

Corso di aggiornamento
Norme Tecniche per le Costruzioni 2008

**Problemi specifici nel progetto di strutture
antisismiche con pareti in c.a.**

3 - L'elemento parete: taglio

Bologna

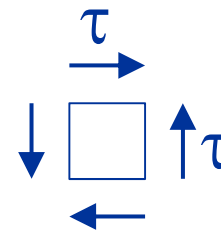
10 gennaio 2013

Edoardo M. Marino

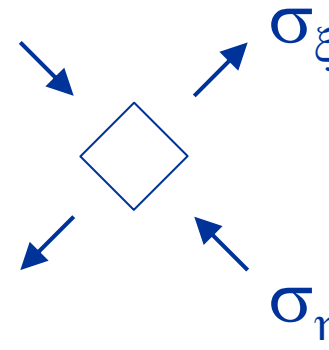
Taglio

brevi richiami

- Secondo la teoria di De Saint Venant, il taglio genera tensioni tangenziali τ



- Se in un elementino infinitesimo vi sono solo τ , a queste corrispondono tensioni principali di trazione e compressione inclinate a 45°



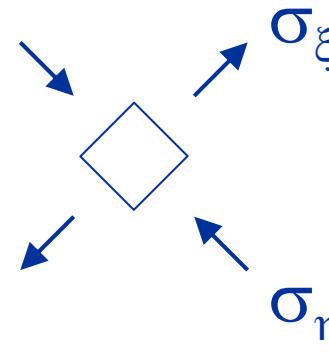
Taglio

brevi richiami



foto M. Dasasso

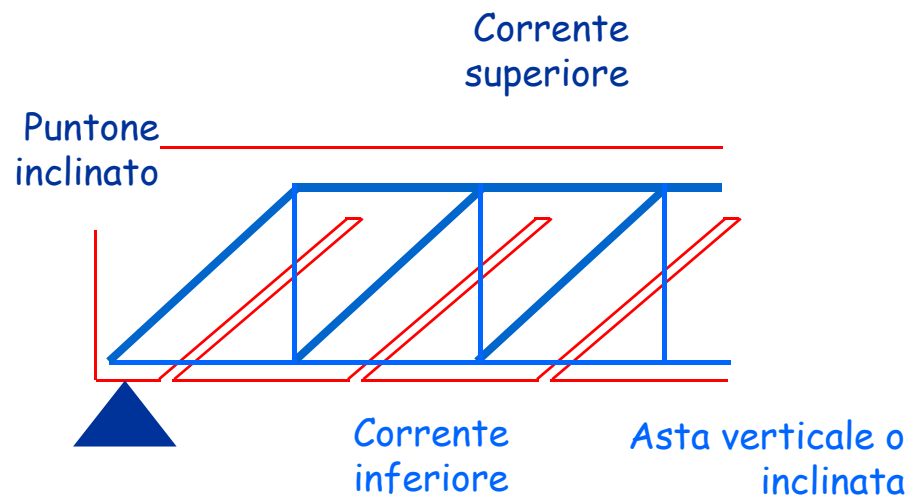
Si avranno
quindi lesioni
a 45° ,
perpendicolari
alla direzione
di trazione



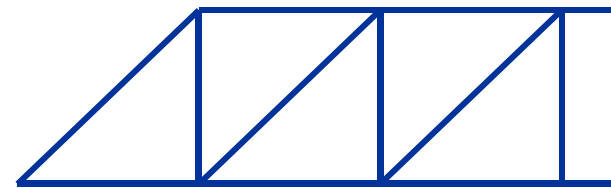
Taglio

brevi richiami

- Il classico modello di traliccio di Mörsch prevede puntoni compressi a 45° e tiranti corrispondenti alle armature a taglio



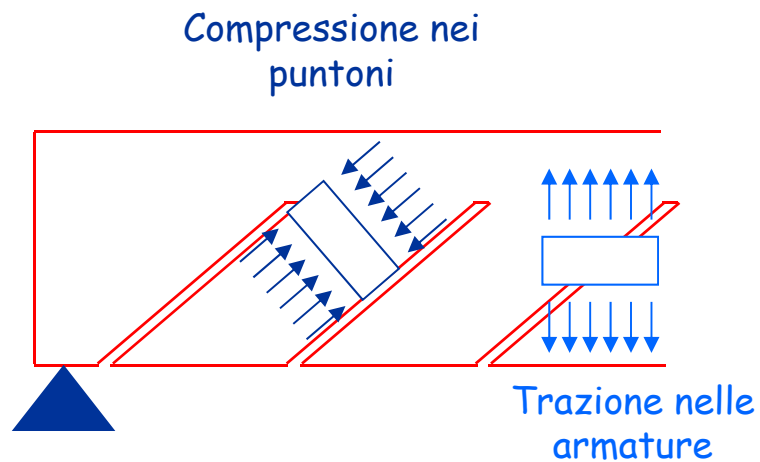
Traliccio di Mörsch



Taglio

brevi richiami

- Sostanzialmente equivalente è il modello a campi di tensione, sviluppato in tempi recenti



