PROGETTO DI EDIFICI ANTISISMICI IN CEMENTO ARMATO

Ascoli Piceno, 17-18 maggio 2019

07 – Analisi strutturale

Docente del corso

AURELIO GHERSI

Corso organizzato da: FONDAZIONE DELL'ORDINE DEGLI INGEGNERI
DELLA PROVINCIA DI ASCOLI PICENO

PROCESSO PROGETTUALE

4. Analisi strutturale dettagliata e verifica del comportamento della struttura

Occorre definire:

- **Un modello per la struttura**
- **Un modello per le azioni, individuando le diverse combinazioni di azioni da considerare**
- **Il tipo di analisi da utilizzare**

Fatta l'analisi occorre esaminare i risultati ottenuti per capire se:

- **I risultati mostrano un comportamento coerente con quello che ci si aspettava**
- **I valori numerici dei risultati sono coerenti con le previsioni**

Se è così si può considerare validato il calcolo ed accettabile la struttura

In caso contrario occorre capire il motivo delle discordanze tra previsioni e risultati numerici e capire se la struttura è idonea per portare l'azione sismica

Modellazione della struttura

- **l modello della struttura deve essere tridimensionale e rappresentare in modo adeguato le effettive distribuzioni spaziali di massa, rigidezza e resistenza**

NTC, punto 7.2.6

In generale il modello della struttura sarà costituito da elementi resistenti piani a telaio o a parete, connessi da diaframmi orizzontali

(modello di insieme spaziale di telai piani con impalcati indeformabili)

D.M. 14/9/05, punto 5.7.4.2

- **Evoluzione legata allo sviluppo dei mezzi di calcolo:**

- **Calcolo di un unico telaio, quello "più sollecitato"**
- **Singoli telai piani, con ripartizione delle forze orizzontali in base alla rigidezza dei telai**
- **Insieme spaziale di telai piani, collegati da impalcati planimetricamente indeformabili**
- **Telaio spaziale, con impalcati planimetricamente indeformabili (o con impalcati deformabili)**

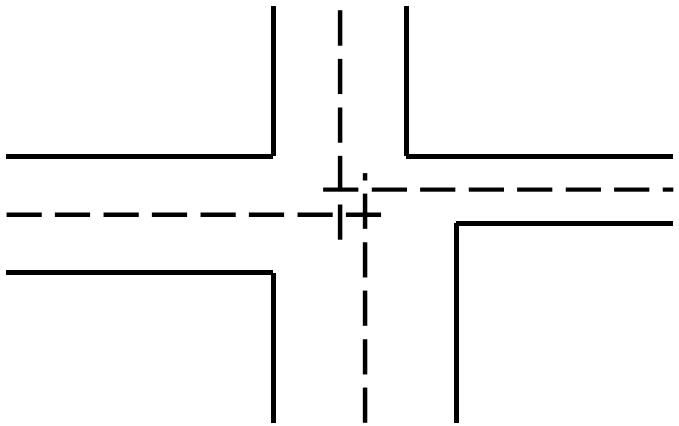
Modello di insieme spaziale di telai piani

- **Limiti:**
  - **La mancanza di aste verticali può inficiare il modello, che trascura la congruenza verticale dei telai ortogonali nei punti di contatto**
  - **La non ortogonalità di travi può inficiare il modello, che trascura la interazione flesso-torsionale tra i telai ortogonali**
- **Vantaggi:**
  - **Maggiore flessibilità nella descrizione della struttura**

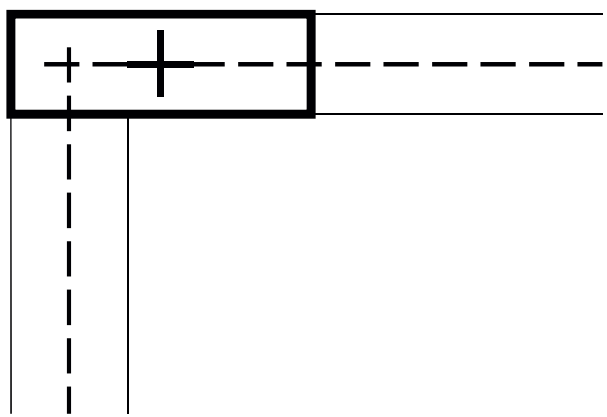
- **Modello di telaio spaziale**
  - **Più preciso e sempre valido**
  - **Maggiori problemi a causa della non convergenza degli assi**

Problemi:

- **La presenza di aste con sezioni di dimensioni non trascurabili e diverse tra loro può inficiare il modello di telaio (piano o spaziale), che richiede che gli assi delle aste convergano in un punto (nodo)**



