VERIFICA DI EDIFICI ESISTENTI IN CEMENTO ARMATO

Catania, 25 giugno – 2 luglio 2019

07 – Analisi lineare, verifica di resistenza

Docente del corso

AURELIO GHERSI

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

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

Procedimenti semplificati

Analisi lineare

Procedimenti semplificati

Esistono vari suggerimenti per la valutazione delle caratteristiche di sollecitazione con procedimenti semplificati

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

Analisi lineare

Procedimenti semplificati

In cosa consistono?

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 di conseguenza le caratteristiche di sollecitazioni

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

Eurocodice 8 e NTC 2018

- Nell'Eurocodice 8, parte 3, è chiaramente definita una duplice possibilità per analisi lineare:
  - Analisi lineare con fattore di struttura
    che richiede una verifica in termini di resistenze, sia per elementi duttili che elementi fragili
  - Analisi lineare (con spettro elastico)
    che richiede una verifica in termini di deformazione plastica
    (oltre al controllo di resistenza per gli elementi fragili)

Eurocodice 8

		Modello Lineare (LM)		Modello non lineare		Approccio con il fattore q	
		Domanda	Capacità	Domanda	Capacità	Domanda	Capacità
Tipo di elemento o meccanismo 8e/m)	Duttile	Accettabilità del modello lineare (per la verifica dei valori $\rho_i = D_i/C_i$):		Dall'analisi. Si usano i valori medi delle proprietà nel modello.	In termini di deformazione. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF.	Dall'analisi.	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.
		Dall'analisi. Si usano i valori medi delle proprietà nel modello.	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà.				
		Ispezioni (se LM è accettato):					
		Dall'analisi.	In termini di deformazione. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF.				
	Fragile	Verifiche (se LM è accettato):			In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.	In conformità alla sezione pertinente della EN 1998-1:2004.	
		Se $\rho_i \leq 1$: dall'analisi.					
		Se $\rho_i > 1$: dall'equilibrio con la resistenza di e/m duttili. Si usano i valori medi delle proprietà moltiplicati per CF.	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.				

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 (come effetto del solo sisma) variano linearmente in proporzione con il valore di a_g
  - E quindi anche in proporzione al valore di q
- A questi va sommato l'effetto dei carichi verticali in condizioni sismiche ($g_k + \psi_2 q_k$) che sono assegnati indipendentemente dal valore di a_g
- Si può calcolare con semplici proporzioni quello che succede per un qualunque valore di a_g e di q

Analisi lineare

In che modo procedere?

Analisi lineare con fattore di comportamento q

- È l'analisi standard per il progetto di nuove costruzioni
  - Richiede verifica di resistenza delle sezioni

  Problema:

  - Quale fattore di comportamento usare se non sono rispettate le prescrizioni che garantiscono un comportamento duttile?

  La normativa suggerisce valori di q compresi tra 1.5 e 3, maggiori solo se ben motivati

  - Dobbiamo definire criteri chiari per scegliere il valore di q

Analisi lineare

In che modo procedere?

Analisi lineare con fattore di comportamento q

- È l'analisi standard per il progetto di nuove costruzioni
  - Richiede verifica di resistenza delle sezioni

  Valore di q suggerito (in linea di massima):
  - q=1.5 per le verifiche fragili (taglio, ecc.)
  - q=1.5 per le verifiche a pressoflessione dei pilastri se le travi sono chiaramente più resistenti dei pilastri
  - q=3 per le verifiche a flessione delle travi e a pressoflessione dei pilastri se le travi sono chiaramente meno resistenti dei pilastri
  - q>3 nel caso di edifici che sono stati ben progettati per il sisma (in particolare con gerarchia delle resistenze)

Analisi lineare

In che modo procedere?

Analisi lineare con fattore di comportamento q

- È l'analisi standard per il progetto di nuove costruzioni
  - Richiede verifica di resistenza delle sezioni

Valore di q suggerito (in linea di massima):

- q=1.5
- q=1.5 e travi sono chiara
- q=3 pe ssione dei pilastr i pilastri
- q>3 ne il sisma (in partic

Non sempre è facile capire a priori se il problema principale è il taglio oppure la flessione e se le travi sono più o meno resistenti dei pilastri
Sarebbe opportuno decidere il valore di q a posteriori (dopo il calcolo)

Analisi lineare

In che modo procedere?

Può essere utile:

- Individuare per ciascuna sezione il valore di a_g (meglio: l'aliquota dell'accelerazione a_g di picco al suolo su roccia prevista nel sito) che porta al raggiungimento del limite di resistenza – indipendentemente dal valore di q

Esempio - Indicando con

M_q il momento flettente prodotto dai carichi verticali

M_s il momento flettente prodotto dal sisma (con tutte le combinazioni di carico) per q=1

ρ Il rapporto domanda/capacità
(o meglio il rapporto tra il sisma previsto nel sito e quello che porta al raggiungimento della resistenza della sezione)

Si ha $$M_{Ed} = M_q + \frac{1}{\rho} M_s = M_{Rd} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{\rho} = \frac{M_{Rd} - M_q}{M_s}$$

Analisi lineare

In che modo procedere?

Può essere utile:

- Individuare per ciascuna sezione il valore di a_g (meglio: l'aliquota dell'accelerazione a_g di picco al suolo su roccia prevista nel sito) che porta al raggiungimento del limite di resistenza – indipendentemente dal valore di q

- Determinata per ogni sezione l'aliquota $1/\rho$ di sisma che porta al raggiungimento del limite di resistenza, si può decidere quale valore di q utilizzare e si può immediatamente sapere:
  - Se la struttura con quel valore di q sta bene

  oppure:
  - Quale aliquota di sisma può sopportare la struttura in funzione el valore di q scelto

Analisi lineare

Procedimento suggerito

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

Analisi lineare

Procedimento suggerito

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

Analisi lineare

Procedimento suggerito

Piccoli (?) problemi operativi:

- Il mio suggerimento è di calcolare i valori di $1/\rho$
  - Sarebbe perfetto avere un programma al quale descrivere anche l'armatura e le caratteristiche dei materiali, che possa fare automaticamente questo calcolo
  - In mancanza di questo è molto utile che il programma esporti i risultati, separatamente per soli carichi verticali in presenza di sisma e per l'inviluppo del sisma, in fogli di calcolo, in cui si può aggiungere il calcolo automatico dei valori di $1/\rho$

