



***VALUTAZIONE E MIGLIORAMENTO DELLA
SICUREZZA DI STRUTTURE ESISTENTI***
MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA

Proff.

Lorenzo Hofer,
Mariano Angelo Zanini,
Flora Faleschini
AA. 2023/2024

MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA

INTRODUZIONE

La **risposta strutturale** di un edificio esistente può essere valutata con diversi metodi di analisi, sia **lineari** sia **non lineari** definiti al § 7.3 delle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2018).

7.3. METODI DI ANALISI E CRITERI DI VERIFICA

L'entità della domanda con la quale confrontare la capacità della struttura, secondo i criteri definiti al § 7.3.6, può essere valutata utilizzando una delle modellazioni descritte in precedenza ed adottando uno fra i metodi di analisi illustrati nel seguito.

I metodi di analisi si articolano in lineari e non lineari, in funzione delle caratteristiche della struttura e del modello di comportamento adottato.

Nel caso di analisi lineare, la domanda sismica per strutture a comportamento sia non dissipativo, sia dissipativo, può essere ridotta utilizzando un opportuno fattore di comportamento q . I valori attribuibili a q variano in funzione del comportamento strutturale (dissipativo o non dissipativo) e dello stato limite considerati, legandosi all'entità delle plasticizzazioni, che a ciascuno stato limite si accompagnano.

Per ciascuno degli stati limite e dei metodi di analisi considerati, nella tabella successiva sono riportati:

- *per l'analisi lineare*, il comportamento strutturale, le modalità di modellazione dell'azione sismica e i limiti da attribuire al fattore di comportamento q , a seconda dello stato limite considerato;
- *per l'analisi non lineare*, il comportamento strutturale, le modalità di modellazione dell'azione sismica.

MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA

INTRODUZIONE

Per la valutazione della **sicurezza sismica**, le metodologie previste dalla norma (C8.7.2.2) sono:

- **Analisi lineare** con spettro di risposta *elastico* o con *fattore di comportamento*
 - statica
 - dinamica
- **Analisi non lineare**
 - statica
 - dinamica

MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA

INTRODUZIONE

Modellazione **NON lineare**



Ruolo fondamentale nella **valutazione della sicurezza** degli edifici in CA

Edifici non progettati per resistere ad azioni orizzontali di tipo sismico:

- **Grandi spostamenti** oltre il dominio della linearità geometrica, associati a
- **Deformazioni importanti dei materiali** oltre la soglia elastica.

MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA

LA NON LINEARITÀ GEOMETRICA

Quando una struttura non progettata per carichi sismici è sottoposta a terremoti di elevata intensità, può essere soggetta a **deformazioni e sollecitazioni che fanno decadere le ipotesi di modellazione elastico-lineare** comunemente adottata nella progettazione di edifici di nuova realizzazione.

Non è più possibile assumere:

- la configurazione iniziale **indeformata** non può più essere assunta sostanzialmente coincidente con la configurazione finale **deformata**. Non sono più valide le ipotesi di piccole deformazioni e piccoli spostamenti;
- Gli **spostamenti** strutturali **non variano più in modo proporzionale ai carichi** applicati;

$$x \not\propto F$$

- La **matrice di rigidezza** della struttura **non è più costante** ed indipendente dalle sollecitazioni;

$$F = Kx, \text{ con } K \text{ NON costante}$$

MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA

LA NON LINEARITÀ GEOMETRICA

La *non linearità geometrica geometrica* di una struttura in CA, è legata essenzialmente **tre contributi**:

- 1) *Effetti del secondo ordine $P - \Delta$* ;
- 2) *Effetti del secondo ordine $P - \delta$ legati alla curvatura*;
- 3) *rotazione del riferimento locale*.

La risposta globale è data dalla combinazione di questi tre contributi, ognuno con la propria influenza in base al caso specifico in esame.

MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA

LA NON LINEARITÀ GEOMETRICA

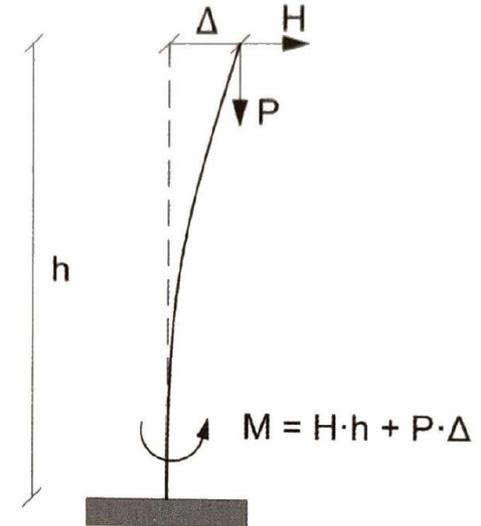
1) Effetti del secondo ordine $P - \Delta$

ANALISI LINEARE: sotto queste ipotesi, la configurazione deformata coinciderebbe con la configurazione indeformata;

$$M = H \cdot h$$

ANALISI NON LINEARE: in questo caso, a causa dello spostamento in sommità si ottiene un momento alla base maggiore, dato dall'eccentricità della forza di compressione.

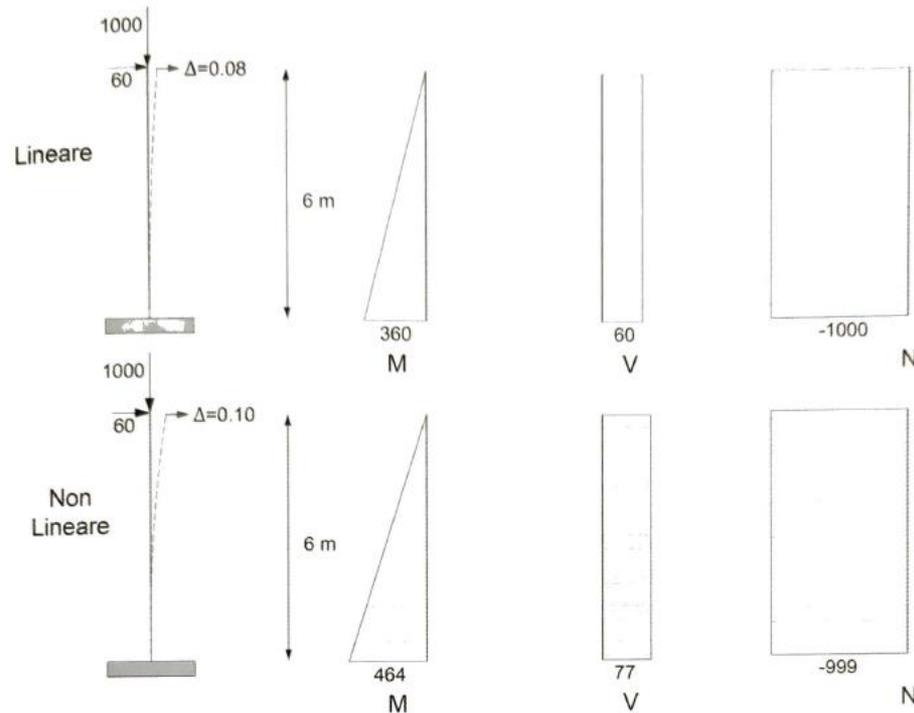
$$M = H \cdot h + P \cdot \Delta$$



MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA

LA NON LINEARITÀ GEOMETRICA

1) Effetti del secondo ordine $P - \Delta$



MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA

LA NON LINEARITÀ GEOMETRICA

2) Effetti del secondo ordine $P - \delta$ legati alla curvatura;

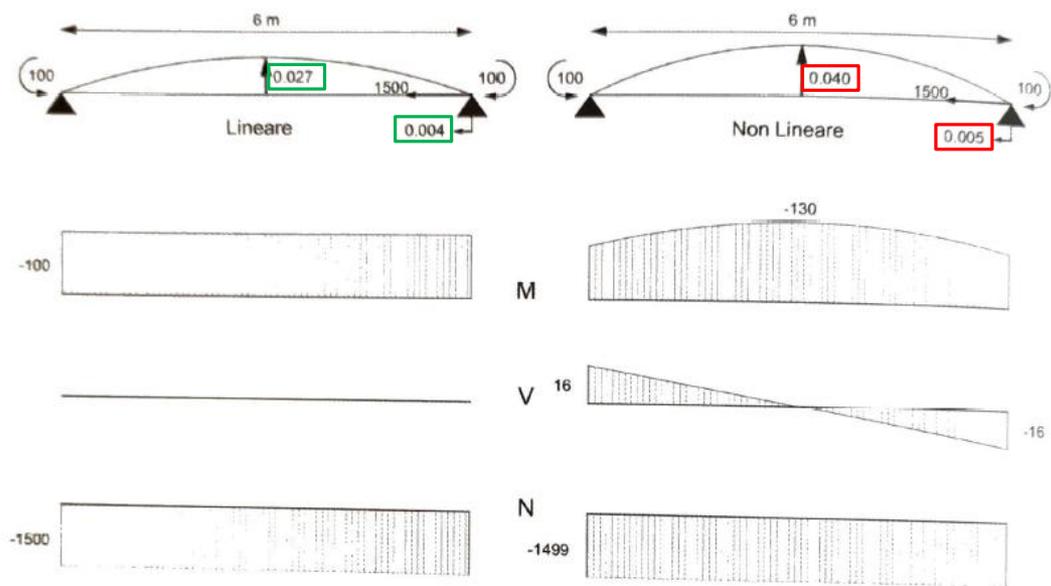
Sono legati all'instabilità indotta dalla curvatura che si sviluppa lungo un elemento strutturale sotto sollecitazione di presso-flessione.

In elementi snelli, soggetti ad importanti sollecitazioni flessionali \Rightarrow **accoppiamento tra rigidità assiale e i momenti a cui l'elemento è soggetto.**

\Rightarrow Aumento della deformazione assiale

\Rightarrow Aumento della curvatura

\Rightarrow Aumento delle deformazioni trasversali

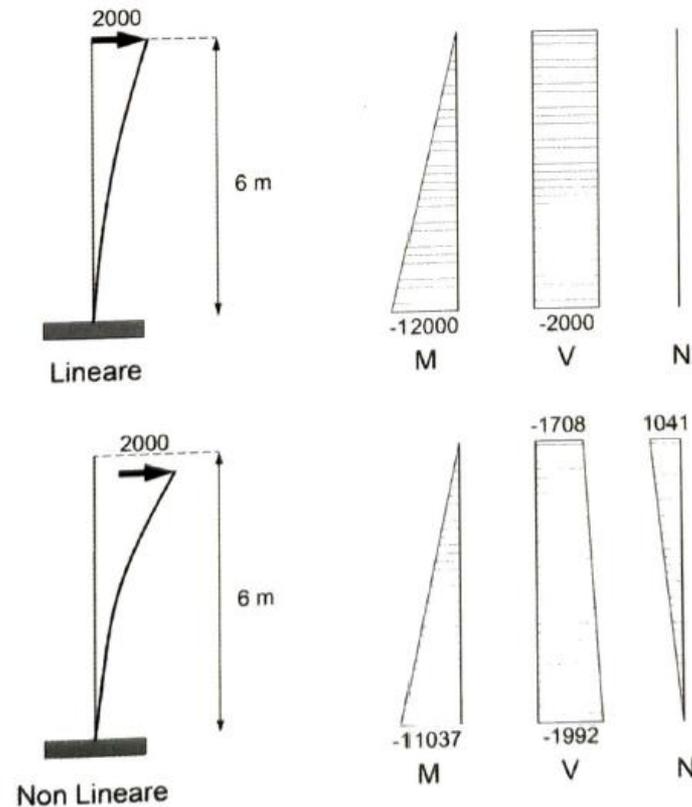


MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA

LA NON LINEARITÀ GEOMETRICA

3) Rotazione del riferimento locale;

All'aumentare dello spostamento, la forza di taglio introduce nella struttura una componente assiale sempre maggiore. All'inizio tale componente è trascurabile, poi aumenta in modo non lineare.



MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA

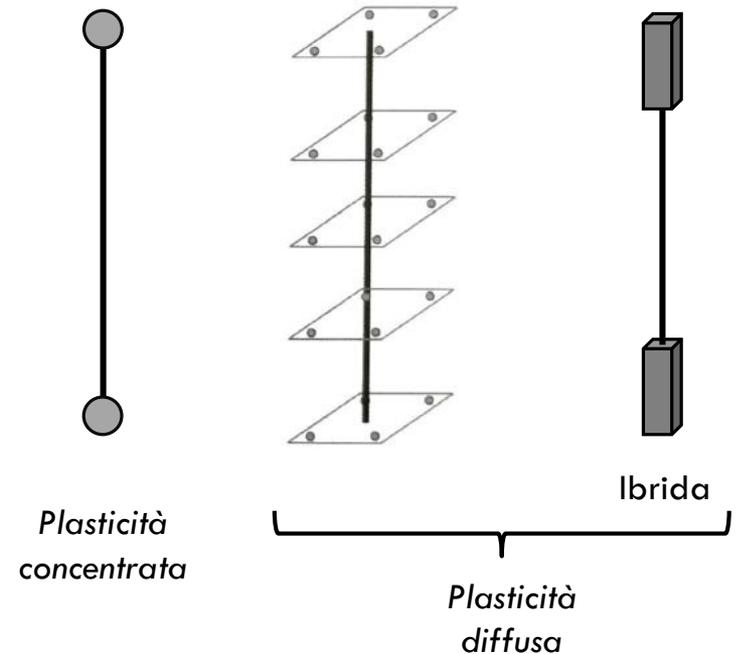
LA NON LINEARITÀ DEI MATERIALI

Per tener conto del comportamento non lineare dei materiali, i principali software di calcolo strutturale seguono due approcci principali:

- Modellazione a **plasticità concentrata**, tramite l'utilizzo di **cerniere plastiche**
- Modellazione a **plasticità diffusa**, detta anche modellazione a **fibre**

In alcuni casi viene utilizzato anche un approccio **ibrido**:

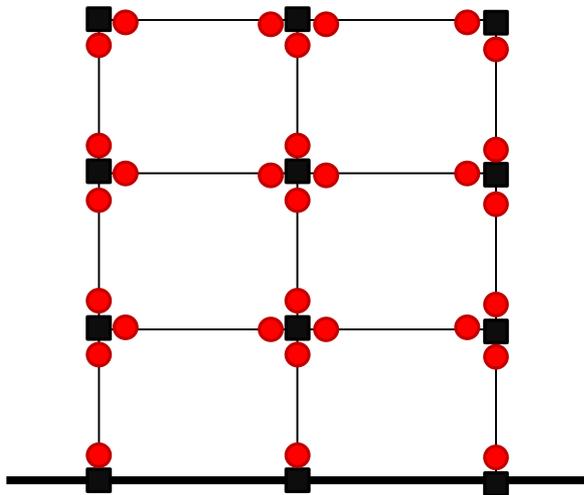
- modellazione di dettaglio a **plasticità diffusa per la sola lunghezza della cerniera plastica**
- **parte elastica** per la parte rimanente dell'elemento



MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA *PLASTICITÀ CONCENTRATA*

Travi e pilastri => elastici

La non linearità della struttura viene concentrata in alcuni elementi «cerniera» posizionati agli estremi degli elementi elastici.



