

Corsi di aggiornamento
Progettazione strutturale
e Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni

9. Vulnerabilità e rischio sismico di edifici esistenti in c.a.

10 – Risposta sismica: analisi lineare
con fattore di struttura q

Villa Redenta, Spoleto, 22-24 novembre 2018
Aurelio Ghersi

Analisi strutturale sismica

Sostanza e dettagli

Analisi strutturale

problemi generali

1. Comportamento “tridimensionale” della struttura
 - L’impalcato può ruotare in maniera rilevante e questo condiziona spostamenti e sollecitazioni nella struttura
2. Reale posizione del centro di massa
 - La distribuzione dei carichi variabili può portare a diverse posizioni del centro di massa
3. Direzione di azione dell’azione sismica
 - L’azione sismica ha due componenti in direzioni ortogonali e l’effetto massimo può agire in una qualsiasi direzione, inclinata rispetto agli assi di riferimento

Analisi strutturale

nella progettazione di nuove strutture

1. Il modello della struttura deve essere sempre tale da cogliere il suo comportamento “tridimensionale” (telaio spaziale)
 - Una buona progettazione tende ad un **comportamento traslazionale**; in caso contrario, l’aspetto rotazionale può essere molto rilevante
2. Si tiene conto delle incertezze nella posizione del centro di massa mediante “eccentricità accidentale”
3. Si tiene conto della possibile direzione con intensità massima combinando opportunamente i risultati di un calcolo fatto con azione sismica applicata in due direzioni ortogonali
 - Una buona progettazione rende questi due aspetti **poco rilevanti** e valutabili come incremento percentuale rispetto ad un calcolo traslazionale

Analisi strutturale

per edifici esistenti

1. Quando si usa l'**analisi lineare** il modello della struttura deve essere sempre tale da cogliere il suo comportamento “tridimensionale” (telaio spaziale)
 - Le strutture esistenti spesso non rispettano i criteri di buona progettazione e l'aspetto rotazionale può essere molto rilevante

L'analisi **statica non lineare** è stata sviluppata con riferimento a comportamento piano

- Occorre usare accorgimenti specifici per tener conto del comportamento “tridimensionale” della struttura

Indicazioni più dettagliate sono fornite più avanti, quando si parlerà di analisi statica non lineare

Analisi strutturale

per edifici esistenti

2-3. Quando si usa l'**analisi lineare** vale quanto detto per edifici di nuova progettazione con riferimento a eccentricità accidentale e combinazione delle forze (ma anche in questo caso l'effetto è spesso poco rilevante)

Se si usa l'analisi **statica non lineare**:

- L'eccentricità accidentale interviene nel comportamento rotazionale

Occorre usare anche qui accorgimenti specifici per tener conto del comportamento "tridimensionale" della struttura

- La direzione del sisma può essere fatta variare cambiando la retta d'azione delle forze

Ma in genere è un aspetto non sostanziale

Risposta sismica

Analisi lineare

Risposta sismica di una struttura

Terremoti con accelerazioni modeste

- Le strutture rimangono in campo elastico lineare (ma con i problemi già evidenziati nel caso di strutture in cemento armato)
- È possibile effettuare una analisi lineare

Terremoti con accelerazioni elevate

- Le strutture superano i limiti elastici
- Sarebbe necessaria una analisi non lineare

Risposta sismica di una struttura

valutazione per comportamento lineare

Analisi modale con spettro di risposta

- La risposta **dinamica** massima è valutata come combinazione dell'effetto di più insiemi di **forze statiche**, corrispondenti ai diversi modi
 - Il contributo di ciascun modo dipende dall'ordinata dello spettro (e quindi da caratteristiche del sisma e periodo proprio del modo) e da un parametro detto massa partecipante

Analisi statica

- Se le forze relative ad un modo sono nettamente predominanti, basta considerare queste (o una loro semplificazione)

È possibile usare un'analisi lineare se il comportamento reale è non lineare?

- Dallo studio di oscillatori semplici non lineari:
una struttura progettata per forze inferiori a quelle che occorre sopportare per rimanere in campo elastico si danneggerà, ma sopporterà il terremoto se ha sufficiente duttilità



In fase di progettazione si può fare un calcolo elastico lineare con forze ridotte, purché si garantisca adeguata duttilità



Progetto con analisi lineare e fattore di struttura q

Progetto di strutture antisismiche

con analisi lineare e fattore di struttura q

Perché funziona?

- Perché:
 - Garantiamo adeguata resistenza a tutte le sezioni
 - Garantiamo adeguata duttilità a tutte le sezioni che dovranno andare in campo plastico
 - Imponiamo una gerarchia di resistenze per ottenere un meccanismo di collasso globale
- Senza il rispetto di queste condizioni l'analisi lineare con fattore di struttura perde significato

Verifica di strutture esistenti

con analisi lineare e fattore di struttura q

- Le strutture esistenti molto spesso non soddisfano i requisiti elencati:
 - La resistenza è stata data pensando (spesso) solo ai carichi verticali; quindi non è adeguata in tutte le sezioni
 - La duttilità delle singole sezioni in genere non è stata curata
 - Il meccanismo di collasso (spesso) non è globale

Verifica di strutture esistenti

con analisi lineare e fattore di struttura q

- Venendo mancare i requisiti:
 - L'analisi lineare è poco significativa
 - Qualunque valore del fattore di struttura q è opinabile
- In ogni caso l'analisi lineare (anche con $q=1$) è un primo passo utile per avere indicazioni di massima sul comportamento della struttura
 - È facile a farsi
 - È poco condizionata dalle incertezze nei dati

Analisi lineare

come valutazione preliminare

Analisi lineare

come valutazione preliminare dell'effetto del sisma

Valutazione delle caratteristiche di sollecitazione con procedimenti semplificati

- Può essere utile farla, per cogliere l'ordine di grandezza delle sollecitazioni ed individuare quali possono essere i problemi principali
- Può essere utile come validazione dei calcoli successivi (o almeno dei calcoli lineari), ai sensi del capitolo 10 delle NTC08
- Può fornire indicazioni anche per quanto riguarda le indagini da effettuare in sito e sui materiali

In cosa consiste?

1. Stimare la rigidezza dei pilastri
 - Usare formule semplificate (linee guida della Basilicata, suggerimenti di A. Ghersi)
2. Determinare le forze sulla struttura con analisi statica
 - Fare il calcolo a meno del periodo T , non noto
3. Determinare il periodo proprio T della struttura (formula di Rayleigh) e le forze conseguenti
4. Ripartire il taglio tra i pilastri in proporzione alle rigidezze
5. Stimare i momenti flettenti

E poi?

I risultati ottenuti vengono usati, come per quelli ottenuti da analisi più precise, per:

- determinare il moltiplicatore del sisma che porta al limite di resistenza **a taglio**
- determinare il moltiplicatore del sisma che porta al limite di resistenza **a flessione**

Nota:

- Contemporaneamente, anzi preliminarmente, determinare in funzione della resistenza a flessione e a taglio se è c'è o no possibilità di rotture a taglio dei pilastri

Riferimenti

Linee guida regionali

- Regione Basilicata: Linee guida per la valutazione della vulnerabilità sismica degli edifici strategici e rilevanti (ottobre 2005)

Esempio applicativo

- Si veda la presentazione del corso tenuto a Spoleto
Verifica sismica di edifici esistenti in c.a. 18-19 maggio 2015
presentazione 7, Analisi lineare: valutazione di massima o dettagliata delle caratteristiche di sollecitazione

Analisi lineare e verifiche

Per SLV

Modello della struttura

- Modello:
 - tridimensionale (telaio spaziale)
composto da telai a maglie rettangolari (solo il primo telaio in direzione x ha la trave della scala a quota intermedia)
- Rigidezza aste:
 - rigidezza nominale delle sezioni, senza offset né riduzione rigidezza per fessurazione
 - ulteriore schema senza offset ma con riduzione travi 0.5 e irrigidimento pilastri 0.75 (questa variazione è calibrata per spostamenti più alti, quindi per SLV)
- Tamponature:
 - non inserite nel modello

Procedimento da seguire

Analisi lineare

Valutazione delle caratteristiche di sollecitazione e degli spostamenti con analisi lineare (modale con spettro di risposta o eventualmente statica)

- I risultati variano linearmente con a_g , quindi si può determinare il valore di a_g che porta ad un qualsiasi valore di sollecitazioni

Analisi modale per:

- Controllo resistenza per rotture fragili
- Controllo resistenza per plasticizzazioni a flessione

In seguito anche:

