



POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di laurea magistrale

SVILUPPO DI UN MODELLO EMPIRICO DI PUNTONE EQUIVALENTE PER L'ANALISI NON LINEARE DI TELAI TAMPONATI

Relatori:

Prof. Fabio Di Trapani

Candidata:

Angela Carmela Ronsivalle

Matricola S221651

Luglio 2020

INDICE

| | |
|--|----|
| INTRODUZIONE | 3 |
| Capitolo 1. Influenza delle tamponature nelle strutture e metodi di modellazione | 5 |
| 1.1 Elementi non strutturali: i tamponamenti in muratura | 5 |
| 1.2 Comportamento dei tamponamenti nel piano: tipologie di danneggiamento | 7 |
| 1.2.1 Fessurazione diagonale | 7 |
| 1.2.2 Scorrimento orizzontale lungo i giunti di malta | 11 |
| 1.2.3 Schiacciamento degli spigoli | 11 |
| 1.3 Comportamento delle strutture tamponate | 13 |
| 1.3.1 Incremento della capacità di dissipazione | 13 |
| 1.3.2 Irregolarità in pianta e in altezza | 15 |
| 1.3.3 Aumento della domanda sismica | 18 |
| 1.4 Modellazione delle tamponature | 21 |
| 1.4.1 Micromodellazione | 22 |
| 1.4.2 Macromodellazione | 23 |
| Capitolo 2. Modellazione in OpenSees dei telai tamponati | 24 |
| 2.1 Introduzione a OpenSees | 24 |
| 2.2 Modellazione attraverso elementi a fibre | 26 |
| 2.3 Materiali utilizzati in OpenSees | 29 |
| 2.3.1 Calcestruzzo | 29 |
| 2.3.2 Acciaio | 34 |
| 2.3.2 Pinching4 | 38 |
| Capitolo 3. Sviluppo del modello empirico | 39 |
| 3.1 Modellazione di un telaio tamponato e proposta di modello ad un puntone equivalente | 39 |
| 3.1.1 Campioni scelti per lo sviluppo del modello | 39 |
| 3.1.2 Determinazione della relazione sforzo-deformazione (forza-spostamento) | 42 |
| 3.1.3 Determinazione dei parametri geometrici del puntone equivalente | 46 |

| | |
|--|----|
| 3.1.4 Sforzi di taglio e di compressione | 48 |
| 3.2 Calibrazione dei parametri sforzo-deformazione dei test sperimentali | 49 |
| 3.2.1 Risultati della calibrazione a confronto con i dati sperimentali e le curve forza- spostamento | 51 |
| 3.2.2 Calcolo dei parametri forza- spostamento ottimali | 54 |
| 3.3 Calibrazione dei parametri sforzo-deformazione dei modelli FE..... | 55 |
| 3.3.1 Risultati della calibrazione a confronto con i dati sperimentali e le curve forza- spostamento | 57 |
| 3.3.2 Calcolo dei parametri forza- spostamento ottimali | 58 |
| 3.4 Definizione delle leggi di correlazione empirica | 59 |
| 3.4.1 Metodo di valutazione dei parametri di correlazione A , B , Z e Y e massimizzazione della funzione obiettivo | 59 |
| 3.4.2 Metodo di valutazione dei parametri sforzo-deformazione α , β , ζ e η per mezzo dei parametri A , B , Z e Y | 61 |
| 3.5 Schema riassuntivo dei vari step di calcolo | 62 |
| Capitolo 4. Validazione del modello tramite Blind Test | 63 |
| 4.1 Selezione dei campioni usati per la validazione..... | 63 |
| 4.2 Risultati della calibrazione a confronto con i dati sperimentali | 67 |
| CONCLUSIONI..... | 69 |
| RINGRAZIAMENTI..... | 70 |
| BIBLIOGRAFIA..... | 72 |
| ALLEGATO A..... | 74 |

INTRODUZIONE

I macromodelli a puntone diagonale equivalente sono largamente utilizzati per modellare l'influenza delle tamperature in strutture intelaiate. Questo è dovuto principalmente alla loro semplicità ed efficacia da un punto di vista computazionale. L'interazione dei telai tamponati con la struttura intelaiata è da molto tempo argomento di ricerca in quanto è evidente l'influenza della muratura sulla resistenza, rigidità e duttilità dell'intera struttura soggetta a carichi sismici. Nonostante la grande quantità di risultati teorici e modelli computazionali semplificati relativi all'argomento, questi non sono comunemente utilizzati nella pratica ingegneristica in quanto molti problemi di interazione tra muratura e telaio possono essere risolti solo con approcci di difficile applicazione e complessi modelli agli elementi finiti (e.s. abbinamento di elementi shell con elementi beam).

Per aggirare la complessa modellazione agli elementi finiti sono stati sviluppati diversi modelli fenomenologici che tendono ad assimilare i tamponamenti in muratura con uno o più puntone equivalenti. I modelli a più puntone sono stati proposti da diversi autori per valutare, oltre all'effetto di irrigidimento e rafforzamento, gli incrementi locali della richiesta di taglio mediante un posizionamento eccentrico di 3 (o 2) elementi a puntone. Questo approccio, nonostante sia semplificato in termini computazionali, presenta delle incertezze nell'assegnazione di specifiche leggi costitutive (monoatomiche o cicliche) e nel posizionamento dei vari puntone al variare delle proprietà geometriche e meccaniche di un telaio tamponato. Per questa ragione il macromodello ad un puntone equivalente è la soluzione più efficiente per svolgere simulazioni sismiche (statica o dinamica) di una struttura e per questo è stato scelto come criterio di modellazione per il presente elaborato.

Il modello ad un puntone equivalente deve superare un processo di identificazione per poter riprodurre adeguatamente il comportamento di un telaio tamponato sotto l'azione di carichi sismici. Molti autori hanno dimostrato che questi approcci di identificazione portano a risultati contrastanti quando si verifica la loro affidabilità mettendoli a confronto con i dati sperimentali; questo è dovuto

al fatto che i meccanismi di rottura che possono presentarsi in una muratura possono essere diversi (fessurazione diagonale, scorrimento orizzontale lungo i giunti di malta e schiacciamento degli spigoli) ed è difficile individuarne uno specifico a priori.

Nel tentativo di superare queste incertezze, nel presente elaborato si propone un approccio empirico per ricavare i parametri, definiti in campo elastico, dei puntoni equivalenti. I puntoni vengono modellati attraverso il software OpenSees come elementi a fibre in sola compressione. Questo modello è governato da quattro parametri sforzo-deformazione: resistenza di picco, sforzo di picco, resistenza ultima e sforzo ultimo.

È stato utilizzato un set di dati ibrido; una parte erano dati sperimentali e altri sono stati ricavati da simulazioni agli elementi finiti (FE). I dati sono stati utilizzati per ricavare quattro leggi di correlazione analitica che legano direttamente le proprietà geometriche e meccaniche dei telai considerati con i parametri sforzo-deformazione dei puntoni equivalenti rappresentanti la muratura. Le equazioni empiriche che vengono determinate consentono di fare una diretta valutazione della legge di sforzo-deformazione della sezione trasversale del puntone equivalente.

Infine sono stati eseguiti dei test di validazione alla cieca con l'ausilio di dati sperimentali diversi da quelli usati per la creazione del set di dati che ha permesso la valutazione delle leggi di correlazione. Da questi test si evince che, considerando, in maniera casuale, dei modelli di telai tamponati e applicando su di essi le leggi di correlazione per la determinazione dei parametri sforzo-deformazione dei puntoni equivalenti, le leggi che ne risultano sono approssimabili a quelle ottenute dalle analisi di laboratorio pertanto i test sono stati considerati superati ed il modello validato.

Capitolo 1. Influenza delle tamponature nelle strutture e metodi di modellazione

1.1 Elementi non strutturali: i tamponamenti in muratura



Figura 1. Esempio di tamponamenti in muratura

Il tamponamento in muratura è l'insieme di diversi elementi in laterizio (mattoni e/o blocchi, forati o meno) collegati tra di loro solitamente con malta, ma non è raro veder utilizzare altre tipologie di leganti (un esempio è rappresentato dai tamponamenti con giunti a colla). Essi vengono sovrapposti gli uni agli altri fino a riempire le varie campate perimetrali della struttura a telaio, con l'obiettivo di creare una separazione tra ambiente interno e ambiente esterno, mentre pannelli in muratura con spessori ridotti vengono utilizzati come divisori per gli ambienti interni.

Alcuni di questi tamponamenti avranno delle aperture che verranno poi riempite con infissi di varia natura. Per migliorare le prestazioni in materia di isolamento termico ed acustico, i tamponamenti in muratura vengono realizzati accoppiando due strati di laterizio separati tra loro da un'intercapedine riempita con materiale isolante o più semplicemente lasciata vuota.

I tamponamenti in muratura appartengono alla categoria di *elementi non strutturali* secondo la definizione fornita dalle Norme Tecniche per le Costruzioni del 2018 (NTC18) [1] al paragrafo § 7.2.3:

“Per elementi costruttivi non strutturali s’intendono quelli con rigidezza, resistenza e massa tali da influenzare in maniera significativa la risposta strutturale e quelli che, pur non influenzando la risposta strutturale, sono ugualmente significativi ai fini della sicurezza e/o dell’incolumità delle persone.” [1]

Come specificato dalla normativa, gli elementi non strutturali non hanno una funzione portante, nel senso che la loro mancanza non pregiudica la stabilità strutturale, tuttavia influenzano in maniera significativa il comportamento dell’organismo strutturale a cui sono associati, ma soprattutto possono causare danni alle persone in caso di sisma qualora non fossero ben progettati; anche gli elementi non strutturali necessitano di una progettazione accurata che spesso viene trascurata.

Nell’ambito dell’edilizia residenziale le tamponature vengono solitamente realizzate in laterizio non armato, al contrario nel campo delle strutture a destinazione d’uso industriale, date le maggiori dimensioni e le diverse esigenze, sempre più spesso si utilizza la tipologia di tamponamento in muratura armata, caratterizzata semplicemente dalla presenza di tralicci di armatura posti in corrispondenza dei letti di malata.

In base a questa descrizione si capisce che il tamponamento non è stato pensato come un elemento in grado di assolvere ad una funzione portante, per questo motivo vengono spesso trascurati in fase di progettazione, in cui si predilige il dimensionamento degli elementi portanti del telaio (travi, pilastri, solai, setti, ecc.) tuttavia, come verrà mostrato in questo elaborato, la loro presenza influisce significativamente sul comportamento dell’intera struttura.

1.2 Comportamento dei tamponamenti nel piano: tipologie di danneggiamento

I pannelli in muratura, come abbiamo visto, sono inseriti all'interno delle strutture intelaiate e vedremo la loro interazione successivamente, ma è bene evidenziare che sotto l'effetto di azioni sismiche le due componenti di una struttura intelaiata (telaio in c.a. e muratura) hanno dei comportamenti totalmente diversi, in particolare la struttura intelaiata in C.A ha la capacità di resistere a delle deformazioni grazie alla sua flessibilità invece la muratura ha un comportamento di tipo fragile quindi, sotto l'azione sismica, si danneggerà prima del telaio ed in maniera più consistente.

Adesso andremo ad approfondire i meccanismi di rottura dei pannelli di muratura nel piano che sono sostanzialmente tre:

- Fessurazione diagonale
- Scorrimento orizzontale lungo i giunti di malta
- Schiacciamento degli spigoli

1.2.1 Fessurazione diagonale

La fessurazione diagonale è probabilmente la tipologia di danneggiamento della muratura più comune. Essa è associata alle tensioni di trazione che nascono a causa dello stato di sollecitazione di taglio puro che caratterizza l'elemento di muratura posto al centro del tamponamento. Consideriamo il tamponamento in figura

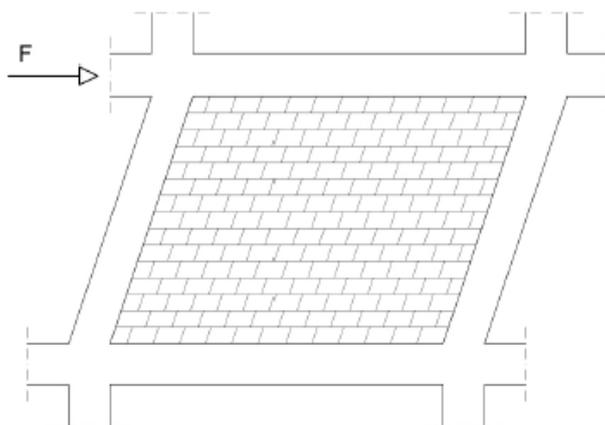


Figura 2. Tamponamento soggetto all'azione di una forza orizzontale

La forza F applicata in testa e agente nel piano del tamponamento induce all'interno del tamponamento uno stato di sollecitazione di taglio puro, ovvero l'elementino di muratura che si trova al centro del pannello è caratterizzato dalla presenza di sole tensioni tangenziali τ (le tensioni normali σ non sono del tutto assenti, ma per il momento le consideriamo trascurabili).

Proviamo ora a definire le direzioni principali di questo elemento bidimensionale caratterizzato da uno stato piano di sollecitazione. Per farlo possiamo utilizzare la teoria dei cerchi di Mohr, quindi con riferimento alla figura:

- individuiamo i punti A e B che descrivono gli stati tensionali caratterizzanti le facce dell'elemento (con la convenzione che prevede tensioni tangenziali τ positive se associate ad una rotazione oraria);
- individuiamo il centro C del cerchio di Mohr sull'asse delle σ , punto definito dall'intersezione tra il segmento che congiunge i punti A e B e l'asse delle ascisse del sistema di riferimento σ - τ ;
- tracciamo per A e per B due rette ortogonali alle facce lungo le quali agiscono le tensioni individuate dai suddetti punti (retta verticale passante per A e retta orizzontale passante per B) e dall'intersezione di queste rette individuiamo il polo P;
- congiungiamo il polo P con i due punti di intersezione tra il cerchio di Mohr e l'asse delle ascisse e individuiamo così le due direzioni principali e le tensioni normali σ ad esse associate.

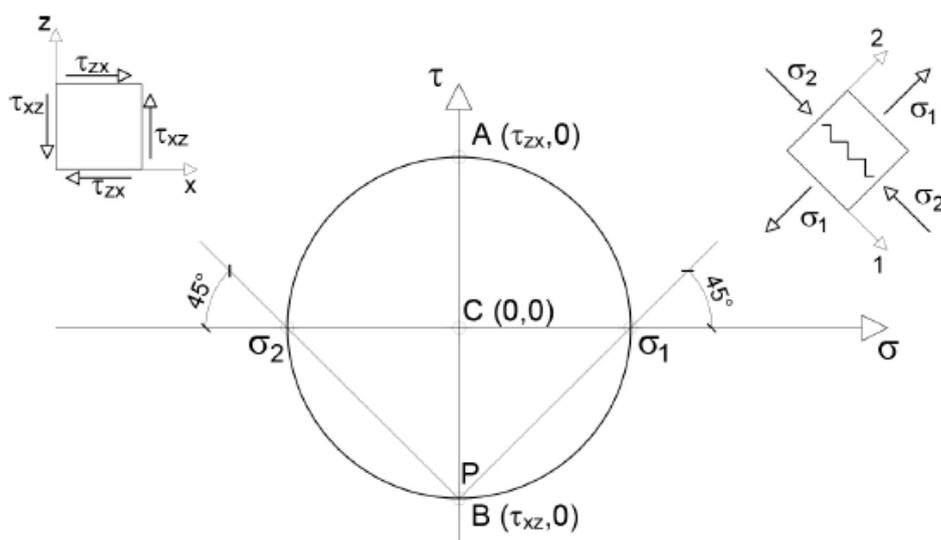


Figura 3. Definizione delle direzioni principali dell'elemento di muratura posto al centro del pannello e soggetto ad uno stato tensionale di taglio puro

Così facendo si scopre che le direzioni principali sono inclinate di 45° rispetto all'orizzontale e che le tensioni sono in un caso di compressione σ_1 e nell'altro di trazione σ_2 . Le tensioni di trazione σ_2 sono proprio le responsabili della fessurazione diagonale del pannello murario.

Generalmente la fessurazione diagonale si sviluppa seguendo il percorso descritto dai giunti di malta (vedi figura). Questo succede perché la resistenza a trazione della malta è praticamente nulla, pertanto appena queste tensioni superano il limite di resistenza si ottiene come risultato lo scollamento dei mattoni di muratura e la formazione di questa fessura diagonale inclinata di 45° rispetto all'orizzontale.

Nel caso in cui il tamponamento fosse caratterizzato da una apertura, la fessurazione diagonale partirebbe dai vertici dell'apertura stessa, in quanto essi fungono da concentratori degli sforzi (vedi figura). Generalmente non si ha mai solo una fessurazione diagonale, ma se ne hanno quasi sempre due incrociate a formare una Croce di S. Andrea (Figura 5).

Questo succede perché un sisma non agisce mai secondo una sola direzione, ma essa si modifica continuamente per tutta la durata dell'evento sismico. Pertanto l'azione orizzontale, che noi abbiamo simulato mediante la forza F , potrebbe agire anche nella direzione opposta, determinando una rotazione di 90° delle direzioni principali, ovvero determinando sforzi di trazione nella direzione lungo la quale prima avevamo compressione e viceversa.

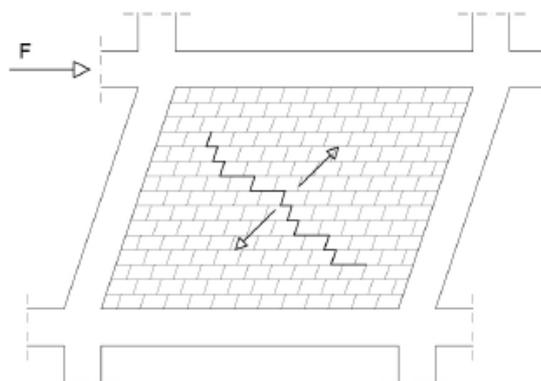


Figura 4. Schema della fessurazione diagonale



Figura 5. Esempi di fessurazione diagonale

1.2.2 Scorrimento orizzontale lungo i giunti di malta

Un'altra tipologia di danneggiamento della muratura di tamponamento è la rottura per scorrimento orizzontale lungo i giunti di malta. In questo caso le tensioni tangenziali che caratterizzano l'elemento in muratura posto al centro del pannello (sono le stesse tensioni τ descritte prima) sono tali da superare la resistenza a taglio della malta, provocando lo scorrimento dei laterizi lungo i giunti di collegamento. Si tratta di un meccanismo di danneggiamento molto frequente e, come il precedente, ben visibile ad occhio nudo (Figura 6).

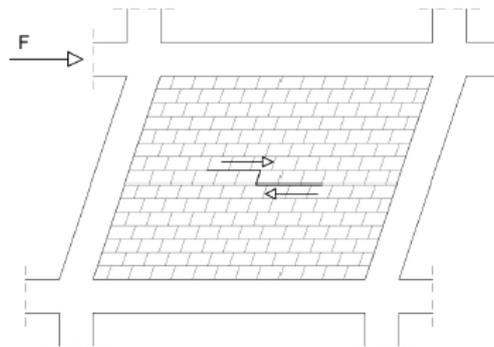


Figura 6. Schema dello scorrimento orizzontale

1.2.3 Schiacciamento degli spigoli

Si faccia riferimento alla figura.

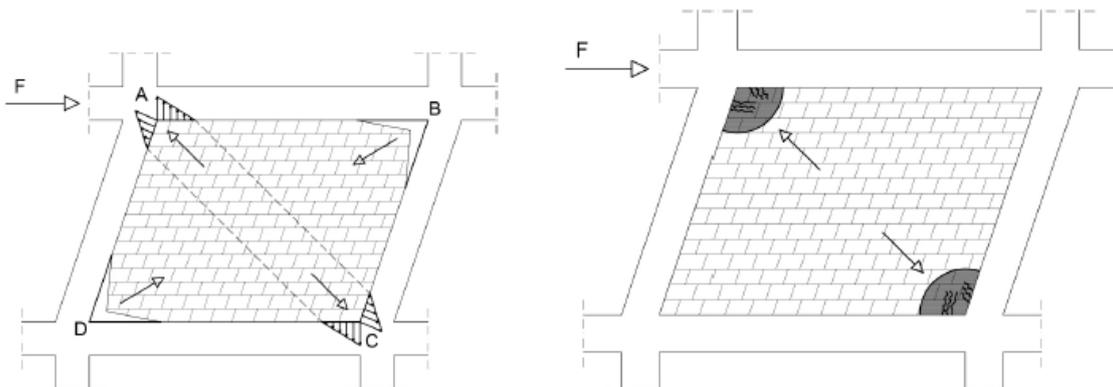


Figura 7. Schema dello schiacciamento degli spigoli

Quando il telaio tamponato viene caricato nel piano, esso dà luogo ad una deformazione a taglio, ovvero lungo una diagonale (quella che collega i punti A e C) leggeremo un accorciamento, quindi

la muratura applicherà sul telaio delle forze di compressione, mentre lungo la diagonale che congiunge i punti B e D leggeremo un allungamento, quindi lungo questa diagonale la muratura dovrebbe applicare sul telaio degli sforzi di trazione. Data l'assenza di resistenza a trazione della muratura, questi sforzi non vengono trasmessi e in corrispondenza degli spigoli B e D avremo un distacco della muratura dal telaio di confinamento. L'azione di compressione che si ha lungo la direzione AC può essere ben simulata da un puntone diagonale che collega i due vertici, da qui il nome di modello a puntone equivalente. In corrispondenza di questi spigoli A e C gli sforzi di compressione potrebbero superare la resistenza a compressione della muratura portando al danneggiamento locale e quindi alla formazione di fessurazioni concentrate in questa zona (Figura 7).

In figura si ha un esempio reale di quel che succede ad un tamponamento in muratura che subisce un danneggiamento di questo tipo



Figura 8. Esempio dello schiacciamento degli spigoli [2]

Dalla foto si vede bene come lo schiacciamento degli spigoli sia accompagnato da una fessurazione diagonale, questo vuol dire che i meccanismi di danneggiamento che abbiamo descritto non si verificano mai da soli, ma sussiste sempre una contemporanea presenza di tutti e tre. Ciò che cambia è l'incidenza che questi possono avere sul tamponamento in questione.

1.3 Comportamento delle strutture tamponate

Come espresso nei paragrafi precedenti le tamponature esterne non vengono considerate come elemento strutturale né tanto meno come elementi sismo-resistenti, nonostante ciò la loro presenza comporta un notevole aumento della rigidità laterale dell'intera struttura quindi non si può trascurare la loro presenza in fase di progettazione né in quella di verifica.

La differenza sostanziale di progetto tra un telaio nudo e uno tamponato è che nel primo si considera la formazione di cerniere plastiche in corrispondenza dei nodi sotto l'effetto di carichi laterali; nel secondo modello invece nasce un meccanismo di puntone nel pannello assimilabile ad un controvento. Tale meccanismo, che dipende dalle caratteristiche geometriche e meccaniche dell'elemento, può comportare effetti positivi sfavorendo il collasso della struttura, e negativi qualora incombesse una riduzione della resistenza nel piano e/o fuori dal piano, il comportamento strutturale verrebbe compromesso.

1.3.1 Incremento della capacità di dissipazione

La struttura viene sottoposta ad una serie di azioni orizzontali ricavate da fenomeni sismici e la risposta varia se si considera il telaio nudo oppure tamponato.

Tenendo conto del solo telaio senza tamponature, se questo è stato progettato secondo la cosiddetta gerarchia delle resistenze, o *Capacity Design*, in presenza di sisma, viene assicurato il collasso della struttura per effetto di meccanismi di frattura duttili e non fragili; si fa in modo che il collasso avvenga con preferenza nelle travi, seguite dai pilastri e, infine, nei nodi trave-pilastro.

In senso più ampio, la duttilità della struttura è voluta nell'ottica di realizzare strutture capaci di dissipare grandi quantità di energia prodotte dal terremoto; una struttura così concepita avrà maggiore capacità in spostamento ed elementi strutturali di dimensione ridotta (rispetto a quanto si avrebbe cercando di conferire ad essa quanta più resistenza possibile), con ovvie conseguenze economiche.

Infine, ad una minore resistenza, e rigidezza, globale sono associate caratteristiche di sollecitazione inferiori.

Considerando invece l'intero edificio tamponato, la modellazione dei muri esterni instaura un meccanismo a puntone simile ad un controvento e tale elemento tende ad assorbire parte dell'azione sismica che viene applicata alla struttura, dissipando così un'aliquota dell'energia. Il tamponamento tenderà ad assorbire carico fino al raggiungimento della fessurazione, dunque è possibile considerare i pannelli elementi sacrificali, una sorta di prima linea di difesa della struttura.

Tale risposta sismica varia anche in base alla geometria dell'edificio, (Figura 9) ovvero, un edificio tozzo ($h/l < 2$) sarà più rigido nella direzione del sisma, mentre un edificio snello ($h/l > 2$) tenderà ad avere un comportamento più flessibile.

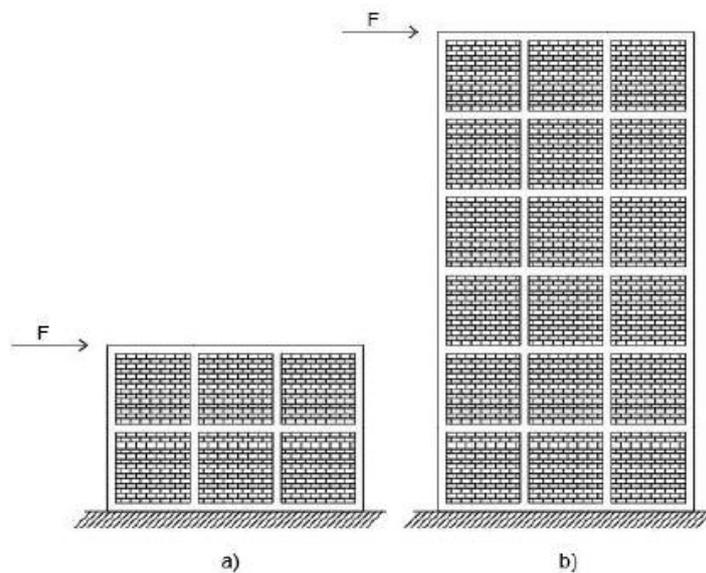


Figura 9. a) edificio tozzo; b) edificio snello

1.3.2 Irregolarità in pianta e in altezza

Come suggeriscono le Norme Tecniche delle Costruzioni 2018 [1], l'edificio deve essere, per quanto possibile, caratterizzato da regolarità in pianta e regolarità in altezza. Il rispetto di tale requisito muterà notevolmente la risposta dell'edificio sottoposto ad azione sismica.

La regolarità in pianta è assicurata se sono rispettati i seguenti requisiti:

- Simmetria di masse e rigidezze rispetto alle due direzioni ortogonali;
- Inscrivendo la struttura in un rettangolo, il rapporto tra i lati di quest'ultimo è inferiore a 4;
- La dimensione di eventuali rientri o sporgenze non superiore al 25% della dimensione totale dell'edificio nella relativa direzione;
- Solai infinitamente rigidi nel loro piano rispetto agli elementi verticali.

Nel momento in cui le tamponature non sono disposte in maniera regolare in pianta possono instaurarsi dei meccanismi torsionali che compromettono il comportamento strutturale dell'intero edificio (Figura 10).

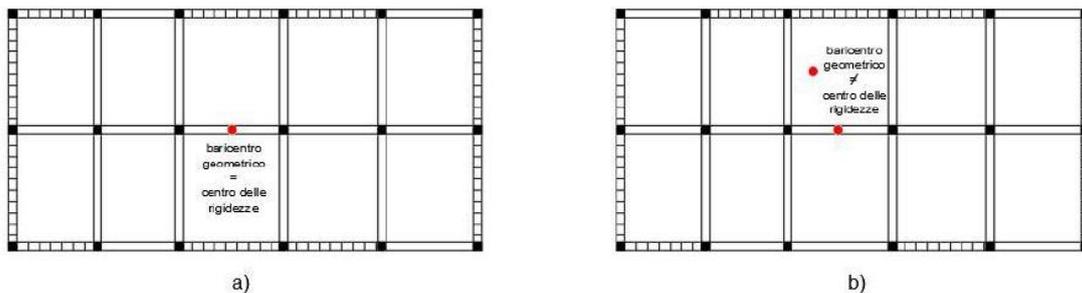


Figura 10. a) edificio regolare in pianta; b) edificio non regolare in pianta

La regolarità in altezza richiede i seguenti requisiti:

- Estensione in altezza di tutti i sistemi resistenti alle azioni orizzontali;

- Le variazioni di massa e rigidezza tra due impalcati consecutivi devono essere nulle oppure devono variare gradualmente, non più del 25% per la massa, mentre per la rigidezza non si deve ridurre più del 30 % da un orizzontamento a quello sovrastante e non aumenta più del 10%;
- La resistenza, dunque il rapporto tra capacità e domanda, di un orizzontamento può essere scritto come la media di tutti i coefficienti di sicurezza degli elementi resistenti verticali, ovvero il valor medio dei rapporti fra la sollecitazione allo SLV e la resistenza dell'elemento;
- Il restringimento della sezione orizzontale tra un impalcato e il successivo deve avvenire in maniera continuativa, oppure deve essere in modo che il rientro di un orizzontamento non superi il 10% della dimensione corrispondente all'orizzontamento sottostante, né il 30% della dimensione corrispondente al primo orizzontamento.

Come per la regolarità in pianta, se l'edificio non rispetta i requisiti per assicurare la regolarità in altezza, il suo comportamento strutturale sotto azioni sismiche sarà compromesso.

In particolare la non regolarità in altezza comporta un decremento del 20% del fattore di comportamento q_{lim} utilizzato per il calcolo della domanda sismica allo SLV:

$$q_{lim} = q_0 \cdot K_R \quad (1.1)$$

dove:

- q_0 è il valore di base del fattore di comportamento allo SLV, i cui massimi valori sono riportati in tabella 7.3.II. delle NTC2018 [1];
- K_R è un fattore che dipende dalle caratteristiche di regolarità in altezza della costruzione, con valori 1 per le costruzioni regolari in altezza e 0,8 per costruzioni non regolari in altezza.

Inoltre, il meccanismo che può instaurarsi è quello del piano soffice, anche detto *soft story*, ovvero un piano non tamponato con una resistenza sotto l'azione orizzontale del sisma nettamente inferiore rispetto ai piani tamponati (Figura 11).

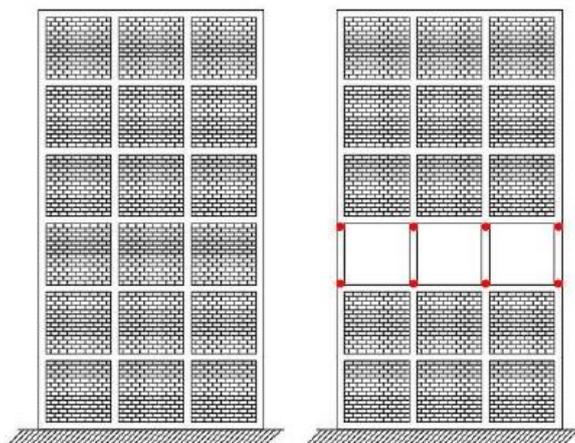


Figura 11. Differenza tra telaio senza piani soffici e telai con piani soffici

1.3.3 Aumento della domanda sismica

L'inserimento delle tamponature sul telaio nudo può causare l'aumento di rigidità dell'intera costruzione e la conseguente diminuzione del periodo della struttura ricavato mediante analisi modale.

L'analisi modale è uno strumento fondamentale per la comprensione del comportamento dinamico di una struttura e fornisce indicazioni molto utili riguardo la risposta, in campo elastico, della stessa ad un carico dinamico, ad esempio un sisma.

Per un sistema a più gradi di libertà (MDOF) l'equazione del moto scritto in forma matriciale è:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} \quad (1.2)$$

dove:

- $[M]$ = matrice delle masse;
- $[C]$ = matrice di smorzamento;
- $[K]$ = matrice di rigidità

Nel caso di forzante sismica risulta

$$\{F(t)\} = [M]\{\ddot{u}_g\} \quad (1.3)$$

Si può applicare una trasformazione di coordinate in un sistema di coordinate modali:

$$u(s, t) = \Phi(spazio) \cdot q(tempo) \quad (1.4)$$

In particolare, Φ rappresenta i modi di vibrare della struttura, mentre la coordinata modale q rappresenta il peso di ciascun modo di vibrare rispetto al comportamento reale della struttura.

L'equazione del moto diventa, quindi:

$$\{\Phi\}^T[M]\{\ddot{q}\} + \{\Phi\}^T[C]\{\dot{q}\} + \{\Phi\}^T[K]\{q\} = -[M]\{i\} \ddot{u}_g \quad (1.5)$$

Si ottiene che la risoluzione dell'equazioni del moto passa per le soluzioni dell'equazione:

$$\det([K] - \lambda[M]) = 0$$

I coefficienti λ rappresentano i quadrati delle frequenze angolari associate a ciascun modo di vibrare ω . Dalla frequenza angolare si ottiene il periodo di vibrare di ciascun modo:

$$T = \sqrt{\frac{2\pi}{\omega}} \quad (1.6)$$

La conoscenza del periodo della costruzione è fondamentale per la determinazione dell'accelerazione spettrale, ovvero la domanda sismica; l'aumentare della rigidezza globale si traduce in diminuzione del periodo della struttura e, per la maggior parte dei casi, conseguente aumento della domanda sismica; considerando una struttura nuda e una struttura tamponata, si possono verificare due situazioni.

Il caso in cui:

$$Sa(T2) > Sa(T1)$$

dove:

- $T1$ è il periodo della struttura nuda;
- $T2$ è il periodo della struttura tamponata;
- $Sa(T1)$ è l'accelerazione spettrale associata al periodo $T1$;
- $Sa(T2)$ è l'accelerazione spettrale associata al periodo $T2$.

E' il caso più comune e viene rappresentato graficamente ponendo i due periodi sulle ascisse dello stesso spettro di risposta.