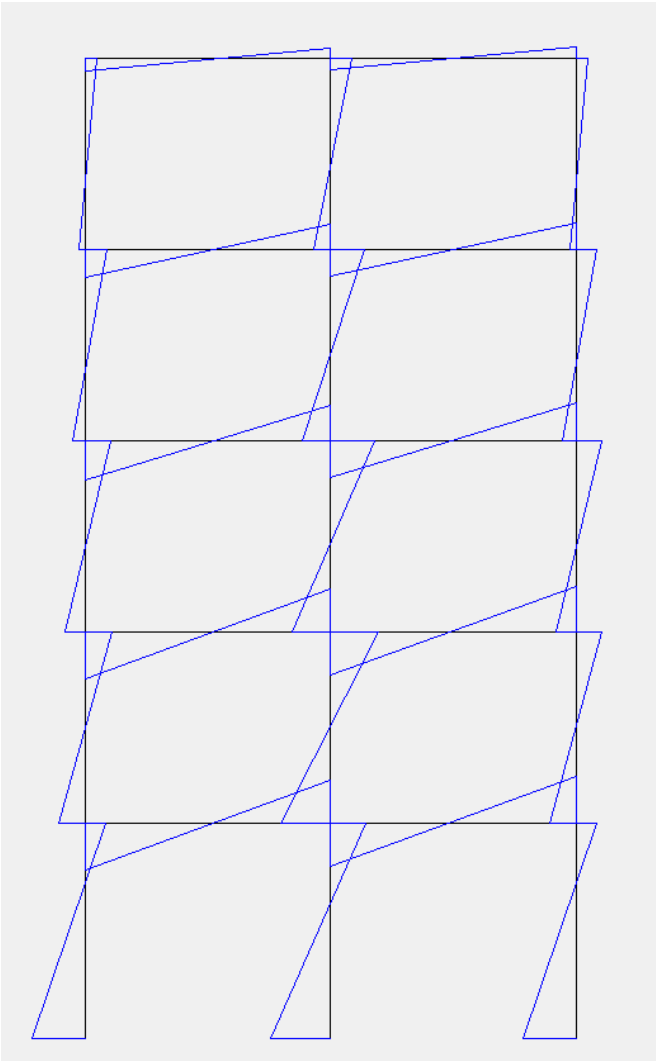
Nel piano verticale



In pianta

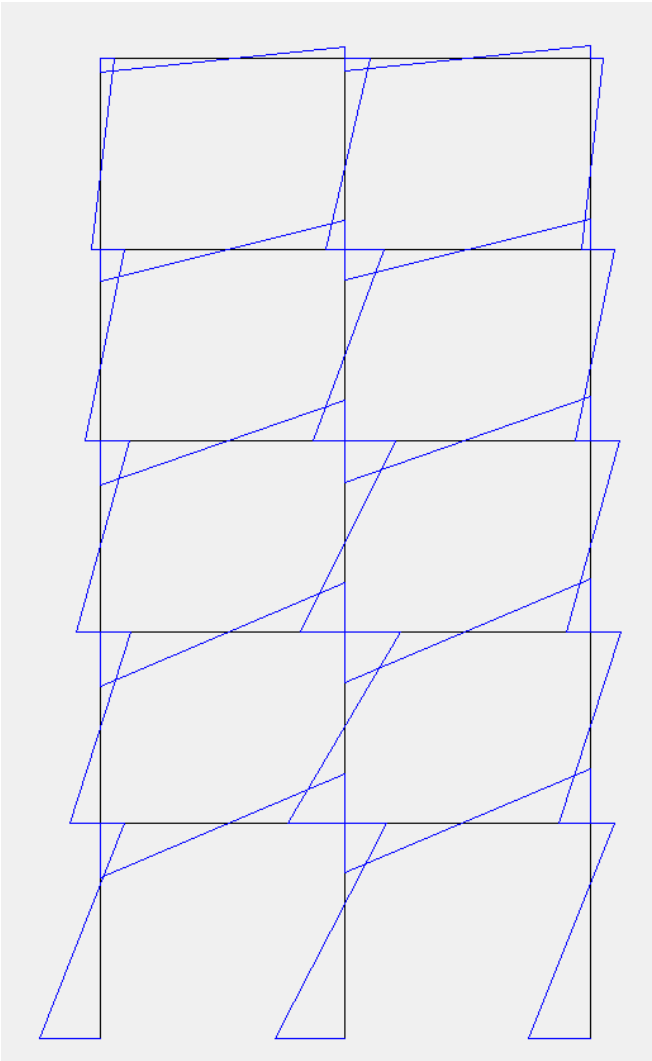
Aggiunta di tratti rigidi o offset, che complicano il modello e modificano (sensibilmente) la rigidezza complessiva e quindi il periodo proprio della struttura

