

Meditazioni strutturali al tempo del Coronavirus

Incontri promossi da Dario Flaccovio editore
con la collaborazione di Aurelio Gherzi e APICE s.r.l.

03 – Analisi lineare e analisi non lineare: un confronto

16 aprile 2020

Aurelio Gherzi

Questa presentazione è stata preparata da me come stimolo alla riflessione e alla discussione su temi che riguardano la progettazione strutturale di nuove costruzioni e la verifica di costruzioni esistenti in zona sismica.

La responsabilità delle opinioni in essa contenute è esclusivamente mia.

Il pdf della presentazione e la videoregistrazione della esposizione di questi temi da me tenuta sono messe liberamente a disposizione di tutti e possono essere diffuse senza lucro, purché io ne venga citato come autore.

Aurelio Gherzi

Introduzione

Analisi lineare e analisi non lineare

Tipi di analisi

per progetto e verifica di strutture in condizioni sismiche

- Progetto di una nuova costruzione antisismica
 - Il procedimento standard è l'**analisi lineare** con fattore di comportamento q
- Verifica sismica di una costruzione esistente
 - È possibile usare l'**analisi lineare**
 - Col tempo si è diffuso sempre di più l'uso di **analisi non lineare**

Lineare o non lineare?

Vantaggi e limiti nell'uso dei due tipi di analisi

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 comportamento q

Progetto di strutture antisismiche

con analisi lineare e fattore di comportamento 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 comportamento 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 comportamento q

- Venendo a mancare i requisiti:
 - L'analisi lineare è poco significativa
 - Qualunque valore del fattore di comportamento 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 per edifici esistenti

Cosa e come fare?

Eurocodice 8

- Nell'Eurocodice 8, parte 3, è chiaramente definita una duplice possibilità per analisi lineare:
 - Analisi lineare con fattore di comportamento q 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

Analisi lineare con fattore q

		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): Se $\rho_i \leq 1$: dall'analisi.			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 $\rho_i > 1$: 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.				

Eurocodice 8 e NTC

- Nell'Eurocodice 8, parte 3, è chiaramente definita una duplice possibilità per analisi lineare:
 - Analisi lineare con fattore di comportamento q 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)
 - L'analisi lineare con fattore di comportamento q è chiaramente richiamata nelle NTC (sia 2018 che 2008) e nelle relative circolari

Eurocodice 8

- Nell'Eurocodice 8, parte 3, è chiaramente definita una duplice possibilità per analisi lineare:
 - Analisi lineare con fattore di comportamento q 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

Analisi lineare (con spettro elastico)

		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. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF.				
	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.				

Eurocodice 8

- Nell'Eurocodice 8, parte 3, è chiaramente definita una duplice possibilità per analisi lineare:
 - Analisi lineare con fattore di comportamento q 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)
- L'analisi lineare con spettro elastico era chiaramente richiamata nella circolare 2009
- Nella circolare 2019 esistente un riferimento a tale analisi, ma è privo di senso e non sembra proprio riferirsi al tipo di analisi citato nell'Eurocodice 8

Eurocodice 8

- Nell'Eurocodice 8, parte 3, è chiaramente definita una duplice possibilità per analisi lineare:
 - Analisi lineare con fattore di comportamento q 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)
- Entrambi i metodi consentono di valutare quale aliquota dell'azione sismica prevista può sopportare la struttura in esame

Eurocodice 8

- Nell'Eurocodice 8, parte 3, è chiaramente definita una duplice possibilità per analisi lineare:
 - Analisi lineare con fattore di comportamento q 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)
- Mi permetto di aggiungere:
 - L'analisi lineare è un ottimo strumento per prefigurare il comportamento non lineare della struttura

Analisi lineare

In cosa consiste?

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 (accelerazione di picco su roccia)
 - E variano linearmente 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 e di q
- Si può calcolare con semplici proporzioni quello che succede per un qualunque valore di a_g e di q

Analisi lineare con fattore di comportamento q

In che modo procedere?

L'analisi prevede:

- Determinazione delle caratteristiche di sollecitazione (con azioni ridotte mediante q)
- Verifica di resistenza delle sezioni

Problema nell'applicazione ad edifici esistenti:

- 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
 - È necessario definire criteri chiari per scegliere il valore di q

Analisi lineare con fattore di comportamento q

In che modo procedere?

Problema nell'applicazione ad edifici esistenti:

- La normativa suggerisce “valori di q compresi tra 1.5 e 3, maggiori solo se ben motivati” (ma non dice altro)
- Io suggerisco (in linea di massima):
 - $q=1.5$ quando sono condizionanti le verifiche fragili (taglio, ecc.)
 - $q=1.5$ quando sono soddisfatte le verifiche fragili, se le travi sono chiaramente più resistenti dei pilastri
 - $q=3$ quando sono soddisfatte le verifiche fragili, 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 con fattore di comportamento q

In che modo procedere?

Problema nell'applicazione ad edifici esistenti:

- La normativa suggerisce “valori di q compresi tra 1.5 e 3, maggiori solo se ben motivati” (ma non dice altro)
- Lo suggerisce la normativa, ma non è chiaro:
 - $q=1.5$ (se il problema principale è il taglio oppure la flessione e se le travi sono più o meno resistenti dei pilastri)
 - $q=1.5$ (se il problema principale è il taglio oppure la flessione e se le travi sono più o meno resistenti dei pilastri)
 - $q=3$ (se il problema principale è il taglio oppure la flessione e se le travi sono più o meno resistenti dei pilastri)
 - $q>3$ (se il problema principale è il taglio oppure la flessione e se le travi sono più o meno resistenti dei pilastri)

Analisi lineare (con spettro elastico)

In che modo procedere?

L'analisi prevede:

- Determinazione di caratteristiche di sollecitazione e spostamenti con spettro elastico (cioè con $q=1$)
- Verifica di resistenza delle sezioni solo per rotture fragili (taglio, ecc.)
- Verifica degli spostamenti relativi di interpiano (*drift*)

Sono aggiunti:

- Limiti di applicabilità di questo tipo di analisi, basati sul controllo dei ρ (rapporto tra domanda e capacità in termini di resistenza)

Analisi lineare (con spettro elastico)

In che modo procedere?

- Verifica di resistenza delle sezioni per rotture fragili (taglio, ecc.) – in particolare per i pilastri
 - È necessaria perché si ritiene che il raggiungimento di una rottura a taglio impedisca alla struttura di sopportare azioni maggiori
 - In realtà si sa che la struttura potrebbe andare oltre e che il controllo dovrebbe essere fatto in termini di spostamento relativo (drift), ma non esistono indicazioni operative su questo

Nota: effettuare questa verifica con $q=1$ mi sembra eccessivamente gravoso; ritengo che un valore $q=1.5$ sia più plausibile

Analisi lineare (con spettro elastico)

In che modo procedere?

- Verifica degli spostamenti di interpiano (drift)
 - Nelle analisi non lineari, quando non avvengono rotture fragili, il controllo deve essere fatto in termini di deformazioni plastiche
 - In molti studi e in normative stranieri si usa come termine di controllo delle deformazioni plastiche dei pilastri lo spostamento d'interpiano
 - È un modo grossolano, ma semplice e quindi efficace
 - La normativa italiana impone un controllo della “rotazione alla corda”, ma in molte situazioni questo può essere ricondotto ad un controllo dello spostamento d'interpiano

Analisi lineare (con spettro elastico)

In che modo procedere?

- Verifica degli spostamenti di interpiano (drift):
dalla rotazione alla corda θ al drift δ_r
 - Ipotizziamo che il punto di flesso del momento flettente nei pilastri sia a metà pilastro
 - Plausibile per travi rigide e resistenti, che portano alla plasticizzazione degli estremi del pilastro
 - Meno vero per travi deformabili e meno resistenti, che si plasticizzano prima dei pilastri
 - Ipotizziamo che la rotazione dei nodi sia trascurabile rispetto alla rotazione alla corda
 - Plausibile quando si plasticizzano abbastanza presto entrambi gli estremi di tutti i pilastri, con meccanismo di piano

Analisi lineare (con spettro elastico)

In che modo procedere?

- Verifica degli spostamenti di interpiano (drift):
dalla rotazione alla corda θ al drift δ_r
 - Ipotizziamo che il punto di flesso del momento flettente nei pilastri sia a metà pilastro
 - Ipotizziamo che la rotazione dei nodi sia trascurabile rispetto alla rotazione alla corda



- In questo modo si può ragionare in termini di spostamento relativo δ_r tra gli impalcati (drift) perché $\delta_r = \theta h$

Questo modo di procedere:

- È in genere cautelativo (ma può esserlo troppo)
- È molto semplice per i pilastri
- Non lo si può fare per le travi (che però in genere non danno problemi)

Analisi lineare (con spettro elastico)

In che modo procedere?

- Verifica degli spostamenti di interpiano (drift)
 - Ma cosa c'entra una analisi lineare con il controllo in termini di deformazioni plastiche?
 - Un principio posto alla base dell'uso di analisi lineari in situazioni in cui il comportamento è non lineare è quello di “uguaglianza degli spostamenti” (Newmark, anni '60 del XX secolo)
 - Il principio è in realtà riferito a schemi a un grado di libertà; può quindi essere usato per schemi che passano rapidamente da elastico a plastico
 - Questa è la motivazione del controllo dei p imposto come condizione di applicabilità: se i p delle diverse sezioni fossero non molto diversi l'uno dall'altro la plasticizzazione sarebbe (quasi) contemporanea

Analisi lineare

suggerimenti operativi

- Qualunque sia il tipo di analisi che si vuole effettuare si può:
 - Effettuare un'analisi lineare per il valore di a_g , con $q=1$
 - Sfruttando la linearità, individuare per ciascuna sezione l'aliquota $1/\rho$ di a_g (accelerazione di picco al suolo su roccia prevista nel sito) che porta al raggiungimento del limite di resistenza, indipendentemente dal valore di q

Indicando ad esempio 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 tra il sisma previsto nel sito e quello che porta al raggiungimento della resistenza della sezione

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

Analisi lineare

suggerimenti operativi

- Qualunque sia il tipo di analisi che si vuole effettuare si può:
 - Effettuare un'analisi lineare per il valore di a_g , con $q=1$
 - Sfruttando la linearità, individuare per ciascuna sezione l'aliquota $1/p$ di a_g (accelerazione di picco al suolo su roccia prevista nel sito) che porta al raggiungimento del limite di resistenza, indipendentemente dal valore di q
- Se si vuol fare un'analisi lineare con fattore q :
 - Determinata per ogni sezione l'aliquota $1/p$ di sisma che porta al raggiungimento del limite di resistenza, si può decidere quale valore di q utilizzare
 - Si può quindi valutare quale aliquota di sisma può sopportare la struttura, in funzione del valore di q scelto

Analisi lineare

suggerimenti operativi

- Qualunque sia il tipo di analisi che si vuole effettuare si può:
 - Effettuare un'analisi lineare per il valore di a_g , con $q=1$
 - Sfruttando la linearità, individuare per ciascuna sezione l'aliquota $1/p$ di a_g (accelerazione di picco al suolo su roccia prevista nel sito) che porta al raggiungimento del limite di resistenza, indipendentemente dal valore di q
- Se si vuol fare un'analisi lineare (con spettro elastico):
 - Utilizzare direttamente i valori per le verifiche fragili (rinunciando al $q=1.5$)
 - Utilizzare direttamente i valori per le verifiche di drift
 - Si può quindi valutare quale aliquota di sisma può sopportare la struttura