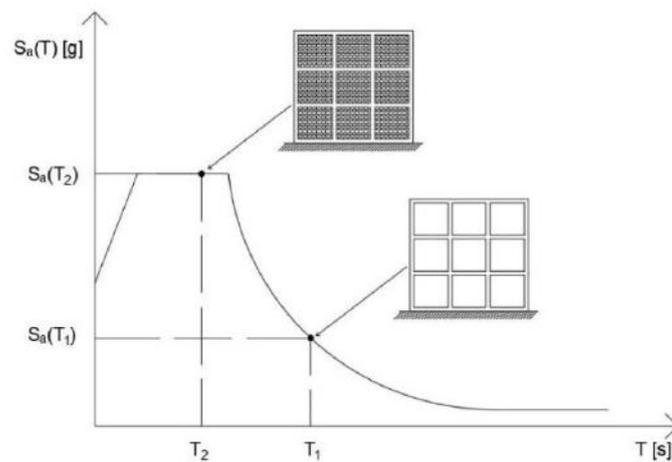


Figura 12. Diminuzione del periodo della struttura con conseguente aumento dell'accelerazione spettrale

La situazione in Figura 11, in cui il periodo della struttura cade nel plateau è la peggiore configurazione che può accadere e costringe a progettare con un taglio alla base molto elevato.

D'altra parte, può esserci il caso in cui:

$$Sa(T_2) < Sa(T_1)$$

Overo un aumento di rigidezza, con conseguente diminuzione del periodo può provocare una diminuzione dell'accelerazione spettrale; tale situazione, mostrata anche in Figura 12, è poco frequente poiché è raro trovare edifici con periodi così bassi.

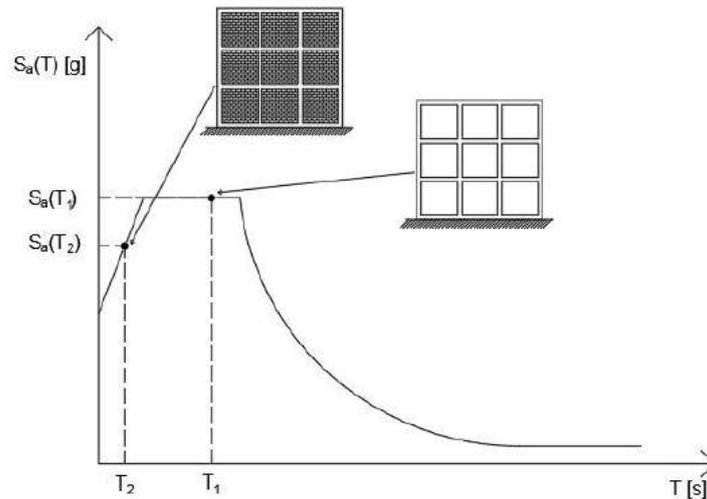


Figura 13. Diminuzione del periodo della struttura con conseguente diminuzione dell'accelerazione spettrale

1.4 Modellazione delle tamponature

Dopo una serie di significativi eventi sismici si è iniziato a notare che la presenza delle tamponature non poteva essere totalmente trascurata nello studio del comportamento della struttura sotto l'azione sismica, quindi la ricerca ha iniziato a focalizzarsi sullo studio di interazione tra telaio e pannelli di muratura.

Nel corso degli anni sono stati numerosi i tentativi [3] di creare un modello equivalente che potesse meglio simulare il comportamento delle tamponature sotto l'azione del sisma nel piano e fuori dal piano. Prendendo in considerazione l'influenza di un singolo tamponamento, i parametri da dover considerare sono principalmente le proprietà geometriche e meccaniche del pannello stesso, con conseguente aumento di resistenza, aumento delle caratteristiche di sollecitazione e diminuzione dello spostamento laterale.

Ma, se si considera un intero edificio multipiano tamponato, oltre al rapporto tra spessore ed altezza della muratura si deve tener conto dell'altezza della costruzione e della quota del pannello sul telaio, dunque i parametri e le interazioni da dover prevedere aumentano [4].

Esistono vari approcci di modellazione, il micromodello FE e il macromodello semplificato di uno o più puntoni equivalenti, i quali vengono usati a seconda del tipo di informazione che si vuole ottenere [5].

1.4.1 Micromodellazione

In questa tipologia di modellazione si è cercato di rappresentare il pannello in muratura in maniera molto dettagliata in modo da poter rappresentare al meglio la sua interazione con la struttura [6], [7], [8]. Il campione è rappresentato mediante modellazione agli elementi finiti, dove il pannello viene simulato per mezzo di un guscio piano, e il telaio per mezzo di elementi *beam* o *shell* (Figura 13). Alla parete è assegnata una *mesh*, ovvero una suddivisione della parete in più elementi di tipo *shell*, ognuno analizzato dal software di calcolo come elemento guscio. Tanto più risulta fitta la *mesh*, tanto più accurati saranno i risultati e tanto più elevato è l'onere di calcolo.

La difficoltà sorge nel dover modellare i nodi tra le due parti, i quali sono simulati mediante degli elementi di collegamento che riproducono l'interazione tra telaio e muratura

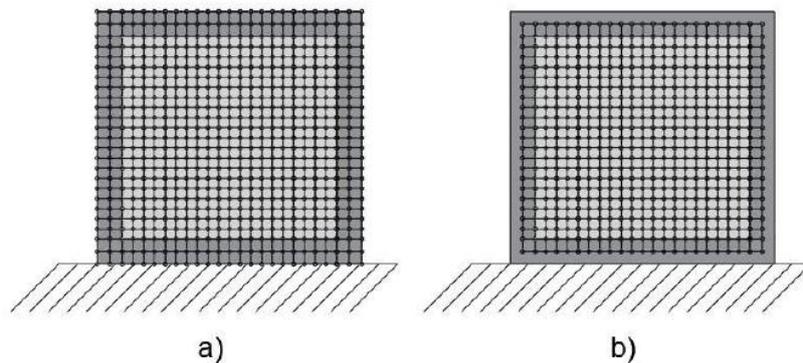


Figura 14. a) Modello FE con elementi shell; b) Modello FE con elementi shell e beam

Tale tipologia di modellazione è quella che si avvicina maggiormente alla realtà, ma, soprattutto nei casi di analisi non lineare, risulta anche di difficile determinazione. La calibrazione del modello richiede una gran quantità di parametri e un'ottima capacità nel maneggiare il tipo di modellazione; l'onere di calcolo è eccessivo per completare un'analisi su edifici complessi, per questo motivo la micromodellazione viene usata per semplici casi studio.

1.4.2 Macromodellazione

Questa tipologia di modellazione, invece, prevede la sostituzione della struttura reale con una o più strutture equivalenti (Figura 14) aventi caratteristiche specifiche e risulta essere un metodo semplificato, maggiormente immediato e dunque più adatto alla valutazione sismica di telai tamponati.

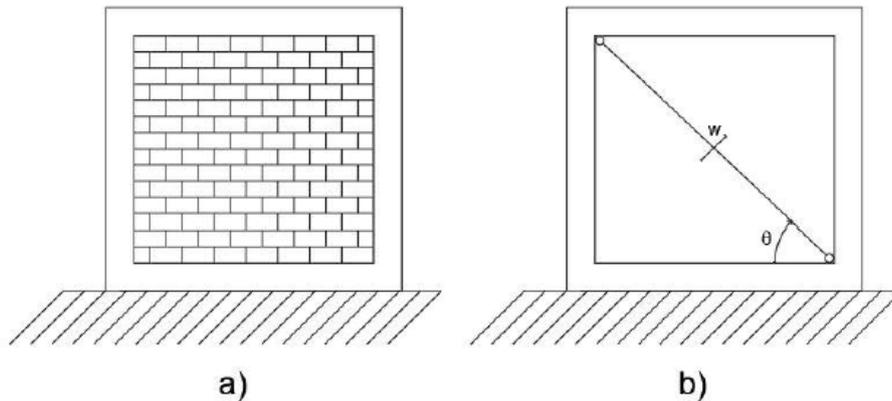


Figura 15. a) struttura reale; b) struttura equivalente

La struttura equivalente, mediante proprietà geometriche e meccaniche, simula la resistenza, la rigidità e l'eventuale danneggiamento della struttura reale prendendo in considerazione:

- La rigidità iniziale del materiale di cui è costituito il pannello;
- La massima resistenza del materiale di cui è costituito il pannello;
- La forma del legame costitutivo del materiale di cui è costituito il pannello.

Esistono altri macromodelli con un numero di bielle equivalenti maggiore, quindi più vicini a cogliere l'interazione tra il telaio e la muratura, ma nel presente elaborato è stato scelto di utilizzare questa tipologia di modellazione in quanto sufficientemente rappresentativa e funzionale per lo svolgimento del lavoro.

Capitolo 2. Modellazione in OpenSees dei telai tamponati

Per lo sviluppo dello studio che viene proposto in questo elaborato sono stati considerati una serie di modelli di telai tamponati con diverse proprietà geometriche e meccaniche ed in questo capitolo verrà mostrata la proposta di modellazione del comportamento di questi sotto l'effetto di una forza orizzontale

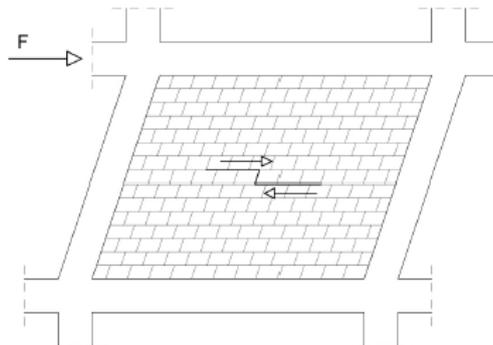


Figura 16. Schema di carico dei modelli

È stata eseguita un'analisi non lineare mediante l'ausilio del software di calcolo *OpenSees*, che ha permesso di eseguire una modellazione a fibre degli elementi strutturali e questo ha portato a determinare una proposta di modellazione che ha restituito risultati validi.

2.1 Introduzione a OpenSees

La modellazione è stata realizzata mediante l'utilizzo del software framework "Open System for Earthquake Engineering Simulation" (OpenSees) [9] sviluppato dalla "Pacific Earthquake Engineering Research Center" (PEER) con l'obiettivo di creare una piattaforma computazionale di ricerca nell'ambito dell'ingegneria sismica.

Per questo software non è disponibile un'interfaccia grafica, rendendo OpenSees più orientato ad un utilizzo per la ricerca che per la pratica professionale.

OpenSees presenta però numerosi vantaggi. Esso è infatti un software di tipo open-source e quindi fruibile liberamente da chiunque, nel lavoro si è utilizzata la versione 3.0.3 a 32 bit. Inoltre OpenSees

vanta una notevole versatilità in quanto è possibile, oltre al normale utilizzo in modalità “User”, aggiungere autonomamente nuove funzionalità mediante la compilazione di codice prodotto da ogni singolo utente. Nella modalità User sono disponibili numerose tipologie di elementi e materiali utilizzabili per un’efficace modellazione strutturale. Sono inoltre presenti numerosi algoritmi per la realizzazione di analisi strutturali sia di tipo statico che dinamico.

Il funzionamento del software si basa sulla compilazione di codici scritti nel linguaggio di programmazione Tcl (Tool Command Language). Mediante opportuni comandi disponibili in questo linguaggio di programmazione è possibile definire la geometria del modello che si intende analizzare, dichiarare i materiali di ogni singolo elemento, assegnare le caratteristiche meccaniche di ogni materiale assegnare i carichi ed eseguire le analisi. È possibile infatti dare tutte le istruzioni per eseguire come detto analisi sia di tipo statico che dinamico.

È inoltre possibile richiamare all’interno di un file Tcl altri file dello stesso tipo in cui sono presenti altri dati utili per le analisi. È dunque possibile scrivere algoritmi principali capaci al loro interno di richiamarne di secondari. Per questo motivo in genere si procede scrivendo un algoritmo principale in cui sono inserite le istruzioni per eseguire le analisi che richiama un algoritmo secondario all’interno del quale si assegnano le caratteristiche necessarie per la definizione del modello. In questo secondo file risulta indispensabile la definizione di:

- Numero di dimensioni e di gradi di libertà;
- Nodi;
- Masse;
- Materiali;
- Sezioni;
- Elementi;
- Trasformazioni geometriche;
- Carichi.

2.2 Modellazione attraverso elementi a fibre

Il software di calcolo strutturale *OpenSees* (*Open System for Earthquake Engineering*) permette di eseguire una modellazione a fibre delle sezioni degli elementi strutturali. Ciò risulta essere conveniente poiché permette di condurre analisi di tipo non lineare su tali elementi, in quanto dà la possibilità di attribuire ad ogni fibra legami costitutivi dei materiali costituenti che non presentano comportamento puramente elastico. Risulta quindi che ogni fibra costituente l'elemento presenta un comportamento di tipo monoassiale (Figura 17).

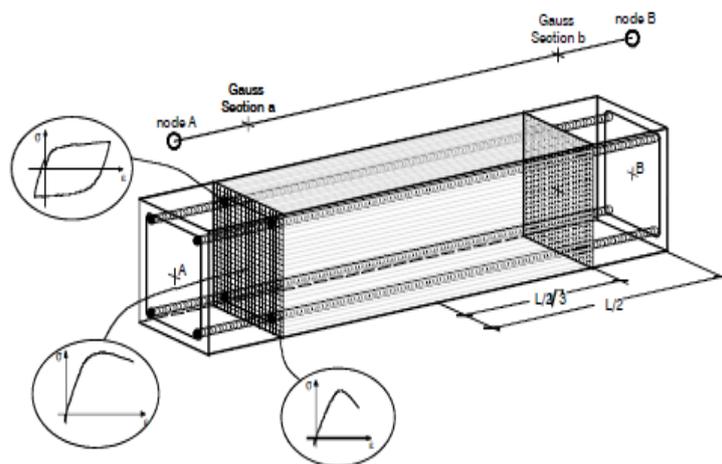


Figura 17. Modellazione a fibre di una sezione in calcestruzzo armato

Prendendo in considerazione una sezione in calcestruzzo armato, risulta necessario eseguire una modellazione utilizzando le fibre sia l'area di calcestruzzo sia l'area di armatura. In particolare il calcestruzzo presenta un comportamento differente a seconda che esso sia confinato o meno. Per questo motivo al calcestruzzo confinato all'interno delle staffe è possibile attribuire una legge costitutiva differente rispetto a quello esterno alle staffe.

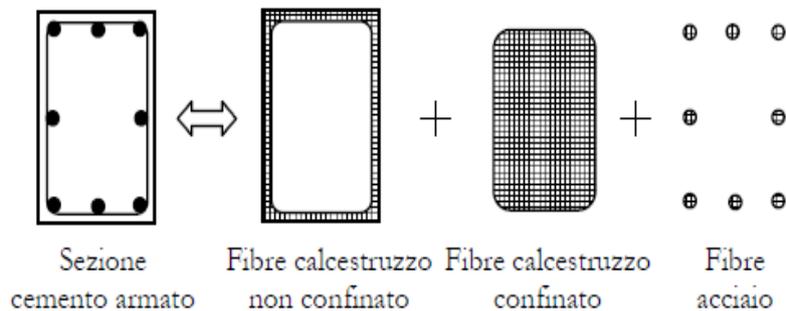


Figura 18. Modellazione a fibre di una sezione in calcestruzzo armato

Come si può meglio osservare in Figura 18 , la sezione finale si ottiene sovrapponendo le 3 aree diversamente modellate.

L'elemento strutturale così creato viene in seguito suddiviso in una serie di sezioni di controllo, i quali rappresentano i punti di integrazione di Gauss-Lobatto lungo l'elemento stesso.

Per gli elementi a fibre si utilizza il concetto di plasticità distribuita. Esso si differenzia dalla plasticità concentrata, in quanto prevede di distribuire la plasticità sull'intero elemento, piuttosto che considerarla concentrata nelle cerniere plastiche (Figura 19).

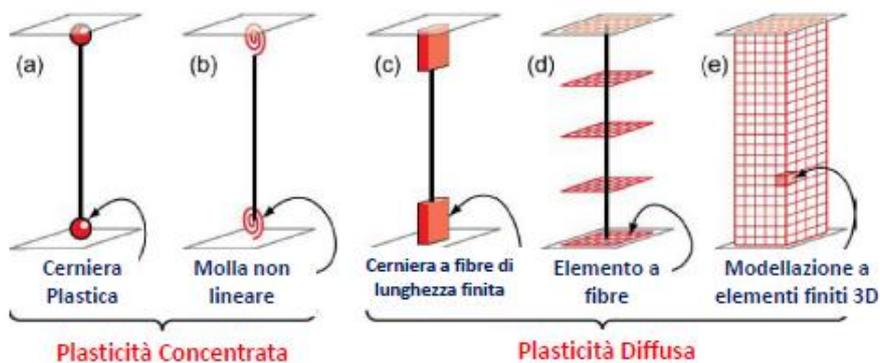


Figura 19. Concetto di plasticità concentrata e plasticità distribuita

Come è noto infatti, nel campo della plasticità concentrata, gli elementi costituenti la struttura rimangono in campo elastico, prevedendo quindi dei punti precisi di formazione delle cerniere plastiche, in cui viene concentrata tutta la non linearità del problema. Questo risulta non del tutto in linea con il comportamento reale delle strutture, specialmente per la difficoltà di un'individuazione precisa della posizione della cerniera plastica. Per contro, questo metodo permette di avere un

vantaggio dal punto di vista computazionale, arrivando ad avere elementi strutturali facilmente gestibili.

Per quanto riguarda invece la modellazione a fibre, la plasticità risulta diffusa lungo tutto l'elemento. In questo modo non è necessaria la determinazione del punto di formazione della cerniera plastica e il calcolo del momento di plasticizzazione. Tuttavia, questo modo richiede un maggior onere computazionale, a fronte però di un comportamento più realistico dell'elemento.

Gli elementi a fibre risultano essere essenzialmente di due tipi:

- *Force Based Elements* (FBE)
- *Displacement Based Elements* (DBE)

Per gli elementi *Displacement Based* viene seguito il classico approccio degli elementi finiti, in cui la deformazione dell'elemento viene interpolata a partire dall'approssimazione del campo degli spostamenti. In seguito viene utilizzato il principio dei lavori virtuali per ricavarne le forze nodali.

Per interpolare il campo di deformazioni, si sceglie di adottare per il campo degli spostamenti $u(x)$ funzioni di forma con andamento lineare e per $v(x)$ con andamento quadratico. Si ottengono così una deformazione assiale costante ed una curvatura lineare. A causa dell'approssimazione scelta, risulta quindi necessario adottare una discretizzazione sufficientemente raffinata per poter cogliere in modo adeguato il campo di deformazione.

Per gli elementi *Forced Based* invece non è richiesta una discretizzazione fitta, in quanto l'approssimazione risulterà essere adeguata grazie all'utilizzo di sezioni di controllo definite dai punti di integrazione.

La risposta degli elementi cambia in modo significativo a seconda che venga utilizzato un tipo di elemento piuttosto che l'altro, ma si ottiene comunque un buon comportamento se la mesh viene gestita in modo adeguato.

2.3 Materiali utilizzati in OpenSees

I materiali da costruzione sono caratterizzati da un legame tensionale σ - ε fortemente non lineare il quale conferisce una non linearità meccanica alla struttura. La presenza di questo comportamento elasto-plastico nel materiale rende inadeguata la teoria lineare per la valutazione dello stato limite ultimo. L'accoppiamento dell'acciaio e del calcestruzzo, materiali costitutivi del cemento armato, crea un legame costitutivo non lineare in cui, superata la tensione di snervamento, nascono plasticizzazioni che rendono non lineare il rapporto tra carico applicato e deformazione. Affiancando al comportamento fragile del calcestruzzo il comportamento duttile dell'acciaio, l'effetto non è la rottura catastrofica una volta superato lo snervamento, ma è la generazione di una deformazione plastica permanente che può portare ad una nuova configurazione di equilibrio. Questo è possibile sotto l'ipotesi di perfetta aderenza tra calcestruzzo e barre di acciaio che assicura la piena collaborazione tra i due materiali.

In questa sezione si descrivono le caratteristiche principali dei legami costitutivi scelti per modellare al meglio il comportamento dei due materiali.

2.3.1 Calcestruzzo

Il calcestruzzo è un materiale composto da cemento e inerti, fortemente non omogeneo e che determina un comportamento non lineare anche per la sollecitazione di compressione pura. Si instaurano, infatti, all'interfaccia tra pasta cementizia e aggregati, delle concentrazioni di sollecitazione che portano a fenomeni di microfessurazione interna.

Per questa modellazione si utilizza il legame proposto da Kent e Park (1971), modificato da Park et al. (1982), in base al quale la curva nel piano sforzo-deformazione si è ottenuta con una prova monoassiale di compressione. Questo modello è implementato su *OpenSees* con il comando *Concrete02* della libreria *uniaxialMaterial* (Figura 20)

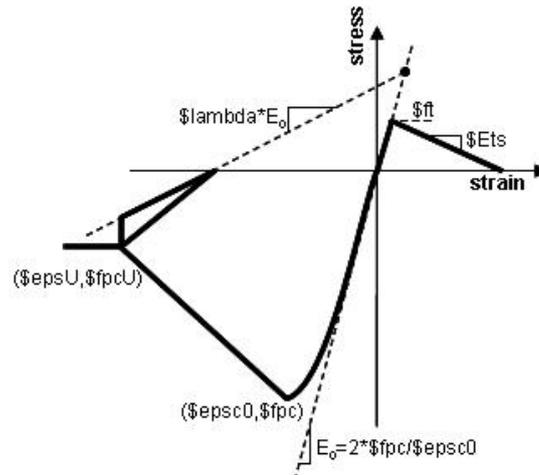


Figura 20. Legame costitutivo del calcestruzzo implementato dal comando Concrete02 di OpenSees

Il ramo crescente di compressione è rappresentato da una parabola limitata da una deformazione del 2‰ la quale non è influenzata dell'entità di armatura trasversale. La necessità di ricorrere alla modifica operata da Park et al., 1982 consente di prendere in considerazione l'incremento di duttilità dovuto alla presenza di rinforzi trasversali, il quale modifica il comportamento del ramo decrescente (Figura 21).

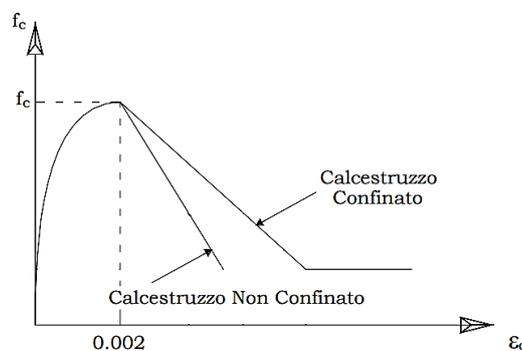


Figura 21. Legame costitutivo del calcestruzzo proposto da (Park et al.,1982)

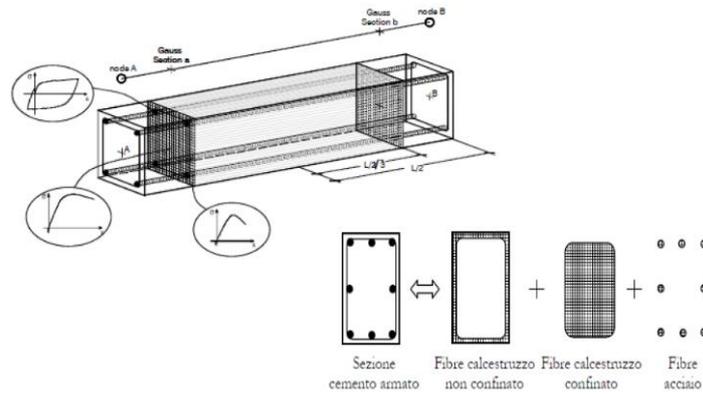


Figura 22. Modellazione tramite fibre

Con una modellazione a fibre è possibile associare alle varie fibre di cui è composta la sezione diversi materiali (Figura 22). In questo modo il confinamento della sezione, per mezzo della presenza di staffe, è reso possibile definendo un materiale che ha come parametri di resistenza quelli calcolati, mediante implementazione su *Excel*, del modello di Saatcioglu e Razvi (1999). Il calcestruzzo confinato dal rinforzo trasversale è sottoposto ad una pressione laterale che si sviluppa in seguito alla compressione assiale, creando uno stato di stress multiassiale di difficile formulazione teorica (Figura 23).

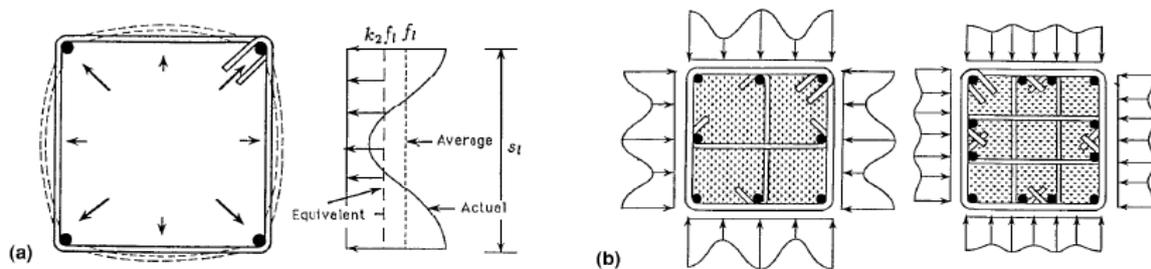


Figura 23. Pressione di confinamento: (a) sviluppo della pressione di confinamento in una sezione quadrata; (b) variazione di pressione di confinamento per mezzo del rinforzo trasversale. [10]

Più aumenta il numero delle barre longitudinali bloccate dal rinforzo trasversale più aumentano i parametri di resistenza delle fibre di calcestruzzo confinato. Il modello empirico di Saatcioglu e Razvi **Error! Reference source not found.**, propone una pressione equivalente (f_{le}) che comporta la stessa pressione di confinamento esercitata dall'elemento trasversale. Tale pressione risulta avere dei picchi in corrispondenza dei nodi poiché qui si ha una maggiore rigidità flessionale.

Si riportano di seguito le formulazioni necessarie per l'implementazione del modello:

$$f'_{cc} = f'_{c0} + k_1 f_{le} \quad (0.1)$$

$$f'_{cc} = f'_{c0} + k_1 f_{le} \quad (0.2)$$

$$f_{le} = k_2 f_l \quad (0.3)$$

$$f_l = \frac{\sum_{i=1}^q A_s f_s \sin \alpha}{s b_c} \quad (0.4)$$

$$k_1 = 6.7 (f_{le})^{-0.17} \quad (0.5)$$

$$k_2 = 0.26 \sqrt{\left(\frac{b_c}{s}\right) \left(\frac{b_c}{s_1}\right) \left(\frac{1}{f_l}\right)} \leq 1.0 \quad (0.6)$$

In cui q rappresenta il numero di rinforzi trasversali nella sezione considerata. La pressione equivalente f_{le} calcolata in MPa è il rapporto tra le forze di trazione nei rinforzi e l'area stessa della sezione. I coefficienti riduttivi k_1 e k_2 tengono conto della pressione di confinamento che aumenta con l'aumentare della forza, spaziatura dell'armatura trasversale (s) e dell'interasse dell'armatura longitudinale (s_1).

Il modello risulta così definito e validato da prove sperimentali di Saatcioglu e Razvi **Error! Reference source not found.**(Figura 24):

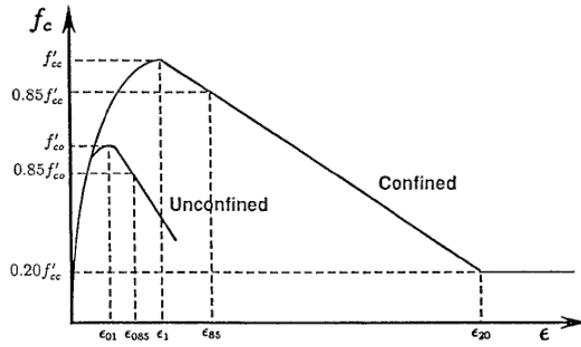


Figura 24. Modello Saatcioglu and Razvi

In cui si ha il ramo crescente della curva:

$$f(\varepsilon) = f'_{cc} \left[2 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_1} \right) - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_1} \right)^2 \right]^{\frac{1}{1+2K}} \quad 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_1 \quad (0.7)$$

ed il ramo decrescente lineare della curva:

$$f(\varepsilon) = \max \left(\begin{array}{l} f'_{cc} \left[1 - 0.15 \frac{\varepsilon - \varepsilon_1}{\varepsilon_{85} - \varepsilon_1} \right] \\ 0.2f'_{cc} \end{array} \right) \quad \varepsilon_1 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{20} \quad (0.8)$$

valgono:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{01} (1 + 5K) \quad (0.9)$$

$$K = \frac{k_1 f_{le}}{f'_{c0}} \quad (0.10)$$

$$\rho_c = \frac{\sum_{i=1}^n (A_{sx})_i + \sum_{j=1}^m (A_{sy})_j}{[s(b_{cx} + b_{cy})]} \quad (0.11)$$

$$\varepsilon_{85} = \varepsilon_{085} + 260\rho_c \varepsilon_1 \quad (0.12)$$

I parametri ε_1 e ε_{01} rappresentano la deformazione di picco del calcestruzzo confinato e non confinato. La pendenza del ramo post-picco è regolata dalla deformazione ε_{85} la quale è funzione del

rapporto di rinforzo laterale nelle due direzioni ρ_c . Il coefficiente K, equivale al rapporto tra l'incremento di resistenza svolto dalle staffe e il valore di resistenza al picco iniziale f'_{c0} del calcestruzzo non confinato. Al parametro $\varepsilon_{0.85}$ si associa il valore 0.00306 **Error! Reference source not found.**

Il modello si ritiene valido dal confronto tra i risultati analitici e sperimentali ottenuti per i diversi valori che caratterizzano la disposizione e la geometria delle staffe. Non si tiene conto in questo modello dell'instabilità per buckling dell'armatura longitudinale, la quale è definita per mezzo di altre leggi nel legame costitutivo dell'acciaio.

2.3.2 Acciaio

Il legame elasto-plastico con incrudimento dell'acciaio è stato descritto ricorrendo al comando *Hysteretic* della libreria *uniaxialMaterial* (Figura 25)

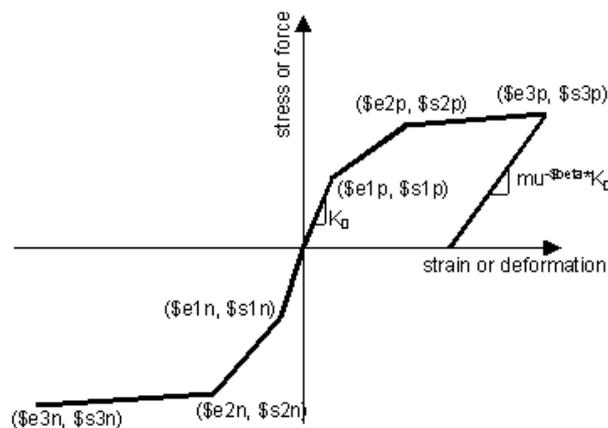


Figura 25. Legame costitutivo dell'acciaio implementato dal comando Hysteretic di OpenSees

La scelta di un legame costitutivo di questo tipo è giustificata dal fatto che è possibile ricostruire il comportamento del materiale a trazione e compressione definendo i singoli punti della spezzata stress-strain. Infatti, il legame costitutivo definito dalla bilatera classica del modello di Prandtl con incrudimento, non permette di cogliere la rottura delle singole barre longitudinali all'interno della simulazione effettuata con *OpenSees*. Pertanto, è stato utile definire un terzo punto oltre allo stato di

snervamento e rottura degli acciai. Il comportamento dell'acciaio sottoposto ad uno stato di trazione monoassiale è definito in Figura 26.

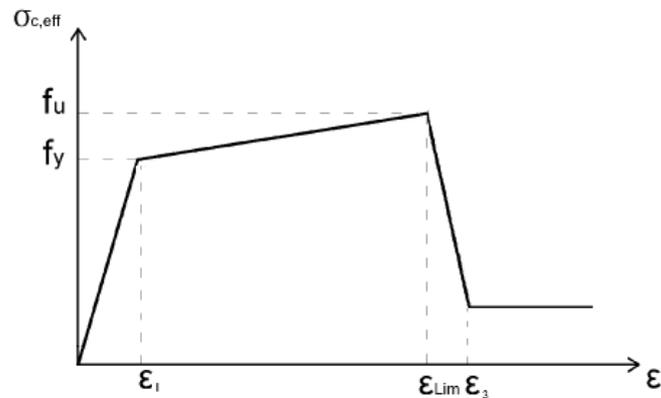


Figura 26. Comportamento a trazione scelto per l'acciaio e implementato dal comando Hysteretic di OpenSees

Il comportamento a trazione dell'acciaio è caratterizzato dal modulo elastico E , dalla resistenza a snervamento f_y , dalla deformazione a snervamento ϵ_1 , dalla resistenza ultima f_u , dalla deformazione di rottura $\epsilon_2 = \epsilon_{Lim}$ e dalla σ_3 e ϵ_3 i quali identificano il terzo punto del comportamento a trazione del materiale. È necessario assegnare i termini riguardanti il danneggiamento dovuto alla duttilità, in questo caso pari a 0 e i parametri riguardanti il pinching durante la fase di ricarico, considerato pari ad 1.

Durante la fase di validazione del modello si è riscontrata l'importanza di una adeguata modellazione del comportamento in compressione dell'acciaio. Per tener conto dell'instabilità per buckling dell'armatura longitudinale si è preso in considerazione il *modello di Dhakal e Maekawa, 2002*.

Nelle membrature in cemento armato, i ferri d'armatura possono subire, in seguito ad un'alta compressione, una grande deformazione laterale, dunque incorrere in fenomeni di instabilità. A causa di ciò la resistenza media a compressione diminuisce nella fase seguente allo snervamento.

Il modello di Dhakal e Meakawa propone una relazione sforzo-deformazione in compressione che può essere applicata alle barre di rinforzo con qualsiasi proprietà geometriche e meccaniche. Per generare le relazioni che reggono il modello, hanno sviluppato uno studio parametrico basato su

esperimenti o analisi di alcuni studi sperimentali eseguiti in passato (Monti and Nuti, 1992). Le barre di rinforzo sono state modellate come delle colonne verticali di lunghezza L e diametro D con incastrati i due nodi. Si è applicato uno spostamento incrementale in testa all'elemento e si è adottato un comportamento elastico perfettamente plastico con $f_y = 400MPa$ e $E = 200GPa$. Attraverso lo studio parametrico analitico, gli autori esprimono qual è il comportamento medio delle barre di armatura in compressione. In particolare, riportano:

- La tensione e deformazione media a compressione dipende solo dal rapporto di snellezza definito come L/D e dalla $\sqrt{f_y}$;
- Subito dopo la fase di buckling la curva ha una pendenza negativa approssimativamente pari al 2% del modulo di Young;
- La tensione media post-buckling è costante e si attesta sul 20% della resistenza a snervamento.