IL MODELLO DI TELAIO - SENZA TRATTI RIGIDI



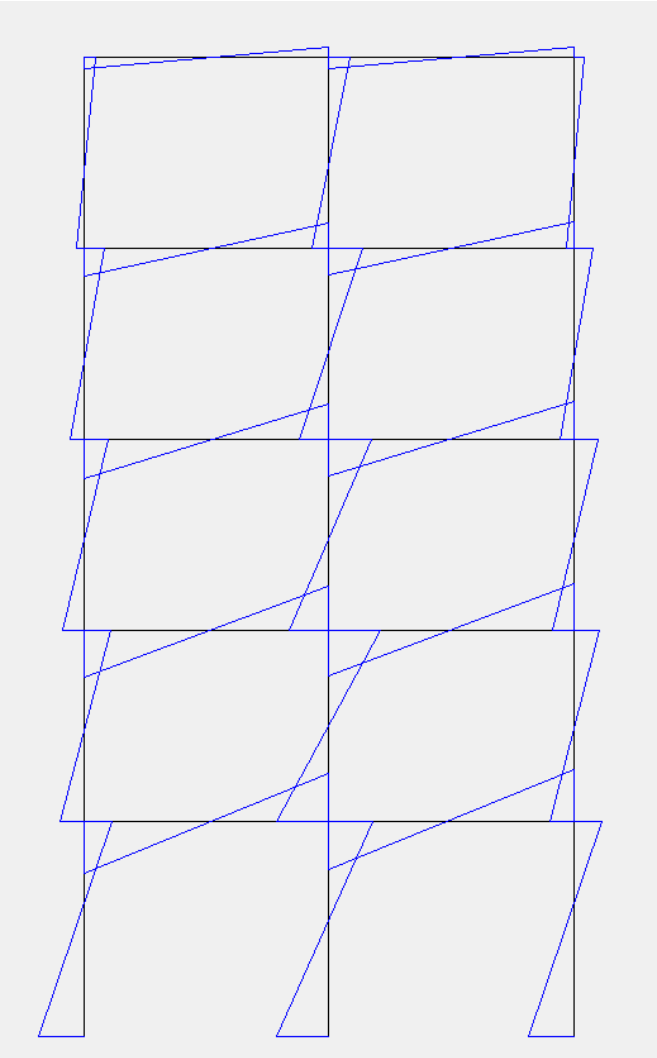
analisi statica

T = 0.533 s



analisi modale

IL MODELLO DI TELAIO - CON TRATTI RIGIDI

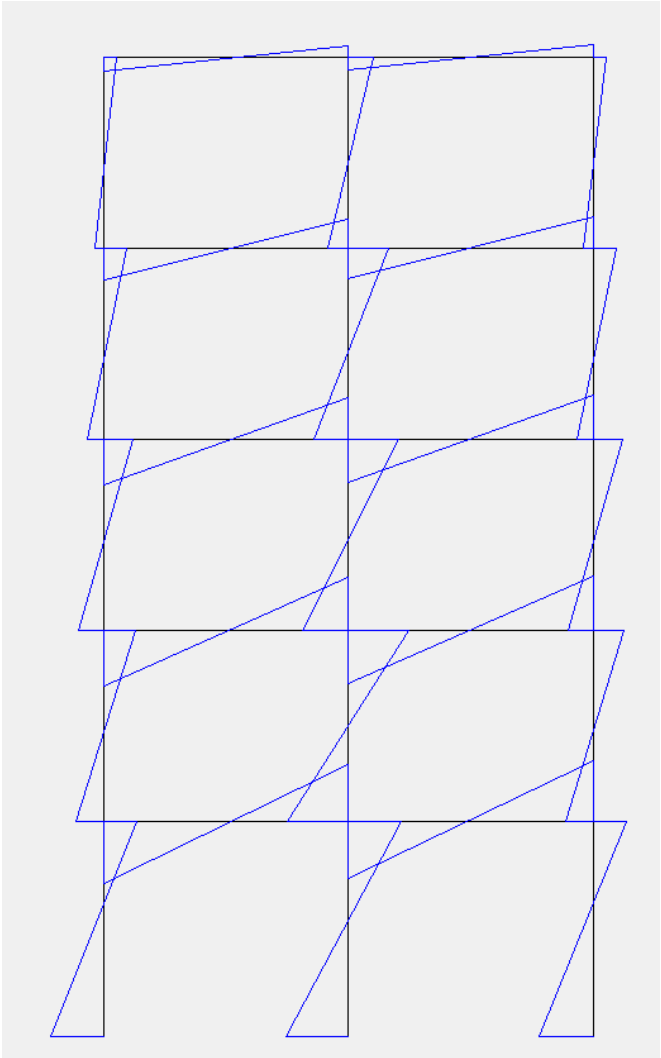


analisi statica

Cambia
(di molto)
il periodo

Cambia
qualcosa dove
c'è variazione
dei tratti rigidi

T = 0.426 s



analisi modale

Il modello della struttura deve essere tridimensionale e rappresentare in modo adeguato le effettive distribuzioni spaziali di massa, rigidezza e resistenza

NTC, punto 7.2.6

- **Per rappresentare la rigidezza degli elementi strutturali ... si deve tener conto della fessurazione dei materiali fragili**

Rigidezza degli elementi strutturali

Strutture in acciaio:

- **Assegnando la sezione si definiscono sia rigidezza che resistenza**

Strutture in c.a. (approccio convenzionale):

- **La rigidezza è assunta pari a quella della sezione geometrica**
- **La resistenza è considerata indipendente e viene dosata aggiungendo le armature necessarie**

Strutture in c.a. (realtà):

- **Rigidezza e resistenza sono comunque legate**
  (si pensi al momento d'inerzia della sezione reagente omogeneizzata)

  Paulay, anni '90 del XX secolo (con riferimento a pareti in c.a.)

Rigidezza degli elementi strutturali

Strutture in c.a. (approccio convenzionale):

- **Già nel D.M. 10/1/1907 (prima norma sul c.a.) si ha:**

  "Se si tratta di costruzioni staticamente indeterminate, allo scopo di calcolare le forze incognite, nel valutare gli enti geometrici delle sezioni trasversali dei solidi … se la percentuale metallica è inferiore al 2% si può … fare astrazione alla presenza del ferro"

- **Se si volesse tener conto rigorosamente della sezione fessurata si dovrebbe:**
  - **Definire le armature prima del calcolo**
  - **Considerare un momento d'inerzia che varia ogni volta che cambiano le armature o si inverte il segno di M**
  - **Considerare un momento d'inerzia che varia con continuità in presenza di N con M variabile (pilastri)**

Il modello della struttura deve essere tridimensionale e rappresentare in modo adeguato le effettive distribuzioni spaziali di massa, rigidezza e resistenza

NTC, punto 7.2.6

- **Per rappresentare la rigidezza degli elementi strutturali ... si deve tener conto della fessurazione dei materiali fragili**

Tener conto rigorosamente della variazione oggi sarebbe forse possibile (con un modello elastico) grazie alla potenza dei computer attuali, ma comunque sarebbe estremamente oneroso

E oltre il limite elastico?

Il modello della struttura deve essere tridimensionale e rappresentare in modo adeguato le effettive distribuzioni spaziali di massa, rigidezza e resistenza

NTC, punto 7.2.6

- **Per rappresentare la rigidezza degli elementi strutturali ... si deve tener conto della fessurazione dei materiali fragili**

Normativa:

In caso non siano effettuate analisi specifiche, la rigidezza flessionale e a taglio di elementi in cemento armato può essere ridotta sino al 50% della rigidezza dei corrispondenti elementi non fessurati, tenendo debitamente conto dell'influenza della sollecitazione assiale permanente

→ quindi differenza tra travi e pilastri

Il modello della struttura deve essere tridimensionale e rappresentare in modo adeguato le effettive distribuzioni spaziali di massa, rigidezza e resistenza

NTC, punto 7.2.6

- **Per rappresentare la rigidezza degli elementi strutturali ... si deve tener conto della fessurazione dei materiali fragili**

Considerazioni:

In pratica, c'è chi riduce a priori la rigidezza in maniera forfetaria (spesso senza nemmeno distinguere tra travi e pilastri)

Ma così si continua a mantenere indipendenti rigidezza e resistenza, mentre la motivazione di base era quella di metterle in relazione

- **Per rappresentare la rigidezza degli elementi strutturali ...**
  si deve tener conto della fessurazione dei materiali fragili

NTC, punto 7.2.6

Considerazioni:

In pratica, c'è chi riduce a priori la rigidezza in maniera forfetaria (spesso senza nemmeno distinguere tra travi e pilastri)

Aspetti negativi:

- Ridurre la rigidezza per tener conto delle condizioni fessurate, se fatto in misura uguale per tutti gli elementi, serve solo ad aumentare il periodo proprio (quindi spesso riduce le forze e proporzionalmente le sollecitazioni)

Conseguenza forse accettabile:

- Se ben dosata, la riduzione forfetaria di rigidezza si limita a bilanciare l'incremento di rigidezza dovuta agli offset

- **Per rappresentare la rigidezza degli elementi strutturali ... si deve tener conto della fessurazione dei materiali fragili**

NTC, punto 7.2.6

Spunti futuri:

Usare modelli a fibre per valutare la variazione di rigidezza causata dalla fessurazione

Si può usare il programma OpenSees (molto usato in campo scientifico) oppure il programma RC_NL, fatto da me e messo a disposizione nel mio sito

In presenza di pareti

Alternative:

- **Pareti come aste**

  Necessità di considerare tratti rigidi per il collegamento alle travi e tenere conto della deformazione a taglio

- **Discretizzazione della parete in elementi finiti**

  Necessità di ritornare a caratteristiche di sollecitazione (come risultante delle tensioni)

  Problemi numerici nel piano (drilling)

  Problemi nel comportamento fuori piano

In presenza di pareti solo al primo livello

Occorre esaminare in maniera distinta la struttura a pareti del primo livello e la struttura a telaio sovrastante

- **Si possono (devono) usare fattori di comportamento q diversi per le due strutture**
- **È possibile usare modelli geometrici distinti per le due strutture (ognuno col proprio q)**
- **Se più comodo, si può usare un unico modello geometrico che comprende entrambe le strutture, calcolandolo con i due diversi fattori di struttura**
  (e usando per ciascuna struttura il modello di calcolo appropriato)

In presenza di pareti solo al primo livello

Modello geometrico e fattore di struttura

Pareti al primo livello

- **Sono sostanzialmente strutture a pareti non accoppiate di classe di duttilità B**
- **Fattore di comportamento:** $q_0 = 3\,k_w$

NTC 08, punto 7.4.3.2

NTC 18, punto 7.3.1

in questo caso $k_w = 0.5$ perché $l_w >> h_w$

quindi $q_o = 1.5$

inoltre $K_R = 1.0$ perché le pareti sono solo a un piano

quindi $q = 1.5$

In presenza di pareti solo al primo livello

Modello geometrico e fattore di struttura

Pareti al primo livello

- **Le pareti possono essere considerate come "pareti estese debolmente armate":**
  - Pareti caratterizzate da un'estensione a buona parte del perimetro della pianta strutturale e dotate di idonei provvedimenti per garantire la continuità strutturale così da produrre un efficace comportamento scatolare
  - Nella direzione orizzontale d'interesse, la struttura (parete) deve avere un periodo fondamentale, in condizioni non fessurate e calcolato nell'ipotesi di assenza di rotazioni alla base, non superiore a TC.