Campi di tensione

Taglio

brevi richiami

- I modelli classici "affidano tutta la resistenza a taglio alle armature"
- I loro risultati sono cautelativi, cioè sottostimano la reale resistenza a taglio
- In tempi più recenti sono stati proposti modelli che meglio colgono la reale resistenza a taglio
 - Modello "normale"
 - Modello "a inclinazione variabile del traliccio" (o meglio del puntone)

Taglio

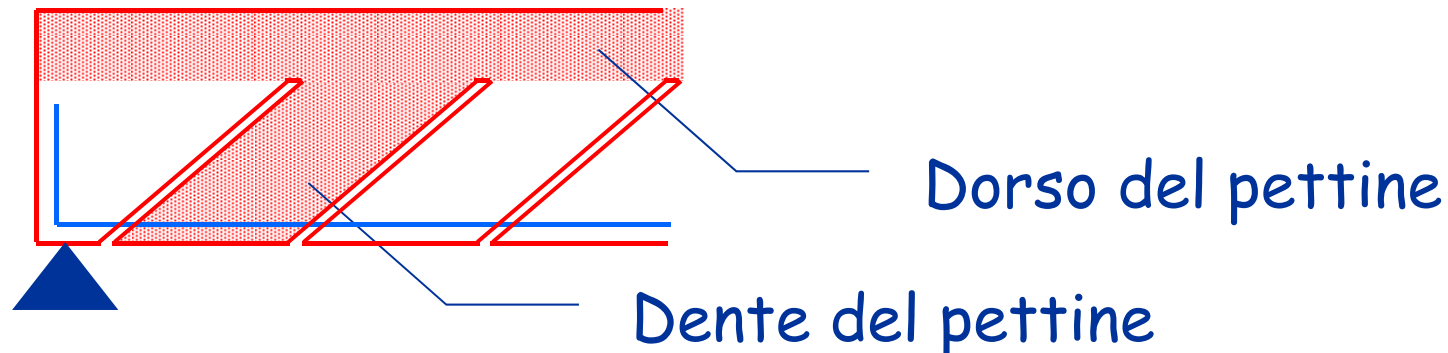
brevi richiami

- Modello "normale"
 - Quando le armature a taglio si snervano rimangono il corrente compresso e i puntoni inclinati, che danno una ulteriore resistenza (valutata col "modello a pettine")

$$V_{Rd} = V_{wd} + V_{cd}$$

armatura a taglio
calcestruzzo del pettine

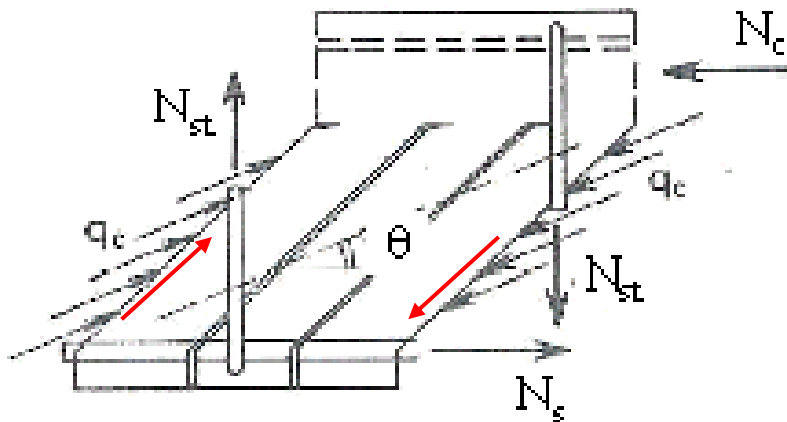
Modello a pettine



Taglio

brevi richiami

- Modello "a inclinazione variabile del traliccio"
 - Quando le armature a taglio si snervano l'ingranamento degli inerti trasmette tensioni tra le facce della lesione e questo modifica l'inclinazione del puntone compresso



Si usano i modelli già citati (traliccio di Mörsch, campi di tensione) ma con puntoni inclinati di un angolo θ

È questo il modello previsto dalla normativa corrente

Taglio

problemi particolari

1. I modelli per il taglio non valgono in prossimità di forze concentrate (e quindi agli estremi)
 - La verifica a taglio va fatta ad una certa distanza
 - Agli estremi si possono usare modelli tirante-puntone

Nel caso delle pareti, questo richiede una distinzione tra pareti snelle e pareti tozze

Pareti snelle

- Si adottano i modelli di comportamento validi per le travi

Pareti tozze

- Si adottano i modelli di comportamento per elementi strutturali tozzi (ad esempio tirante-puntone)

Taglio

problemi particolari

1. I modelli per il taglio non valgono in prossimità di forze concentrate (e quindi agli estremi)
 - La verifica a taglio va fatta ad una certa distanza
 - Agli estremi si possono usare modelli tirante-puntone

Nel caso delle pareti, questo richiede una distinzione tra pareti snelle e pareti tozze