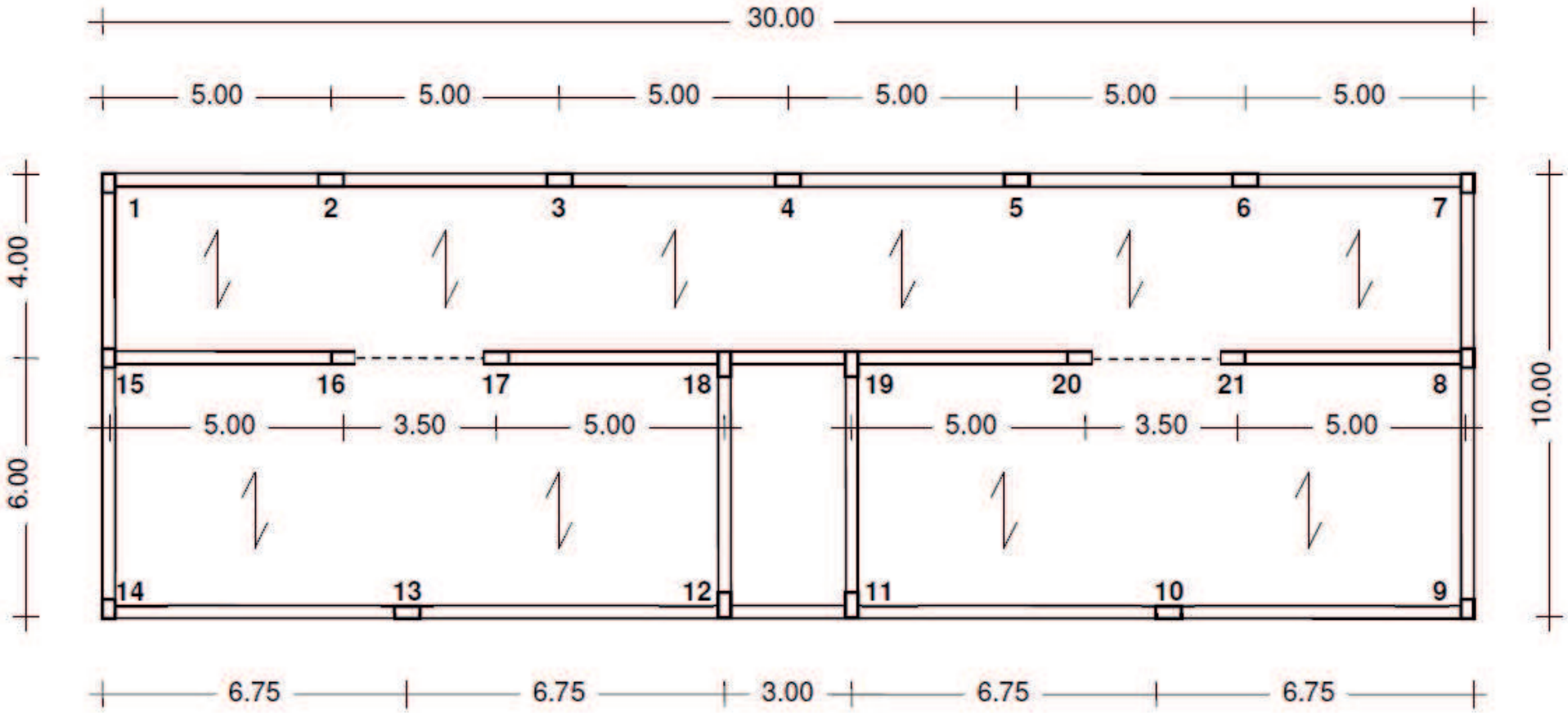
Esame risultati e verifiche

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'inviluppo 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)

