

Corso di aggiornamento

Progetto di edifici antisismici
con struttura controventata in acciaio

Telai con controventi ad instabilità impedita

9 - Validazione del metodo di progetto

Spoletto

24-25 marzo 2017

Edoardo M. Marino

Metodo di progetto proposto e normativa

Eurocodice e NTC08

Sono norme basate sulle prestazioni. È ammesso l'uso di regole di progetto alternative a condizione che sia dimostrato che:

- le regole alternative siano in accordo con i principi dell'Eurocodice
- che la struttura sia in grado di garantire lo stesso livello di sicurezza (prestazione sismica) garantito dalle regole dell'Eurocodice

Metodo di progetto proposto e normativa

Il metodo di progetto è in linea con i principi dell'Eurocodice?

Nella progettazione di una struttura antisismica:

- Bisogna individuare gli elementi dissipativi che devono essere progettati per plasticizzarsi

Nel caso in questione i BRB

- Gli altri elementi (non dissipativi) devono mantenersi elastici e vanno progettati con il criterio di gerarchia delle resistenze

Travi e colonne

Metodo di progetto proposto e normativa

Il metodo di progetto è in linea con i principi dell'Eurocodice?

In occasione di un terremoto severo:

- La reale richiesta di duttilità dei BRB deve essere "sufficientemente" (secondo quanto indicato dalla normativa) inferiore della capacità
- Gli elementi non dissipativi non devono né plasticizzarsi né instabilizzarsi

Livello di sicurezza richiesto dalla norma!
Ma come controllare?

... come controllare?

Il terremoto severo è quello con probabilità di superamento del 10% in 50 anni

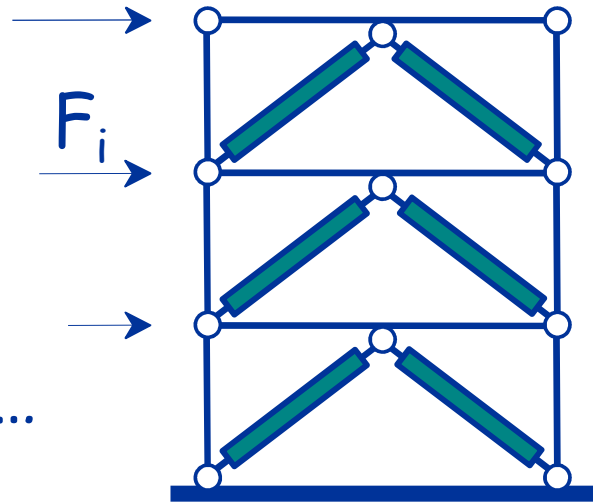
La risposta della struttura può essere prevista con grande precisione con l'analisi dinamica

La reale richiesta di duttilità accettabile è quella corrispondente allo stato limite di danno significativo (SD)

Se si conoscono le sollecitazioni, plasticizzazione e instabilità si possono controllare con le usuali formule di verifica

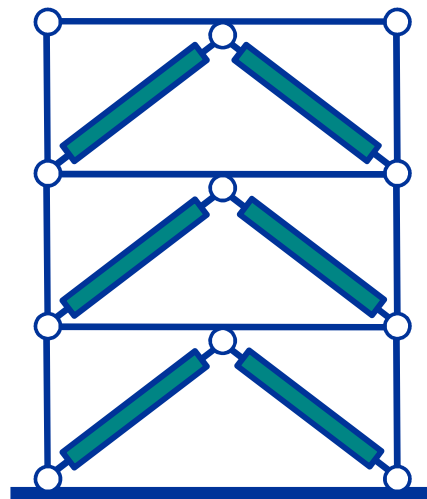
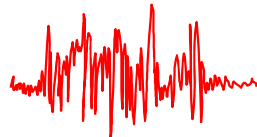
... come controllare?

Prima,
progetto...



... infine, faccio
le verifiche

... dopo, analisi
dinamica...

