

# Progettazione strutturale 2M A

---

Progetto di una struttura in c.a. :  
progetto delle travi a taglio  
in zona sismica

Ing. Davide Lavorato  
davide.lavorato@uniroma3.it

# Progetto struttura: progetto travi a taglio

---

- Non uso il diagramma di involuppo del taglio!!! Nel modello 3D elastico della struttura non sono incluse le cerniere plastiche
  - Progetto la struttura affinché si formino le cerniere plastiche all'interno delle zone critiche alle estremità della trave!!!
  - Devo garantire la dissipazione dell'energia in cerniera plastica. Sto progettando in classe di duttilità A!!!!
  - Cerco il massimo taglio Ved agente quando si sono formate le cerniere plastiche alle estremità delle travi!!!
  - Per calcolare Ved devo considerare tutte le armature a flessione!!! Compresi i reggi-staffe!!!!
-

# Progetto struttura: armature a taglio nelle travi

---

□ Calcolo Ved con un sottoschema di trave dove:

- *Simulo la formazione delle cerniere plastiche alla estremità delle travi*
  - *Considero le reazioni a rotazione dovute alle armature a flessione nella cerniera*
  - *Ricordo che le armature hanno una sovra-resistenza: maggiore resistenza rispetto al legame di norma per acciaio (vero snervamento, incrudimento,...)*
  - *Includo gli effetti dei carichi verticali sismici distribuiti!!!*
-

# Progetto struttura: sollecitazioni taglio

## 7.4.4.1 Travi

### 7.4.4.1.1 Sollecitazioni di calcolo

I momenti flettenti di calcolo, da utilizzare per il dimensionamento o verifica delle travi, sono quelli ottenuti dall'analisi globale della struttura per le combinazioni di carico di cui al § 3.2.4.

Al fine di escludere la formazione di meccanismi inelastici dovuti al taglio, le sollecitazioni di taglio di calcolo  $V_{Ed}$  si ottengono sommando il contributo dovuto ai carichi gravitazionali agenti sulla trave, considerata incernierata agli estremi, alle sollecitazioni di taglio corrispondenti alla formazione delle cerniere plastiche nella trave e prodotte dai momenti resistenti  $M_{b,Rd,1,2}$  delle due sezioni di plasticizzazione (generalmente quelle di estremità) determinati come indicato in § 4.1.2.1.2, amplificati del fattore di sovraresistenza  $\gamma_{Rd}$  assunto pari, rispettivamente, ad 1,20 per strutture in CD "A", ad 1,00 per strutture in CD "B" (v. Fig. 7.4.1).

Per ciascuna direzione e ciascun verso di applicazione delle azioni sismiche, si considerano due valori di sollecitazione di taglio, massimo e minimo, ipotizzando rispettivamente la presenza e l'assenza dei carichi variabili e momenti resistenti  $M_{b,Rd,1,2}$ , da assumere in ogni caso di verso concorde sulla trave.

Nei casi in cui le cerniere plastiche non si formino nella trave ma negli elementi che la sostengono, le sollecitazioni di taglio sono calcolate sulla base della resistenza di questi ultimi.



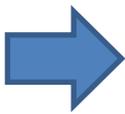
# Progetto struttura: capacity design

## C7.2 CRITERI GENERALI DI PROGETTAZIONE E MODELLAZIONE

### C7.2.1 CRITERI GENERALI DI PROGETTAZIONE

Una volta attivati i meccanismi duttili, infatti, le sollecitazioni agenti sugli elementi fragili, sia a livello locale che a livello globale, per ovvi motivi di equilibrio si stabilizzano, rendendo l'attivazione dei meccanismi fragili altamente improbabile, come già detto.

Per scongiurare l'attivazione di possibili meccanismi fragili locali, viene utilizzata la regola di gerarchia delle resistenze sulle sollecitazioni. Per evitare la rottura prematura per meccanismo fragile della generica sezione critica, quest'ultima è progettata per sostenere sollecitazioni derivate da condizioni di equilibrio che tengano conto della formazione di cerniere plastiche e della



sovrarresistenza delle zone adiacenti. Ad esempio la resistenza di progetto nei confronti delle sollecitazioni di taglio viene determinata non sulla base dei valori forniti dal modello di calcolo, bensì sulla base delle resistenze cui sono associati meccanismi deformativi duttili, generalmente flessionali, opportunamente amplificate mediante il coefficiente di sovrarresistenza  $\gamma_{RD}$ .