- Controllo deformazioni per giudizio su duttilità

Procedimento da seguire

Analisi lineare

Per ciascuna sezione si ha:

- Momento flettente
 - Valore per carichi verticali (in condizione sismica)
 - Valore per analisi modale con sisma in una direzione (meglio: sisma prevalente in una direzione, cioè includendo eccentricità accidentale e aliquota di sisma nella direzione ortogonale)
Questo valore è proporzionale ad a_g
 - Valore resistente
- Si può calcolare il moltiplicatore del sisma che porta al raggiungimento del momento resistente
 - Per sisma positivo
 - Per sisma negativo

Procedimento da seguire

Analisi lineare

Per ciascuna sezione si ha:

- Taglio
 - Valore per carichi verticali (in condizione sismica)
 - Valore per analisi modale con sisma in una direzione (meglio: sisma prevalente in una direzione, cioè includendo eccentricità accidentale e aliquota di sisma nella direzione ortogonale)
Questo valore è proporzionale ad a_g
 - Valore resistente
- Si può calcolare il moltiplicatore del sisma che porta al raggiungimento del taglio resistente
 - Per sisma positivo
 - Per sisma negativo

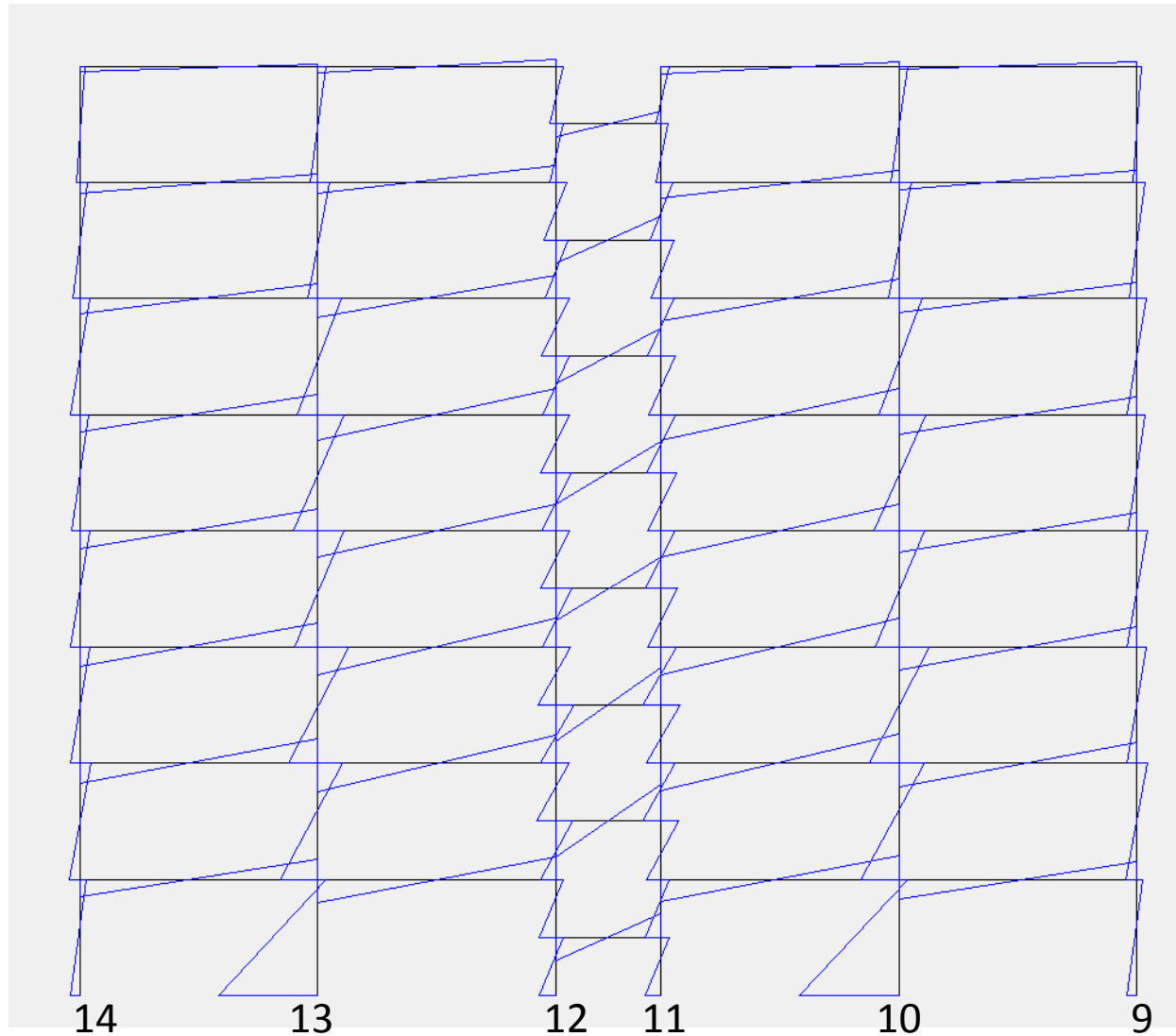
Esame risultati e verifiche
Per SLV – sisma x

Stato limite di salvaguardia della vita SLV

- Si è effettuata una analisi modale con spettro di risposta (con dati spettro per SLV)
 - Per semplicità si mostra l'effetto della sola analisi modale base; si deve comunque considerare l'involuppo di più schemi di carico, per includere effetto di eccentricità accidentale e aliquota di sisma in direzione ortogonale
 - I valori (per i periodi di interesse) sono proporzionali a q . Si mostrano quindi i valori per $q=1$, da dividere per q
- Si è preso in esame separatamente l'effetto dei carichi verticali (i valori quasi permanenti, in condizione sismica)

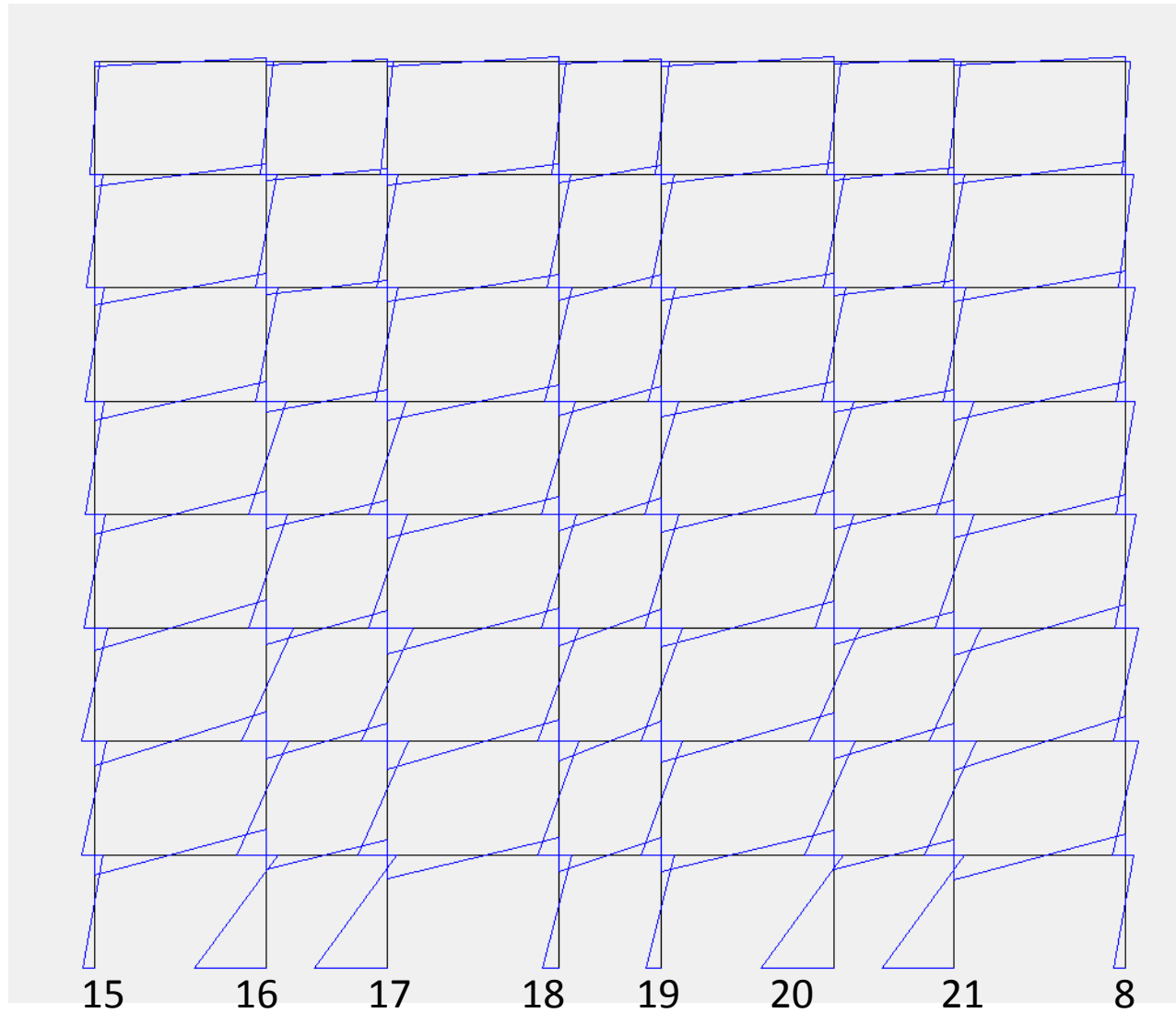
Analisi modale

- Telaio 1 x (in basso in pianta)