Analisi lineare

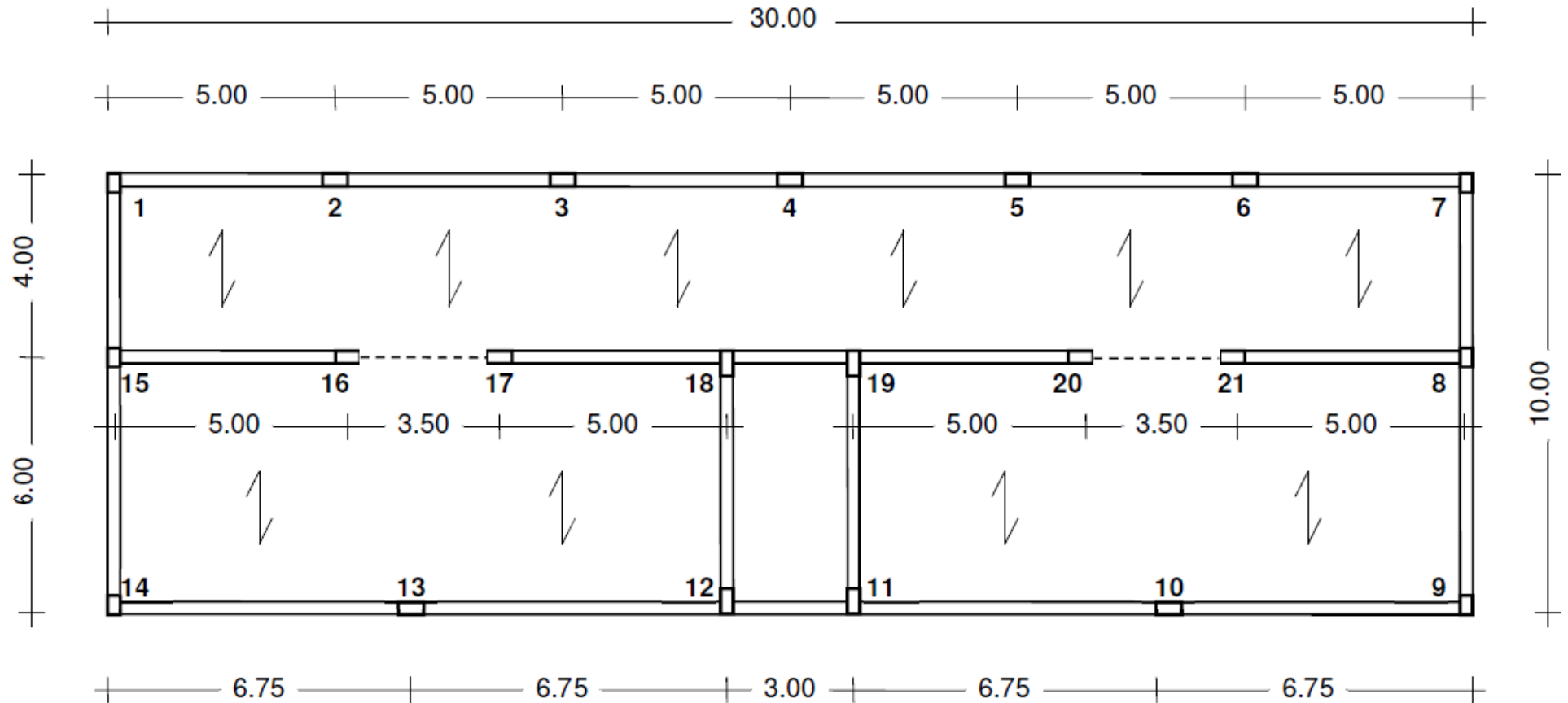
suggerimenti operativi

- Qualunque sia il tipo di analisi che si vuole effettuare si può:
 - Effettuare un'analisi lineare per il valore di a_g , con $q=1$
 - Sfruttando la linearità, individuare per ciascuna sezione l'aliquota $1/\rho$ di a_g (accelerazione di picco al suolo su roccia prevista nel sito) che porta al raggiungimento del limite di resistenza, indipendentemente dal valore di q
- Se si vuol usare l'analisi lineare come prefigurazione del comportamento non lineare della struttura :
 - Vedere cosa avviene al crescere di $1/\rho$, sia in termini di raggiungimento dei limiti di resistenza delle sezioni che in termini di drift

Esempio

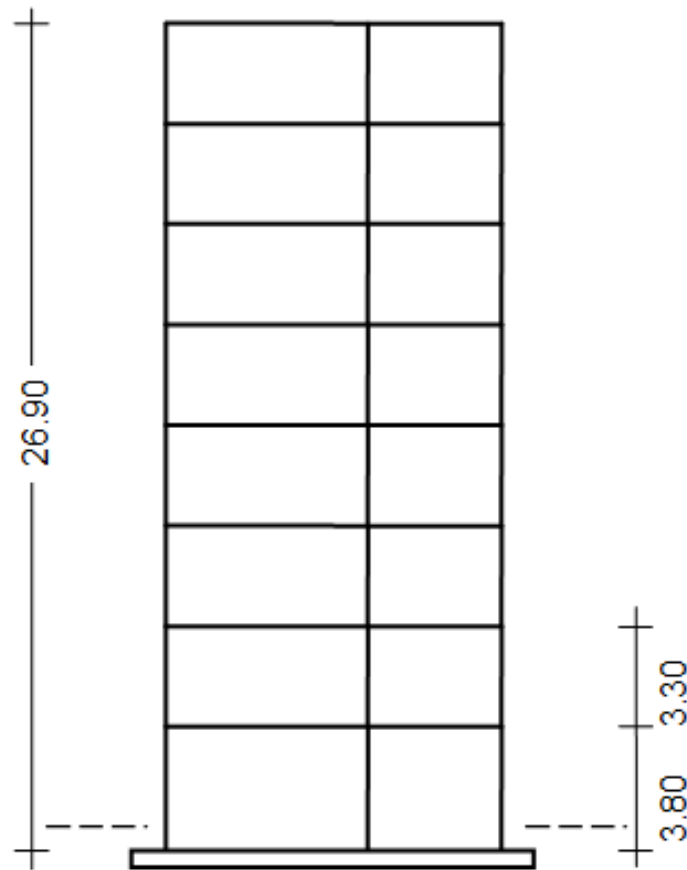
Analisi lineare e analisi non lineare

Edificio esistente da esaminare



Carpenteria del piano tipo

Edificio esistente da esaminare



Sezione schematica dell'edificio

Materiali

Valori ottenuti mediante prove

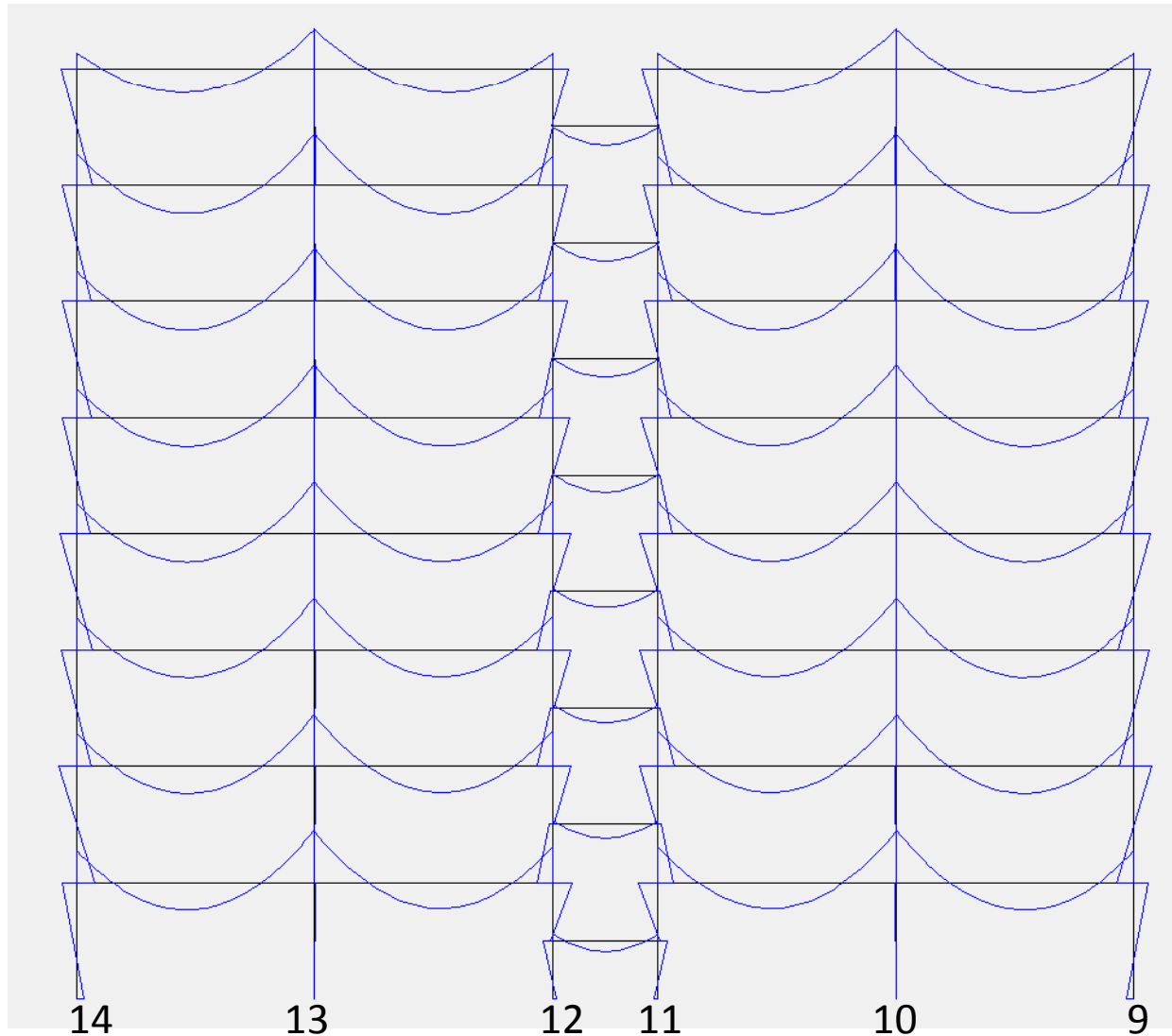
- Calcestruzzo:
 - Si ottiene dalle prove $f_{cm} = 19 \text{ MPa}$
(molto minore di quanto corrisponde a $R_{ck} = 25 \text{ MPa}$)
 - Fattore di confidenza: $FC = 1.2$
a causa della dispersione dei valori riscontrata
- Acciaio:
 - Si trovano barre ad aderenza migliorata;
si ottiene dalle prove $f_{ym} = 380 \text{ MPa}$
(plausibile per un FeB38k, anche se leggermente inferiore)
 - Fattore di confidenza: $FC = 1.05$
perché non c'è rilevante dispersione dei valori

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 1.1 (calibrata per piccoli spostamenti, quindi per SLU senza sisma e SLD) o riduzione 0.8 (per SLV)
- Tamponature:
 - non inserite nel modello

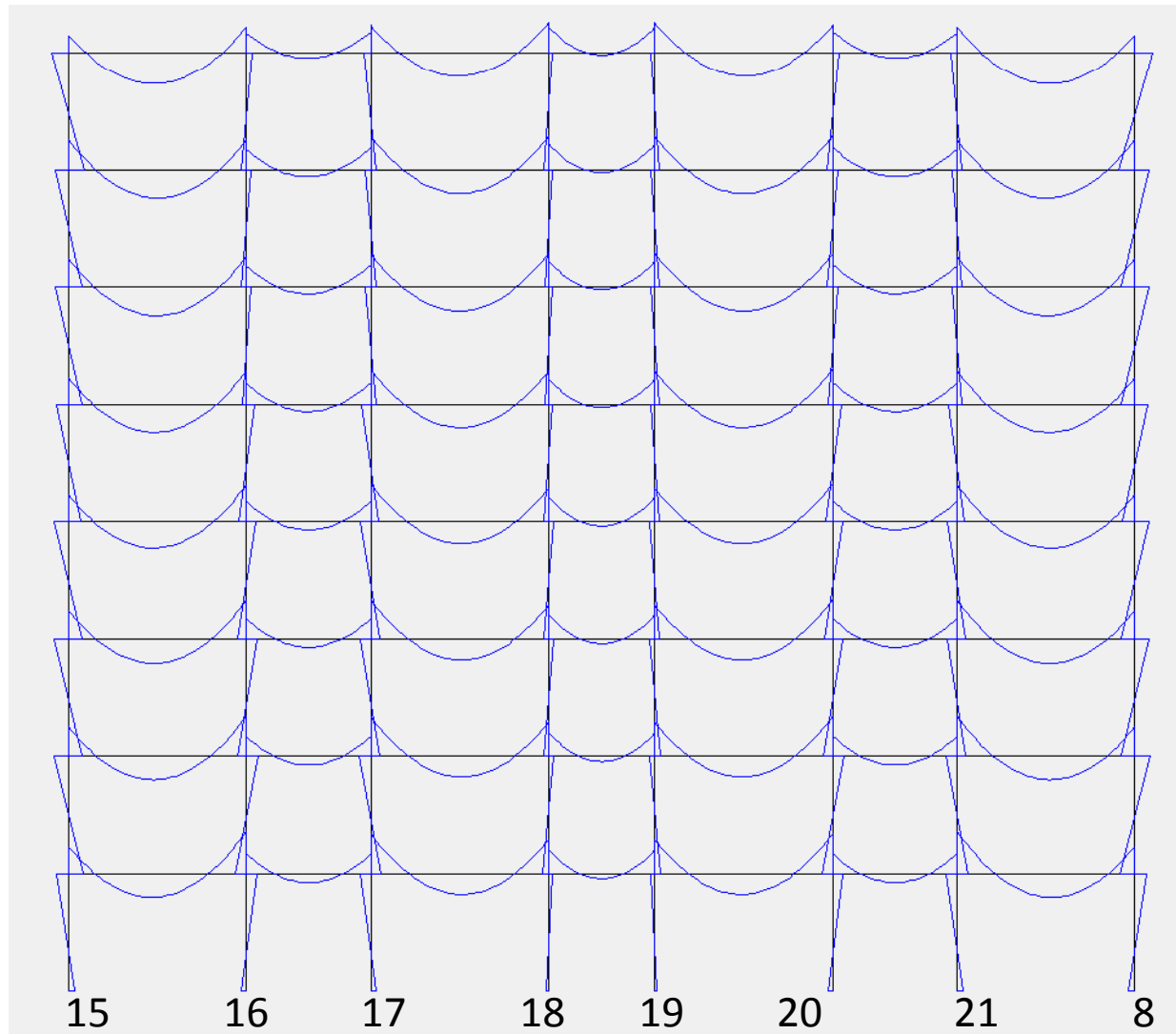
Carichi verticali in presenza di sisma

- Telaio 1 x (in basso in pianta)



