

Corsi di aggiornamento

# Progettazione strutturale e Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni

## 3. Progetto di edifici antisismici in c.a. con struttura a telaio

15 - Modellazione della struttura  
a. struttura intelaiata e pareti

Spoletto

1-2 marzo 2018

Aurelio Ghersi

# Modellazione della struttura

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

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 del modello di telaio

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)

# Evoluzione del modello di telaio

## Telaio spaziale e insieme spaziale di telai piani

### 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 flessione-torsionale tra i telai ortogonali
- Vantaggi:
  - Maggiore flessibilità nella descrizione della struttura

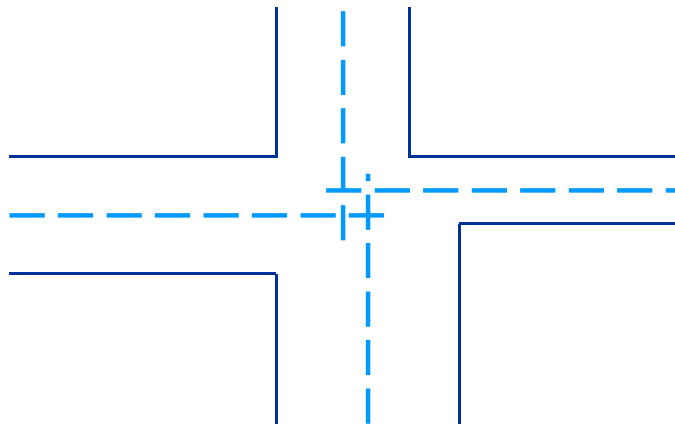
### Modello di telaio spaziale

- Più preciso e sempre valido
- Maggiori problemi a causa della non convergenza degli assi

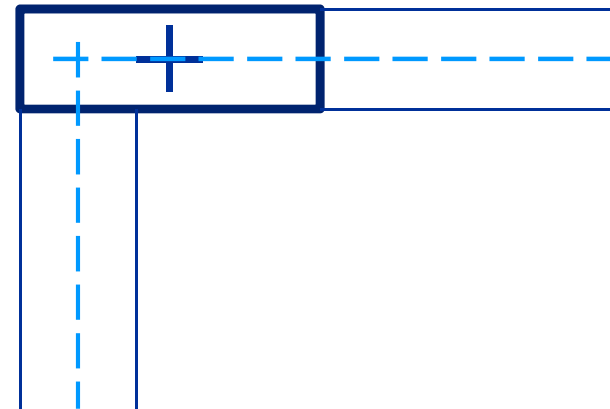
# Il modello di telaio

## 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

# Il modello di telaio

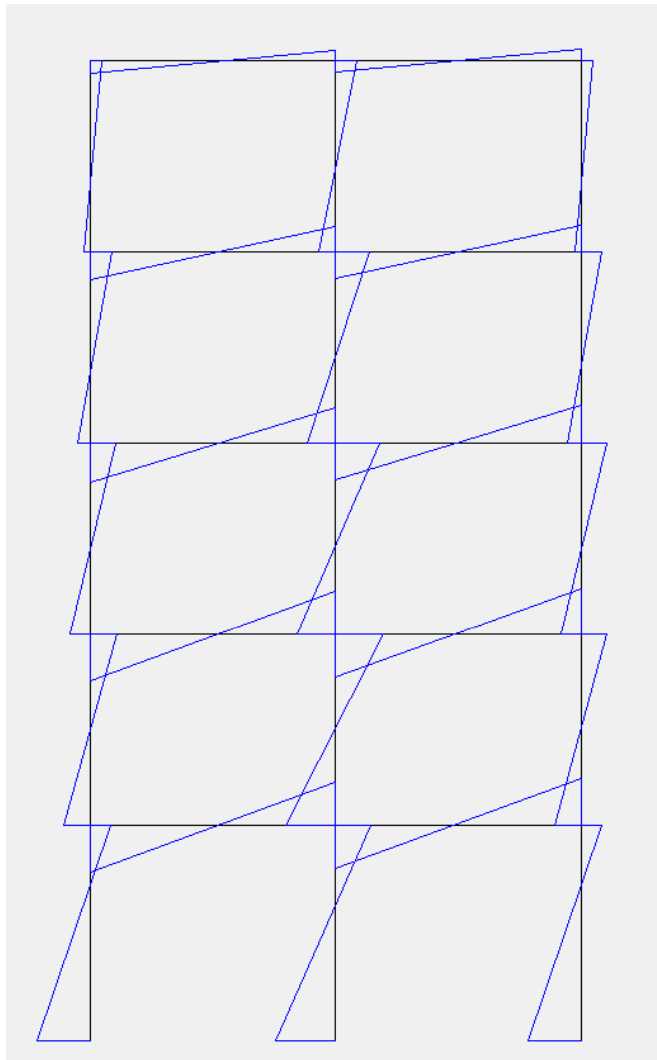
## Problemi:

- 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)

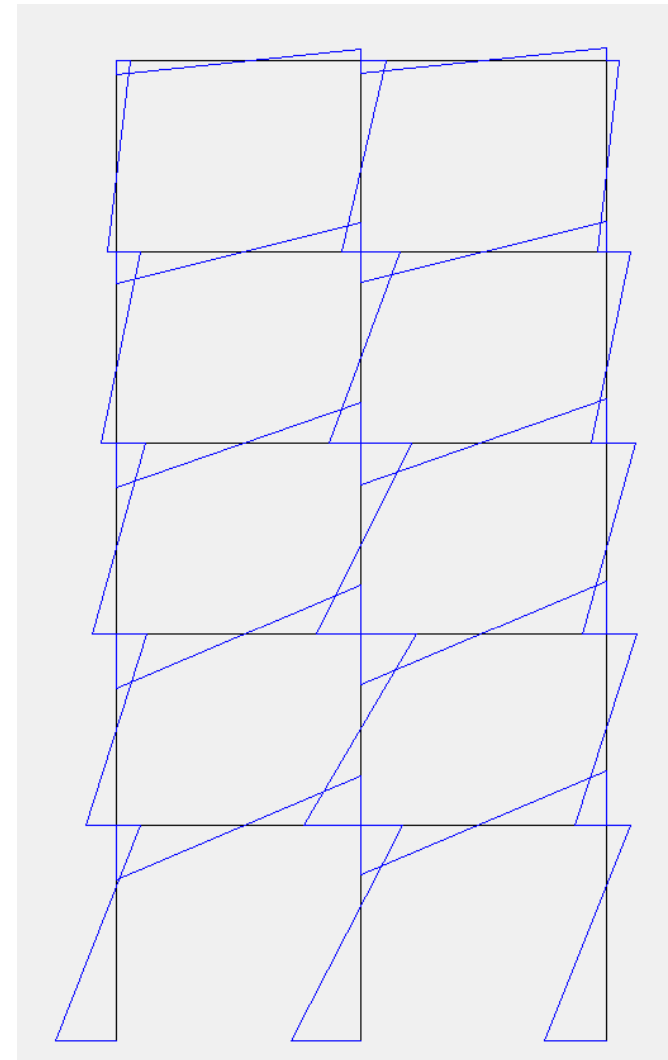
Aggiunta di tratti rigidi o offset, che complicano il modello e modificano (sensibilmente) la rigidezza complessiva e quindi il periodo proprio della struttura