PRO

- poco onerosa dal punto di vista computazionale

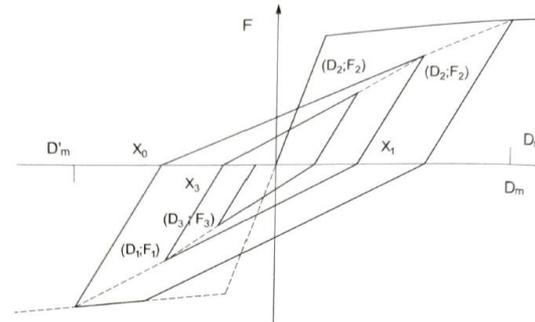
CONTRO

- diverse variabili da definire, tra cui:
 - Posizione delle cerniere plastiche
 - Scelta del modello isteretico
 - Calibrazione dei parametri del modello isteretico
 - Tipo di rottura

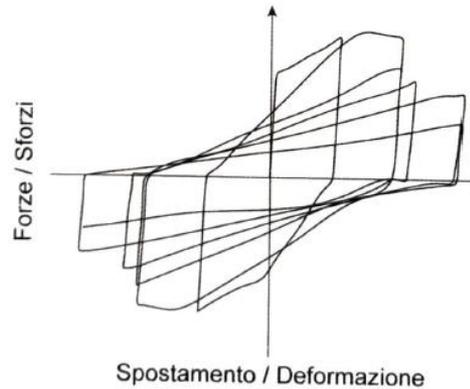
MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA

PLASTICITÀ CONCENTRATA

Modello isteretico di Takeda 1970, spesso utilizzato nella definizione delle cerniere plastiche in strutture in CA.



Legami diversi possono essere utilizzati per rappresentare diversi tipi di risposta



Risposta isteretica

Peak oriented

(comportamento flessionale)



Risposta isteretica

Pinched

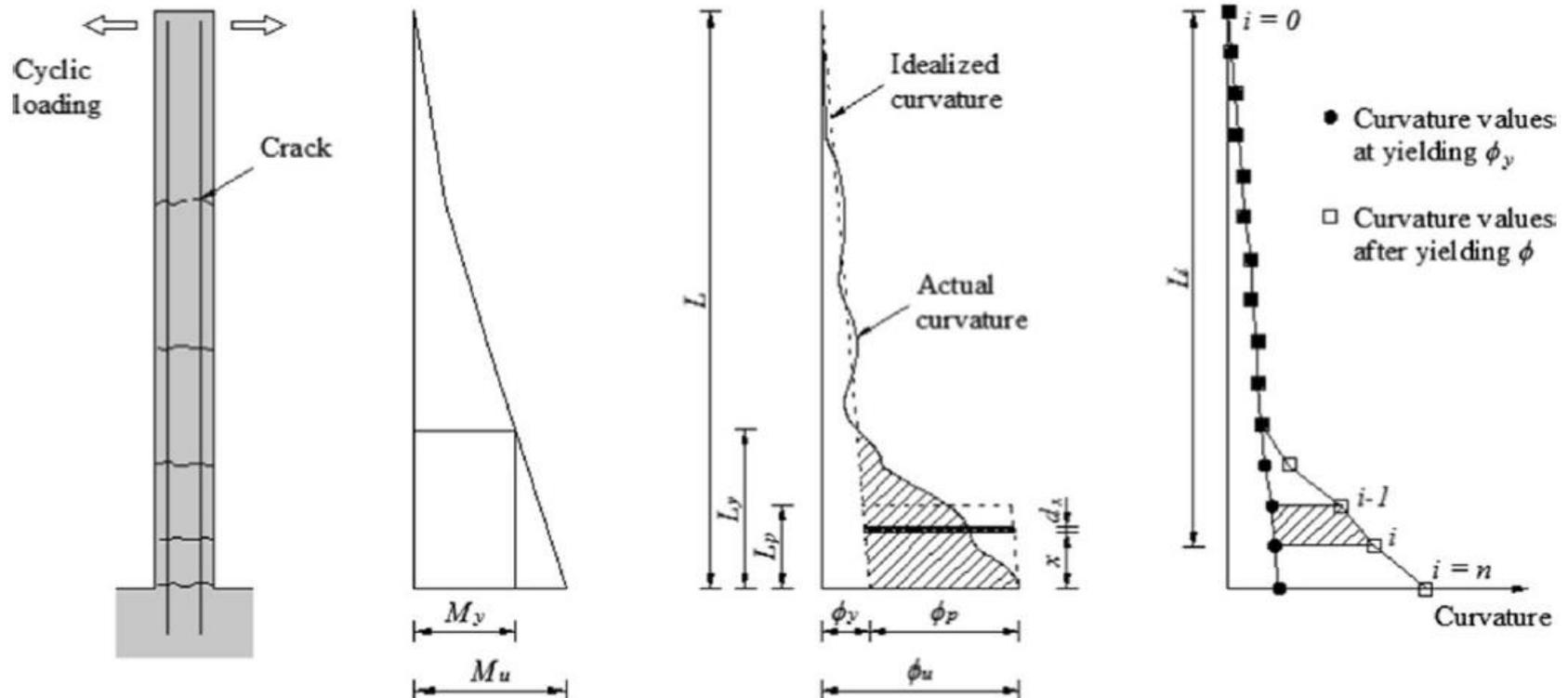
(risposta dominata dal taglio)

Modello di degrado Ibarra-Medina-Krawinkler (Ibarra et al. 2005)

MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA

PLASTICITÀ CONCENTRATA

Lunghezza della cerniera plastica

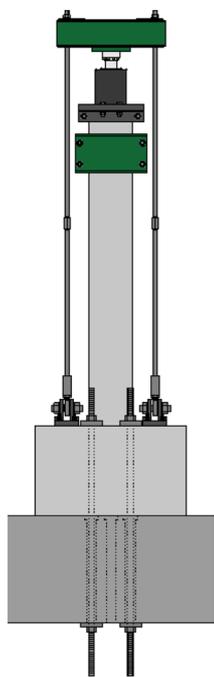


MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA

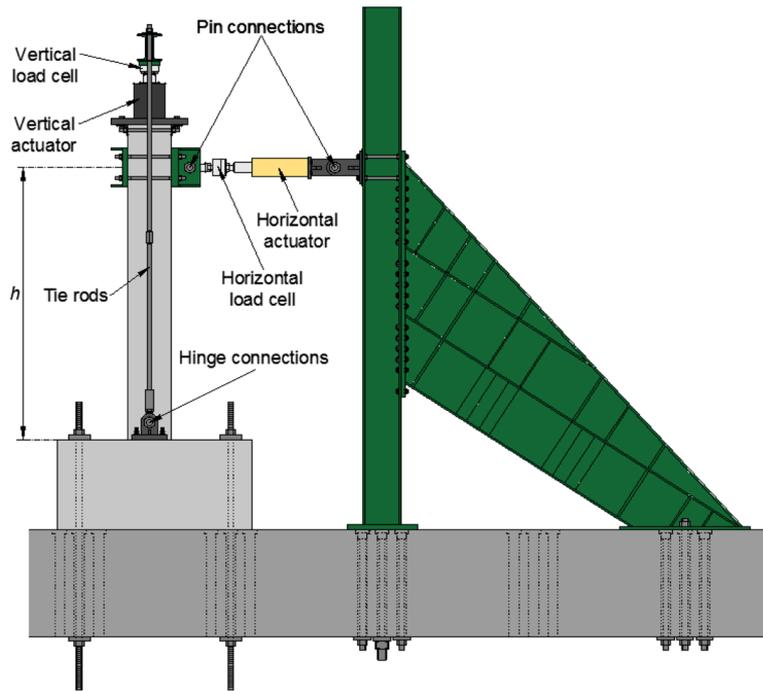
PLASTICITÀ CONCENTRATA

Lunghezza della cerniera plastica

Frontal view



Side view



Bulletin of Earthquake Engineering (2021) 19:5191–5218
<https://doi.org/10.1007/s10518-021-01133-w>

ORIGINAL ARTICLE



Seismic behavior of precast reinforced concrete column-to-foundation grouted duct connections

Lorenzo Hofer¹ · Mariano Angelo Zanini¹ · Flora Faleschini¹ · Klajdi Toska¹ · Carlo Pellegrino¹

Received: 8 December 2020 / Accepted: 20 May 2021 / Published online: 1 July 2021
© The Author(s) 2021

Abstract

The paper shows the results of an experimental campaign aimed at investigating the cyclic behavior of a column-to-foundation joint for precast concrete elements. The tested connection is realized adopting corrugated steel ducts embedded into the foundation, in which column protruding rebars are anchored by grouting high performance mortar. The experimental program consists in testing six full-scale reinforced concrete square-section columns subject to quasi-static cyclic lateral load with a constant axial compression. A preliminary series of bond tests was carried out to define some experimental variables, i.e., longitudinal rebar diameter and anchorage length. Results of the precast joints are compared with those of two reference cast-in-place specimens with the same geometric characteristics, showing similar hysteretic behavior, energy dissipation and ductility values. Lastly, the plastic hinge height is computed for all the specimens based on experimental concrete strains, and compared to current codes formulations.

Keywords Precast concrete column · Column-to-foundation connection · Grouted duct connection · Cyclic test · Seismic behavior

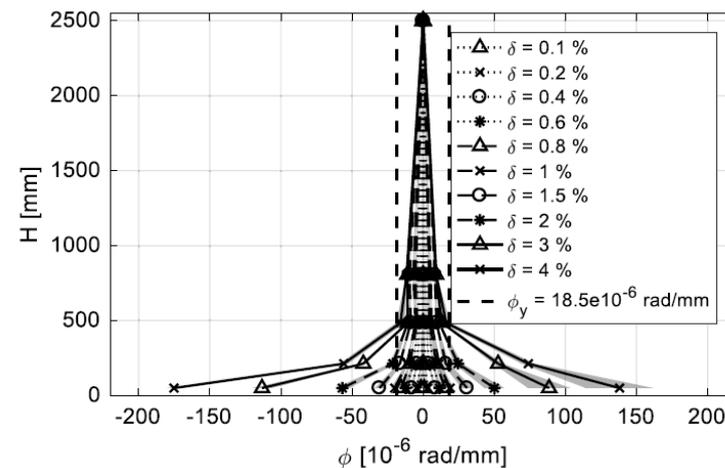
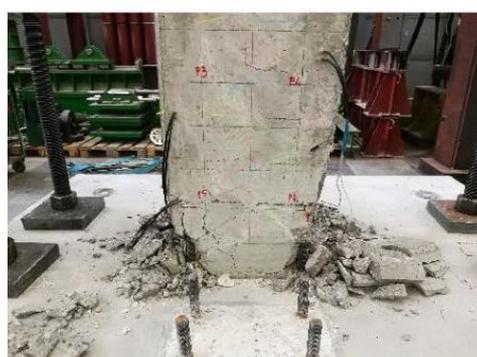
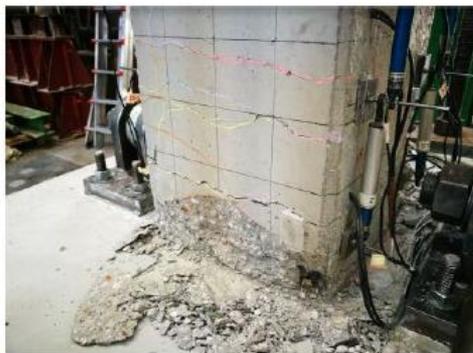
1 Introduction

Precast structures are widely diffused structural typologies since they allow minimizing the on-site construction time and cover wide open spaces. Hence, precast concrete structures have been widely adopted to realize industrial plants, factories and warehouses (Buratti et al. 2017). Typically, the configuration of these structures is simple, consisting in cantilever columns connected with simply supported beams. Consequently, the structural behavior of the connections strongly influences the overall structural response of this structural type (Elliot 2017). Indeed, when precast frame structures are subject to horizontal forces, the ductility demand is concentrated at the base of the column, which becomes the most critical part of the structure.

MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA

PLASTICITÀ CONCENTRATA

Lunghezza della cerniera plastica



MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA

PLASTICITÀ CONCENTRATA

Lunghezza della cerniera plastica

In letteratura sono state proposte diverse formulazioni per il calcolo di L_p . Nella Circolare esplicativa 2019 (§ C8.7.3.2), per la condizione ultima viene riportata la seguente formulazione

$$L_p = 0.1L_V + 0,17h + 0,24 \frac{d_{bL}f_y}{\sqrt{f_c}}$$

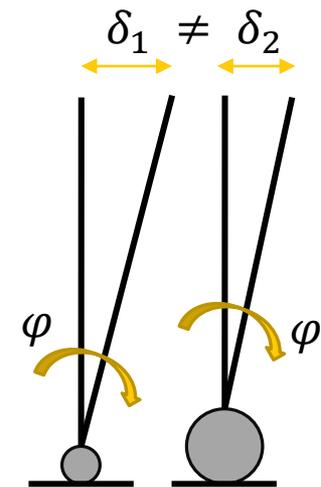
L_V è la luce di taglio

h è l'altezza della sezione

d_{bL} è il diametro (medio) delle barre longitudinali

f_y e f_c sono rispettivamente, la resistenza a snervamento dell'acciaio longitudinale e la resistenza a compressione (in MPa), ottenute come media delle prove eseguite in sito e da fonti aggiuntive di informazione, divise per il fattore di confidenza appropriato in relazione al livello di conoscenza raggiunto.

Sono relazioni *tipicamente empiriche* che possono essere influenzate da diversi fattori (carico assiale, sovrapposizione ferri, staffatura, duttilità/confinamento...)



MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA *PLASTICITÀ CONCENTRATA*

Lunghezza della cerniera plastica

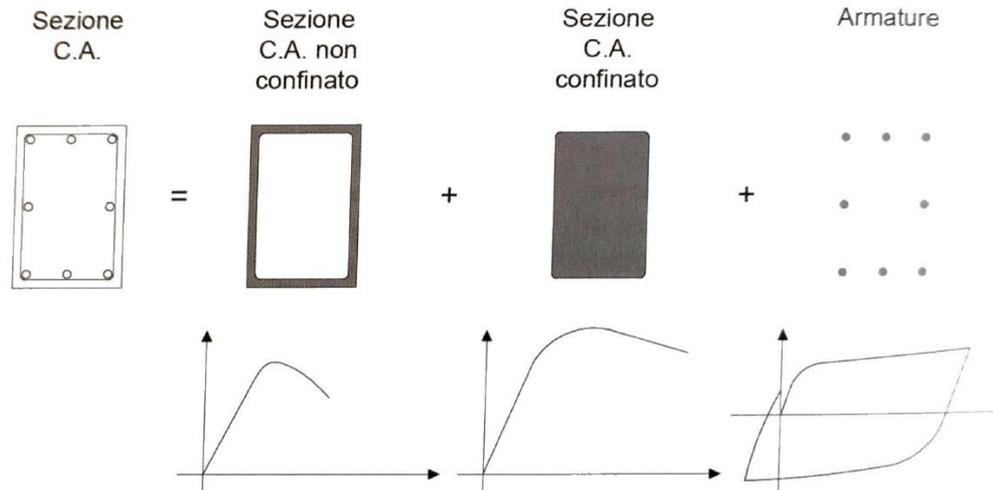
Table 1. Empirically derived hinge lengths.

Reference	Hinge Length (L_{pl})
(Baker et al., 1956)	$k_1 k_2 k_3 \cdot (z/d)^{1/4} \cdot d$
(Mattock, 1964)	$\frac{d}{2} \left[1 + \left(1.14 \sqrt{\frac{z}{d}} - 1 \right) \left(1 - \left(\frac{q-q'}{q_b} \right) \sqrt{\frac{d}{16.2}} \right) \right]$
(Corley, 1966)	$\frac{d}{2} + 0.2 \frac{z}{\sqrt{d}}$
(Mattock, 1967)	$\frac{d}{2} + 0.05z$
(Park, 1982)	$0.4h$
(Priestley et al., 1987)	$0.08L_v + 6d_b$
(Paulay et al., 1992)	$0.08L_v + 0.022d_b f_y$
(Panagiotakos et al., 2001)	$0.12L_v + 0.014\alpha_{sl} d_b f_y$ for cyclic loading
	$0.18L_v + 0.021\alpha_{sl} d_b f_y$ for monotonic loading
(Fardis, 2007)	$0.09L_v + 0.2h$ for cyclic loading
	$0.04L_v + 1.2h$ for monotonic loading

MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA

PLASTICITÀ DIFFUSA

L'intera sezione viene discretizzata in *fibre* che si estendono per l' *intera lunghezza* dell'elemento.



Fibra di ogni sezione \leftrightarrow relazione uniaxiale σ - ϵ

Lo stato tensionale e deformativo di ogni sezione viene ricavato attraverso l'integrazione della risposta non-lineare assiale di ogni fibra

MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA *PLASTICITÀ DIFFUSA*

Vantaggi di questo tipo di modellazione:

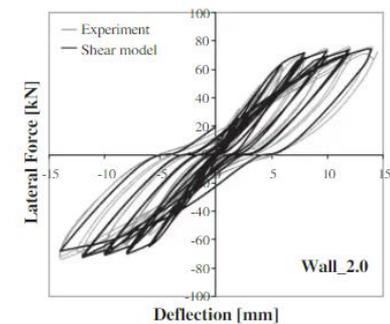
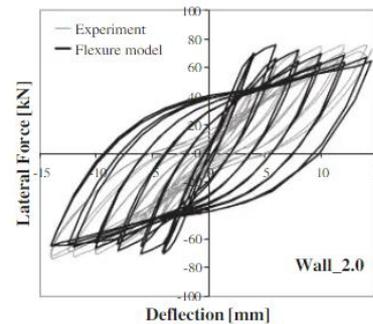
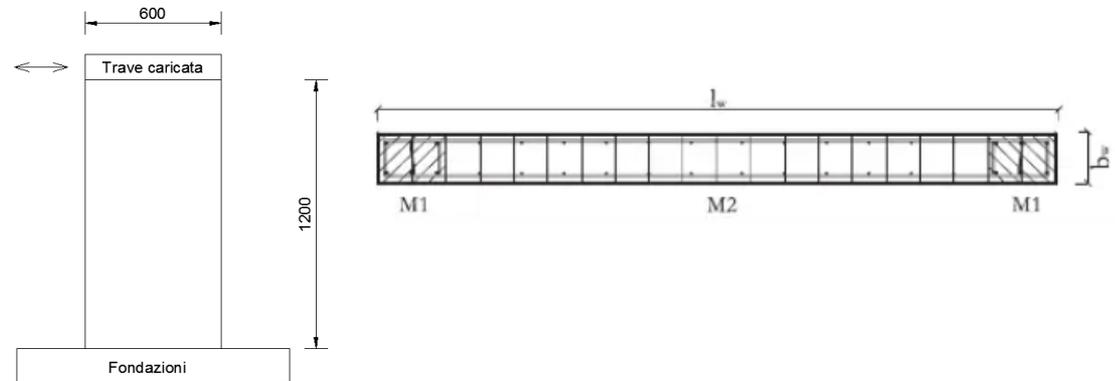
- **Non è necessario definire a priori alcun legame momento – curvatura** per la sezione, ma sono definire il comportamento assiale di ogni materiale.
- **Non è necessario definire un comportamento isteretico associato all'elemento.** Esso viene definito nei legami costitutivi dei materiali utilizzati.
- **L'interazione M-N** (sia in termini di resistenza sia in termini di rigidezza) viene modellata direttamente scomponendo la sezione in fibre ed integrando lo stato tensionale-deformativo per ogni sezione.
- È possibile rappresentare bene il **comportamento biassiale**, con M_x e M_y

MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA

PLASTICITÀ DIFFUSA

E il taglio?

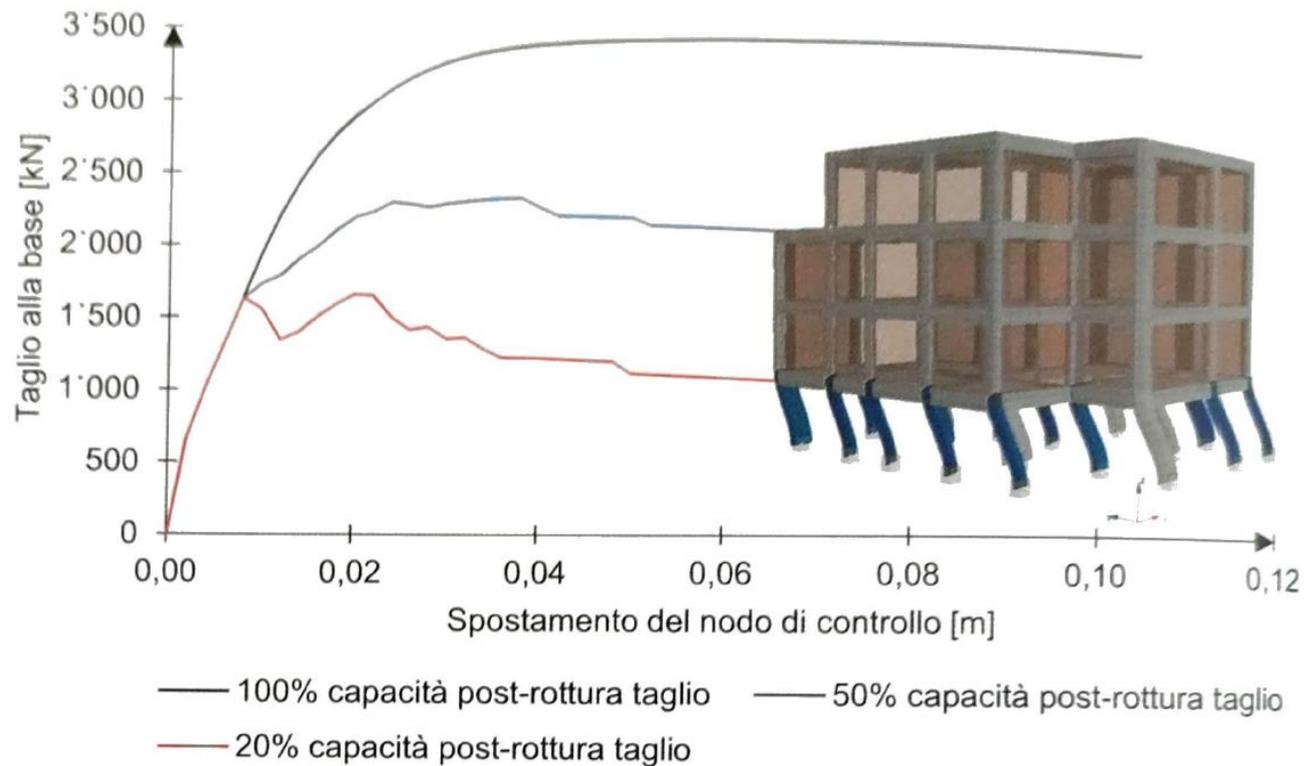
Possibilità di imporre una progressiva riduzione di resistenza e rigidezza una volta raggiunta la capacità a taglio



Ceresa P., petrini L., Pinho R., Sousa R. (2009) A fibre flexure-shear model for seismic analysis of RC framed structures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 38: 565-586.

MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA

PLASTICITÀ DIFFUSA



R. Pinho et al. Valutazione sismica e tecniche di intervento per edifici esistenti in C.A. Maggioli editore 2019.

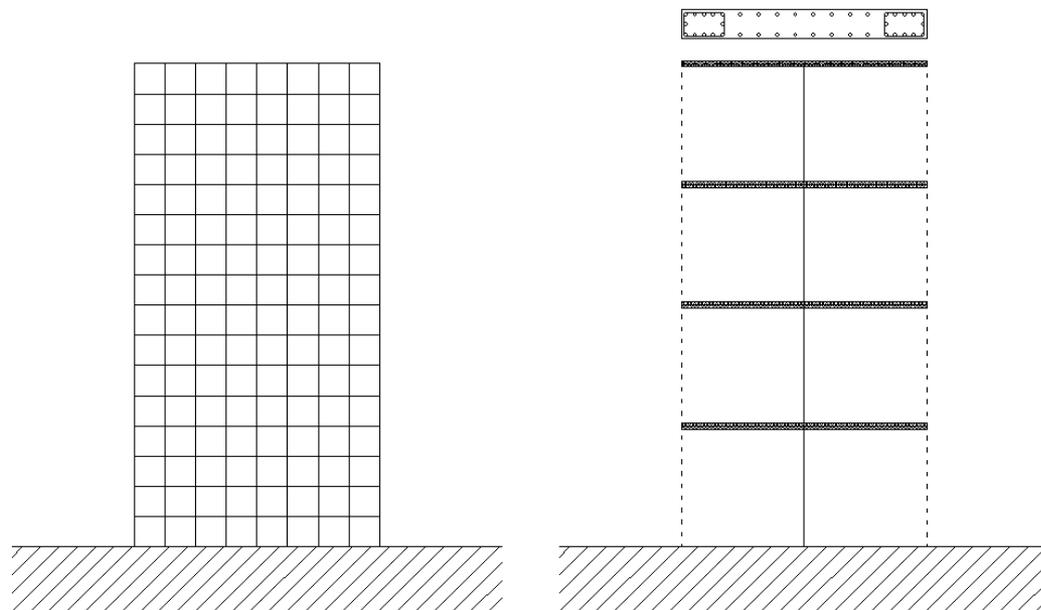
MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA

TECNICHE DI MODELLAZIONE: PARETI STRUTTURALI

Grande rigidezza => influenzano in modo determinante il comportamento globale dell'edificio.