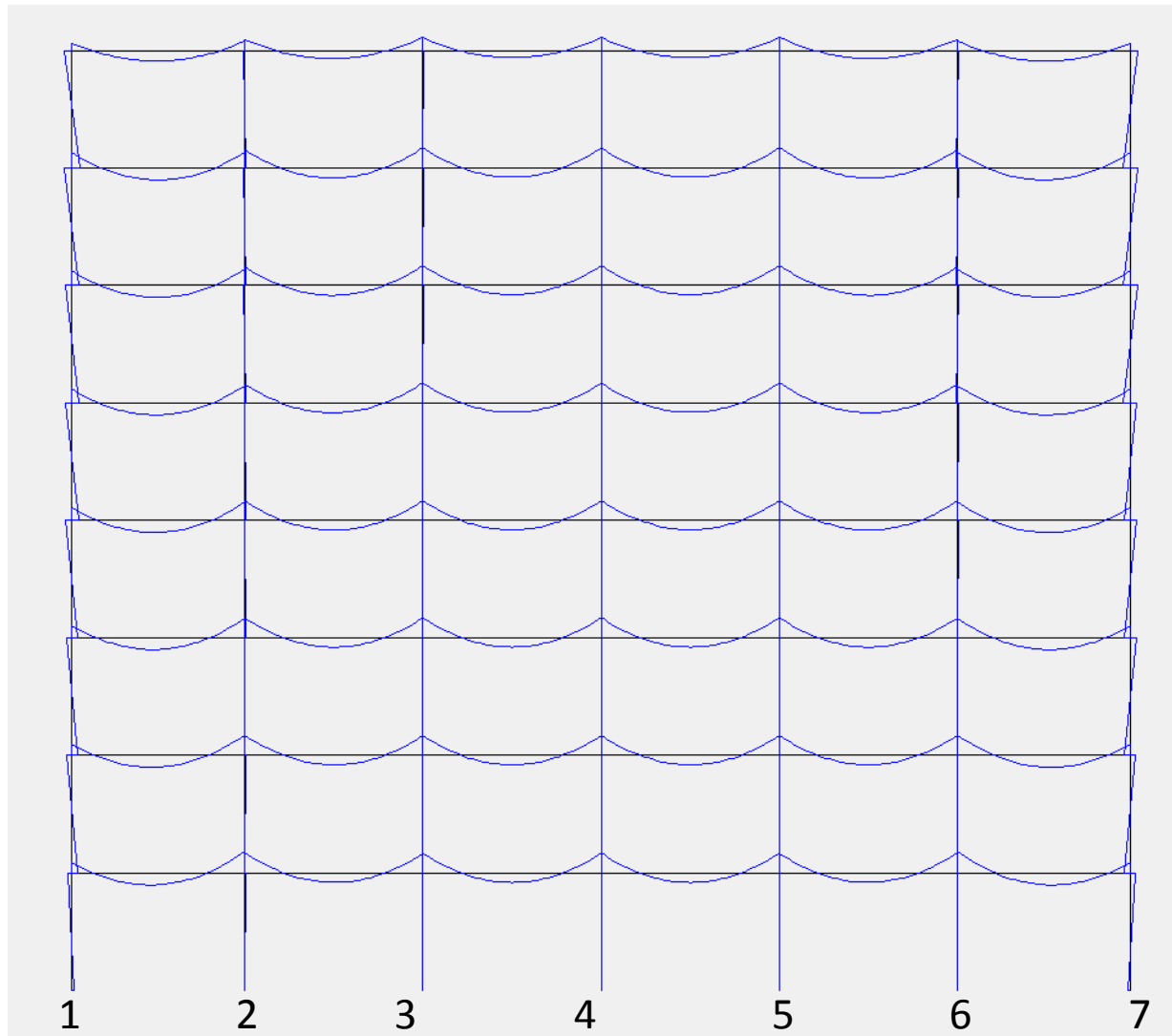
Carichi verticali in presenza di sisma

- Telaio 2 x (di spina)



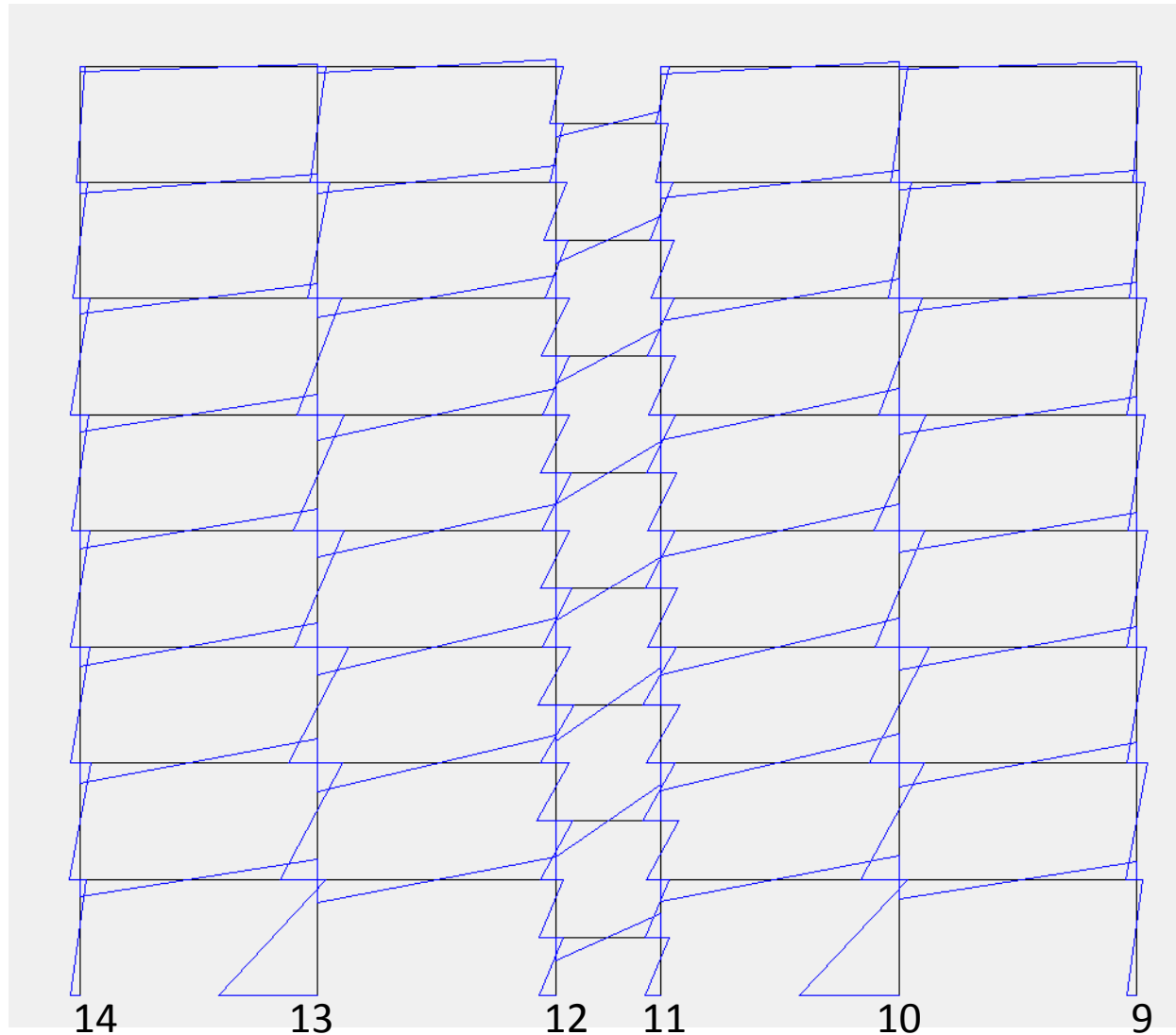
Carichi verticali in presenza di sisma

- Telaio 3 x (in alto in pianta)



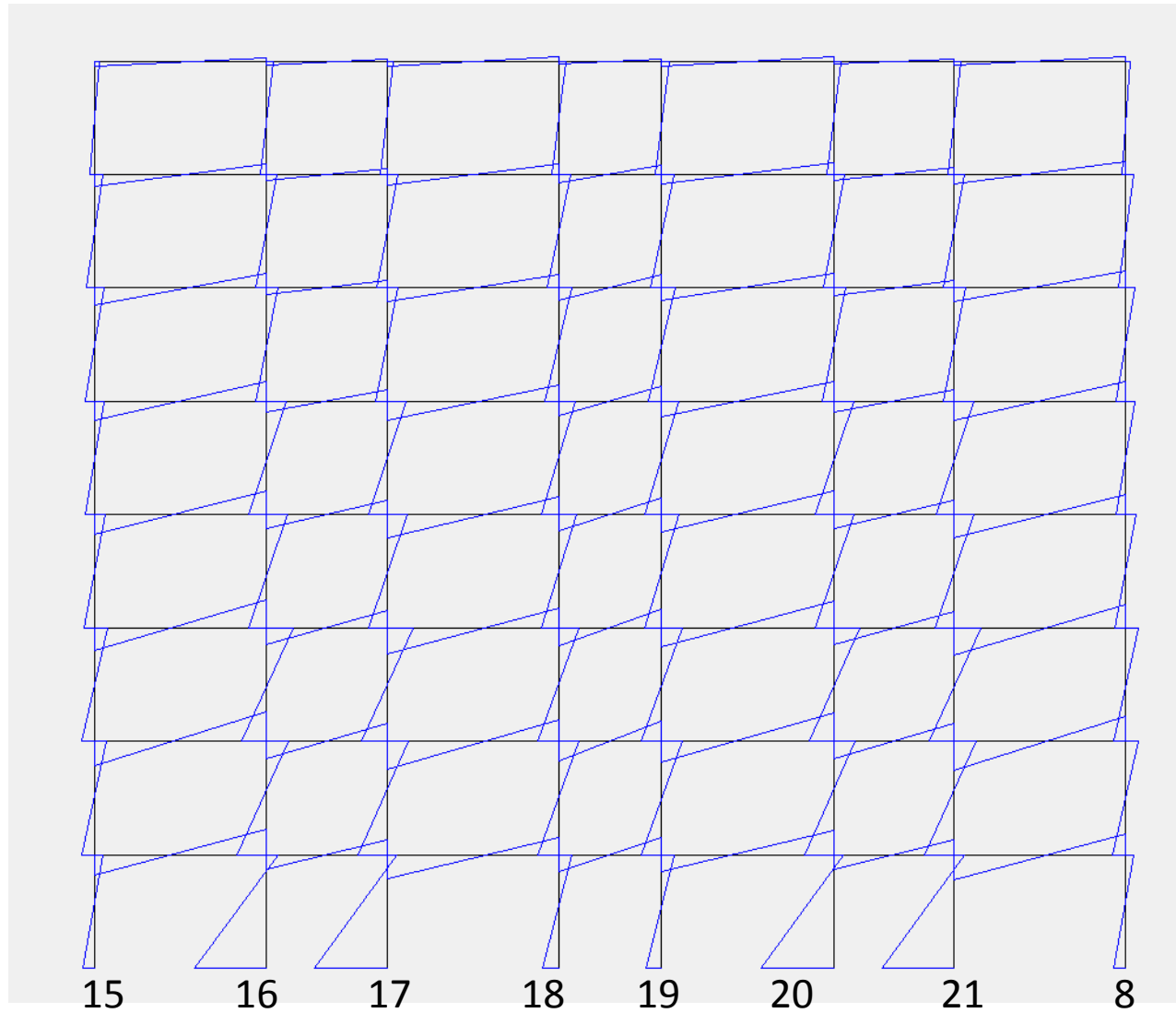
Analisi modale, con $q=1$

- Telaio 1 x (in basso in pianta)