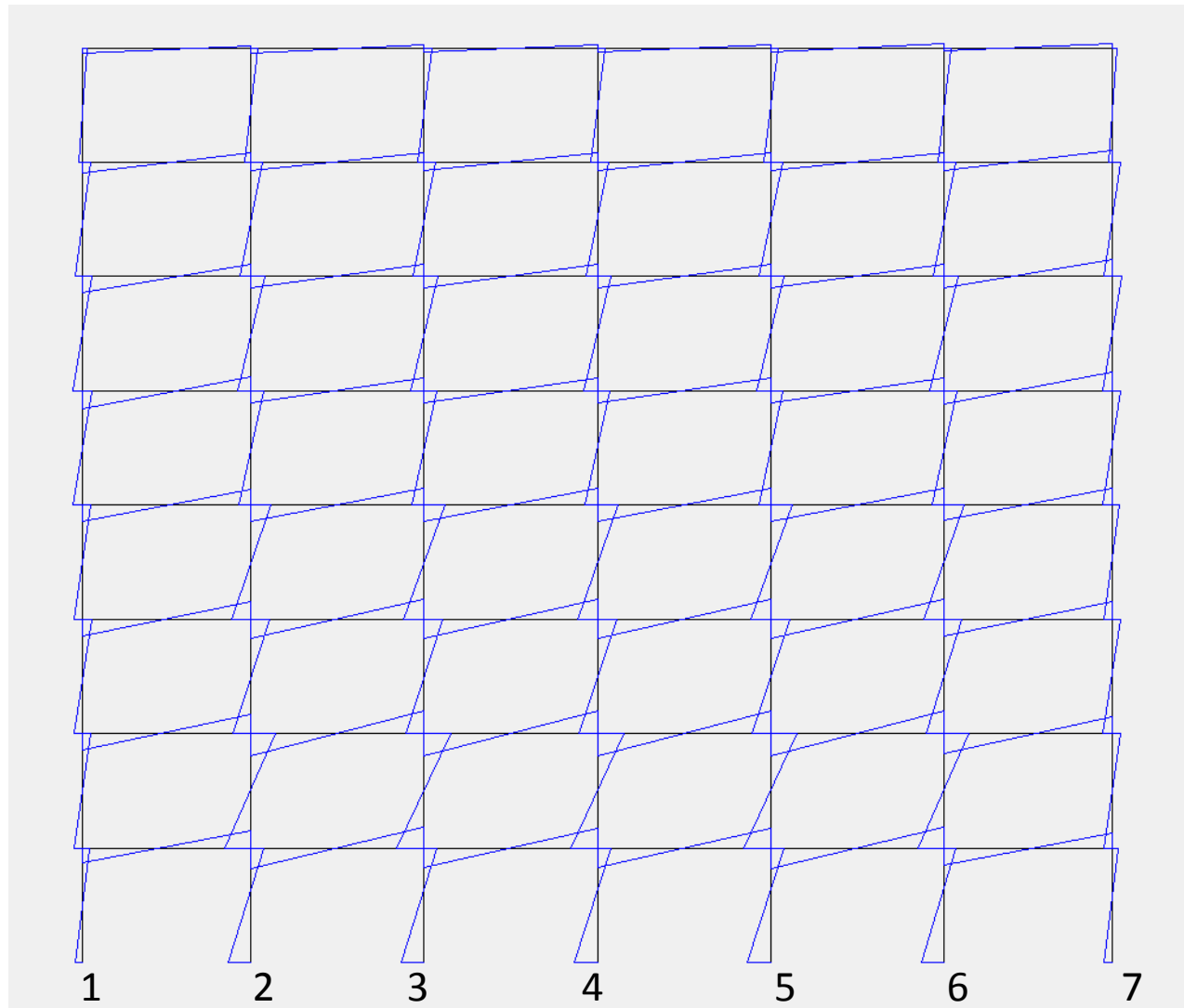
Analisi modale

- Telaio 2 x (di spina)



Analisi modale

- Telaio 3 x (in alto in pianta)



Procedimento da seguire

- Si indica con ρ il rapporto tra caratteristica di sollecitazione agente e resistente

$$\rho = \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \qquad \rho = \frac{V_{Ed}}{V_{Rd}}$$

- Più precisamente, indicando con $M_{Ed,q}$ l'effetto dei carichi verticali e $M_{Ed,s}$ l'effetto del sisma per $q=1$ si ha

$$\frac{1}{\rho} \frac{M_{Ed,s}}{q} + M_{Ed,q} = M_{Rd}$$

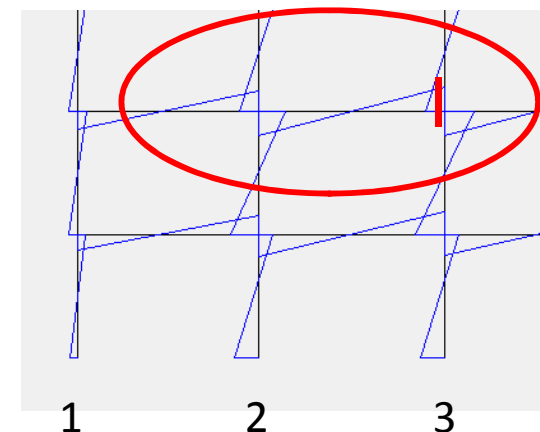
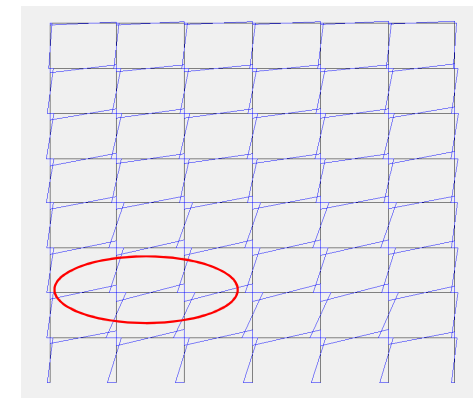
- Si calcola quindi $\frac{1}{\rho} = \frac{M_{Rd} - M_{Ed,q}}{M_{Ed,s}} q$

- $1/\rho$ è il moltiplicatore dell'azione sismica che porta al limite di resistenza della sezione

Procedimento da seguire esempio

- Trave 2-3, 2° impalcato
 - Estremo destro – sisma positivo
 - Carichi verticali
 - $M_{Ed,q} = -41.90 \text{ kNm}$ $V_{ed,q} = -50.40 \text{ kN}$
 - Sisma (con $q=1$)
 - $M_{Ed,s} = -376.64 \text{ kNm}$ $V_{ed,s} = -151.80 \text{ kN}$
 - Valori resistenti
 - $M_{Rd} = -102.50 \text{ kNm}$ $V_{Rd} = -96.10 \text{ kN}$
- calcolati con

$$f_{cd} = \frac{19}{1.2 \times 1.5} = 10.5 \text{ MPa} \quad f_{yd} = \frac{380}{1.05 \times 1.15} = 314.7 \text{ MPa}$$

