

Corsi di aggiornamento  
**Progettazione strutturale e  
 Norme Tecniche per le Costruzioni 2008**

Villa Redenta, Spoleto  
 settembre 2010 - maggio 2011

Organizzati da Aurelio Ghersi

Con il patrocinio degli Ordini degli ingegneri delle province di  
 Perugia, Oristano, Parma, Ascoli Piceno, Ancona, Rimini, Teramo,  
 Terni e dell'ATE, Associazione Tecnologi dell'Edilizia



Corso di aggiornamento  
**Progettazione strutturale e  
 Norme Tecniche per le Costruzioni 2008**

**Problemi specifici nel progetto  
 di strutture antisismiche in acciaio**

1 - Tipologie strutturali e problematiche generali

Spoleto  
 4-5 febbraio 2011

Aurelio Ghersi

**Tipologie strutturali**

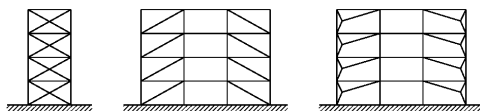
- Strutture intelaiate
  - La risposta ad azioni sismiche è prevalentemente flessionale
  - I collegamenti trave-colonna devono trasmettere momento flettente
  - La struttura può essere molto duttile (diffusa plasticizzazione delle sezioni)
  - La struttura è molto deformabile

**Tipologie strutturali**

- Strutture con controventi concentrici
  - Sono aggiunte diagonali
  - La risposta ad azioni sismiche è prevalentemente estensionale
  - I collegamenti trave-colonna possono essere (e in genere sono) a cerniera
  - La struttura non è molto duttile (si plasticizzano solo le diagonali)
  - La struttura è adeguatamente rigida

**Tipologie strutturali**

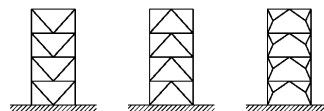
- Strutture con controventi concentrici  
 Possibili schemi strutturali:
  - Controventi a croce (o a X) o schemi equivalenti



La resistenza alle azioni orizzontali e la capacità dissipativa è affidata solo alle diagonali tese

**Tipologie strutturali**

- Strutture con controventi concentrici  
 Possibili schemi strutturali:
  - Controventi a V

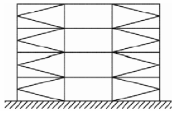


La resistenza alle azioni orizzontali è affidata sia alle diagonali tese che a quelle compresse

L'instabilizzazione delle diagonali compresse provoca flessione nella trave

### Tipologie strutturali

- Strutture con controventi concentrici
- Nota. Non sono considerati dissipativi:
- Controventi a K



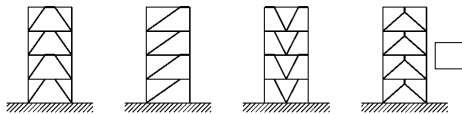
L'instabilizzazione delle diagonali compresse provoca flessione nella colonna e quindi un meccanismo di collasso non dissipativo

### Tipologie strutturali

- Strutture con controventi eccentrici
  - Le diagonali non convergono nel nodo
  - Rimangono tratti soggetti a flessione e taglio (link)
  - La risposta ad azioni sismiche è sia estensionale che flessionale
  - La struttura è duttile (i link si plasticizzano e dissipano energia)
  - La struttura è sufficientemente rigida

### Tipologie strutturali

- Strutture con controventi eccentrici
- Possibili schemi strutturali:

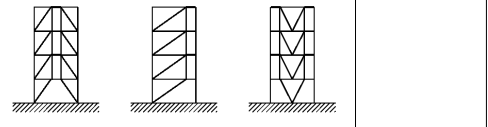


La plasticizzazione dei link a un piano riduce fortemente la rigidezza e cambia il comportamento dinamico (meccanismo di piano soffice)

Ma questo può avvenire anche per telai con controventi concentrici

### Tipologie strutturali

- Strutture con controventi eccentrici
- Possibili schemi strutturali:
- un'alternativa