NTC, punto 7.4.3.1

In presenza di pareti solo al primo livello

Modello geometrico e fattore di struttura

Pareti al primo livello

- **Sono sostanzialmente strutture a pareti non accoppiate di classe di duttilità B**
  - Fattore di comportamento q = 1.5
  - Amplificazione del taglio:

    per pareti estese debolmente armate il taglio dovrebbe essere amplificato di (q+1)/2 e quindi di 1.25

NTC, punto 7.4.4.5.1

questa mi sembra una cautela eccessiva, ma comunque poco rilevante

In presenza di pareti solo al primo livello

Modello geometrico e fattore di struttura

Struttura a telaio sovrastante

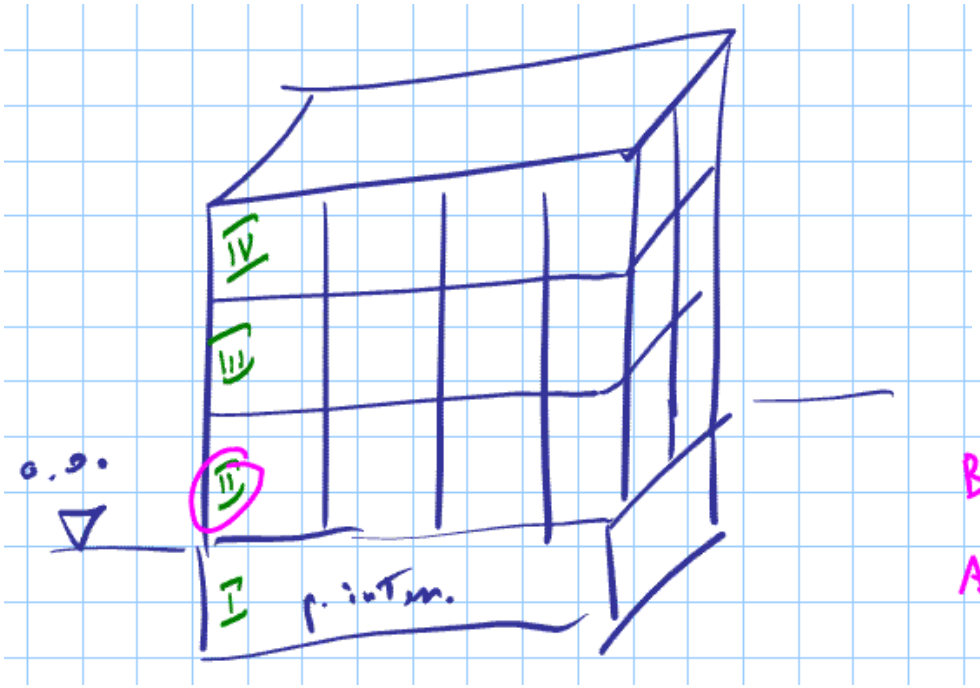
- È a tutti gli effetti una struttura a telaio (può essere di CD "A" oppure "B")
  - Fattore di comportamento:

    come per una qualsiasi struttura a telaio
  - Nel modello geometrico (e nel giudizio sulla regolarità) fare attenzione al diverso comportamento dei pilastri in funzione del vincolo al piede (del 2° ordine)

In presenza di pareti solo al primo livello

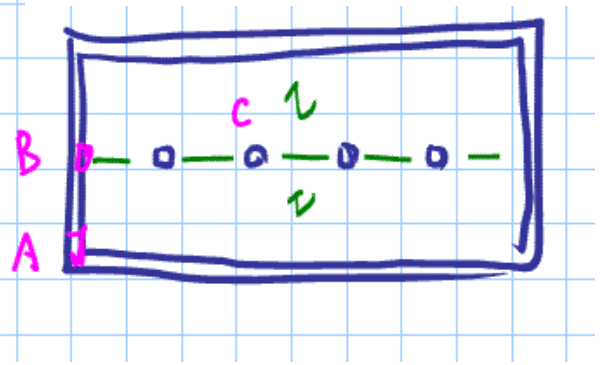
Modello geometrico e fattore di struttura

Struttura a telaio sovrastante - Diverso comportamento dei pilastri in funzione del vincolo al piede (del 2° ordine)



A – incastrato nelle due direzioni

C – spostamento impedito rotazioni consentite



In presenza di pareti solo al primo livello

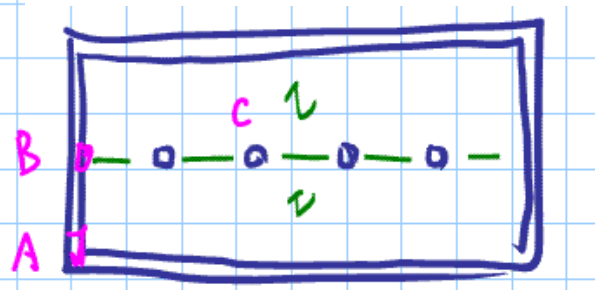
Modello geometrico e fattore di struttura

Struttura a telaio sovrastante - Diverso comportamento dei pilastri in funzione del vincolo al piede (del 2° ordine)

La regolarità in pianta e la regolarità in altezza del telaio possono essere condizionate dal diverso comportamento dei pilastri in funzione del vincolo