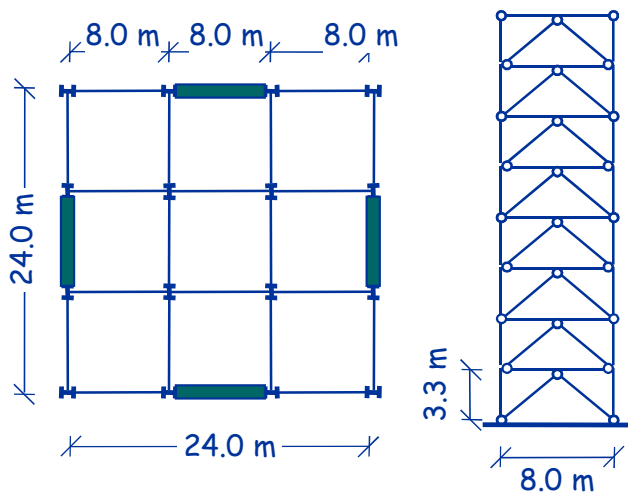


Ma è
faticoso

Determinazione di q in funzione di Δ_d

Sono stati considerati: $\Delta_d = 1.0, 1.5$ and 2.0%

- Per ogni Δ_d , è stato progettato un insieme di telai con diversi valori di q



Sisma

$q = 2.5 - 7.5$ con passo 1.0

Altezza: 4, 8 and 12 piani

Acciaio S235 per i BRB

Azione sismica (EC8):

- 10%/50 anni
- $PGA = 0.35 g$
- Suolo C

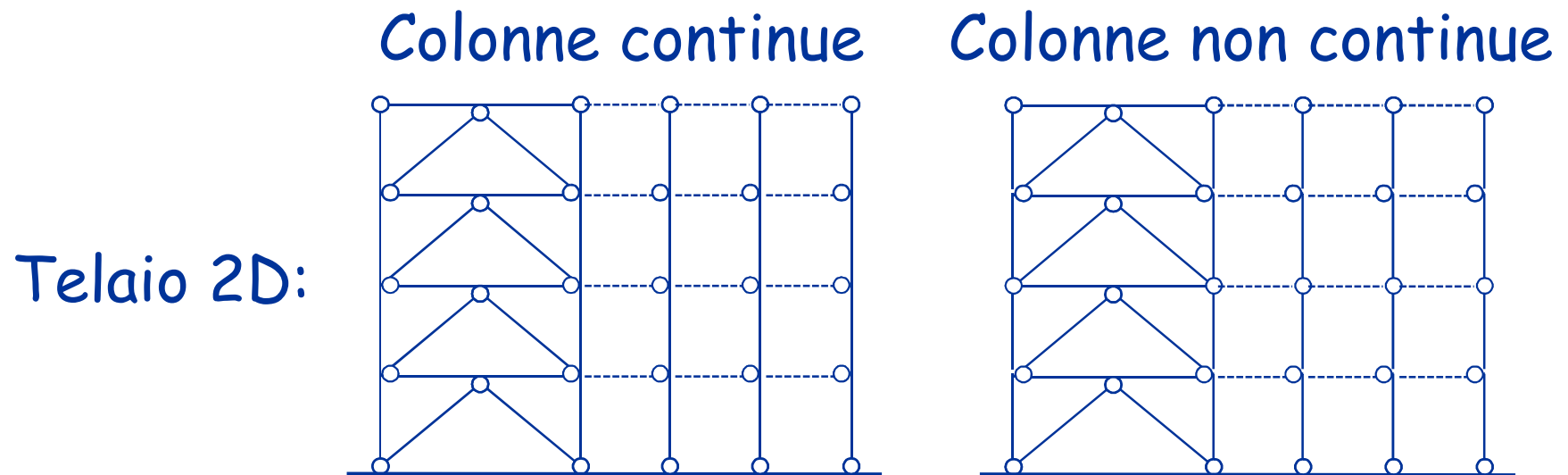
Determinazione di q in funzione di Δ_d

Sono stati considerati: $\Delta_d = 1.0, 1.5$ and 2.0%

- Per ogni Δ_d , è stato progettato un insieme di telai con diversi valori di q
- Per ciascun telaio progettato è stata determinata la risposta mediante analisi dinamica

L'analisi dinamica fornisce la storia temporale della risposta. Se eseguita con un modello affidabile descrive "quasi" la realtà.