L'aggiunta di aste verticali (tie) impedisce la formazione di meccanismi di piano

### Tipologie strutturali

- Altre tipologie strutturali
  - Strutture a pendolo capovolto
  - Strutture "duali", con telai resistenti a flessione accoppiati a controventi
  - Strutture con telai resistenti a flessione accoppiate a tamponamenti rigidi
  - Strutture con nuclei in cemento armato (che portano sostanzialmente l'azione sismica)

Progettazione strutturale  
in zona sismica

## Stati limite da verificare

- SLD - Stato Limite di Danno
  - Si usa lo spettro di risposta elastico, con accelerazioni corrispondenti ad un periodo di ritorno basso
  - Si ipotizza un comportamento elastico (non dissipativo)
- SLV - Stato Limite di salvaguardia della Vita
  - Si usa lo spettro di risposta di progetto, con accelerazioni corrispondenti ad un periodo di ritorno alte e riduzione per fattore di struttura  $q$
  - Si ipotizza un comportamento dissipativo, con classe di duttilità A (alta) o B (bassa)
    - ↳ EC8: M (media)

## SLV

### Stato Limite di salvaguardia della Vita

- È possibile progettare allo SLV ipotizzando un comportamento non dissipativo ( $q \leq 2$ ) ?
  - Norma italiana:
 

"Nel comportamento strutturale dissipativo, cui ci si riferisce quando si progetta per gli stati limite ultimi ..."

NTC08, punto 7.2.1
  - Norma europea:
 

"Per gli edifici che non sono isolati sismicamente, la progettazione poco dissipativa è raccomandata solo per casi di bassa sismicità."

EC8, punto 6.1.2 (4)

Ma, in generale, è possibile progettare con  $q$  basso, se si garantisce comunque una discreta duttilità

## Strutture (intelaiate) in acciaio: comportamento e verifiche richieste

## SLV: buon comportamento dissipativo

Occorre garantire:

- Duttilità locale
 

Le zone dissipative devono potersi deformare plasticamente senza riduzione di resistenza, fino ad elevati valori della deformazione plastica
- Duttilità globale
 

Si deve raggiungere il collasso secondo il modello di comportamento previsto

Le zone dissipative si devono plasticizzare, mentre le altre devono rimanere in campo elastico

## Duttilità locale

Dipende da:

- Duttilità del materiale
 

La duttilità è garantita da prescrizioni su limiti minimi del rapporto  $f_{yk}/f_y$  e del valore di  $\epsilon_u$

$$\frac{f_{yk}}{f_y} \geq 1.2 \quad \epsilon_u \geq 0.20$$

Nelle connessioni bullonate (per gli elementi sismoresistenti) occorre usare bulloni di classe 8.8 o 10.9

Non so bene cosa c'entri con la duttilità

EC8, punto 6.2 (9)

NTC08, punto 11.3.4.9

## Duttilità locale

Dipende da:

- Duttilità del materiale
- Comportamento della sezione
 

Occorre evitare l'instabilità locale. Quindi:

  - Si devono usare sezioni di classe 1 e 2

Classe di duttilità	Valore di riferimento del fattore di struttura $q_0$	Classe di sezione trasversale richiesta
CD "B"	$2 < q_0 \leq 4$	Classe 1 o 2
CD "A"	$q_0 > 4$	Classe 1

NTC08, punto 7.5.3.1

## Duttilità locale

Dipende da:

- Duttilità del materiale
- Comportamento della sezione

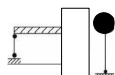
Occorre evitare l'instabilità locale. Quindi:

- Si deve limitare lo sforzo normale

$$N_{Ed} \leq 0.3 N_{pl,Rd}$$

Questa indicazione si riferisce alle sezioni in cui si svolge essenzialmente la dissipazione:

- Travi (se ci sono controventi di piano)
- Colonne (solo per particolari meccanismi di collasso)