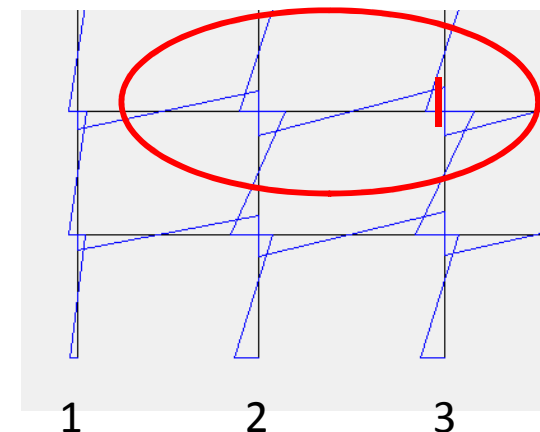
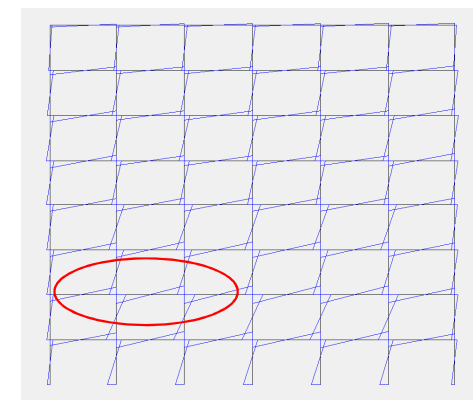


Procedimento da seguire esempio

- Trave 2-3, 2° impalcato
 - Estremo destro – sisma positivo
- Carichi verticali
 - $M_{Ed,q} = -41.90 \text{ kNm}$ $V_{Ed,q} = -50.40 \text{ kN}$
- Sisma (con $q=1$)
 - $M_{Ed,s} = -376.64 \text{ kNm}$ $V_{Ed,s} = -151.80 \text{ kN}$
- Valori resistenti
 - $M_{Rd} = -102.50 \text{ kNm}$ $V_{Rd} = -96.10 \text{ kN}$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M_{Rd} - M_{Ed,q}}{M_{Ed,s}} = \frac{-102.5 + 41.9}{-376.64} q = 0.161 q$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{V_{Rd} - V_{Ed,q}}{V_{Ed,s}} = \frac{-96.1 + 50.4}{-151.8} q = 0.301 q$$

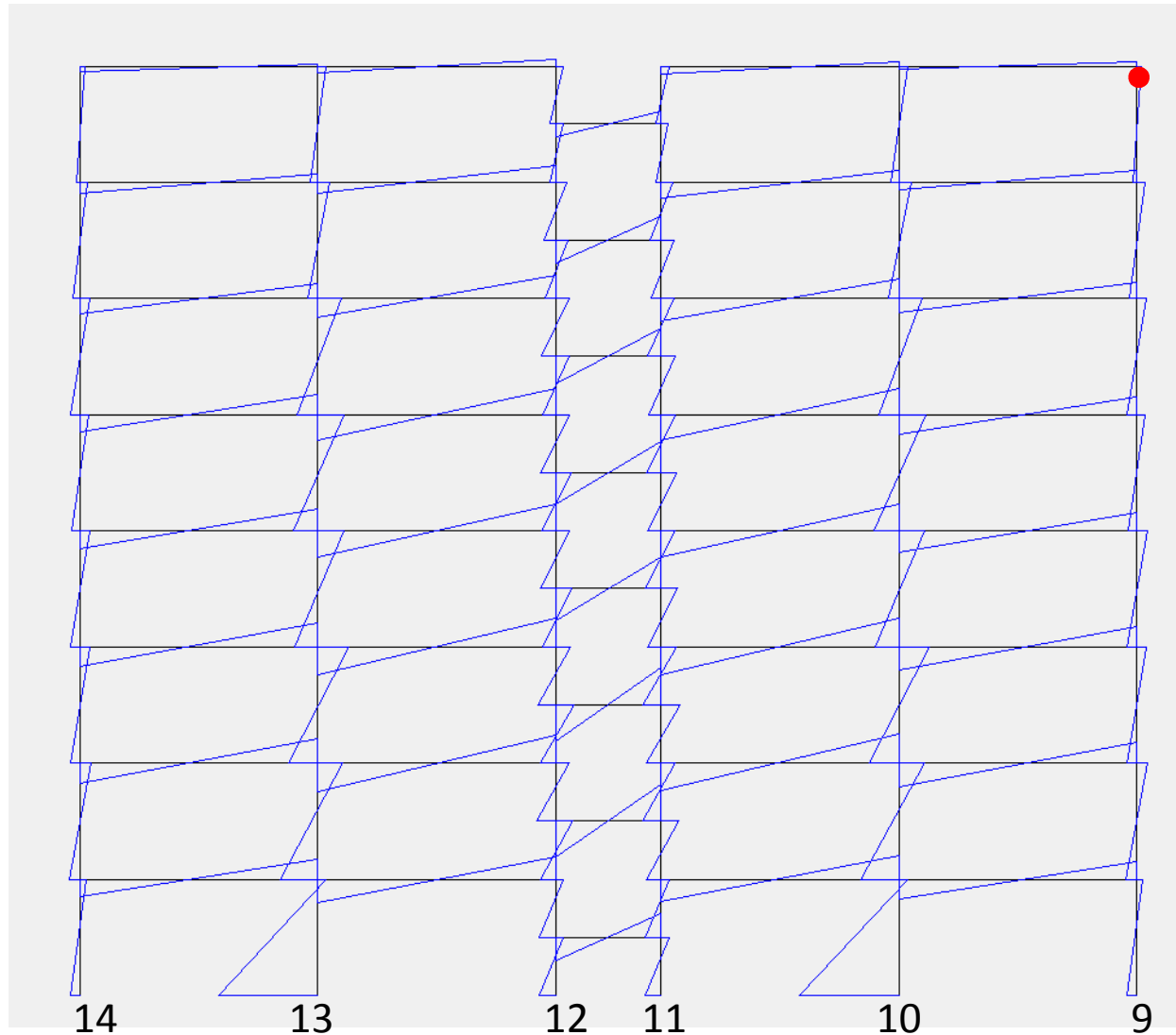


Procedimento da seguire

- Si calcola (a meno di q) il valore di ρ (meglio: di $1/\rho$) per tutte le sezioni significative
- Il valore più piccolo di $1/\rho$ indica la prima sezione a raggiungere il limite
 - Si devono scartare le sezioni non rilevanti
- È importante esaminare la distribuzione dei valori $1/\rho$ ed esprimere sulla base di questi il giudizio sulla struttura

Procedimento da seguire esempio

- Telaio 1 x (in basso in pianta)