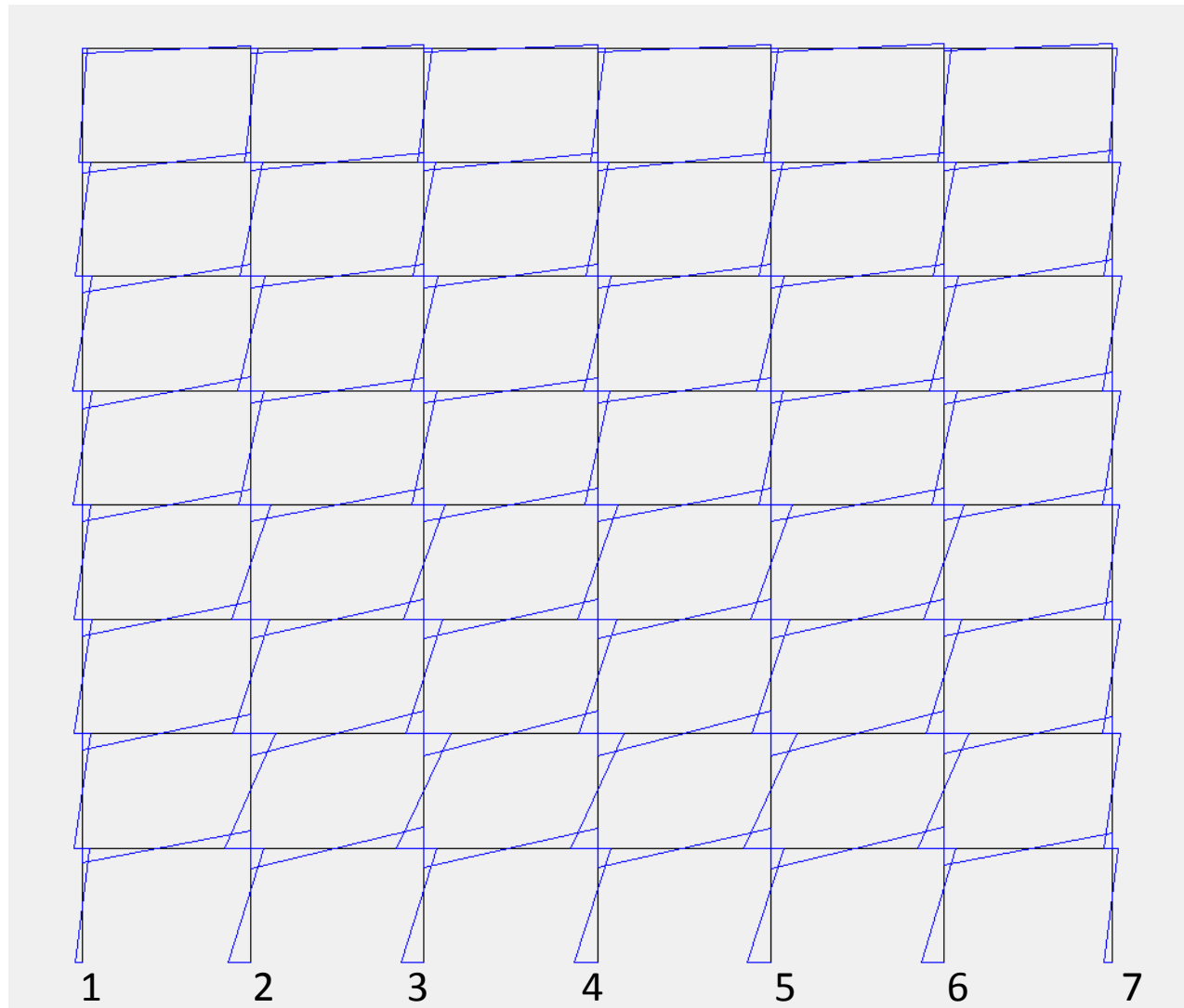
Analisi modale, con $q=1$

- Telaio 2 x (di spina)



Analisi modale, con $q=1$

- Telaio 3 x (in alto in pianta)



Procedimento da seguire

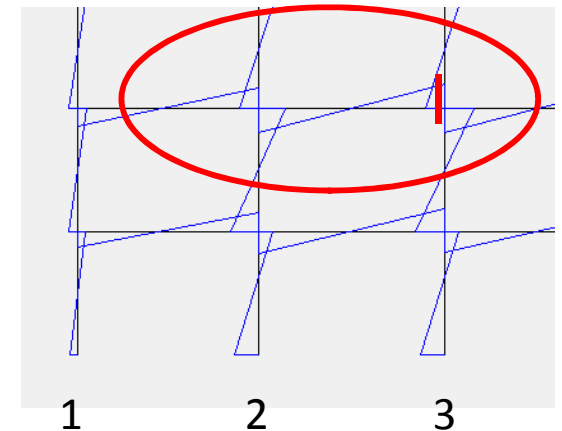
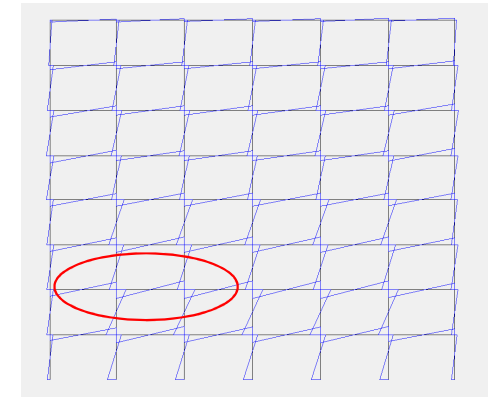
- Per tutte le sezioni significative e per le diverse caratteristiche di sollecitazione (momento flettente, taglio, ecc.) si determina il moltiplicatore $1/\rho$ dell'azione sismica che porta al raggiungimento del limite di resistenza della sezione

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
 - $M_{Rd} = -102.50 \text{ kNm}$ $V_{Rd} = -96.10 \text{ kN}$

$$f_{cd} = \frac{19}{1.2 \times 1.5} = 10.5 \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = \frac{380}{1.05 \times 1.15} = 314.7 \text{ MPa}$$

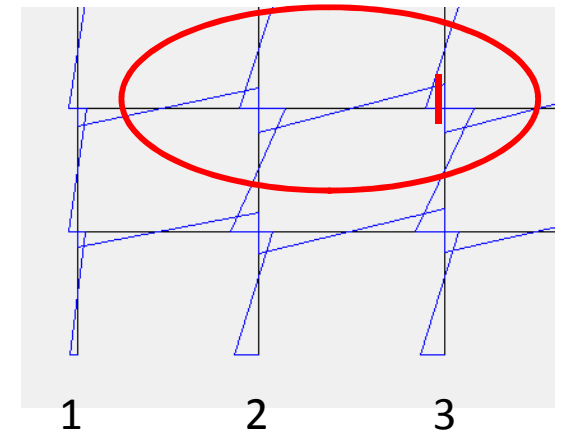
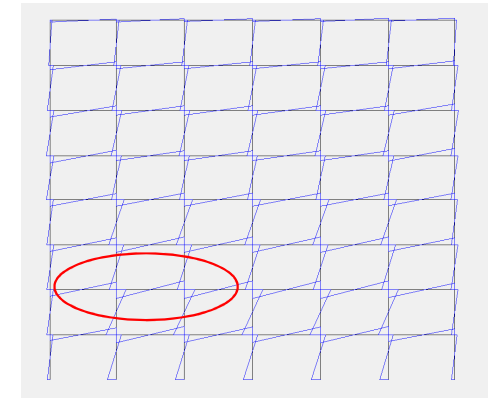


Procedimento da seguire esempio

- 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
 - $M_{Rd} = -102.50 \text{ kNm}$ $V_{Rd} = -96.10 \text{ kN}$

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

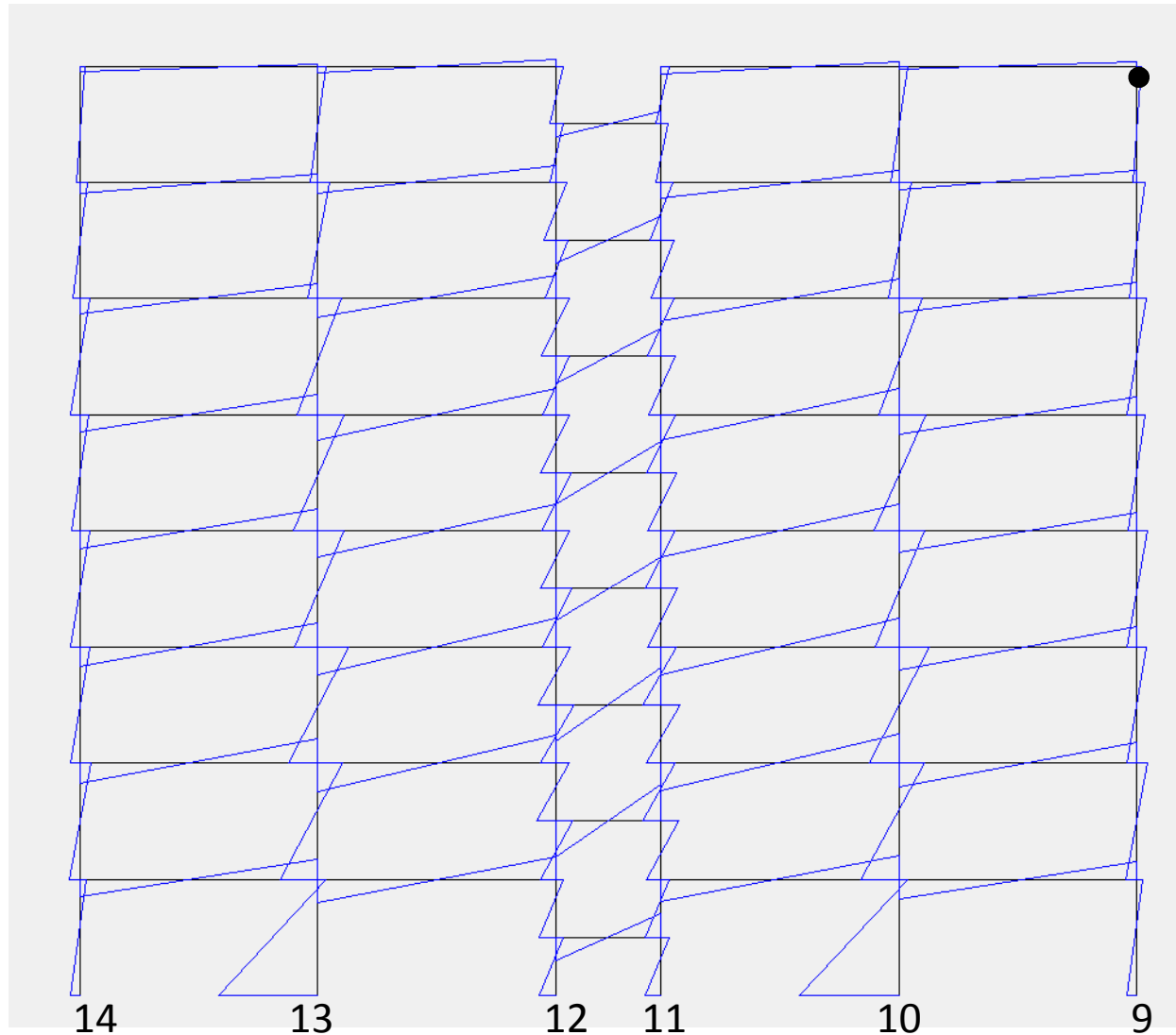
$$\frac{1}{\rho} = \frac{V_{Rd} - V_{Ed,q}}{V_{Ed,s}} = \frac{-96.1 + 50.4}{-151.8} q = 0.301 q$$



Procedimento da seguire

se si usa analisi lineare con fattore q

- 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

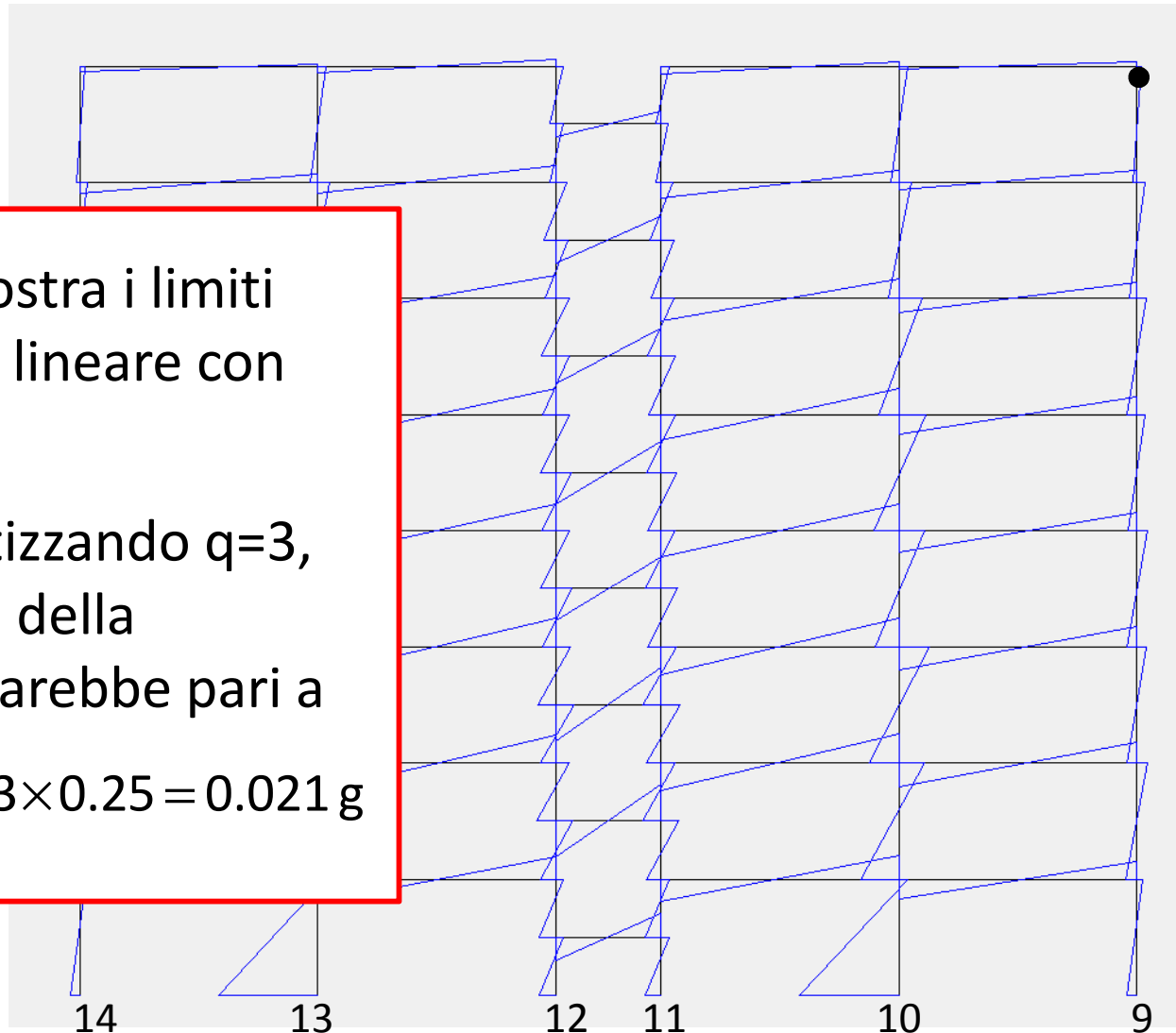
se si usa analisi lineare con fattore q

- Telaio 1 x (in basso in pianta)