Modello numerico per l'analisi dinamica



Per i BRBs è stato utilizzato il modello di Zona e Dall'Asta

Travi e colonne sono state modellate mediante elementi elastici

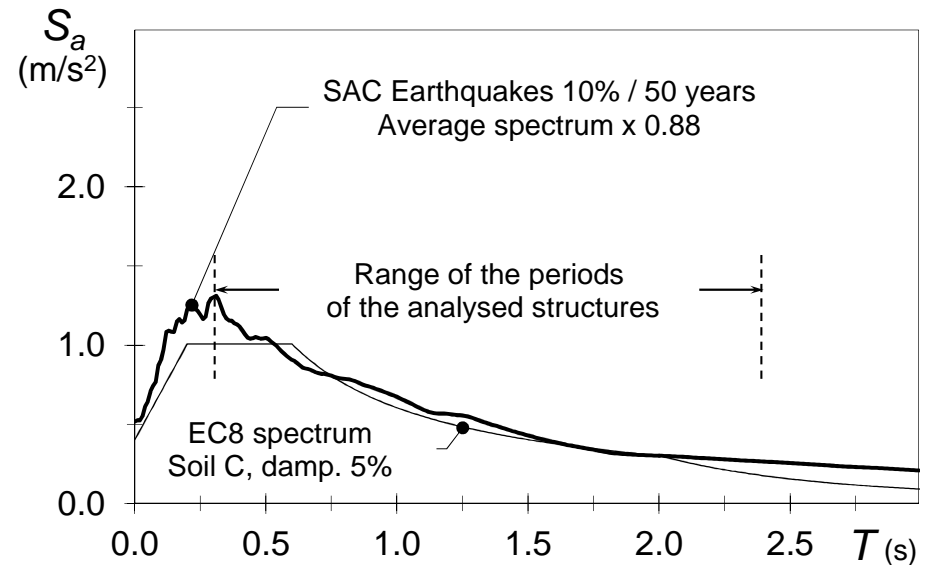
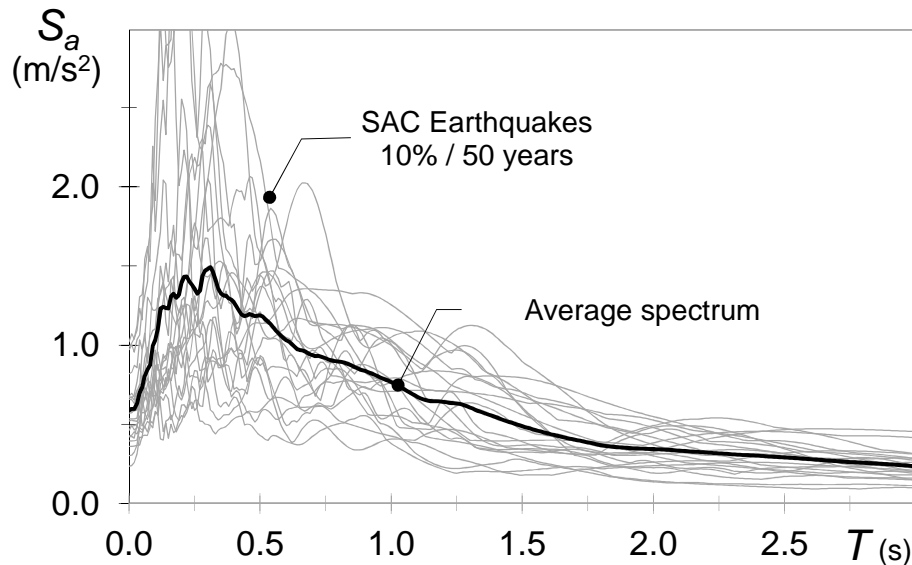
Determinazione di q in funzione di Δ_d

Sono stati considerati: $\Delta_d = 1.0, 1.5$ and 2.0%

- Per ogni Δ_d , è stato progettato un insieme di telai con diversi valori di q
- Per ciascun telaio progettato è stata determinata la risposta mediante analisi dinamica
- L'analisi dinamica è stata eseguita con 20 accelerogrammi (l'EC8 ne richiede almeno 7)

Accelerogrammi

Sono i 20 accelerogrammi del "FEMA/SAC project",
scalati in modo da essere compatibili con lo spettro
di risposta usato in progetto



Determinazione di q in funzione di Δ_d

Sono stati considerati: $\Delta_d = 1.0, 1.5$ and 2.0%

- Per ogni Δ_d , è stato progettato un insieme di telai con diversi valori di q
- Per ciascun telaio progettato è stata determinata la risposta mediante analisi dinamica
- L'analisi dinamica è stata eseguita con 20 accelerogrammi (l'EC8 ne richiede almeno 7)
- Il valore di q adeguato è quello che consente di ottenere la prestazione richiesta dalla norma

I valori di q sono stati espressi in funzione di Δ_d

Valutazione della prestazione sismica

Per ogni accelerogramma (ad ogni piano) si valuta :

- Rapporto tra duttilità richiesta e disponibile
- Indice di resistenza plastica (verifica di resistenza)
- Indice di stabilità (verifica di stabilità)

Per ciascun indice è stato valutato il valore medio, che quantifica la prestazione sismica.