Due approcci principali alla modellazione:

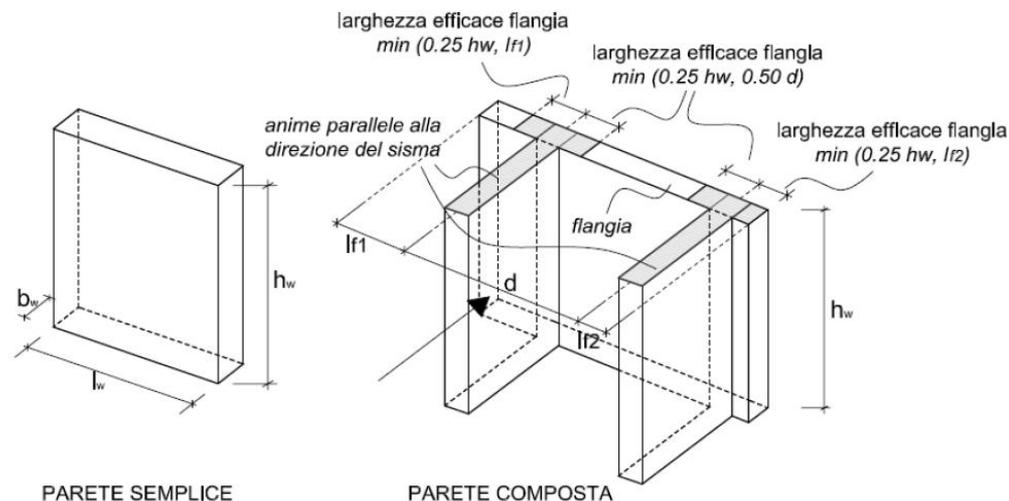
1. Elementi **shell**, elementi bidimensionali che permettono di modellare l'intera geometria delle pareti strutturali
2. **Pilastri equivalenti**, elementi monodimensionali a cui viene assegnata la sezione della parete. Vengono collegati al resto della struttura tramite **rigid link**.



MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA

TECNICHE DI MODELLAZIONE: PARETI COMPOSTE

- Gli elementi strutturali *parete in c.a.* si possono suddividere in **semplice** o **composta** (NTC2018 §7.4.4.5);
- Una parete composta è costituita da più segmenti rettangolari connessi tra loro a formare un unico elemento strutturale con diversa **sezione a L, T, U** o simili;
- Si utilizzano pareti composte principalmente nella realizzazione di nuclei in c.a. (es. **vani ascensore o scala**) in edifici multipiano.



MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA

TECNICHE DI MODELLAZIONE: PARETI COMPOSTE

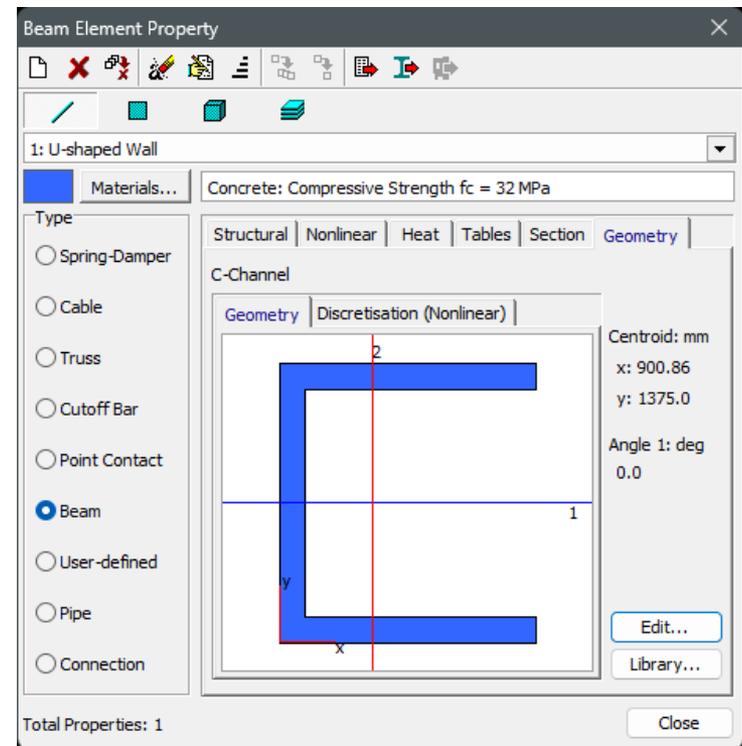
- Il comportamento di pareti composte in c.a. viene ricreato in un ambiente FEM con **tre strategie di modellazione:**
 1. Elemento trave-colonna a sezione equivalente (***stick model***);
 2. Metodo a telaio equivalente (***WCM Wide Column Model***);
 3. Elementi bidimensionali (***plate/shell***).

MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA

TECNICHE DI MODELLAZIONE: PARETI COMPOSTE

STICK MODEL

- Si utilizza un unico elemento monodimensionale con sezione equivalente;
- Tecnica di modellazione semplice che fornisce in output direttamente parametri di sollecitazione N , V , M ;
- Il comportamento non-lineare può essere modellato con la formulazione a fibre;
- Con questa modellazione **non si riesce a riprodurre efficacemente gli effetti della torsione** che si possono generare in strutture con questi elementi.

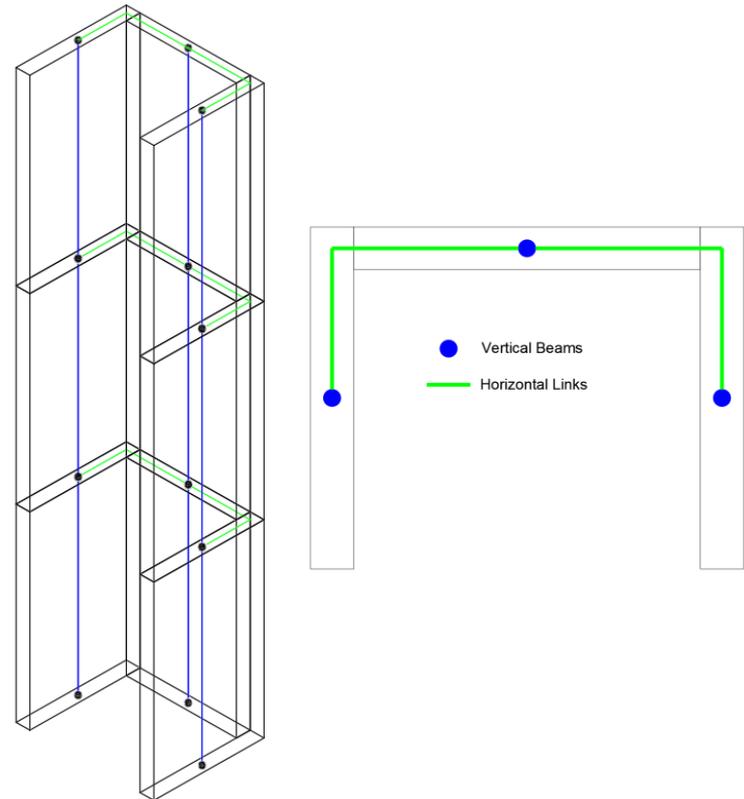


MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA

TECNICHE DI MODELLAZIONE: PARETI COMPOSTE

WCM - WIDE COLUMN MODEL

- Ogni segmento rettangolare viene modellato come un elemento verticale monodimensionale e questi sono connessi tra loro ad ogni interpiano per mezzo di **link rigidi** orizzontali;
- I parametri di sollecitazione vengono forniti per ogni singolo elemento rettangolare, facilitandone la fase di post-processamento (progettazione-verifica).
- Effetto torsione riprodotto attraverso la rigidità flessionale delle *flange* e il loro braccio interno.

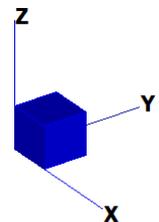
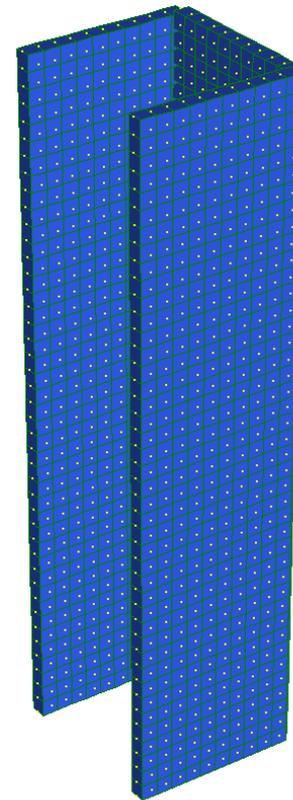


MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA

TECNICHE DI MODELLAZIONE: PARETI COMPOSTE

ELEMENTI SHELL

- Si realizza una **mesh** con elementi bidimensionali di tipo shell;
- Non tutti i software forniscono in output i parametri di sollecitazione (N,M,V) quindi è necessario integrare lungo la sezione per ottenerli in fase di post-processamento;
- In letteratura sono presenti pochi modelli che descrivono il comportamento non-lineare del calcestruzzo per elementi bidimensionali.

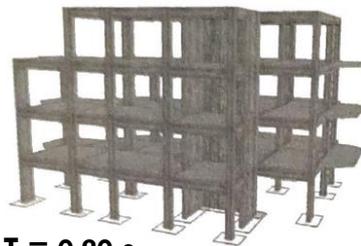


MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA

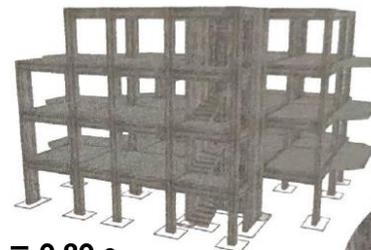
TECNICHE DI MODELLAZIONE: SCALE

La modellazione esplicita delle scale diventa importante in assenza di un valo scale/ascensore/pareti strutturali.

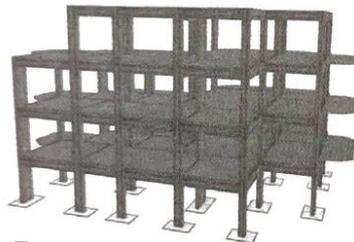
La presenza delle scale ha un **minimo effetto se sono già presenti nella struttura elementi ad elevata rigidezza**, mentre diventa più significativa nel caso di strutture interamente a telaio.



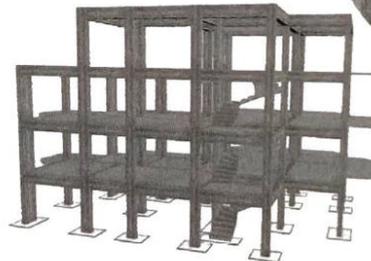
$T = 0.20$ s
Vano CA - no scale



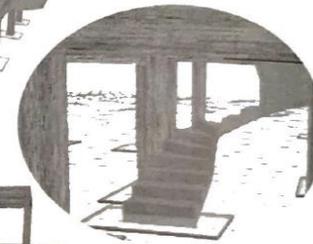
$T = 0.20$ s
Vano CA + scale



$T = 0.37$ s
Solo telaio



$T = 0.30$ s
Telaio + scale



MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA

TECNICHE DI MODELLAZIONE: SCALE



MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA

TECNICHE DI MODELLAZIONE: TAMPONATURE

In presenza di azioni orizzontali, le tamponature possono alterare la risposta strutturale, sia statica sia dinamica.

Maggiore è l'irregolarità in pianta ed in elevazione => maggiore è l'influenza

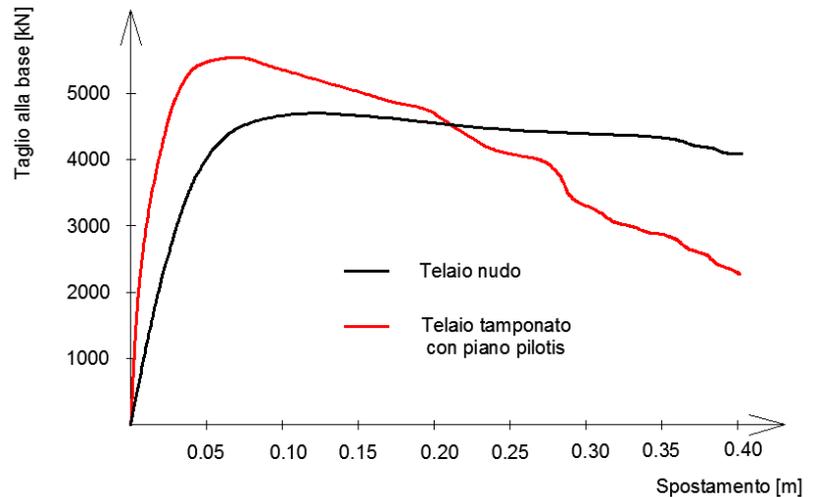
Principali problematiche:

1) Piano soffice



MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA

TECNICHE DI MODELLAZIONE: TAMPONATURE



MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA

TECNICHE DI MODELLAZIONE: TAMPONATURE

Se le tamponature sono disposte in modo **regolare in pianta ed in elevazione**

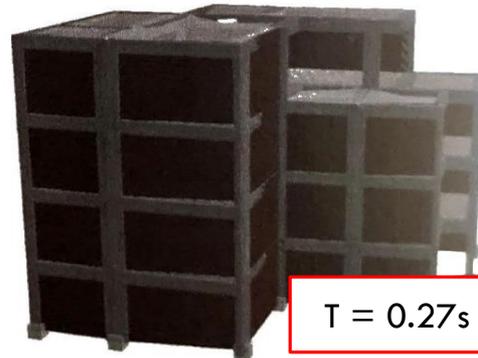


possono portare ad un vantaggioso **aumento di resistenza e rigidità**



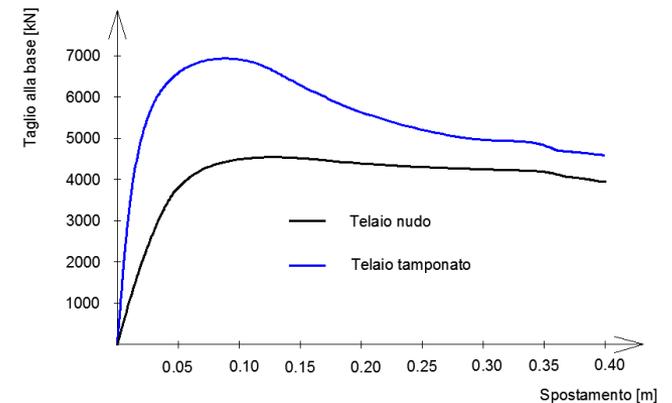
$T = 0.31s$

(a)



$T = 0.27s$

(b)



MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA

TECNICHE DI MODELLAZIONE: TAMPONATURE

Nell'ambito della valutazione degli edifici esistenti si pone quindi il problema della modellazione o meno delle tamponature.