Questo mostra i limiti
dell'analisi lineare con
fattore q:

anche ipotizzando $q=3$,
la capacità della
struttura sarebbe pari a

$$a_g = 0.028 \times 3 \times 0.25 = 0.021 g$$



Per questa
sezione è

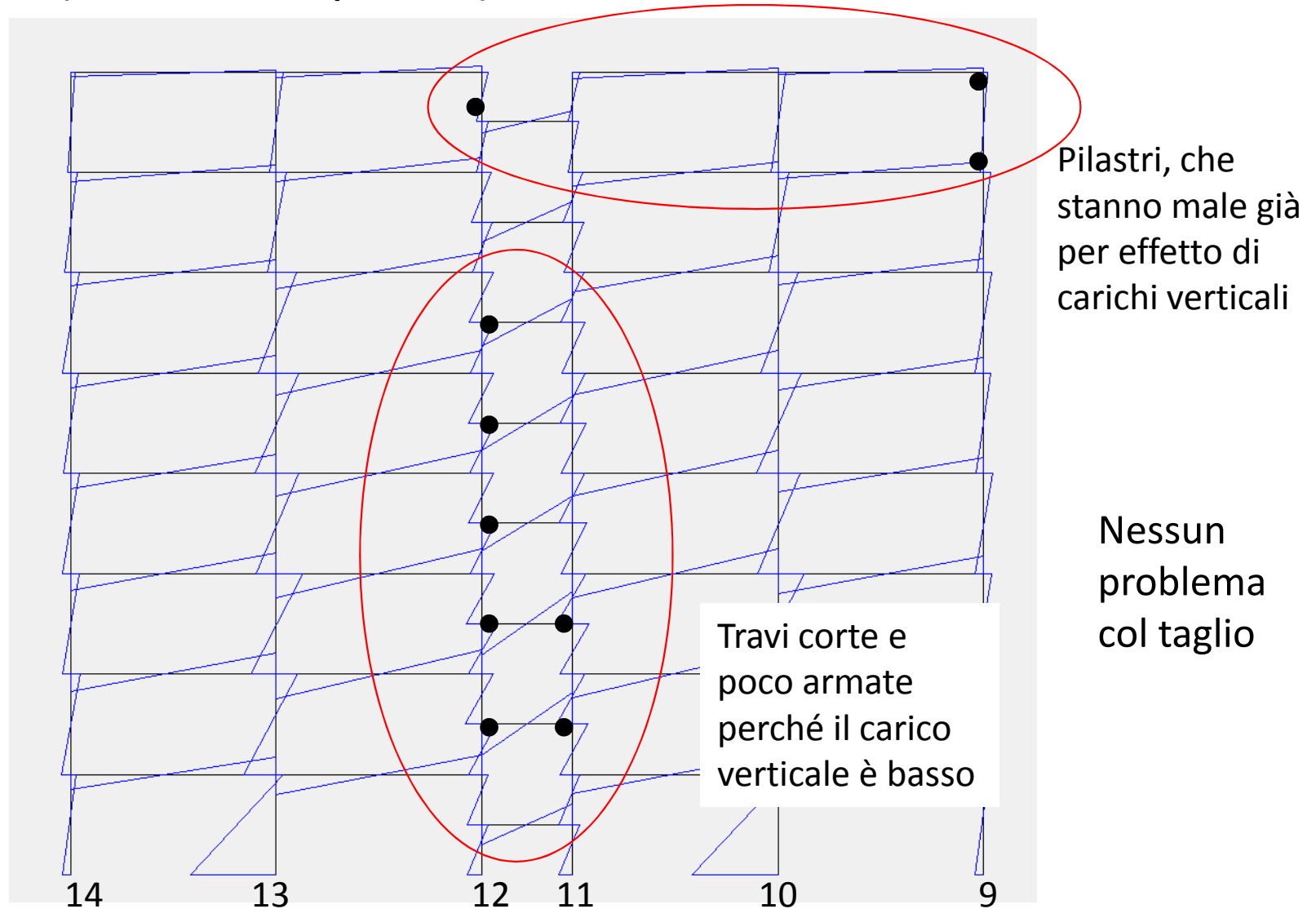
$$\frac{1}{\rho} = 0.028 q$$

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

Procedimento da seguire

valori di $1/\rho$ inferiori a $0.1 q$ (per $q=3$ $a_g=0.075$ g)

- Telaio 1 x (in basso in pianta)



Procedimento da seguire

valori di $1/\rho$ inferiori a $0.1 q$ (per $q=3$ $a_g=0.075 g$)

- Telaio 1 x (in basso in pianta)



Per analisi lineare con
fattore q :

Possiamo trascurare
questi punti e andare
avanti?

Oppure abbiamo già
raggiunto il limite?

Pilastri, che
stanno male già
per effetto di
carichi verticali

Nessun
problema
col taglio

Travi corte e
poco armate
perché il carico
verticale è basso

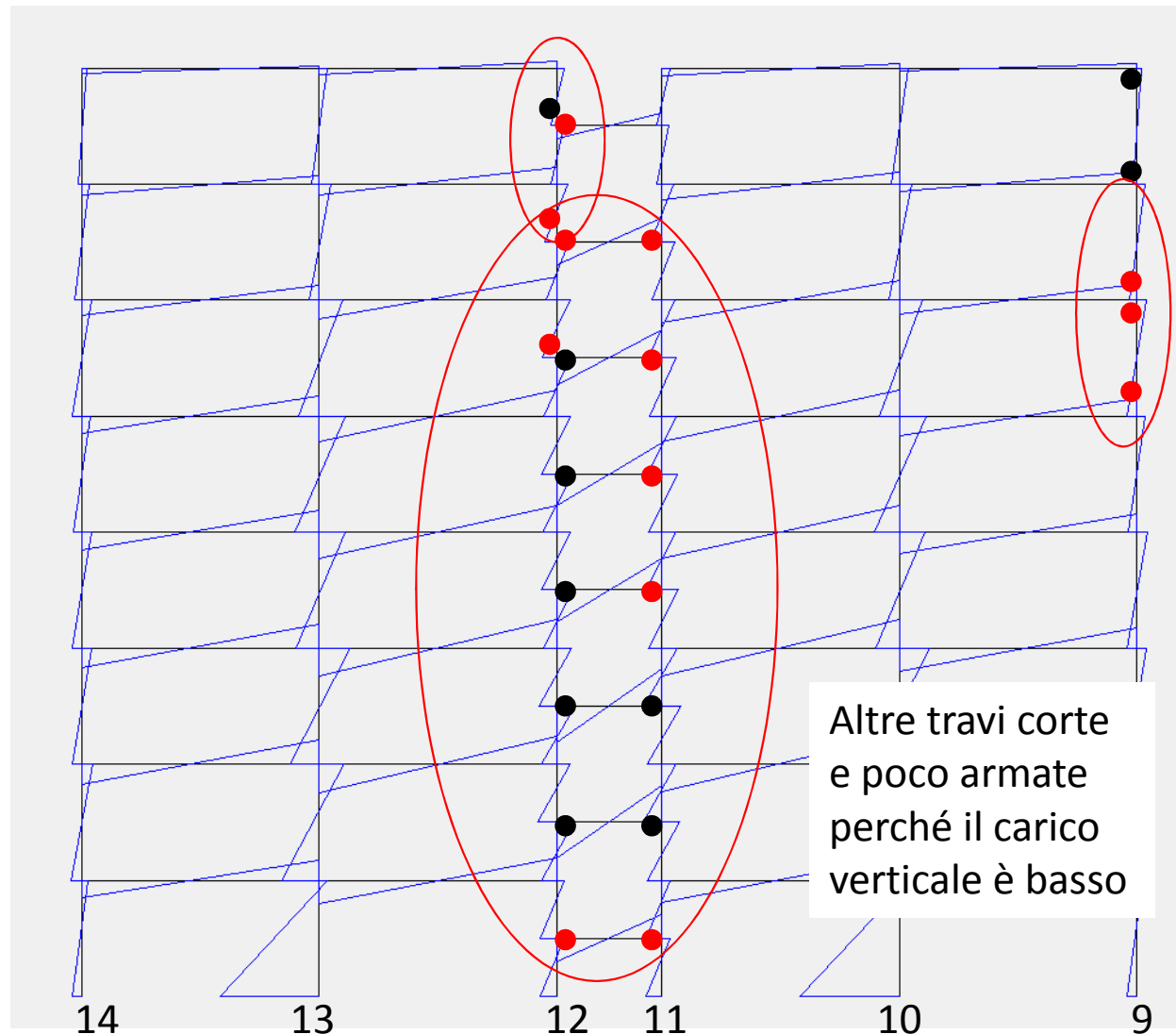
Procedimento da seguire

valori di $1/\rho$ inferiori a $0.2 q$ (per $q=3$ $a_g=0.150$ g)

- Telaio 1 x (in basso in pianta)

● $< 0.1 q$

● $0.1 \div 0.2 q$



Ulteriori pilastri,
con N basso o
corti

Ancora
nessun
problema
col taglio

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

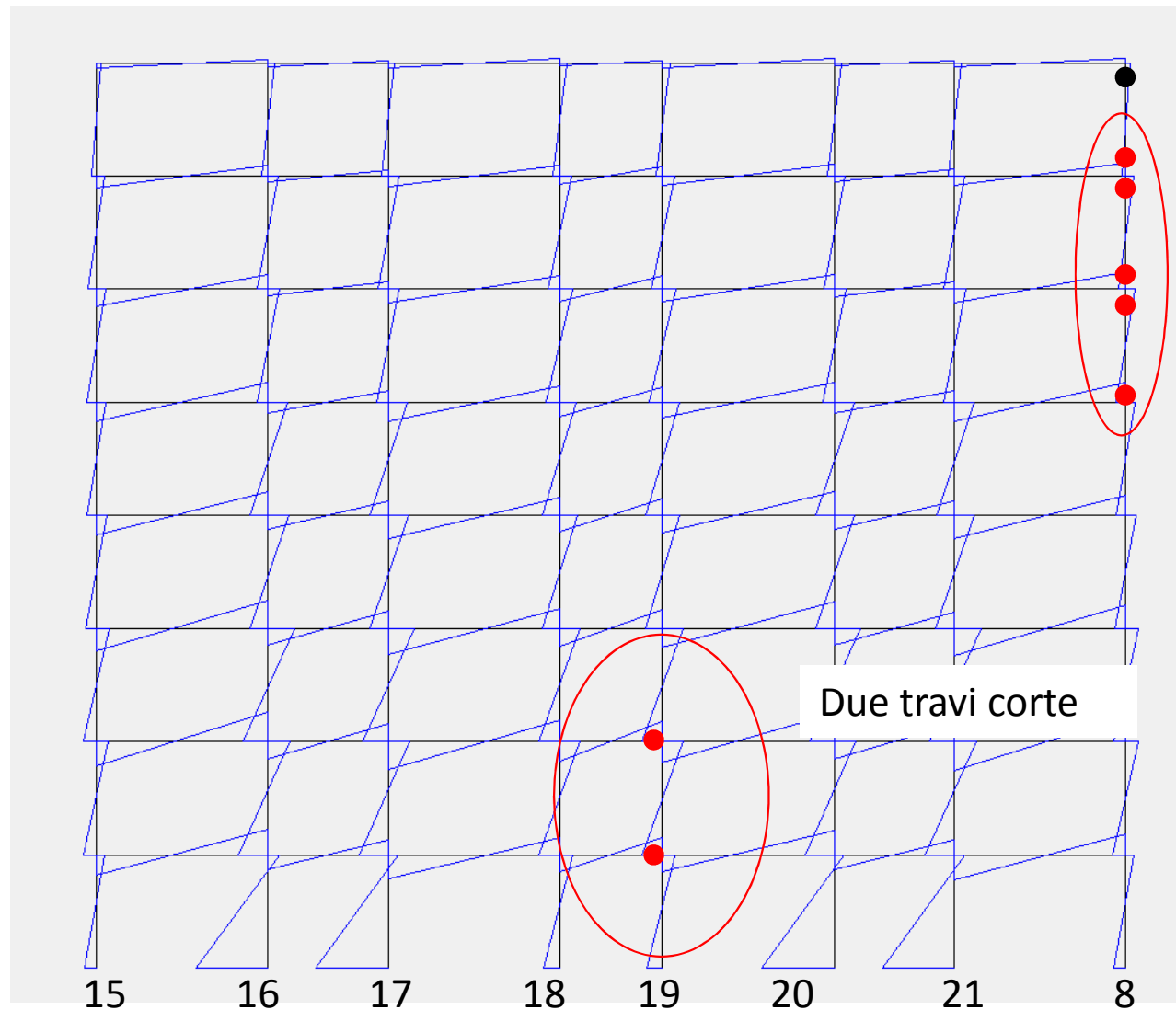
Procedimento da seguire

valori di $1/\rho$ inferiori a $0.2 q$ (per $q=3$ $a_g=0.150$ g)