Pareti snelle

$$\alpha_s = \frac{M_{Ed}}{V_{Ed} l_w} \geq 2$$

Pareti tozze

$$\alpha_s = \frac{M_{Ed}}{V_{Ed} l_w} < 2$$

Taglio

problemi particolari

1. I modelli per il taglio non valgono in prossimità di forze concentrate (e quindi agli estremi)
 - La verifica a taglio va fatta ad una certa distanza
 - Agli estremi si possono usare modelli tirante-puntone
2. Il contributo del calcestruzzo può annullarsi in caso di carico ciclico con segno alternato del taglio
 - In questi casi deve θ rimanere 45°

Indicazioni specifiche sono fornite per gli edifici di classe di duttilità "A", che richiedono maggiore duttilità

Taglio

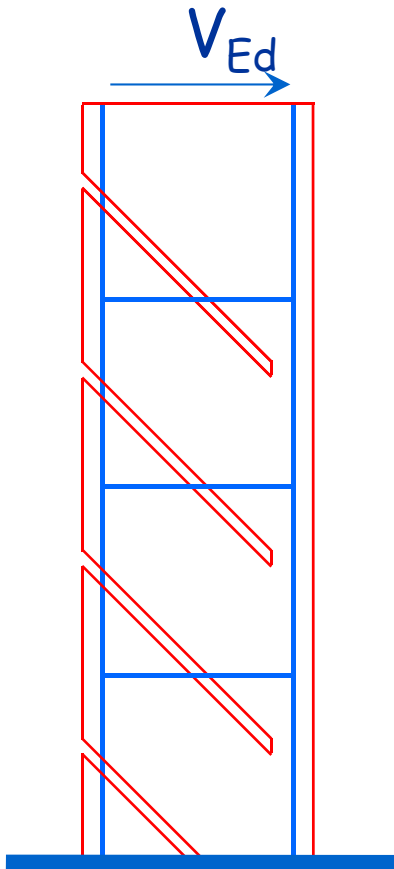
problemi particolari

1. I modelli per il taglio non valgono in prossimità di forze concentrate (e quindi agli estremi)
 - La verifica a taglio va fatta ad una certa distanza
 - Agli estremi si possono usare modelli tirante-puntone
2. Il contributo del calcestruzzo può annullarsi in caso di carico ciclico con segno alternato del taglio
 - In questi casi deve θ rimanere 45°
3. Il traliccio di Mörsch in presenza di sole staffe trascura la componente longitudinale della trazione: è necessario considerare (l'uno o l'altro, in alternativa)
 - Traslazione del diagramma dei momenti
 - Contributo dell'armatura di parete

Verifica a taglio di pareti snelle

Verifica a taglio di pareti snelle

modelli di calcolo



Attraverso l'analisi di:

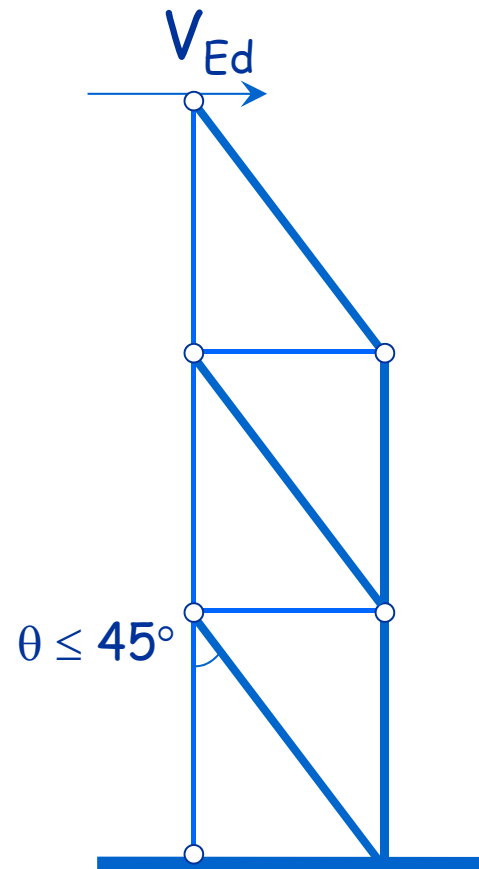
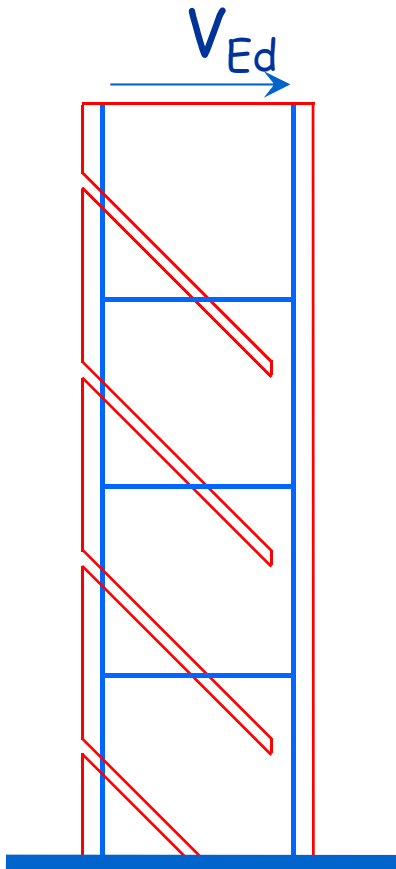
- stato tensionale
- lesioni da taglio
- ingranamento degli inerti