# Progetto struttura: sottoschema

## C7.2 CRITERI GENERALI DI PROGETTAZIONE E MODELLAZIONE

### C7.2.1 CRITERI GENERALI DI PROGETTAZIONE

Nei casi in cui le cerniere siano di tipo flessionale, nel rispetto dei criteri della gerarchia delle resistenze, le sollecitazioni di taglio  $V_{Ed}$  da utilizzare all'atto della verifica di resistenza si ottengono garantendo l'equilibrio dell'intero elemento strutturale o della sua porzione alle cui estremità si ammette la formazione delle cerniere plastiche. Esso è dunque soggetto ai carichi gravitazionali valutati nella condizione sismica e, nelle sezioni di estremità, ai momenti resistenti  $M_{Rb,i}$  delle sezioni plasticizzate amplificati dal fattore di sovraresistenza  $\gamma_{Rd}$ , come mostrato in Fig. C7.2.1 per una generica porzione di trave.

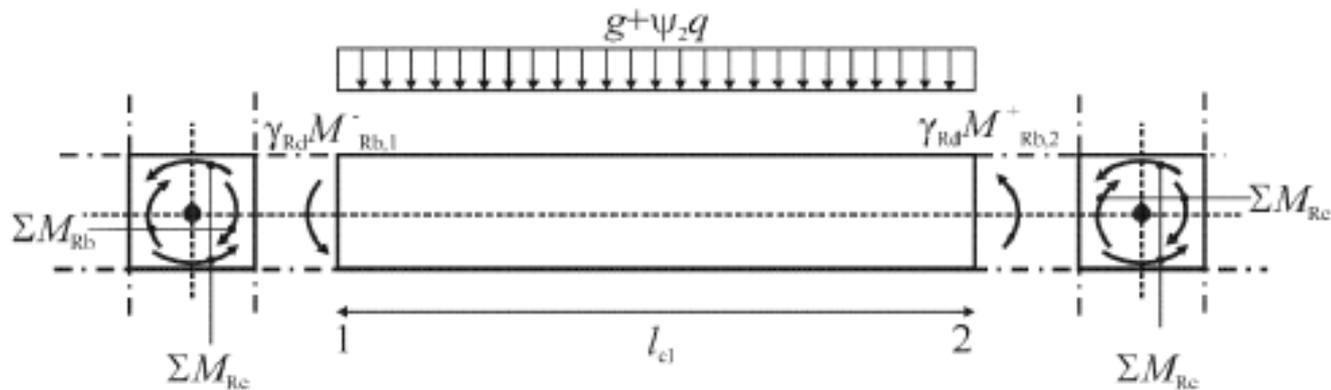


Figura C7.2.1 – Equilibrio dei momenti per il calcolo delle sollecitazioni di taglio di calcolo  $V_{Ed}$

# Progetto struttura: sovra-resistenza

---

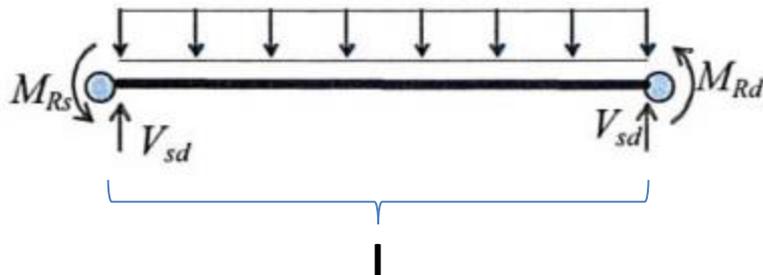
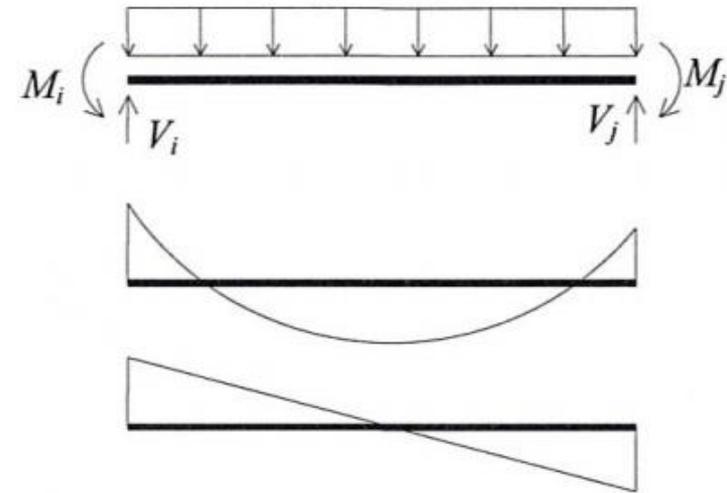
## C7.2 CRITERI GENERALI DI PROGETTAZIONE E MODELLAZIONE