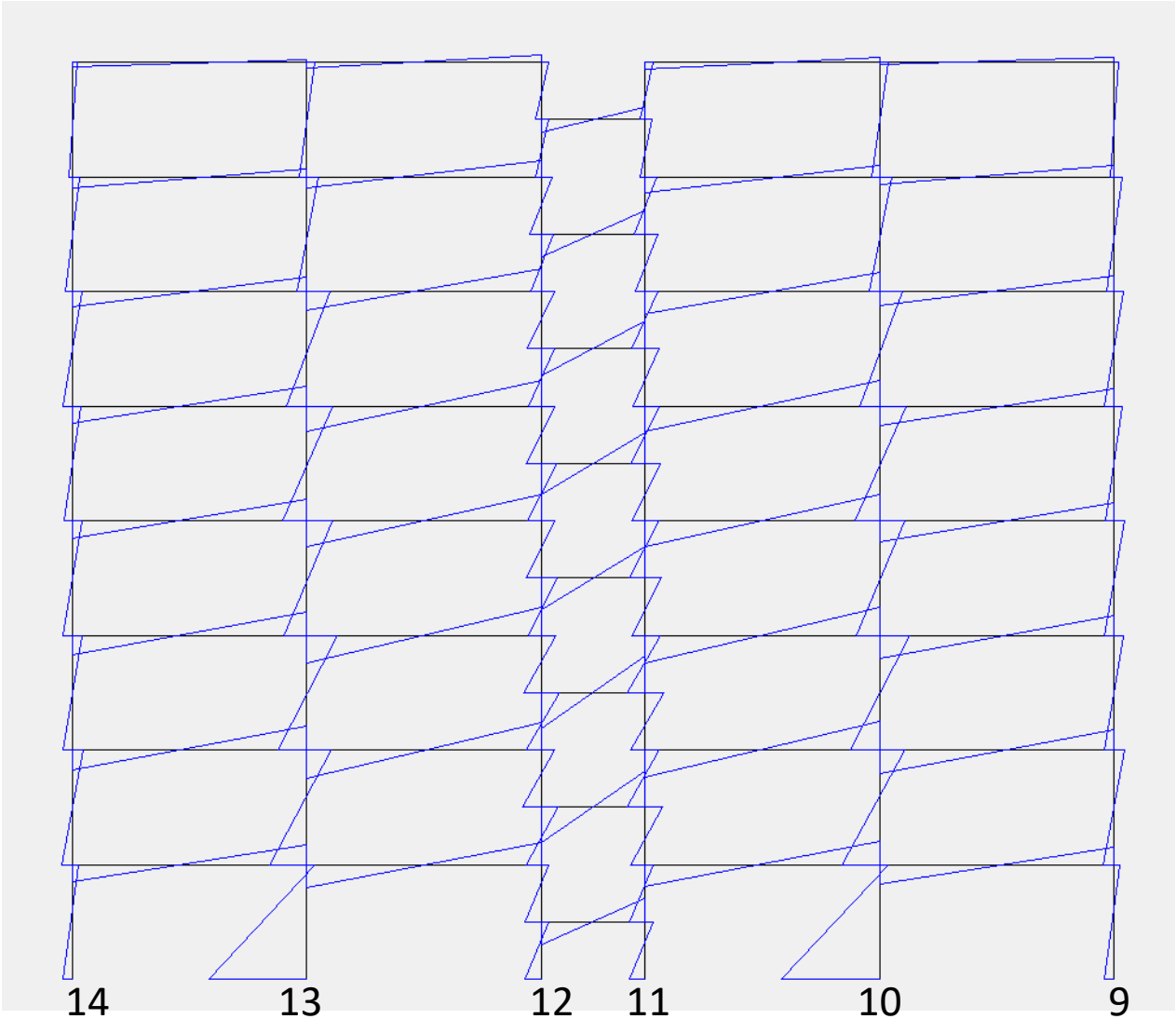
Edificio esistente da esaminare



Carpenteria del piano tipo

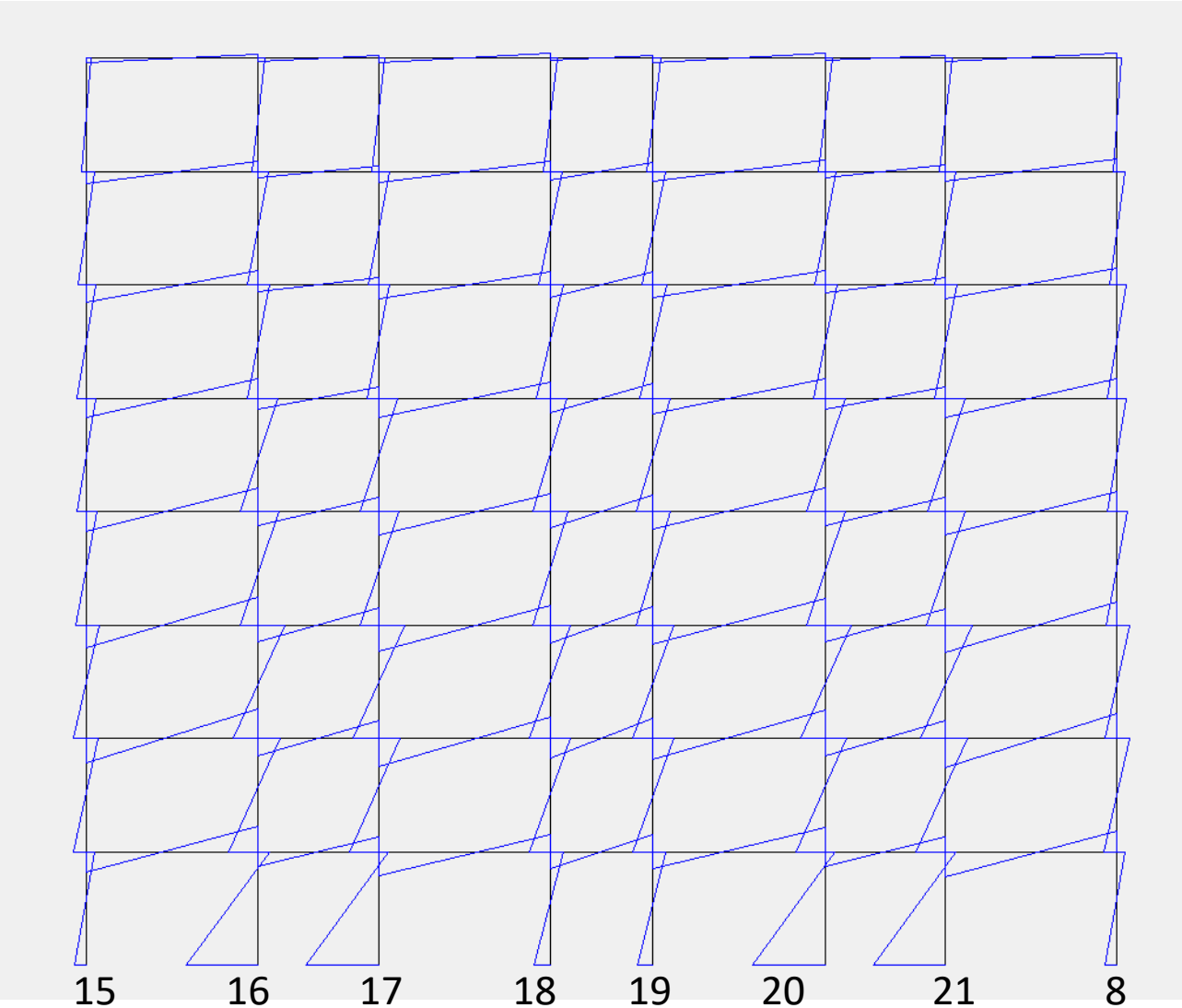
Analisi modale

- Telaio 1 x (in basso in pianta)



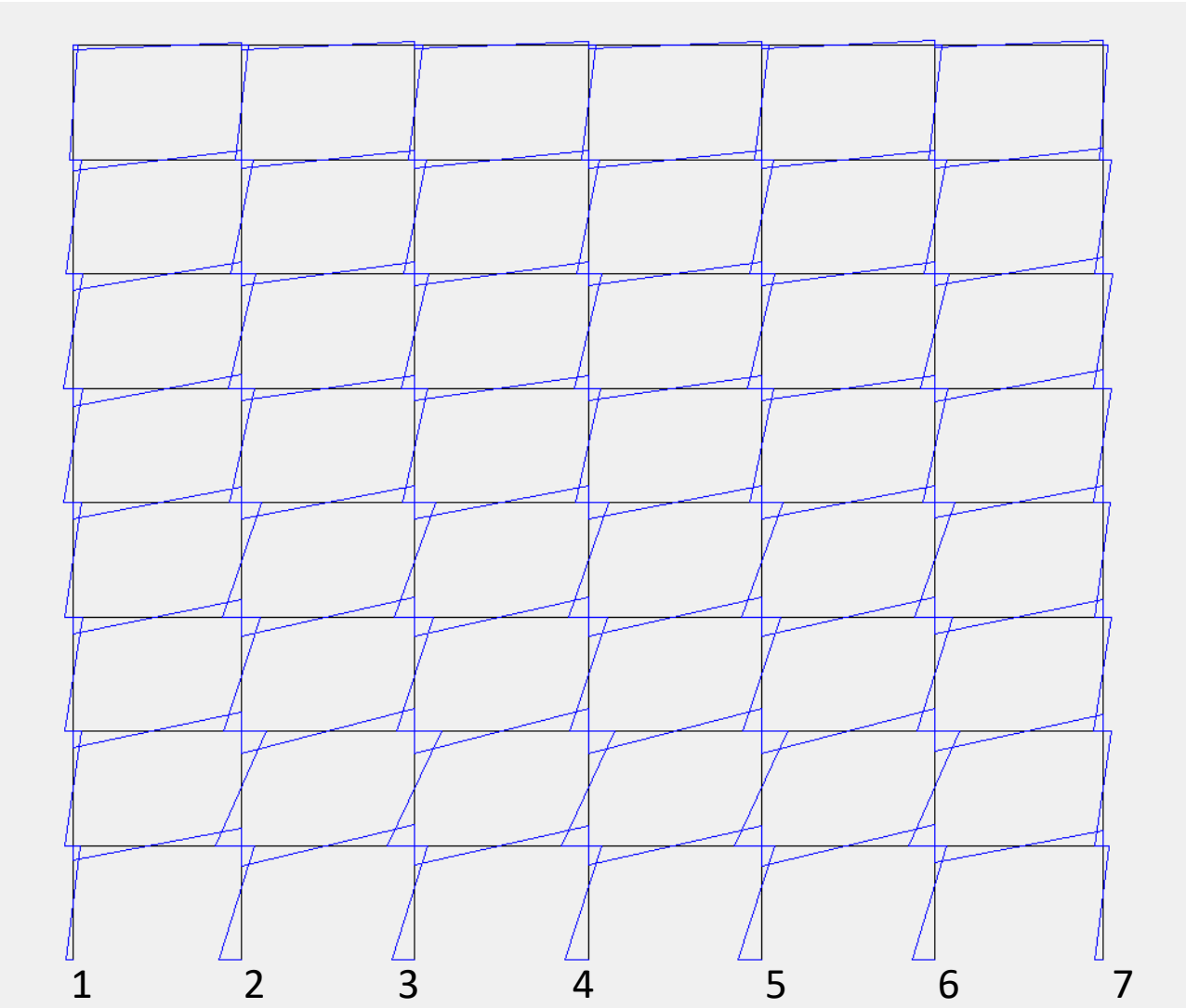
Analisi modale

- 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

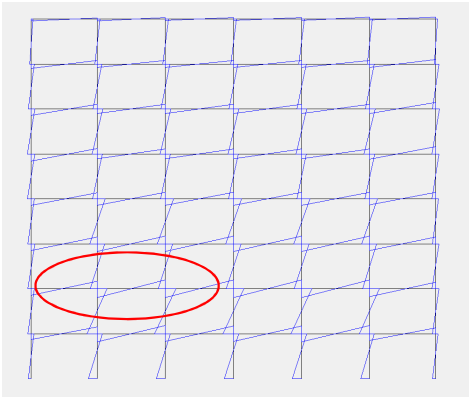
$$\frac{1}{\rho}\frac{M_{Ed,s}}{q} + M_{Ed,q} = M_{Rd}$$

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

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

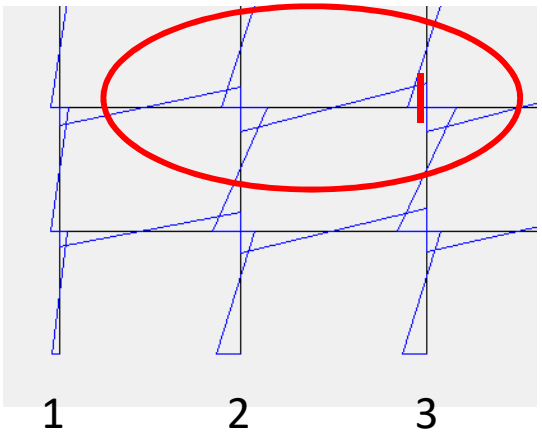
Procedimento da seguire

esempio



- Trave 2-3, 2° impalcato
  - Estremo destro – sisma positivo

- Carichi verticali
  - $M_{Ed,q}$ = -41.90 kNm $V_{Ed,q}$ = -50.40 kN
- Sisma (con q=1)
  - $M_{Ed,s}$ = -376.64 kNm $V_{Ed,s}$ = -151.80 kN