7.2.6. CRITERI DI MODELLAZIONE DELLA STRUTTURA E DELL'AZIONE SISMICA

MODELLAZIONE DELLA STRUTTURA

Il modello della struttura deve essere tridimensionale e rappresentare in modo adeguato le effettive distribuzioni spaziali di massa, rigidezza e resistenza, con particolare attenzione alle situazioni nelle quali componenti orizzontali dell'azione sismica possono produrre forze d'inerzia verticali (travi di grande luce, sbalzi significativi, ecc.).

Qualora si adotti un modello di comportamento non dissipativo, oppure un modello dissipativo che utilizza il coefficiente di comportamento q , si impiegheranno per i materiali leggi costitutive elastiche.

Qualora si adotti un modello di comportamento dissipativo tenendo esplicitamente conto della capacità dissipativa, il legame costitutivo utilizzato per modellare la non linearità di materiale dovrà essere giustificato, anche in relazione alla corretta rappresentazione dell'energia dissipata nei cicli di isteresi.

Delle non linearità geometriche, se significative, si terrà conto per ambedue i comportamenti.

Nel rappresentare la rigidezza degli elementi strutturali si deve tener conto della fessurazione. In caso non siano effettuate analisi specifiche, la rigidezza flessionale e a taglio di elementi in muratura, calcestruzzo armato, acciaio-calcestruzzo, può essere ridotta sino al 50% della rigidezza dei corrispondenti elementi non fessurati, tenendo debitamente conto dello stato limite considerato e dell'influenza della sollecitazione assiale permanente.

A meno di specifiche valutazioni e purché le aperture presenti non ne riducano significativamente la rigidezza, gli orizzontamenti piani possono essere considerati infinitamente rigidi nel loro piano medio a condizione che siano realizzati in calcestruzzo armato, oppure in latero-cemento con soletta in calcestruzzo armato di almeno 40 mm di spessore, o in struttura mista con soletta in calcestruzzo armato di almeno 50 mm di spessore collegata agli elementi strutturali in acciaio o in legno da connettori a taglio opportunamente dimensionati.

Nella definizione del modello, gli elementi non strutturali non appositamente progettati come collaboranti (quali tamponature e tramezzi) possono essere rappresentati unicamente in termini di massa; il loro contributo al comportamento del sistema strutturale in termini di rigidezza e resistenza sarà considerato solo qualora abbia effetti negativi ai fini della sicurezza.

MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA

TECNICHE DI MODELLAZIONE: TAMPONATURE

Principalmente 2 approcci disponibili alla modellazione delle tamponature:

- **Modellazione di dettaglio (micro-modellazione):** elementi finiti 2D e 3D. Necessità di definire nel dettaglio il comportamento non lineare degli elementi, inclusi gli elementi di contatto non lineari per la rappresentazione dell'interfaccia malta-mattone.



Estremamente accurata, ma **alto onere computazionale**. Difficilmente estendibile ad un intero edificio.

RC floor lateral disp. [in. (mm)]	In-plane principal compression stress (ksi)	Crack openings (crack strain larger than 0.002)	Contours of horizontal displacement in infill wall	Remarks
0.12 (3.0)				Onset of cracking
1.14 (29.0)				Maximum strength, off-diagonal strut formation
1.44 (36.6)				Top strut fails, horizontal crack openings and sliding
1.80 (45.7)				Onset of second off-diagonal strut failure
6.60 (167.6)				Complete failure, a new sliding plane forms at the top.

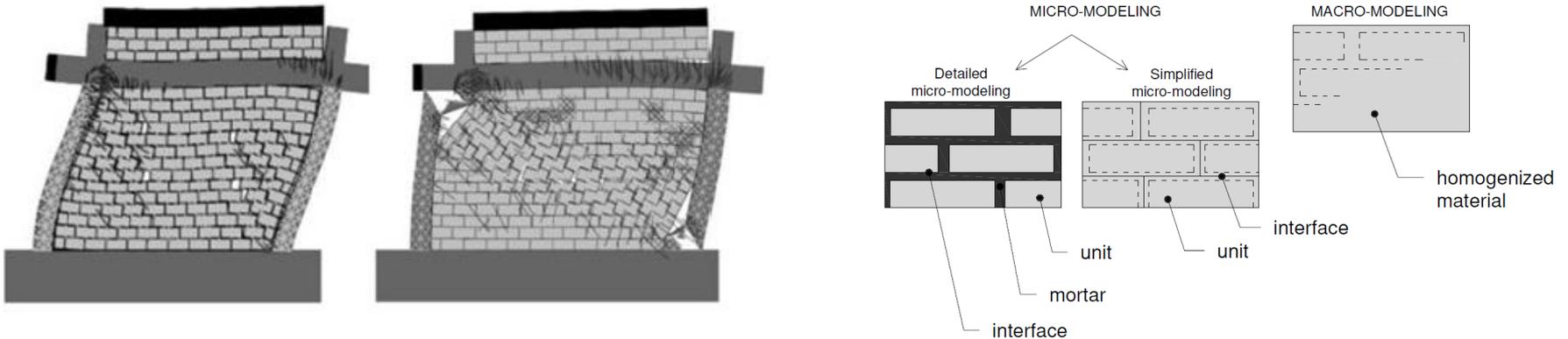
A. Hasemi and K.M. Mosalam, Seismic Evaluation of Reinforced Concrete Buildings Including Effects of Masonry Infill Walls, PEER Report 2007/100 Pacific Earthquake Engineering Research Center College of Engineering University of California, Berkeley

MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA

TECNICHE DI MODELLAZIONE: TAMPONATURE

Principalmente 2 approcci disponibili alla modellazione delle tamponature:

- **Modellazione di dettaglio (micro-modellazione):**



MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA

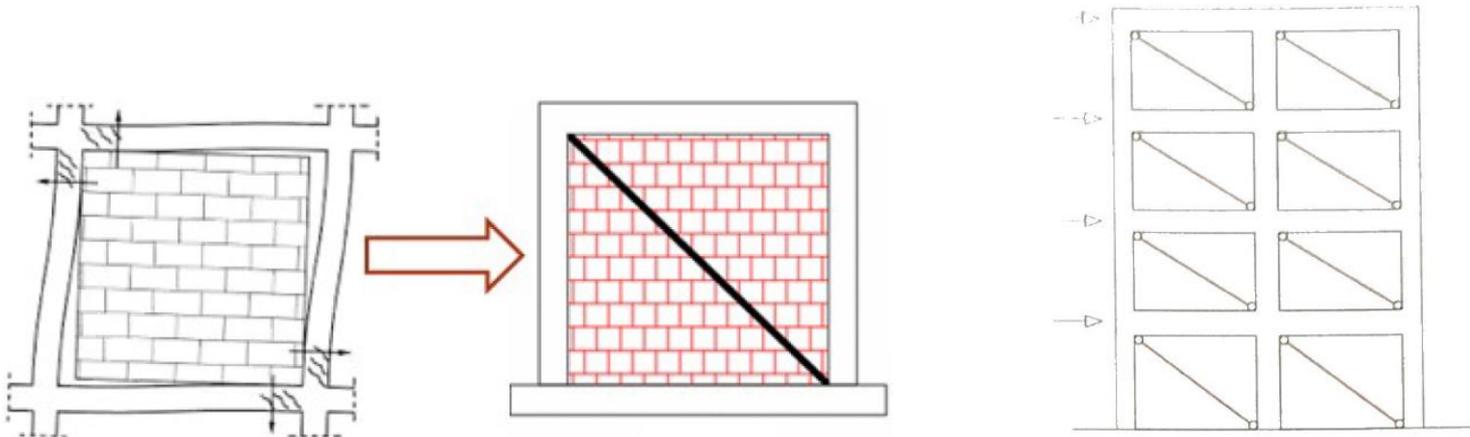
TECNICHE DI MODELLAZIONE: TAMPONATURE

Principalmente 2 approcci disponibili alla modellazione delle tamponature:

- Modellazione **semplificata** tramite l'utilizzo di **bielle equivalenti**

All'aumentare della forza orizzontale, la tamponatura si stacca dal telaio in CA con uno scorrimento relativo sia in direzione orizzontale, sia in direzione verticale.

A seguito del distacco, il funzionamento a taglio del pannello si trasforma in un funzionamento principalmente a puntone equivalente disposto secondo la diagonale.



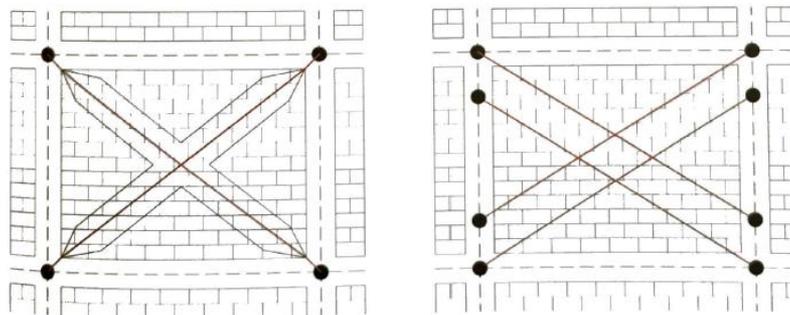
MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA

TECNICHE DI MODELLAZIONE: TAMPONATURE

Principalmente 2 approcci disponibili alla modellazione delle tamponature:

- Modellazione **semplificata** tramite l'utilizzo di **bielle equivalenti**

Nella realtà, la biella compressa non ha una larghezza infinitesima. Gli sforzi di compressione vengono quindi trasferiti alle travi e ai pilastri adiacenti generando in essi forze di taglio e momenti.



Sono state quindi proposte delle formulazioni in grado di considerare l'interazione tra biella compressa e il telaio in CA => verifica del potenziale danneggiamento indotto dalla tamponatura.

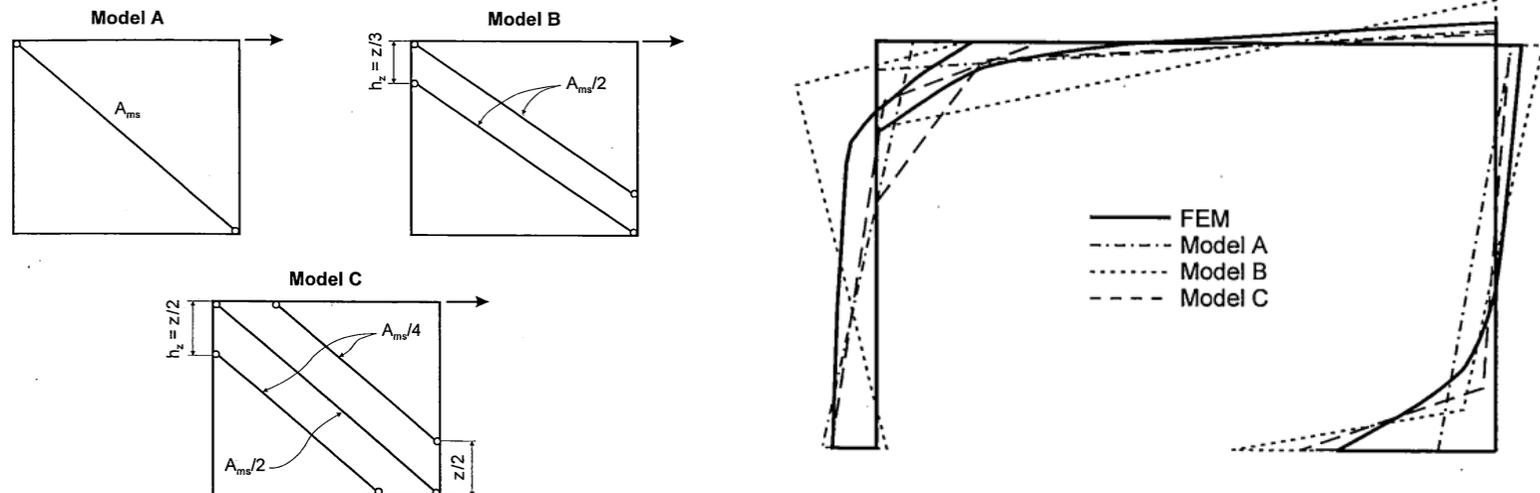
MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA

TECNICHE DI MODELLAZIONE: TAMPONATURE

Principalmente 2 approcci disponibili alla modellazione delle tamponature:

- Modellazione **semplificata** tramite l'utilizzo di **bielle equivalenti**.