### C7.2.1 CRITERI GENERALI DI PROGETTAZIONE

Nei telai, per scongiurare l'attivazione di meccanismi fragili globali, come il meccanismo di "piano debole" che comporta la plasticizzazione, anticipata rispetto alle travi, di gran parte dei pilastri di un piano, il progetto delle zone dissipative dei pilastri è effettuato considerando le sollecitazioni corrispondenti alla resistenza delle zone dissipative delle travi amplificata mediante il coefficiente  $\gamma_{Rd}$  che vale 1,3 in CD "A" e 1,1 per CD "B".

# Progetto struttura: sottoschema

- Al crescere delle azioni, alle estremità delle travi si devono formare delle cerniere plastiche per dissipare energia
- Equilibrio dei momenti rispetto a un estremo ci fornisce il taglio  $V_{sd} = V_{ed}$ . Si considerano effetti:
  - *sovra-resistenza (fattore  $\gamma_{Rd}$ )*
  - *Momenti resistenti ( $M_{Rd}$ ) alle estremità (se “tirano” sopra o sotto sono in genere diversi!!)*
  - *carichi verticali ( $G_k$  e  $Q_k$ ) da comb. sismica (NB qui caso particolare accidentali appartamento coeff. 0.3!!!)*



$$V_{sd} = \gamma_{Rd} \cdot \frac{M_{Rs} + M_{Rd}}{l} \pm \frac{(G_k + [0.3 Q_k])l}{2}$$

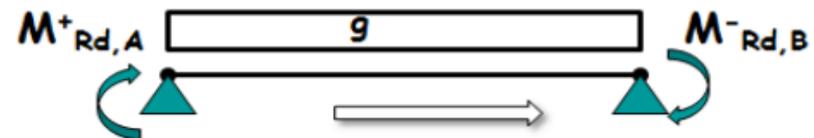
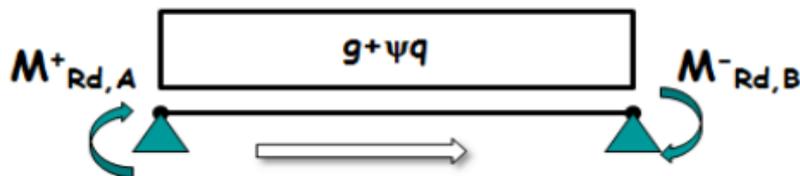
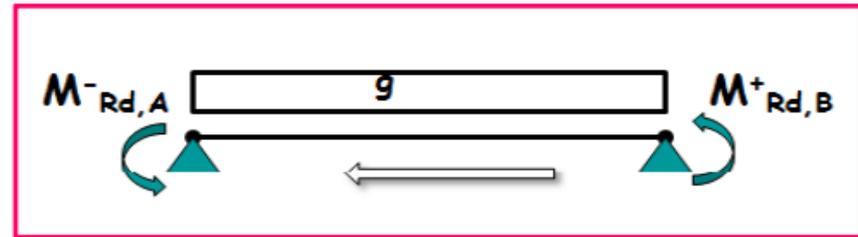
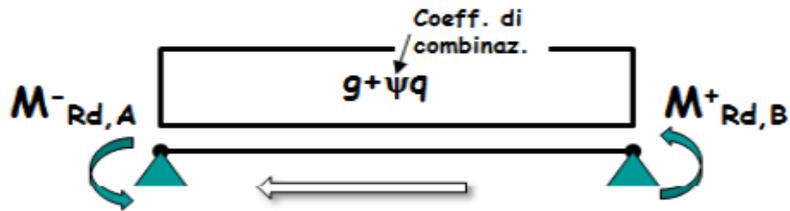
Contributo  
Mom. Resistenti  
amplificati!!