Il modello proposto è mostrato in Figura 27.

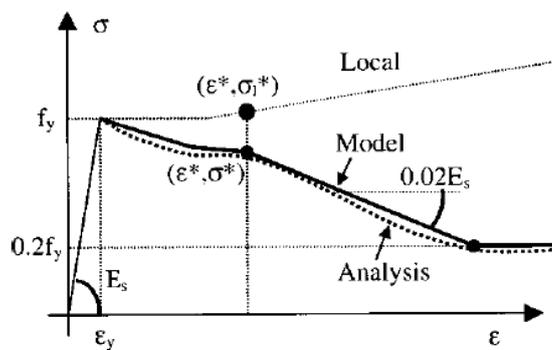


Figura 27. Modello Dhakal and Maekawa (2002)

Le coordinate del punto intermedio possono essere valutate dalle seguenti relazioni:

$$\frac{\varepsilon^*}{\varepsilon_y} = 55 - 2.3 \sqrt{\frac{f_y}{100} \frac{L}{D}} \quad \frac{\varepsilon^*}{\varepsilon_y} \geq 7 \quad (0.13)$$

$$\frac{\sigma^*}{\sigma_t^*} = \alpha(1.1 - 0.016 \sqrt{\frac{f_y}{100} \frac{L}{D}}) \quad \sigma^* \geq 0.2f_y \quad (0.14)$$

Queste relazioni derivano dall'analisi condotta su barre che hanno un incrudimento lineare. Il coefficiente α tiene conto di diversi modelli di incrudimento che si possono avere e per i due casi estremi esso vale 1.0 per le barre con incrudimento lineare e 0.75 per barre elastiche perfettamente plastiche.

Il modello a fibre che sfrutta gli elementi finiti riesce a prevedere il comportamento medio delle barre di rinforzo in compressione caratterizzate da grandi non linearità geometriche. Questo comportamento risulta essere influenzato solo da L/D e $\sqrt{f_y}$. L'analisi di Dhakal e Meekawa è validata anche da un confronto con risultati sperimentali per provini con applicazione di carico sia monotona che ciclica.

L'applicazione di questo modello è stata prevista per ricreare il ramo in compressione del legame costitutivo delle barre di acciaio attraverso i tre punti previsti dal comando *Hysteretic* di *OpenSees*. L'instabilità, e dunque la perdita di resistenza in compressione, è funzione della spaziatura tra le staffe. Il parametro L , infatti, ha assunto il valore del passo tra gli elementi di rinforzo trasversale.

2.3.2 Pinching4

Questo materiale fa parte della famiglia “Uniaxial Material” di Opensees, nello specifico è uno di quelli appositamente implementati per la descrizione del comportamento isteretico dei materiali ed in questo lavoro viene utilizzato per la modellazione dei puntoni rappresentativi dei pannelli in muratura.

Caratteristica fondamentale è anche quella di consentire la regolazione di molti parametri associati al comportamento isteretico quali il degrado (della massima forza, della rigidità in carico e di quella in scarico) e la forma del ramo di scarico (parametri di pinching).

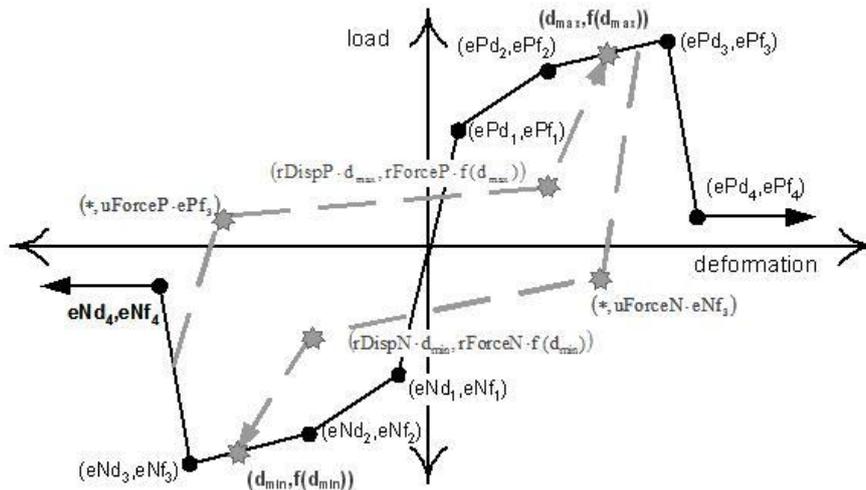


Figura 28. Rappresentazione schematica del modello associato al materiale Pinching4

Questo materiale tiene in conto di una relazione definita da una linea spezzata composta da quattro segmenti per la parte positiva ed altrettanti per quella negativa, Figura 28. Per questo motivo sono richiesti i quattro punti estremi dei vertici della spezzata.

Per lo scopo con cui viene utilizzato questo materiale nel presente lavoro, di queste coordinate, verranno utilizzate solo quelle rappresentanti i parametri monotonicamente crescenti; le altre sono state assunte come nulle.

Capitolo 3. Sviluppo del modello empirico

3.1 Modellazione di un telaio tamponato e proposta di modello ad un puntone equivalente

In questo capitolo viene mostrato l'approccio empirico che sta alla base della procedura condotta, al fine di ricavare una relazione sforzo-deformazione usata per la modellazione a fibre dei puntone equivalenti rappresentativi dei pannelli in muratura presenti nelle strutture intelaiate.

Per lo sviluppo del modello empirico sono stati selezionati dei modelli che hanno costituito il set di dati di base provenienti da analisi sperimentali ed è stato poi ulteriormente ampliato con altri dati provenienti da simulazioni agli elementi finiti (FE).

Questi modelli considerati sono dei telai in calcestruzzo armato con muratura di vari tipologie; alcuni sono telai in vera grandezza, altri sono provini realizzati allo scopo di studi in laboratorio.

Verranno calcolati, per tutti questi casi, i parametri sforzo-deformazione α , β , ζ , e η considerando una modellazione della muratura ad un puntone equivalente al quale viene assegnato un legame costitutivo che viene rappresentato attraverso il materiale pinching4 di *OpenSees*.

3.1.1 Campioni scelti per lo sviluppo del modello

I campioni usati provengono dalle seguenti campagne sperimentali:

- **Cavaleri and Di Trapani, 2014** (Spec. S1A e S1B)
- **Mehrabi et al., 1996** (Spec. 4, 5, 11, 6)
- **Kakaletsis & Karayannis, 2009** (Spec. S)
- **Papia et al., 2003** (Spec. S2A e S2B)
- **Colangelo, 2005** (Specs. C1, L2, N1)

Di seguito sono rappresentati, a scopo illustrativo, le immagini e gli esecutivi dei campioni scelti:

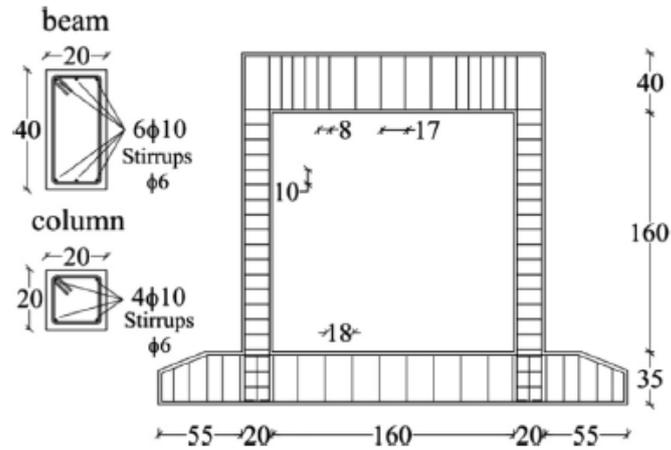


Figura 29. Cavaleri e Di Trapani, 2014, S1A e S1B [14]

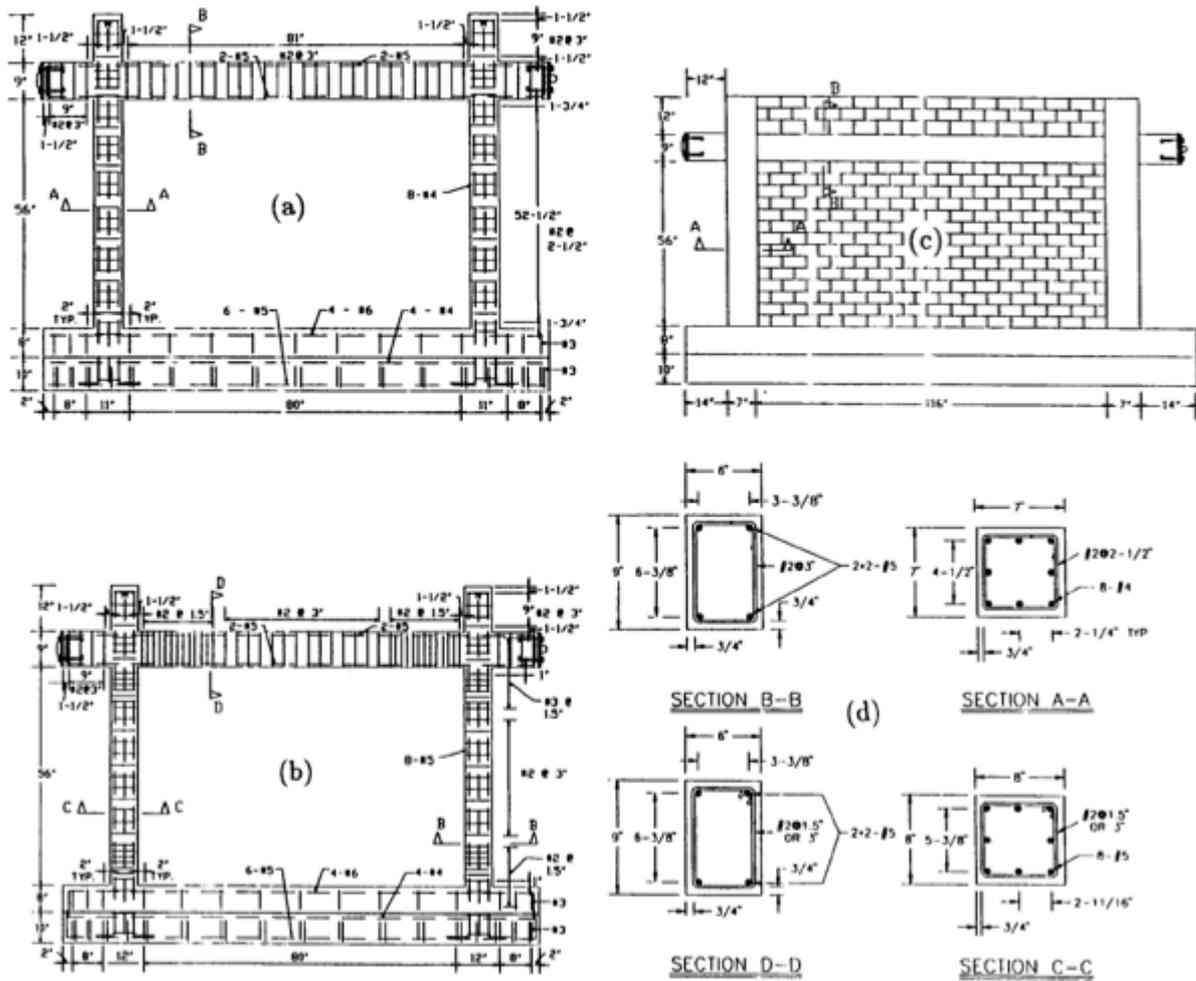


Figura 30. Mehrabi et al., 1996: a) 4,6; b) 5,11; c) muratura; d) sezioni travi e colonne [15]

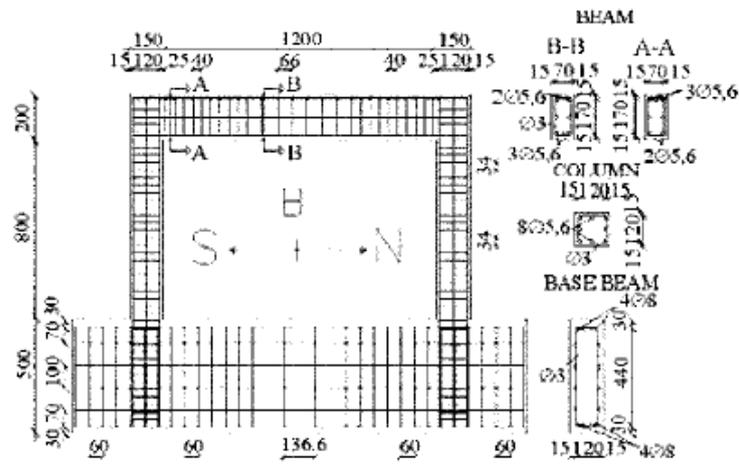


Figura 31. Kakaletsis & Karayannis, 2009, S [16]

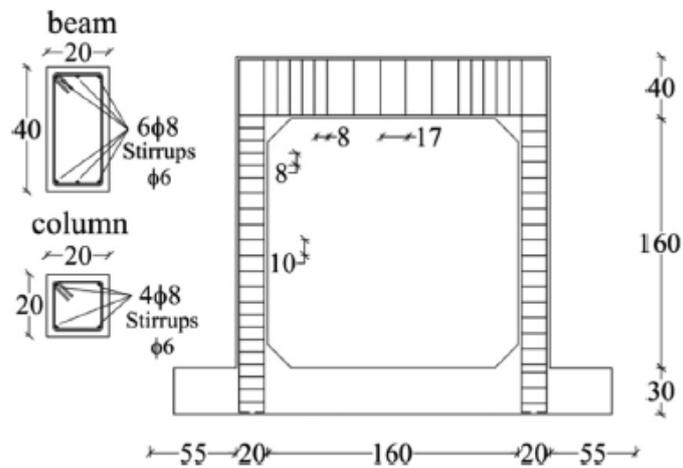


Figura 32. Papia et al., 2003, S2A e S2B [14]

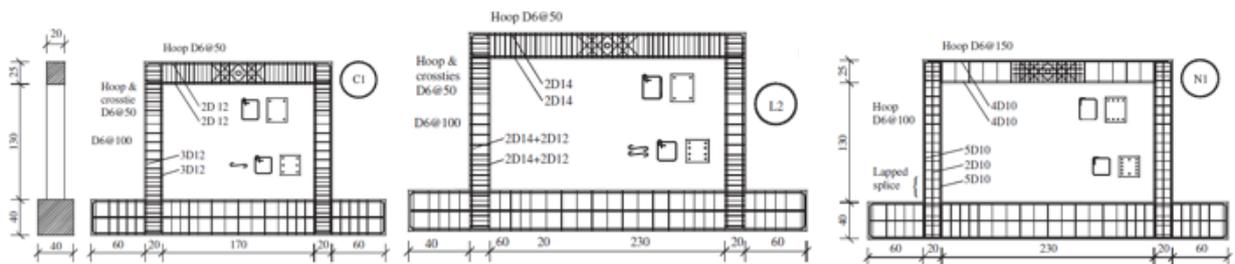


Figura 33. Colangelo, 2005, C1, L2, N1 [17]

3.1.2 Determinazione della relazione sforzo-deformazione (forza-spostamento)

La modellazione proposta per la rappresentazione del puntone equivalente prevede uno schema classico con una biella inclinata soggetta a sola compressione (Figura 34 a).

Travi e pilastri possono essere modellati sia usando elementi a fibre a plasticità diffusa o concentrata, introducendo delle cerniere plastiche agli estremi (ai nodi). In entrambi i casi il confinamento del calcestruzzo deve essere considerato per modellare appropriatamente la risposta anelastica del telaio. I puntone equivalenti sono modellati come bielle con un comportamento forza-spostamento anelastico, caratterizzati da un comportamento forza assiale-spostamento assiale come illustrato in Figura 34 a).

Come esposto nel capitolo precedente, in questo elaborato, si è usato il software *OpenSees* per le modellazioni e simulazioni e il materiale *pinching4* è stato usato per modellare la risposta assiale dei puntone.

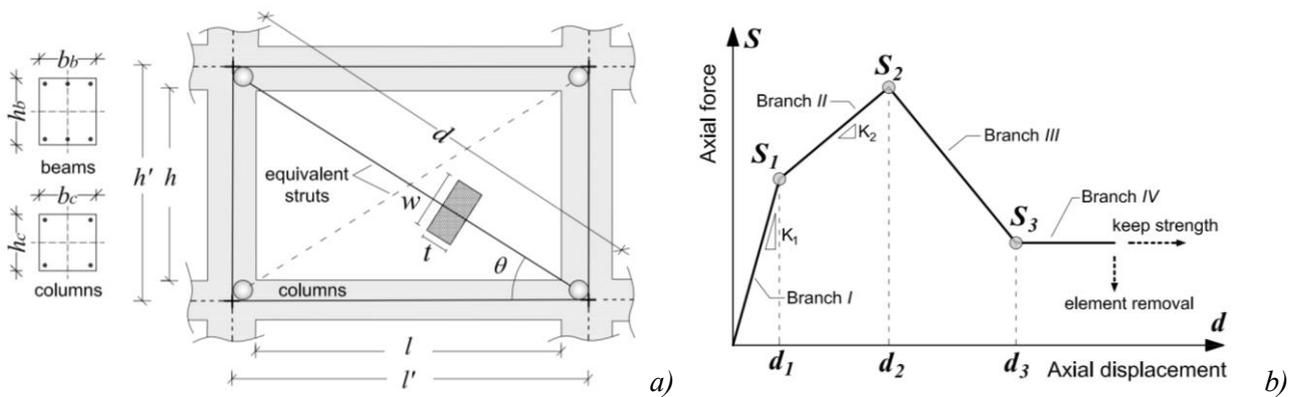


Figure 34. a) modellazione di un puntone equivalente b) legame costitutivo proposto per la modellazione del puntone

La forma della relazione anelastica per i puntone è la stessa di quella proposta da altri autori come **Panagiotakos and Fardis 1996, Bertoldi et al. 1993**, quest'ultima in particolare prevede un ramo ascendente elastico fino al punto S_1-d_1 , caratterizzato da una rigidezza K_1 , un secondo ramo irrigidente fino al punto S_2-d_2 , caratterizzato da una rigidezza K_2 , un terzo ramo di softening ed un quarto ramo di resistenza residua, perfettamente orizzontale, che ha inizio nel punto S_3-d_3 , che può essere considerato a capacità di deformazione illimitata.

La determinazione della relazione forza-spostamento segue dei passi che verranno descritti di seguito.

I rami 1 e 2 sono valutati come fornito da **Cavaleri et al. (2005)** and **Cavaleri and Di Trapani (2014)**

[14] e la rigidezza del ramo 1 è definita come:

$$K_1 = \frac{\tilde{E}_m t w}{d} \quad (3.1)$$

Dove:

t = spessore del pannello in muratura

w = larghezza del puntone equivalente

d = lunghezza del puntone equivalente

\tilde{E}_m = modulo elastico

\tilde{E}_m è definito, secondo Di Trapani et al. 2018a come:

$$\tilde{E}_m = \sqrt{E_{m1} \cdot E_{m2}} \quad (3.2)$$

dove E_{m1} e E_{m2} sono i moduli elastici della muratura rispettivamente in direzione orizzontale e verticale.

La rigidezza del ramo 2 è legata alla rigidezza K_1 attraverso il parametro β (≤ 1) con la seguente relazione

$$K_2 = \beta K_1 \quad (3.3)$$

Lo sforzo di picco S_2 può essere calcolato come prodotto tra la resistenza di picco del puntone diagonale (f_{md0}) e l'area della sua sezione trasversale:

$$S_2 = f_{md0} t w \quad (3.4)$$

Nota S_2 possiamo calcolare come segue S_1 attraverso il parametro α (≤ 1):

$$(3.5)$$

$$S_1 = \alpha S_2$$

Gli spostamenti al punto 1 e 2 sono valutati come:

$$d_1 = \frac{S_1}{K_1}; \quad d_2 = d_1 + \frac{S_2 - S_1}{K_2} \quad (3.6)$$

Il ramo di softening è ottenuto linearizzando il ramo di softening esponenziale proposto da **Cavaleri et al. (2005)**. Questo viene fatto collegando il punto $S_2 - \delta_2$ con un punto ausiliario $S_3^* - \delta_3^*$ (**Fig.**), quando per S_3^* è stato convenzionalmente stabilito $S_3^* = 0.7S_2$, e δ_3^* è ottenuto attraverso l'espressione (**Cavaleri and Di Trapani 2014**) (Figura 35):

$$d_3^* = \frac{l}{\zeta} \ln \left[\frac{S_2}{S_3^*} \exp(\zeta d_2) \right] \quad (3.7)$$

Dove ζ è uno dei parametri empirici che deve essere calibrato.

Infine la resistenza residua (S_3) è collegata alla resistenza di picco con il parametro $\eta (\leq 1)$ come:

$$S_3 = S_3^* \quad (3.8)$$

Lo spostamento δ_3 è ottenuto intersecando le rette che identificano i rami II e IV e risulta:

$$d_3 = d_2 + (\eta - 1) \left(\frac{d_3^* - d_2}{S_3^* - S_2} \right) S_2 \quad (3.9)$$

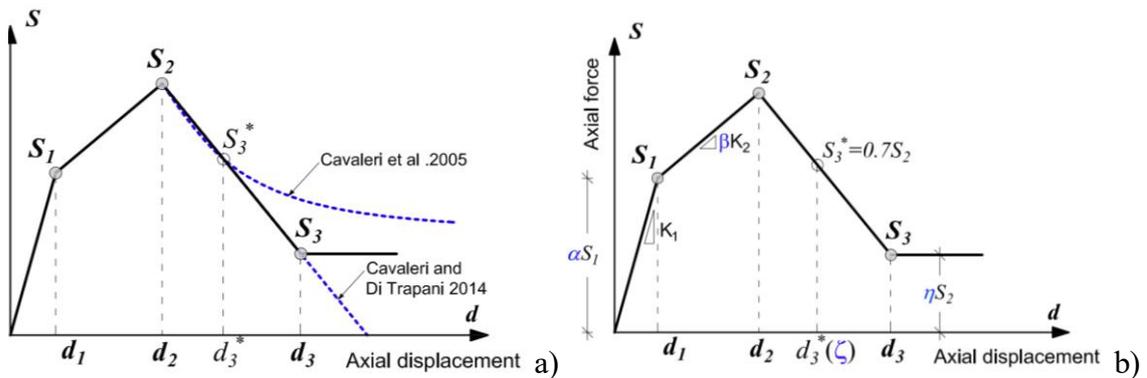


Figure 35. Relazione forza-spostamento per il puntone equivalente: a) Confronto tra le relazioni di Cavaleri et al. (2005) e Cavaleri and Di Trapani (2014); b) parametri di calibrazione

Dalle espressioni su riportate è evidente che la risposta forza-spostamento è definita una volta che sono definiti i 4 parametri α , β , ζ , e η . Questi, nel seguito, verranno chiamati “parametri forza-spostamento” come appunto regolano la risposta forza-spostamento del puntone. Il loro significato viene chiarito graficamente nella Figura 30 b), in particolare α e η collegano lo sforzo di fessurazione S_1 e lo sforzo residuo S_3 come porzione dello sforzo di picco del puntone (S_2), il parametro β , invece, definisce la riduzione della rigidezza dopo la formazione della prima fessurazione, il parametro ζ definisce il salto del ramo di softening.

Questi parametri hanno una forte dipendenza dalle proprietà meccaniche della muratura, ma, più in generale, I loro valori dipendono dalle proprietà geometriche e meccaniche dell'intero telaio.

La loro determinazione può avvenire attraverso correlazioni empiriche che saranno descritte nei paragrafi successivi.

3.1.3 Determinazione dei parametri geometrici del puntone equivalente

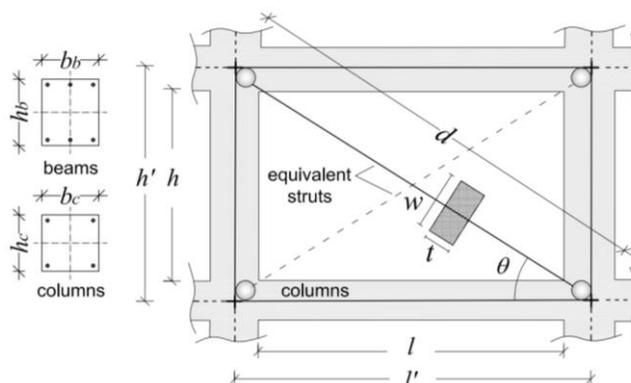


Figure 36. Modello di puntone equivalente

Per quanto riguarda la definizione delle dimensioni della sezione trasversale del puntone equivalente, questa è stata valutata secondo la procedura proposta da **Di Trapani et al. 2018a** che verrà descritta nel seguito. Lo spessore t del puntone è uguale allo spessore del pannello di muratura, mentre la larghezza w è valutata con la relazione:

$$w = \kappa^{\gamma^*} \left(\frac{h}{l} \right) \frac{c^*}{\lambda^{*\beta^*}} d \quad (3.10)$$

Dove, come si vede in Figura 36, si ha:

h = altezza del pannello in muratura

l = luce del pannello di muratura

d = lunghezza del puntone diagonale

k = coefficiente che tiene conto dell'effetto dell'irrigidimento laterale dovuto al carico verticale

k può essere valutato con la seguente formula:

$$\kappa = [1 + (18\lambda^* + 200)\varepsilon_v] \quad (3.11)$$

Dove ε_v è la deformazione assiale valutata sulle due colonne laterali dividendo la forza totale F_v

agente sulle colonne per la loro area trasversale A_c e per il modulo elastico E_c :

$$\varepsilon_v = \frac{F_v}{2E_c A_c} \quad (3.12)$$

Il parametro λ^* considera il grado di accoppiamento tra il telaio e la muratura ed è valutato secondo la formula proposta da **Papia et al. (2003)**:

$$\lambda^* = \frac{\tilde{E}_m}{E_c} \frac{th'}{A_c} \left(\frac{h'^2}{l'^2} + \frac{1}{4} \frac{A_c}{A_b} \frac{l'}{h'} \right) \quad (3.13)$$

Dove:

A_b = area della sezione trasversale della trave

A_c = area della sezione trasversale della colonna

Mentre gli altri simboli possono essere dedotti dalla Figura 31.

L'esponente γ^* nell' **Eq. (3.14)** considera l'influenza combinata delle aperture dei pannelli in muratura e del loro rapporto di forma e viene definito come:

$$\gamma^* = 1 + 0.5 \frac{r}{(l/h)^4} \quad (3.14)$$

dove $r=1$ per il presente caso di pannelli pieni.

I parametri c^* e β^* hanno le seguenti espressioni:

$$\begin{aligned} c^* &= 0.249 - 0.0116\nu + 0.567\nu^2 \\ \beta^* &= 0.146 - 0.0073\nu + 0.126\nu^2 \end{aligned} \quad (3.15)$$

che dipendono dal coefficiente di Poisson (ν) del pannello di muratura lungo la direzione diagonale che per semplicità viene considerata la media nelle due direzioni ortogonali oppure il valore 0.1.

3.1.4 Sforzi di taglio e di compressione

I valori sperimentali dello sforzo di taglio della muratura (f_{vm}) e dello sforzo di compressione lungo le direzioni ortogonali (f_{m1} and f_{m2}) sono riportati in Tabella 3 insieme agli sforzi di compressione convenzionali (\tilde{f}_m) definiti da (Di Trapani et al. 2018a):

$$\tilde{f}_m = \sqrt{f_{m1} \cdot f_{m2}} \quad (3.16)$$

E gli sforzi di compressione del puntone diagonale (f_{md0}).

| References | Spec. # | f_{vm} (MPa) | f_{m2} (MPa) | f_{m1} (MPa) | \tilde{f}_m (MPa) | f_{md0} (MPa) |
|--------------------------------|------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------------|--------------------|
| Cavaleri & Di Trapani (2014) | S1A | 0.73 | 2.67 | 3.08 | 2.86 | 2.0 |
| Cavaleri & Di Trapani (2014) | S1B | 1.07 | 8.70 | 4.18 | 6.00 | 2.5 |
| Mehrabi et al. (1996) | 4 | 0.93 | 5.09 | 2.75 | 3.74 | 2.4 |
| Mehrabi et al. (1996) | 5 | 1.15 | 13.84 | 13.84 | 13.84 | 5.3 |
| Mehrabi et al. (1996) | 11 | 1.03 | 11.44 | 11.44 | 11.44 | 3.8 |
| Mehrabi et al. (1996) | 6 | 0.7 | 4.86 | 2.62 | 3.57 | 2.6 |
| Kakaletsis & Karayannis (2009) | S | 0.08 | 5.11 | 2.63 | 3.66 | 2.3 |
| Papia et al (2003) | S2A | 0.89 | 4.57 | 3.92 | 4.23 | 2.5 |
| Papia et al (2003) | S2B | 1.07 | 8.70 | 4.18 | 6.00 | 2.3 |
| Colangelo (2005) | C1 | 0.87 | 5.10 | 3.39 | 4.15 | 2.05 |
| Colangelo (2005) | L2 | 0.87 | 5.10 | 3.39 | 4.15 | 1.8 |
| Colangelo (2005) | N1 | 0.58 | 2.74 | 3.90 | 3.24 | 1.4 |

Tabella 1. Dati meccanici sperimentali della muratura, risultati convenzionali e sforzi diagonali

3.2 Calibrazione dei parametri sforzo-deformazione dei test sperimentali

I campioni di ripperimento sono selezionati dai test sperimentali di Mehrabi et al., 1996, Papia et al., 2003, Colangelo, 2005, Kakaletsis and Karayannis, 2009, Cavaleri and Di Trapani, 2014. LA scelta di questi studi sperimentali è dovuta alla completezza dei programmi sperimentali di cui abbiamo informazioni dettagliate sui test sperimentali eseguiti sui materiali e sui pannelli di muratura. Le varie tipologie di telai e le loro proprietà geometriche sono riassunte nella Tabella 1, mentre le loro proprietà meccaniche, i dati relativi al puntone diagonale ed altri parametri per l'identificazione dei puntoni sono riassunti in Tabella 2.

| References | Spec. # | Masonry units type | t (mm) | h (mm) | h' (mm) | l (mm) | l' (mm) | l/h - | d (mm) | b_c (mm) | h_c (mm) | b_b (mm) | h_b (mm) |
|--------------------------------|------------|-----------------------|-------------|-------------|--------------|-------------|--------------|------------|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Cavaleri & Di Trapani (2014) | S1A | Calcarenite | 200 | 1600 | 1800 | 1600 | 1800 | 1.00 | 2545.6 | 200 | 200 | 200 | 400 |
| Cavaleri & Di Trapani (2014) | S1B | Clay / hollow | 150 | 1600 | 1800 | 1600 | 1800 | 1.00 | 2545.6 | 200 | 200 | 200 | 400 |
| Mehrabi et al. (1996) | 4 | Brick / hollow | 92 | 1422 | 1536 | 2032 | 2210 | 1.43 | 2691.5 | 178 | 178 | 152.4 | 228.6 |
| Mehrabi et al. (1996) | 5 | Brick / solid | 92 | 1422 | 1536 | 2032 | 2210 | 1.43 | 2691.5 | 178 | 178 | 152.4 | 228.6 |
| Mehrabi et al. (1996) | 11 | Brick / solid | 92 | 1422 | 1536 | 2948 | 3126 | 2.07 | 3483.1 | 178 | 178 | 152.4 | 228.6 |
| Mehrabi et al. (1996) | 6 | Brick / hollow | 92 | 1422 | 1536 | 2032 | 2235 | 1.43 | 2712.3 | 203.2 | 203.2 | 152.4 | 228.6 |
| Kakaletsis & Karayannis (2009) | S | Brick | 60 | 800 | 900 | 1200 | 1350 | 1.50 | 1622.5 | 150 | 150 | 100 | 200 |
| Papia et al (2003) | S2A | Calcarenite | 200 | 1600 | 1800 | 1600 | 1800 | 1.00 | 2545.6 | 200 | 200 | 200 | 400 |
| Papia et al (2003) | S2B | Clay / hollow | 150 | 1600 | 1800 | 1600 | 1800 | 1.00 | 2545.6 | 200 | 200 | 200 | 400 |
| Colangelo (2005) | C1 | Clay / hollow | 120 | 1300 | 1425 | 1700 | 1900 | 1.31 | 2375.0 | 200 | 200 | 200 | 250 |
| Colangelo (2005) | L2 | Clay / hollow | 120 | 1300 | 1425 | 2300 | 2500 | 1.77 | 2877.6 | 200 | 200 | 200 | 250 |
| Colangelo (2005) | N1 | Clay / hollow | 160 | 1300 | 1425 | 2300 | 2500 | 1.77 | 2877.6 | 200 | 200 | 200 | 250 |

Tabella 1. Proprietà geometriche dei campioni

| References | Spec. # | F_v (kN) | E_{m2} (MPa) | E_{m1} (MPa) | \tilde{E}_m (MPa) | E_c (MPa) | ν - | c - | β - | ε_v (%) | κ - | γ - | λ^* - | w (mm) |
|--------------------------------|------------|---------------|-------------------|-------------------|------------------------|----------------|------------|----------|--------------|------------------------|---------------|---------------|------------------|-------------|
| Cavaleri & Di Trapani (2014) | S1A | 400 | 3933 | 7408 | 5397 | 25000 | 0.150 | 0.260 | 0.150 | 0.20 | 1.048 | 1.50 | 2.186 | 631.4 |
| Cavaleri & Di Trapani (2014) | S1B | 400 | 6040 | 5070 | 5697 | 25000 | 0.100 | 0.254 | 0.148 | 0.20 | 1.046 | 1.50 | 1.730 | 636.8 |
| Mehrabi et al. (1996) | 4 | 294 | 4600 | 4600 | 4600 | 17000 | 0.150 | 0.260 | 0.150 | 0.27 | 1.059 | 3.08 | 0.978 | 587.1 |
| Mehrabi et al. (1996) | 5 | 294 | 8949 | 8949 | 8949 | 18064 | 0.150 | 0.260 | 0.150 | 0.26 | 1.060 | 3.08 | 1.791 | 536.6 |
| Mehrabi et al. (1996) | 11 | 294 | 9604 | 9604 | 9604 | 18133 | 0.150 | 0.260 | 0.150 | 0.26 | 1.059 | 10.24 | 1.664 | 726.7 |
| Mehrabi et al. (1996) | 6 | 294 | 4198 | 4198 | 4198 | 19856 | 0.150 | 0.260 | 0.150 | 0.18 | 1.038 | 3.08 | 0.654 | 590.1 |
| Kakaletsis & Karayannis (2009) | S | 100 | 670.3 | 660.7 | 665.5 | 29961 | 0.150 | 0.260 | 0.150 | 0.07 | 1.015 | 3.53 | 0.046 | 470.5 |
| Papia et al (2003) | S2A | 400 | 7106 | 9528 | 8228 | 23000 | 0.090 | 0.253 | 0.148 | 0.22 | 1.058 | 1.50 | 3.622 | 578.2 |
| Papia et al (2003) | S2B | 400 | 6040 | 5070 | 5697 | 23000 | 0.100 | 0.254 | 0.148 | 0.22 | 1.051 | 1.50 | 1.881 | 633.1 |
| Colangelo (2005) | C1 | 400 | 4230 | 1688 | 2672 | 34200 | 0.100 | 0.254 | 0.148 | 0.15 | 1.030 | 2.46 | 0.277 | 598.8 |
| Colangelo (2005) | L2 | 400 | 4230 | 1688 | 2672 | 35417 | 0.100 | 0.254 | 0.148 | 0.14 | 1.029 | 5.90 | 0.218 | 610.8 |
| Colangelo (2005) | N1 | 400 | 1212 | 2623 | 1782 | 34429 | 0.100 | 0.254 | 0.148 | 0.15 | 1.030 | 5.90 | 0.199 | 621.6 |

Tabella 2. Larghezza equivalente del puntone e dati meccanici associati

Le simulazioni dei test sono stati effettuati con il software OpenSees procedendo con un'analisi pushover dei puntoni equivalenti di ogni provino, dai quali sono stati ottenuti i grafici sforzo-deformazione che sono poi stati messi a confronto con le risposte sperimentali cicliche. Il confronto viene mostrato nelle figure 32, 33, 34, 35, 36.