A – incastrato nelle due direzioni

C – spostamento impedito rotazioni consentite



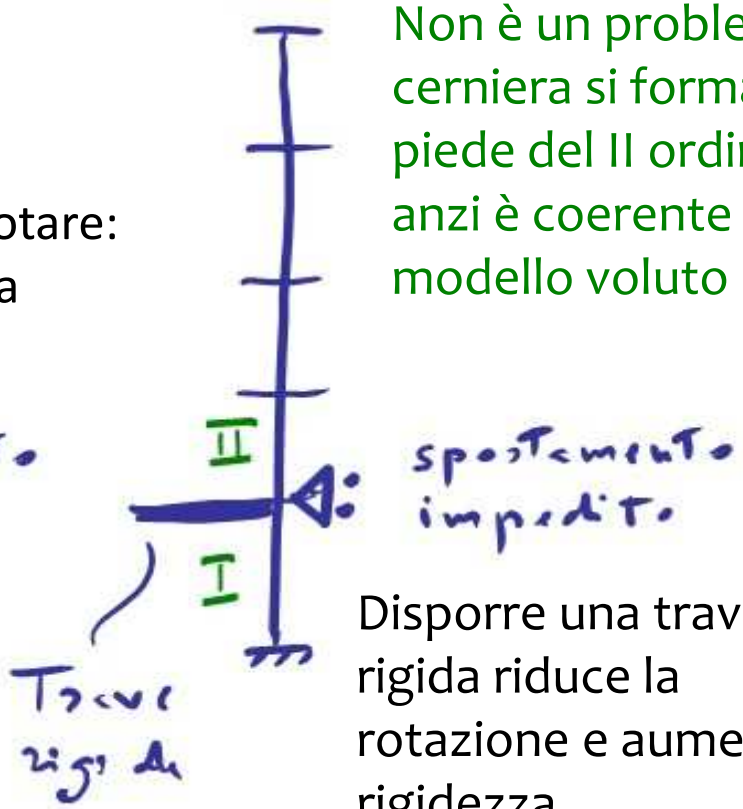
In presenza di pareti solo al primo livello

Modello geometrico e fattore di struttura

Struttura a telaio sovrastante

Incastro al piede del II ordine: maggiore rigidezza

Possibilità di ruotare: minore rigidezza



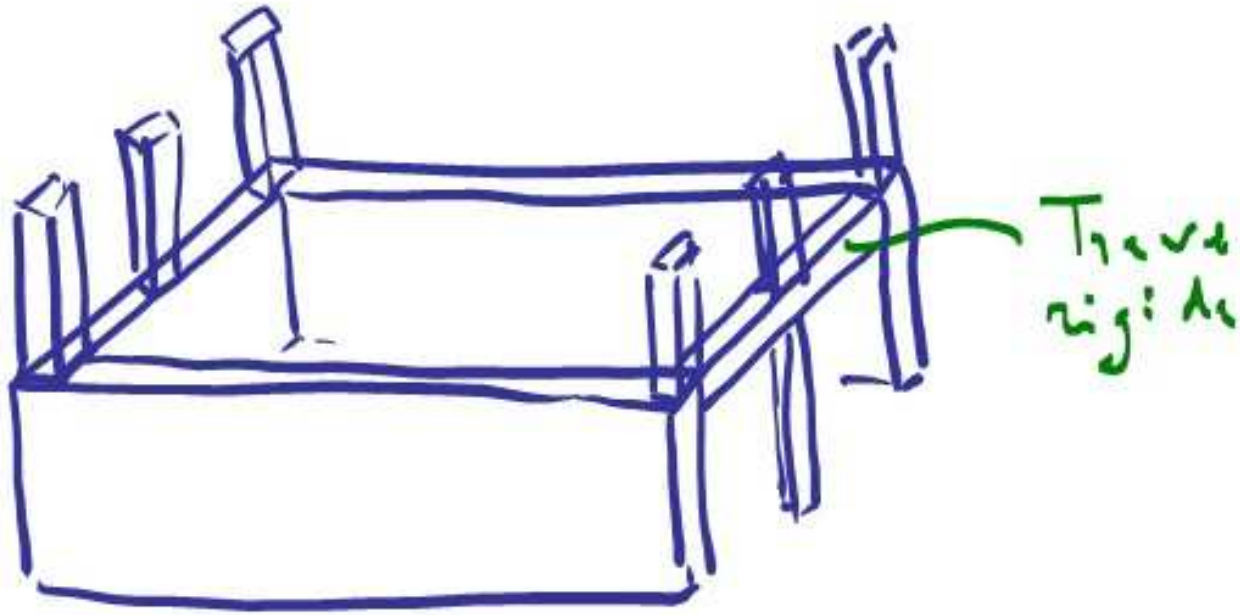
Disporre una trave rigida riduce la rotazione e aumenta la rigidezza

Non è un problema se la cerniera si forma al piede del II ordine anzi è coerente col modello voluto

In presenza di pareti solo al primo livello

Modello geometrico e fattore di struttura

Struttura a telaio sovrastante



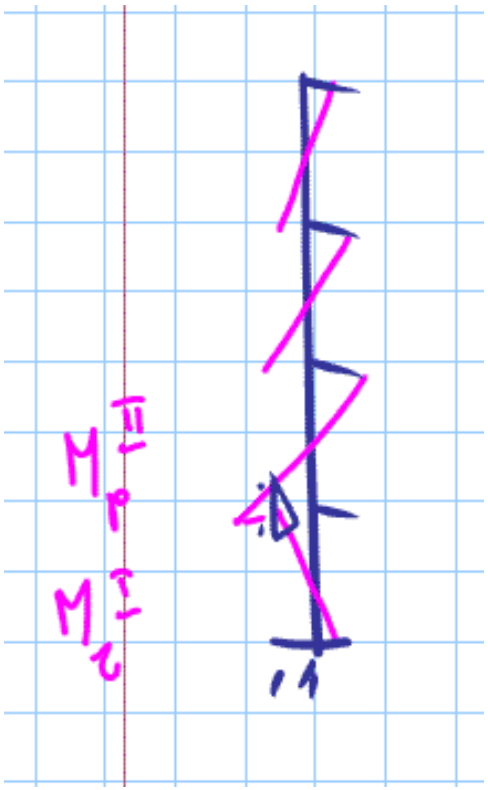
La trave rigida può regolarizzare il comportamento al II ordine

La trave rigida non serve a regolarizzare il comportamento della “scatola”

In presenza di pareti solo al primo livello

Modello geometrico e fattore di struttura

Struttura a telaio sovrastante



Comportamento di un pilastro che parte dal I ordine

Inversione del taglio (e della pendenza del momento flettente)

Se le travi sono a spessore:

$$M_t^I \cong M_p^{II}$$

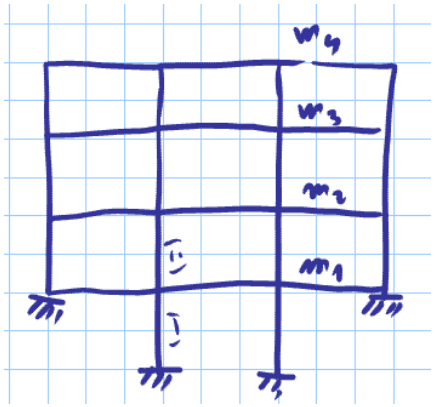
Se le travi sono rigide:

$$M_t^I << M_p^{II}$$

In presenza di pareti solo al primo livello

La struttura si comporta come se avesse un piano in meno, cioè come se partisse dal II ordine