- Telaio 2 x (di spina)

● $< 0.1 q$

● $0.1 \div 0.2 q$



Ulteriori pilastri,
con N basso

Due travi corte

Procedimento da seguire

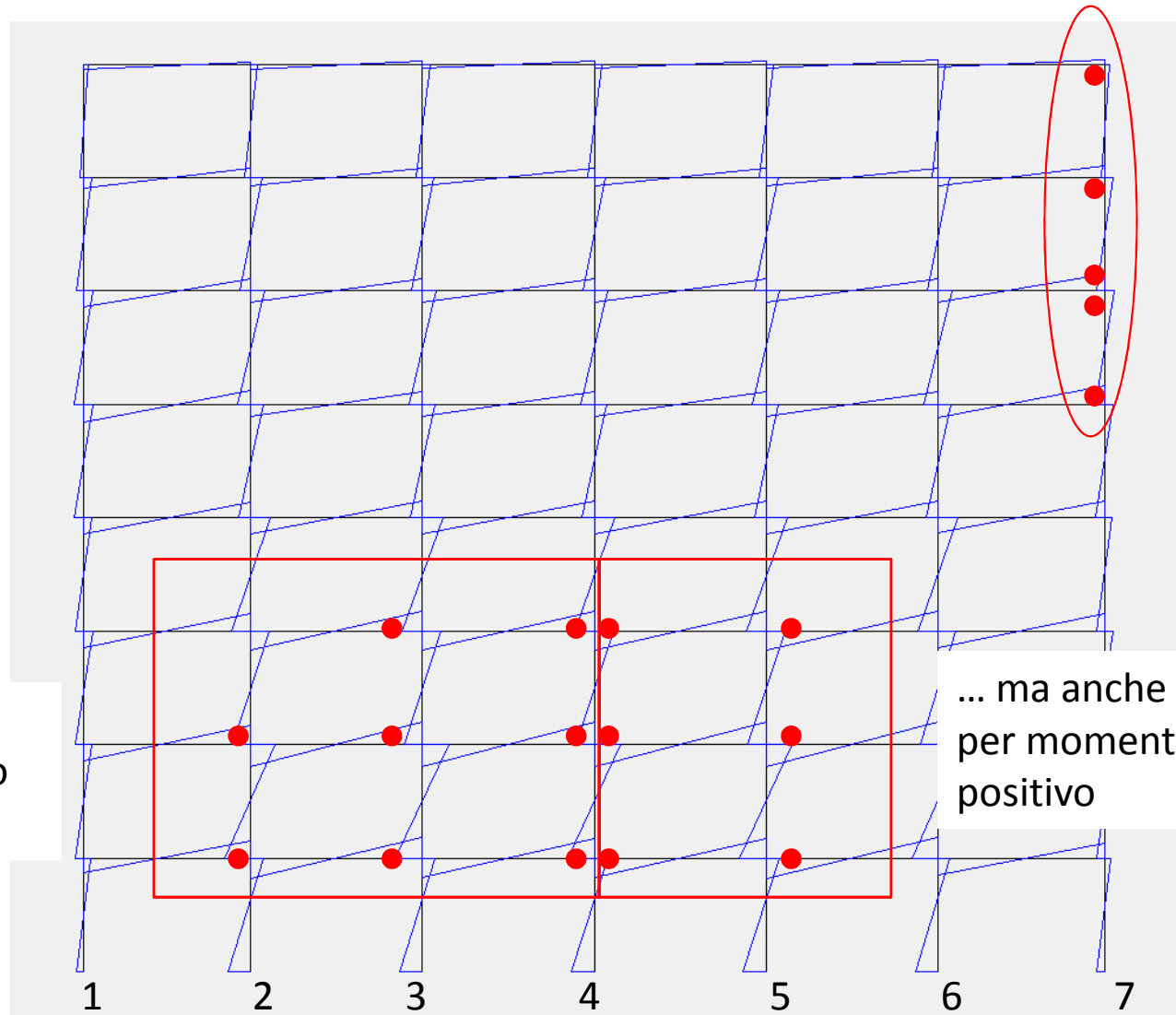
valori di $1/\rho$ inferiori a $0.2 q$ (per $q=3$ $a_g=0.150$ g)

- Telaio 3 x (in alto in pianta)

● $< 0.1 q$

● $0.1 \div 0.2 q$

Travi per
momento
negativo



Pilastri, con N
basso

... ma anche
per momento
positivo

Analisi lineare con fattore q: 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 $0.214 q$
- Per il raggiungimento del limite a taglio è opportuno considerare un fattore di comportamento $q=1.5$
- La capacità della struttura nei confronti del taglio potrebbe essere $0.214 \times q = 32\%$ dell'azione sismica prevista, cioè $0.080 g$

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

Analisi lineare con fattore q : 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, ma dopo $0.15 q$ le travi danneggiate sono parecchie
- 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 $1/p$ pari a circa $0.21 q$ cominciano ad arrivare al limite altri pilastri; questo può essere considerato il primo limite per i pilastri

Analisi lineare con fattore q: quale conclusione?

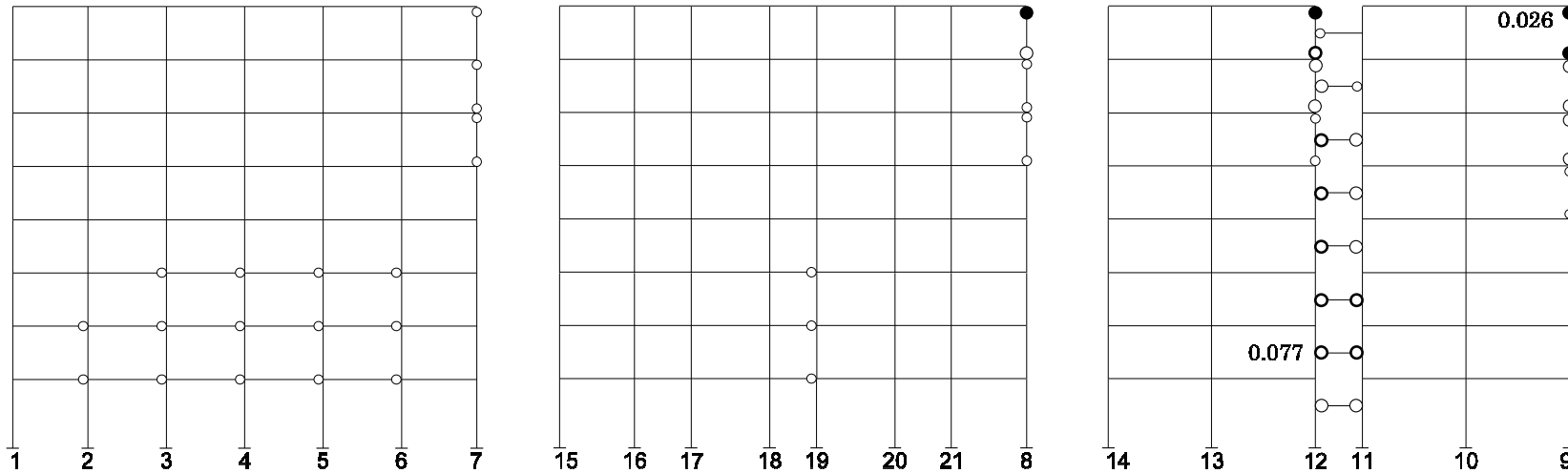
Per la direzione x - flessione

- 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
- Escludo i pilastri che stanno male per M da carichi verticali e N basso (ultimi piani)
- I primi pilastri critici raggiungono il limite per $1/\rho$ pari a circa $0.21 q$ ma per le travi forse a $0.155 q$ il danno è diffuso
- Poiché sono molte le travi che raggiungono il limite prima dei pilastri posso considerare $q=3$
- La capacità della struttura nei confronti della flessione sarebbe $0.155 \times q = 0.47$ dell'azione sismica prevista , cioè $0.118 g$

Confronto lineare - non lineare

direzione x - formazione progressiva delle cerniere plastiche

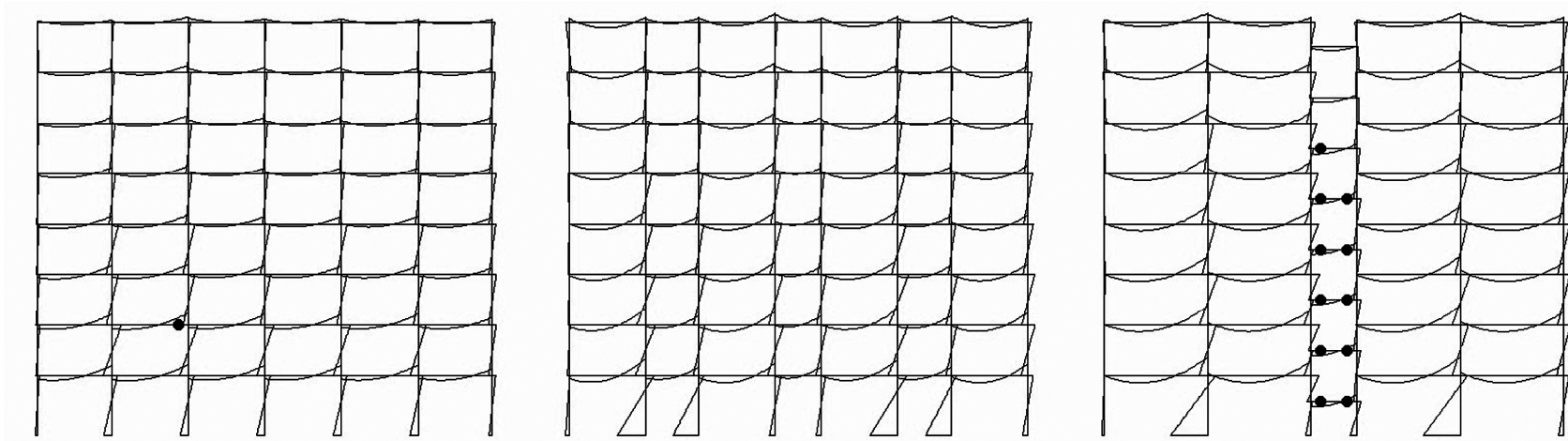
Analisi lineare



Da moltiplicare per q

- $\frac{1}{\rho} \leq 0.075$
- $0.075 \leq \frac{1}{\rho} < 0.10$
- $0.10 \leq \frac{1}{\rho} < 0.15$
- $0.15 \leq \frac{1}{\rho} < 0.20$