Per questa
sezione è

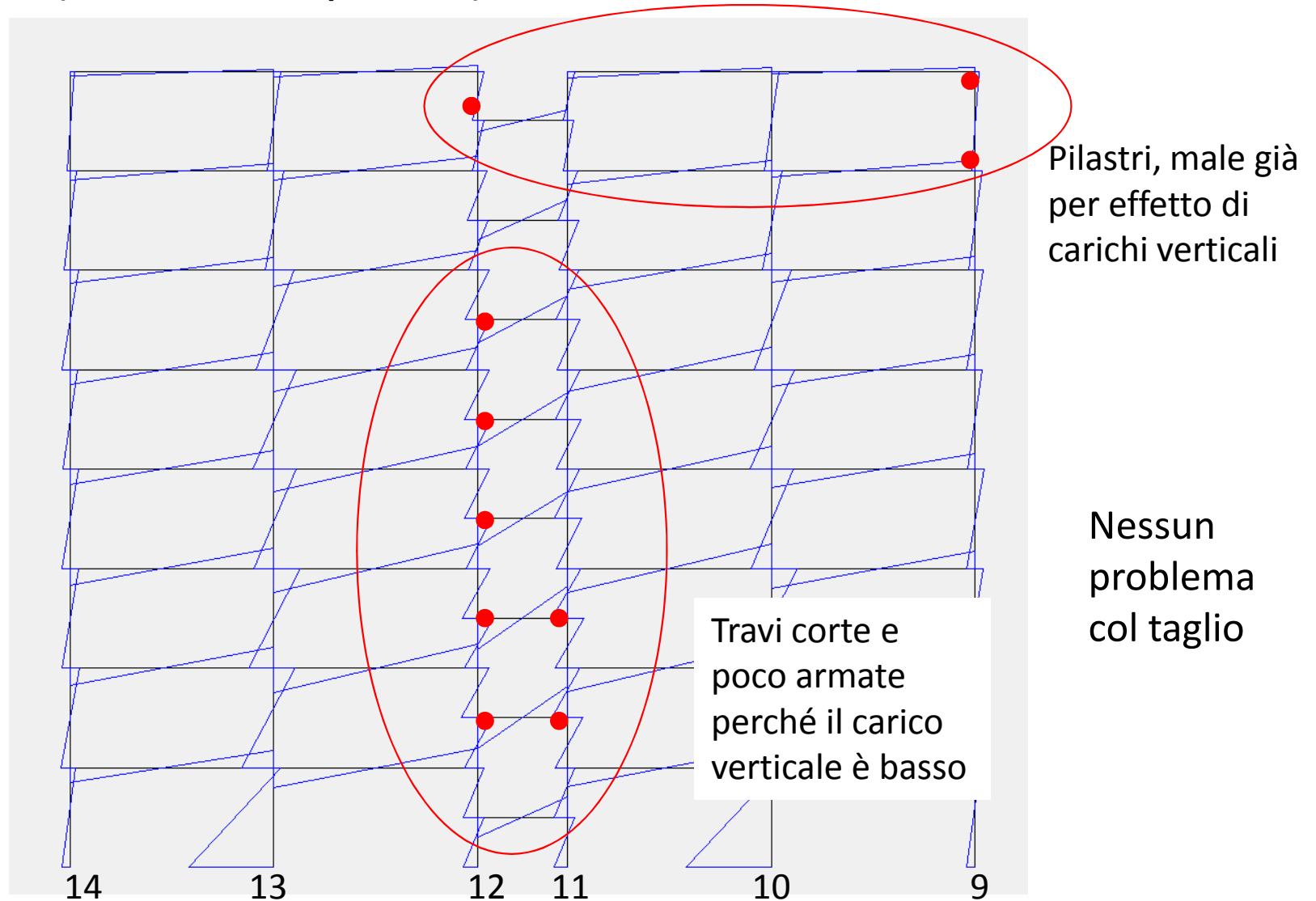
$$\frac{1}{\rho} = 0.028 q$$

Niente di strano,
è una sezione
che sta male già
per carichi
verticali

Procedimento da seguire

valori di $1/p$ inferiori a $0.1 q$

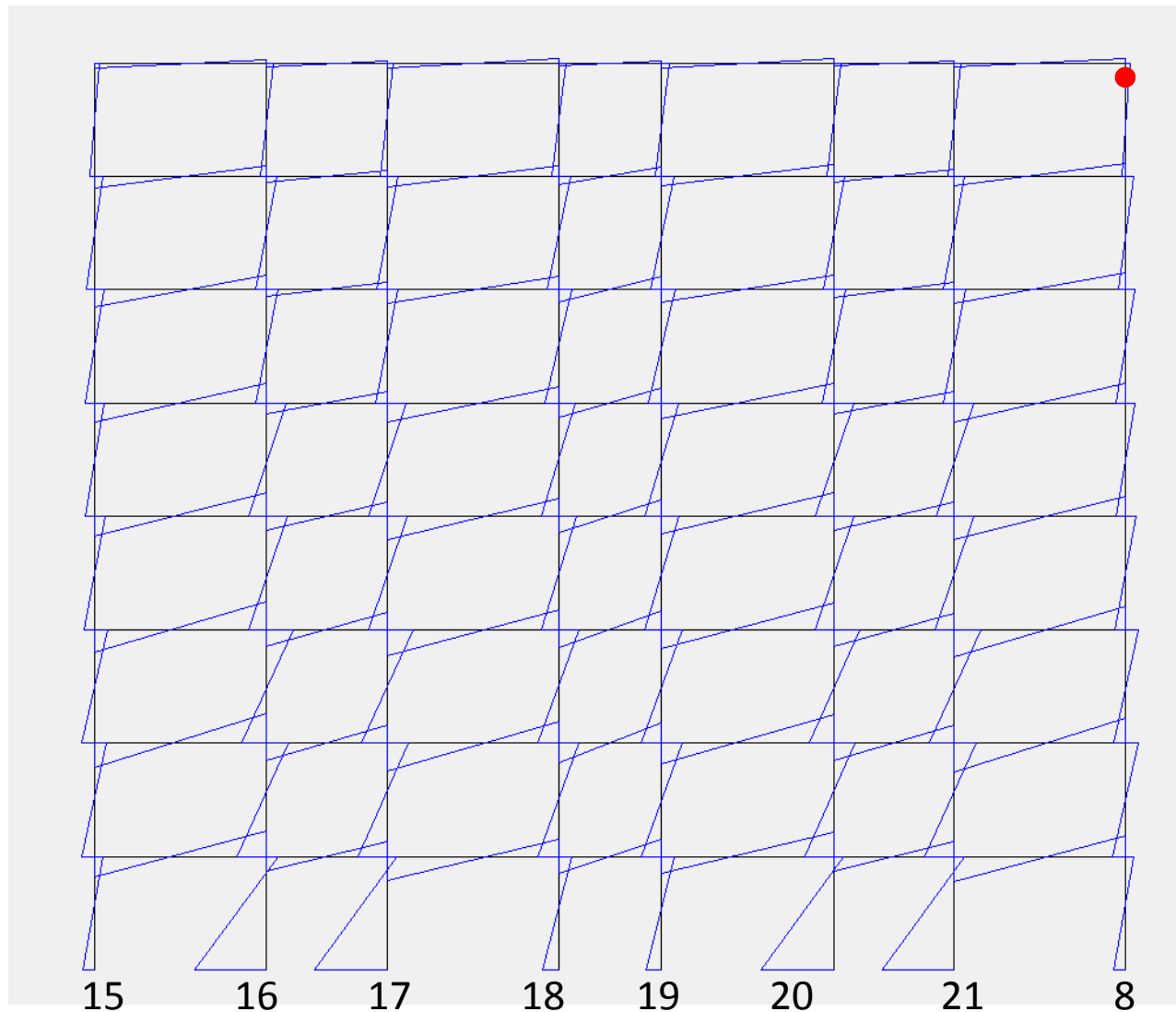
- Telaio 1 x (in basso in pianta)



Procedimento da seguire

valori di $1/p$ inferiori a $0.1 q$

- Telaio 2 x (di spina)