- La previsione delle sollecitazioni (per la relazione secondo il capitolo 10) può essere fatta con un piano in meno
  - Nella ripartizione del taglio tra i pilastri occorre tenere conto della differenza di rigidezza dovuta al diverso grado di vincolo al piede del II ordine



La modellazione è condizionata dal programma che si usa. Si possono seguire due vie:

- **Descrivere solo la struttura a telaio, inserendo opportuni vincoli che simulano l'effetto della scatola rigida al I ordine**
- **Descrivere anche le pareti (ed il primo impalcato)**

Solo telaio:

Pilastri che partono dalla parete:

- **Se al di sotto vi sono pareti che li bloccano nelle due direzioni, considerare alla base un incastro per entrambe le direzioni**
- **Se la parete vincola in una sola direzione, mettere alla base un incastro per quella direzione e un incastro rotazionalmente cedevole per l'altra (la rigidezza rotazionale del vincolo può essere schematizzata con modelli semplici)**

La modellazione è condizionata dal programma che si usa. Si possono seguire due vie:

- Descrivere solo la struttura a telaio, inserendo opportuni vincoli che simulano l'effetto della scatola rigida al I ordine
- Descrivere anche le pareti (ed il primo impalcato)

Solo telaio:

Pilastri che partono dalla fondazione:

- Imporre alla base un vincolo coerente con la rigidezza della fondazione
- Imporre in testa al primo ordine un vincolo che impedisce gli spostamenti orizzontali (per simulare l'effetto dell'impalcato bloccato) ma non le rotazioni

Il primo impalcato non è descritto nel modello e le relative masse non sono assegnate allo schema

La modellazione è condizionata dal programma che si usa. Si possono seguire due vie:

- Descrivere solo la struttura a telaio, inserendo opportuni vincoli che simulano l'effetto della scatola rigida al I ordine
- Descrivere anche le pareti (ed il primo impalcato)

Anche le pareti:

a) Pareti modellate con elementi bidimensionali

- Gli elementi bidimensionali non vincolano i nodi alla rotazione (i pilastri che partono dalla parete risulterebbero incernierati). I programmi usano vari artifici per eliminare il problema
- Gli elementi bidimensionali non danno un vincolo fuori piano. Anche per questo occorre usare artifici
- Evitare di assegnare una massa alle pareti, perché questo darebbe luogo ad un numero elevatissimo di ulteriori modi di oscillazione libera, che farebbero solo confusione

La modellazione è condizionata dal programma che si usa. Si possono seguire due vie:

- **Descrivere solo la struttura a telaio, inserendo opportuni vincoli che simulano l'effetto della scatola rigida al I ordine**
- **Descrivere anche le pareti (ed il primo impalcato)**

Anche le pareti:

b) Pareti modellate con elementi monodimensionali

- **Si possono inserire aste verticali in prosecuzione dei pilastri sovrastanti, ma occorre scegliere opportunamente la sezione di queste aste**
- **È opportuno inserire anche aste orizzontali, a mo' di travi, per limitare le rotazioni dei nodi**

La modellazione è condizionata dal programma che si usa. Si possono seguire due vie:

- **Descrivere solo la struttura a telaio, inserendo opportuni vincoli che simulano l'effetto della scatola rigida al I ordine**
- **Descrivere anche le pareti (ed il primo impalcato)**

Anche le pareti:

Primo impalcato

- **Può essere modellato come vincolo mutuo tra i nodi, per rappresentare un impalcato indeformabile nel suo piano**
- **Può essere preferibile non assegnare al primo impalcato la massa che gli compete. Se lo si fa, questa massa verrebbe eccitata solo dagli ultimi modi (che sono sicuramente irrilevanti) e si faticherebbe a raggiungere formalmente l'85% della massa partecipante**

Modellazione della struttura

L'impalcato

Il modello della struttura deve essere tridimensionale e rappresentare in modo adeguato le effettive distribuzioni spaziali di massa, rigidezza e resistenza

Gli orizzontamenti possono essere considerati infinitamente rigidi nel loro piano, a condizione che siano realizzati in cemento armato, oppure in latero-cemento con soletta in cemento armato di almeno 40 mm di spessore

L'ipotesi di impalcato rigido è fondamentale nella modellazione della struttura

È comunque necessario verificare
la rigidezza e la resistenza dell'impalcato

NTC , punto 7.2.6

Impalcato =

insieme di solai e travi posti ad una stessa quota (in particolare, soggetti ad azioni orizzontali); la parte resistente di questo elemento è, soprattutto, la soletta del solaio

Impalcato rigido:

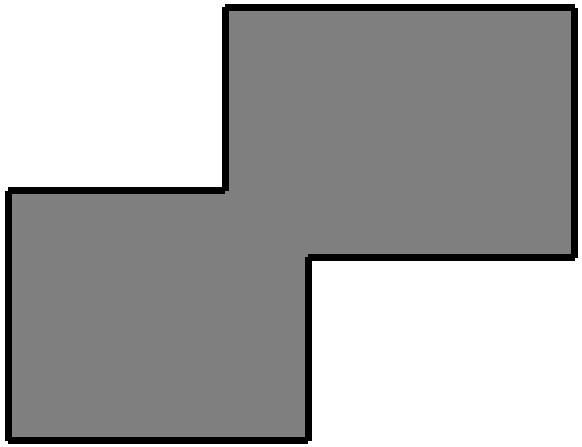
modellato come vincolo mutuo tra i nodi del telaio

Impalcato deformabile:

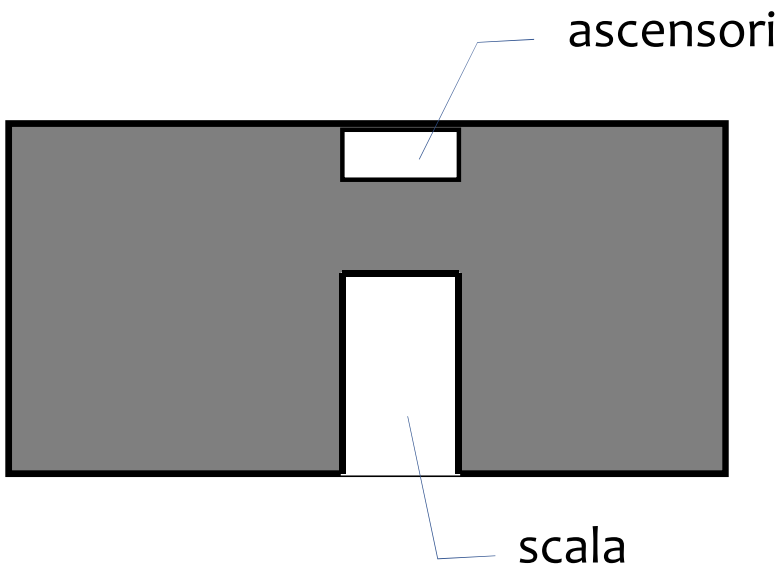
modellato come insieme di lastre (o più grossolanamente come diagonali), collegate ai nodi del telaio spaziale