Analisi non lineare



UP

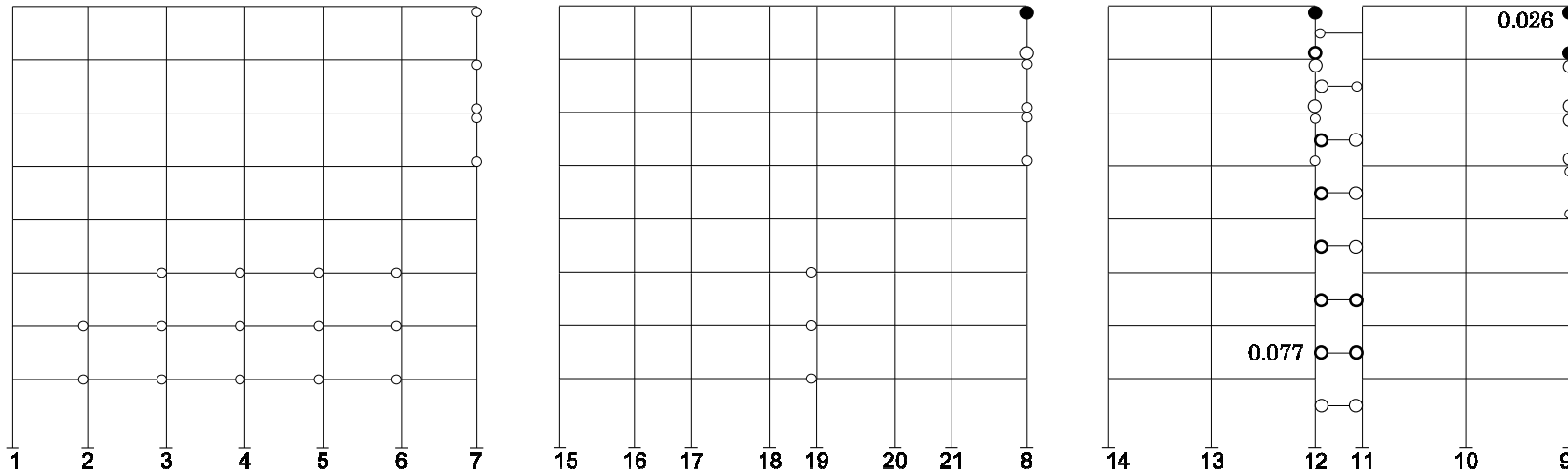
$$\frac{1}{\rho} = 0.20$$

$$a_g = 0.050 \text{ g}$$

Confronto lineare - non lineare

direzione x - formazione progressiva delle cerniere plastiche

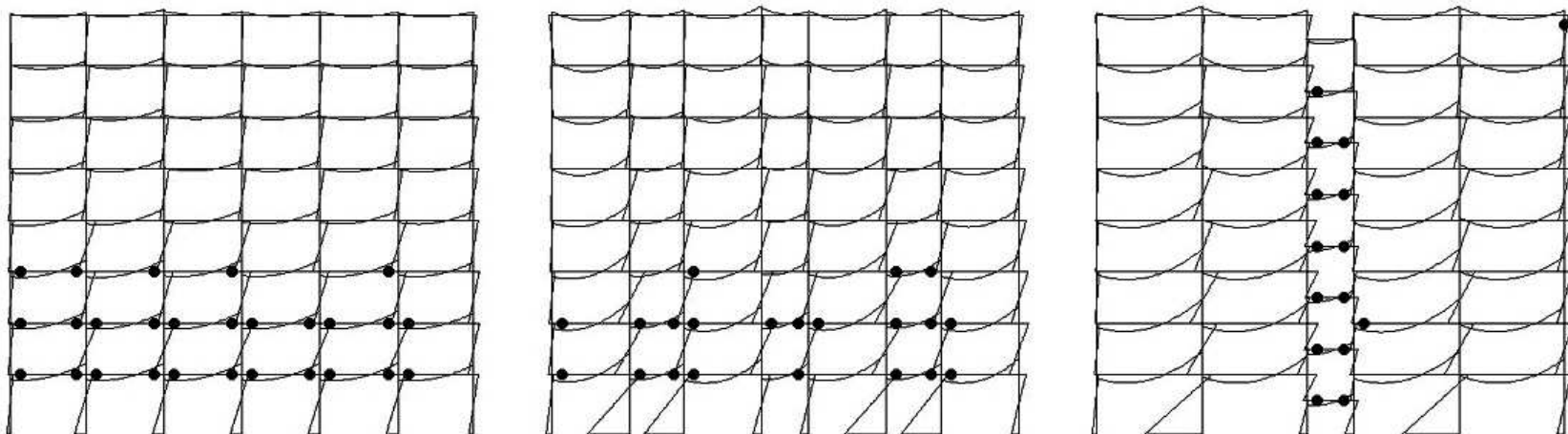
Analisi lineare



Da moltiplicare
per q

- $\frac{1}{\rho} \leq 0.075$
- $0.075 \leq \frac{1}{\rho} < 0.10$
- $0.10 \leq \frac{1}{\rho} < 0.15$
- $0.15 \leq \frac{1}{\rho} < 0.20$

Analisi non lineare



UP

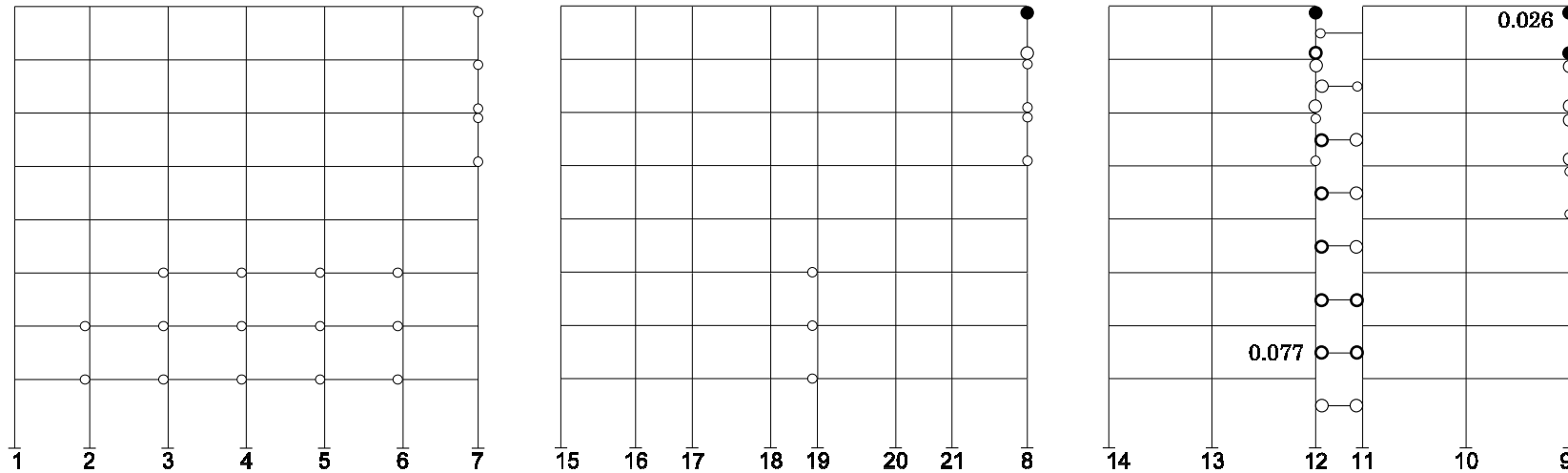
$$\frac{1}{\rho} = 0.30$$

$$a_g = 0.075 \text{ g}$$

Confronto lineare - non lineare

direzione x - formazione progressiva delle cerniere plastiche

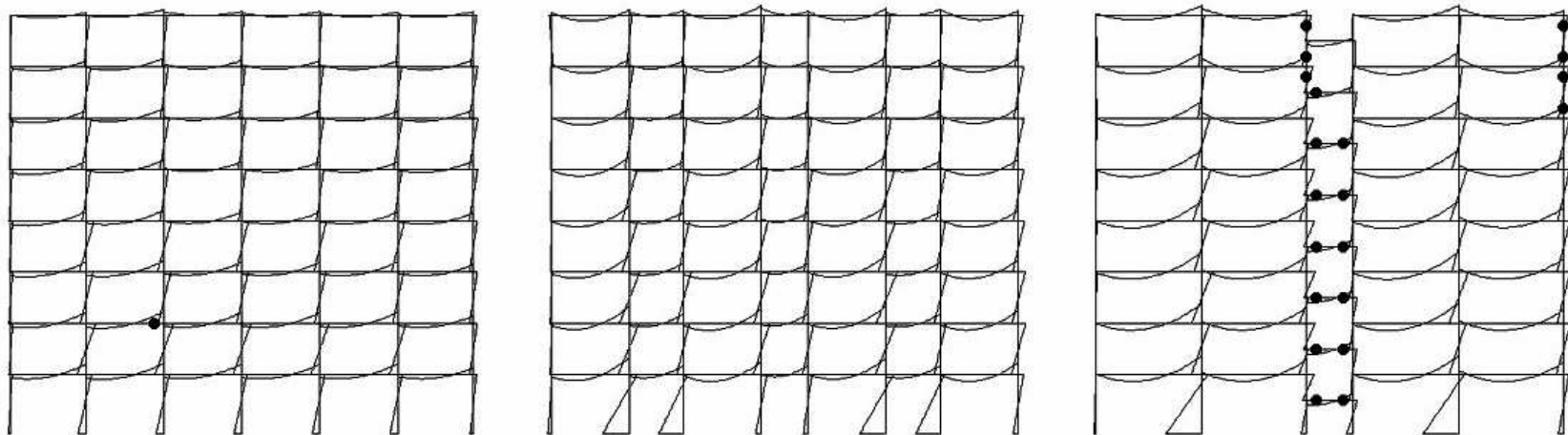
Analisi lineare



Da moltiplicare per q

- $\frac{1}{\rho} \leq 0.075$
- $0.075 \leq \frac{1}{\rho} < 0.10$
- $0.10 \leq \frac{1}{\rho} < 0.15$
- $0.15 \leq \frac{1}{\rho} < 0.20$

Analisi non lineare



MP

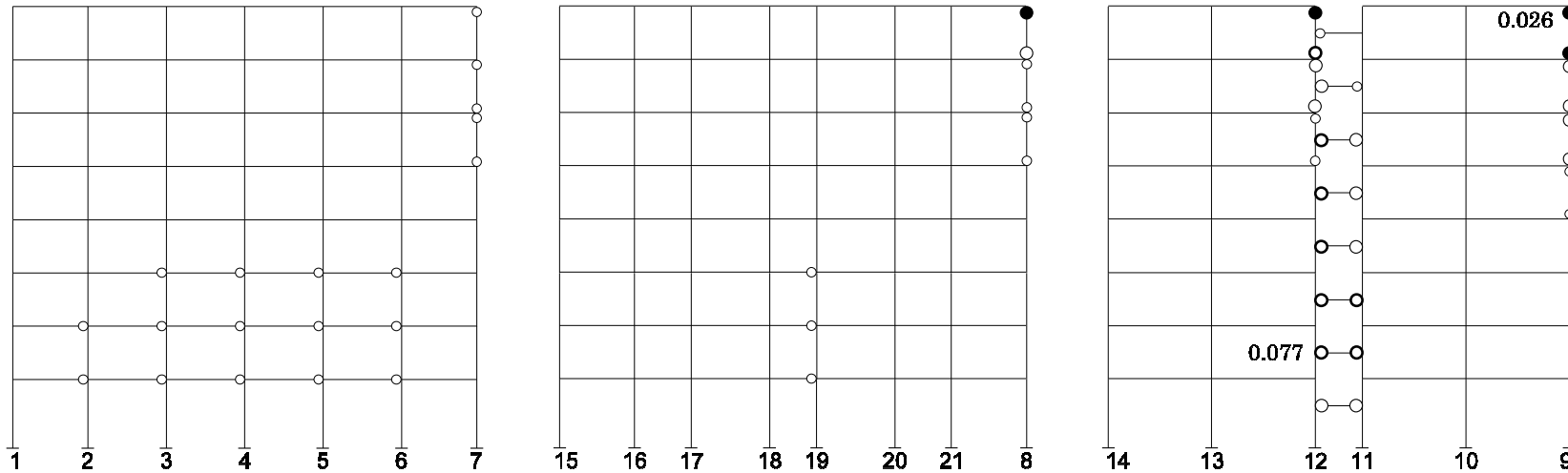
$$\frac{1}{\rho} = 0.20$$

$$a_g = 0.050 \text{ g}$$

Confronto lineare - non lineare

direzione x - formazione progressiva delle cerniere plastiche

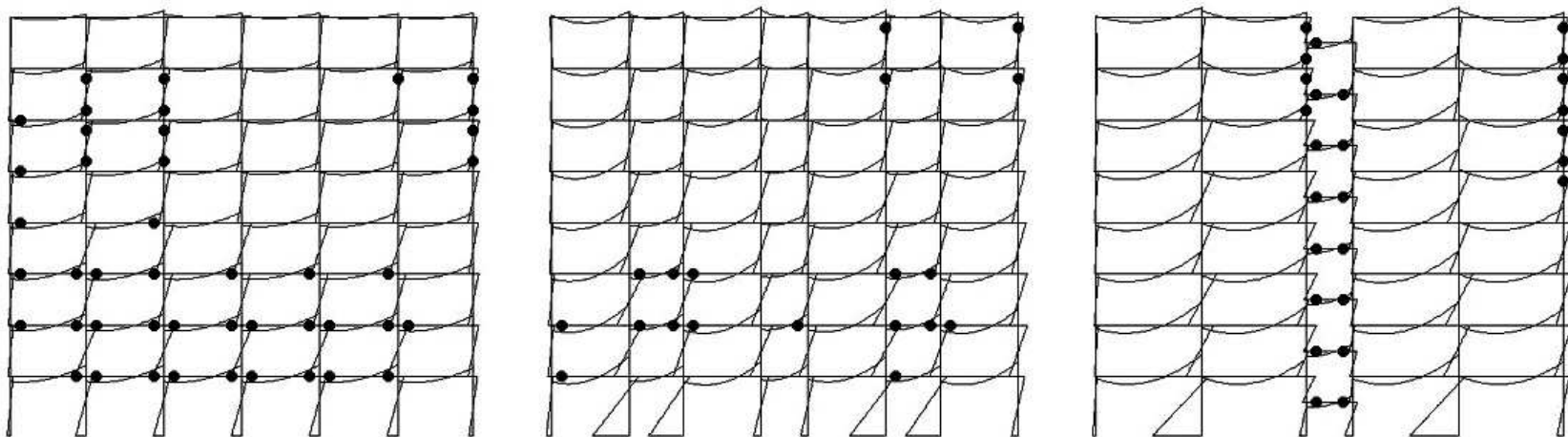
Analisi lineare



Da moltiplicare per q

- $\frac{1}{\rho} \leq 0.075$
- $0.075 \leq \frac{1}{\rho} < 0.10$
- $0.10 \leq \frac{1}{\rho} < 0.15$
- $0.15 \leq \frac{1}{\rho} < 0.20$