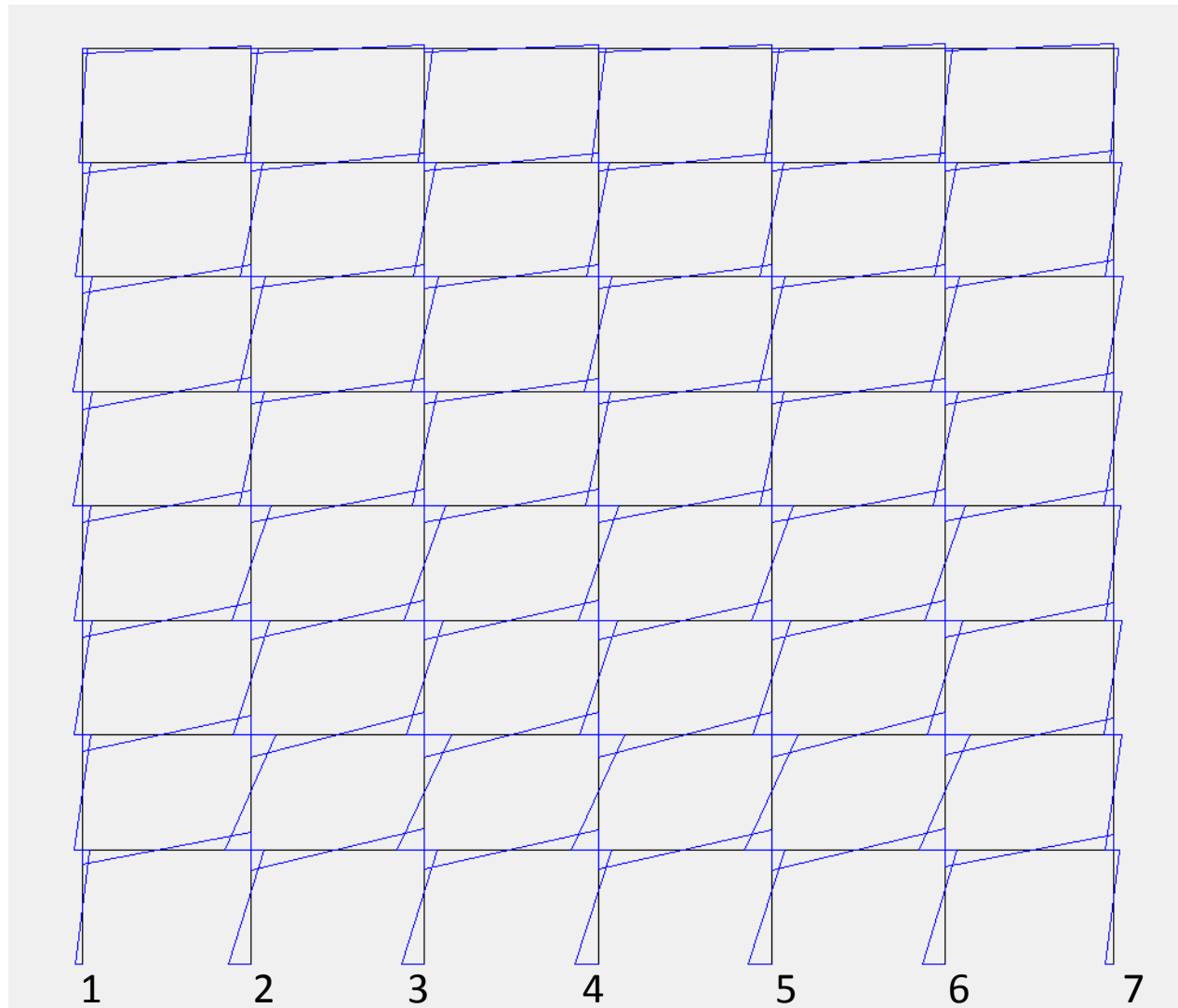


Solo un pilastro,
male già per
effetto di carichi
verticali

Procedimento da seguire

valori di $1/p$ inferiori a $0.1 q$

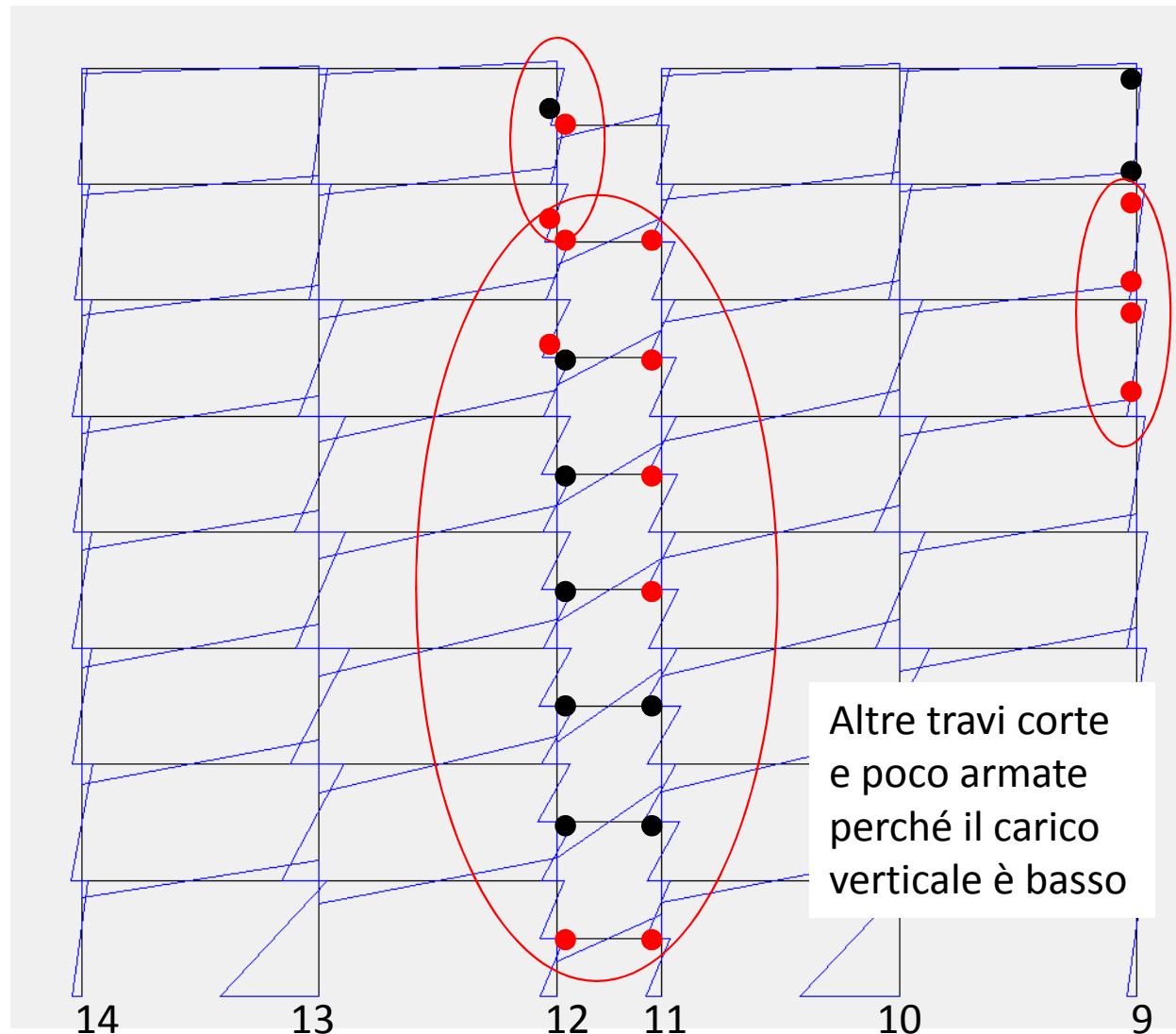
- Telaio 3 x (in alto in pianta)



Nessuna sezione

Procedimento da seguire valori di $1/p$ inferiori a $0.2 q$

- Telaio 1 x (in basso in pianta)