Rapporto di duttilità dei BRB

μ = massima richiesta di duttilità dei BRB
(si ottiene dall'analisi dinamica)

μ_{SD} = duttilità dei BRB corrispondente allo stato
limite di danno significativo

$\mu_{SD} = 3/4 \mu_{max}$ Estrapolato dalle indicazioni
dell'EC8 sulle travi in acciaio

μ_{max} = duttilità a rottura dei BRB
(ottenuta dal progetto, è la duttilità dei BRB che
consente uno spostamento d'interpiano pari a $2 \Delta_d$)

Rapporto di duttilità dei BRB

μ = massima richiesta di duttilità dei BRB
(si ottiene dall'analisi dinamica)

μ_{SD} = duttilità dei BRB corrispondente allo stato
limite di danno significativo

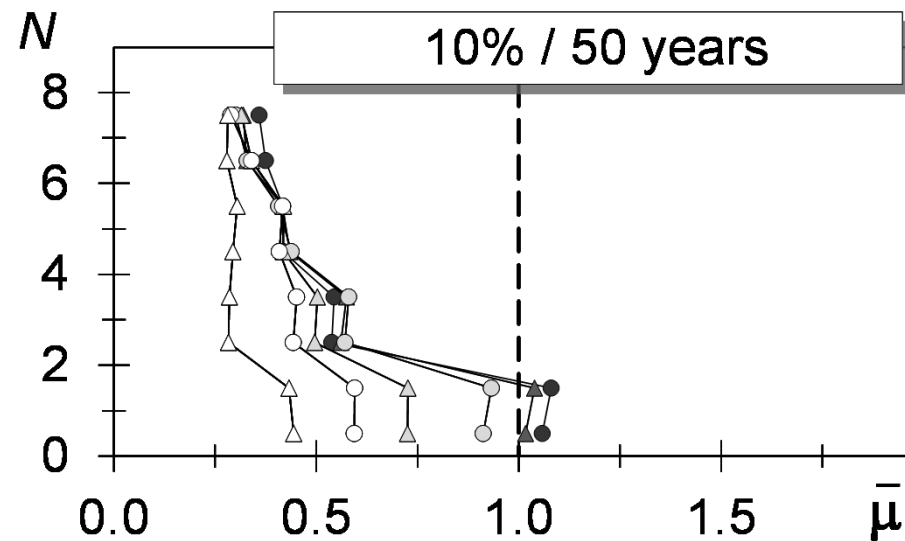
$$\bar{\mu} = \frac{\mu}{\mu_{SD}}$$

$\bar{\mu} \geq 1.0$  I BRB superano lo stato limite e
la prestazione non è accettabile

Rapporto di duttilità dei BRB

(telaio a 8 piani, colonne non continue, $\Delta_d=1.5\%$)

\triangle $q = 2.5$ \circ $q = 3.5$ \triangle $q = 4.5$ \bullet $q = 5.5$ \blacktriangle $q = 6.5$ \bullet $q = 7.5$





La prestazione sismica richiesta dalla norma è ottenuta per un valore di q compreso tra 5.5 e 6.5

Richiesta di resistenza delle colonne

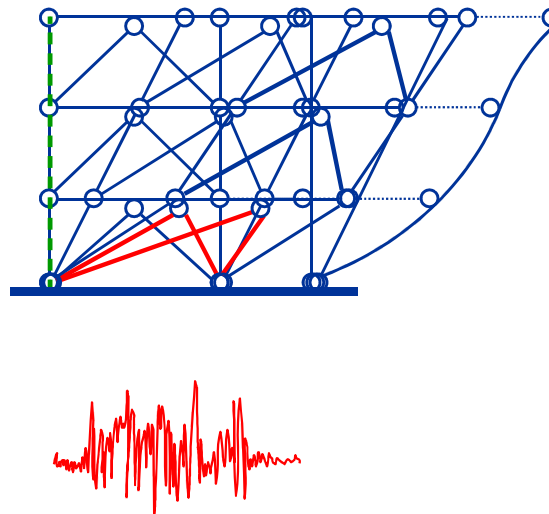
L'Eurocodice 8 richiede che sia evitata la plasticizzazione e l'instabilità delle colonne