- **Forma poco compatta, presenza di grosse rientranze, grossi fori o parti mancanti nell'impalcato:**

riduce localmente la resistenza e rende possibili grosse deformazioni localizzate



qui la debolezza è evidente



in altri casi uno sguardo superficiale può trarre in inganno

- **Forma poco compatta, presenza di grosse rientranze, grossi fori o parti mancanti nell'impalcato:**

  riduce localmente la resistenza e rende possibili grosse deformazioni localizzate

- Presenza di un numero molto basso di elementi resistenti verticali (singole pareti o nuclei irrigidenti):

  nascono sollecitazioni e deformazioni rilevanti per riportare l'azione sismica a tali elementi

- Variazione della rigidezza degli elementi resistenti verticali (soprattutto se pareti) tra un piano e l'altro :

  nel trasferire azioni rilevanti da un punto all'altro l'impalcato può essere molto sollecitato e deformarsi molto

Modellazione della struttura

Elementi non strutturali

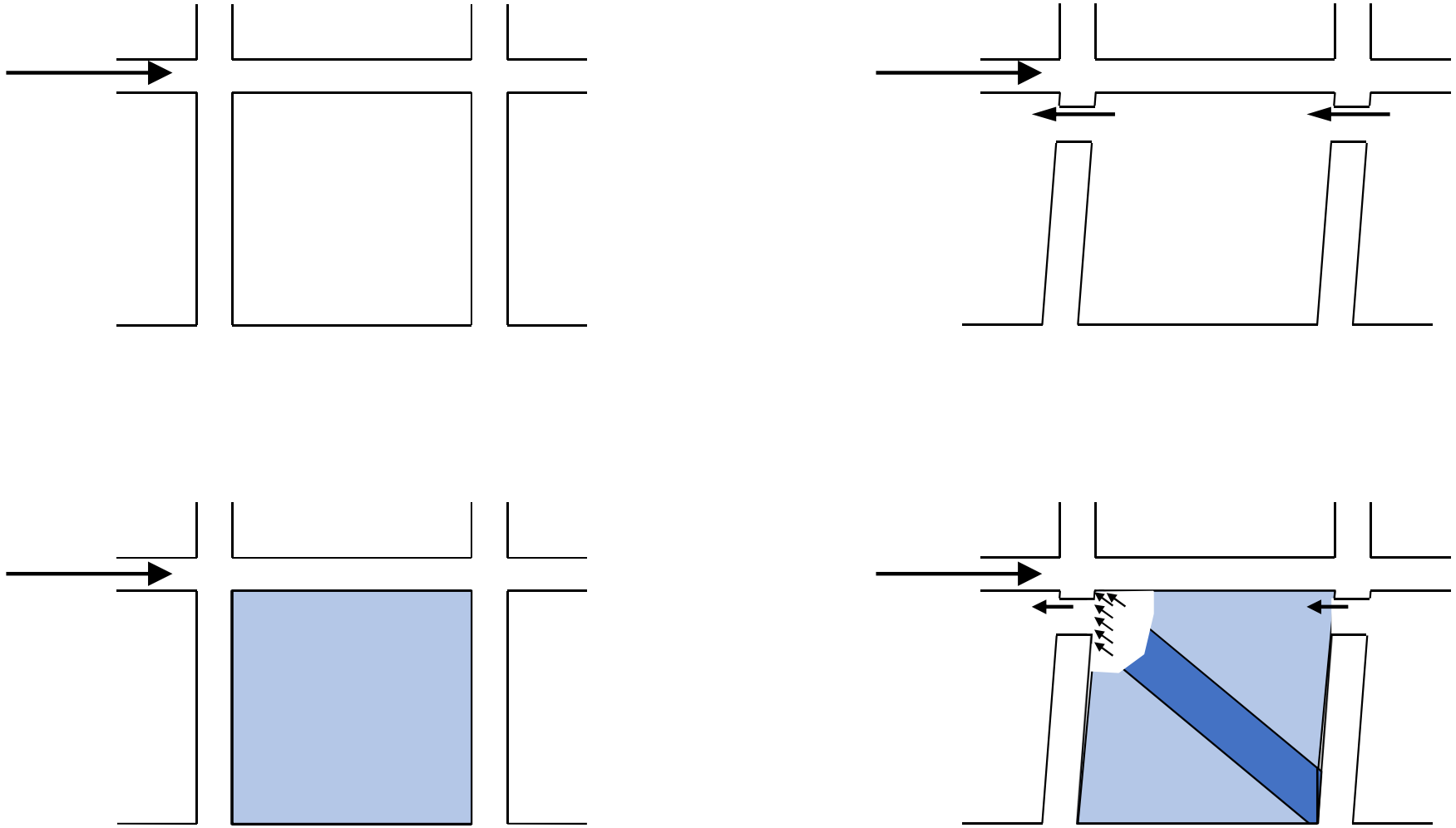
Il modello della struttura deve essere tridimensionale e rappresentare in modo adeguato le effettive distribuzioni spaziali di massa, rigidezza e resistenza

Gli elementi non strutturali (quali tamponature e tramezzi) possono essere rappresentati unicamente in termini di massa, considerando il loro contributo alla rigidezza e alla resistenza del sistema strutturale solo qualora tale contributo modifichi significativamente il comportamento del modello

In quali casi il contributo degli elementi non strutturali modifica il comportamento?