Circolare, punto C7.5.2.1

Ma è bene evitare comunque valori eccessivi di  $N_{Ed}$

## Duttilità locale

Dipende da:

- Duttilità del materiale
- Comportamento della sezione
- Comportamento della sezione in presenza di fori

La resistenza ultima della sezione in corrispondenza ai fori deve essere maggiore della resistenza a plasticizzazione della sezione non forata

per asta tesa  $\frac{A_{res}}{A} \geq 1.1 \frac{\gamma_{M2}}{\gamma_{M0}} \frac{f_{yk}}{f_{uk}}$

Nota: analoga condizione si deve imporre alle aste inflesse

NTC08, punto 7.5.3.2

## Duttilità locale

Dipende da:

- Duttilità del materiale
- Comportamento della sezione
- Comportamento della sezione in presenza di fori
- Resistenza dei collegamenti

Il collegamento deve essere a completo ripristino di resistenza (cioè la resistenza ultima del collegamento deve essere maggiore della resistenza a plasticizzazione della sezione, in modo che sia la sezione e non il collegamento a dissipare energia)

$$R_{j,d} \geq 1.1 \gamma_{Rd} R_{pl,Rd}$$

L'EC8, punto 6.5.3 (9), consente plasticizzazioni nelle connessioni

NTC08, punto 7.5.3.3

## Duttilità globale

Occorre controllare:

- Caratteristiche del materiale

Per un buon comportamento globale occorre evitare una eccessiva sovrarresistenza

$$f_{y,max} \leq 1.2 f_{yk}$$

$$f_{y,max} \leq 1.1 \gamma_{ov} f_{yk}$$

EC8, punto 6.2 (3)

Nei calcoli si terrà conto di questa possibile sovrarresistenza mediante il coefficiente di sovrarresistenza

$$\gamma_{Rd} = f_{y,m} / f_{yk}$$

$\gamma_{ov}$  per EC8

Acciaio	$\gamma_{Rd} = \frac{f_{y,m}}{f_{yk}}$
S 235	1.20
S 275	1.15
S 355	1.10
S 420	1.10
S 460	1.10

NTC08, punto 11.3.4.9

Attenzione: questo  $\gamma_{Rd}$  crea confusione, perché già usato con altro significato

## Duttilità globale

Occorre controllare:

- Caratteristiche del materiale

Per un buon comportamento globale occorre evitare una eccessiva sovrarresistenza

- La normativa italiana richiede di tenere espressamente conto del coefficiente di sovrarresistenza  $\gamma_{Rd}$  nel calcolo
- La normativa europea consente di:
  - Tenere conto di  $\gamma_{ov}$  nel calcolo
  - Effettuare il calcolo con un unico valore di  $f_y$ , tenendo conto di  $\gamma_{ov}$  solo per i collegamenti, e poi usare nelle zone non dissipative un acciaio con  $f_y$  più grande del valore  $f_{y,max}$  che si ha nelle zone dissipative

## Duttilità globale

Occorre controllare:

- Resistenza delle travi

Non deve essere ridotta dalla presenza di sforzo normale e momento flettente

$$N_{Ed} \leq 0.15 N_{pl,Rd}$$

$$V_{Ed} \leq 0.5 V_{pl,Rd}$$

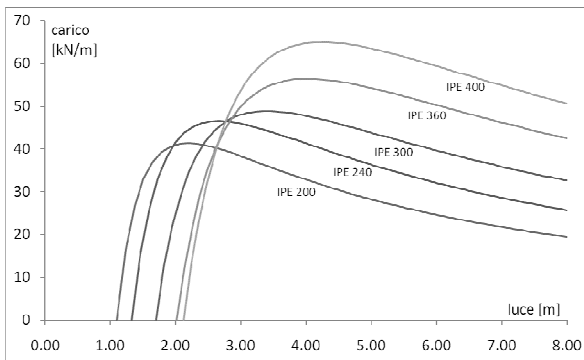
- La prima condizione è in genere rispettata (ma attenzione nel caso di controventi di piano)
- La seconda condizione potrebbe condizionare la scelta della sezione, in funzione del carico, tenendo presente che

$$V_{Ed} = \frac{q l}{2} + \frac{2 M_{pl,Rd}}{l}$$

NTC08, punto 7.5.4.1

EC8, punto 6.6.2

## Travi: carico massimo in funzione della luce



## Duttilità globale

Occorre controllare:

### • Resistenza delle colonne

Le NTC08 e l'EC8 forniscono una indicazione specifica, diversa da quella contenuta nella parte generale

$$N_{Ed} = N_{Ed,G} + 1.1 \gamma_{Rd} \Omega N_{Ed,E}$$

$$M_{Ed} = M_{Ed,G} + 1.1 \gamma_{Rd} \Omega M_{Ed,E}$$

$$V_{Ed} = V_{Ed,G} + 1.1 \gamma_{Rd} \Omega V_{Ed,E}$$

Nota:

$$\gamma_{Rd} = f_{ym}/f_{yk}$$

$$1.1 = f_{uk}/f_{yk}$$

dove

G indica l'effetto dei carichi verticali

E indica l'effetto delle azioni sismiche di calcolo

$\Omega$  è il valore minimo di  $M_{pl,Rd} / M_{Ed}$  per le travi

Cosa vuol dire?

NTC08, punto 7.5.4.2

EC8, punto 6.6.3

## Duttilità globale

Occorre controllare:

### • Resistenza delle colonne

Che significato hanno le espressioni indicate?

Ritengo che  $\Omega$  sia da intendersi come il moltiplicatore del sisma che porta alla prima plasticizzazione delle travi

Ma allora, più correttamente

$$\Omega = \min \left( \frac{M_{pl,Rd} - M_{Ed,G}}{M_{Ed,E}} \right)_{travi}$$

In questo modo, i valori di calcolo nelle colonne sono quelli che corrispondono alla prima plasticizzazione delle travi

Nota: Oltre a trovare il minimo, sarebbe importante esaminare la distribuzione dei valori di  $\Omega$  nella struttura

## Duttilità globale

Occorre controllare:

### • Resistenza delle colonne

L'Ordinanza 3431 indicava

$$N_{Ed} = N_{Ed,G} + \Omega' N_{Ed,E}$$

$$M_{Ed} = M_{Ed,G} + \Omega' M_{Ed,E}$$

$$V_{Ed} = V_{Ed,G} + \Omega' V_{Ed,E}$$

con

$$\Omega' = \min \left( \frac{1.1 \gamma_{Rd} M_{pl,Rd} - M_{Ed,G}}{M_{Ed,E}} \right)_{travi}$$

dove  $\Omega'$  sarebbe il moltiplicatore che porta alla resistenza massima della trave (ipotizzando analisi lineare)

## Duttilità globale

Occorre controllare:

### • Resistenza delle colonne

- Si richiede inoltre che

$$V_{Ed} \leq 0.5 V_{pl,Rd}$$

Si noti che questa prescrizione è riferita al valore di calcolo  $V_{Ed}$  e non al valore massimo possibile ( $2 M_{N,Rd} / l$ )

- La norma prescrive anche che

"Nelle colonne in cui si attende la formazione di cerniere plastiche, le sollecitazioni devono essere calcolate nell'ipotesi che nelle cerniere plastiche il momento flettente sia pari a  $M_{pl,Rd}$ " (NTC08)

"La verifica consideri che in queste cerniere plastiche il momento sollecitante sia uguale a  $M_{pl,Rd}$ " (EC8)

Cosa vuol dire?  $M_{pl,Rd}$  è probabilmente il valore che si ha per  $N \leq 0.5 N_{pl,Rd}$ . Equivale allora ad una limitazione di  $N$ ?