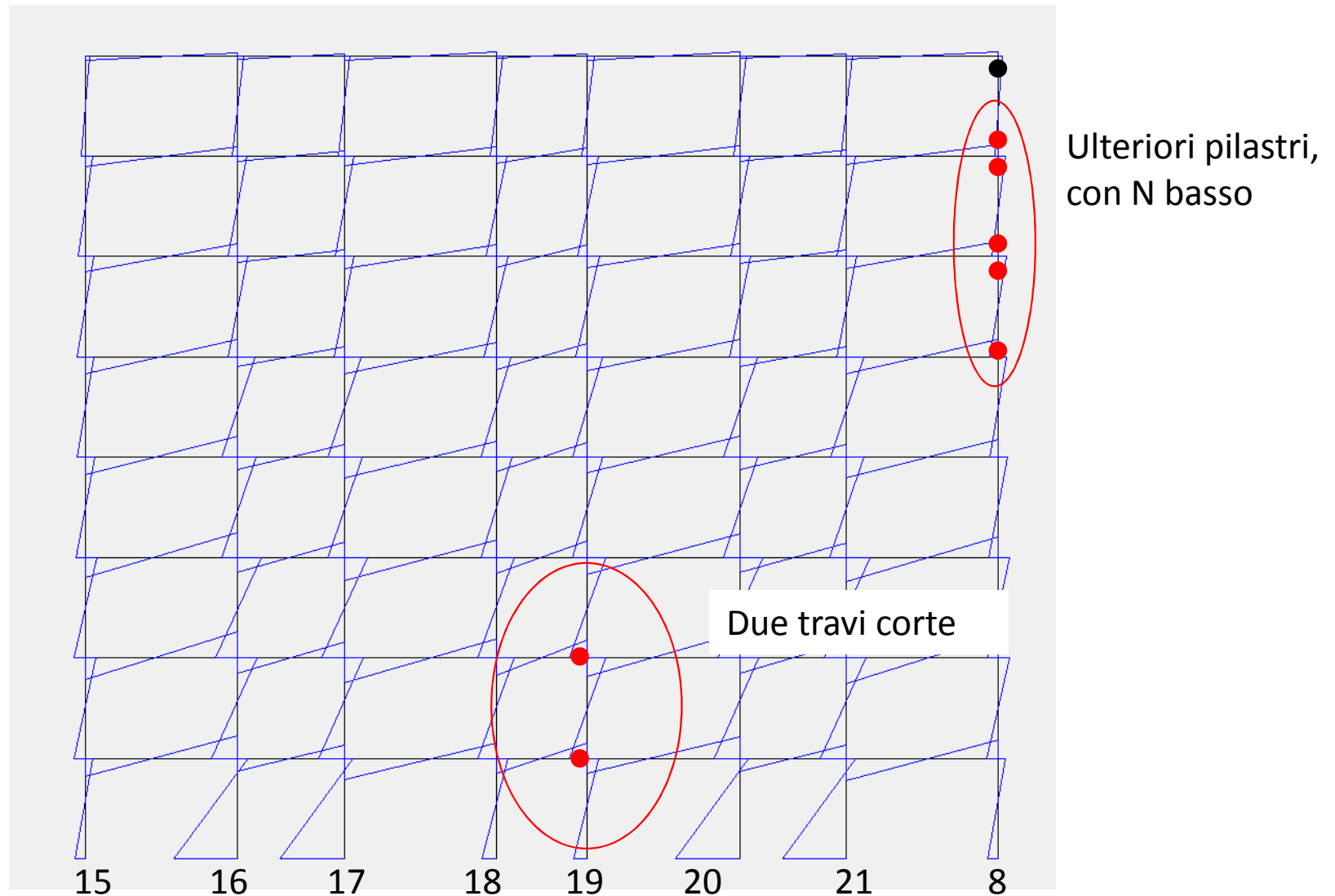
Ulteriori pilastri,
con N basso o
corti

Ancora
nessun
problema
col taglio

Procedimento da seguire

valori di $1/\rho$ inferiori a $0.2 q$

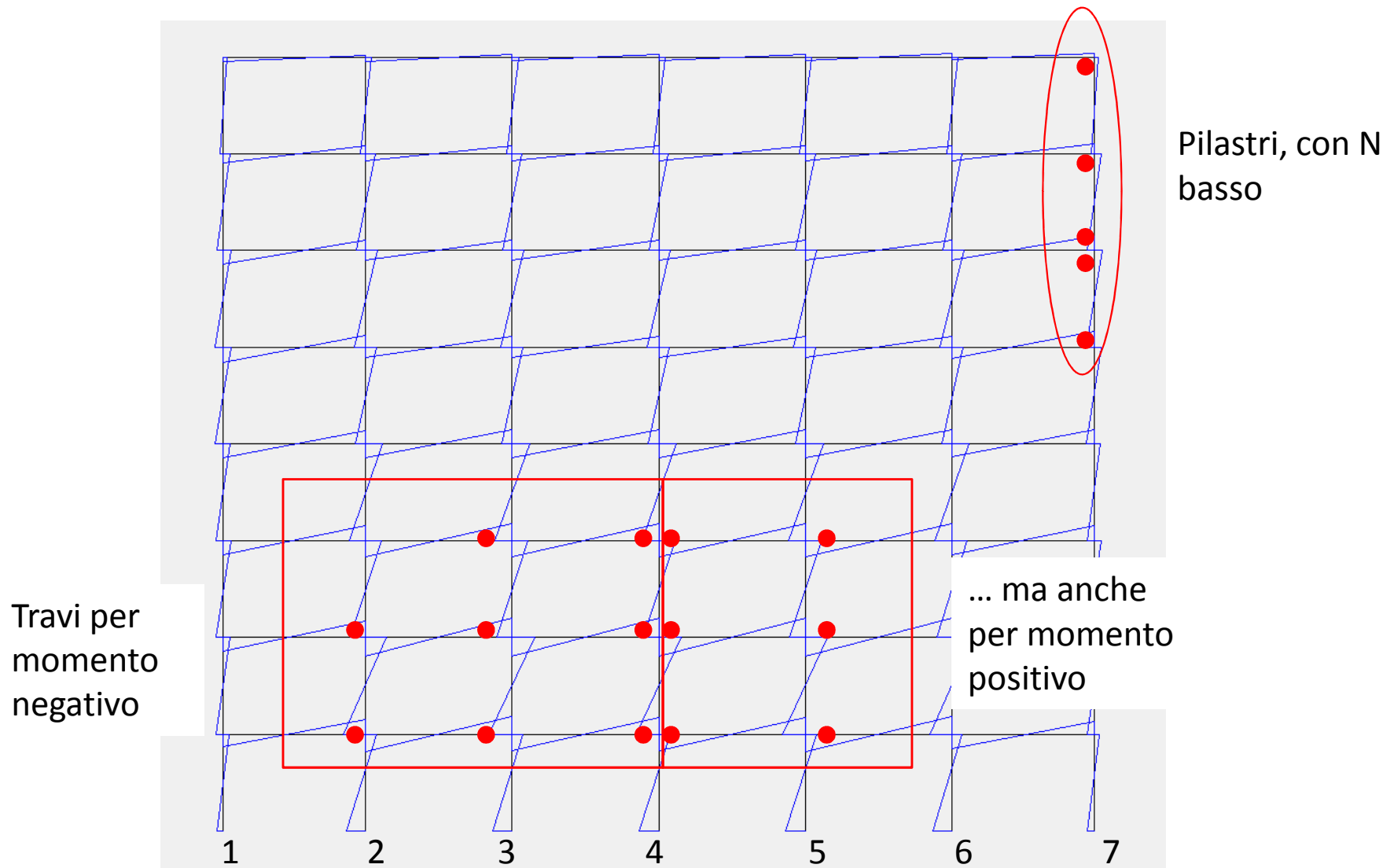
- Telaio 2 x (di spina)



Procedimento da seguire

valori di $1/\rho$ inferiori a $0.2 q$

- Telaio 3 x (in alto in pianta)



Quale conclusione?

Per la direzione x - taglio

- Controllare innanzitutto il raggiungimento dei limiti di resistenza a taglio (soprattutto per i pilastri)
- In questo caso le staffe nei pilastri sono adeguate ($\varnothing 8/20$) ed il limite viene raggiunto per valori di $1/\rho$ pari a circa $0.24 q$
- Per il raggiungimento del limite a taglio considerare un fattore di comportamento $q=1.5$
- La capacità della struttura nei confronti del taglio potrebbe essere $0.24 \times q = 0.36$ dell'azione sismica prevista

Quale conclusione?

Per la direzione x - flessione

- Parecchie travi raggiungono presto i liti di resistenza; prima quelle corte ma presto anche quelle più lunghe
 - Se le armature disposte garantiscono duttilità, le travi non rappresentano un limite da considerare
 - È bene che siano prima le travi a raggiungere il limite prima dei pilastri
- I pilastri che stanno male sono tutti pilastri ai piani superiori, nei quali il problema principale è il momento flettente da carichi verticali, accoppiato ad uno sforzo normale basso
 - Queste sezioni potrebbero essere trascurate
 - Per valori di $1/\rho$ pari a circa 0.21 q cominciano ad arrivare al limite altri pilastri; questo può essere considerato il primo limite per i pilastri

Quale conclusione?

Per la direzione x - flessione

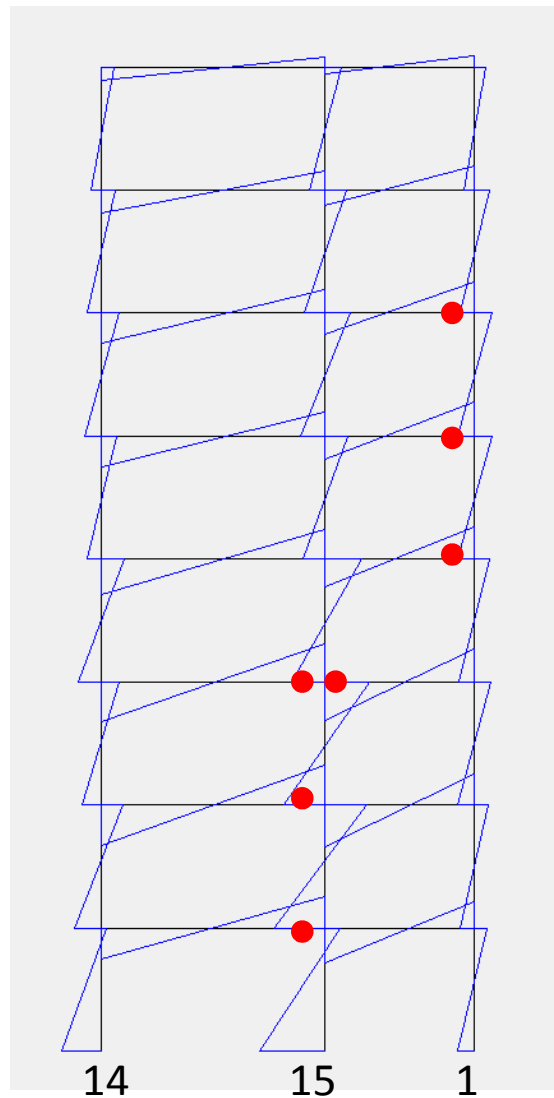
- Controllare che le travi non abbiano problema di duttilità
 - armature a rischio sfilamento per carenza di ancoraggio
 - armatura compressa fortemente carente
- Se le travi sono duttili, non le considero
- Escludere i pilastri che stanno male per M da carichi verticali e N basso (ultimi piani)
- I primi pilastri che considero critici raggiungono il limite per $1/\rho$ pari a circa $0.21 q$
- Poiché sono molte le travi che raggiungono il limite prima dei pilastri posso considerare $q=3$
- La capacità della struttura nei confronti della flessione potrebbe essere $0.21 \times q = 0.63$ dell'azione sismica prevista