# Senza tratti rigidi

$T = 0.533 \text{ s}$



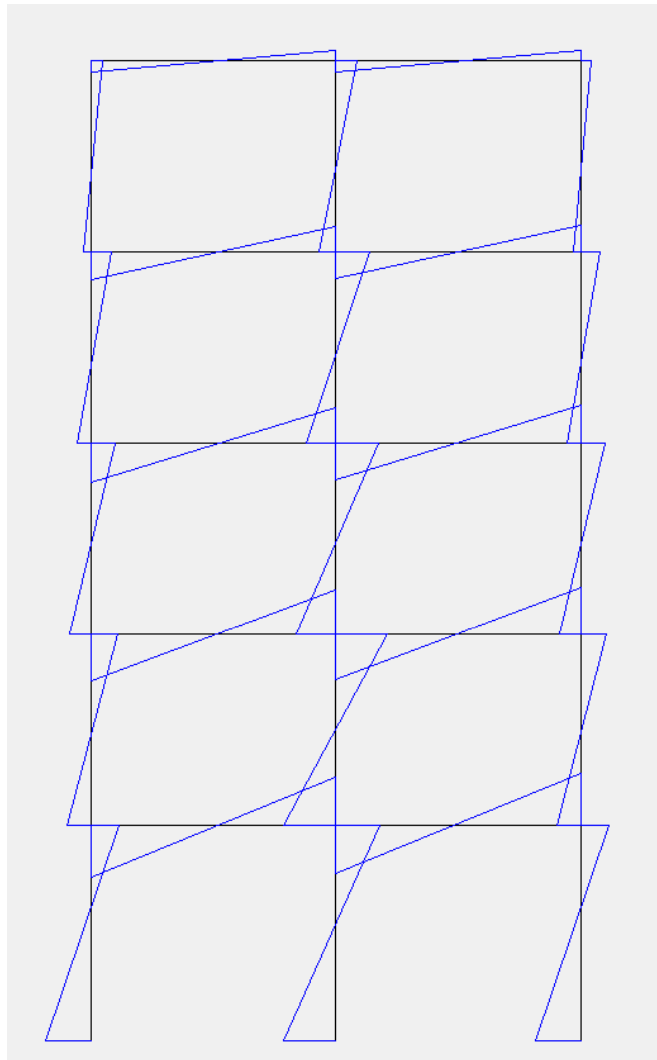
analisi statica



analisi modale

# Con tratti rigidi

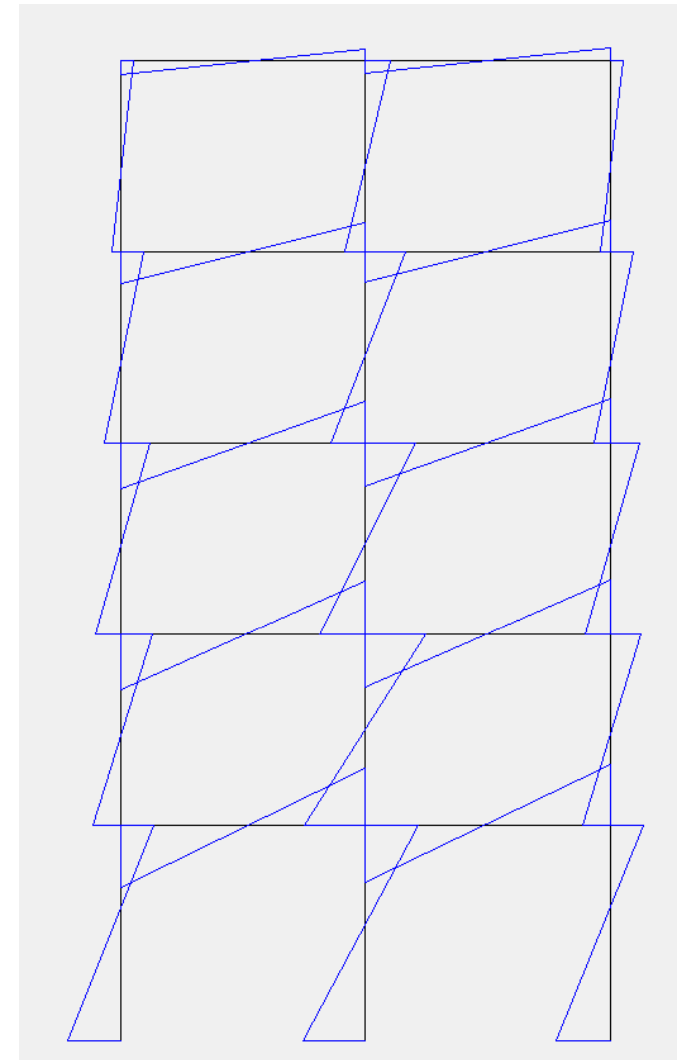
$T = 0.426 \text{ s}$



analisi statica

Cambia  
(di molto)  
il periodo

Cambia  
qualcosa dove  
c'è variazione  
dei tratti  
rigidi



analisi modale

# Modellazione della struttura

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

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

# Modellazione della struttura

## 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.)

# Modellazione della struttura

## 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)

# Modellazione della struttura

## Rigidezza degli elementi strutturali

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

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?

# Modellazione della struttura

## Rigidezza degli elementi strutturali

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

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

# Modellazione della struttura

## Rigidezza degli elementi strutturali

### Considerazioni:

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

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

# Modellazione della struttura

## Rigidezza degli elementi strutturali

### 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

# Modellazione della struttura

## Rigidezza degli elementi strutturali

Spunti futuri:

- Usare il programma RC\_NL per valutare la variazione di rigidezza causata dalla fessurazione

In presenza di pareti

# Modelli per le pareti

## Alternative:

- Pareti come aste, con tratti rigidi per il collegamento alle travi e tenendo 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

# Edifici con pareti presenti solo al primo livello

- Modello geometrico e fattore di struttura

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

- Usare fattori di struttura 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 calcolo appropriato)

# Edifici con pareti presenti 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 struttura:

$$q_0 = 3 k_w$$

ma in questo caso  $k_w = 0.5$  perché  $l_w \gg h_w$

quindi  $q_0 = 1.5$

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

quindi  $q = 1.5$

# Edifici con pareti presenti 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 struttura:

$$q = 1.5$$

- Amplificazione del taglio:

per pareti estese debolmente armate il taglio dovrebbe essere amplificato di  $(q+1)/2$  e quindi di 1.25 (vedi più avanti, tipologia pareti non accoppiate)

questa mi sembra una cautela  
eccessiva, ma comunque poco rilevante

# Edifici con pareti presenti 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")

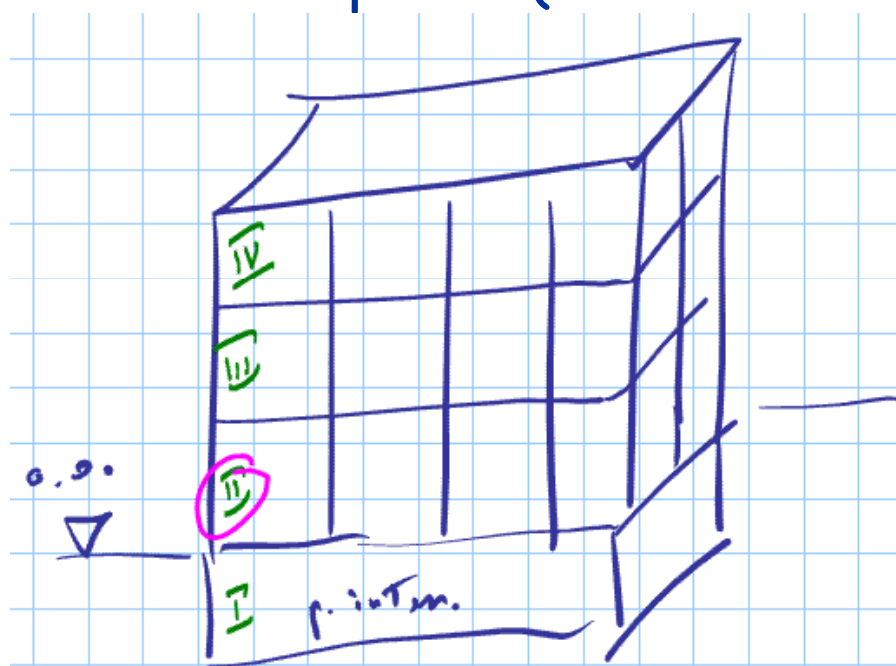
- Fattore di struttura:  
come per una qualsiasi struttura a telaio
- Nel modello geometrico (e nel giudizio sulla regolarità) fare attenzione al diverso comportamento dei pilastri in funzione del vincolo al piede (del 2° ordine)