3.2.1 Risultati della calibrazione a confronto con i dati sperimentali e le curve forza-spostamento

I risultati sono mostrati nelle Figure seguenti dove le curve di pushover alla fine del processo di calibrazione e i risultati sperimentali (sia gli involucri positivi che negativi) vengono sovrapposti. In queste figure vengono rappresentate anche le risposte forza assiale-spostamento assiale tracciati per punti ($S_1-\delta_1$, $S_2-\delta_2$, $S_3-\delta_3$, $S_4-\delta_4$) secondo la procedura descritta nel primo paragrafo di questo capitolo.

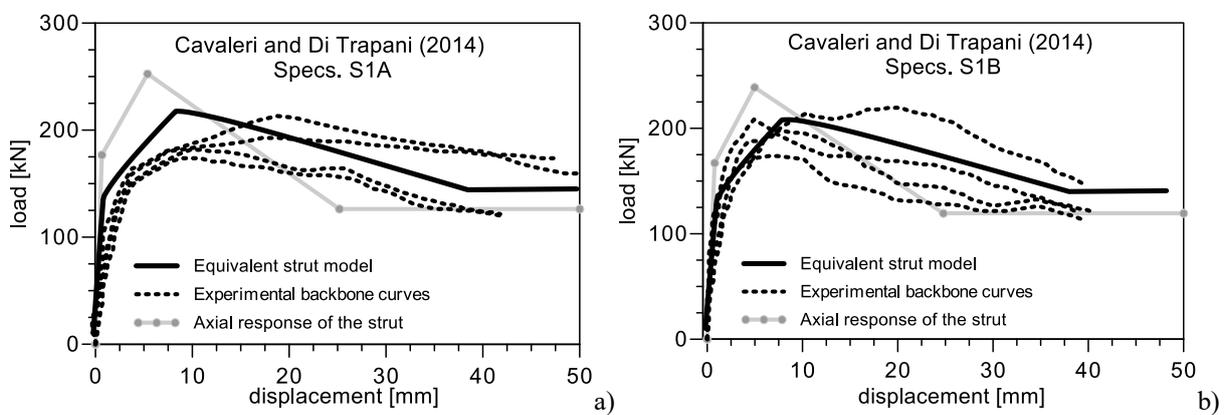


Figura 37. Curve sperimentali di Cavaleri e Di Trapani, 2014 e curve di pushover dei modelli di telai tamponati con puntoni equivalenti dopo la calibrazione: a) campione S1A; b) campione S1B

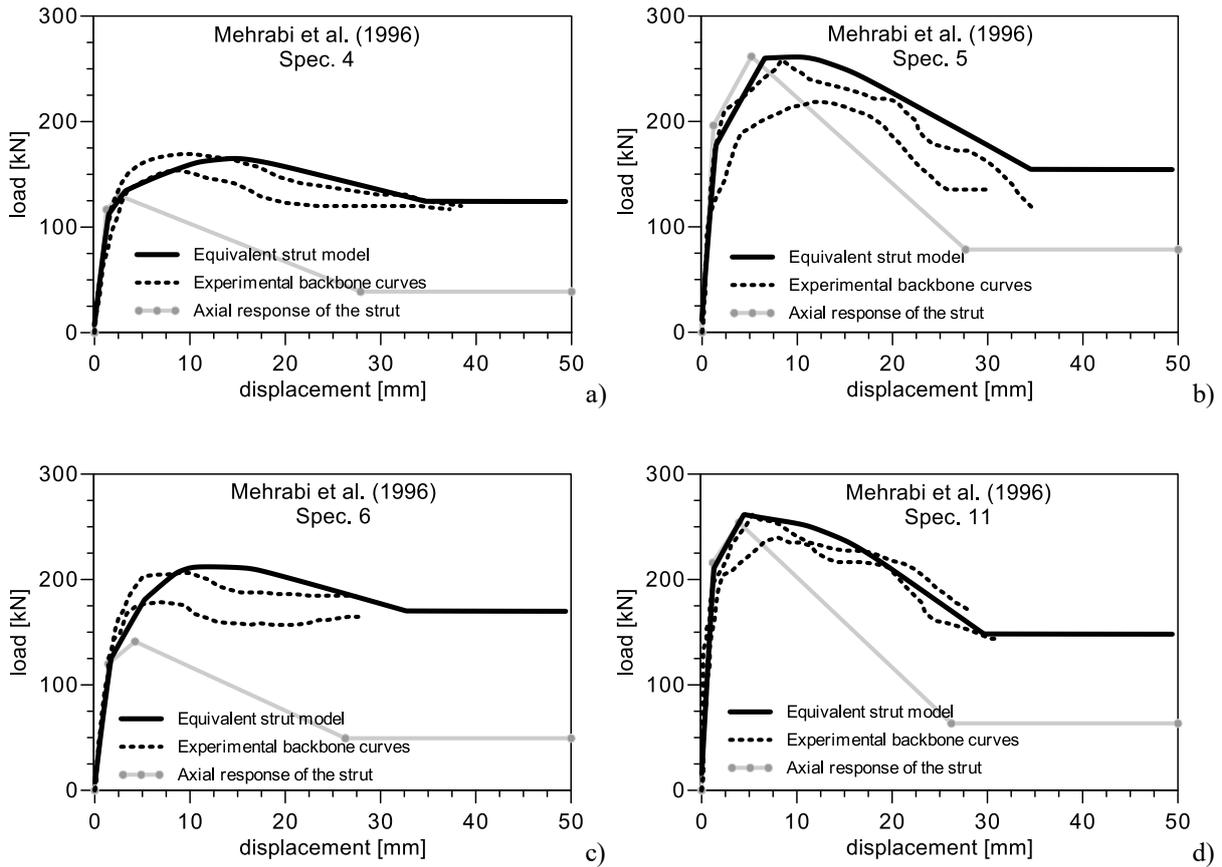


Figura 38. Curve sperimentali di Mehrabi et al., 1996 e curve di pushover dei modelli di telai tamponati con puntoni equivalenti dopo la calibrazione: a) campione 4; b) campione 5; c) campione 6; d) campione 11

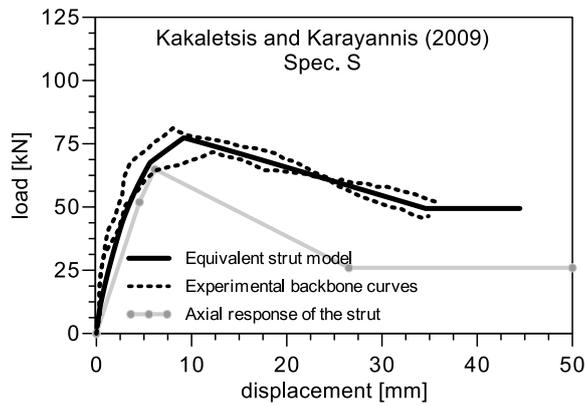


Figura 39. Curve sperimentali di Kakaletsis et al., 2009 e curve di pushover dei modelli di telai tamponati con puntoni equivalenti dopo la calibrazione

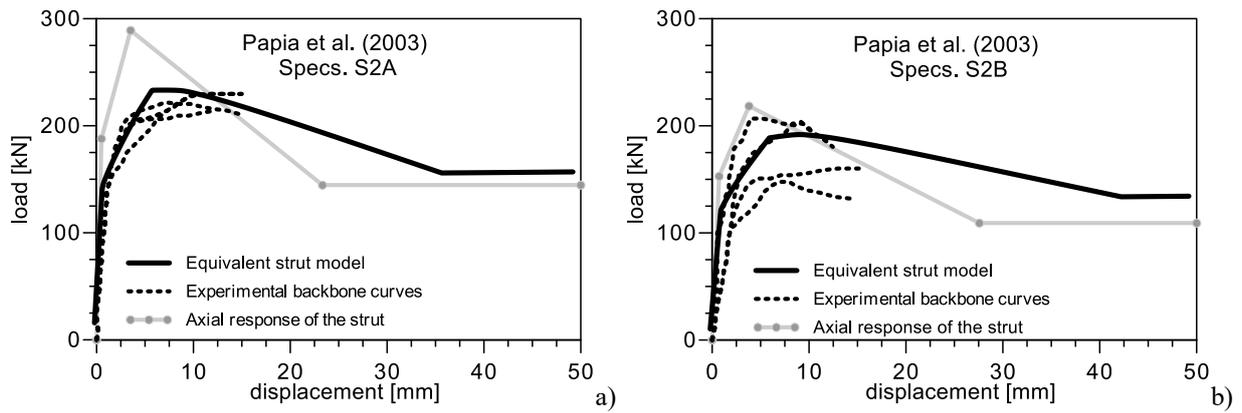


Figura 40. Curve sperimentali di Papia et al., 2003 e curve di pushover dei modelli di telai tamponati con puntoni equivalenti dopo la calibrazione: a) campione S2A; b) campione S2B

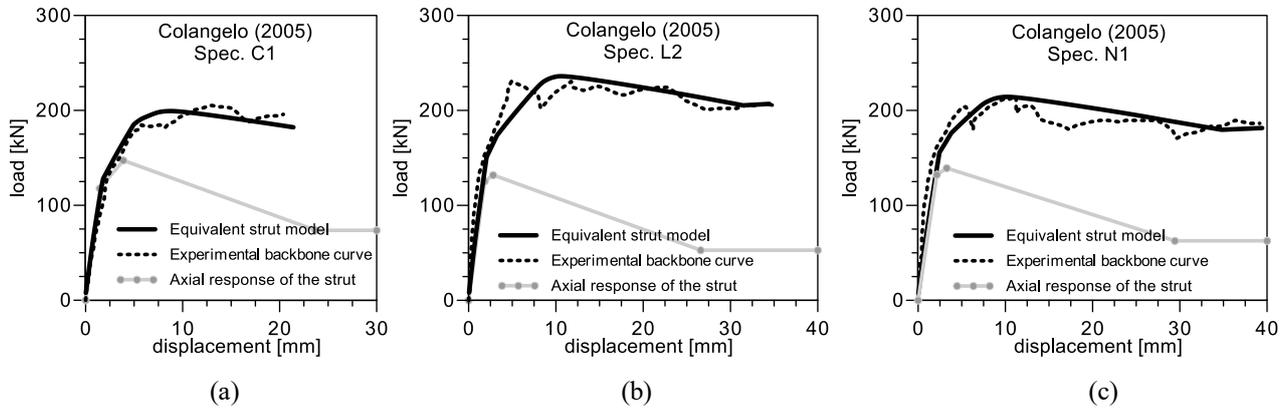


Figura 41. Curve sperimentali di Colangelo, 2005 e curve di pushover dei modelli di telai tamponati con puntoni equivalenti dopo la calibrazione: a) campione C1; b) campione L2; c) campione N1

3.2.2 Calcolo dei parametri forza- spostamento ottimali

I parametri forza spostamento ottimali (α , β , ζ e η) sono stati valutati dopo la calibrazione e sono stati infine riportati in Tabella 4 insieme ai valori risultatnti di forza e spostamento dei puntoni equivalenti.

| References | Spec. # | α - | β - | ζ - | η - | S_1 (kN) | d_1 (mm) | S_2 (kN) | d_2 (mm) | S_3 (kN) | d_3 (mm) |
|--------------------------------|------------|---------------|--------------|--------------|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Cavaleri & Di Trapani (2014) | S1A | 0.7 | 0.06 | 0.030 | 0.50 | 176.8 | 0.66 | 252.6 | 5.38 | 176.8 | 25.2 |
| Cavaleri & Di Trapani (2014) | S1B | 0.7 | 0.08 | 0.030 | 0.50 | 167.2 | 0.78 | 238.8 | 4.97 | 167.2 | 24.8 |
| Mehrabi et al. (1996) | 4 | 0.9 | 0.10 | 0.033 | 0.30 | 116.7 | 1.26 | 129.6 | 2.67 | 90.7 | 27.9 |
| Mehrabi et al. (1996) | 5 | 0.75 | 0.10 | 0.037 | 0.30 | 196.2 | 1.20 | 261.6 | 5.18 | 183.2 | 27.7 |
| Mehrabi et al. (1996) | 11 | 0.85 | 0.075 | 0.040 | 0.25 | 215.9 | 1.17 | 254.0 | 3.93 | 177.8 | 26.2 |
| Mehrabi et al. (1996) | 6 | 0.85 | 0.09 | 0.035 | 0.35 | 119.9 | 1.43 | 141.1 | 4.23 | 98.8 | 26.3 |
| Kakaletsis & Karayannis (2009) | S | 0.8 | 0.70 | 0.035 | 0.40 | 519.4 | 4.52 | 64.9 | 6.14 | 45.4 | 26.5 |
| Papia et al (2003) | S2A | 0.65 | 0.09 | 0.030 | 0.50 | 187.9 | 0.50 | 289.1 | 3.51 | 202.4 | 23.3 |
| Papia et al (2003) | S2B | 0.7 | 0.10 | 0.025 | 0.50 | 152.9 | 0.72 | 218.4 | 3.80 | 152.9 | 27.6 |
| Colangelo (2005) | C1 | 0.8 | 0.15 | 0.030 | 0.50 | 117.8 | 1.46 | 147.3 | 3.89 | 103.1 | 23.7 |
| Colangelo (2005) | L2 | 0.95 | 0.10 | 0.030 | 0.40 | 125.3 | 1.84 | 131.9 | 2.81 | 92.3 | 26.6 |
| Colangelo (2005) | N1 | 0.95 | 0.10 | 0.025 | 0.45 | 132.3 | 2.15 | 139.2 | 3.28 | 97.5 | 29.4 |

Tabella 3. Parametri sforzo-deformazione ottenuti dopo la calibrazione e valori risultatnti di forza e spostamenti dei puntoni equivalenti

3.3 Calibrazione dei parametri sforzo-deformazione dei modelli FE

In modo da ampliare il set di dati su cui fare lo studio, sono stati presi in considerazione, oltre ai campioni mostrati nel paragrafo precedente, degli ulteriori campioni forniti da **Di Trapani et al. 2018a**.^[22]

Quest'ultimi sono stati ricavati da modelli sperimentali FE validati ed implementati con il software ATENA 2D (Cervenka Consulting, 2014).

La formulazione dei modelli FE viene di seguito richiamata brevemente.

Il modello costitutivo associato con il calcestruzzo e la muratura è definito da una legge uniassiale sforzo-deformazione calibrata con i dati sperimentali relativi alla muratura e calcestruzzo. Il legame costitutivo del calcestruzzo è associato ad un dominio biassiale (Figura 42a) che regola la superficie di rottura basata su sforzo di compressione (f_c) e di trazione (f_{ct}). La rottura biassiale è raggiunta allo sforzo efficace $f'_{c,eff}$ e dipende dal percorso di carico che segue. Elementi di interfaccia vengono utilizzati per modellare l'attrito tra i giunti di malta. L'interfaccia 2D è governata da una superficie di rottura di Mohr-Coulomb (Figura 42b) e dipende dai coefficienti di attrito (μ) e di coesione (c). LA curva sforzo tangenziale-spostamento relativo è lineare fino al valore massimo di sforzo tangenziale (Figura 42c) e poi è seguito da un ramo di softening dovuto alla resistenza residua.

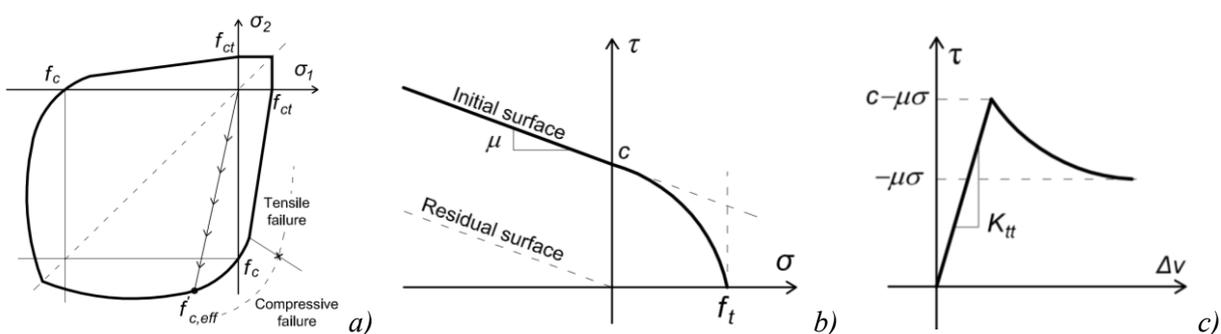


Figura 42. a) Superficie di rottura di calcestruzzo/muratura b) superficie di rottura dell'interfaccia c) sforzo tangenziale-spostamento relativo

Una vista del modello FE di riferiment è mostrata in Figura 43.

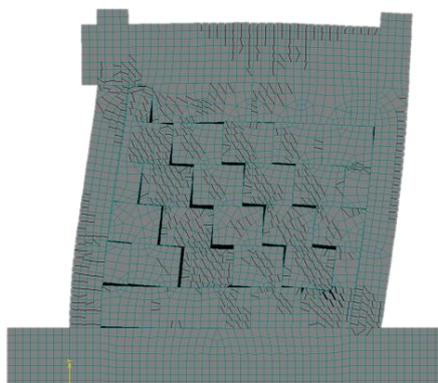


Figura 43. Vista del modello durante una tipica analisi pushover [14]

Il confronto tra le previsioni del modello FE ed I test sperimentali di riferimento usati per la validazione (provino S1B by **Cavaleri and Di Trapani 2014**) sono mostrati in Figura 44:

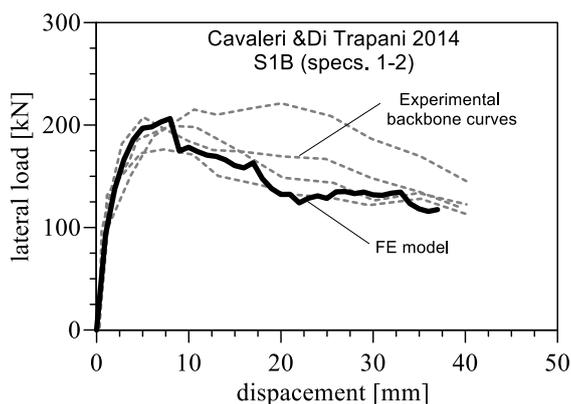


Figura 44. Confronto tra le previsioni del modello FE e curve sperimentali del campione S1B (Cavaleri e Di Trapani 2014) usati per la validazione [14]

I campioni di test numerici estrapolati dal modello FE di riferimento sono stati ottenuti variando sforzi di trazione e compressione della muratura (f_m and f_{vm}), spessore del pannello (t) e modulo elastico della muratura (E_m). è bene notare che affinché i macroelementi abbiano un comportamento isotropico, lo sforzo di trazione e il modulo elastico della muratura sono stati adottati quelli convenzionali: $f_m = \tilde{f}_m$ e $E_m = \tilde{E}_m$

L'interfaccia e i parametri del calcestruzzo sono inecce stati mantenuti fissi, così come la geometria del telaio (vedi campione S1B by **Cavaleri and Di Trapani 2014**).

I parametri geometrici e meccanici che sono stati variati per creare I modelli numerici sono riportati in Tabella 5.

| Spec. # | f_{vm} (MPa) | $f_m = \tilde{f}_m$ (MPa) | t (mm) | $E_m = \tilde{E}_m$ (N/mm ²) |
|------------|-------------------|------------------------------|-------------|---|
| FEM-1S | 0.60 | 12.00 | 150 | 5719 |
| FEM-2S | 0.40 | 4.00 | 150 | 5719 |
| FEM-3S | 0.20 | 2.00 | 150 | 5719 |
| FEM-1T | 0.50 | 8.66 | 50 | 5719 |
| FEM-1T | 0.50 | 8.66 | 100 | 5719 |
| FEM-1T | 0.50 | 8.66 | 150 | 5719 |
| FEM-1T | 0.50 | 8.66 | 200 | 5719 |
| FEM-1E | 0.50 | 8.66 | 150 | 1200 |
| FEM-2E | 0.50 | 8.66 | 150 | 2000 |
| FEM-3E | 0.50 | 8.66 | 150 | 3850 |
| FEM-4E | 0.50 | 8.66 | 150 | 9000 |

Tabella 4. Dati numerici e meccanici dei modelli numerici generati dal provino S1B

3.3.1 Risultati della calibrazione a confronto con i dati sperimentali e le curve forza-spostamento

I modelli di telai con puntoni equivalenti associati ai modelli FE generati sono stati costruiti e calibrati per ricavare i parametri forza-spostamento. Le curve forza spostamento alla fine della calibrazione sono mostrate in Figura 41 insieme alla rispettive curve forza-spostamento delle simulazioni dei modelli FE.

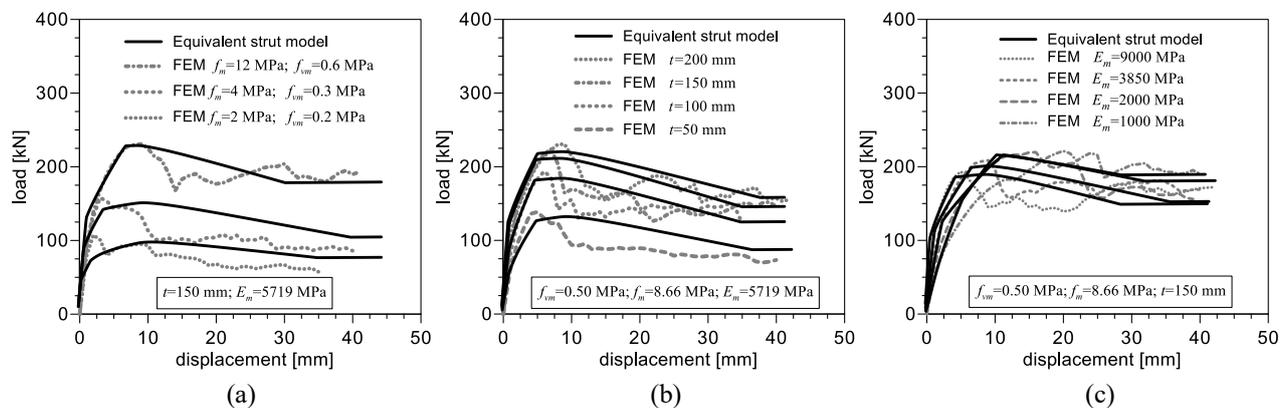


Figura 45. Curve forza-spostamento dei modelli FE e dei modelli a puntone equivalente dopo la calibrazione: a) variazione della tensione della muratura; b) variazione dello spessore del pannello; c) variazione del modulo elastico

3.3.2 Calcolo dei parametri forza- spostamento ottimali

I parametri forza spostamento ottimali (α , β , ζ e η) sono stati valutati dopo la calibrazione e sono stati infine riportati in Tabella 6 insieme ai valori risultatnti di forza e spostamento dei puntoni equivalenti.

| Spec. | λ^* | w (mm) | f_{mdo} (MPa) | α | β | ζ | η | S_1 (kN) | d_1 (mm) | S_2 (kN) | d_2 (mm) | S_3 (kN) | d_3 (mm) |
|--------------|-------------|-------------|--------------------|----------|---------|---------|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| FEM-1S | 1.737 | 636.4 | 1.70 | 0.7 | 0.12 | 0.03 | 0.40 | 113.6 | 0.7 | 162.3 | 2.42 | 113.6 | 2.42 |
| FEM-2S | 1.737 | 636.4 | 2.90 | 0.6 | 0.15 | 0.027 | 0.60 | 166.1 | 0.6 | 276.8 | 4.22 | 193.8 | 4.22 |
| FEM-3S | 1.737 | 636.4 | 0.80 | 0.8 | 0.07 | 0.038 | 0.30 | 61.1 | 0.8 | 76.4 | 1.30 | 53.5 | 1.30 |
| FEM-1T | 0.579 | 744.3 | 3.50 | 0.5 | 0.3 | 0.040 | 0.30 | 65.1 | 0.5 | 130.3 | 3.38 | 91.2 | 3.38 |
| FEM-1T | 1.158 | 673.8 | 3.20 | 0.5 | 0.25 | 0.033 | 0.45 | 107.8 | 0.5 | 215.6 | 3.56 | 150.9 | 3.56 |
| FEM-1T | 1.737 | 636.4 | 2.70 | 0.6 | 0.16 | 0.030 | 0.50 | 154.7 | 0.6 | 257.8 | 3.73 | 180.4 | 3.73 |
| FEM-1T | 2.316 | 611.7 | 2.20 | 0.6 | 0.15 | 0.025 | 0.55 | 161.5 | 0.6 | 269.2 | 3.20 | 188.4 | 3.20 |
| FEM-1E | 0.608 | 739.2 | 2.20 | 0.6 | 0.18 | 0.022 | 0.75 | 146.4 | 0.6 | 243.9 | 7.90 | 170.7 | 7.90 |
| FEM-2E | 1.169 | 672.8 | 2.30 | 0.6 | 0.16 | 0.025 | 0.60 | 139.3 | 0.6 | 232.1 | 4.71 | 162.5 | 4.71 |
| FEM-3E | 0.304 | 817.7 | 2.00 | 0.7 | 0.4 | 0.02 | 0.80 | 171.7 | 0.7 | 245.3 | 7.38 | 171.7 | 7.38 |
| FEM-4E | 2.734 | 598.2 | 2.50 | 0.6 | 0.12 | 0.025 | 0.60 | 134.6 | 0.6 | 224.3 | 2.78 | 157.0 | 2.78 |

Tabella 5. Parametri sforzo-deformazione dei puntoni equivalenti dopo la calibrazione e volori di forza e spostamento dei puntoni

3.4 Definizione delle leggi di correlazione empirica

Il set di dati sperimentali e numerici, per i quali sono stati ricavati i parametri sforzo-deformazione, α , β , ζ e η , insieme alle caratteristiche geometriche e meccaniche dei rispettivi telai tamponati, sono uniti in un unico set di dati. I risultati sono stati dopo analizzati in modo da comprendere la dipendenza dei parametri α , β , ζ e η dai parametri coinvolti nel processo di identificazione di ogni modello. In dettaglio, i parametri λ^* , \tilde{E}_m , (l/h) , t , \tilde{f}_m , f_{md0} , f_{vm} sono i più significativi per la risposta anelastica del telaio tamponato, come questo tiene conto del rapporto di forma, della rigidezza e della robustezza dei pannelli e dei puntoni.

3.4.1 Metodo di valutazione dei parametri di correlazione A , B , Z e Y e massimizzazione della funzione obiettivo

Le relazioni con α , β , ζ e η sono basati sulla definizione di quattro parametri di correlazione (A , B , Z e Y) che nella forma generale si presentano nel seguente modo:

$$\Pi = \lambda^{*x_1} \cdot \tilde{E}_m^{x_2} \cdot \left(\frac{l}{h}\right)^{x_3} \cdot t^{x_4} \cdot \tilde{f}_m^{x_5} \cdot f_{md0}^{x_6} \cdot f_{vm}^{x_7} \quad (3.17)$$

Gli esponenti x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , x_5 , x_6 e x_7 sono stati calibrati per i quattro parametri di correlazione A , B , Z and U per ottenere il *massimo coefficiente di determinazione* (R^2) della funzione analitica interpolante relativa a a , b , z e h come $f(A)$, $f(B)$, $f(Z)$ e $f(U)$.

Nel processo di ottimizzazione le tipologie di funzione interpolante sono variabili con gli esponenti in modo da minimizzare la funzione obiettivo $OF=1-R^2$.

I risultati forniscono le seguenti espressioni analitiche dei parametri di correlazione:

$$A = \lambda^{*0.1} \left(\frac{l}{h} \right)^{-3} \left(\frac{f_{md0}}{f_{vm}^{0.4}} \right) \quad (3.18)$$

$$B = \lambda^{*0.7} \left(\frac{l}{h} \right)^{1.8} \left(\frac{f_{md0}^{-1.7}}{f_{vm}^{-0.7}} \right) \frac{l}{t^{0.5}} \quad (3.19)$$

$$Z = \left(\frac{\tilde{E}_m}{\tilde{f}_m} \right)^{0.7} \left(\frac{l}{h} \right)^{0.7} \left(\frac{f_{md0}^{0.7}}{f_{vm}^{0.35}} \right) \frac{l}{t} \quad (3.20)$$

$$Y = \left(\frac{\tilde{E}_m^{0.7}}{t} \right)^{0.7} \left(\frac{l}{h} \right)^{1.2} \left(\frac{\tilde{f}_m^{-0.5}}{f_{vm}^{0.1}} \right) \quad (3.21)$$

Che sono associati agli esponenti riportati in Tabella 7.

| Correlation parameter | x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | x_5 | x_6 | x_7 |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| A | 0.10 | 0.00 | -3.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | -0.40 |
| B | 0.70 | 0.00 | 1.80 | -0.50 | 0.00 | -1.70 | 0.70 |
| Z | 0.00 | 0.70 | 0.70 | -1.00 | 0.00 | 0.70 | -0.35 |
| Y | 0.00 | 0.70 | 1.20 | -1.00 | -0.50 | 0.00 | -0.10 |

Tabella 6 Esponenti ottimali associati ai termini dei parametri di correlazione

3.4.2 Metodo di valutazione dei parametri sforzo-deformazione α , β , ζ e η per mezzo dei parametri A , B , Z e Y

Le relazioni tra i parametri sforzo-deformazione α , β , ζ e η e i parametri A , B , Z e Y sono mostrati in Figura, insieme alle leggi di correlazione analitica ottimali, che sono di seguito riportati con i corrispettivi coefficienti di determinazione (R^2) e sono tutti sopra le 0.86:

$$\alpha = 0.1A + 0.94 \quad (R^2 = 0.94) \quad (3.22)$$

$$\beta = 0.092B^{-0.76} \quad (R^2 = 0.88) \quad (3.23)$$

$$\zeta = 0.025Z^{0.26} \quad (R^2 = 0.86) \quad (3.24)$$

$$\eta = 0.53Y^{-0.46} \quad (R^2 = 0.90) \quad (3.25)$$

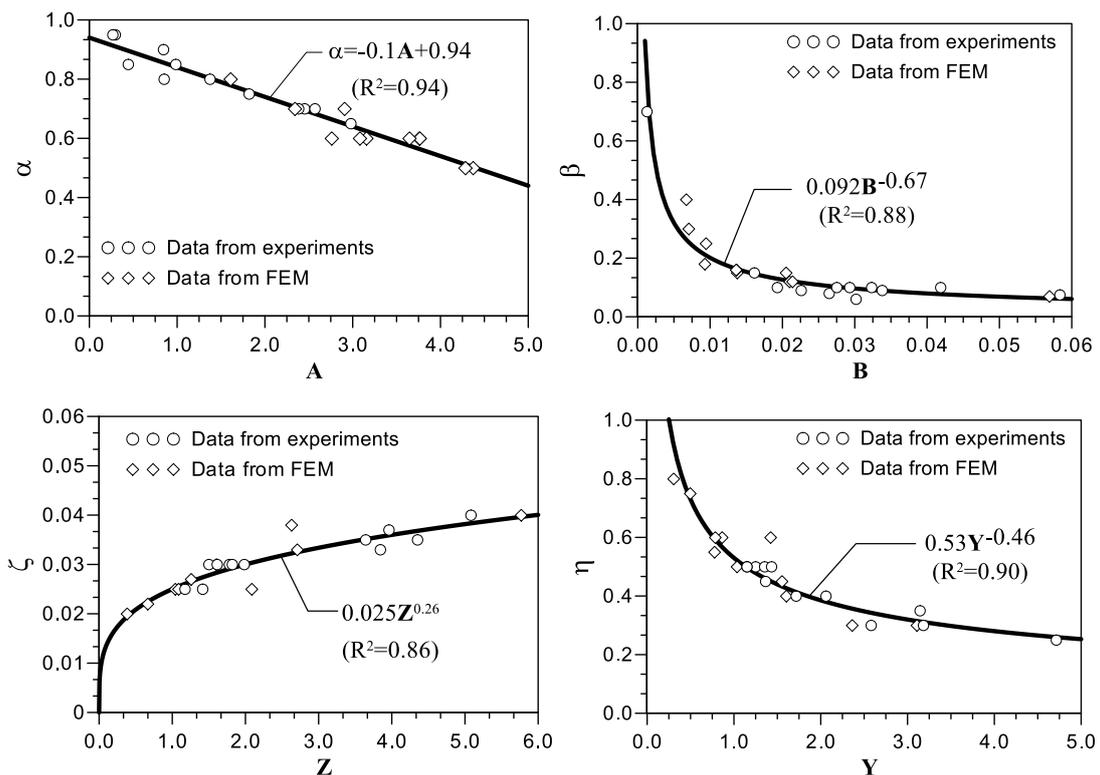


Figura 46. Relazioni tra i parametri sforzo-deformazione e parametri di correlazione con rispettive leggi di correlazione

3.5 Schema riassuntivo dei vari step di calcolo

Allo scopo di mostrare la procedura nel suo insieme ed il fine ultimo del lavoro svolto, in questo paragrafo viene riassunto il procedimento step by step:

1. Valutazione della larghezza del puntone w (**Eq. 3.10-3.15**)
2. Valutazione dello sforzo di picco del puntone S_2 (**Eq. 3.4**)
3. Valutazione dei parametri di correlazione A, B, Z, Y (**Eq.3.18-3.21**)
4. Valutazione dei parametri forza-spostamento $\alpha, \beta, \zeta, \eta$ (**Eq. 3.22-3.25**)
5. Determinazione delle relazioni forza-spostamento per i puntoni (**Eq. 3.1, 3.3 e 3.5-3.9**)

Questa procedura può essere utilizzata come metodologia per definire i puntoni equivalenti, ma può anche essere usata come strumento di progettazione per i telai tamponati. Il coefficiente di determinazione (R^2), che è associato alle **Eq. (22-25)**, ha evidenziato una buona correlazione tra i parametri A, B, Z e Y e i parametri forza-spostamento α, β, ζ e η , rimanendo sempre in un range di valori compreso tra 0.86 e 0.94.