- Valori resistenti
  - M_{Rd} = -102.50 kNm V_{Rd} = -96.10 kN

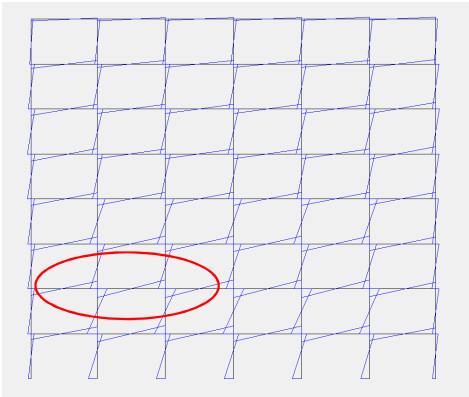
calcolati con

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

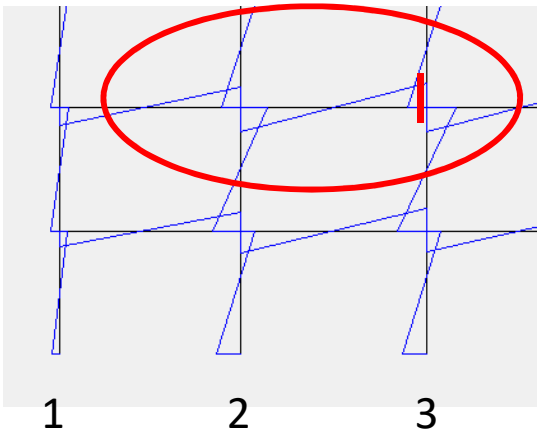
Procedimento da seguire

esempio

- Trave 2-3, 2° impalcato
  - Estremo destro – sisma positivo



- Carichi verticali
  - $M_{Ed,q}$ = -41.90 kNm $V_{Ed,q}$ = -50.40 kN
- Sisma (con q=1)
  - $M_{Ed,s}$ = -376.64 kNm $V_{Ed,s}$ = -151.80 kN
- Valori resistenti
  - M_{Rd} = -102.50 kNm V_{Rd} = -96.10 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

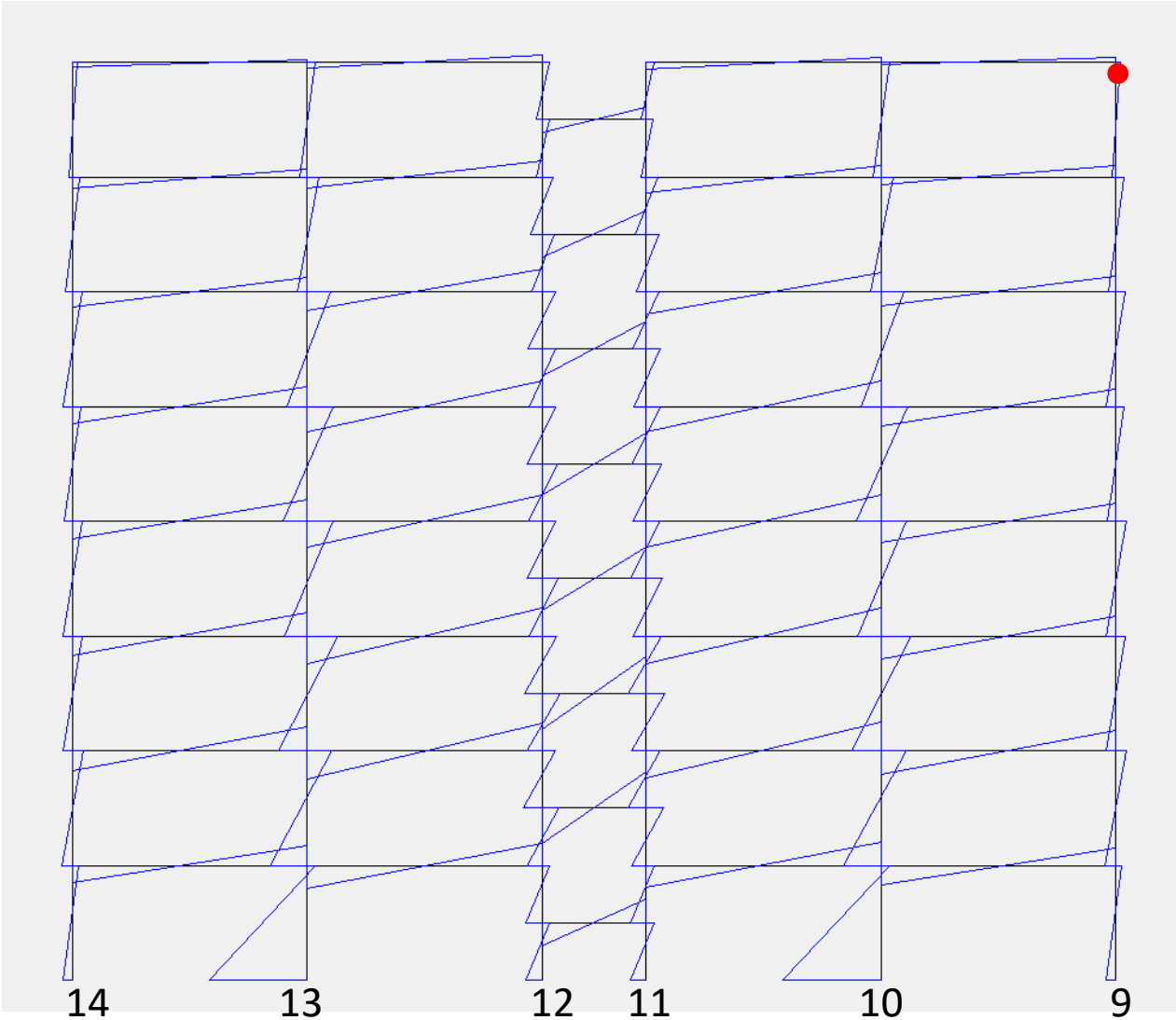
- Il valore più piccolo di $1/\rho$ indica la prima sezione a raggiungere il limite
  - Si devono scartare le sezioni non rilevanti