Modello a inclinazione variabile
del traliccio

Verifica a taglio di pareti snelle

modelli di calcolo

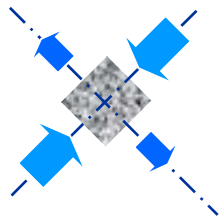


Puntoni ad inclinazione variabile
 $\theta \leq 45^\circ$

Resistenza del calcestruzzo

compressione del calcestruzzo d'anima

$$V_{Rd,max} = \alpha_c f'_{cd} b_w z \frac{\cot \theta}{1 + \cot^2 \theta} \quad 1 \leq \cot \theta \leq 2.5$$



$$f'_{cd} = v_1 f_{cd} \quad v_1 = 0.5$$

resistenza ridotta a causa della trazione in direzione ortogonale

α_c tiene conto della compressione

$$\alpha_c = 1$$

in assenza di compressione

$$\alpha_c = 1 + \frac{\sigma_{cd}}{f_{cd}}$$

per $0 \leq \frac{\sigma_{cd}}{f_{cd}} \leq 0.25$

$$\alpha_c = 1.25$$

per $0.25 \leq \frac{\sigma_{cd}}{f_{cd}} \leq 0.5$

$$\alpha_c = 2.5 \left(1 - \frac{\sigma_{cd}}{f_{cd}} \right)$$

per $0.5 \leq \frac{\sigma_{cd}}{f_{cd}} \leq 1$

per le pareti
 α_c è in genere
prossimo ad 1

NTC 08, punto 4.1.2.1.3.2

Resistenza dell'armatura a taglio

trazione dell'armatura d'anima

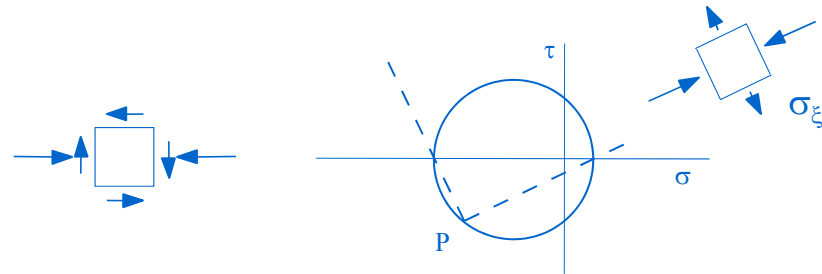
$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} f_{yd} z \cot \theta$$

$$1 \leq \cot \theta \leq 2.5$$

In presenza di compressione:

$$\cot \theta_1 \leq \cot \theta \leq 2.5$$

$$\cot \theta_1 = \frac{\tau}{\sigma_\xi}$$



Nota: Discordanza di simboli tra NTC08 e EC2.
Io faccio riferimento a EC2

NTC 08, punto 4.1.2.1.3.2

Resistenza a taglio pareti snelle

- Si applicano le formule generali

$$V_{Rd,max} = \alpha_c f'_{cd} b_w z \frac{\cot \theta}{1 + \cot^2 \theta} \quad V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} f_{yd} z \cot \theta$$

tenendo conto che $z = 0.8 l_w$

Classe di duttilità B

$$1 \leq \cot \theta \leq 2.5$$

Classe di duttilità A

$$\cot \theta = 1$$

ridurre $V_{Rd,max}$ col fattore 0.4 nelle zone critiche

Resistenza a taglio

pareti snelle - classe di duttilità A

Che senso hanno le prescrizioni per CD "A" ?

Usare $\cot \theta = 1$

Durante il sisma il progressivo danneggiamento del calcestruzzo riduce l'efficacia dell'ingranamento degli inerti per cui $\theta = 45^\circ$

Ridurre $V_{Rd,max}$ col fattore 0.4

Usare $\cot \theta = 1$ è cautelativo per l'armatura ma non per il calcestruzzo

Se $\cot \theta$ cresce $V_{Rd,max}$ si riduce
(per $\cot \theta = 2 \rightarrow V_{Rd,max}$ si riduce di 0.8)

Ma allora come mai
0.4 e non 0.8?

Resistenza a taglio

pareti snelle - classe di duttilità A

Che senso hanno le prescrizioni per CD "A" ?

- Notare l'evoluzione della normativa

Al di fuori della zona critica

$$V_{Rd,max} = \frac{1}{2} \alpha_c f'_{cd} b_w z$$

Nella zona critica

PreStandard EC8 1998:

$$V_{Rd,max} = 0.4 \alpha_c f'_{cd} b_w z$$

Bozze EC8 2002 e 2001:

$$V_{Rd,max} = 0.8 \left(\frac{1}{2} \alpha_c f'_{cd} b_w z \right)$$

NTC08, EC8 2005:

$$V_{Rd,max} = 0.4 \left(\frac{1}{2} \alpha_c f'_{cd} b_w z \right)$$

L'attuale 0.4 è voluto o è un errore di trascrizione?