Contributo  
Car. sismici verticali

# Progetto struttura: sottoschemi

□ Considero quattro sotto-schemi distinti perché:

- Posso avere o non avere carico accidentale  $Q_k$
- Momenti resistenti ( $M_{rd}$ ) sempre concordi possono avere versi di rotazione orari o antiorari (effetti oscillazioni terremoto)



$$V_{A,g+q} = V_{g+\psi q} + \gamma_{Rd} \frac{M^-_{Rd,A} + M^+_{Rd,B}}{L_{cl}}$$

$$V_{B,g+q} = V_{g+\psi q} + \gamma_{Rd} \frac{M^+_{Rd,A} + M^-_{Rd,B}}{L_{cl}}$$

$$V_{A,g} = V_g + \gamma_{Rd} \frac{M^-_{Rd,A} + M^+_{Rd,B}}{L_{cl}}$$

$$V_{B,g} = V_g + \gamma_{Rd} \frac{M^+_{Rd,A} + M^-_{Rd,B}}{L_{cl}}$$

□ NB cerco taglio massimo e minimo!!! Loro rapporto deve essere valutato!!!

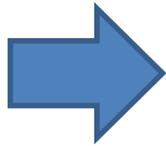
# Progetto struttura: taglio in zona sismica

## 7.4.4.1.2.2 Taglio

Per le strutture in CD" B", la resistenza a taglio nei confronti delle sollecitazioni determinate come indicato nel § 7.4.4.1.1 è calcolata come indicato nel § 4.1.2.1.3.

Per le strutture in CD" A", vale quanto segue:

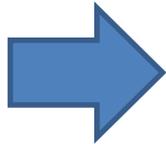
- la resistenza a taglio si calcola come indicato in § 4.2.1.3 assumendo nelle zone critiche  $\text{ctg}\theta = 1$ ;
- Se nelle zone critiche il rapporto tra il taglio minimo e quello massimo risulta inferiore a -0,5, e se il maggiore tra i valori assoluti dei due tagli supera il valore:



$$V_{R1} = \left( 2 - \left| \frac{V_{Ed,\min}}{V_{Ed,\max}} \right| \right) \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d \quad (7.4.2)$$

dove  $b_w$  è la larghezza dell'anima della trave e  $d$  è l'altezza utile della sua sezione, allora nel piano verticale di inflessione della trave devono essere disposti due ordini di armature diagonali, l'uno inclinato di  $+45^\circ$  e l'altro di  $-45^\circ$  rispetto all'asse della trave.

La resistenza deve essere affidata per metà alle staffe e per metà ai due ordini di armature inclinate, per le quali deve risultare



$$V_{Ed,\max} \leq \frac{A_s \cdot f_{yd}}{\sqrt{2}} \quad (7.4.3)$$

dove  $A_s$  è l'area di ciascuno dei due ordini di armature inclinate.

# Progetto struttura: sovra-resistenza

- ❑ Abbiamo calcolato momenti resistenti  $M_{rd}$  con legame acciaio secondo normativa NTC 2008
- ❑ La tensione massima dell'acciaio è  $f_{yd}$

## 4.1.2.1.2.3 Diagrammi di calcolo tensione-deformazione dell'acciaio

Per il diagramma tensione-deformazione dell'acciaio è possibile adottare opportuni modelli rappresentativi del reale comportamento del materiale, modelli definiti in base al valore di calcolo  $\epsilon_{ud} = 0,9\epsilon_{uk}$  ( $\epsilon_{uk} = (A_{gt})_k$ ) della deformazione uniforme ultima, al valore di calcolo della tensione di snervamento  $f_{yd}$  ed al rapporto di sovraresistenza  $k = (f_t / f_y)_k$  (Tab. 11.3.Ia-b).

In Fig. 4.1.2 sono rappresentati i modelli  $\sigma$ - $\epsilon$  per l'acciaio: (a) bilineare finito con incrudimento; (b) elastico-perfettamente plastico indefinito.