# Edifici con pareti presenti solo al primo livello

- Modello geometrico e fattore di struttura

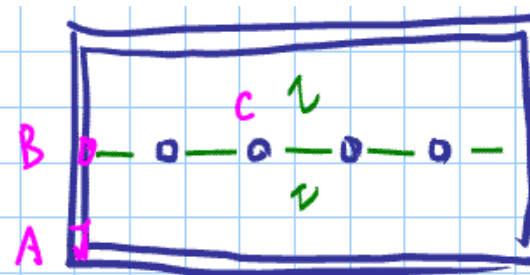
## Struttura a telaio sovrastante

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



A - incastrato nelle due direzioni

C - spostamento impedito  
rotazioni consentite



# Edifici con pareti presenti solo al primo livello

- Modello geometrico e fattore di struttura

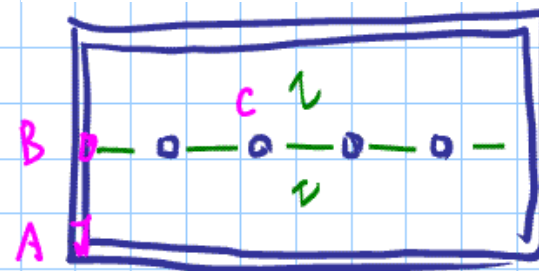
## Struttura a telaio sovrastante

- 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

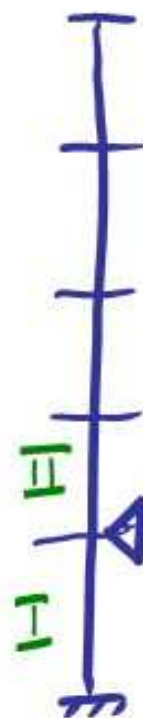


# Comportamento dei pilastri in funzione del vincolo al piede (del 2° ordine)

- Modellazione e comportamento



Incastro al piede  
del II ordine:  
maggiore rigidezza



Possibilità di  
ruotare:  
minore rigidezza

spostamento  
impedito



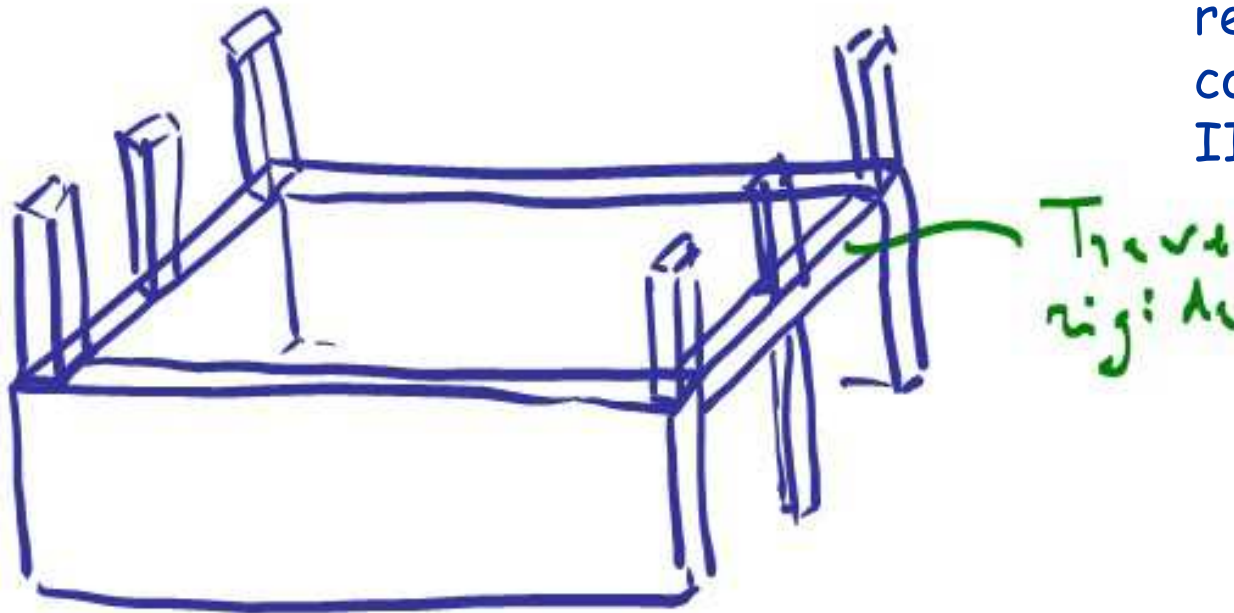
Non è un problema se  
la cerniera si forma al  
piede del II ordine  
anzi è coerente col  
modello voluto