L'affidabilità della procedura descritta nell'identificazione della risposta anelastica dei telai tamponati verrà dimostrata nel capitolo successivo per mezzo di test alla cieca.

Capitolo 4. Validazione del modello tramite Blind Test

La correlazione empirica proposta nel presente elaborato è stata validata con dei test sperimentali di sei campioni, non appartenenti al set di dati usati per la correlazione.

4.1 Selezione dei campioni usati per la validazione

I campioni usati sono di seguito riportati:

- **Morandi et al., 2018** (Spec. TA-2)
- **da Porto et al. 2013** (Spec. URM-U)
- **Colangelo, 2005** (Spec. V21)
- **Bergami and Nuti, 2015** (Spec. FT-2)
- **Verderame et al., 2016** (Specs. GLD)
- **Verderame et al., 2016** (Specs. SLD)

Di seguito, a scopo illustrativo, vengono mostrate immagini ed esecutivi dei campioni scelti:

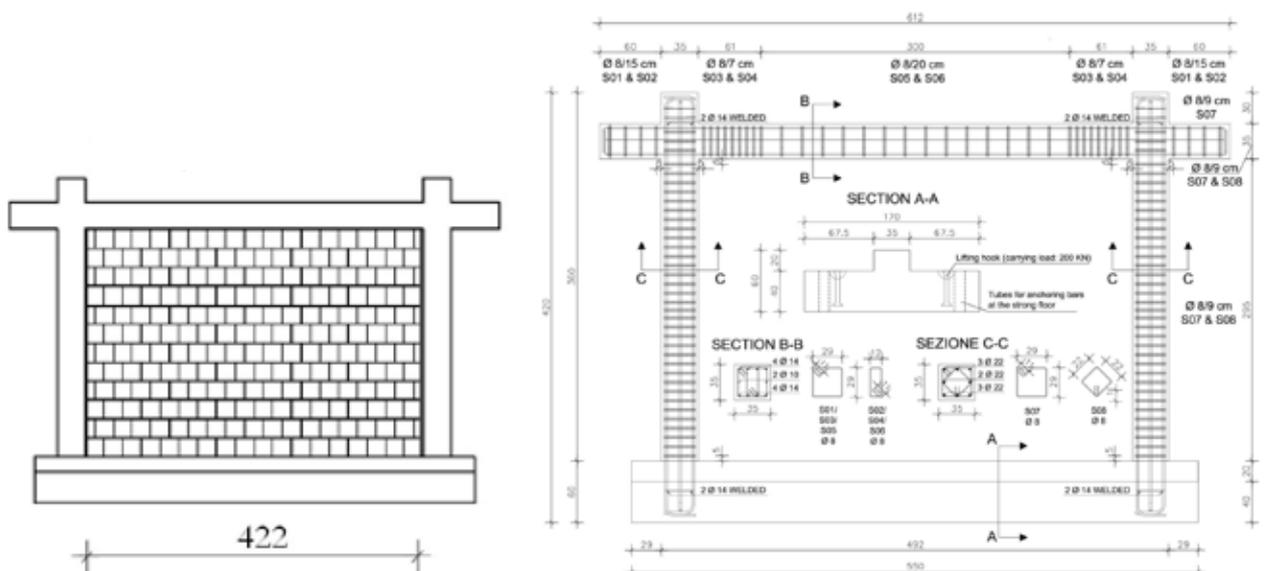


Figura 47. Morandi et al.,2018, muratura ed esecutivo [18]

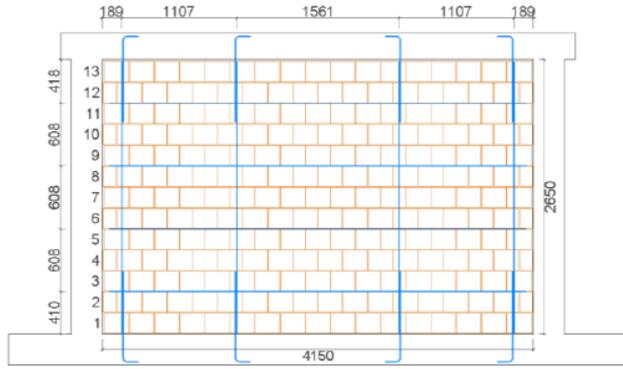


Figura 48. da Porto et al., 2013, muratura [19]

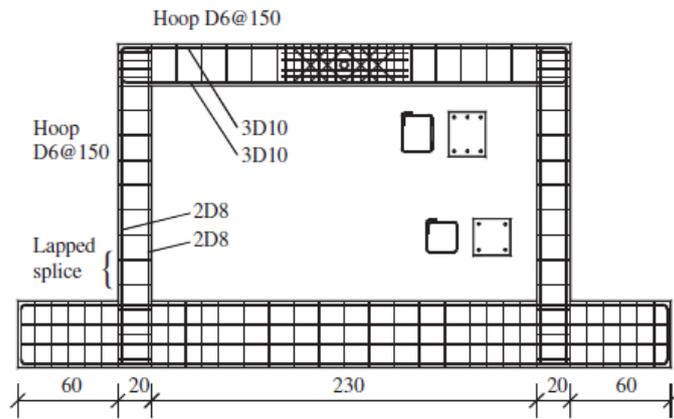


Figura 49. Colangelo, 2005, esecutivo [17]

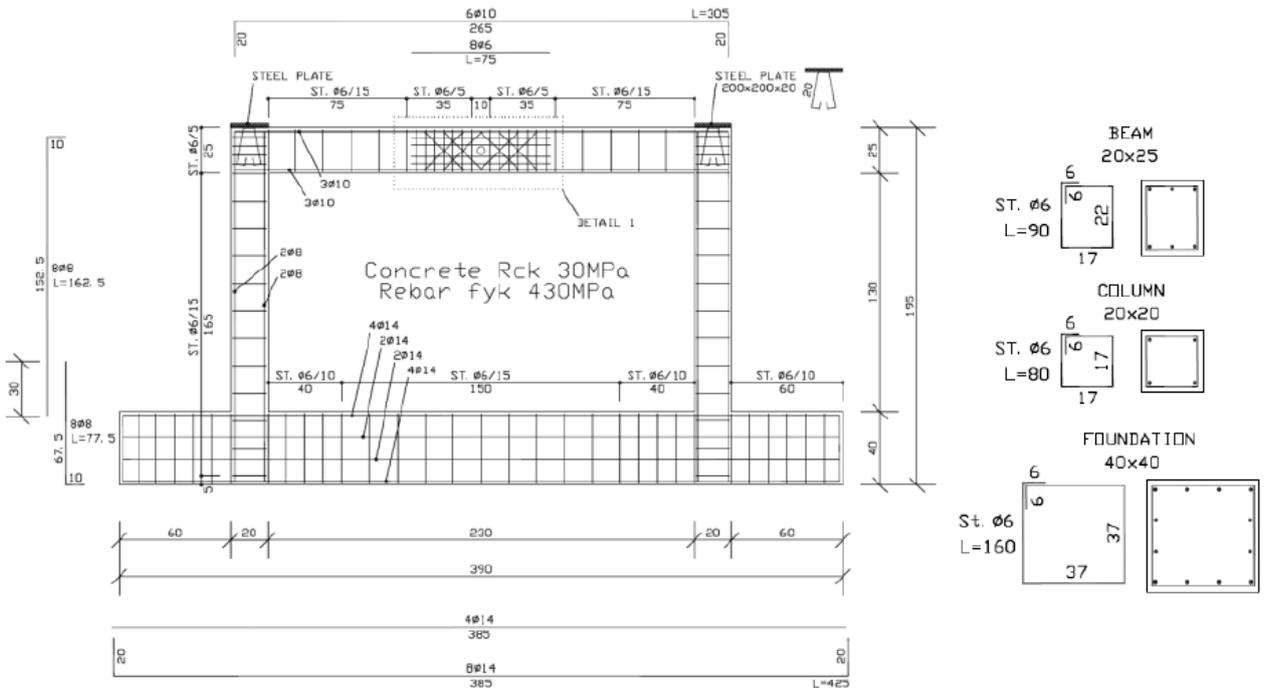


Figura 50. Bergami, Nuti, 2015, esecutivo [20]

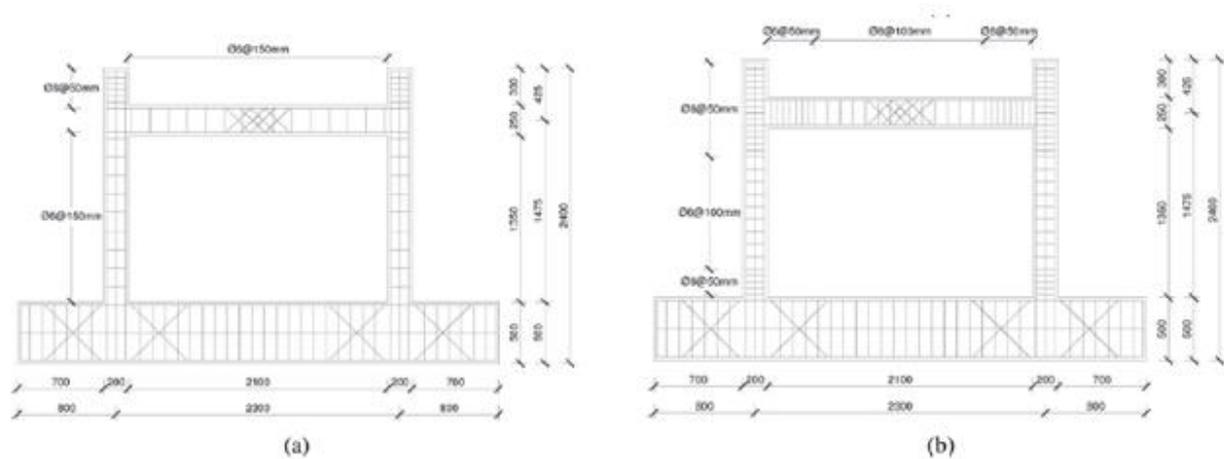


Figura 51. Verderame et al.,2016: a) GLD; b) SLD [21]

Per quanto riguarda la campagna sperimentale di **Colangelo, 2005**, di cui alcuni campioni sono stati usati per costruire il set di dati della procedura, bisogna specificare che i test per la validazione sono stati svolti esclusivamente con il campione V21, che non era stato utilizzato precedentemente nella calibrazione.

Gli altri cinque campioni appartengono ad altre campagne sperimentali sempre non utilizzate nella fase di calibrazione. I campioni GLD e SLD by **Verderame et al. (2016)** hanno le stesse proprietà geometriche e meccaniche, sono differenti in termini di armature longitudinali e trasversali, in particolare: in GLD, nel calcolo dell'armatura, si considerano solo i carichi verticali mentre in SLD si tiene conto anche dei carichi sismici.

Le caratteristiche geometriche sono riportate in Tabella

| References | Spec. # | Masonry units type | t (mm) | h (mm) | h' (mm) | l (mm) | l' (mm) | l/h (-) | d (mm) | b_c (mm) | h_c (mm) | b_b (mm) | h_b (mm) |
|-------------------------|-------------|-----------------------|-------------|-------------|--------------|-------------|--------------|--------------|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Morandi et al. (2018) | TA2 | Clay / hollow | 350 | 2950 | 3125 | 4220 | 4570 | 1.5 2 | 5536. 3 | 350 | 350 | 350 | 350 |
| Da Porto et al. (2013) | URM-U | Clay / hollow | 300 | 2650 | 2775 | 4150 | 4450 | 1.5 7 | 5244. 3 | 300 | 300 | 300 | 250 |
| Colangelo (2005) | V21 | 2-layer clay / hollow | 160 | 1300 | 1425 | 2300 | 2500 | 1.7 7 | 2877. 6 | 200 | 200 | 200 | 250 |
| Bergami & Nuti (2015) | FT2 | Clay / hollow | 120 | 1300 | 1425 | 2300 | 2500 | 1.7 7 | 2877. 6 | 200 | 200 | 200 | 250 |
| Verderame et al. (2016) | SLD/GL D | Clay / hollow | 80 | 1300 | 1475 | 2100 | 2300 | 1.6 2 | 2732. 3 | 200 | 200 | 200 | 250 |

Tabella 7. Dettagli geometrici e tipologici dei campioni usati per la validazione

Per tutti questi modelli sono stati svolti tutti gli step mostrati nel capitolo precedente che hanno portato al calcolo della larghezza del puntone equivalente w e tutti i parametri necessari per la definizione del puntone, che sono raggruppati nelle seguenti tabelle:

| References | Spec. # | E_{m2} (MPa) | E_{m1} (MPa) | \tilde{E}_m (MPa) | E_c (MPa) | f_{m2} (MPa) | f_{m1} (MPa) | \tilde{f}_m (MPa) | f_{vm} (MPa) | f_{md0} (MPa) |
|-------------------------|---------|----------------|----------------|---------------------|-------------|----------------|----------------|---------------------|----------------|-----------------|
| Morandi et al. (2018) | TA2 | 5299 | 494 | 1617 | 30000 | 4.64 | 1.08 | 2.24 | 0.36 | 0.93 |
| Da Porto et al. (2913) | URM-U | 4312 | 1767 | 2760 | 30000 | 6.00 | 1.19 | 2.67 | 0.20 | 1.14 |
| Colangelo (2005) | V21 | 3188 | n.d. | 3188 | 33900 | 2.24 | 2.56 | 2.39 | 0.35 | 1.58 |
| Bergami & Nuti (2015) | FT2 | 7228 | 4031 | 5685 | 31475 | 6.19 | 2.91 | 4.24 | 1.26 | 2.42 |
| Verderame et al. (2016) | SLD/GLD | n.d. | n.d. | 3940* | 27870 | 4.88 | 3.19 | 3.94 | 0.36 | 2.31 |

(*estimated)

Tabella 8. Dati meccanici sperimentali dei campioni e proprietà meccaniche

| References | Spec. # | F_v (kN) | ν - | c - | β - | ε_v (%) | κ - | γ - | λ^* - | w (mm) |
|-------------------------|---------|------------|---------|-------|-----------|---------------------|------------|------------|---------------|----------|
| Morandi et al. (2018) | TA2 | 800 | 0.15 | 0.260 | 0.150 | 0.20 | 1.048 | 1.50 | 2.186 | 631.4 |
| Da Porto et al. (2913) | URM-U | 800 | 0.10 | 0.254 | 0.148 | 0.20 | 1.046 | 1.50 | 1.730 | 636.8 |
| Colangelo (2005) | V21 | 400 | 0.15 | 0.260 | 0.150 | 0.27 | 1.059 | 3.08 | 0.978 | 587.1 |
| Bergami & Nuti (2015) | FT2 | 318 | 0.10 | 0.254 | 0.148 | 0.13 | 1.026 | 5.90 | 0.522 | 529.6 |
| Verderame et al. (2016) | SLD/GLD | 200 | 0.10 | 0.254 | 0.148 | 0.09 | 1.018 | 4.40 | 0.302 | 554.9 |

Tabella 9. Valori della larghezza del puntone diagonale w con associati parametri di identificazione meccanica

4.2 Risultati della calibrazione a confronto con i dati sperimentali

La correlazione e i parametri forza-spostamento calcolati con le Eq. (3.18-3.21) e (3.22-3.25) sono mostrati in Tabella 11 insieme ai valori di sforzo assiale-spostamento assiale dei puntoni.

| References | Spec. # | A | B | Z | Y | α | β | ζ | η | S_1 (kN) | d_1 (mm) | S_2 (kN) | d_2 (mm) | S_3 (kN) | d_3 (mm) |
|-------------------------|---------|------|-------|------|------|----------|---------|---------|--------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Morandi et al. (2018) | TA2 | 0.43 | 0.030 | 0.50 | 0.57 | 0.90 | 0.10 | 0.021 | 0.65 | 350.8 | 2.85 | 389.9 | 6.17 | 252.4 | 26.3 |
| Da Porto et al. (2013) | URM-U | 0.54 | 0.027 | 1.13 | 1.06 | 0.89 | 0.10 | 0.026 | 0.49 | 318.1 | 1.93 | 358.1 | 4.30 | 174.4 | 27.9 |
| Colangelo (2005) | V21 | 0.39 | 0.024 | 2.86 | 2.58 | 0.90 | 0.11 | 0.033 | 0.32 | 130.7 | 1.29 | 144.7 | 2.52 | 46.7 | 26.9 |
| Bergami & Nuti (2015) | FT2 | 0.37 | 0.042 | 3.29 | 3.48 | 0.91 | 0.08 | 0.034 | 0.28 | 139.4 | 1.11 | 153.9 | 2.63 | 43.3 | 27.6 |
| Verderame et al. (2016) | SLD/GLD | 0.73 | 0.013 | 5.66 | 4.25 | 0.87 | 0.16 | 0.039 | 0.26 | 89.4 | 1.40 | 102.7 | 2.67 | 26.4 | 25.1 |

Tabella 10. Parametri di correlazione, parametri forza-spostamento e dati di sforzo assiale-spostamento assiale finali calcolati per i puntoni dei campioni usati per i blind test

In Figura 42 viene mostrato il confronto tra le curve sperimentali forza-spostamento e le predizioni numeriche.

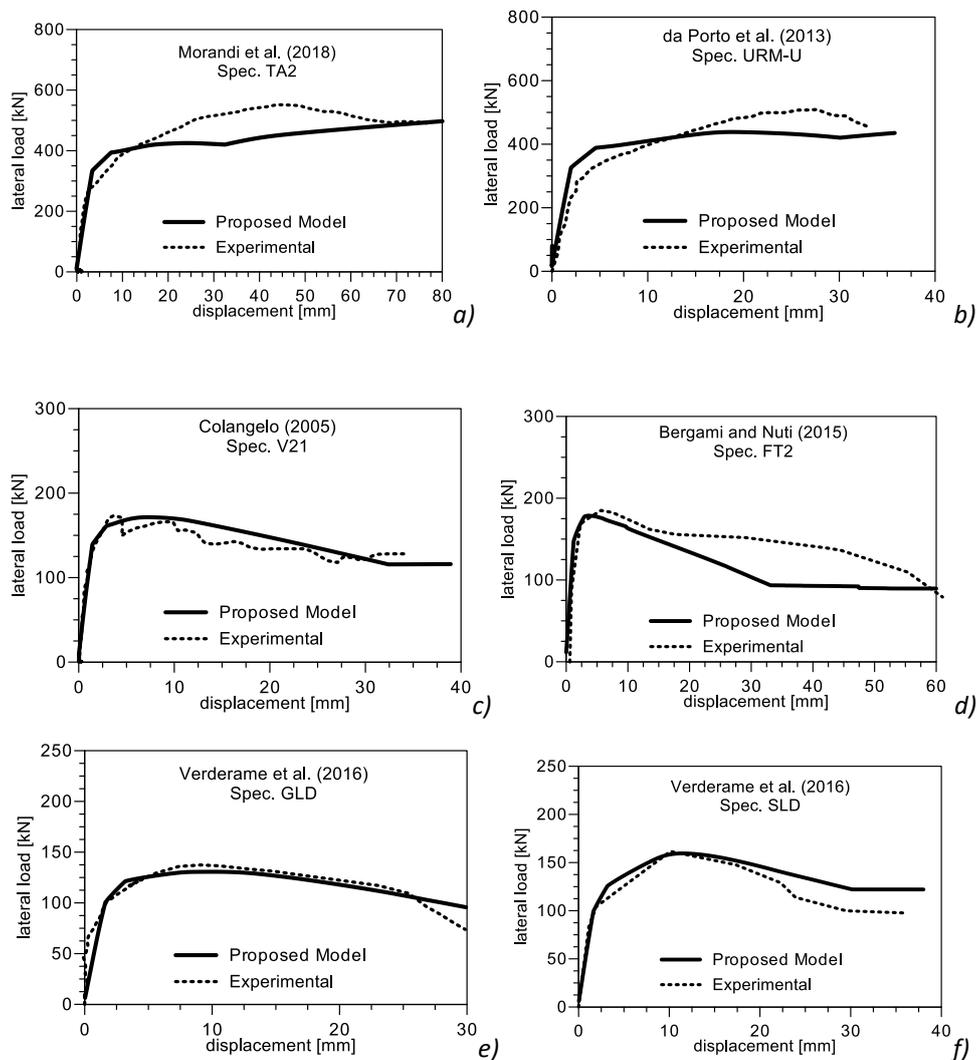


Figura 52. Test di validazione dei modelli proposti: a) Morandi et al., 2018 (TA-2); b) da Porto et al., 2013 (URM-U); c) Colangelo, 2005 (V21); d) Bergami and Nuti, 2015 (FT-2); e) Verderame et al., 2016 (GLD); f) Verderame et al., 2016 (SLD)

Come si vede dalle immagini, per tutti i casi considerati, i risultati delle predizioni numeriche presentano un buon accoppiamento con le curve sperimentali, fornendo una sufficiente affidabilità nonostante la grande eterogeneità dei test usati per la validazione, tenendo anche in considerazione il grado di incertezza, che è in generale presente nella meccanica della muratura, e dei telai tamponati in particolare.

CONCLUSIONI

La valutazione della risposta anelastica dei telai tamponati è un processo molto complicato. I modelli fenomenologici, come i puntone equivalenti, hanno il grande vantaggio di tenere in conto una grande quantità di parametri con l'ausilio di un modello molto semplice. Nonostante ciò la flessibilità dei modelli a puntone equivalente, disponibili in letteratura a rappresentare le risposte forza-spostamento, come una funzione di diversi meccanismi di rottura dei telai tamponati, è limitata. Infatti, gli approcci di tipo meccanico necessitano un'ipotesi di meccanismo di collasso per limitare le condizioni di equilibrio, ma le incertezze nella predizione del meccanismo di collasso, che dipendono da una grande quantità di parametri geometrici e meccanici, si propagano nell'affidabilità dell'estimazione. Inoltre, anche la predizione dell'andamento del ramo di softening è molto complicata con questo tipo di approccio.

Sulla base di questo, il presente elaborato, propone un nuovo approccio basato sull'uso di una sezione a fibre del puntone equivalente. Il metodo non è basato su considerazioni meccaniche, ma su un approccio di tipo empirico per definire le relazioni forza-spostamento da assegnare ai puntone equivalenti.

Il modello prevede la calibrazione di quattro leggi di correlazione analitica che collegano le caratteristiche geometriche e meccaniche di un telaio tamponato con i parametri sforzo-deformazione f_{md0} , ϵ_{md0} , f_{mdu} , ϵ_{mdu} del puntone diagonale rappresentativo del pannello in muratura. Le equazioni di correlazione sono ricavate per mezzo di un set di dati, costruito usando dati sperimentali e simulazioni numeriche.

A prova del funzionamento del modello proposto sono stati fatti dei test di validazione con dei campioni diversi da quelli usati per la correlazione. I risultati hanno dimostrato l'affidabilità predittiva dell'approccio proposto come strumento di validazione, e evidenziando inoltre il potenziale uso delle equazioni di correlazione come strumento di progettazione per i telai tamponati.

RINGRAZIAMENTI

Questa tesi di laurea rappresenta la conclusione di un percorso inaspettatamente lungo e articolato, dove gioie e dolori si sono alternate con un ritmo incalzante. Inoltre questo lavoro è stato elaborato e svolto in un periodo storico estremamente difficile per il mondo intero, che tutti faremo fatica a dimenticare. Per questa ragione credo sia doveroso aggiungere alcune parole di ringraziamento per le persone che ci sono sempre state e quelle che in questi ultimi mesi hanno davvero fatto la differenza.

Innanzitutto devo ringraziare il Prof. Di Trapani per la sua disponibilità e gentilezza, per non avermi mai fatto mancare il suo supporto nonostante le estreme difficoltà, tra cui dover stilare una tesi interamente a distanza e in condizioni psicologiche particolarmente sfavorevoli.

Ringrazio mia mamma Ione per lo sforzo titanico che ha fatto in questi anni, per il suo supporto economico ed emotivo. Una presenza che senz'altro ha fatto la differenza.

Ringrazio i miei fratelli, Giuseppe e Maria, e mia cognata Ylenia per non aver mai fatto mancare momenti di svago e di risate, fondamentali per mantenere l'animo forte nelle difficoltà.

Grazie alla zia Pucci ed a mia cugina Giuli per aver pianto e pregato con me, per aver dipinto orizzonti impossibili e reso la speranza più forte dell'evidenza.

Grazie ai miei cugini americani Joe e Mela: la prova vivente che le distanze non esistono quando i cuori sono vicini.

Ringrazio le mie amiche di sempre Rossana, Federica e Fanny per esserci sempre state, nonostante la distanza e le strade diverse intraprese, e per le infinite risate nel terrazzo a Ragalna che mi hanno riempito di gioia.

Grazie a Silvia per aver curato le ferite più profonde ed essere stata presente a tutte le ore del giorno e della notte, per avermi compresa anche quando nessun sano di mente avrebbe potuto. E grazie agli altri cinque splendidi fiori Monica, Chiara, Mery, Rossella e Eliana: semplicemente meravigliose, un porto sicuro, sicurissimo, nel quale approdare.

Grazie ad Antonio per avermi donato momenti e risate indimenticabili, per aver alleggerito le giornate pesanti soprattutto in questi ultimi mesi particolarmente difficili.

Grazie ad Andrea, Giulia , Pietro ed Elena, altri doni ricevuti in questo percorso, per aver sempre avuto un pensiero per me.

Ancora un grazie va ai miei colleghi del Politecnico di Torino Giulia M., Alex, Lorenzo e Angela S. per avermi accompagnato in questi anni e per avermi insegnato molto più di quanto potrebbe fare qualsiasi corso di studi.

Infine non posso non ringraziare Rossana B. amica e tanto altro, la persona giusta al momento giusto: grazie per aver fatto la differenza, per avermi fatto comprendere mondi inesplorati e per aver sciolto matasse che da sola non sarei mai riuscita a disfare.

Tutti voi siete pezzi dello stesso puzzle senza i quali tutto questo non sarebbe stato possibile quindi non posso che dirvi ancora, con tutto il cuore, grazie!!!

BIBLIOGRAFIA

- [1] D.M. 17 gennaio 2018. *NTC18 - Norme Tecniche per le Costruzioni*. 2018.
- [2] Bachmann, H., & Suisse. Office fédéral de l'environnement. (2003). *Seismic conceptual design of buildings: basic principles for engineers, architects, building owners, and authorities*. SDC.
- [3] Asteris, P. G., Cavaleri, L., Di Trapani, F., & Tsaris, A. K. (2017). Numerical modelling of out-of-plane response of infilled frames: State of the art and future challenges for the equivalent strut macromodels. *Art. Cit.*
- [4] Ricci, P., Di Domenico, M., & Verderame, G. M. (2019). Out-of-plane seismic safety assessment of URM infills accounting for the in-plane/out-of-plane interaction in a nonlinear static framework. *Engineering Structures*, 195, 96-112.
- [5] Di Trapani, F., Macaluso, G., Cavaleri, L., & Papia, M. (2015). Masonry infills and RC frames interaction: literature overview and state of the art of macromodeling approach. *Art. Cit.*
- [6] Mehrabi, A. B., & Shing, P. B. (1997). Finite element modeling of masonry-infilled RC frames. *Journal of structural engineering*, 123(5), 604-613.
- [7] Shing, P. B., & Mehrabi, A. B. (2002). Behaviour and analysis of masonry-infilled frames. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 4(3), 320-331.
- [8] Koutromanos, I., Stavridis, A., Shing, P. B., & Willam, K. (2011). Numerical modeling of masonry-infilled RC frames subjected to seismic loads. *Computers & Structures*, 89(11-12), 1026-1037.
- [9] PEER, «Opensees,» University of California, Berkley, CA, [Online]. Available: <https://opensees.berkeley.edu>.
- [10] Saatcioglu, M., and Razvi, S., 1991, “Analytical model for confined concrete.”, Res. Rep. No. 9101, Dept. of Civ. Engrg., University of Ottawa, Ottawa, ON, Canada, 59.
- [11] Saatcioglu, M., and Razvi, S. R., 1992, “Strength and ductility of confined concrete.”, *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 118(6), 1590–1607.
- [12] Dhakal, R. P., and Maekawa, K., 2002, “Modeling for Postyield Buckling of Reinforcement.”. In: *Journal of Structural Engineering* 128.9, pp.1147
- [13] Fabio Di Trapani; Gabriele Bertagnoli; Marco Filippo Ferrotto; and Diego Gino, 2019, “Empirical Equations for the Direct Definition of Stress–Strain Laws for Fiber-Section-Based Macromodeling of Infilled Frames”
- [14] Cavaleri, L., Di Trapani, F. (2014). “Cyclic response of masonry infilled RC frames: Experimental results and simplified modeling.” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 65, 224–242.
- [15] Mehrabi, A.B., Shing, P.B., Schuller, M.P., Noland, L. (2016). “Experimental Evaluation of Masonry-Infilled RC Frames.” *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 122(3), 228-237.
- [16] Kakaletsis, D.J., Karayannis, C.G. (2009). “Experimental investigation of infilled reinforced concrete frames with openings.” *ACI Structural Journal*, 102(2), 132-141.

- [17] Colangelo, F. (2005). "Pseudo-dynamic seismic response of reinforced concrete frames infilled with non-structural brick masonry." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34, 1219–1241.
- [18] Morandi, P., Hak, S., Magenes, G. (2018). "In-plane Experimental Response of Strong Masonry Infills." *Engineering Structures*, 156, 503-521.
- [19] da Porto, F., Guidi, M., Dalla Benetta, N., Verlato, F. (2013). "Combined in-plane/out-of-plane experimental behaviour of reinforced and strengthened infill masonry walls." *12th Canadian Masonry Symposium*, June 2-5, Vancouver, Canada.
- [20] Bergami, Nuti (2015) "Experimental tests and global modeling of masonry infilled frames"
- [21] G.M. Verderame, P. Ricci, C. Del Gaudio & M.T. De Risi "Experimental tests on masonry infilled gravity- and seismic-load designed RC frames".
- [22] Di Trapani, F., Shing, P.B., Cavaleri, L. (2018). "A Macro-element Model for In-plane and Out-of-plane Responses of Masonry Infills in Frame Structures." *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 144(2), 04017198.