Diversi modelli portano a diverse sollecitazioni sul telaio



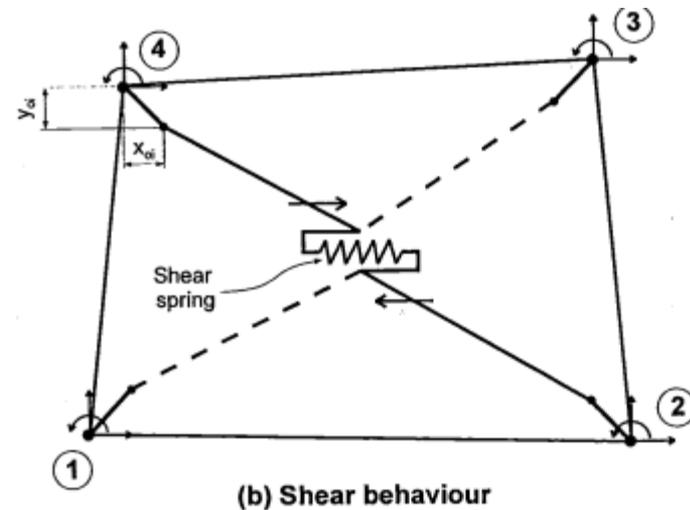
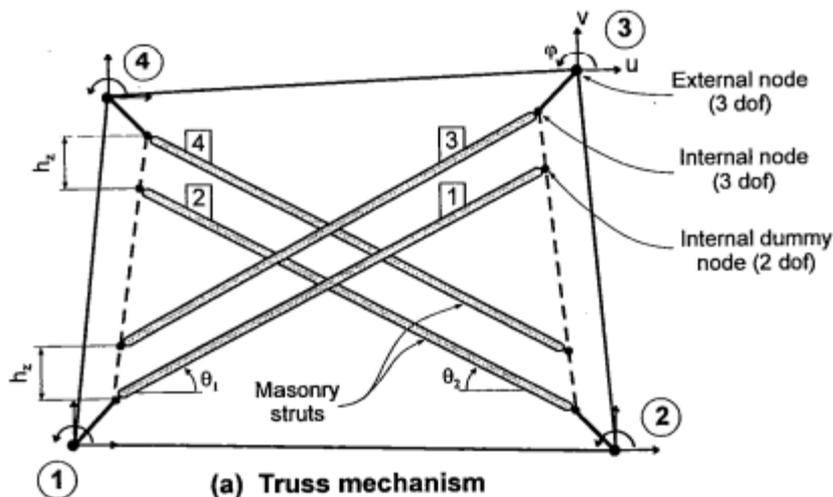
MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA

TECNICHE DI MODELLAZIONE: TAMPONATURE

Principalmente 2 approcci disponibili alla modellazione delle tamponature:

- Modellazione **semplificata** tramite l'utilizzo di **bielle equivalenti**.

Sviluppo di formulazioni in grado di considerare indirettamente l'effetto sui pilastri l'inserimento di nodi fittizi.

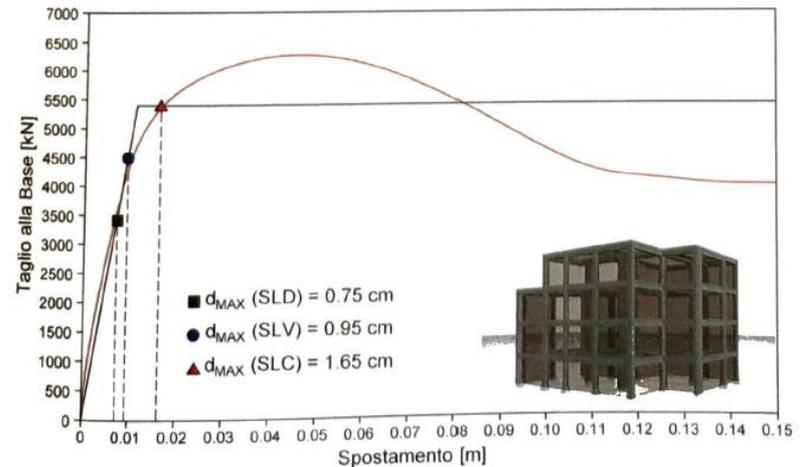
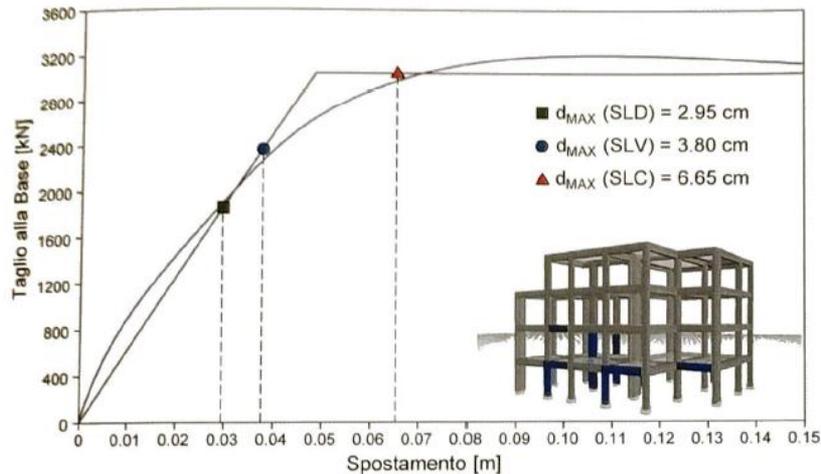


Crisafulli F.J., Seismic behaviour of reinforced concrete structures with masonry infills (1997), University of Canterbury. Civil Engineering

MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA

TECNICHE DI MODELLAZIONE: TAMPONATURE

La scelta di modellare o meno le tamponature si ripercuote non solo sul comportamento globale della struttura, ma anche sulle verifiche di capacità degli elementi strutturali.



R. Pinho et al. Valutazione sismica e tecniche di intervento per edifici esistenti in C.A. Maggioli editore 2019.

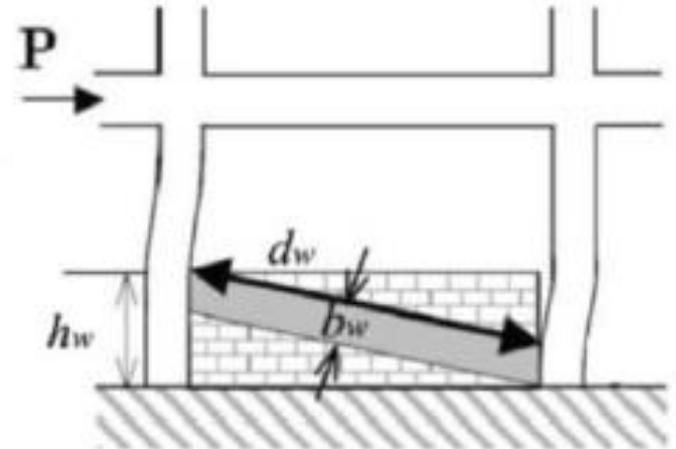
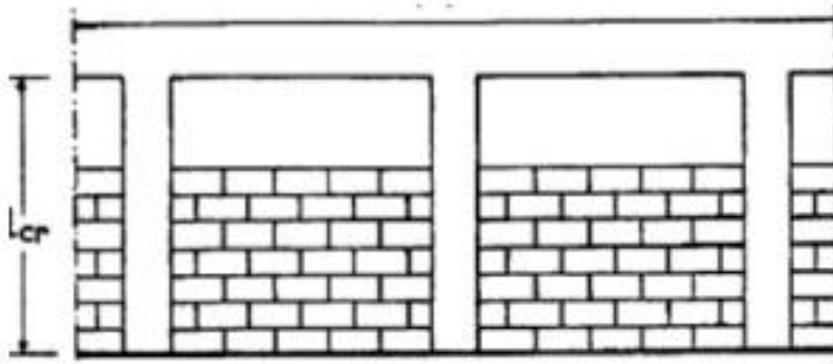
MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA

TECNICHE DI MODELLAZIONE: TAMPONATURE

Casi in cui le tamponature non si sviluppano per tutta l'altezza del telaio



Si considera l'altezza effettiva del tamponamento



MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA

TECNICHE DI MODELLAZIONE: TAMPONATURE

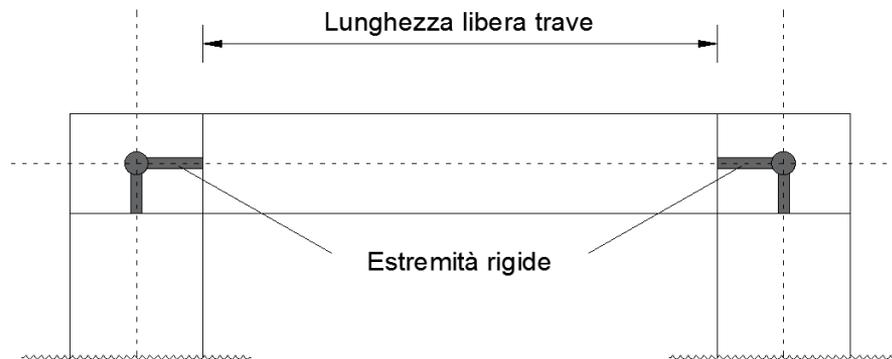
Presenza finestrate



MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA

TECNICHE DI MODELLAZIONE: NODI TRAVE-COLONNA

Nel caso di edifici di nuova realizzazione, la progettazione degli elementi strutturali vuole far in modo che i nodi travi-pilastro si comportino come elementi strutturali non deformabili e non danneggiabili. Le attuali norme di progettazione vogliono preservare il nodo dalla rottura. In tali ipotesi è lecito assumere il **comportamento dei nodi come rigido** ed utilizzare i cosiddetti «end offsets» o «rigid link»



MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA

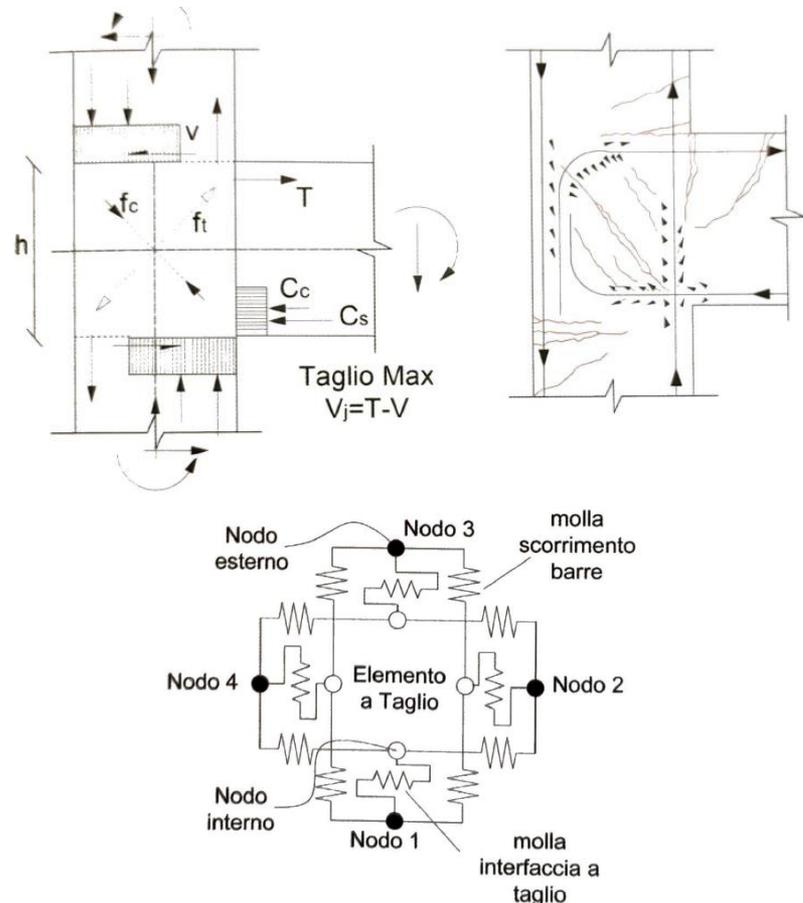
TECNICHE DI MODELLAZIONE: NODI TRAVE-COLONNA

Molte strutture del passato non sono state progettate con gli attuali criteri di protezione dei nodi trave-pilastro => viene meno la certezza del comportamento rigido.

Con barre lisce, non piegate/ancorate, si possono verificare anche degli scorrimenti all'interfaccia acciaio-calcestruzzo.

Modelli meccanici equivalenti costituiti da sistemi di molle per rappresentare il comportamento del nodo.

- Possibilità di modellare tutti i fenomeni
- Difficile calibrazione
- Grande onere computazionale



Lowes L.N., Mitra N., Altoontasha A. (2003), A beam-column joint model for simulating the earthquake response of reinforced concrete frames, PEER 2003/210, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.

MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA TECNICHE DI MODELLAZIONE: NODI TRAVE-COLONNA

Composite Structures 207 (2019) 352–363



Repair of severely-damaged RC exterior beam-column joints with FRP and FRCM composites

Flora Faleschini^{a,b,*}, Jaime Gonzalez-Libreros^a, Mariano Angelo Zanini^a, Lorenzo Hofer^a, Lesley Sneed^c, Carlo Pellegrino^d

^a Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Padova, Via Marzolo 9, 35131 Padova, Italy
^b Dept. of Industrial Engineering, University of Padova, Via Gradisigo 6, 35131 Padova, Italy
^c Dept. of Civil, Architectural and Environmental Engineering, Missouri University of Science and Technology, 1401 North Pine Street, Rolla, MO 65409, USA

ARTICLE INFO

Keywords:
 Beam-column joint
 Cyclic loading
 FRP
 FRCM
 Reinforced concrete
 Seismic repair

ABSTRACT

This paper presents the results of an experimental program aimed at comparing the cyclic behavior of three full-scale reinforced concrete (RC) exterior beam-column joints repaired with externally bonded composites. Preliminary, the specimens suffered significant damage, which resulted in a beam-joint (B + J) failure, i.e. shear failure of the panel joint after yielding of longitudinal reinforcement in the beam. The damaged specimens were then repaired using either Fiber Reinforced Polymer (FRP) or Fiber Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) composites, and the same loading history was applied to the repaired specimens. The experimental behavior was compared with that of original specimens, and results are presented in terms of load-carrying capacity, stiffness deterioration, ductility, dissipated energy, and equivalent damping viscous ratio. Results allow to clearly identify the contribution of the externally-bonded composites to the overall behavior of the repaired specimens.