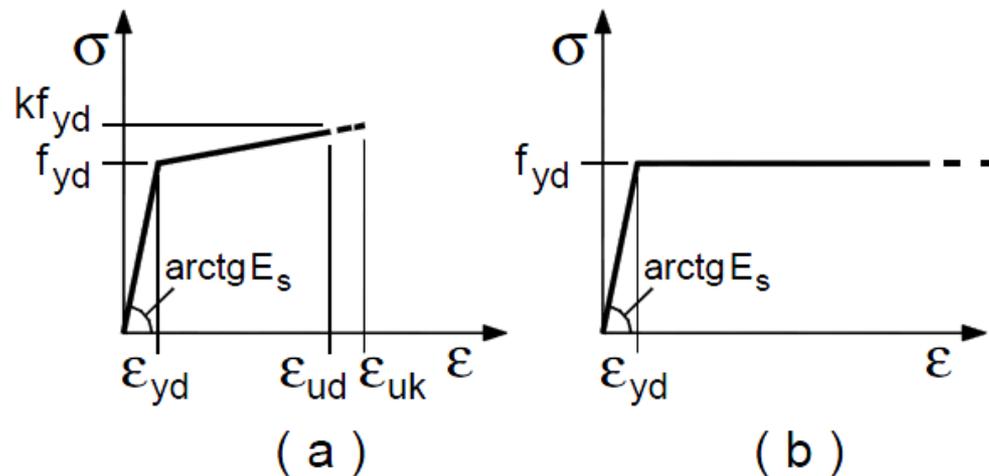
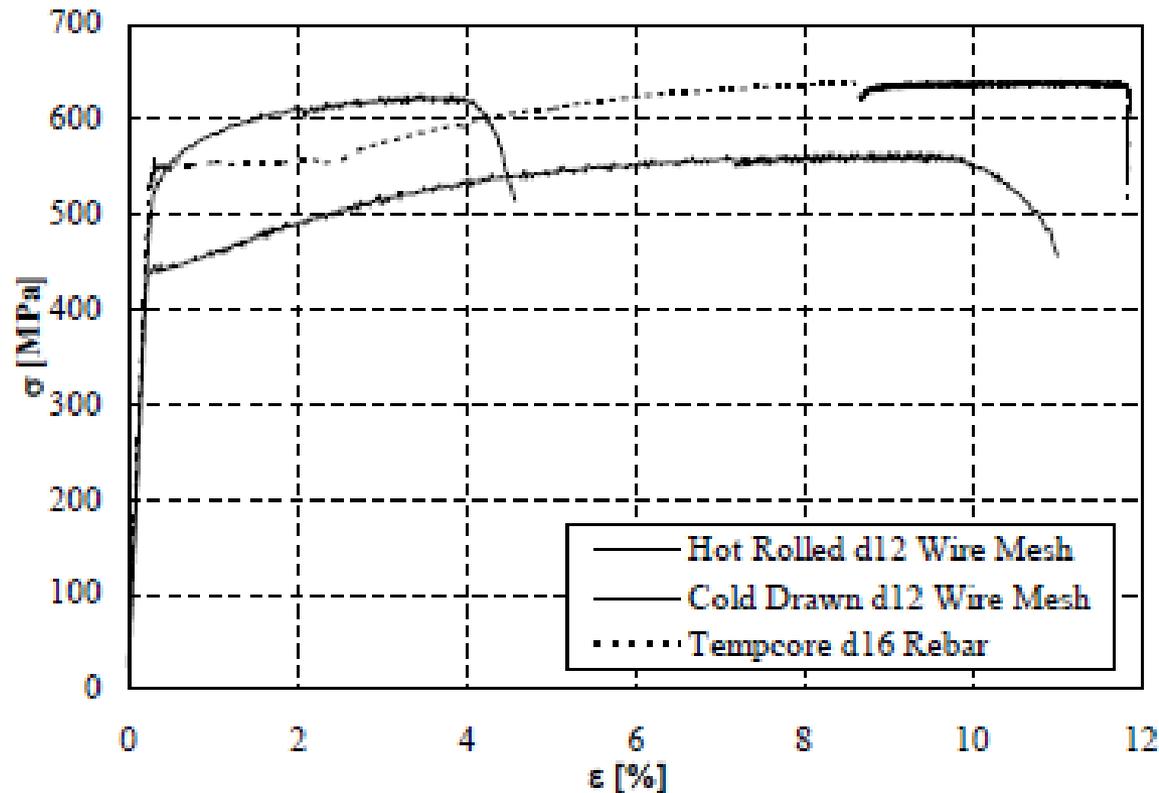


Figura 4.1.2– Modelli  $\sigma$ - $\epsilon$  per l'acciaio

# Progetto struttura: sovra-resistenza

- ❑ L'acciaio se provato ha resistenze massime più elevate rispetto a  $f_{yd}$



- ❑ Cerco il taglio massimo  $V_{ed}$  che dipende dai massimi momenti resistenti
- ❑ Dovrei calcolare i momenti resistenti usando la vera resistenza dell'acciaio

# Progetto struttura: sovra-resistenza

☐ L'acciaio nella NTC2008 ha dei limiti ben precisi per le resistenze!!!