Cosa cambia con la Bozza NTC 2013

pareti snelle

Uguali prescrizioni per le due classi di duttilità

- Si assume $\cot \theta = 1$

$$V_{Rd,max} = \frac{1}{2} \alpha_c f'_{cd} b_w z \quad V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} f_{yd} z$$

- Nelle zone critiche
ridurre $V_{Rd,max}$ col fattore 0.4

Taglio

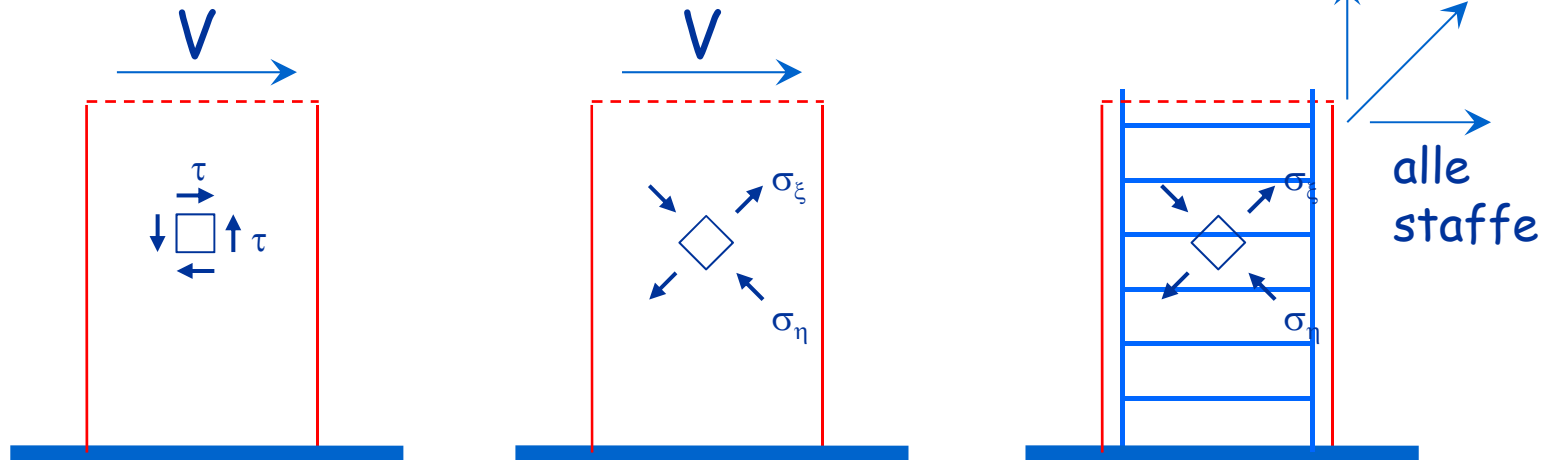
problemi particolari

1. I modelli per il taglio non valgono in prossimità di forze concentrate (e quindi agli estremi)
 - La verifica a taglio va fatta ad una certa distanza
 - Agli estremi si possono usare modelli tirante-puntone
2. Il contributo del calcestruzzo può annullarsi in caso di carico ciclico con segno alternato del taglio
 - In questi casi deve θ rimanere 45°
3. Il traliccio di Mörsch in presenza di sole staffe trascura la componente longitudinale della trazione: è necessario considerare (l'uno o l'altro, in alternativa)
 - Traslazione del diagramma dei momenti
 - Contributo dell'armatura di parete

Taglio

la componente longitudinale della trazione

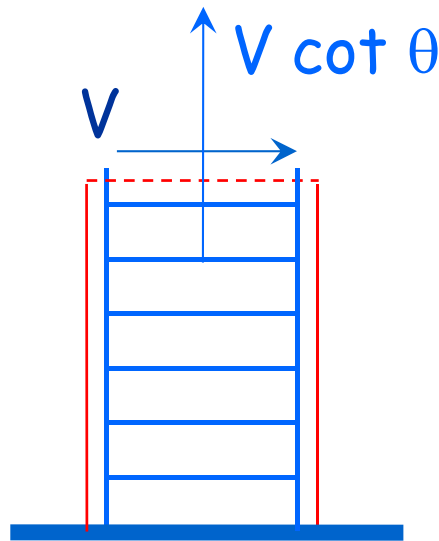
- Nel modello di De Saint Venant il taglio genera tensioni tangenziali τ e quindi tensioni principali di trazioni a 45°
- Le staffe assorbono solo una componente di questa trazione



Taglio

la componente longitudinale della trazione

- Il modello dei campi di tensione (con inclinazione θ della compressione) mostra che l'anima della parete è soggetta ad una forza di trazione pari a $V \cot \theta$