- 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

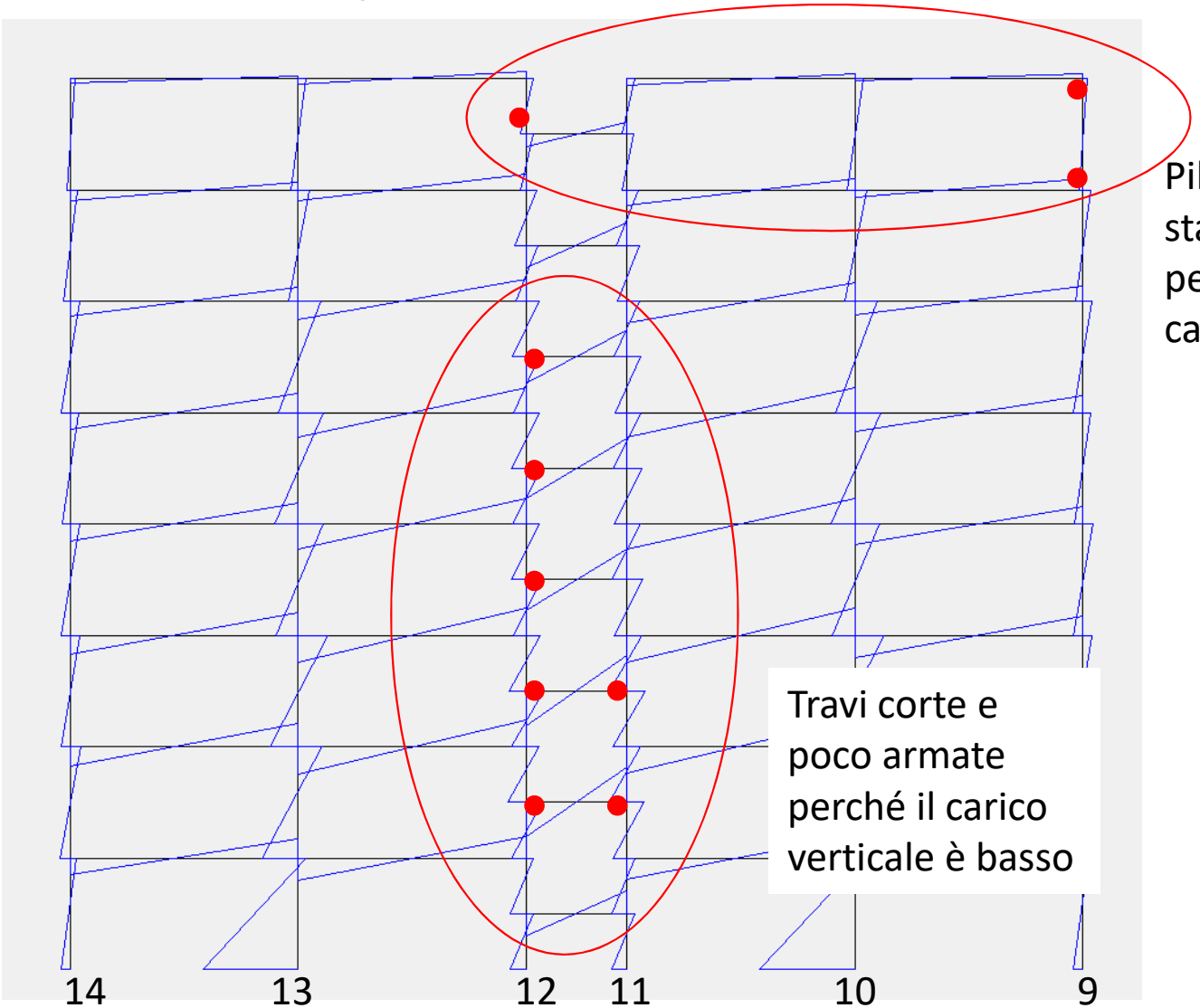
$$\frac{1}{\rho} = 0.028\, q$$

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

Procedimento da seguire

valori di 1/ρ inferiori a 0.1 q

- Telaio 1 x (in basso in pianta)



Pilastri, che stanno male già per effetto di carichi verticali

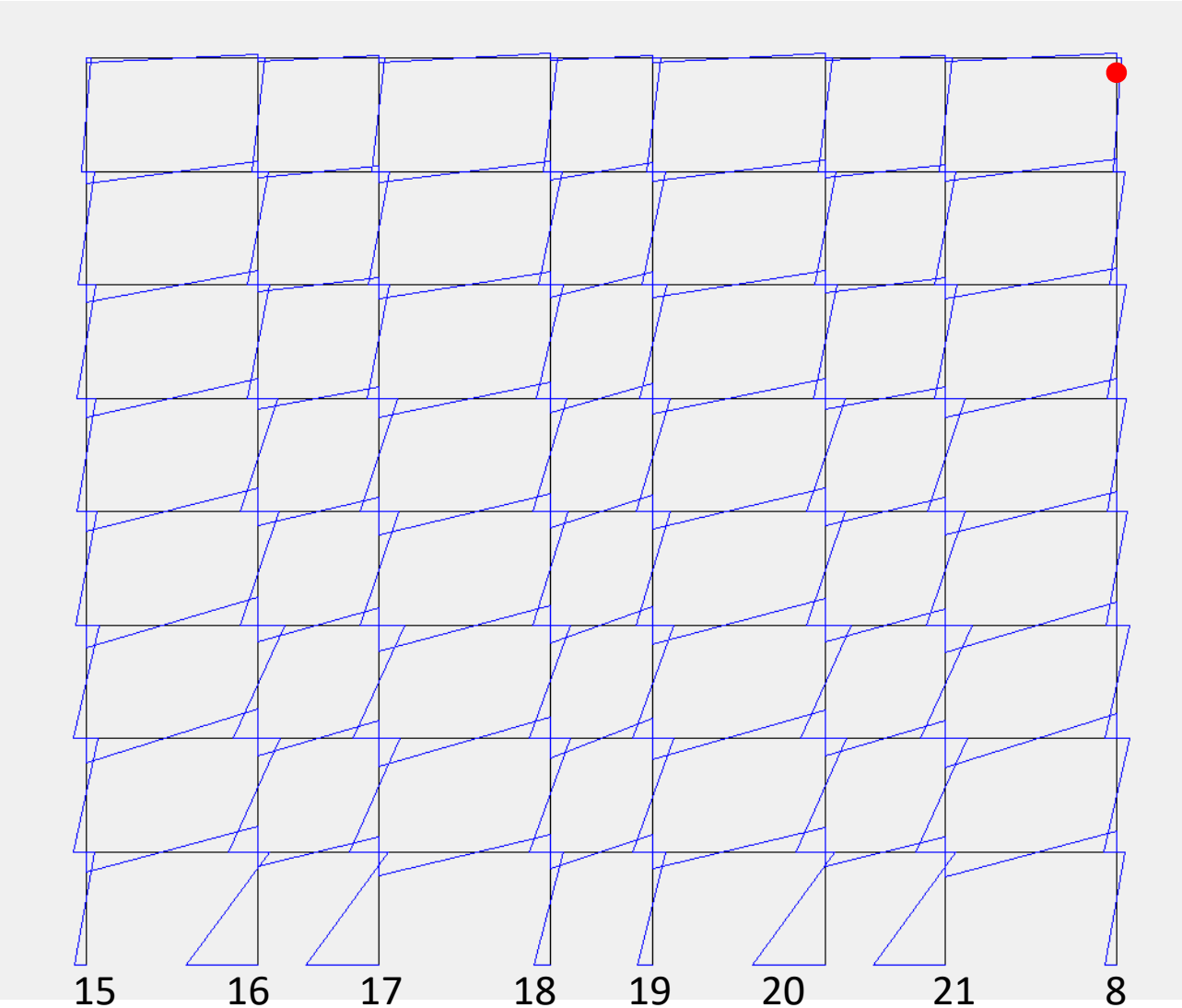
Travi corte e poco armate perché il carico verticale è basso

Nessun problema col taglio

Procedimento da seguire

valori di 1/ρ inferiori a 0.1 q

- Telaio 2 x (di spina)