1. Introduction

Research carried out in previous years has enabled the development of design standards that provide seismic requirements and reinforcement detailing that result in better seismic performance of newly-designed structures and minimize the probability of damage and/or collapse. As pointed out by Pantialides et al. [1], this can be achieved by preventing the brittle failure of joints in reinforced concrete (RC) frame structures, maintaining its integrity and reducing its stiffness degradation. However, there is a considerable number of buildings worldwide that have been designed, detailed, and built without specific seismic requirements that may be vulnerable to seismic events, as demonstrated by recent earthquakes [2,3].

In order to minimize the effect of an earthquake on an existing RC structure, several strengthening techniques have been developed, studied, and applied in previous decades. Traditional techniques include concrete and steel jacketing of the frame elements, however these techniques are complex, intrusive, and labor-intensive [4]. More modern techniques such as base isolation and supplemental damping devices have also been developed, but some challenging aspects still need to be addressed such as cost, invasiveness, and practical implementation [5,6].

The use of fiber reinforced polymer (FRP) composites allows for overcoming some of the drawbacks of the strengthening techniques mentioned previously due to its tailorability, high strength/weight ratio, and excellent corrosion resistance [7]. Therefore, an important research effort has been carried out to study the behavior of RC members strengthened using these composites. Results reported in the available technical literature have proven the effectiveness of this technique for increasing the flexural, shear, torsional, and axial strength of RC members (e.g., [8–10]) and have enabled the development of guidelines for the design of externally bonded FRP systems for the strengthening of existing RC structures [11–13].

For the case of moment-resisting RC frame structures, it has been shown that the performance during a seismic event is strongly related to the behavior of the beam-column joints [4], especially corner joints in which high load eccentricities are expected [14]. Therefore, the use of FRP composites has also been studied for the case of RC beam-column joints, considering their major influence on the overall behavior of a RC frame structure. In general, structural strengthening of RC beam-column joints is intended to modify the strength hierarchy between the columns, beams, and joint, promoting a more ductile failure characterized by a strong column/weak beam behavior and avoiding brittle joint shear failure [15]. For the case of FRP strengthening, this is



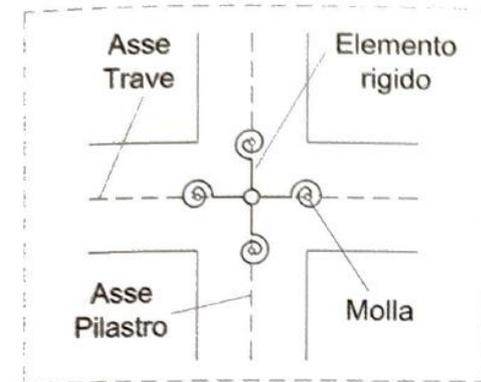
* Corresponding author at: Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Padova, Via Marzolo 9, 35131 Padova, Italy.
 E-mail address: flora.faleschini@dicea.unipd.it (F. Faleschini).

MODELLAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI IN CA

TECNICHE DI MODELLAZIONE: NODI TRAVE-COLONNA

Elementi molla agli estremi di un pannello rigido calibrati in modo tale da rappresentare tutti i fenomeni di deformazioni del nodo.

⇒ Calibrazione su dati sperimentali

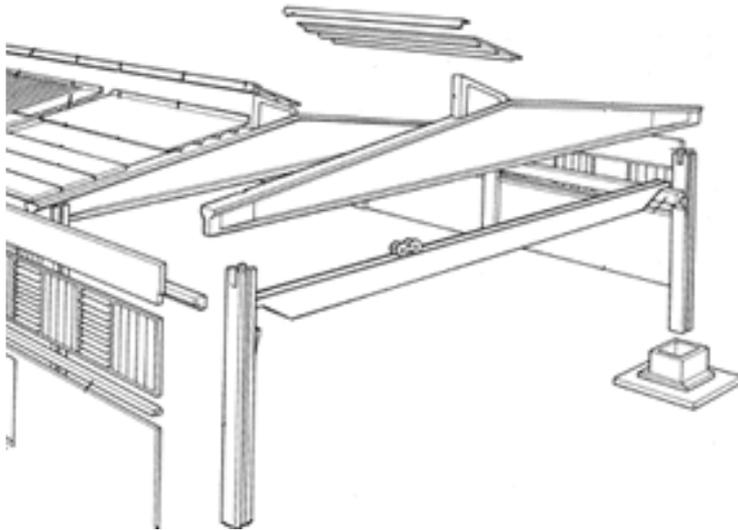


In via semplificata, è possibile non modellare alcuna zona rigida, ma considerare che gli **elementi che schematizzano le travi e i pilastri che convergono nel nodo siano deformabili per tutta la loro lunghezza.**

In questo caso, le potenziali deformazioni dei nodi delle strutture esistenti vengono indirettamente considerate dall'aumento di flessibilità degli elementi trave e pilastro.

MODELLAZIONE DI PREFABBRICATI

CAPANNONI PREFABBRICATI



- Tipologia molto ricorrente
- Necessità di modellare il collegamento:
 - pilastro-capriata
 - tegolo-capriata

La mancanza di connessioni tra gli elementi causa l'assenza di un piano rigido. Tegoli, capriate e pilastri tendono a muoversi in modo indipendente tra loro.

MODELLAZIONE DI PREFABBRICATI

CAPANNONI PREFABBRICATI

- La **modellazione degli elementi** è sempre **funzione della tipologia di analisi che si intende eseguire**. In questo senso, diversi sono gli aspetti che vengono tenuti in conto nel caso di analisi lineari e nel caso di analisi non lineari. In ogni caso, **la modellazione deve conservare una certa “semplicità” che consenta di ottenere risultati attendibili ma facilmente controllabili** attraverso comodi schemi statici.
- Le **scelte** effettuate durante la modellazione sono basate sulla **ricerca del giusto compromesso tra accuratezza e semplicità**. Gli **schemi strutturali sono volti a determinare le sollecitazioni di progetto sugli elementi** tenendo in conto le principali criticità sia dal punto di vista della modellazione, sia da quelle dell’ analisi.

MODELLAZIONE DI PREFABBRICATI

CAPANNONI PREFABBRICATI

MATERIALI

Dalle *prove in sito* o dalle *tavole originali* di progetto è normalmente nota la **tipologia di materiale impiegato** per la realizzazione degli elementi strutturali. In generale quindi è possibile ricavare sia le **caratteristiche del calcestruzzo** sia **quelle delle barre di acciaio lente e di precompressione**.

Anche la definizione del modulo elastico viene effettuata secondo le indicazioni della norma (NTC18, capitolo 11). Tuttavia, per tenere in considerazione gli effetti della fessurazione sugli elementi, in accordo con il metodo semplificato previsto al capitolo 7, è opportuno **ridurre del 50% il modulo elastico per il materiale corrispondente alle sezioni dei pilastri**. Per gli elementi orizzontali precompressi sembra invece più sensato assumere un **coefficiente di riduzione maggiore, in quanto il livello di fessurazione atteso è sensibilmente più basso**. Non potendo però quantificare il valore di tale fattore in assenza di dati sperimentali, è opportuno assumere la **sezione integra** per tutti gli stati limite considerati (100%).

MODELLAZIONE DI PREFABBRICATI

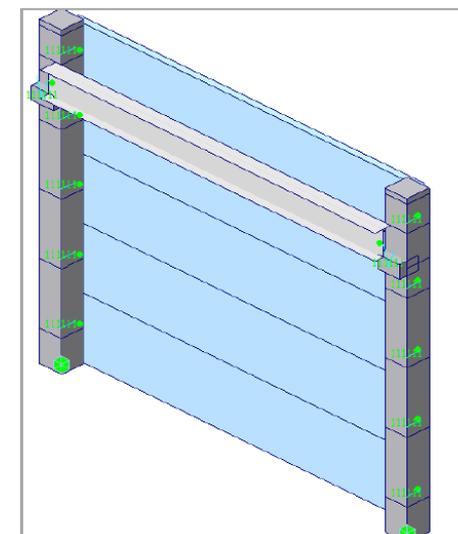
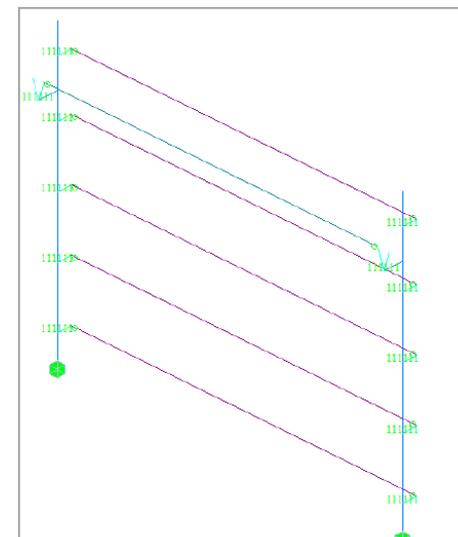
CAPANNONI PREFABBRICATI

PANNELLI

Gli elementi da utilizzare per una **modellazione lineare** sono di tipo **“beam” a comportamento elastico lineare**. Essi possono essere utilizzati sia per gli elementi verticali sia per quelli orizzontali.

In caso di **presenza di pannelli verticali**, gravanti in fondazione ed agganciati ad elementi orizzontali per evitarne il ribaltamento, **in prima analisi possono essere trascurati in fase di modellazione in quanto generalmente non contribuiscono all'aumento di rigidezza** della struttura in virtù del loro grado di vincolo. Tuttavia, vengono **tenute in conto le relative masse**.

Anche i **pannelli orizzontali appesi ad elementi verticali**, solamente se liberi di spostarsi con la struttura, **in prima approssimazione non offrono alcun tipo di irrigidimento trasversale**, partecipando al moto sismico **solo in termini di massa**. Comunque **l'inserimento o meno di pannelli verticali e orizzontali appesi va valutato caso per caso**, individualmente ed in dipendenza dai gradi di vincolo realizzati al fine di valutarne, anche con modelli di dettaglio, l'interazione in termini di rigidezza e massa con il sistema strutturale primario.



MODELLAZIONE DI PREFABBRICATI

CAPANNONI PREFABBRICATI

TAMPONATURA

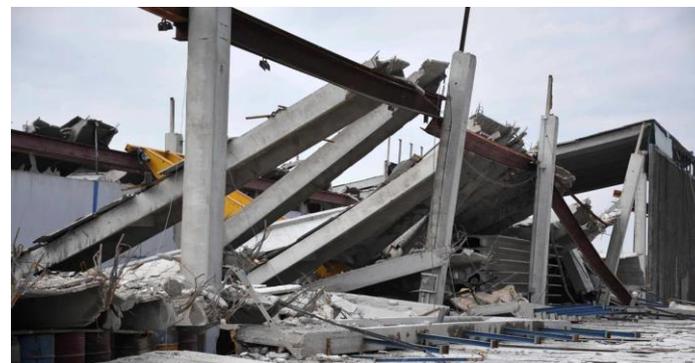
Tamponatura in laterizio con finestratura a nastro oppure **pannelli inseriti** in scanalature realizzate nei pilastri.