## 11.3.2.1 Acciaio per cemento armato B450C

L'acciaio per cemento armato B450C è caratterizzato dai seguenti valori nominali delle tensioni caratteristiche di snervamento e rottura da utilizzare nei calcoli:

Tabella 11.3.Ia

$f_{y\ nom}$	450 N/mm <sup>2</sup>
$f_{t\ nom}$	540 N/mm <sup>2</sup>

e deve rispettare i requisiti indicati nella seguente Tab. 11.3.Ib:

Tabella 11.3.Ib

CARATTERISTICHE	REQUISITI	FRATTILE (%)
Tensione caratteristica di snervamento $f_{yk}$	$\geq f_{y\ nom}$	5.0
Tensione caratteristica di rottura $f_{tk}$	$\geq f_{t\ nom}$	5.0
$(f_t/f_y)_k$	$\geq 1,15$	10.0
$(f_y/f_{y\ nom})_k$	$< 1,35$	10.0
Allungamento $(A_{gt})_k$	$\geq 7,5\ %$	10.0
Diametro del mandrino per prove di piegamento a 90 ° e successivo raddrizzamento senza cricche:		
$\phi < 12\ mm$	4 $\phi$	
$12 \leq \phi \leq 16\ mm$	5 $\phi$	
per $16 < \phi \leq 25\ mm$	8 $\phi$	
per $25 < \phi \leq 40\ mm$	10 $\phi$	

☐ Snervamento più alto del nominale entro certi limiti!!!

☐ Tensione massima più alta della nominale ma entro certi limiti!!!

# Progetto struttura: sovra-resistenza

- ❑ Se l'acciaio B450C secondo NTC2008 deve rientrare nei limiti del §11 allora so che la resistenza massima non può superare un dato valore!!!
- ❑ Il fattore di sovra-resistenza ( $\gamma_{Rd}$ ) ci consente di incrementare opportunamente i valori dei momenti  $M_{rd}$  calcolati con  $f_{yd}$  secondo capitolo 4 delle NTC2008!!!!

## 7.4.4.1.1 Sollecitazioni di calcolo

I momenti flettenti di calcolo, da utilizzare per il dimensionamento o verifica delle travi, sono quelli ottenuti dall'analisi globale della struttura per le combinazioni di carico di cui al § 3.2.4.

Al fine di escludere la formazione di meccanismi inelastici dovuti al taglio, le sollecitazioni di taglio di calcolo  $V_{Ed}$  si ottengono sommando il contributo dovuto ai carichi gravitazionali agenti sulla trave, considerata incernierata agli estremi, alle sollecitazioni di taglio corrispondenti alla formazione delle cerniere plastiche nella trave e prodotte dai momenti resistenti  $M_{b,Rd,1,2}$  delle due sezioni di plasticizzazione (generalmente quelle di estremità) determinati come indicato in § 4.1.2.1.2, amplificati del fattore di sovraresistenza  $\gamma_{Rd}$  assunto pari, rispettivamente, ad 1,20 per strutture in CD "A", ad 1,00 per strutture in CD "B" (v. Fig. 7.4.1).

# Progetto struttura: verifica

---

- Verifica a taglio secondo NTC2008 con formule traliccio con angolo inclinazione bielle variabile !!!
- Rispetto i minimi di norma per le staffe (sismici (cap 4) e non sismici (cap 7))
- Fisso un diametro per le staffe e uso sempre questo diametro fuori e dentro zona critica!!! Dove serve infittisco il passo!!!