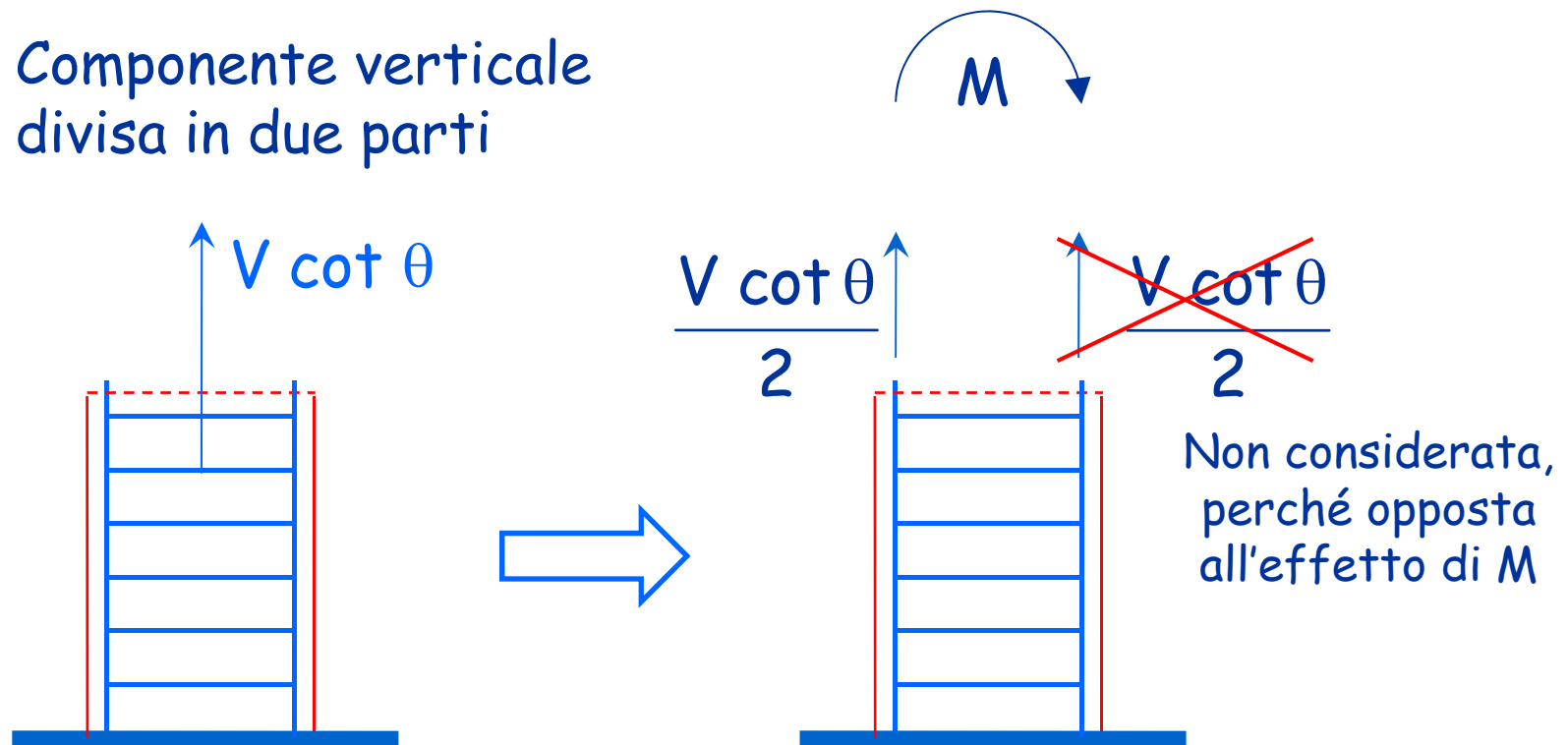


- Sono stati sviluppati modelli diversi per assorbire questa trazione
 - armature concentrate all'estremità della sezione
 - armature diffuse lungo l'anima

Taglio

la componente longitudinale della trazione

- Armatura concentrata all'estremità della sezione (scuola milanese)
 - Componente verticale divisa in due parti