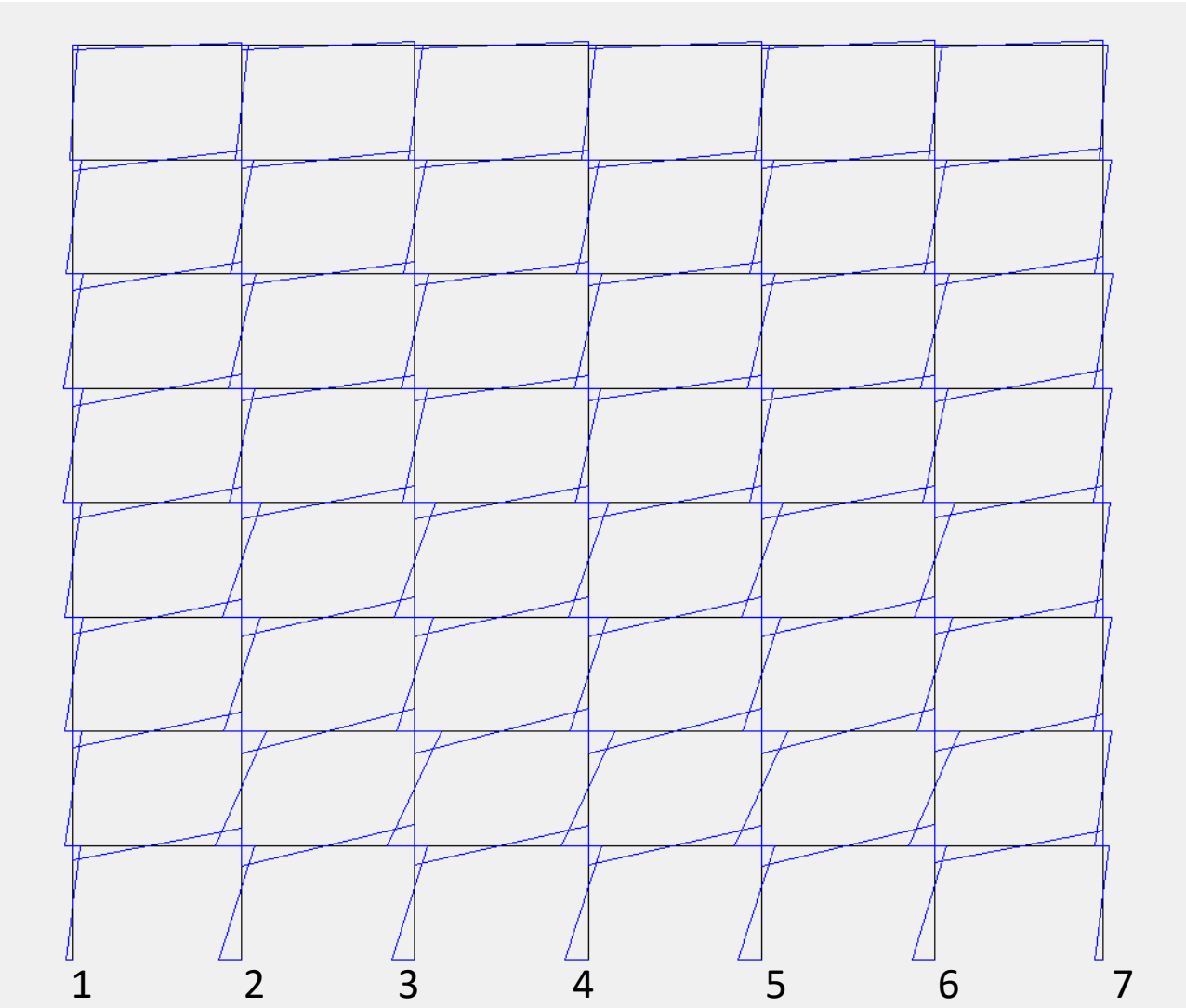


Solo un pilastro, male già per effetto di carichi verticali

Procedimento da seguire

valori di 1/ρ inferiori a 0.1 q

- Telaio 3 x (in alto in pianta)



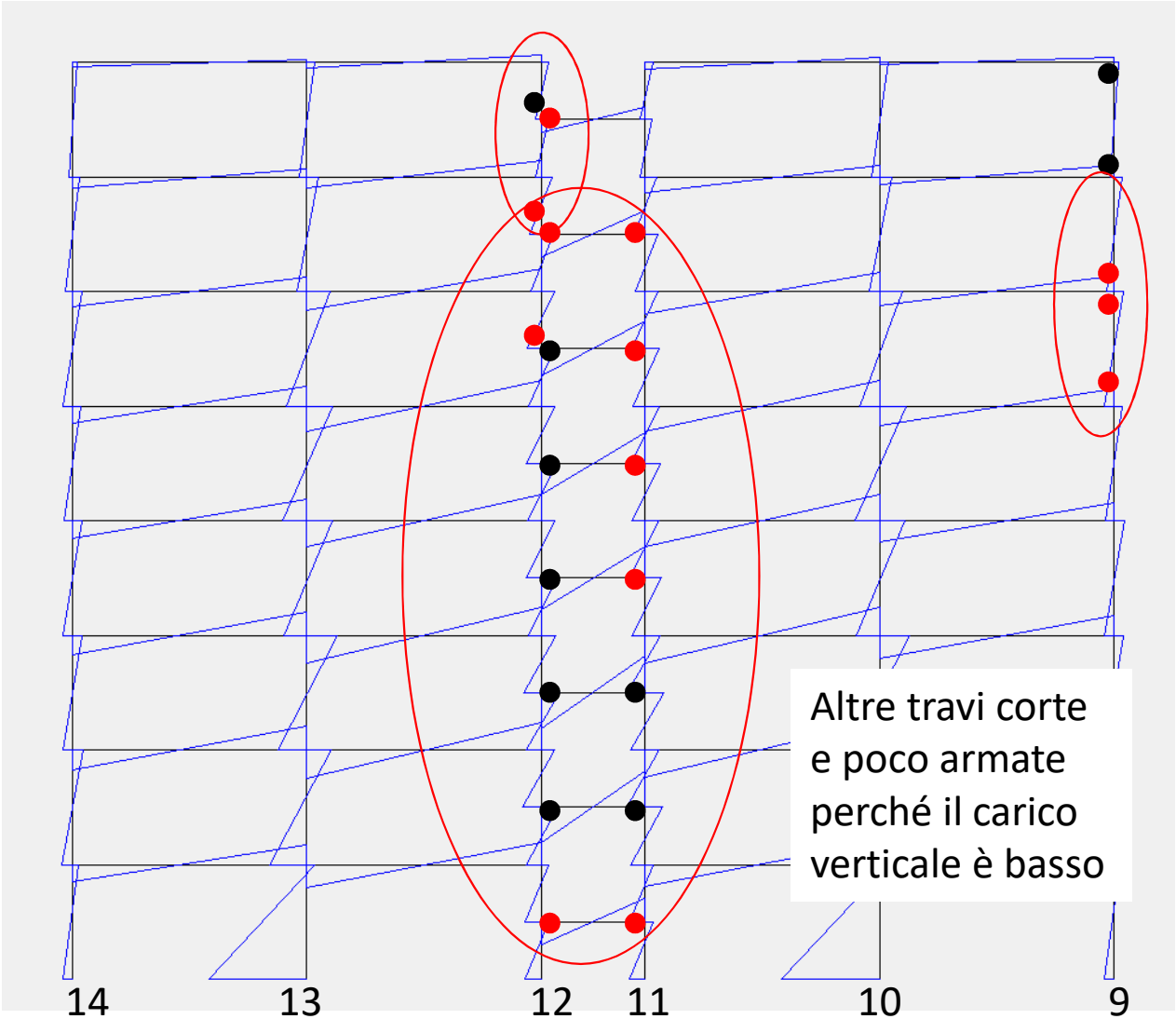
Nessuna sezione

Procedimento da seguire

valori di 1/ρ inferiori a 0.2 q

- Telaio 1 x (in basso in pianta)