Esame risultati e verifiche
Per SLV – sisma y

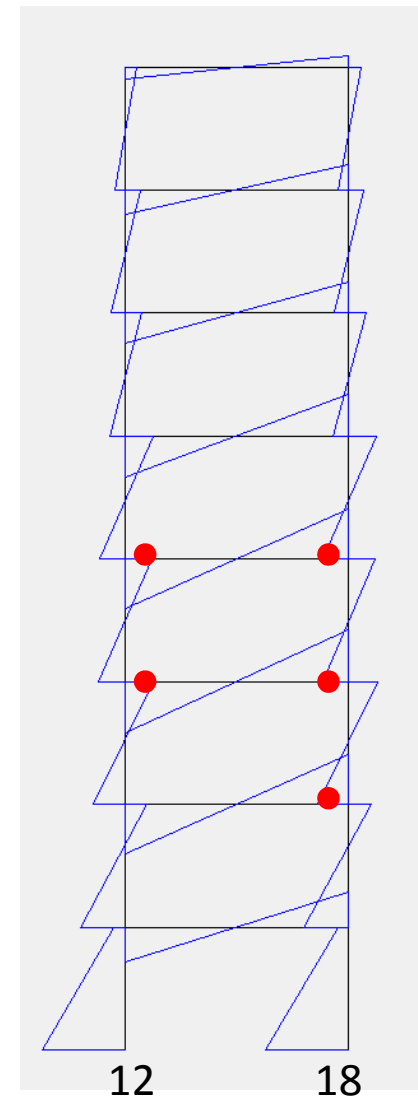
Procedimento da seguire

valori di $1/\rho$ inferiori a $0.1 q$

Telaio perimetrale



Telaio scala

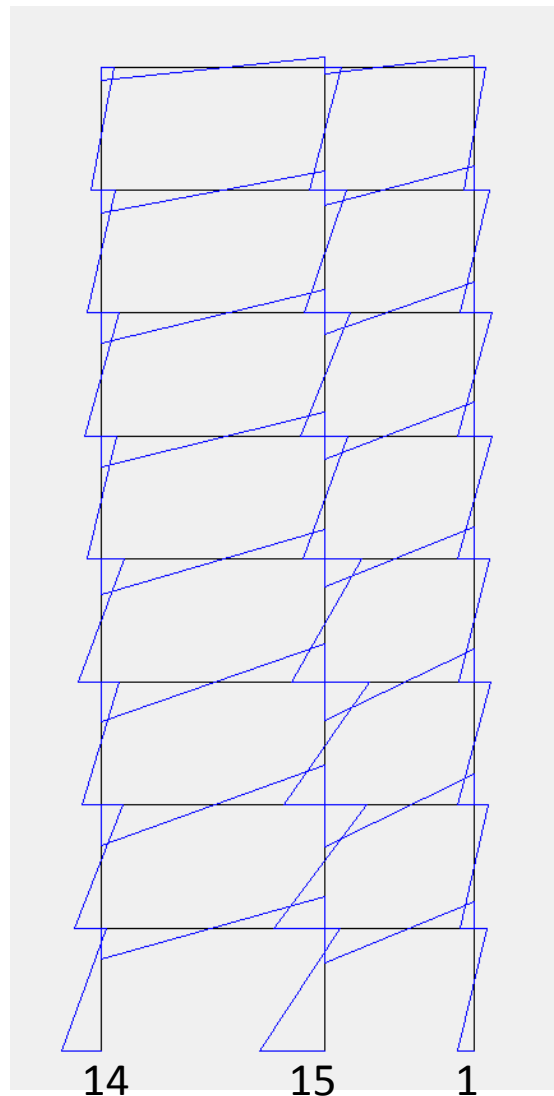


Numerose travi raggiungono presto il limite, perché poco armate

Procedimento da seguire

valori di $1/\rho$ inferiori a $0.2 q$

Telaio perimetrale

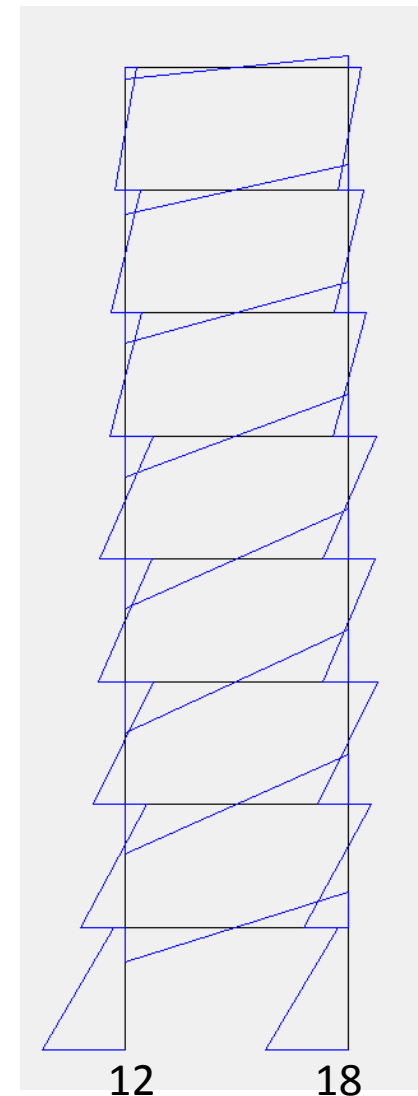


Numerose travi
ma anche
parecchi pilastri
raggiungono il
limite a flessione

I primi pilastri lo
raggiungono per
 $1/\rho = 0.13 q$

Il limite a taglio
non è raggiunto
prima di
 $1/\rho = 0.38 q$

Telaio scala



Quale conclusione?

Per la direzione y

- Il limite a taglio è raggiunto per $1/\rho = 0.38 q$
- Per il raggiungimento del limite a taglio considero un fattore di comportamento $q=1.5$
- La capacità della struttura nei confronti del taglio potrebbe essere $0.38 \times q = 0.51$ dell'azione sismica prevista
- Il limite a flessione nei pilastri è raggiunto per $1/\rho = 0.13 q$
- Per il raggiungimento del limite a flessione considero un fattore di comportamento $q=3$
- La capacità della struttura nei confronti della flessione potrebbe essere $0.13 \times q = 0.39$ dell'azione sismica prevista

Quale conclusione?

Complessivamente

- La direzione x è più resistente flessionalmente e potrebbe sopportare un'azione sismica maggiore.
Potrebbe però essere più vulnerabile a taglio
- La direzione y è meno resistente flessionalmente ma sembra avere minori problemi a taglio
- Nel complesso, la struttura potrebbe sopportare il 36% dell'azione sismica, cioè $a_g = 0.36 \times 0.261 = 0.094 \text{ g}$

Limiti del calcolo fatto

- Arbitrarietà nell'esclusione di alcune sezioni di pilastri:
 - È sicuramente giusto escludere alcune sezioni, che stanno male principalmente per M da carichi verticali e basso N
... ma a quali sezioni limitarsi?
- Arbitrarietà nel non preoccuparsi troppo della flessione nelle travi:
 - È bene che siano le travi a raggiungere il limite prima dei pilastri (purché se ne controlli la duttilità)
... ma è giusto escluderle del tutto?

Limiti del calcolo fatto

- Peso da dare al taglio e alle altre rotture fragili:
 - Il taglio è condizionante, ma il raggiungimento dei limiti a flessione può evitare il crescere del taglio
... la preoccupazione per il taglio può essere eccessiva?
- Arbitrarietà nella scelta del fattore di comportamento q :
 - I criteri seguiti ($q=1.5$ per il taglio, $q=3$ per flessione se molte travi raggiungono il limite di resistenza prima dei pilastri) sono plausibili
... ma quanta soggettività rimane nella valutazione?

Analisi lineare e analisi non lineare

- Il ragionamento fatto, con il calcolo dei valori $1/\rho$ prefigurano quello che si otterrà con l'analisi non lineare
 - Differenza importante (ma superabile):
nell'analisi non lineare si usano resistenze a flessione diverse, calcolate con i valori medi f_{cm} f_{ym} senza alcuna riduzione
- È importante (ed utile per una maturazione individuale) confrontare i valori (e la distribuzione dei valori) di $1/\rho$ dell'analisi lineare con le plasticizzazioni e rotture fragili dell'analisi non lineare

... ma nel comportamento non lineare diventa fondamentale la capacità deformativa plastica