Le indicazioni dell'Eurocodice 3 sono state utilizzate per sintetizzare l'esito delle verifiche attraverso due indici di resistenza:

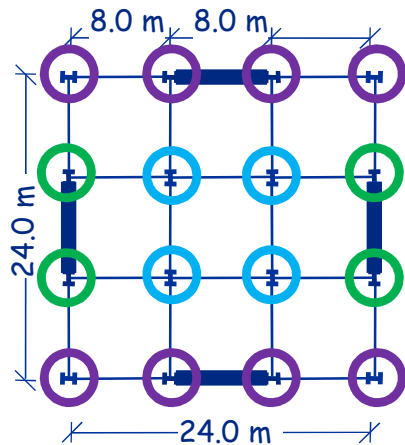
- Indice IR $IR \geq 1.0$  Plasticizzazione
- Indice IS $IS \geq 1.0$  Instabilità

Come eseguire le verifiche di resistenza delle colonne?

Nelle colonne c'è sforzo normale. Ma durante il sisma nasce anche momento flettente perché sono continue.



Richiesta di resistenza delle colonne



Sisma

Nelle colonne nasce momento flettente perché sono continue

Colonne del telaio controventato (flessione attorno all'asse forte)

Colonne per carichi verticali (flessione attorno all'asse forte)

Colonne per carichi verticali (flessione attorno all'asse debole)

Indice di Resistenza plastica IR

Flessione attorno all'asse forte


$$IR = \begin{cases} \frac{M}{M_{Rd,y}} & : \text{per } \frac{N}{N_{Rd}} \leq 0.5 \alpha \\ \frac{N}{N_{Rd}} + (1 - 0.5 \alpha) \frac{M}{M_{Rd,y}} & : \text{per } \frac{N}{N_{Rd}} > 0.5 \alpha \end{cases}$$

N = sforzo normale

M = Momento flettente

N_{Rd} = Resistenza plastica

M_{Rd} = Momento resistente

$IR \geq 1.0$  Le colonne superano lo stato limite e la prestazione non è accettabile

Indice di Stabilità IS

Flessione attorno all'asse forte


$$IS = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{N}{N_{b,Rd,y}} + k_{yy} \frac{M}{M_{Rd,y}} \\ \frac{N}{N_{b,Rd,z}} \end{array} \right.$$

N = sforzo normale

M = Momento flettente

$N_{b,Rd,y}$ = Resistenza all'instabilità, asse forte

$M_{Rd,y}$ = Momento resistente, asse forte

$IS \geq 1.0$  Le colonne superano lo stato limite e la prestazione non è accettabile