Possono avere effetti irrigidenti sul sistema trave-pilastro ed essere causa della perdita di appoggio della copertura. La modellazione della tamponatura in laterizio risulta perciò **estremamente importante al fine di cogliere il corretto stato di sollecitazione sugli elementi verticali.**

ELEMENTI ORIZZONTALI

Gli **elementi orizzontali** sono di solito costituiti da **travi appoggiate in sommità ai pilastri** e da **elementi di copertura disposti trasversalmente** a queste. In assenza di getti in opera integrativi al di sopra degli elementi di copertura, tipicamente realizzati solo in zone classificate da tempo sismiche, **gli orizzontamenti non possono ritenersi rigidi nel loro piano ed è quindi necessario modellare singolarmente ogni elemento.**



Tartero F., Bellotti D., Nascimbene R. Procedure di modellazione di capannoni industriali prefabbricati esistenti, Progettare e costruire con la prefabbricazione PRECAST Design

MODELLAZIONE DI PREFABBRICATI

CAPANNONI PREFABBRICATI

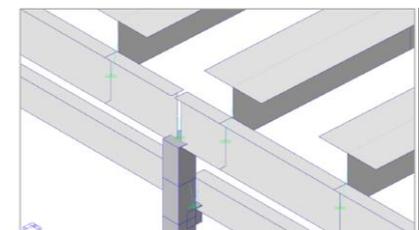
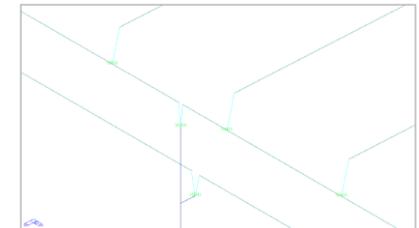
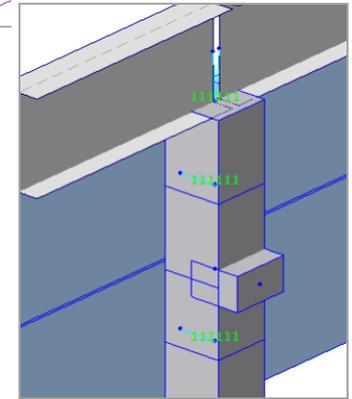
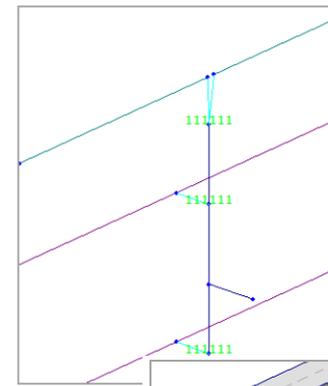
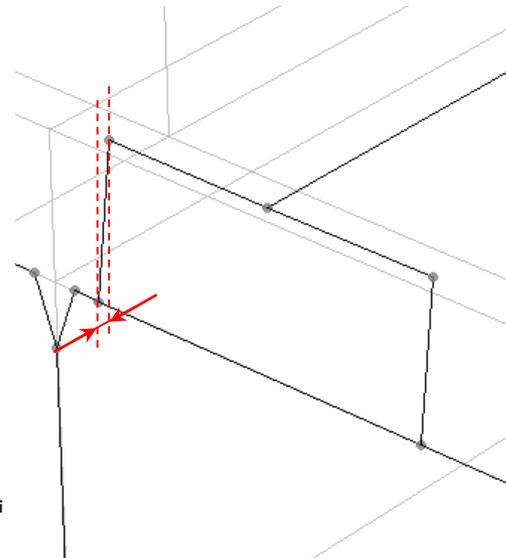
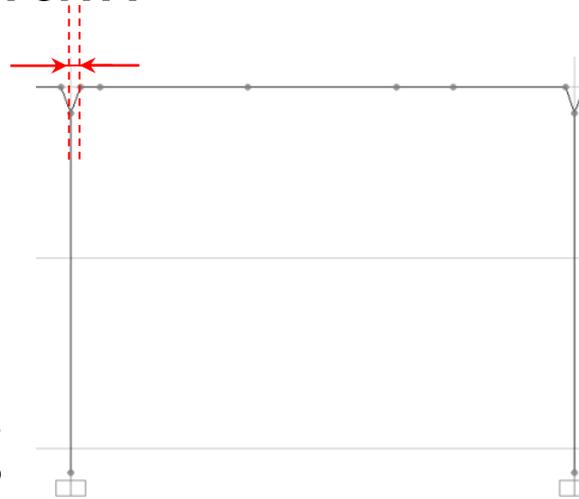
VINCOLI

Modello => generalmente tridimensionale

Pilastri => mensole incastrate alla base

Appoggi => generalmente gli appoggi tra elementi orizzontali risultano sempre **eccentrici rispetto all'asse dell'elemento inferiore**.

Anche **l'appoggio dei tegoli può risultare eccentrico** rispetto alla mezzeria della trave. Queste distanze non sono trascurabili nella definizione del modello per l'assegnazione corretta delle masse e devono essere considerate posizionando **l'asse e gli elementi nel loro effettivo baricentro**.



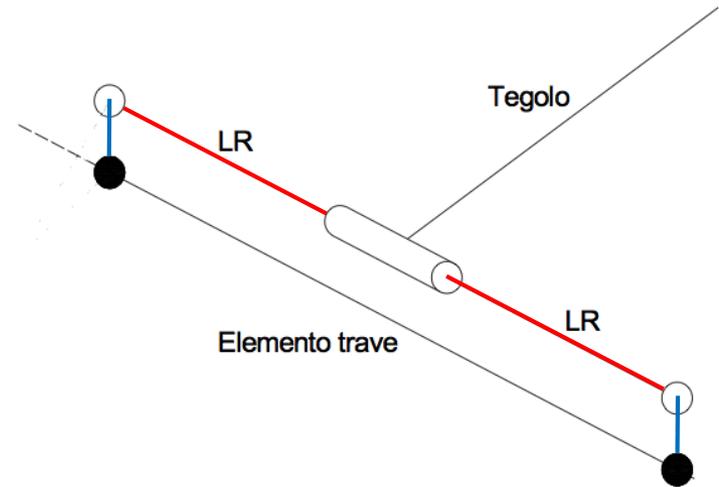
MODELLAZIONE DI PREFABBRICATI

CAPANNONI PREFABBRICATI

VINCOLI

L'appoggio lungo il lato del tegolo è simulato con quattro bracci rigidi. I primi si estendono a destra e a sinistra rispetto all'asse del tegolo e sono ad esso complanari in quanto **servono a tenere in conto l'affettiva larghezza della sezione di appoggio** e del grado di vincolo da essa fornito. Gli altri **collegano i nodi estremi con l'asse della trave sottostante** e sono perciò inclinati.

Nel piano orizzontale si comporta come un incastro, poiché i tagli nei bracci inclinati possono generare una coppia di forze sotto azioni orizzontali nella trave sotto.

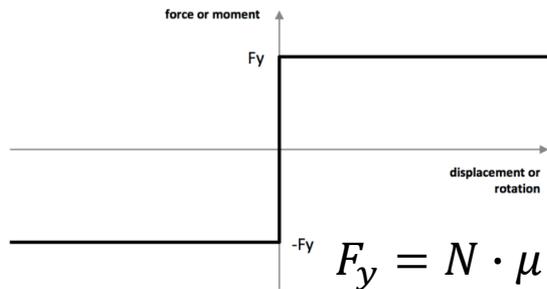


MODELLAZIONE DI PREFABBRICATI

CAPANNONI PREFABBRICATI

APPOGGI IN CAMPO NON LINEARE

In campo non-lineare è possibile, inoltre, determinare il **limite effettivo di perdita di appoggio** degli elementi orizzontali per ogni direzione di applicazione dell' azione sismica. Questo risultato viene ottenuto **modellando il collegamento ad attrito** tra gli elementi con un **elemento link a cui attribuito un legame ideale rigido-plastico** per un valore di forza orizzontale stimata in base al carico verticale e al coefficiente di attrito tra le superfici.



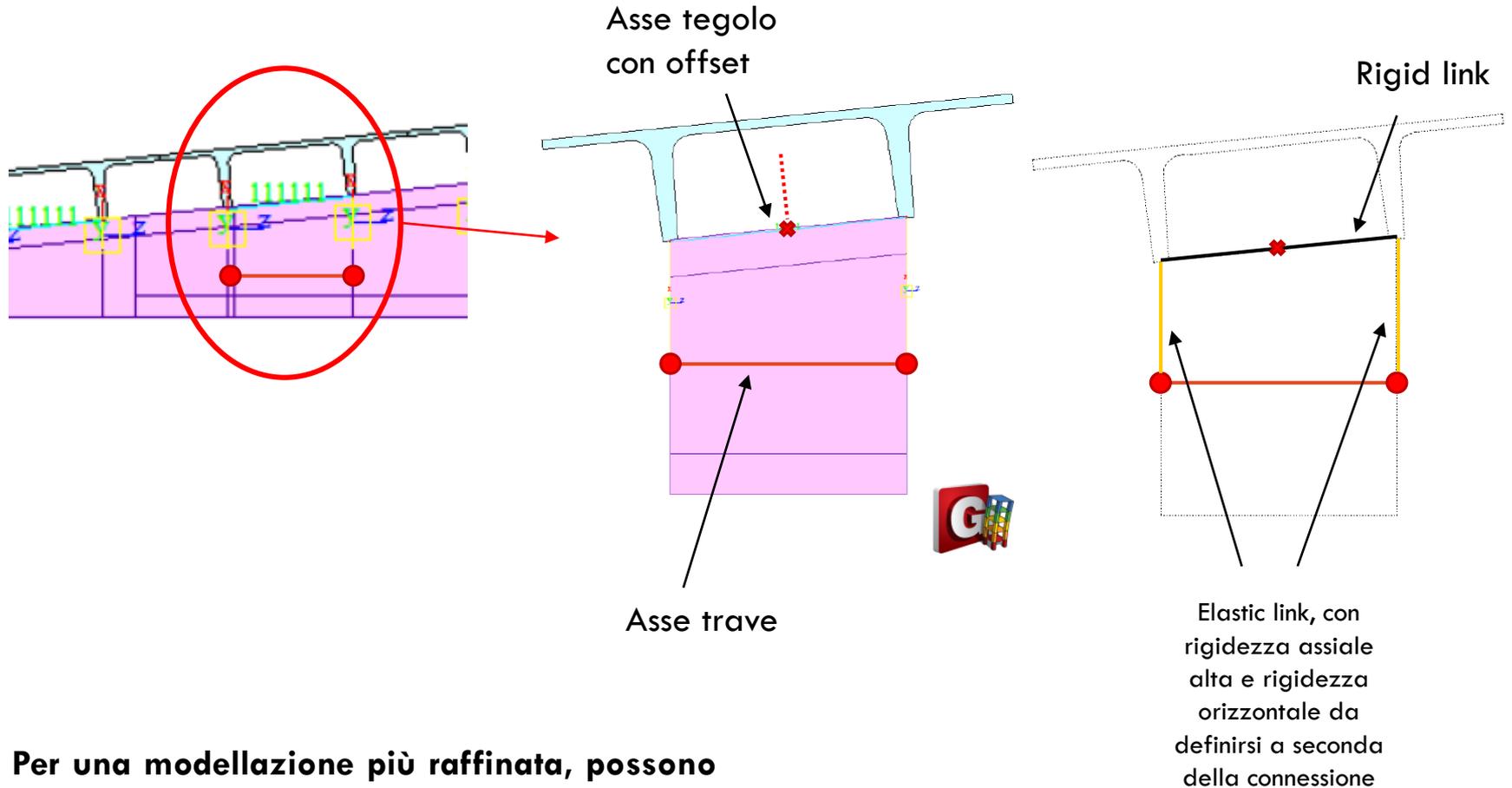
Il coefficiente per il contatto neoprene-calcestruzzo po' essere determinato in accordo a CNR10018:

$$\mu = c + \frac{\beta}{\sigma_V} \quad \text{generalmente compreso tra } 0.1 \div 0.2.$$

- σ_V : sforzo di compressione sull'appoggio in neoprene (0.14÷5 MPa);
- costante pari a 0.1;
- costante pari a 0.055.

MODELLAZIONE DI PREFABBRICATI

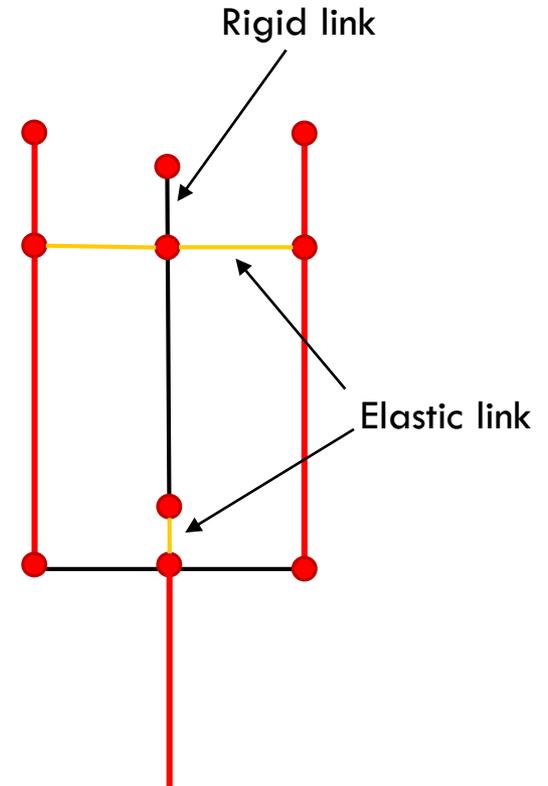
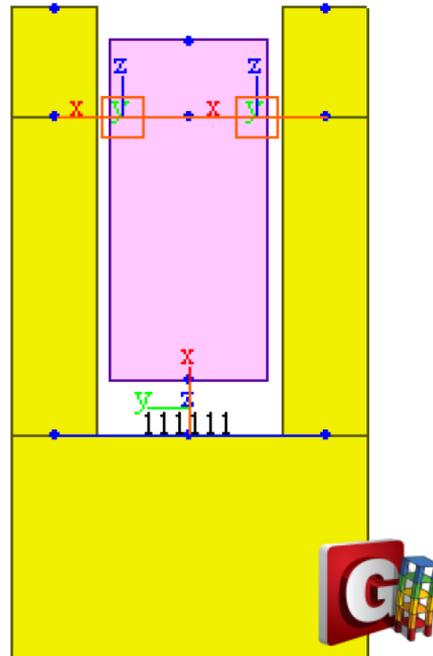
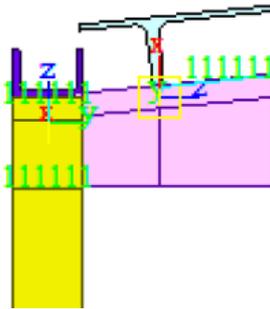
CAPANNONI PREFABBRICATI



Per una modellazione più raffinata, possono essere introdotti i seguenti dettagli.

MODELLAZIONE DI PREFABBRICATI

CAPANNONI PREFABBRICATI



MODELLAZIONE DI PREFABBRICATI

TEGOLI

Il numero di connessioni influenza il comportamento strutturale:

- Un tegolo con due collegamenti si comporta come una biella. La struttura risulta più deformabile con un periodo maggiore.
- Un tegolo con 4 collegamenti rende la struttura più rigida con un maggiore momento sui pilastri. Il momento fuori dal piano della trave diminuisce, mentre aumenta il taglio.