ALLEGATO A

Script di OpenSees del modello di Cavalieri e Di Trapani (2014), campioni S1A e S1B

```
# Create ModelBuilder (with two-dimensions and 3 DOF/node)
wipe

model basic -ndm 3 -ndf 6

# Create nodes
# -----

# Set parameters for overall model geometry
set width 1800.0
set height 1800.0

# Create nodes
# tag X Y Z
node 1 0.0 0.0 0.0
node 2 $width 0.0 0.0
node 3 0.0 $height 0.0
node 4 $width $height 0.0
# node 61 [expr $width/2] [expr $height/2] 0.0
# node 62 [expr $width/2] [expr $height/2] 0.0
# node 63 [expr $width/2] [expr $height/2] 0.0
# node 64 [expr $width/2] [expr $height/2] 0.0
# node 5 [expr $width/2] 0.0 0.0
# node 7 [expr $width/2] 0.0 0.0
# node 8 [expr $width/2] $height 0.0
# node 9 [expr $width/2] $height 0.0
# node 12 0.0 [expr $height/2] 0.0
# node 13 0.0 [expr $height/2] 0.0
# node 14 [expr $width] [expr $height/2] 0.0
# node 15 [expr $width] [expr $height/2] 0.0
# node 33 0.0 $height 0.0
# node 44 $width $height 0.0
# node 11 0.0 0.0 0.0
# node 22 $width 0.0 0.0

# Fix supports at base of columns
# tag DX DY DZ RX RY RZ
fix 1 1 1 1 1 1 0
fix 2 1 1 1 1 1 0
fix 3 0 0 1 0 0 0
fix 4 0 0 1 0 0 0
# fix 5 0 1 0 1 1 0
# fix 9 0 0 0 1 1 0
# fix 6 0 0 1 0 0 0

# 7 8 1 2 3 4 5
# equalDOF 63 62 3
# equalDOF 63 61 3
# equalDOF 63 64 3

# Define materials for nonlinear columns
# -----
# CONCRETE tag f'c ec0 f'cu ecu
# Core concrete (confined)
# uniaxialMaterial Concrete01 1 -55.2 -0.002 -28.7 -0.01
#
# Et
uniaxialMaterial Concrete02 1 -27.0 -0.002 -23.0 -0.01 0.1 0.00 0.00
# Cover concrete (unconfined)
# uniaxialMaterial Concrete01 2 -55.2 -0.002 -27.6 -0.008
uniaxialMaterial Concrete02 2 -25.0 -0.002 -20.0 -0.008 0.10 0.00 0.00
# STEEL
# Reinforcing steel
set fy 450.0; # Yield stress
set E 210000.0; # Young's modulus
# tag fy E0 b
#uniaxialMaterial Steel01 3 $fy $E 0.001
# tag fy E0 b R0 cR1 CR1
uniaxialMaterial Steel02 3 $fy $E 0.01 15 0.925 0.15

# Masonry Tag fpc epsc0 fpcu epscu lambda ft Et
# uniaxialMaterial Concrete02 4 -2.25 -0.0015 -1.35 -0.0080 07 0.0 0.0
# uniaxialMaterial Concrete02 4 -4.5 -0.0010 -2.7 -0.007 0.07 0.0 0.0
uniaxialMaterial Concrete02 4 -2.0 -0.00175 -1.2 -0.01 0.085 0.0 0.0
# (3a) uniaxialMaterial Concrete02 4 -2.15 -0.0015 -0.6 -0.008 0.030 0.0 0.07
# uniaxialMaterial Concrete02 5 -10.85 -0.0015 -6.51 -0.008 0.07 0.0 0.0
# uniaxialMaterial Concrete02 5 -22.90 -0.0015 -13.74 -0.008 0.07 0.0 0.0
# (3a)
# uniaxialMaterial Concrete02 5 -22.82 -0.0015 -13.69 -0.008 0.07 0.0 0.00

set S1 -176833
set e1 -0.00025937
set S2 -252618
set e2 -0.002111993
set S3 -126309
set e3 -0.0099
set S4 -126309
set e4 -19.6518
```

```

#uniaxialMaterial Pinching4 $matTag $ePf1 $ePd1 $ePf2 $ePd2 $ePf3 $ePd3 $ePf4 $ePd4 <$eNf1 $eNd1 $eNf2 $eNd2 $eNf3 $eNd3
$eNf4 $eNd4> $rDispP $rForceP $uForceP <$rDispN $rForceN $uForceN > $gK1 $gK2 $gK3 $gK4 $gKLim $gD1 $gD2 $gD3 $gD4 $gDLim
$gF1 $gF2 $gF3 $gF4 $gFLim $gE $dmgType
uniaxialMaterial Pinching4 10 0 1 0 5 0 10 0 20 $S1 $e1 $S2 $e2 $S3 $e3
$S4 $e4 0.5 0.25 0.05 0.5 0.25 0.05 1 0.2 0.3 0.2 0.9 0.5 0.5 2 2 0.5 1
0 1 1 0.9 10 "cycle"

# Define cross-section for nonlinear columns
# -----
# #####
# set some parameters for COLUMNS sections
set colWidth 200.0
set colDepth 200.0

set cover 20.0
set As 78.5 ; # area of 1 bar

set y1 [expr $colDepth/2.0]
set z1 [expr $colWidth/2.0]

section Fiber 1 {
    # Create the concrete core fibers
    patch rect 1 30 30 [expr $cover-$y1] [expr $cover-$z1] [expr $y1-$cover] [expr $z1-$cover]

    # Create the concrete cover fibers (top, bottom, left, right)
    patch rect 2 20 20 [expr -$y1] [expr $z1-$cover] $y1 $z1
    patch rect 2 20 20 [expr -$y1] [expr -$z1] $y1 [expr $cover-$z1]
    patch rect 2 20 20 [expr -$y1] [expr $cover-$z1] [expr $cover-$y1] [expr $z1-$cover]
    patch rect 2 20 20 [expr $y1-$cover] [expr $cover-$z1] $y1 [expr $z1-$cover]

    # Create the reinforcing fibers (left, middle, right)
    layer straight 3 2 $As [expr -$y1+$cover] [expr $z1-$cover] [expr $y1-$cover] [expr $z1-$cover]
    layer straight 3 0 $As [expr -$y1+$cover] 0.0 [expr $y1-$cover] 0.0
    layer straight 3 2 $As [expr -$y1+$cover] [expr -$z1+$cover] [expr $y1-$cover] [expr -$z1+$cover]
}
#VALORI MATERIALI TAGLIO E TORSIONE PER TUTTE LE SEZIONI
set Gc 25000000
set C250 10
# -----
# column torsional stiffness
# Linear elastic torsion for the column

set GJcol [expr $Gc*$C250*$colDepth*pow($colWidth,3)]
set GAcoll [expr $Gc*$colWidth*$colDepth*5/6]

uniaxialMaterial Elastic 50 $GJcol
uniaxialMaterial Elastic 51 $GAcoll

# Attach torsion to the RC beam section(QUESTO COMANDO ATTACCA TAGLIO E TORSIONE ALLE SEZIONI DELLE TRAVI)
# tag uniTag uniCode secTag
#section Aggregator $secTag $matTag1 $string1 $matTag2 $string2 ..... <-section $sectionTag>
section Aggregator 10 51 Vy 51 Vz 50 T -section 1
# -----
# #####
# set some parameters for EQUIVALENT DIAGONAL STRUT section
set strWidth 1.0
set strDepth 1.0
set coverstr 0.1

set Asp 1.0; # area of 1 bar
# some variables derived from the parameters
set ys1 [expr $strDepth/2.0]
set zs1 [expr $strWidth/2.0]

section Fiber 3 {
    # Create the concrete core fibers
    patch rect 10 30 30 -$ys1 -$zs1 $ys1 $zs1

    # Create the reinforcing fibers (left, middle, right)
    layer straight 3 0 $Asp [expr -$ys1+$coverstr] [expr $zs1-$coverstr] [expr $ys1-$coverstr] [expr $zs1-$coverstr]
    layer straight 3 0 $Asp [expr -$ys1+$coverstr] 0.0 [expr $ys1-$coverstr] 0.0
    layer straight 3 0 $Asp [expr -$ys1+$coverstr] [expr -$zs1+$coverstr] [expr $ys1-$coverstr] [expr -$zs1+$coverstr]
}
# EQSTRUT torsional stiffness
# Linear elastic torsion for the column

set GJstr [expr $Gc*$C250*$strDepth*pow($strWidth,3)]
set GAstr [expr $Gc*$strWidth*$strDepth*5/6]

uniaxialMaterial Elastic 60 $GJstr
uniaxialMaterial Elastic 61 $GAstr

# Attach torsion to the RC beam section(QUESTO COMANDO ATTACCA TAGLIO E TORSIONE ALLE SEZIONI DELLE TRAVI)
# tag uniTag uniCode secTag
#section Aggregator $secTag $matTag1 $string1 $matTag2 $string2 ..... <-section $sectionTag>
section Aggregator 30 61 Vy 61 Vz 60 T -section 3

# #####
# set some parameters for BEAM sections
set beaWidth 400.0
set beaDepth 200.0

set cover 20.0
set Ast 113.0; # area of 1 bar

# some variables derived from the parameters
set yb1 [expr $beaDepth/2.0]
set zb1 [expr $beaWidth/2.0]

```

```

section Fiber 4 {
    # Create the concrete core fibers
    patch rect 1 40 40 [expr $cover-$yb1] [expr $cover-$zb1] [expr $yb1-$cover] [expr $zb1-$cover]

    # Create the concrete cover fibers (top, bottom, left, right)
    patch rect 2 20 10 [expr -$yb1] [expr $zb1-$cover] $yb1 $zb1
    patch rect 2 20 10 [expr -$yb1] [expr -$zb1] $yb1 [expr $cover-$zb1]
    patch rect 2 20 10 [expr -$yb1] [expr $cover-$zb1] [expr $cover-$yb1] [expr $zb1-$cover]
    patch rect 2 20 10 [expr $yb1-$cover] [expr $cover-$zb1] $yb1 [expr $zb1-$cover]

    # Create the reinforcing fibers (left, middle, right)
    layer straight 3 3 $Ast [expr -$yb1+$cover] [expr $zb1-$cover] [expr $yb1-$cover] [expr $zb1-$cover]
    layer straight 3 3 $Ast [expr -$yb1+$cover] [expr -$zb1+$cover] [expr $yb1-$cover] [expr -$zb1+$cover]
}
#
# BEAM torsional stiffness
# Linear elastic torsion for the equivalent strut

set GJbea [expr $Gc*$C250*$beaDepth*pow($beaWidth,3)]
set GAbear [expr $Gc*$beaWidth*$beaDepth*5/6]

uniaxialMaterial Elastic 54 $GJbea
uniaxialMaterial Elastic 55 $GAbear

# Attach torsion to the RC beam section(QUESTO COMANDO ATTACCA TAGLIO E TORSIONE ALLE SEZIONI DELLE TRAVI)
#
#          tag uniTag uniCode secTag
#section Aggregator $secTag $matTag1 $string1 $matTag2 $string2 ..... <-section $sectionTag>
section Aggregator 40 55 Vy 55 Vz 54 T -section 4

# #####
#COLUMNS#
# Geometry of column elements
#          tag

geomTransf Linear 1 -1 0 0

# Number of integration points along length of element
set np 5
set nps 10
# Create the columns using Beam-column elements
#          e          tag nDI nDJ nsecs secID transfTag
set eleType forceBeamColumn
element $eleType 1 1 3 $np 10 1
# element $eleType 101 12 3 $np 10 1
element $eleType 2 2 4 $np 10 1
# element $eleType 202 15 4 $np 10 1
# #####
#BEAMS#
# Define beam element
# -----

# Geometry of beam elements
#          tag
geomTransf Linear 2 0 1 0
geomTransf Corotational 3 0 1 0
geomTransf Corotational 4 -1 0 0
#1=4
#2=3
set tranfoloriz 2
set tranfelvert 1
set tranfolorizcor 3
set tranfelvertcor 4

# Create the NONLINEAR BEAM using Beam-column elements
#          e          tag nDI nDJ nsecs secID transfTag
set eleType2 dispBeamColumn
# TRAVI
# element $eleType 3 1 2 $np 40 $tranfoloriz
element $eleType 4 3 4 $np 40 $tranfoloriz
# element $eleType 11 1 5 $np 40 $tranfoloriz
# element $eleType 12 5 2 $np 40 $tranfoloriz
# VERTICAL
# element $eleType2 9 7 63 $nps 50 $tranfelvertcor
# element $eleType2 10 63 8 $nps 50 $tranfelvertcor
# HORIZONTAL
# element $eleType2 13 13 64 $nps 80 $tranfolorizcor
# element $eleType2 14 64 14 $nps 80 $tranfolorizcor

#DIAGONAL

# element trussSection $eleTag $iNode $jNode $secTag

element trussSection 5 3 2 30
# element trussSection 6 1 4 30

# element $eleType2 7 1 62 $nps 30 $tranfoloriz
# element $eleType2 8 62 44 $nps 30 $tranfoloriz

# Create the ELASTIC BEAM beam element
#          eleTag iNode jNode A E G J Iy Iz transfTag
transfTag
element elasticBeamColumn 11 1 2 8000000 3000000 1000000 1066666666 1066666666 1066666666 $tranfoloriz
# element elasticBeamColumn 12 5 2 8000000 3000000 1000000 1066666666 1066666666 1066666666 2

# #####
# Create the Truss element infill
#          tag
#geomTransf Linear 3 1 0 0

```

```

#          tag ndI ndJ          A          Mat  SectionTag          30
# element trussSection          5  3  61
# element trussSection          6  61  2          30
# element trussSection          7  1  62          30
# element trussSection          8  62  4          30

#element zeroLength $eleID $Node1ID $Node2ID -mat $matID $matID -dir 1 2
#uniaxialMaterial Elastic $matTag $E

uniaxialMaterial Elastic 20 500000000;

# uniaxialMaterial Elastic 10 100;
# uniaxialMaterial Elastic 15 100;

#          #          Tag E  Fy  GAP
# uniaxialMaterial ElasticPPGap 41 100 10000 10000;
# uniaxialMaterial ElasticPPGap 101 1000000 -100000 0.0;
# uniaxialMaterial Parallel 90 41 101;
# uniaxialMaterial Series 99 41 20;
# uniaxialMaterial ENT 91 500000000;

#VERTICAL
# element zeroLength 90 5 7 -mat 20 20 20 15 10 10 -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 0 1 0 -1 0 0
# element zeroLength 91 8 9 -mat 20 20 20 15 10 10 -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 0 1 0 -1 0 0
#HORIZONTAL
# element zeroLength 88 12 13 -mat 20 20 20 15 10 10 -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 0 0 0 1 0
# element zeroLength 89 14 15 -mat 20 20 20 15 10 10 -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 0 0 0 1 0
#DIAGONAL
# element zeroLength 92 1 11 -mat 20 20 20 15 10 10 -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 1 0 -1 1 0
# element zeroLength 93 44 4 -mat 91 20 20 15 10 10 -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 1 0 -1 1 0
# element zeroLength 94 3 33 -mat 91 20 20 15 10 10 -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 -1 0 1 1 0
# element zeroLength 95 22 2 -mat 20 20 20 15 10 10 -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 -1 0 1 1 0

# Define gravity loads
# -----

# Set a parameter for the axial load
set P 200000.0;          # 10% of axial capacity of columns

# Create a Plain load pattern with a Linear TimeSeries
pattern Plain 1 "Linear" {
    # Create nodal loads at nodes 3 & 4
    #   nd   FX   FY  FZ   MX  MY  MZ
    load 3  0.0 [expr -$P] 0.0 0.0 0.0 0.0
    load 4  0.0 [expr -$P] 0.0 0.0 0.0 0.0
    # load 9  0.0 [expr -$P/4] 0.0 0.0 0.0 0.0
    #   load 61 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
    #   load 62 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
    #   load 63 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
}

# -----
# End of model generation
# -----

# -----
# Start of analysis generation
# -----

# Create the system of equation, a sparse solver with partial pivoting
system BandGeneral

# Create the constraint handler, the transformation method
constraints Transformation

# Create the DOF numberer, the reverse Cuthill-McKee algorithm
numberer RCM

# Create the convergence test, the norm of the residual with a tolerance of
# 1e-12 and a max number of iterations of 10
test NormDispIncr 1.0e-12 1000 3

# Create the solution algorithm, a Newton-Raphson algorithm
algorithm Newton

# Create the integration scheme, the LoadControl scheme using steps of 0.1
integrator LoadControl 0.1

# Create the analysis object
analysis Static

# -----
# End of analysis generation
# -----

# -----
# Finally perform the analysis
# -----

# perform the gravity load analysis, requires 10 steps to reach the load level

```

```
analyze 10
# Print out the state of nodes 3 and 4
print node 3

# Print out the state of element 1
print ele 1 2
```

Script di OpenSees del modello di Mehrabi et al. (1996), campioni 4, 5, 6 e 11

```

# Create ModelBuilder (with two-dimensions and 3 DOF/node)

wipe

model basic -ndm 3 -ndf 6

# Create nodes
# -----

# Set parameters for overall model geometry
set width 2210.0
set height 1536.3

# Create nodes
# tag X Y Z
node 1 0.0 0.0 0.0
node 2 $width 0.0 0.0
node 3 0.0 $height 0.0
node 4 $width $height 0.0
# node 61 [expr $width/2] [expr $height/2] 0.0
# node 62 [expr $width/2] [expr $height/2] 0.0
# node 63 [expr $width/2] [expr $height/2] 0.0
# node 64 [expr $width/2] [expr $height/2] 0.0
# node 5 [expr $width/2] 0.0 0.0
# node 7 [expr $width/2] 0.0 0.0
# node 8 [expr $width/2] $height 0.0
# node 9 [expr $width/2] $height 0.0
# node 12 0.0 [expr $height/2] 0.0
# node 13 0.0 [expr $height/2] 0.0
# node 14 [expr $width] [expr $height/2] 0.0
# node 15 [expr $width] [expr $height/2] 0.0
# node 33 0.0 $height 0.0
# node 44 $width $height 0.0
# node 11 0.0 0.0 0.0
# node 22 $width 0.0 0.0

# Fix supports at base of columns
# tag DX DY DZ RX RY RZ
fix 1 1 1 1 1 1 0
fix 2 1 1 1 1 1 0
# fix 3 0 0 0 1 1 0
# fix 4 0 0 0 1 1 0
# fix 5 0 1 0 1 1 0
# fix 9 0 0 0 1 1 0
# fix 6 0 0 1 0 0 0

# 7 8 1 2 3 4 5
# equalDOF 3 4 1
# equalDOF 63 61 3
# equalDOF 63 64 3

# Define materials for nonlinear columns
# -----
# CONCRETE tag f'c ec0 f'cu ecu
# Core concrete (confined)
# uniaxialMaterial Concrete01 1 -55.2 -0.002 -28.7 -0.01
# Tag fpc epsc0 fpcu epscu lambda ft
Et
uniaxialMaterial Concrete02 1 -29.0 -0.002 -25.0 -0.01 0.1 0.00 0.00
# Cover concrete (unconfined)
# uniaxialMaterial Concrete01 2 -55.2 -0.002 -27.6 -0.008
uniaxialMaterial Concrete02 2 -29.8 -0.002 -22.5 -0.008 0.1 0.00 0.00
# STEEL
# Reinforcing steel
set fy 450.0; # Yield stress
set E 210000.0; # Young's modulus
# tag fy E0 b
#uniaxialMaterial Steel01 3 $fy $E 0.001
# tag fy E0 b R0 cR1 CR1
uniaxialMaterial Steel02 3 $fy $E 0.0 15 0.925 0.15

# Masonry Tag fpc epsc0 fpcu epscu lambda ft Et
# uniaxialMaterial Concrete02 4 -2.25 -0.0015 -1.35 -0.0080 07 0.0 0.0
# uniaxialMaterial Concrete02 4 -4.5 -0.0010 -2.7 -0.007 0.07 0.0 0.0
uniaxialMaterial Concrete02 4 -2.6 -0.0008 -0.65 -0.009 0.07 0.0 0.0
# (3a) uniaxialMaterial Concrete02 4 -2.2 -0.0012 -0.6 -0.008 0.030 0.0 0.07
# uniaxialMaterial Concrete02 5 -10.85 -0.0015 -6.51 -0.008 0.07 0.0 0.0
# uniaxialMaterial Concrete02 5 -22.90 -0.0015 -13.74 -0.008 0.07 0.0 0.0
# (3a)
# uniaxialMaterial Concrete02 5 -22.82 -0.0015 -13.69 -0.008 0.07 0.0 0.00

set S1 -116534
set e1 -0.00046957
set S2 -129482
set e2 -0.0009913
set S3 -38844
set e3 -0.01036
set S4 -38844
set e4 -18.5884

#uniaxialMaterial Pinching4 $matTag $ePf1 $ePd1 $ePf2 $ePd2 $ePf3 $ePd3 $ePf4 $ePd4 <$eNf1 $eNd1 $eNf2 $eNd2 $eNf3 $eNd3
$eNf4 $eNd4> $rDispP $rForceP $uForceP <$rDispN $rForceN $uForceN > $gK1 $gK2 $gK3 $gK4 $gKLim $gD1 $gD2 $gD3 $gD4 $gDLim
$gF1 $gF2 $gF3 $gF4 $gFLim $gE $dmgType

```

```

uniaxialMaterial Pinching4 10 0 1 0 5 0 10 0 20 $S1 $e1 $S2 $e2 $S3 $e3
$S4 $e4 0.5 0.25 0.05 0.5 0.25 0.05 1 0.2 0.3 0.2 0.9 0.5 0.5 2 2 0.5 $e3
0 1 1 0.9 10 "cycle"

```

```

# Define cross-section for nonlinear columns

```

```

# -----
# #####
# set some parameters for COLUMNS sections
set colWidth 178
set colDepth 178

```

```

set cover 25.0
set As 126.617 ; # area of 1 bar

```

```

set y1 [expr $colDepth/2.0]
set z1 [expr $colWidth/2.0]

```

```

section Fiber 1 {

```

```

    # Create the concrete core fibers
    patch rect 1 30 30 [expr $cover-$y1] [expr $cover-$z1] [expr $y1-$cover] [expr $z1-$cover]

```

```

    # Create the concrete cover fibers (top, bottom, left, right)
    patch rect 2 20 20 [expr -$y1] [expr $z1-$cover] $y1 $z1
    patch rect 2 20 20 [expr -$y1] [expr -$z1] $y1 [expr $cover-$z1]
    patch rect 2 20 20 [expr -$y1] [expr $cover-$z1] [expr $cover-$y1] [expr $z1-$cover]
    patch rect 2 20 20 [expr $y1-$cover] [expr $cover-$z1] $y1 [expr $z1-$cover]

```

```

    # Create the reinforcing fibers (left, middle, right)
    layer straight 3 3 $As [expr -$y1+$cover] [expr $z1-$cover] [expr $y1-$cover] [expr $z1-$cover]
    layer straight 3 2 $As [expr -$y1+$cover] 0.0 [expr $y1-$cover] 0.0
    layer straight 3 3 $As [expr -$y1+$cover] [expr -$z1+$cover] [expr $y1-$cover] [expr -$z1+$cover]

```

```

}
#VALORI MATERIALI TAGLIO E TORSIONE PER TUTTE LE SEZIONI
set Gc 25000000
set C250 10

```

```

# column torsional stiffness
# Linear elastic torsion for the column

```

```

set GJcol [expr $Gc*$C250*$colDepth*pow($colWidth,3)]
set GAcot [expr $Gc*$colWidth*$colDepth*5/6]

```

```

uniaxialMaterial Elastic 50 $GJcol
uniaxialMaterial Elastic 51 $GAcot

```

```

# Attach torsion to the RC beam section (QUESTO COMANDO ATTACCA TAGLIO E TORSIONE ALLE SEZIONI DELLE TRAVI)
# tag uniTag uniCode secTag
#section Aggregator $secTag $matTag1 $string1 $matTag2 $string2 ..... <-section $sectionTag>
section Aggregator 10 51 Vy 51 Vz 50 T -section 1
#

```

```

# #####
# set some parameters for EQUIVALENT DIAGONAL STRUT section
set strWidth 1.0
set strDepth 1.0
set coverstr 0.1

```

```

set Asp 1.0; # area of 1 bar
# some variables derived from the parameters
set y1 [expr $strDepth/2.0]
set z1 [expr $strWidth/2.0]

```

```

section Fiber 3 {

```

```

    # Create the concrete core fibers
    patch rect 10 30 30 -$y1 -$z1 $y1 $z1

```

```

    # Create the reinforcing fibers (left, middle, right)
    layer straight 3 2 $Asp [expr -$y1+$coverstr] [expr $z1-$coverstr] [expr $y1-$coverstr] [expr $z1-$coverstr]
    layer straight 3 2 $Asp [expr -$y1+$coverstr] 0.0 [expr $y1-$coverstr] 0.0
    layer straight 3 2 $Asp [expr -$y1+$coverstr] [expr -$z1+$coverstr] [expr $y1-$coverstr] [expr -$z1+$coverstr]

```

```

}
# EQSTRUT torsional stiffness
# Linear elastic torsion for the column

```

```

set GJstr [expr $Gc*$C250*$strDepth*pow($strWidth,3)]
set GAstr [expr $Gc*$strWidth*$strDepth*5/6]

```

```

uniaxialMaterial Elastic 60 $GJstr
uniaxialMaterial Elastic 61 $GAstr

```

```

# Attach torsion to the RC beam section (QUESTO COMANDO ATTACCA TAGLIO E TORSIONE ALLE SEZIONI DELLE TRAVI)
# tag uniTag uniCode secTag
#section Aggregator $secTag $matTag1 $string1 $matTag2 $string2 ..... <-section $sectionTag>
section Aggregator 30 61 Vy 61 Vz 60 T -section 3

```

```

# set some parameters for EQUIVALENT VERTICAL STRUT section
set vWidth 726.67
set vDepth 143.0
set coverv 10.0

```

```

# set Asv 1.0; # area of 1 bar
# some variables derived from the parameters
# set yv [expr $vDepth/2.0]
# set zv [expr $vWidth/2.0]

```

```

section Fiber 5 {

```

```

    # Create the concrete core fibers
    # patch rect 5 30 30 -$yv -$zv $yv $zv

```

```

# Create the reinforcing fibers (left, middle, right)
# layer straight 3 3 $Asv [expr -$yv+$coverv] [expr $zv-$coverv] [expr $yv-$coverv] [expr $zv-$coverv]
# layer straight 3 2 $Asv [expr -$yv+$coverv] 0.0 [expr $yv-$coverv] 0.0
# layer straight 3 3 $Asv [expr -$yv+$coverv] [expr -$zv+$coverv] [expr $yv-$coverv] [expr -$zv+$coverv]
)
# EQSTRUT torsional stiffness
# Linear elastic torsion for the column

set GJv [expr $Gc*$C250*$vDepth*pow($vWidth,3)]
set GAv [expr $Gc*$vWidth*$vDepth*5/6]

uniaxialMaterial Elastic 70 $GJv
uniaxialMaterial Elastic 71 $GAv

# Attach torsion to the RC beam section(QUESTO COMANDO ATTACCA TAGLIO E TORSIONE ALLE SEZIONI DELLE TRAVI)
# tag uniTag uniCode secTag
# section Aggregator $secTag $matTag1 $string1 $matTag2 $string2 ..... <-section $sectionTag>
section Aggregator 50 71 Vy 71 Vz 70 T -section 5

# #####
# set some parameters for EQUIVALENT HORIZONTAL STRUT section
set hWidth 453.7
set hDepth 143.0
set coverstrh 10.0

# set Ash 1.0; # area of 1 bar
# some variables derived from the parameters
# set yh [expr $hDepth/2.0]
# set zh [expr $hWidth/2.0]

# section Fiber 8 {
# Create the concrete core fibers
# patch rect 5 30 30 -$yh -$zh $yh $zh

# Create the reinforcing fibers (left, middle, right)
# layer straight 3 3 $Ash [expr -$yh+$coverstrh] [expr $zh-$coverstrh] [expr $yh-$coverstrh] [expr $zh-$coverstrh]
# layer straight 3 2 $Ash [expr -$yh+$coverstrh] 0.0 [expr $yh-$coverstrh] 0.0
# layer straight 3 3 $Ash [expr -$yh+$coverstrh] [expr -$zh+$coverstrh] [expr $yh-$coverstrh] [expr -$zh+$coverstrh]
# }
# EQSTRUT torsional stiffness
# Linear elastic torsion for the column

set GJh [expr $Gc*$C250*$hDepth*pow($hWidth,3)]
set GAh [expr $Gc*$hWidth*$hDepth*5/6]

uniaxialMaterial Elastic 80 $GJh
uniaxialMaterial Elastic 81 $GAh

# Attach torsion to the RC beam section(QUESTO COMANDO ATTACCA TAGLIO E TORSIONE ALLE SEZIONI DELLE TRAVI)
# tag uniTag uniCode secTag
# section Aggregator $secTag $matTag1 $string1 $matTag2 $string2 ..... <-section $sectionTag>
# section Aggregator 80 81 Vy 81 Vz 80 T -section 8

# #####
# set some parameters for BEAM sections
set beaWidth 228.6
set beaDepth 152.4

set cover 20.0
set Ast 197.7; # area of 1 bar

# some variables derived from the parameters
set yb1 [expr $beaDepth/2.0]
set zb1 [expr $beaWidth/2.0]

section Fiber 4 {
# Create the concrete core fibers
patch rect 1 40 40 [expr $cover-$yb1] [expr $cover-$zb1] [expr $yb1-$cover] [expr $zb1-$cover]

# Create the concrete cover fibers (top, bottom, left, right)
patch rect 2 20 10 [expr -$yb1] [expr $zb1-$cover] $yb1 $zb1
patch rect 2 20 10 [expr -$yb1] [expr -$zb1] $yb1 [expr $cover-$zb1]
patch rect 2 20 10 [expr -$yb1] [expr $cover-$zb1] [expr $cover-$yb1] [expr $zb1-$cover]
patch rect 2 20 10 [expr $yb1-$cover] [expr $cover-$zb1] $yb1 [expr $zb1-$cover]

# Create the reinforcing fibers (left, middle, right)
layer straight 3 2 $Ast [expr -$yb1+$cover] [expr $zb1-$cover] [expr $yb1-$cover] [expr $zb1-$cover]
layer straight 3 2 $Ast [expr -$yb1+$cover] [expr -$zb1+$cover] [expr $yb1-$cover] [expr -$zb1+$cover]
}
# BEAM torsional stiffness
# Linear elastic torsion for the equivalent strut

set GJbea [expr $Gc*$C250*$beaDepth*pow($beaWidth,3)]
set GAbea [expr $Gc*$beaWidth*$beaDepth*5/6]

uniaxialMaterial Elastic 54 $GJbea
uniaxialMaterial Elastic 55 $GAbea

# Attach torsion to the RC beam section(QUESTO COMANDO ATTACCA TAGLIO E TORSIONE ALLE SEZIONI DELLE TRAVI)
# tag uniTag uniCode secTag
#section Aggregator $secTag $matTag1 $string1 $matTag2 $string2 ..... <-section $sectionTag>
section Aggregator 40 55 Vy 55 Vz 54 T -section 4

# #####
#COLUMNS#
# Geometry of column elements
# tag

geomTransf Linear 1 -1 0 0

```

```

# Number of integration points along length of element
set np 5
set nps 10
# Create the columns using Beam-column elements
#
# e tag ndI ndJ nsecs secID transfTag
set eleType forceBeamColumn
element $eleType 1 1 3 $np 10 1
# element $eleType 101 12 3 $np 10 1
element $eleType 2 2 4 $np 10 1
# element $eleType 202 15 4 $np 10 1
#####
#BEAMS#
# Define beam element
# -----

# Geometry of beam elements
# tag
geomTransf Linear 2 0 1 0
geomTransf Corotational 3 0 1 0
geomTransf Corotational 4 -1 0 0
#1=4
#2=3
set tranfeloriz 2
set tranfelvert 1
set tranfelorizcor 3
set tranfelvertcor 4

# Create the NONLINEAR BEAM using Beam-column elements
#
# e tag ndI ndJ nsecs secID transfTag
set eleType2 dispBeamColumn
# TRAVI
# element $eleType 3 1 2 $np 40 $tranfeloriz
element $eleType 4 3 4 $np 40 $tranfeloriz
# element $eleType 11 1 5 $np 40 $tranfeloriz
# element $eleType 12 5 2 $np 40 $tranfeloriz
# VERTICAL
# element $eleType2 9 7 63 $nps 50 $tranfelvertcor
# element $eleType2 10 63 8 $nps 50 $tranfelvertcor
# HORIZONTAL
# element $eleType2 13 13 64 $nps 80 $tranfelorizcor
# element $eleType2 14 64 14 $nps 80 $tranfelorizcor

#DIAGONAL

# element trussSection $eleTag $iNode $jNode $secTag

element trussSection 5 3 2 30
#element trussSection 6 1 4 30

# element $eleType2 7 1 62 $nps 30 $tranfeloriz
# element $eleType2 8 62 44 $nps 30 $tranfeloriz

# Create the ELASTIC BEAM beam element

# eleTag iNode jNode A E G J Iy Iz transfTag
transfTag
element elasticBeamColumn 11 1 2 8000000 3000000 1000000 1066666666 1066666666 1066666666 $tranfeloriz
# element elasticBeamColumn 12 5 2 8000000 3000000 1000000 1066666666 1066666666 1066666666 2

#####
# Create the Truss element infill
# tag
#geomTransf Linear 3 1 0 0

# tag ndI ndJ A Mat SectionTag
# element trussSection 5 3 61 30
# element trussSection 6 61 2 30
# element trussSection 7 1 62 30
# element trussSection 8 62 4 30

#element zeroLength $eleID $Node1ID $Node2ID -mat $matID $matID -dir 1 2
#uniaxialMaterial Elastic $matTag $E

uniaxialMaterial Elastic 20 500000000;

# uniaxialMaterial Elastic 10 100;
# uniaxialMaterial Elastic 15 100;

# Tag E Fy GAP
# uniaxialMaterial ElasticPPGap 41 100 10000 10000;
# uniaxialMaterial ElasticPPGap 101 1000000 -100000 0.0;
# uniaxialMaterial Parallel 90 41 101;
# uniaxialMaterial Series 99 41 20;
# uniaxialMaterial ENT 91 500000000;

#VERTICAL
# element zeroLength 90 5 7 -mat 20 20 20 15 10 10 -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 0 1 0 -1 0 0
# element zeroLength 91 8 9 -mat 20 20 20 15 10 10 -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 0 1 0 -1 0 0
#HORIZONTAL
# element zeroLength 88 12 13 -mat 20 20 20 15 10 10 -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 0 0 0 1 0
# element zeroLength 89 14 15 -mat 20 20 20 15 10 10 -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 0 0 0 1 0
#DIAGONAL
# element zeroLength 92 1 11 -mat 20 20 20 15 10 10 -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 1 0 -1 1 0

```

```

# element zeroLength 93 44 4 -mat 91 20 20 15 10 10 -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 1 0 -1 1 0
# element zeroLength 94 3 33 -mat 91 20 20 15 10 10 -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 -1 0 1 1 0
# element zeroLength 95 22 2 -mat 20 20 20 15 10 10 -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 -1 0 1 1 0

# Define gravity loads
# -----

# Set a parameter for the axial load
set P 147000.0; # 10% of axial capacity of columns

# Create a Plain load pattern with a Linear TimeSeries
pattern Plain 1 "Linear" {
    # Create nodal loads at nodes 3 & 4
    # nd FX FY FZ MX MY MZ
    load 3 0.0 [expr -$P] 0.0 0.0 0.0 0.0
    load 4 0.0 [expr -$P] 0.0 0.0 0.0 0.0
    # load 9 0.0 [expr -$P/4] 0.0 0.0 0.0 0.0
    # load 61 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
    # load 62 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
    # load 63 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
}

# -----
# End of model generation
# -----

# -----
# Start of analysis generation
# -----

# Create the system of equation, a sparse solver with partial pivoting
system BandGeneral

# Create the constraint handler, the transformation method
constraints Transformation

# Create the DOF numberer, the reverse Cuthill-McKee algorithm
numberer RCM

# Create the convergence test, the norm of the residual with a tolerance of
# 1e-12 and a max number of iterations of 10
test NormDispIncr 1.0e-12 1000 3

# Create the solution algorithm, a Newton-Raphson algorithm
algorithm Newton

# Create the integration scheme, the LoadControl scheme using steps of 0.1
integrator LoadControl 0.1

# Create the analysis object
analysis Static

# -----
# End of analysis generation
# -----

# -----
# Finally perform the analysis
# -----

# perform the gravity load analysis, requires 10 steps to reach the load level
analyze 10

# Print out the state of nodes 3 and 4
print node 3

# Print out the state of element 1
print ele 1 2