Taglio

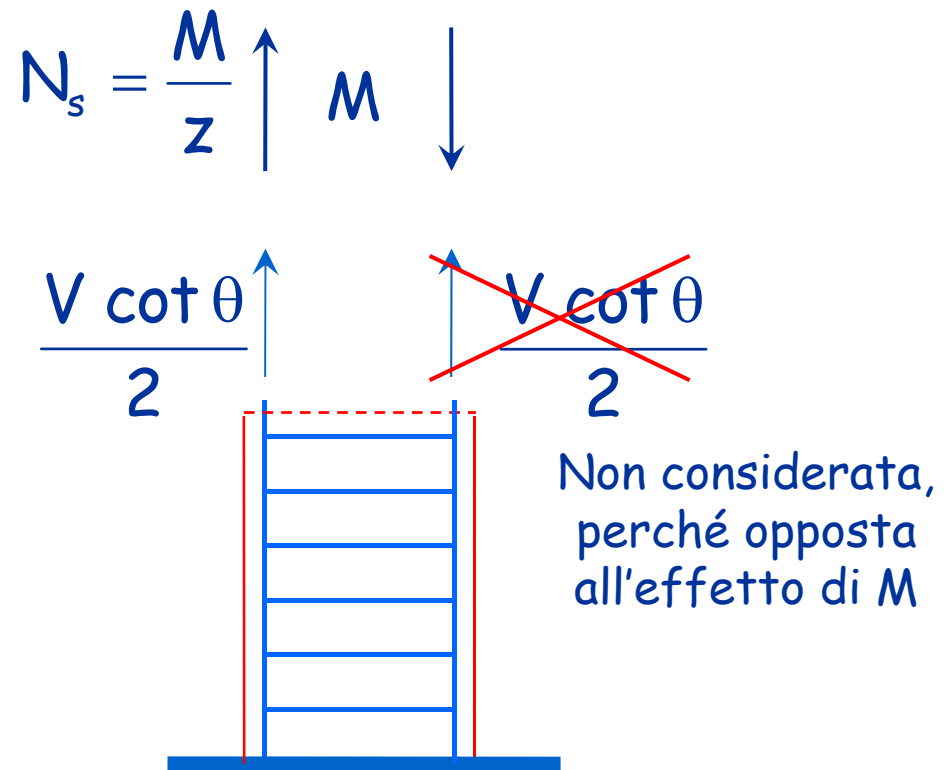
la componente longitudinale della trazione

- Armatura concentrata all'estremità della sezione (scuola milanese)

- Si incrementa l'armatura a flessione, ovvero si calcola tale armatura con un momento flettente maggiorato



Traslazione del
diagramma del momento



Taglio

la componente longitudinale della trazione

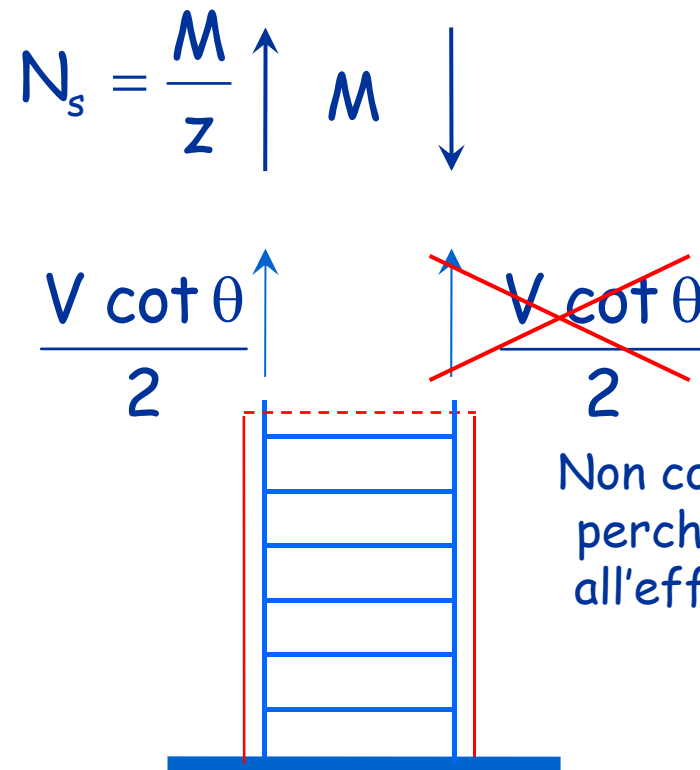
- Armatura concentrata all'estremità della sezione (scuola milanese)