## Duttilità globale

Occorre controllare:

### • Resistenza delle colonne

Occorre applicare il principio generale di gerarchia delle resistenze

$$\sum M_{c,pl,Rd} \geq \gamma_{RD} \sum M_{b,pl,Rd}$$

con  $\gamma_{RD} = 1.3$  o  $1.1$  (per classe A o B)

Notare la confusione di simboli (nella parte generale si usa a questo scopo  $\gamma_{Rd}$  che qui ha un altro significato)

Questa regola è un doppione della prima indicazione (e in genere è più gravosa)

NTC08, punto 7.5.4.3

Non c'è nell'EC8

## Duttilità globale

Occorre controllare:

- Resistenza delle colonne

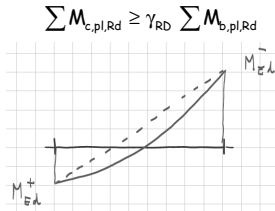
Riflessione:

Tipico diagramma di  $M$  ( $q+F$ )

Nelle strutture in c.a. si mette l'armatura strettamente necessaria, quindi

$$M_{Rd}^+ < M_{Rd}^-$$

Gli estremi della trave si possono plasticizzare contemporaneamente



NTC08, punto 7.5.4.3

Non c'è nell'EC8

## Duttilità globale

Occorre controllare:

- Resistenza delle colonne

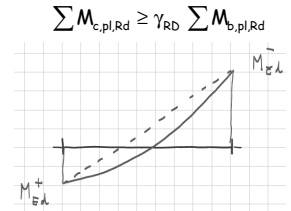
Riflessione:

Tipico diagramma di  $M$  ( $q+F$ )

Nelle strutture in acciaio si ha sempre

$$M_{Rd}^+ = M_{Rd}^-$$

Un estremo della trave si plasticizza parecchio dopo l'altro



NTC08, punto 7.5.4.3

Non c'è nell'EC8

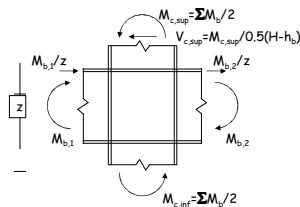
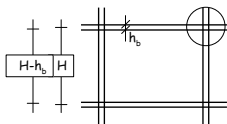
## Duttilità globale

Occorre controllare:

- Resistenza dei pannelli nodali

Occorre valutare la sollecitazione nel pannello nodale e verificarne la resistenza per plasticizzazione e per instabilità

- Sollecitazione



NTC08, punto 7.5.4.5

## Duttilità globale

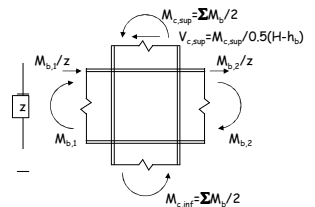
Occorre controllare:

- Resistenza dei pannelli nodali

Occorre valutare la sollecitazione nel pannello nodale e verificarne la resistenza per plasticizzazione e per instabilità

- Sollecitazione

$$V_{wp,Ed} = \frac{M_{b,1}}{z} + \frac{M_{b,2}}{z} - V_{c,sup} = \sum M_b \left( \frac{1}{z} - \frac{1}{H-h_b} \right) = \gamma_{RD} \sum M_{b,pl,Rd}$$



Circolare, punto C7.5.4.5

## Duttilità globale

Occorre controllare:

- Resistenza dei pannelli nodali

Occorre valutare le sollecitazioni nel pannello nodale e verificarne la resistenza per plasticizzazione e per instabilità

- Resistenza a plasticizzazione

Criterio di Von Mises

$$\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq f_y \quad \Leftrightarrow \quad \tau \leq \frac{f_y}{\sqrt{3}} \sqrt{1 - \left( \frac{\sigma}{f_y} \right)^2}$$

$$V_{wp,Rd} = \frac{f_y}{\sqrt{3}} A_{vc} \sqrt{1 - \left( \frac{\sigma}{f_y} \right)^2}$$

Circolare, punto C7.5.4.5