Indice di Stabilità IS

Flessione attorno all'asse debole


$$IS = \frac{N}{N_{b,Rd,z}} + k_{zz} \frac{M}{M_{Rd,z}}$$

N = sforzo normale

M = Momento flettente

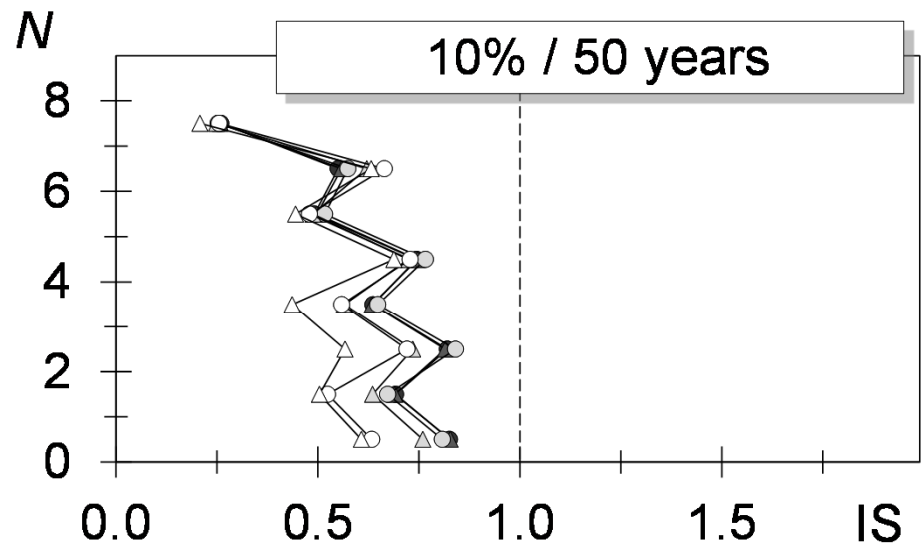
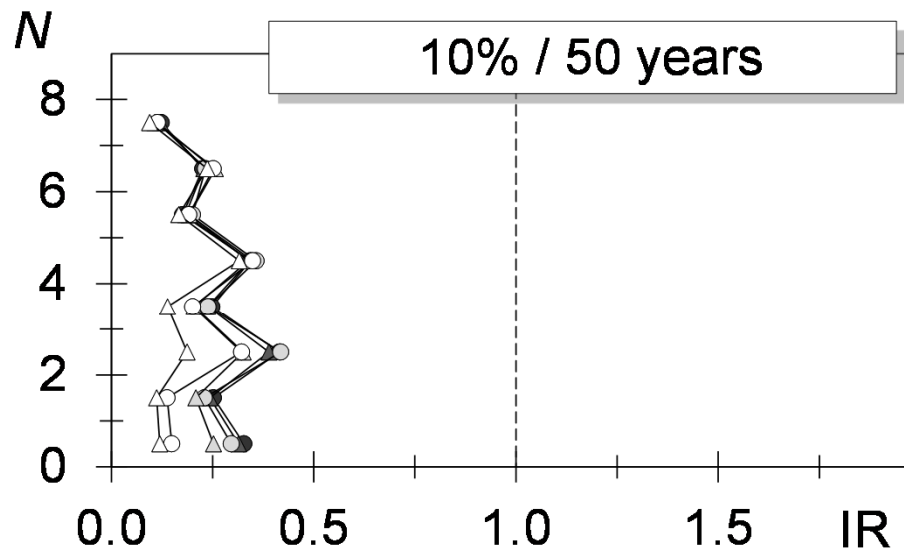
$N_{b,Rd,z}$ = Resistenza all'instabilità, asse forte

$M_{Rd,z}$ = Momento resistente, asse forte

$IS \geq 1.0$  Le colonne superano lo stato limite e la prestazione non è accettabile

Colonne del telaio controventato (telaio a 8 piani, colonne continue, $\Delta_d=1.5\%$)

\triangle $q = 2.5$ \circ $q = 3.5$ \triangle $q = 4.5$ \bullet $q = 5.5$ \blacktriangle $q = 6.5$ \bullet $q = 7.5$



Indipendentemente dal valore di q , le colonne del telaio controventato non raggiungono né la plasticizzazione né l'instabilità.

Altre colonne

(telaio a 8 piani, colonne continue, $\Delta_d=1.5\%$)

Le verifiche hanno avuto esito positivo
indipendentemente dal valore di q per tutte le colonne
dell'edificio