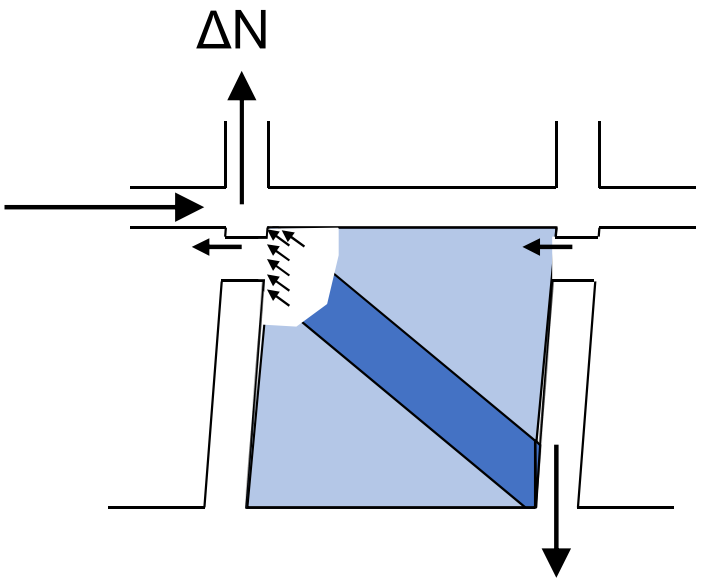
NTC, punto 7.2.6

ELEMENTI NON STRUTTURALI (TRAMEZZI, TAMPONATURE)



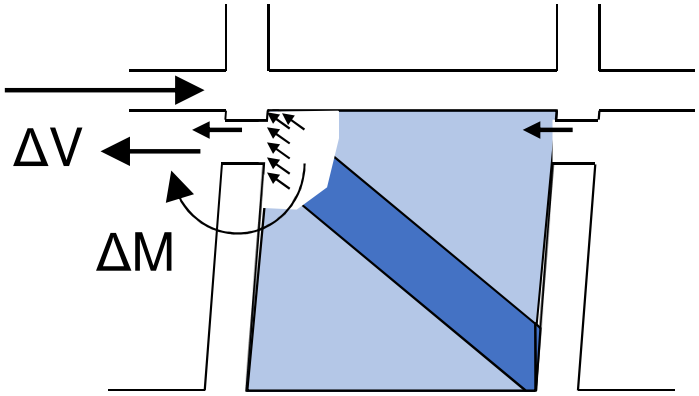
Effetto locale su travi e pilastri:

- **variazione dello sforzo normale nei pilastri (dovuto alla componente verticale della forza nel pannello murario)**



Effetto locale su travi e pilastri:

- **variazione dello sforzo normale nei pilastri (dovuto alla componente verticale della forza nel pannello murario)**
- **variazione di taglio e momento nella zona di estremità dei pilastri (dovuto alla componente orizzontale della forza nella diagonale), perché il pannello murario ha un contatto diffuso con le aste e non trasmette la forza direttamente nel nodo**



Effetto locale su travi e pilastri:

- **variazione dello sforzo normale nei pilastri (dovuto alla componente verticale della forza nel pannello murario)**
- **variazione di taglio e momento nella zona di estremità dei pilastri (dovuto alla componente orizzontale della forza nella diagonale), perché il pannello murario ha un contatto diffuso con le aste e non trasmette la forza direttamente nel nodo**
- **variazione di taglio e momento agli estremi delle travi**

Effetti globali:

- **comportamento dinamico: l'irrigidimento dovuto alla presenza delle tamponature riduce il periodo proprio della struttura; ciò può comportare un incremento dell'azione sismica**
- **comportamento inelastico: la rottura delle tamponature è fragile; quando essa avviene, l'aliquota di azione sismica da loro portata si scarica istantaneamente sulla struttura**

Effetti dovuti alla loro distribuzione:

- **una distribuzione irregolare in pianta**
  può provocare rotazione degli impalcati e quindi incrementi anche notevoli di sollecitazione sugli elementi più eccentrici
  attenzione in particolare agli edifici con struttura simmetrica o bilanciata (baricentro delle masse coincidente con quello delle rigidezze) e tamponature dissimmetriche
- **una distribuzione irregolare lungo l'altezza**
  può portare a concentrazione di sollecitazione ad un piano ("piano soffice"), con riduzione della duttilità globale

Tenerne conto è importante quando:

- Sono pochi e molto robusti
  (rischio di forti sollecitazioni negli elementi strutturali adiacenti)

- Sono disposti in pianta in maniera molto irregolare
  (rischio di rotazione dell'impalcato e quindi di sollecitazioni negli elementi strutturali agli estremi)

- Sono distribuiti irregolarmente lungo l'altezza
  (rischio di creazione di piano soffice, con riduzione della duttilità globale)

In caso contrario si può analizzare un modello costituito dai soli elementi strutturali

Possibili schematizzazioni delle tamponature:

- **insieme di lastre, collegate in più punti alla maglia di telaio**
  - **Vantaggi:**
    possibilità di analizzare pareti con aperture
  - **Svantaggi:**
    complessità dello schema;
    difficoltà a tenere conto dell'unilateralità del vincolo

- **pendolo, disposto nella diagonale compressa**
  - **Lunghezza del pendolo l_d = lunghezza diagonale**
  - **Spessore della sua sezione s = spessore muratura**
  - **Larghezza della sua sezione B indicata da fonti bibliografiche:**

M. Pagano	$B = 0.5\ A_p / l_d$	$\Rightarrow$	$B \cong 0.20 \div 0.25\ l_d$
B. Stafford Smith			$B \cong 0.15 \div 0.30\ l_d$
D.M. 2/7/81			$B = 0.10\ ld$

A_p = area del pannello murario

Modellazione della struttura

Struttura e terreno

Il modello della struttura deve essere tridimensionale e rappresentare in modo adeguato le effettive distribuzioni spaziali di massa, rigidezza e resistenza

Nella definizione dell'azione sismica sulla struttura, si possono considerare la deformabilità del complesso fondazione-terreno e la sua capacità dissipativa

Usare un modello complessivo per struttura, fondazione e terreno, oppure modelli separati?

NTC, punto 7.2.6

Effetto della deformabilità della fondazione (comportamento statico):

- **cedimenti verticali differenziali**
- **rotazioni al piede dei pilastri del primo ordine**

$\Downarrow$

variazione della rigidezza relativa dei diversi pilastri e quindi diversa distribuzione delle azioni sismiche

attenzione in particolare agli elementi molto rigidi, come le pareti, la cui rigidezza può essere vanificata dalla rotazione al piede

Effetto della deformabilità della fondazione (comportamento dinamico):

- **maggiore deformabilità complessiva**

$$\Downarrow$$

aumento del periodo proprio della struttura;

ciò comporta in genere una riduzione dell'azione sismica, ma un aumento degli spostamenti

È necessario modellare insieme struttura, fondazione e terreno quando:

- La fondazione non è adeguatamente rigida
  (rischio di cedimenti differenziali, rotazioni al piede, ridistribuzione dell'azione sismica)

- Il terreno è molto deformabile
  (rischio di variazione notevole del periodo proprio)

In caso contrario (fondazione più rigida della struttura in elevazione, terreno non particolarmente deformabile), si può considerare la struttura incastrata al piede ed analizzare poi separatamente l'insieme fondazione-terreno con le azioni trasmesse dalla struttura sovrastante