# Progetto struttura: VERIFICA A TAGLIO

## Verifica e progetto a taglio

### 4.1.2.1.3.2 Elementi con armature trasversali resistenti al taglio

La resistenza a taglio  $V_{Rd}$  di elementi strutturali dotati di specifica armatura a taglio deve essere valutata sulla base di una adeguata schematizzazione a traliccio. Gli elementi resistenti dell'ideale traliccio sono: le armature trasversali, le armature longitudinali, il corrente compresso di calcestruzzo e i puntoni d'anima inclinati. L'inclinazione  $\theta$  dei puntoni di calcestruzzo rispetto all'asse della trave deve rispettare i limiti seguenti:

$$1 \leq \text{ctg } \theta \leq 2,5 \quad (4.1.16)$$

La verifica di resistenza (SLU) si pone con

$$V_{Rd} \geq V_{Ed} \quad (4.1.17)$$

dove  $V_{Ed}$  è il valore di calcolo dello sforzo di taglio agente.

Con riferimento all'armatura trasversale, la resistenza di calcolo a "taglio trazione" si calcola con:

$$V_{Rsd} = 0,9 \cdot d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yd} \cdot (\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\theta) \cdot \sin\alpha \quad (4.1.18)$$

Con riferimento al calcestruzzo d'anima, la resistenza di calcolo a "taglio compressione" si calcola con

# Progetto struttura: VERIFICA A TAGLIO

$$V_{Rcd} = 0,9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot f'_{cd} \cdot (\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\theta) / (1 + \text{ctg}^2\theta) \quad (4.1.19)$$

La resistenza al taglio della trave è la minore delle due sopra definite:

$$V_{Rd} = \min (V_{Rsd}, V_{Rcd}) \quad (4.1.20)$$

dove  $d$ ,  $b_w$  e  $\sigma_{cp}$  hanno il significato già visto in § 4.1.2.1.3.1. e inoltre si è posto:

$A_{sw}$  area dell'armatura trasversale;

$s$  interasse tra due armature trasversali consecutive;

$\alpha$  angolo di inclinazione dell'armatura trasversale rispetto all'asse della trave;

$f'_{cd}$  resistenza a compressione ridotta del calcestruzzo d'anima ( $f'_{cd} = 0,5 \cdot f_{cd}$ );

$\alpha_c$  coefficiente maggiorativo pari a

1	per membrature non compresse
$1 + \sigma_{cp}/f_{cd}$	per $0 \leq \sigma_{cp} < 0,25 f_{cd}$
1,25	per $0,25 f_{cd} \leq \sigma_{cp} \leq 0,5 f_{cd}$
$2,5(1 - \sigma_{cp}/f_{cd})$	per $0,5 f_{cd} < \sigma_{cp} < f_{cd}$

In presenza di significativo sforzo assiale, ad esempio conseguente alla precompressione, si dovrà aggiungere la limitazione:

$$(\text{ctg}\theta_1 \leq \text{ctg}\theta) \quad (4.1.21)$$

dove  $\theta_1$  è l'angolo di inclinazione della prima fessurazione ricavato da  $\text{ctg}\theta_1 = \tau/\sigma_1$  mentre  $\tau$  e  $\sigma_1$  sono rispettivamente la tensione tangenziale e la tensione principale di trazione sulla corda baricentrica della sezione intesa interamente reagente.

Le armature longitudinali, dimensionate in base alle sollecitazioni flessionali, dovranno essere prolungate di una misura pari a

$$a_1 = 0,9 \cdot d \cdot (\text{ctg}\theta - \text{ctg}\alpha) / 2 \geq 0 \quad (4.1.22)$$

# Progetto struttura: minimi armature

## Minimi di normativa NN sismici (§4.1.6.1.1)

Le travi devono prevedere armatura trasversale costituita da staffe con sezione complessiva non inferiore ad  $A_{st} = 1,5 b \text{ mm}^2/\text{m}$  essendo  $b$  lo spessore minimo dell'anima in millimetri, con un minimo di tre staffe al metro e comunque passo non superiore a 0,8 volte l'altezza utile della sezione.

In ogni caso almeno il 50% dell'armatura necessaria per il taglio deve essere costituita da staffe.

## Minimi di normativa sismici (§7.....)

### Armature trasversali

Nelle zone critiche devono essere previste staffe di contenimento. La prima staffa di contenimento deve distare non più di 5 cm dalla sezione a filo pilastro; le successive devono essere disposte ad un passo non superiore alla minore tra le grandezze seguenti:

- un quarto dell'altezza utile della sezione trasversale;
- 175 mm e 225 mm, rispettivamente per CD "A" e CD "B";
- 6 volte e 8 volte il diametro minimo delle barre longitudinali considerate ai fini delle verifiche, rispettivamente per CD "A" e CD "B";
- 24 volte il diametro delle armature trasversali.