Fattore di struttura

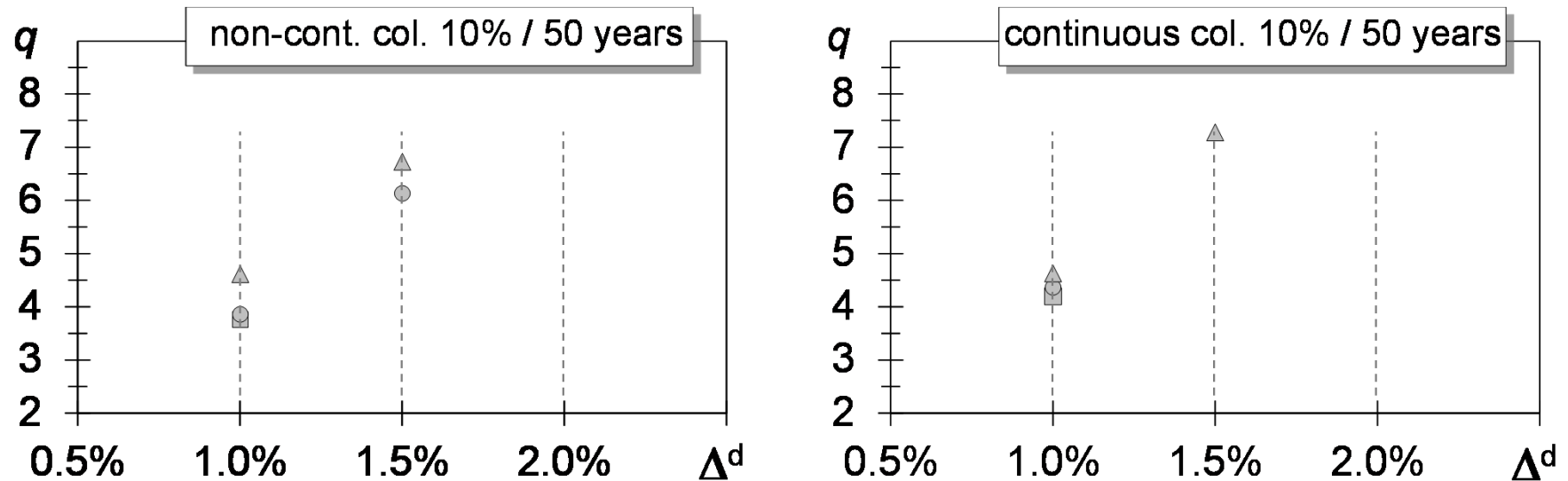
Δ 4 piani

\circ 8 piani

\square 12 piani

$\triangle \circ \square$ Duttilità

$\blacktriangle \bullet \blacksquare$ Resistenza colonne



Il rispetto della condizione sulla duttilità richiede valori di q che crescono con Δ_d

Qualunque valore di q consente di soddisfare le verifiche di resistenza delle colonne

Fattore di struttura

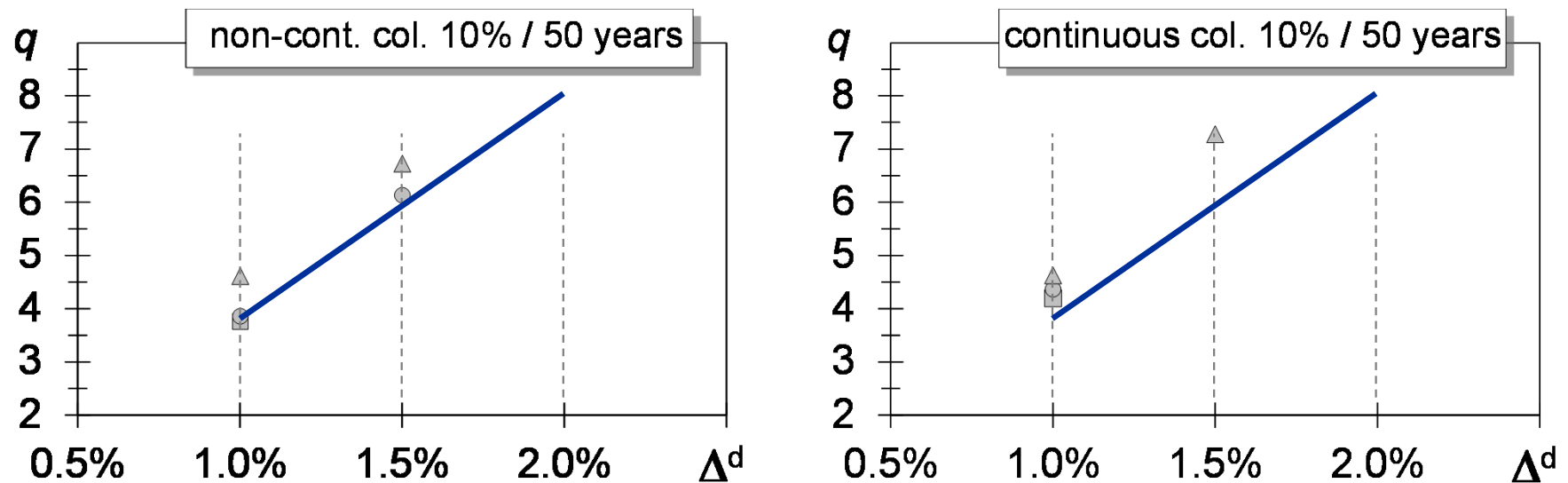
△ 4 piani

○ 8 piani

□ 12 piani

△ ○ □ Duttilità

▲ ● ■ Resistenza colonne



Se si usa il fattore di struttura calcolato con la seguente formula, si ottengono telai in grado di soddisfare la prestazione richiesta dalla Normativa

$$q_{\max} = 425 \Delta^d (\%) - 0.50$$