- < 0.1 q
- 0.1÷0.2 q



Ulteriori pilastri, con N basso o corti

Altre travi corte e poco armate perché il carico verticale è basso

Ancora nessun problema col taglio

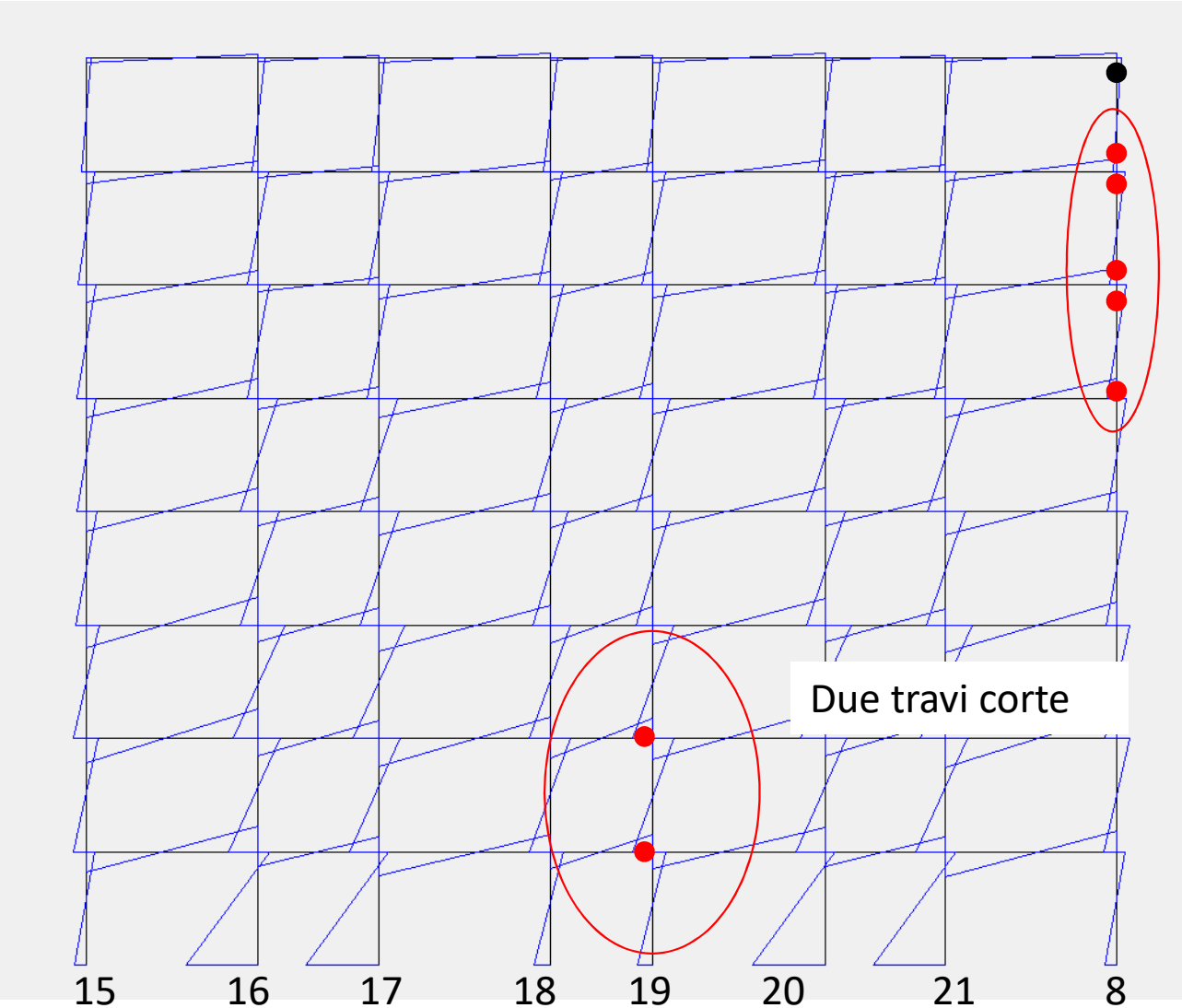
Procedimento da seguire

valori di 1/ρ inferiori a 0.2 q

- Telaio 2 x (di spina)

● < 0.1 q

● 0.1÷0.2 q

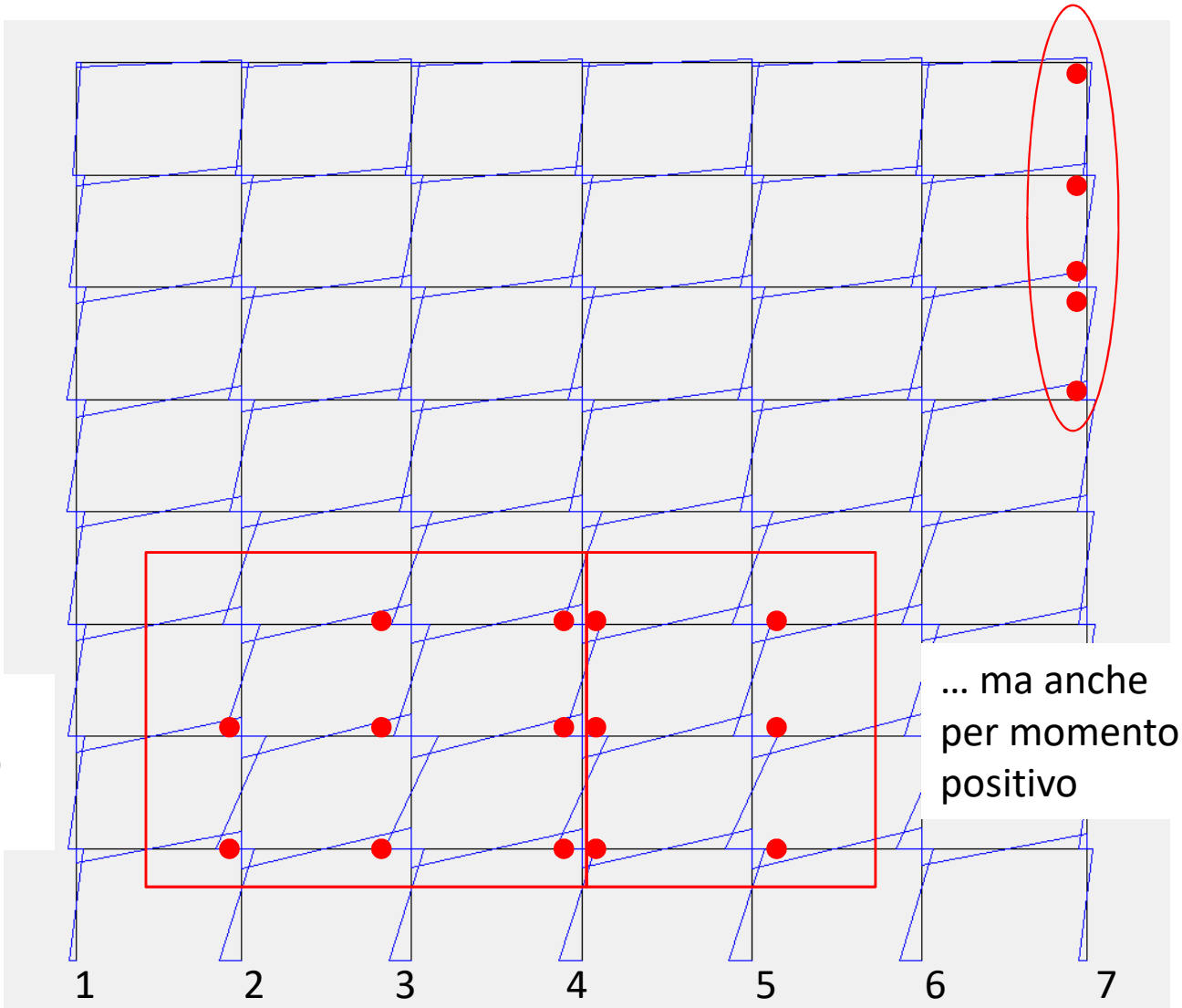


Procedimento da seguire

valori di 1/ρ inferiori a 0.2 q

- Telaio 3 x (in alto in pianta)

- < 0.1 q
- 0.1÷0.2 q



Pilastri, con N basso

Travi per momento negativo

… ma anche per momento positivo

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 (∅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

Nota: il massimo taglio che si può avere in un pilastro è $\frac{2\,M_{Rd}}{L}$

con M_{Rd} calcolato con resistenze maggiorate

È possibile controllare se certe sezioni non possono mai raggiungere il limite perché V_{Rd} è maggiore di questo valore

Quale conclusione?