Per staffa di contenimento si intende una staffa rettangolare, circolare o a spirale, di diametro minimo 6 mm, con ganci a 135° prolungati per almeno 10 diametri alle due estremità. I ganci devono essere assicurati alle barre longitudinali.

# Progetto struttura: VERIFICA A TAGLIO

---

- Armatura a taglio (le staffe) nelle zone critiche (dove si formano le cerniere plastiche):
  - *Rispetto le staffe secondo minimi di norma sismici e non sismici*
  - *Inclinazione fessure per taglio pari a  $45^\circ$  ( $\cot(\theta)=1$ )*
  - *Fisso il diametro delle barre con cui realizzo le staffe*
  - *Noto il taglio Massimo Ved determino il passo delle staffe*

# Progetto struttura: VERIFICA A TAGLIO

□ In zona critica se  $\cot(\theta)$  pari a 1

8.1.4.1.2 Data la trave, le resistenze dei materiali e il taglio sollecitante  $V_{Ed}$ , si voglia determinare l'armatura ( $A_{sv}/s$ )

Preliminarmente occorre verificare che  $V_{Ed}$  sia non maggiore del secondo membro della (8.1-9) scritto con  $\cot\theta = 1$ . Quindi, uguagliando  $V_{Ed}$  a  $V_{Rd,max}$  della stessa (8.1-9),

si ottiene l'angolo  $\theta$ . Rammentando che  $\frac{1}{\cot\theta + \tan\theta} = \frac{1}{2} \sin 2\theta$ , si ottiene:

$$V_{Ed} = (\alpha_{cv} v_1 f_{cd}) b_w z \frac{1}{2} \sin 2\theta$$

da cui

$$\theta = \frac{1}{2} \arcsin \frac{2V_{Ed}}{(\alpha_{cv} v_1 f_{cd}) b_w z} \quad (8.1-12)$$

# Progetto struttura: VERIFICA A TAGLIO

□ Armatura a taglio fuori dalle zone critiche:

- *Rispetto le staffe secondo minimi di norma sismici e non sismici*
- *Inclinazione fessure per taglio variabile ( $1 < \cot(\theta) < 2.5$ )*
- *Fisso il diametro delle barre con cui realizzo le staffe*
- *Assumo passo minimo di norma e calcolo  $\cot(\theta)$*
- *Nota la  $\cot(\theta)$  e fissato il passo minimo calcolo resistenza a taglio*
- *Dove interseco con valore resistenza a taglio con staffe di minimo, il diagramma del taglio, infittisco il passo delle staffe*

□ Prevedo zona transizione passo staffe da minimo in zona centrale a passo più piccolo in zona critica

# Progetto struttura: VERIFICA A TAGLIO

□ fuori zona critica se  $\cot(\theta)$  generica

## 8.1.4.1.1 Determinazione del taglio resistente

Data la trave con le relative armature e resistenze, si voglia determinare il massimo taglio resistente.

Si può seguire il seguente percorso:

- accertare, con i dati del problema, che sia verificata la (8.1-7), ossia che la trave sia duttile
- imporre il cedimento simultaneo delle bielle di calcestruzzo e delle staffe uguagliando i secondi membri delle formule (8.1-8) e (8.1-9). Risulta:

$$\frac{A_{sv} f_{svd}}{b_w s(\alpha_{sv} v_1 f_{cd})} = \sin^2 \theta \quad (8.1-11)$$

Da questa si ottiene  $\sin\theta$  e quindi  $\theta$ . Se  $\theta$  soddisfa la (8.1-5), il taglio resistente si calcola direttamente mediante la (8.1-8) o la (8.1-9) con il valore di  $\theta$  trovato.

Se  $\theta$  non soddisfa la (8.1-5) in quanto angolo inferiore a  $21,80^\circ$  (a cui corrispondono  $\cot\theta = 2,5$  e  $\sin\theta = 0,3714$ ), significa che il collasso avviene lato acciaio con bielle compresse integre. In questo caso il taglio resistente è dato dalla (8.1-8) con  $\cot\theta = 2,5$  per il rispetto della (8.1-5).