Disporre una trave  
rigida riduce la  
rotazione e aumenta  
la rigidezza



# Comportamento dei pilastri in funzione del vincolo al piede (del 2° ordine)

- Modellazione e comportamento



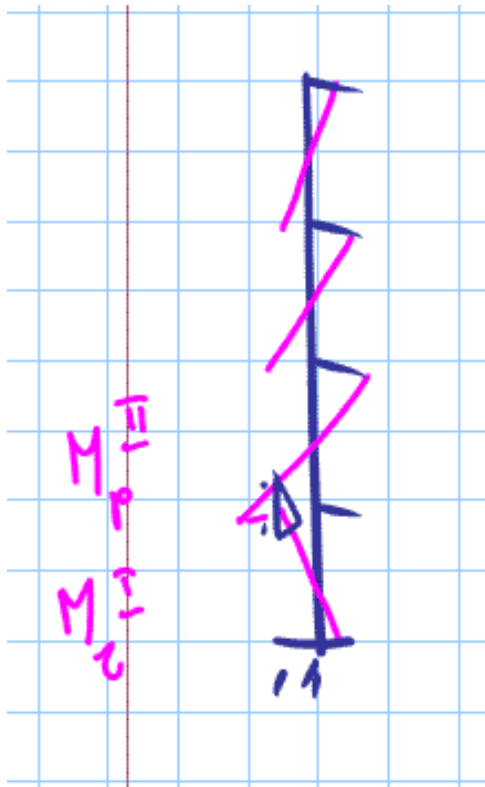
La trave rigida può  
regolarizzare il  
comportamento al  
II ordine

Trave  
rigida

La trave rigida non serve a  
regolarizzare il comportamento  
della "scatola"

# Comportamento dei pilastri in funzione del vincolo al piede (del 2° ordine)

- Modellazione e comportamento



Comportamento di un pilastro  
che parte dal I ordine

Inversione del taglio (e della  
pendenza del momento flettente)

Se le travi sono a spessore:

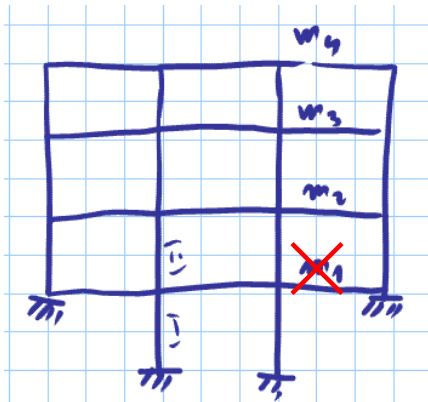
$$M_t^I \cong M_p^{II}$$

Se le travi sono rigide:

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

# Comportamento dei pilastri in funzione del vincolo al piede (del 2° ordine)

- 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



# Modellazione globale della struttura

È condizionata dal programma che si usa. Si possono seguire due vie:

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

# Modellazione globale della struttura

## 1. 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)

# Modellazione globale della struttura

## 1. 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

# Modellazione globale della struttura

## 2. 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

# Modellazione globale della struttura

## 2. 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

# Modellazione globale della struttura

## 2. 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