```

Script di OpenSees del modello di Kakaletsis e Karayannis (2009), campione S

```
# Create ModelBuilder (with two-dimensions and 3 DOF/node)
```

```
wipe
```

```
model basic -ndm 3 -ndf 6
```

```
# Create nodes
```

```
# -----
```

```
# Set parameters for overall model geometry
```

```
set width 1350.0
```

```
set height 900.0
```

```
# Create nodes
```

```
# tag X Y Z
```

```
node 1 0.0 0.0 0.0
```

```
node 2 $width 0.0 0.0
```

```
node 3 0.0 $height 0.0
```

```
node 4 $width $height 0.0
```

```
# node 61 [expr $width/2] [expr $height/2] 0.0
```

```
# node 62 [expr $width/2] [expr $height/2] 0.0
```

```
# node 63 [expr $width/2] [expr $height/2] 0.0
```

```
# node 64 [expr $width/2] [expr $height/2] 0.0
```

```
# node 5 [expr $width/2] 0.0 0.0
```

```
# node 7 [expr $width/2] 0.0 0.0
```

```
# node 8 [expr $width/2] $height 0.0
```

```
# node 9 [expr $width/2] $height 0.0
```

```
# node 12 0.0 [expr $height/2] 0.0
```

```
# node 13 0.0 [expr $height/2] 0.0
```

```
# node 14 [expr $width] [expr $height/2] 0.0
```

```
# node 15 [expr $width] [expr $height/2] 0.0
```

```
# node 33 0.0 $height 0.0
```

```
# node 44 $width $height 0.0
```

```
# node 11 0.0 0.0 0.0
```

```
# node 22 $width 0.0 0.0
```

```
# Fixupports at base of columns
```

```
# tag DX DY DZ RX RY RZ
```

```
fix 1 1 1 1 1 1 0
```

```
fix 2 1 1 1 1 1 0
```

```
# fix 3 0 0 0 1 1 0
```

```
# fix 4 0 0 0 1 1 0
```

```
# fix 5 0 1 0 1 1 0
```

```
# fix 9 0 0 0 1 1 0
```

```
# fix 6 0 0 1 0 0 0
```

```
# 7 8 1 2 3 4 5
```

```
# equalDOF 63 62 3
```

```

# equalDOF 63 61 3
# equalDOF 63 64 3

# Define materials for nonlinear columns
# -----
# CONCRETE          tag  f'c      ec0  f'cu      ecu
# Core concrete (confined)
# uniaxialMaterial Concrete01  1  -55.2  -0.002  -28.7  -0.01
#
#                               Tag  fpc      epsc0  fpcu      epscu      lambda  ft
Et
uniaxialMaterial Concrete02  1  -30.1  -0.002  -27.0  -0.01  0.12  0.00  0.00
# Cover concrete (unconfined)
# uniaxialMaterial Concrete01  2  -55.2  -0.002  -27.6  -0.008
uniaxialMaterial Concrete02  2  -28.51  -0.002  -26.0  -0.008  0.12  0.00  0.00
# STEEL
# Reinforcing steel
set fy 400.0;      # Yield stress
set E 210000.0;   # Young's modulus
#
#           tag  fy  E0  b
#uniaxialMaterial Steel01  3  $fy $E 0.001
#
#           tag  fy  E0  b      R0  cR1  CR1
uniaxialMaterial Steel02  3  $fy $E 0.0  15  0.925  0.15

# Masonry          Tag      fpc      epsc0      fpcu      epscu      lambda      ft      Et
# uniaxialMaterial Concrete02  4  -2.25      -0.0015      -1.35 -0.0080      07  0.0 0.0
# uniaxialMaterial Concrete02  4  -4.5      -0.0010      -2.7 -0.007      0.07  0.0 0.0
# uniaxialMaterial Concrete02  4  -2.3 -0.0020      -0.85 -0.015  0.00  0.0 0.0
# (3a) uniaxialMaterial Concrete02  4  -2.2 -0.0012      -0.6 -0.008  0.030 0.0 0.07
# uniaxialMaterial Concrete02  5  -10.85 -0.0015      -6.51 -0.008  0.07  0.0 0.0
# uniaxialMaterial Concrete02  5  -22.90 -0.0015      -13.74 -0.008  0.07  0.0 0.0
# (3a)
# uniaxialMaterial Concrete02  5  -22.82 -0.0015      -13.69 -0.008  0.07 0.0 0.00

set S1 -51896
set e1 -0.00276491
set S2 -64870
set e2 -0.00449
set S3 -25948
set e3 -0.01705
set S4 -24948
set e4 -30.8337

#uniaxialMaterial Pinching4 $matTag $ePf1 $ePd1 $ePf2 $ePd2 $ePf3 $ePd3 $ePf4 $ePd4 <$eNf1 $eNd1 $eNf2 $eNd2 $eNf3 $eNd3
#$eNf4 $eNd4> $rDispP $rForceP $uForceP <$rDispN $rForceN $uForceN > $gK1 $gK2 $gK3 $gK4 $gKLim $gD1 $gD2 $gD3 $gD4 $gDLim
#$gF1 $gF2 $gF3 $gF4 $gFLim $gE $dmgType

```

```

uniaxialMaterial Pinching4 10 0 1 0 5 0 10 0 20 $S1 $e1 $S2 $e2 $S3 $e3
$S4 $e4 0.5 0.25 0.05 0.5 0.25 0.05 1 0.2 0.3 0.2 0.9 0.5 0.5 2 2 0.5 1
0 1 1 0.9 10 "cycle"

```

```

# Define cross-section for nonlinear columns

```

```

# -----
# #####

```

```

# set some paramaters for COLUMNS sections

```

```

set colWidth 150.0
set colDepth 150.0

```

```

set cover 25.0

```

```

set As 24.6 ; # area of 1 bar

```

```

set y1 [expr $colDepth/2.0]

```

```

set z1 [expr $colWidth/2.0]

```

```

section Fiber 1 {

```

```

# Create the concrete core fibers

```

```

patch rect 1 30 30 [expr $cover-$y1] [expr $cover-$z1] [expr $y1-$cover] [expr $z1-$cover]

```

```

# Create the concrete cover fibers (top, bottom, left, right)

```

```

patch rect 2 20 20 [expr -$y1] [expr $z1-$cover] $y1 $z1

```

```

patch rect 2 20 20 [expr -$y1] [expr -$z1] $y1 [expr $cover-$z1]

```

```

patch rect 2 20 20 [expr -$y1] [expr $cover-$z1] [expr $cover-$y1] [expr $z1-$cover]

```

```

patch rect 2 20 20 [expr $y1-$cover] [expr $cover-$z1] $y1 [expr $z1-$cover]

```

```

# Create the reinforcing fibers (left, middle, right)

```

```

layer straight 3 3 $As [expr -$y1+$cover] [expr $z1-$cover] [expr $y1-$cover] [expr $z1-$cover]

```

```

layer straight 3 2 $As [expr -$y1+$cover] 0.0 [expr $y1-$cover] 0.0

```

```

layer straight 3 3 $As [expr -$y1+$cover] [expr -$z1+$cover] [expr $y1-$cover] [expr -$z1+$cover]

```

```

}

```

```

#VALORI MATERIALI TAGLIO E TORSIONE PER TUTTE LE SEZIONI

```

```

set Gc 25000000

```

```

set C250 10

```

```

# _____

```

```

# column torsional stiffness

```

```

# Linear elastic torsion for the column

```

```

set GJcol [expr $Gc*$C250*$colDepth*pow($colWidth,3)]

```

```

set GAcot [expr $Gc*$colWidth*$colDepth*5/6]

```

```

uniaxialMaterial Elastic 50 $GJcol

```

```

uniaxialMaterial Elastic 51 $GAcot

```

```

# Attach torsion to the RC beam section(QUESTO COMANDO ATTACCA TAGLIO E TORSIONE ALLE SEZIONI DELLE TRAVI)

```

```

#          tag uniTag uniCode secTag
#section Aggregator $secTag $matTag1 $string1 $matTag2 $string2 ..... <-section $sectionTag>
section Aggregator    10    51 Vy      51 Vz    50 T      -section 1
# _____

# #####

# set some paramaters for EQUIVALENT DIAGONAL STRUT section
set strWidth 1.0
set strDepth 1.0
set coverstr 0.1

set Asp  1.0;      # area of 1 bar
# some variables derived from the parameters
set ys1 [expr $strDepth/2.0]
set zs1 [expr $strWidth/2.0]

section Fiber 3 {

    # Create the concrete core fibers
    patch rect 10 30 30 -$ys1 -$zs1 $ys1 $zs1

    # Create the reinforcing fibers (left, middle, right)
    layer straight 3 2 $Asp [expr -$ys1+$coverstr] [expr $zs1-$coverstr] [expr $ys1-$coverstr] [expr $zs1-$coverstr]
    layer straight 3 2 $Asp [expr -$ys1+$coverstr] 0.0 [expr $ys1-$coverstr] 0.0
    layer straight 3 2 $Asp [expr -$ys1+$coverstr] [expr -$zs1+$coverstr] [expr $ys1-$coverstr] [expr -$zs1+$coverstr]
}

# EQSTRUT torsional stiffness
# Linear elastic torsion for the column

set GJstr [expr $Gc*$C250*$strDepth*pow($strWidth,3)]
set GAstr [expr $Gc*$strWidth*$strDepth*5/6]

uniaxialMaterial Elastic 60 $GJstr
uniaxialMaterial Elastic 61 $GAstr

# Attach torsion to the RC beam section(QUESTO COMANDO ATTACCA TAGLIO E TORSIONE ALLE SEZIONI DELLE TRAVI)
#          tag uniTag uniCode secTag
#section Aggregator $secTag $matTag1 $string1 $matTag2 $string2 ..... <-section $sectionTag>
section Aggregator    30    61 Vy      61 Vz    60 T      -section 3

# set some paramaters for EQUIVALENT VERTICAL STRUT section
set vWidth 679.2
set vDepth 143.0
set coverv 10.0

# set Asv  1.0;      # area of 1 bar
# some variables derived from the parameters
# set yv [expr $vDepth/2.0]

```

```

# set zv [expr $vWidth/2.0]

section Fiber 5 {

    # Create the concrete core fibers

    # patch rect 5 30 30 -$yv -$zv $yv $zv

        # Create the reinforcing fibers (left, middle, right)
    # layer straight 3 3 $Asv [expr -$yv+$coverv] [expr $zv-$coverv] [expr $yv-$coverv] [expr $zv-$coverv]
    # layer straight 3 2 $Asv [expr -$yv+$coverv] 0.0 [expr $yv-$coverv] 0.0
    # layer straight 3 3 $Asv [expr -$yv+$coverv] [expr -$zv+$coverv] [expr $yv-$coverv] [expr -$zv+$coverv]
}

# EQSTRUT torsional stiffness
# Linear elastic torsion for the column

set GJv [expr $Gc*$C250*$vDepth*pow($vWidth,3)]
set GAv [expr $Gc*$vWidth*$vDepth*5/6]

uniaxialMaterial Elastic 70 $GJv
uniaxialMaterial Elastic 71 $GAv

# Attach torsion to the RC beam section(QUESTO COMANDO ATTACCA TAGLIO E TORSIONE ALLE SEZIONI DELLE TRAVI)
#          tag uniTag uniCode secTag
# section Aggregator $secTag $matTag1 $string1 $matTag2 $string2 ..... <-section $sectionTag>
section Aggregator    50    71 Vy    71 Vz    70 T    -section 5

#####
# set some paramaters for EQUIVALENT HORIZONTAL STRUT section
set hWidth 453.7
set hDepth 143.0
set coverstrh 10.0

# set Ash    1.0;    # area of 1 bar
# some variables derived from the parameters
# set yh [expr $hDepth/2.0]
# set zh [expr $hWidth/2.0]

# section Fiber 8 {

    # Create the concrete core fibers

    # patch rect 5 30 30 -$yh -$zh $yh $zh

        # Create the reinforcing fibers (left, middle, right)
    # layer straight 3 3 $Ash [expr -$yh+$coverstrh] [expr $zh-$coverstrh] [expr $yh-$coverstrh] [expr $zh-$coverstrh]
    # layer straight 3 2 $Ash [expr -$yh+$coverstrh] 0.0 [expr $yh-$coverstrh] 0.0
    # layer straight 3 3 $Ash [expr -$yh+$coverstrh] [expr -$zh+$coverstrh] [expr $yh-$coverstrh] [expr -$zh+$coverstrh]
# }

# EQSTRUT torsional stiffness

```

```

# Linear elastic torsion for the column

set GJh [expr $Gc*$C250*$hDepth*pow($hWidth,3)]
set GAh [expr $Gc*$hWidth*$hDepth*5/6]

uniaxialMaterial Elastic 80 $GJh
uniaxialMaterial Elastic 81 $GAh

# Attach torsion to the RC beam section (QUESTO COMANDO ATTACCA TAGLIO E TORSIONE ALLE SEZIONI DELLE TRAVI)
#          tag uniTag uniCode secTag
# section Aggregator $secTag $matTag1 $string1 $matTag2 $string2 ..... <-section $sectionTag>
# section Aggregator      80      81 Vy      81 Vz      80 T      -section 8

# #####
# set some parameters for BEAM sections
set beaWidth 200.0
set beaDepth 100.0

set cover 20.0
set Ast 24.6; # area of 1 bar

# some variables derived from the parameters
set yb1 [expr $beaDepth/2.0]
set zb1 [expr $beaWidth/2.0]

section Fiber 4 {

    # Create the concrete core fibers
    patch rect 1 40 40 [expr $cover-$yb1] [expr $cover-$zb1] [expr $yb1-$cover] [expr $zb1-$cover]

    # Create the concrete cover fibers (top, bottom, left, right)
    patch rect 2 20 10 [expr -$yb1] [expr $zb1-$cover] $yb1 $zb1
    patch rect 2 20 10 [expr -$yb1] [expr -$zb1] $yb1 [expr $cover-$zb1]
    patch rect 2 20 10 [expr -$yb1] [expr $cover-$zb1] [expr $cover-$yb1] [expr $zb1-$cover]
    patch rect 2 20 10 [expr $yb1-$cover] [expr $cover-$zb1] $yb1 [expr $zb1-$cover]

    # Create the reinforcing fibers (left, middle, right)
    layer straight 3 3 $Ast [expr -$yb1+$cover] [expr $zb1-$cover] [expr $yb1-$cover] [expr $zb1-$cover]
    layer straight 3 3 $Ast [expr -$yb1+$cover] [expr -$zb1+$cover] [expr $yb1-$cover] [expr -$zb1+$cover]
}

# _____
# BEAM torsional stiffness
# Linear elastic torsion for the equivalent strut

set GJbea [expr $Gc*$C250*$beaDepth*pow($beaWidth,3)]
set GAbea [expr $Gc*$beaWidth*$beaDepth*5/6]

uniaxialMaterial Elastic 54 $GJbea

```

```

uniaxialMaterial Elastic 55 $GAbea

# Attach torsion to the RC beam section (QUESTO COMANDO ATTACCA TAGLIO E TORSIONE ALLE SEZIONI DELLE TRAVI)
#
#           tag uniTag uniCode secTag
#section Aggregator $secTag $matTag1 $string1 $matTag2 $string2 ..... <-section $sectionTag>
section Aggregator      40      55 Vy      55 Vz      54 T      -section 4

#####

#COLUMNS#
# Geometry of column elements
#
#           tag

geomTransf Linear 1 -1 0 0

# Number of integration points along length of element
set np 5
set nps 10
# Create the columns using Beam-column elements
#
#           e           tag ndI ndJ nsecs secID transfTag
set eleType forceBeamColumn
element $eleType              1   1   3   $np   10   1
# element $eleType              101 12   3   $np   10   1
element $eleType              2   2   4   $np   10   1
# element $eleType              202 15   4   $np   10   1

#####

#BEAMS#
# Define beam element
# -----

# Geometry of beam elements
#
#           tag
geomTransf Linear 2  0 1 0
geomTransf Corotational 3  0 1 0
geomTransf Corotational 4 -1 0 0

#1=4
#2=3

set tranfeloriz 2
set tranfelvert 1
set tranfelorizcor 3
set tranfelvertcor 4

# Create the NONLINEAR BEAM using Beam-column elements
#
#           e           tag ndI ndJ nsecs secID transfTag
set eleType2 dispBeamColumn
# TRAVI
# element $eleType              3   1   2   $np   40   $tranfeloriz
element $eleType              4   3   4   $np   40   $tranfeloriz

```

```

# element $eleType          11  1  5  $np      40  $stranfeloriz
# element $eleType          12  5  2  $np      40  $stranfeloriz
# VERTICAL
# element $eleType2        9  7  63  $nps  50  $stranfelvertcor
# element $eleType2        10  63  8  $nps  50  $stranfelvertcor
# HORIZONTAL
# element $eleType2        13  13  64  $nps  80  $stranfelorizcor
# element $eleType2        14  64  14  $nps  80  $stranfelorizcor

#DIAGONAL

# element trussSection $eleTag $iNode $jNode $secTag

element trussSection 5 3 2 30
#element trussSection 6 1 4 30

# element $eleType2        7  1  62  $nps  30  $stranfeloriz
# element $eleType2        8  62  44  $nps  30  $stranfeloriz

# Create the ELASTIC BEAM beam element

#          eleTag iNode jNode  A      E      G      J      Iy      Iz      transfTag
transfTag
element elasticBeamColumn 11 1 2 8000000 3000000 1000000 10666666666 10666666666 10666666666 $stranfeloriz
# element elasticBeamColumn 12 5 2 8000000 3000000 1000000 10666666666 10666666666 10666666666 2

# #####
# Create the Truss element infill
#          tag
#geomTransf Linear 3 1 0 0

#          tag ndI ndJ      A      Mat  SectionTag
# element trussSection          5  3  61          30
# element trussSection          6  61  2          30
# element trussSection          7  1  62          30
# element trussSection          8  62  4          30

#element zeroLength $eleID $Node1ID $Node2ID -mat $matID $matID -dir 1 2
#uniaxialMaterial Elastic $matTag $E

uniaxialMaterial Elastic 20 500000000;

```

```

# uniaxialMaterial Elastic 10 100;
# uniaxialMaterial Elastic 15 100;

#
# Tag E Fy GAP
# uniaxialMaterial ElasticPPGap 41 100 10000 10000;
# uniaxialMaterial ElasticPPGap 101 1000000 -100000 0.0;
# uniaxialMaterial Parallel 90 41 101;
# uniaxialMaterial Series 99 41 20;
# uniaxialMaterial ENT 91 50000000;

#VERTICAL
# element zeroLength 90 5 7 -mat 20 20 20 15 10 10 -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 0 1 0 -1 0 0
# element zeroLength 91 8 9 -mat 20 20 20 15 10 10 -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 0 1 0 -1 0 0
#HORIZONTAL
# element zeroLength 88 12 13 -mat 20 20 20 15 10 10 -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 0 0 0 1 0
# element zeroLength 89 14 15 -mat 20 20 20 15 10 10 -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 0 0 0 1 0
#DIAGONAL
# element zeroLength 92 1 11 -mat 20 20 20 15 10 10 -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 1 0 -1 1 0
# element zeroLength 93 44 4 -mat 91 20 20 15 10 10 -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 1 0 -1 1 0
# element zeroLength 94 3 33 -mat 91 20 20 15 10 10 -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 -1 0 1 1 0
# element zeroLength 95 22 2 -mat 20 20 20 15 10 10 -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 -1 0 1 1 0

# Define gravity loads
# -----

# Set a parameter for the axial load
set P 50000.0; # 10% of axial capacity of columns

# Create a Plain load pattern with a Linear TimeSeries
pattern Plain 1 "Linear" {

# Create nodal loads at nodes 3 & 4
# nd FX FY FZ MX MY MZ
load 3 0.0 [expr -$P] 0.0 0.0 0.0 0.0
load 4 0.0 [expr -$P] 0.0 0.0 0.0 0.0
# load 9 0.0 [expr -$P/4] 0.0 0.0 0.0 0.0
# load 61 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
# load 62 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
# load 63 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

}

# -----
# End of model generation
# -----

```

```

# -----
# Start of analysis generation
# -----

# Create the system of equation, a sparse solver with partial pivoting
system BandGeneral

# Create the constraint handler, the transformation method
constraints Transformation

# Create the DOF numberer, the reverse Cuthill-McKee algorithm
numberer RCM

# Create the convergence test, the norm of the residual with a tolerance of
# 1e-12 and a max number of iterations of 10
test NormDispIncr 1.0e-12 1000 3

# Create the solution algorithm, a Newton-Raphson algorithm
algorithm Newton

# Create the integration scheme, the LoadControl scheme using steps of 0.1
integrator LoadControl 0.1

# Create the analysis object
analysis Static

# -----
# End of analysis generation
# -----

# -----
# Finally perform the analysis
# -----

# perform the gravity load analysis, requires 10 steps to reach the load level
analyze 10

# Print out the state of nodes 3 and 4
print node 3

# Print out the state of element 1
print ele 1 2

```

Script di OpenSees del modello di Papia et al. (2003), campione S2A e S2B

```
# Create ModelBuilder (with two-dimensions and 3 DOF/node)
```

```
wipe
```

```
model basic -ndm 3 -ndf 6
```

```
# Create nodes
```

```
# -----
```

```
# Set parameters for overall model geometry
```

```
set width 1800.0
```

```
set height 1800.0
```

```
# Create nodes
```

```
# tag X Y Z
```

```
node 1 0.0 0.0 0.0
```

```
node 2 $width 0.0 0.0
```

```
node 3 0.0 $height 0.0
```

```
node 4 $width $height 0.0
```

```
# node 61 [expr $width/2] [expr $height/2] 0.0
```

```
# node 62 [expr $width/2] [expr $height/2] 0.0
```

```
# node 63 [expr $width/2] [expr $height/2] 0.0
```

```
# node 64 [expr $width/2] [expr $height/2] 0.0
```

```
# node 5 [expr $width/2] 0.0 0.0
```

```
# node 7 [expr $width/2] 0.0 0.0
```

```
# node 8 [expr $width/2] $height 0.0
```

```
# node 9 [expr $width/2] $height 0.0
```

```
# node 12 0.0 [expr $height/2] 0.0
```

```
# node 13 0.0 [expr $height/2] 0.0
```

```
# node 14 [expr $width] [expr $height/2] 0.0
```

```
# node 15 [expr $width] [expr $height/2] 0.0
```

```
# node 33 0.0 $height 0.0
```

```
# node 44 $width $height 0.0
```

```
# node 11 0.0 0.0 0.0
```

```
# node 22 $width 0.0 0.0
```

```
# Fixupports at base of columns
```

```
# tag DX DY DZ RX RY RZ
```

```
fix 1 1 1 1 1 1 0
```

```
fix 2 1 1 1 1 1 0
```

```
fix 3 0 0 1 0 0 0
```

```
fix 4 0 0 1 0 0 0
```

```
# fix 5 0 1 0 1 1 0
```

```
# fix 9 0 0 0 1 1 0
```

```
# fix 6 0 0 1 0 0 0
```

```

# 7 8 1 2 3 4 5
# equalDOF 63 62 3
# equalDOF 63 61 3
# equalDOF 63 64 3

# Define materials for nonlinear columns
# -----
# CONCRETE          tag  f'c      ec0  f'cu      ecu
# Core concrete (confined)
# uniaxialMaterial Concrete01  1  -55.2  -0.002  -28.7  -0.01
#
#                               Tag  fpc      epsc0  fpcu      epscu      lambda  ft
Et
uniaxialMaterial Concrete02  1  -27.0  -0.002  -23.0  -0.01  0.1  0.00  0.00
# Cover concrete (unconfined)
# uniaxialMaterial Concrete01  2  -55.2  -0.002  -27.6  -0.008
uniaxialMaterial Concrete02  2  -25.0  -0.002  -20.0  -0.008  0.10  0.00  0.00
# STEEL
# Reinforcing steel
set fy 450.0; # Yield stress
set E 210000.0; # Young's modulus
#
#          tag  fy  E0  b
#uniaxialMaterial Steel01  3  $fy $E 0.001
#
#          tag  fy  E0  b      R0  cR1  CR1
uniaxialMaterial Steel02  3  $fy $E 0.01  15  0.925  0.15

# Masonry          Tag      fpc      epsc0      fpcu      epscu      lambda      ft      Et
# uniaxialMaterial Concrete02  4  -2.25  -0.0015  -1.35  -0.0080  07  0.0  0.0
# uniaxialMaterial Concrete02  4  -4.5  -0.0010  -2.7  -0.007  0.07  0.0  0.0
# uniaxialMaterial Concrete02  4  -2.3  -0.0015  -1.1  -0.009  0.085  0.0  0.0
# (3a) uniaxialMaterial Concrete02  4  -2.15  -0.0015  -0.6  -0.008  0.030  0.0  0.07
# uniaxialMaterial Concrete02  5  -10.85  -0.0015  -6.51  -0.008  0.07  0.0  0.0
# uniaxialMaterial Concrete02  5  -22.90  -0.0015  -13.74  -0.008  0.07  0.0  0.0
# (3a)
# uniaxialMaterial Concrete02  5  -22.82  -0.0015  -13.69  -0.008  0.07  0.0  0.00

set S1 -188016
set e1 -0.00019749
set S2 -289255
set e2 -0.00138
set S3 -144627
set e3 -0.00916
set S4 -144627
set e4 -19.651

```

```

#uniaxialMaterial Pinching4 $matTag $ePf1 $ePd1 $ePf2 $ePd2 $ePf3 $ePd3 $ePf4 $ePd4 <$eNf1 $eNd1 $eNf2 $eNd2 $eNf3 $eNd3
$eNf4 $eNd4> $rDispP $rForceP $uForceP <$rDispN $rForceN $uForceN > $gK1 $gK2 $gK3 $gK4 $gKLim $gD1 $gD2 $gD3 $gD4 $gDLim
$gF1 $gF2 $gF3 $gF4 $gFLim $gE $dmgType

uniaxialMaterial Pinching4 10 0 1 0 5 0 10 0 20 $$S1 $e1 $$S2 $e2 $$S3 $e3
$$S4 $e4 0.5 0.25 0.05 0.5 0.25 0.05 1 0.2 0.3 0.2 0.9 0.5 0.5 2 2 0.5 1
0 1 1 0.9 10 "cycle"

# Define cross-section for nonlinear columns
# -----
# #####

# set some parameters for COLUMNS sections

set colWidth 200.0

set colDepth 200.0

set cover 20.0

set As 78.5 ; # area of 1 bar

set y1 [expr $colDepth/2.0]
set z1 [expr $colWidth/2.0]

section Fiber 1 {

# Create the concrete core fibers

patch rect 1 30 30 [expr $cover-$y1] [expr $cover-$z1] [expr $y1-$cover] [expr $z1-$cover]

# Create the concrete cover fibers (top, bottom, left, right)

patch rect 2 20 20 [expr -$y1] [expr $z1-$cover] $y1 $z1
patch rect 2 20 20 [expr -$y1] [expr -$z1] $y1 [expr $cover-$z1]
patch rect 2 20 20 [expr -$y1] [expr $cover-$z1] [expr $cover-$y1] [expr $z1-$cover]
patch rect 2 20 20 [expr $y1-$cover] [expr $cover-$z1] $y1 [expr $z1-$cover]

# Create the reinforcing fibers (left, middle, right)

layer straight 3 2 $As [expr -$y1+$cover] [expr $z1-$cover] [expr $y1-$cover] [expr $z1-$cover]
layer straight 3 0 $As [expr -$y1+$cover] 0.0 [expr $y1-$cover] 0.0
layer straight 3 2 $As [expr -$y1+$cover] [expr -$z1+$cover] [expr $y1-$cover] [expr -$z1+$cover]
}

#VALORI MATERIALI TAGLIO E TORSIONE PER TUTTE LE SEZIONI

set Gc 25000000

set C250 10

# _____

# column torsional stiffness

# Linear elastic torsion for the column

set GJcol [expr $Gc*$C250*$colDepth*pow($colWidth,3)]
set GAcol [expr $Gc*$colWidth*$colDepth*5/6]

uniaxialMaterial Elastic 50 $GJcol
uniaxialMaterial Elastic 51 $GAcol

```

```

# Attach torsion to the RC beam section(QUESTO COMANDO ATTACCA TAGLIO E TORSIONE ALLE SEZIONI DELLE TRAVI)
#
tag uniTag uniCode secTag
#section Aggregator $secTag $matTag1 $string1 $matTag2 $string2 ..... <-section $sectionTag>
section Aggregator 10 51 Vy 51 Vz 50 T -section 1
#
#####
# set some paramaters for EQUIVALENT DIAGONAL STRUT section
set strWidth 1.0
set strDepth 1.0
set coverstr 0.1
set Asp 1.0; # area of 1 bar
# some variables derived from the parameters
set ys1 [expr $strDepth/2.0]
set zs1 [expr $strWidth/2.0]
section Fiber 3 {
# Create the concrete core fibers
patch rect 10 30 30 -$ys1 -$zs1 $ys1 $zs1
# Create the reinforcing fibers (left, middle, right)
layer straight 3 0 $Asp [expr -$ys1+$coverstr] [expr $zs1-$coverstr] [expr $ys1-$coverstr] [expr $zs1-$coverstr]
layer straight 3 0 $Asp [expr -$ys1+$coverstr] 0.0 [expr $ys1-$coverstr] 0.0
layer straight 3 0 $Asp [expr -$ys1+$coverstr] [expr -$zs1+$coverstr] [expr $ys1-$coverstr] [expr -$zs1+$coverstr]
}
# EQSTRUT torsional stiffness
# Linear elastic torsion for the column
set GJstr [expr $Gc*$C250*$strDepth*pow($strWidth,3)]
set GAstr [expr $Gc*$strWidth*$strDepth*5/6]
uniaxialMaterial Elastic 60 $GJstr
uniaxialMaterial Elastic 61 $GAstr
# Attach torsion to the RC beam section(QUESTO COMANDO ATTACCA TAGLIO E TORSIONE ALLE SEZIONI DELLE TRAVI)
#
tag uniTag uniCode secTag
#section Aggregator $secTag $matTag1 $string1 $matTag2 $string2 ..... <-section $sectionTag>
section Aggregator 30 61 Vy 61 Vz 60 T -section 3
#####
# set some paramaters for BEAM sections
set beaWidth 400.0
set beaDepth 200.0
set cover 20.0

```

```

set Ast 113.0; # area of 1 bar

# some variables derived from the parameters
set yb1 [expr $beaDepth/2.0]
set zb1 [expr $beaWidth/2.0]

section Fiber 4 {

    # Create the concrete core fibers
    patch rect 1 40 40 [expr $cover-$yb1] [expr $cover-$zb1] [expr $yb1-$cover] [expr $zb1-$cover]

    # Create the concrete cover fibers (top, bottom, left, right)
    patch rect 2 20 10 [expr -$yb1] [expr $zb1-$cover] $yb1 $zb1
    patch rect 2 20 10 [expr -$yb1] [expr -$zb1] $yb1 [expr $cover-$zb1]
    patch rect 2 20 10 [expr -$yb1] [expr $cover-$zb1] [expr $cover-$yb1] [expr $zb1-$cover]
    patch rect 2 20 10 [expr $yb1-$cover] [expr $cover-$zb1] $yb1 [expr $zb1-$cover]

    # Create the reinforcing fibers (left, middle, right)
    layer straight 3 3 $Ast [expr -$yb1+$cover] [expr $zb1-$cover] [expr $yb1-$cover] [expr $zb1-$cover]
    layer straight 3 3 $Ast [expr -$yb1+$cover] [expr -$zb1+$cover] [expr $yb1-$cover] [expr -$zb1+$cover]
}

# _____
# BEAM torsional stiffness
# Linear elastic torsion for the equivalent strut

set GJbea [expr $Gc*$C250*$beaDepth*pow($beaWidth,3)]
set GAbear [expr $Gc*$beaWidth*$beaDepth*5/6]

uniaxialMaterial Elastic 54 $GJbea
uniaxialMaterial Elastic 55 $GAbear

# Attach torsion to the RC beam section(QUESTO COMANDO ATTACCA TAGLIO E TORSIONE ALLE SEZIONI DELLE TRAVI)
#          tag uniTag uniCode secTag
#section Aggregator $secTag $matTag1 $string1 $matTag2 $string2 ..... <-section $sectionTag>
section Aggregator 40 55 Vy 55 Vz 54 T -section 4

#####
#COLUMNS#
# Geometry of column elements
#          tag

geomTransf Linear 1 -1 0 0

# Number of integration points along length of element
set np 5
set nps 10

# Create the columns using Beam-column elements
#          e          tag ndI ndJ nsecs secID transfTag

```

```

set eleType forceBeamColumn

element $eleType          1   1   3   $np   10   1
# element $eleType        101 12   3   $np   10   1
element $eleType          2   2   4   $np   10   1
# element $eleType        202 15   4   $np   10   1
# #####

#BEAMS#
# Define beam element
# -----

# Geometry of beam elements
#           tag
geomTransf Linear 2 0 1 0
geomTransf Corotational 3 0 1 0
geomTransf Corotational 4 -1 0 0

#1=4
#2=3

set tranfelowiz 2
set tranfelvert 1
set tranfelowizcor 3
set tranfelvertcor 4

# Create the NONLINEAR BEAM using Beam-column elements
#           e           tag ndI ndJ nsecs secID transfTag
set eleType2 dispBeamColumn

# TRAVI
# element $eleType          3   1   2   $np          40   $tranfelowiz
element $eleType          4   3   4   $np          40   $tranfelowiz
# element $eleType        11   1   5   $np          40   $tranfelowiz
# element $eleType        12   5   2   $np          40   $tranfelowiz

# VERTICAL
# element $eleType2          9   7   63   $nps   50   $tranfelvertcor
# element $eleType2          10  63  8   $nps   50   $tranfelvertcor

# HORIZONTAL
# element $eleType2        13  13  64   $nps   80   $tranfelowizcor
# element $eleType2        14  64  14   $nps   80   $tranfelowizcor

#DIAGONAL

# element trussSection $eleTag $iNode $jNode $secTag

element trussSection 5 3 2 30
# element trussSection 6 1 4 30

# element $eleType2        7  1 62   $nps   30   $tranfelowiz
# element $eleType2        8 62 44   $nps   30   $tranfelowiz