Analisi non lineare



MP

$$\frac{1}{\rho} = 0.30$$

$$a_g = 0.075 \text{ g}$$

Confronto lineare - non lineare

direzione x - formazione progressiva delle cerniere plastiche

Commento

- Per quanto riguarda la progressione del danneggiamento, fino a $1/\rho=0.20$ ($a_g=0.050$ g) c'è un'ottima rispondenza tra analisi lineare e non lineare
- Per valori maggiori le differenze aumentano, ma si vedono anche differenze tra le due pushover (UP ed MP)

Confronto lineare - non lineare

direzione x - formazione progressiva delle cerniere plastiche

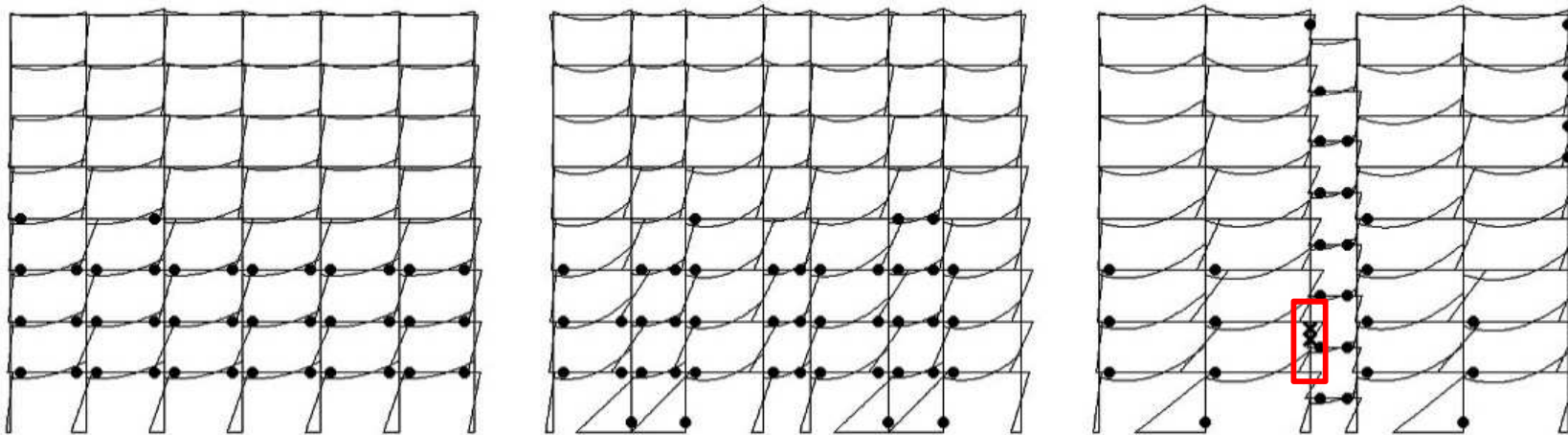
Commento

- L'analisi lineare evidenzia il danneggiamento delle travi scala e di travi dei primi tre impalcati per $a_g = 0.20 a_{g,SLV}$ coerentemente con l'analisi non lineare (per cui avvengono tra $a_g = 0.20 a_{g,SLV}$ e $a_g = 0.30 a_{g,SLV}$)
- L'analisi lineare non mostra il possibile danneggiamento dei pilastri degli ordini 6° e 7°, mostrati solo dalla distribuzione MP
- Per l'analisi lineare la prima rottura a taglio avviene per $a_g = 0.214 a_{g,SLV}$
Per le analisi non lineari, fino a $a_g = 0.30 a_{g,SLV}$ non vi sono rotture a taglio

Confronto lineare - non lineare

direzione x - formazione progressiva delle cerniere plastiche

Analisi non lineare



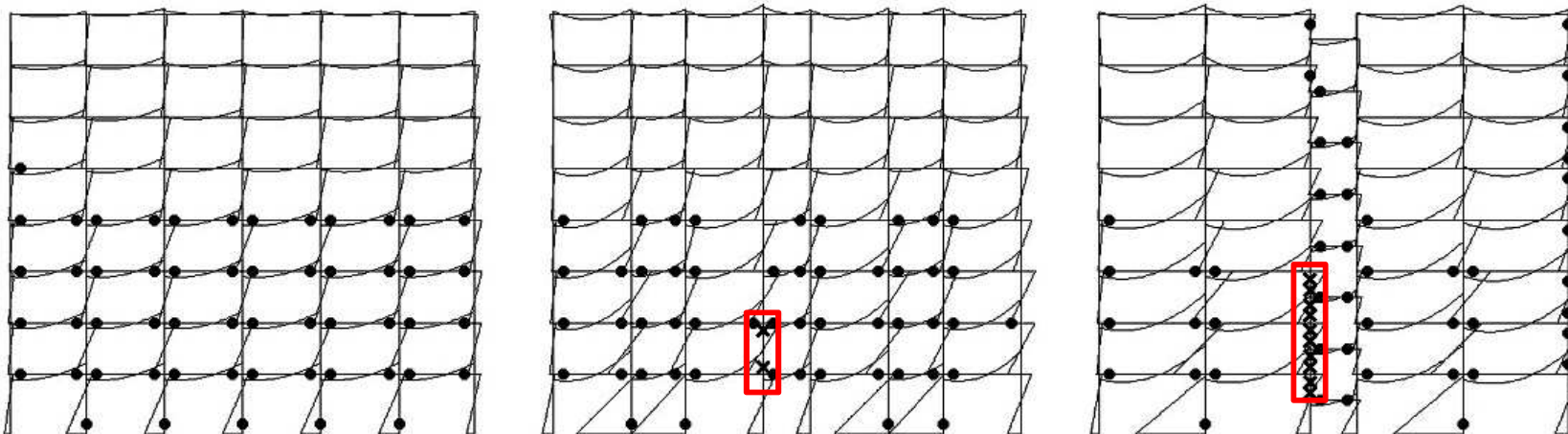
UP

$$\frac{1}{\rho} = 0.40$$

$$a_g = 0.100 \text{ g}$$

In rosso:
rotture a
taglio

Analisi non lineare



UP

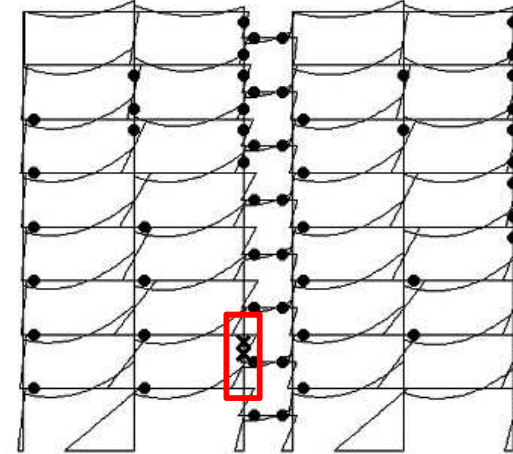
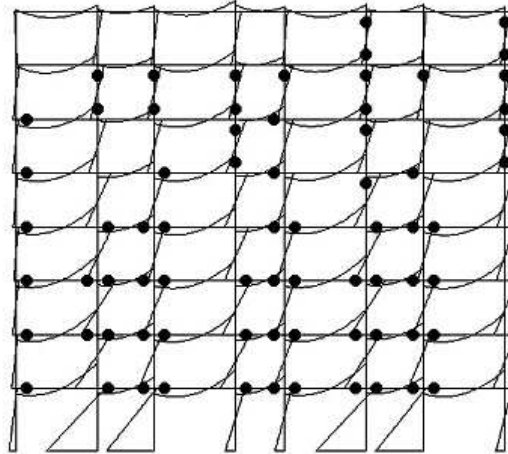
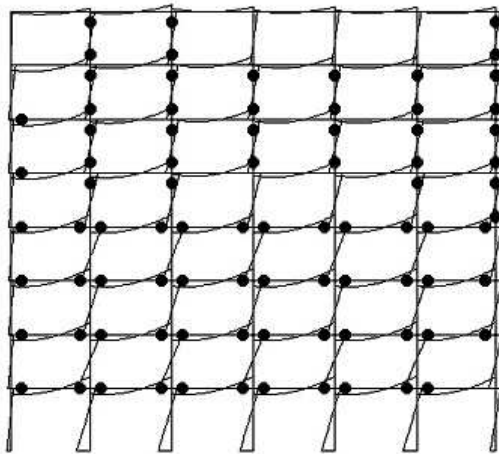
$$\frac{1}{\rho} = 0.50$$

$$a_g = 0.125 \text{ g}$$

Confronto lineare - non lineare

direzione x - formazione progressiva delle cerniere plastiche

Analisi non lineare



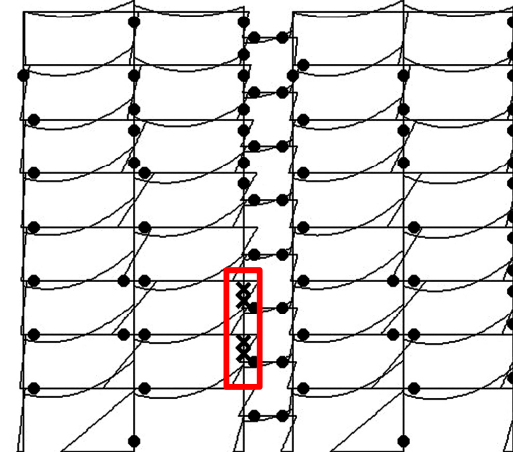
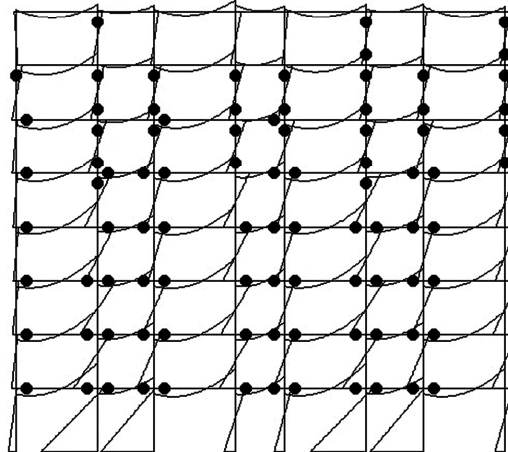
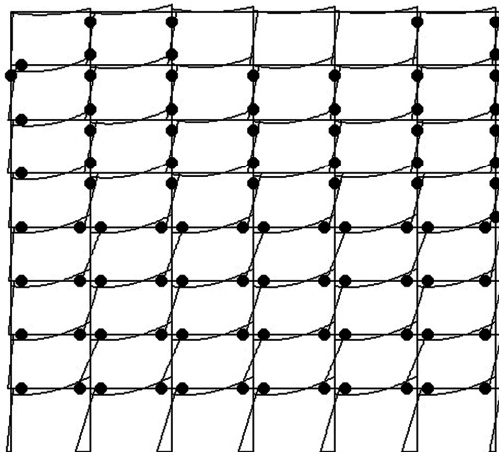
MP

$$\frac{1}{\rho} = 0.40$$

$$a_g = 0.100 \text{ g}$$

In rosso:
rotture a
taglio

Analisi non lineare



MP

$$\frac{1}{\rho} = 0.50$$

$$a_g = 0.125 \text{ g}$$

Confronto lineare - non lineare

direzione x – resistenza a rottura fragile

Commento

- Per quanto riguarda il limite di resistenza a taglio, che risulta condizionante, l'analisi lineare ha fornito il valore $1/\rho=0.214 q$ cioè (con $q=1.5$) $a_g=0.080 g$
- L'analisi non lineare ha mostrato che il limite si raggiunge per $a_g=0.091 g$
- I due valori non sono molto diversi tra loro

Confronto lineare - non lineare

direzione x – in termini di capacità di deformazione plastica

Analisi lineare (con spettro elastico)

- Ragionando in termini di drift, la direzione x mostra una capacità di deformazione plastica molto elevata; tenendo conto dei limiti di applicabilità del procedimento citati nella Circolare 2009, si può ipotizzare una capacità pari $1/\rho=0.533$, cioè $a_g=0.133\text{ g}$

Nota:

- Le analisi numeriche sono descritte nel libro “Edifici esistenti in cemento armato”; la capacità è determinata con la formula C8.7.2.1 della circolare

Confronto lineare - non lineare

direzione x – in termini di capacità di deformazione plastica

Analisi non lineare

- Ragionando in termini di drift, la direzione x mostra una capacità pari $1/\rho=0.860$, cioè $a_g=0.215\text{ g}$
- Ragionando con più precisione in termini di rotazione alla corda, la direzione x mostra una capacità pari $1/\rho=0.908$, cioè $a_g=0.227\text{ g}$

Nota:

- Le analisi numeriche sono descritte nel libro “Edifici esistenti in cemento armato”; la capacità è determinata con la formula C8.7.2.1 della circolare

Confronto lineare - non lineare

direzione x – in termini di capacità di deformazione plastica

Commento

- Per quanto riguarda la capacità di deformazione plastica, l'analisi lineare (con spettro elastico) fornisce in questo caso valori molto cautelativi
- Si segnala però che:
 - Si ottengono valori peggiori usando il modello con rigidezza fessurata
 - I valori di capacità sono molto condizionati dalla scelta della formula utilizzata
 - La direzione y nell'edificio in esempio mostra una domanda di deformazione plastica molto maggiore