Per la direzione x - flessione

- Parecchie travi raggiungono presto i limiti 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

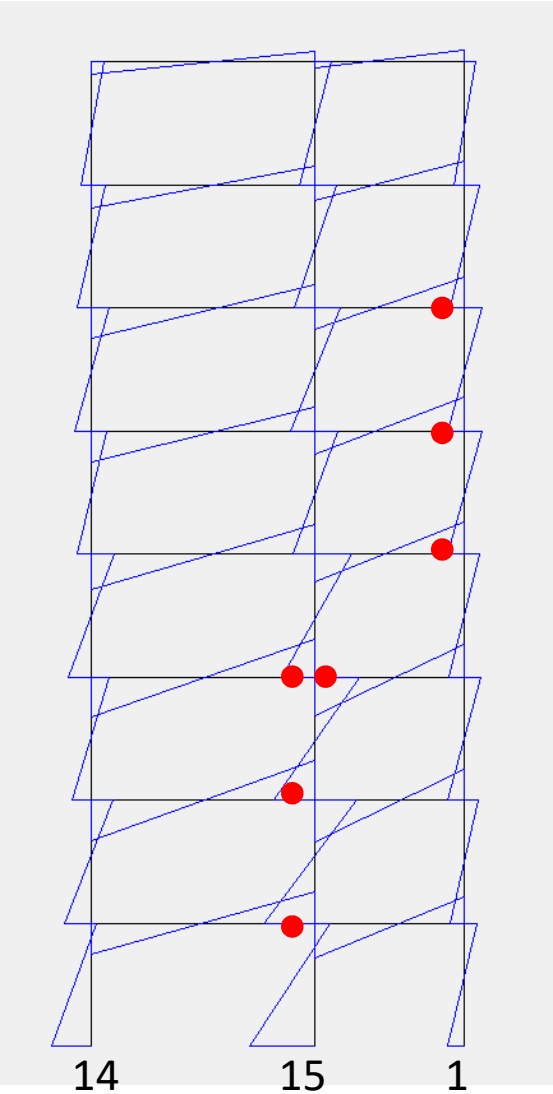
Esame risultati e verifiche

Per SLV – sisma y

Procedimento da seguire

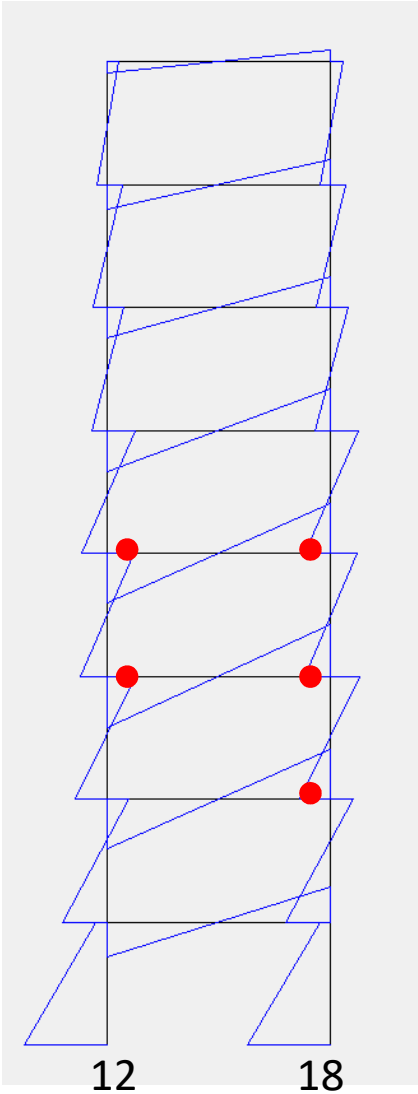
valori di 1/ρ inferiori a 0.1 q

Telaio perimetrale



Numerose travi raggiungono presto il limite, perché poco armate

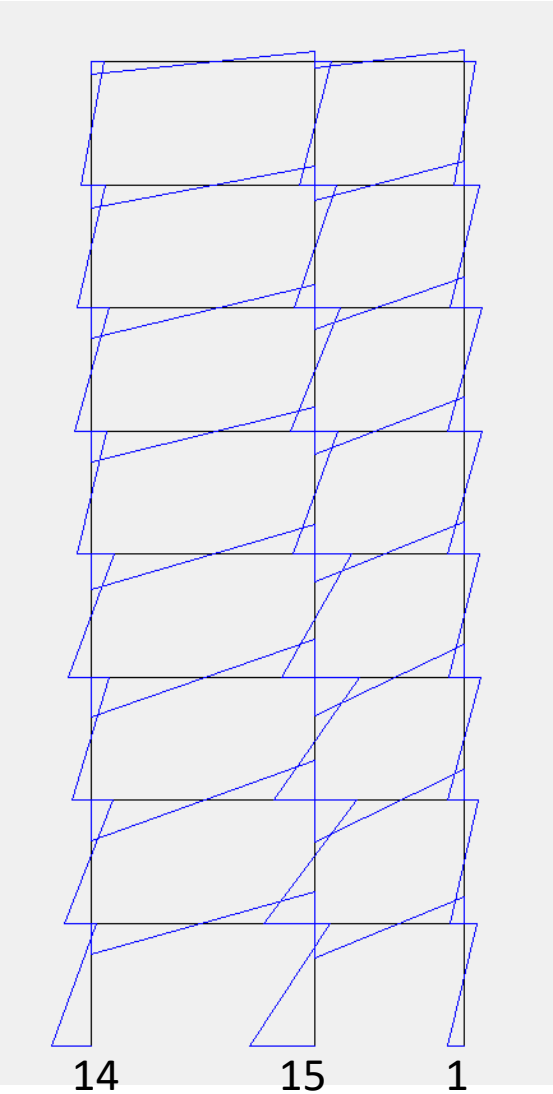
Telaio scala



Procedimento da seguire

valori di 1/ρ inferiori a 0.2 q

Telaio perimetrale

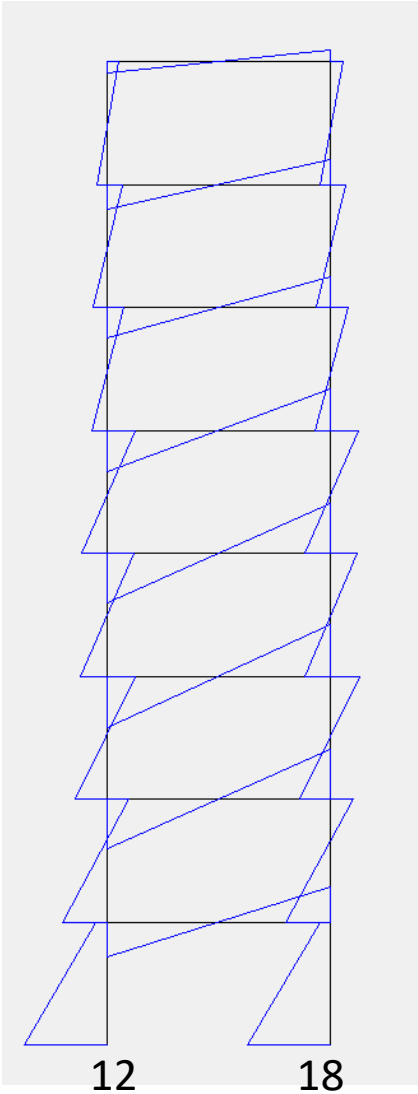


Numerose travi ma anche parecchi pilastri raggiungono il limite a flessione

I primi pilastri lo raggiungono per 1/ρ = 0.13 q

Il limite a taglio non è raggiunto prima di 1/ρ = 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 $a_g = 0.36 \times 0.261 = 0.094$ 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 otterrò 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