```



```

# element zeroLength 93 44 4 -mat 91 20 20 15 10 10 -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 1 0 -1 1 0
# element zeroLength 94 3 33 -mat 91 20 20 15 10 10 -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 -1 0 1 1 0
# element zeroLength 95 22 2 -mat 20 20 20 15 10 10 -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 -1 0 1 1 0

# Define gravity loads
# -----

# Set a parameter for the axial load
set P 200000.0;          # 10% of axial capacity of columns

# Create a Plain load pattern with a Linear TimeSeries
pattern Plain 1 "Linear" {

    # Create nodal loads at nodes 3 & 4
    #   nd   FX      FY FZ      MX  MY  MZ
    load 3  0.0  [expr -$P]  0.0  0.0  0.0  0.0
    load 4  0.0  [expr -$P]  0.0  0.0  0.0  0.0
    # load 9  0.0  [expr -$P/4] 0.0  0.0  0.0  0.0
    # load 61 0.0    0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
    # load 62 0.0    0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
    # load 63 0.0    0.0  0.0  0.0  0.0  0.0

}

# -----
# End of model generation
# -----

# -----
# Start of analysis generation
# -----

# Create the system of equation, a sparse solver with partial pivoting
system BandGeneral

# Create the constraint handler, the transformation method
constraints Transformation

# Create the DOF numberer, the reverse Cuthill-McKee algorithm
numberer RCM

# Create the convergence test, the norm of the residual with a tolerance of
# 1e-12 and a max number of iterations of 10
test NormDispIncr 1.0e-12 1000 3

# Create the solution algorithm, a Newton-Raphson algorithm

```

```
algorithm Newton

# Create the integration scheme, the LoadControl scheme using steps of 0.1
integrator LoadControl 0.1

# Create the analysis object
analysis Static

# -----
# End of analysis generation
# -----

# -----
# Finally perform the analysis
# -----

# perform the gravity load analysis, requires 10 steps to reach the load level
analyze 10

# Print out the state of nodes 3 and 4
print node 3

# Print out the state of element 1
print ele 1 2
```

Script di OpenSees del modello di Colangelo et al. (2005), campione C1, L2, N1

```
# Create ModelBuilder (with two-dimensions and 3 DOF/node)
```

```
wipe
```

```
model basic -ndm 3 -ndf 6
```

```
# Create nodes
```

```
# -----
```

```
# Set parameters for overall model geometry
```

```
set width 1900.0
```

```
set height 1425.0
```

```
# Create nodes
```

```
# tag X Y Z
```

```
node 1 0.0 0.0 0.0
```

```
node 2 $width 0.0 0.0
```

```
node 3 0.0 $height 0.0
```

```
node 4 $width $height 0.0
```

```
# node 61 [expr $width/2] [expr $height/2] 0.0
```

```
# node 62 [expr $width/2] [expr $height/2] 0.0
```

```
# node 63 [expr $width/2] [expr $height/2] 0.0
```

```
# node 64 [expr $width/2] [expr $height/2] 0.0
```

```
# node 5 [expr $width/2] 0.0 0.0
```

```
# node 7 [expr $width/2] 0.0 0.0
```

```
# node 8 [expr $width/2] $height 0.0
```

```
# node 9 [expr $width/2] $height 0.0
```

```
# node 12 0.0 [expr $height/2] 0.0
```

```
# node 13 0.0 [expr $height/2] 0.0
```

```
# node 14 [expr $width] [expr $height/2] 0.0
```

```
# node 15 [expr $width] [expr $height/2] 0.0
```

```
# node 33 0.0 $height 0.0
```

```
# node 44 $width $height 0.0
```

```
# node 11 0.0 0.0 0.0
```

```
# node 22 $width 0.0 0.0
```

```
# Fixupports at base of columns
```

```
# tag DX DY DZ RX RY RZ
```

```
fix 1 1 1 1 1 1 0
```

```
fix 2 1 1 1 1 1 0
```

```
fix 3 0 0 1 0 0 0
```

```
fix 4 0 0 1 0 0 0
```

```
# fix 5 0 1 0 1 1 0
```

```
# fix 9 0 0 0 1 1 0
```

```
# fix 6 0 0 1 0 0 0
```

```

# 7 8 1 2 3 4 5

# equalDOF 63 62 3
# equalDOF 63 61 3
# equalDOF 63 64 3

# Define materials for nonlinear columns
# -----
# CONCRETE          tag  f'c      ec0  f'cu      ecu
# Core concrete (confined)
# uniaxialMaterial Concrete01  1  -55.2  -0.002  -28.7  -0.01
#
#                               Tag  fpc      epsc0  fpcu      epscu  lambda  ft
# Et
uniaxialMaterial Concrete02  1  -49.0  -0.002  -37.0  -0.01  0.10  0.00  0.00
# Cover concrete (unconfined)
# uniaxialMaterial Concrete01  2  -55.2  -0.002  -27.6  -0.008
uniaxialMaterial Concrete02  2  -43.7  -0.002  -22.0  -0.008  0.12  0.00  0.00
# STEEL
# Reinforcing steel
set fy 530.0;      # Yield stress
set E 210000.0;   # Young's modulus
#
#          tag  fy  E0  b
#uniaxialMaterial Steel01  3  $fy $E 0.001
#
#          tag  fy  E0  b      R0  cR1  CR1
uniaxialMaterial Steel02  3  $fy $E 0.01  15  0.925  0.15

# Masonry          Tag      fpc  epsc0  fpcu  epscu      lambda  ft  Et
# uniaxialMaterial Concrete02  4  -2.25  -0.0015  -1.35  -0.0080  07  0.0  0.0
# uniaxialMaterial Concrete02  4  -4.5  -0.0010  -2.7  -0.007  0.07  0.0  0.0
# uniaxialMaterial Concrete02  4  -2.05  -0.00186  -0.95  -0.0082  0.1  0.0  0.0
# (3a) uniaxialMaterial Concrete02  4  -2.15  -0.0015  -0.6  -0.008  0.030  0.0  0.07
# uniaxialMaterial Concrete02  5  -10.85  -0.0015  -6.51  -0.008  0.07  0.0  0.0
# uniaxialMaterial Concrete02  5  -22.90  -0.0015  -13.74  -0.008  0.07  0.0  0.0
# (3a)
# uniaxialMaterial Concrete02  5  -22.82  -0.0015  -13.69  -0.008  0.07  0.0  0.00

set S1 -117842
set e1 -0.0006137
set S2 -147303
set e2 -0.00164
set S3 -73651
set e3 -0.00998
set S4 -73651
set e4 -21.0626

```

```

#uniaxialMaterial Pinching4 $matTag $ePf1 $ePd1 $ePf2 $ePd2 $ePf3 $ePd3 $ePf4 $ePd4 <$eNf1 $eNd1 $eNf2 $eNd2 $eNf3 $eNd3
$eNf4 $eNd4> $rDispP $rForceP $uForceP <$rDispN $rForceN $uForceN > $gK1 $gK2 $gK3 $gK4 $gKLim $gD1 $gD2 $gD3 $gD4 $gDLim
$gF1 $gF2 $gF3 $gF4 $gFLim $gE $dmgType

uniaxialMaterial Pinching4 10 0 1 0 5 0 10 0 20 $S1 $e1 $S2 $e2 $S3 $e3
$S4 $e4 0.5 0.25 0.05 0.5 0.25 0.05 1 0.2 0.3 0.2 0.9 0.5 0.5 2 2 0.5 1
0 1 1 0.9 10 "cycle"

# Define cross-section for nonlinear columns
# -----
# #####

# set some parameters for COLUMNS sections

set colWidth 200.0

set colDepth 200.0

set cover 20.0

set As 113.04 ; # area of 1 bar

set y1 [expr $colDepth/2.0]
set z1 [expr $colWidth/2.0]

section Fiber 1 {

# Create the concrete core fibers

patch rect 1 30 30 [expr $cover-$y1] [expr $cover-$z1] [expr $y1-$cover] [expr $z1-$cover]

# Create the concrete cover fibers (top, bottom, left, right)

patch rect 2 20 20 [expr -$y1] [expr $z1-$cover] $y1 $z1
patch rect 2 20 20 [expr -$y1] [expr -$z1] $y1 [expr $cover-$z1]
patch rect 2 20 20 [expr -$y1] [expr $cover-$z1] [expr $cover-$y1] [expr $z1-$cover]
patch rect 2 20 20 [expr $y1-$cover] [expr $cover-$z1] $y1 [expr $z1-$cover]

# Create the reinforcing fibers (left, middle, right)

layer straight 3 3 $As [expr -$y1+$cover] [expr $z1-$cover] [expr $y1-$cover] [expr $z1-$cover]
layer straight 3 0 $As [expr -$y1+$cover] 0.0 [expr $y1-$cover] 0.0
layer straight 3 3 $As [expr -$y1+$cover] [expr -$z1+$cover] [expr $y1-$cover] [expr -$z1+$cover]
}

#VALORI MATERIALI TAGLIO E TORSIONE PER TUTTE LE SEZIONI

set Gc 25000000

set C250 10

# _____

# column torsional stiffness

# Linear elastic torsion for the column

set GJcol [expr $Gc*$C250*$colDepth*pow($colWidth,3)]
set GAcol [expr $Gc*$colWidth*$colDepth*5/6]

uniaxialMaterial Elastic 50 $GJcol
uniaxialMaterial Elastic 51 $GAcol

```

```

# Attach torsion to the RC beam section(QUESTO COMANDO ATTACCA TAGLIO E TORSIONE ALLE SEZIONI DELLE TRAVI)
#
tag uniTag uniCode secTag
#section Aggregator $secTag $matTag1 $string1 $matTag2 $string2 ..... <-section $sectionTag>
section Aggregator 10 51 Vy 51 Vz 50 T -section 1
#
#####
# set some paramaters for EQUIVALENT DIAGONAL STRUT section
set strWidth 1
set strDepth 1
set coverstr 0.1
set Asp 1.0; # area of 1 bar
# some variables derived from the parameters
set ys1 [expr $strDepth/2.0]
set zs1 [expr $strWidth/2.0]
section Fiber 3 {
# Create the concrete core fibers
patch rect 10 30 30 -$ys1 -$zs1 $ys1 $zs1
# Create the reinforcing fibers (left, middle, right)
layer straight 3 2 $Asp [expr -$ys1+$coverstr] [expr $zs1-$coverstr] [expr $ys1-$coverstr] [expr $zs1-$coverstr]
layer straight 3 2 $Asp [expr -$ys1+$coverstr] 0.0 [expr $ys1-$coverstr] 0.0
layer straight 3 2 $Asp [expr -$ys1+$coverstr] [expr -$zs1+$coverstr] [expr $ys1-$coverstr] [expr -$zs1+$coverstr]
}
# EQSTRUT torsional stiffness
# Linear elastic torsion for the column
set GJstr [expr $Gc*$C250*$strDepth*pow($strWidth,3)]
set GAstr [expr $Gc*$strWidth*$strDepth*5/6]
uniaxialMaterial Elastic 60 $GJstr
uniaxialMaterial Elastic 61 $GAstr
# Attach torsion to the RC beam section(QUESTO COMANDO ATTACCA TAGLIO E TORSIONE ALLE SEZIONI DELLE TRAVI)
#
tag uniTag uniCode secTag
#section Aggregator $secTag $matTag1 $string1 $matTag2 $string2 ..... <-section $sectionTag>
section Aggregator 30 61 Vy 61 Vz 60 T -section 3
#####
# set some paramaters for BEAM sections
set beaWidth 250.0
set beaDepth 200.0
set cover 20.0
set Ast 113.04; # area of 1 bar

```

```

# some variables derived from the parameters
set yb1 [expr $beaDepth/2.0]
set zb1 [expr $beaWidth/2.0]

section Fiber 4 {

    # Create the concrete core fibers
    patch rect 1 40 40 [expr $cover-$yb1] [expr $cover-$zb1] [expr $yb1-$cover] [expr $zb1-$cover]

    # Create the concrete cover fibers (top, bottom, left, right)
    patch rect 2 20 10 [expr -$yb1] [expr $zb1-$cover] $yb1 $zb1
    patch rect 2 20 10 [expr -$yb1] [expr -$zb1] $yb1 [expr $cover-$zb1]
    patch rect 2 20 10 [expr -$yb1] [expr $cover-$zb1] [expr $cover-$yb1] [expr $zb1-$cover]
    patch rect 2 20 10 [expr $yb1-$cover] [expr $cover-$zb1] $yb1 [expr $zb1-$cover]

    # Create the reinforcing fibers (left, middle, right)
    layer straight 3 2 $Ast [expr -$yb1+$cover] [expr $zb1-$cover] [expr $yb1-$cover] [expr $zb1-$cover]
    layer straight 3 2 $Ast [expr -$yb1+$cover] [expr -$zb1+$cover] [expr $yb1-$cover] [expr -$zb1+$cover]
}

# _____
# BEAM torsional stiffness
# Linear elastic torsion for the equivalent strut

set GJbea [expr $Gc*$C250*$beaDepth*pow($beaWidth,3)]
set GAbear [expr $Gc*$beaWidth*$beaDepth*5/6]

uniaxialMaterial Elastic 54 $GJbea
uniaxialMaterial Elastic 55 $GAbear

# Attach torsion to the RC beam section (QUESTO COMANDO ATTACCA TAGLIO E TORSIONE ALLE SEZIONI DELLE TRAVI)
#          tag uniTag uniCode secTag
#section Aggregator $secTag $matTag1 $string1 $matTag2 $string2 ..... <-section $sectionTag>
section Aggregator 40 55 Vy 55 Vz 54 T -section 4

# #####
#COLUMNS#
# Geometry of column elements
#          tag

geomTransf Linear 1 -1 0 0

# Number of integration points along length of element
set np 5
set nps 10

# Create the columns using Beam-column elements
#          e          tag ndI ndJ nsecs secID transfTag
set eleType forceBeamColumn

```

```

element $eleType          1  1  3  $np  10  1
# element $eleType        101 12  3  $np  10  1
element $eleType          2  2  4  $np  10  1
# element $eleType        202 15  4  $np  10  1

# #####

#BEAMS#

# Define beam element
# -----

# Geometry of beam elements
#           tag
geomTransf Linear 2  0 1 0
geomTransf Corotational 3  0 1 0
geomTransf Corotational 4 -1 0 0

#1=4
#2=3

set tranfeloriz 2
set tranfelvert 1
set tranfelorizcor 3
set tranfelvertcor 4

# Create the NONLINEAR BEAM using Beam-column elements
#           e           tag ndI ndJ nsecs secID transfTag
set eleType2 dispBeamColumn

# TRAVI
# element $eleType          3  1  2  $np  40  $tranfeloriz
element $eleType          4  3  4  $np  40  $tranfeloriz
# element $eleType        11  1  5  $np  40  $tranfeloriz
# element $eleType          12  5  2  $np  40  $tranfeloriz

# VERTICAL
# element $eleType2          9  7  63  $nps  50  $tranfelvertcor
# element $eleType2          10  63  8  $nps  50  $tranfelvertcor

# HORIZONTAL
# element $eleType2        13  13  64  $nps  80  $tranfelorizcor
# element $eleType2          14  64  14  $nps  80  $tranfelorizcor

#DIAGONAL

# element trussSection $eleTag $iNode $jNode $secTag

element trussSection 5 3 2 30
#element trussSection 6 1 4 30

# element $eleType2          7  1  62  $nps  30  $tranfeloriz
# element $eleType2          8  62  44  $nps  30  $tranfeloriz

```



```

# element zeroLength 94 3 33 -mat 91 20 20 15 10 10 -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 -1 0 1 1 0
# element zeroLength 95 22 2 -mat 20 20 20 15 10 10 -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 -1 0 1 1 0

# Define gravity loads
# -----

# Set a parameter for the axial load
set P 200000.0;          # 10% of axial capacity of columns

# Create a Plain load pattern with a Linear TimeSeries
pattern Plain 1 "Linear" {

    # Create nodal loads at nodes 3 & 4
    #   nd   FX      FY FZ      MX  MY  MZ
    load 3  0.0  [expr -$P]  0.0  0.0  0.0  0.0
    load 4  0.0  [expr -$P]  0.0  0.0  0.0  0.0
    # load 9  0.0  [expr -$P/4] 0.0  0.0  0.0  0.0
    # load 61 0.0      0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
    # load 62 0.0      0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
    # load 63 0.0      0.0  0.0  0.0  0.0  0.0

}

# -----
# End of model generation
# -----

# -----
# Start of analysis generation
# -----

# Create the system of equation, a sparse solver with partial pivoting
system BandGeneral

# Create the constraint handler, the transformation method
constraints Transformation

# Create the DOF numberer, the reverse Cuthill-McKee algorithm
numberer RCM

# Create the convergence test, the norm of the residual with a tolerance of
# 1e-12 and a max number of iterations of 10
test NormDispIncr 1.0e-12 1000 3

# Create the solution algorithm, a Newton-Raphson algorithm
algorithm Newton

```

```
# Create the integration scheme, the LoadControl scheme using steps of 0.1
integrator LoadControl 0.1

# Create the analysis object
analysis Static

# -----
# End of analysis generation
# -----

# -----
# Finally perform the analysis
# -----

# perform the gravity load analysis, requires 10 steps to reach the load level
analyze 10

# Print out the state of nodes 3 and 4
print node 3

# Print out the state of element 1
print ele 1 2
```

Script di OpenSees dei modelli FEM

```
# Create ModelBuilder (with two-dimensions and 3 DOF/node)
```

```
wipe
```

```
model basic -ndm 3 -ndf 6
```

```
# Create nodes
```

```
# -----
```

```
# Set parameters for overall model geometry
```

```
set width 1800.0
```

```
set height 1800.0
```

```
# Create nodes
```

```
# tag X Y Z
```

```
node 1 0.0 0.0 0.0
```

```
node 2 $width 0.0 0.0
```

```
node 3 0.0 $height 0.0
```

```
node 4 $width $height 0.0
```

```
# node 61 [expr $width/2] [expr $height/2] 0.0
```

```
# node 62 [expr $width/2] [expr $height/2] 0.0
```

```
# node 63 [expr $width/2] [expr $height/2] 0.0
```

```
# node 64 [expr $width/2] [expr $height/2] 0.0
```

```
# node 5 [expr $width/2] 0.0 0.0
```

```
# node 7 [expr $width/2] 0.0 0.0
```

```
# node 8 [expr $width/2] $height 0.0
```

```
# node 9 [expr $width/2] $height 0.0
```

```
# node 12 0.0 [expr $height/2] 0.0
```

```
# node 13 0.0 [expr $height/2] 0.0
```

```
# node 14 [expr $width] [expr $height/2] 0.0
```

```
# node 15 [expr $width] [expr $height/2] 0.0
```

```
# node 33 0.0 $height 0.0
```

```
# node 44 $width $height 0.0
```

```
# node 11 0.0 0.0 0.0
```

```
# node 22 $width 0.0 0.0
```

```
# Fixupports at base of columns
```

```
# tag DX DY DZ RX RY RZ
```

```
fix 1 1 1 1 1 1 0
```

```
fix 2 1 1 1 1 1 0
```

```
fix 3 0 0 1 0 0 0
```

```
fix 4 0 0 1 0 0 0
```

```
# fix 5 0 1 0 1 1 0
```

```
# fix 9 0 0 0 1 1 0
```

```
# fix 6 0 0 1 0 0 0
```

```

# 7 8 1 2 3 4 5
# equalDOF 63 62 3
# equalDOF 63 61 3
# equalDOF 63 64 3

# Define materials for nonlinear columns
# -----
# CONCRETE
tag f'c ec0 f'cu ecu
# Core concrete (confined)
# uniaxialMaterial Concrete01 1 -55.2 -0.002 -28.7 -0.01
#
Tag fpc epsc0 fpcu epscu lambda ft Et
uniaxialMaterial Concrete02 1 -27.0 -0.002 -23.0 -0.01 0.1 0.00 0.00
# Cover concrete (unconfined)
# uniaxialMaterial Concrete01 2 -55.2 -0.002 -27.6 -0.008
uniaxialMaterial Concrete02 2 -25.0 -0.002 -20.0 -0.008 0.10 0.00 0.00
# STEEL
# Reinforcing steel
set fy 450.0; # Yield stress
set E 210000.0; # Young's modulus
#
tag fy E0 b
#uniaxialMaterial Steel01 3 $fy $E 0.001
#
tag fy E0 b R0 cR1 CR1
uniaxialMaterial Steel02 3 $fy $E 0.01 15 0.925 0.15

# Masonry
Tag fpc epsc0 fpcu epscu lambda ft Et
# uniaxialMaterial Concrete02 4 -2.25 -0.0015 -1.35 -0.0080 07 0.0 0.0
# uniaxialMaterial Concrete02 4 -4.5 -0.0010 -2.7 -0.007 0.07 0.0 0.0
uniaxialMaterial Concrete02 4 -2.3 -0.0015 -1.1 -0.009 0.085 0.0 0.0
# (3a) uniaxialMaterial Concrete02 4 -2.15 -0.0015 -0.6 -0.008 0.030 0.0 0.07
# uniaxialMaterial Concrete02 5 -10.85 -0.0015 -6.51 -0.008 0.07 0.0 0.0
# uniaxialMaterial Concrete02 5 -22.90 -0.0015 -13.74 -0.008 0.07 0.0 0.0
# (3a)
# uniaxialMaterial Concrete02 5 -22.82 -0.0015 -13.69 -0.008 0.07 0.0 0.00

set S1 -171696
set e1 -0.0014
set S2 -245280
set e2 -0.0026
set S3 -196224
set e3 -0.00727
set S4 -196224
set e4 -19.6491

```

```

#uniaxialMaterial Pinching4 $matTag $ePf1 $ePd1 $ePf2 $ePd2 $ePf3 $ePd3 $ePf4 $ePd4 <$eNf1 $eNd1 $eNf2 $eNd2 $eNf3 $eNd3
$eNf4 $eNd4> $rDispP $rForceP $uForceP <$rDispN $rForceN $uForceN > $gK1 $gK2 $gK3 $gK4 $gKLim $gD1 $gD2 $gD3 $gD4 $gDLim $gF1
$gF2 $gF3 $gF4 $gFLim $gE $dmgType

uniaxialMaterial Pinching4 10 0 1 0 5 0 10 0 20 $S1 $e1 $S2 $e2 $S3 $e3
$S4 $e4 0.5 0.25 0.05 0.5 0.25 0.05 1 0.2 0.3 0.2 0.9 0.5 0.5 2 2 0.5 1
0 1 1 0.9 10 "cycle"

# Define cross-section for nonlinear columns
# -----
# #####
# set some parameters for COLUMNS sections
set colWidth 200.0
set colDepth 200.0

set cover 20.0
set As 78.5 ; # area of 1 bar

set y1 [expr $colDepth/2.0]
set z1 [expr $colWidth/2.0]

section Fiber 1 {

# Create the concrete core fibers
patch rect 1 30 30 [expr $cover-$y1] [expr $cover-$z1] [expr $y1-$cover] [expr $z1-$cover]

# Create the concrete cover fibers (top, bottom, left, right)
patch rect 2 20 20 [expr -$y1] [expr $z1-$cover] $y1 $z1
patch rect 2 20 20 [expr -$y1] [expr -$z1] $y1 [expr $cover-$z1]
patch rect 2 20 20 [expr -$y1] [expr $cover-$z1] [expr $cover-$y1] [expr $z1-$cover]
patch rect 2 20 20 [expr $y1-$cover] [expr $cover-$z1] $y1 [expr $z1-$cover]

# Create the reinforcing fibers (left, middle, right)
layer straight 3 2 $As [expr -$y1+$cover] [expr $z1-$cover] [expr $y1-$cover] [expr $z1-$cover]
layer straight 3 0 $As [expr -$y1+$cover] 0.0 [expr $y1-$cover] 0.0
layer straight 3 2 $As [expr -$y1+$cover] [expr -$z1+$cover] [expr $y1-$cover] [expr -$z1+$cover]
}

#VALORI MATERIALI TAGLIO E TORSIONE PER TUTTE LE SEZIONI
set Gc 25000000
set C250 10
# _____
# column torsional stiffness
# Linear elastic torsion for the column

set GJcol [expr $Gc*$C250*$colDepth*pow($colWidth,3)]
set GAcol [expr $Gc*$colWidth*$colDepth*5/6]

uniaxialMaterial Elastic 50 $GJcol

```

```

uniaxialMaterial Elastic 51 $GAc1

# Attach torsion to the RC beam section (QUESTO COMANDO ATTACCA TAGLIO E TORSIONE ALLE SEZIONI DELLE TRAVI)
#
#          tag uniTag uniCode secTag
#section Aggregator $secTag $matTag1 $string1 $matTag2 $string2 ..... <-section $sectionTag>
section Aggregator    10    51 Vy      51 Vz      50 T      -section 1
# _____

# #####

# set some parameters for EQUIVALENT DIAGONAL STRUT section

set strWidth 1.0
set strDepth 1.0
set coverstr 0.1

set Asp 1.0; # area of 1 bar
# some variables derived from the parameters
set ys1 [expr $strDepth/2.0]
set zs1 [expr $strWidth/2.0]

section Fiber 3 {

    # Create the concrete core fibers
    patch rect 10 30 30 -$ys1 -$zs1 $ys1 $zs1

    # Create the reinforcing fibers (left, middle, right)
    layer straight 3 0 $Asp [expr -$ys1+$coverstr] [expr $zs1-$coverstr] [expr $ys1-$coverstr] [expr $zs1-$coverstr]
    layer straight 3 0 $Asp [expr -$ys1+$coverstr] 0.0 [expr $ys1-$coverstr] 0.0
    layer straight 3 0 $Asp [expr -$ys1+$coverstr] [expr -$zs1+$coverstr] [expr $ys1-$coverstr] [expr -$zs1+$coverstr]
}

# EQSTRUT torsional stiffness
# Linear elastic torsion for the column

set GJstr [expr $Gc*$C250*$strDepth*pow($strWidth,3)]
set GAstr [expr $Gc*$strWidth*$strDepth*5/6]

uniaxialMaterial Elastic 60 $GJstr
uniaxialMaterial Elastic 61 $GAstr

# Attach torsion to the RC beam section (QUESTO COMANDO ATTACCA TAGLIO E TORSIONE ALLE SEZIONI DELLE TRAVI)
#
#          tag uniTag uniCode secTag
#section Aggregator $secTag $matTag1 $string1 $matTag2 $string2 ..... <-section $sectionTag>
section Aggregator    30    61 Vy      61 Vz      60 T      -section 3

# #####

# set some parameters for BEAM sections

```

```

set beaWidth 400.0
set beaDepth 200.0

set cover 20.0
set Ast 113.0; # area of 1 bar

# some variables derived from the parameters
set yb1 [expr $beaDepth/2.0]
set zb1 [expr $beaWidth/2.0]

section Fiber 4 {

    # Create the concrete core fibers
    patch rect 1 40 40 [expr $cover-$yb1] [expr $cover-$zb1] [expr $yb1-$cover] [expr $zb1-$cover]

    # Create the concrete cover fibers (top, bottom, left, right)
    patch rect 2 20 10 [expr -$yb1] [expr $zb1-$cover] $yb1 $zb1
    patch rect 2 20 10 [expr -$yb1] [expr -$zb1] $yb1 [expr $cover-$zb1]
    patch rect 2 20 10 [expr -$yb1] [expr $cover-$zb1] [expr $cover-$yb1] [expr $zb1-$cover]
    patch rect 2 20 10 [expr $yb1-$cover] [expr $cover-$zb1] $yb1 [expr $zb1-$cover]

    # Create the reinforcing fibers (left, middle, right)
    layer straight 3 3 $Ast [expr -$yb1+$cover] [expr $zb1-$cover] [expr $yb1-$cover] [expr $zb1-$cover]
    layer straight 3 3 $Ast [expr -$yb1+$cover] [expr -$zb1+$cover] [expr $yb1-$cover] [expr -$zb1+$cover]
}

# _____
# BEAM torsional stiffness
# Linear elastic torsion for the equivalent strut

set GJbea [expr $Gc*$C250*$beaDepth*pow($beaWidth,3)]
set GAbea [expr $Gc*$beaWidth*$beaDepth*5/6]

uniaxialMaterial Elastic 54 $GJbea
uniaxialMaterial Elastic 55 $GAbea

# Attach torsion to the RC beam section(QUESTO COMANDO ATTACCA TAGLIO E TORSIONE ALLE SEZIONI DELLE TRAVI)
#
#          tag uniTag uniCode secTag
#section Aggregator $secTag $matTag1 $string1 $matTag2 $string2 ..... <-section $sectionTag>
section Aggregator 40 55 Vy 55 Vz 54 T -section 4

# #####
#COLUMNS#
# Geometry of column elements
#
#          tag

geomTransf Linear 1 -1 0 0

```

```

# Number of integration points along length of element
set np 5
set nps 10
# Create the columns using Beam-column elements
#           e           tag ndI ndJ nsecs secID transfTag
set eleType forceBeamColumn
element $eleType           1   1   3   $np   10   1
# element $eleType           101 12   3   $np   10   1
element $eleType           2   2   4   $np   10   1
# element $eleType           202 15   4   $np   10   1
# #####
#BEAMS#
# Define beam element
# -----

# Geometry of beam elements
#           tag
geomTransf Linear 2 0 1 0
geomTransf Corotational 3 0 1 0
geomTransf Corotational 4 -1 0 0
#1=4
#2=3
set tranfeloriz 2
set tranfelvert 1
set tranfelorizcor 3
set tranfelvertcor 4

# Create the NONLINEAR BEAM using Beam-column elements
#           e           tag ndI ndJ nsecs secID transfTag
set eleType2 dispBeamColumn
# TRAVI
# element $eleType           3   1   2   $np   40   $tranfeloriz
element $eleType           4   3   4   $np   40   $tranfeloriz
# element $eleType           11  1   5   $np   40   $tranfeloriz
# element $eleType           12  5   2   $np   40   $tranfeloriz
# VERTICAL
# element $eleType2           9   7   63 $nps  50   $tranfelvertcor
# element $eleType2           10  63  8   $nps  50   $tranfelvertcor
# HORIZONTAL
# element $eleType2           13 13  64 $nps  80   $tranfelorizcor
# element $eleType2           14 64 14  $nps  80   $tranfelorizcor

#DIAGONAL

```

```

# element trussSection $eleTag $iNode $jNode $secTag

element trussSection 5 3 2 30

# element trussSection 6 1 4 30

# element $eleType2 7 1 62 $nps 30 $stranfeloriz
# element $eleType2 8 62 44 $nps 30 $stranfeloriz

# Create the ELASTIC BEAM beam element

#
#          eleTag iNode jNode A          E          G          J          Iy          Iz          transfTag
# transfTag
# element elasticBeamColumn 11 1 2 8000000 3000000 1000000          10666666666 10666666666 10666666666 $stranfeloriz
# element elasticBeamColumn 12 5 2 8000000 3000000 1000000          10666666666 10666666666 10666666666 2

#####

# Create the Truss element infill

#          tag
#geomTransf Linear 3 1 0 0

#
#          tag ndI ndJ          A          Mat          SectionTag
# element trussSection          5 3 61          30
# element trussSection          6 61 2          30
# element trussSection          7 1 62          30
# element trussSection          8 62 4          30

#element zeroLength $eleID $Node1ID $Node2ID -mat $matID $matID -dir 1 2
#uniaxialMaterial Elastic $matTag $E

uniaxialMaterial Elastic 20 500000000;

# uniaxialMaterial Elastic 10 100;
# uniaxialMaterial Elastic 15 100;

#
#          Tag E Fy GAP
# uniaxialMaterial ElasticPPGap 41 100 10000 10000;
# uniaxialMaterial ElasticPPGap 101 1000000 -100000 0.0;
# uniaxialMaterial Parallel 90 41 101;
# uniaxialMaterial Series 99 41 20;
# uniaxialMaterial ENT 91 500000000;

```

```

#VERTICAL
# element zeroLength 90 5 7 -mat 20 20 20 15 10 10 -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 0 1 0 -1 0 0
# element zeroLength 91 8 9 -mat 20 20 20 15 10 10 -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 0 1 0 -1 0 0

#HORIZONTAL
# element zeroLength 88 12 13 -mat 20 20 20 15 10 10 -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 0 0 0 1 0
# element zeroLength 89 14 15 -mat 20 20 20 15 10 10 -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 0 0 0 1 0

#DIAGONAL
# element zeroLength 92 1 11 -mat 20 20 20 15 10 10 -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 1 0 -1 1 0
# element zeroLength 93 44 4 -mat 91 20 20 15 10 10 -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 1 0 -1 1 0
# element zeroLength 94 3 33 -mat 91 20 20 15 10 10 -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 -1 0 1 1 0
# element zeroLength 95 22 2 -mat 20 20 20 15 10 10 -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 -1 0 1 1 0

# Define gravity loads
# -----

# Set a parameter for the axial load
set P 200000.0;          # 10% of axial capacity of columns

# Create a Plain load pattern with a Linear TimeSeries
pattern Plain 1 "Linear" {

    # Create nodal loads at nodes 3 & 4
    #   nd   FX      FY FZ      MX  MY   MZ
    load 3  0.0  [expr -$P]  0.0  0.0  0.0  0.0
    load 4  0.0  [expr -$P]  0.0  0.0  0.0  0.0

    # load 9  0.0  [expr -$P/4] 0.0  0.0  0.0  0.0
    # load 61 0.0    0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
    # load 62 0.0    0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
    # load 63 0.0    0.0  0.0  0.0  0.0  0.0

}

# -----

# End of model generation
# -----

# -----

# Start of analysis generation
# -----

# Create the system of equation, a sparse solver with partial pivoting
system BandGeneral

# Create the constraint handler, the transformation method
constraints Transformation

# Create the DOF numberer, the reverse Cuthill-McKee algorithm

```

```

numberer RCM

# Create the convergence test, the norm of the residual with a tolerance of
# 1e-12 and a max number of iterations of 10
test NormDispIncr 1.0e-12 1000 3

# Create the solution algorithm, a Newton-Raphson algorithm
algorithm Newton

# Create the integration scheme, the LoadControl scheme using steps of 0.1
integrator LoadControl 0.1

# Create the analysis object
analysis Static

# -----
# End of analysis generation
# -----

# -----
# Finally perform the analysis
# -----

# perform the gravity load analysis, requires 10 steps to reach the load level
analyze 10

# Print out the state of nodes 3 and 4
print node 3

# Print out the state of element 1
print ele 1 2

```