Traslazione del
diagramma del momento

$$N_s = \frac{M}{z} + V \frac{\cot \theta}{2} = \frac{M + \Delta M}{z}$$

$$\Delta M = V \Delta z$$

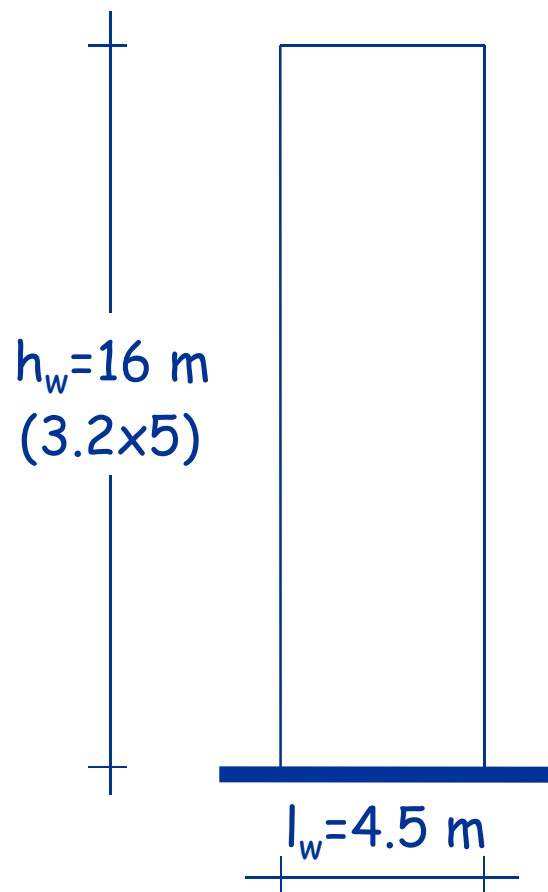
$$\Delta z = \frac{z}{2} \cot \theta$$



Non considerata,
perché opposta
all'effetto di M

Traslazione del diagramma del momento esempio

$$z = 0.8 l_w$$

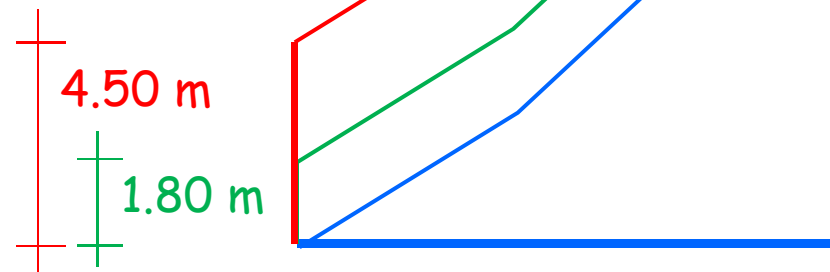


$$\cot \theta = 1.0$$

$$\cot \theta = 2.5$$

$$z/2 = 0.4 l_w$$

$$2.5 z/2 = l_w$$

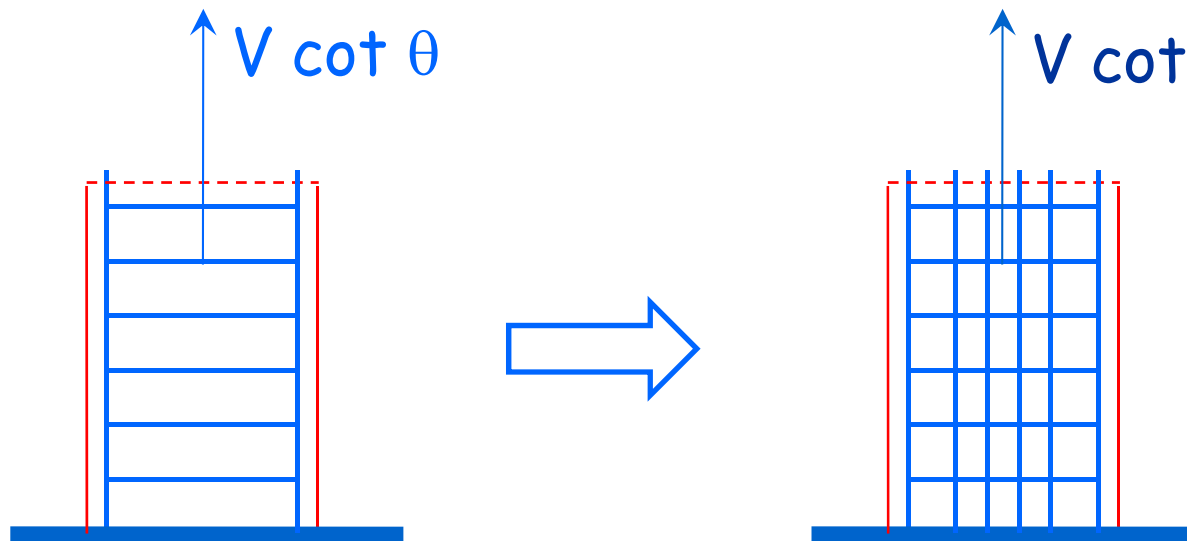


Taglio

la componente longitudinale della trazione

- Armatura diffusa lungo l'anima (scuola napoletana)
 - Apposita armatura per tutta la componente verticale

$$A_{s,p} = \frac{V \cot \theta}{f_{yd}}$$



Taglio

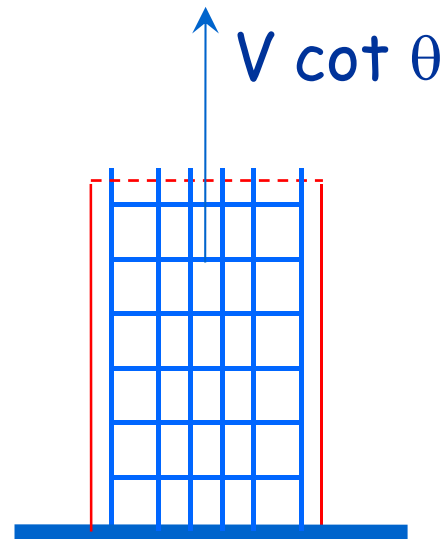
la componente longitudinale della trazione

- Armatura diffusa lungo l'anima (scuola napoletana)
 - Apposita armatura per tutta la componente verticale (armatura di parete)

$$A_{s,p} = \frac{V \cot \theta}{f_{yd}}$$

Si noti che:

- questo è quanto si fa per la torsione
- questa armatura è espressamente prevista anche per il taglio nelle pareti tozze



Considerazioni

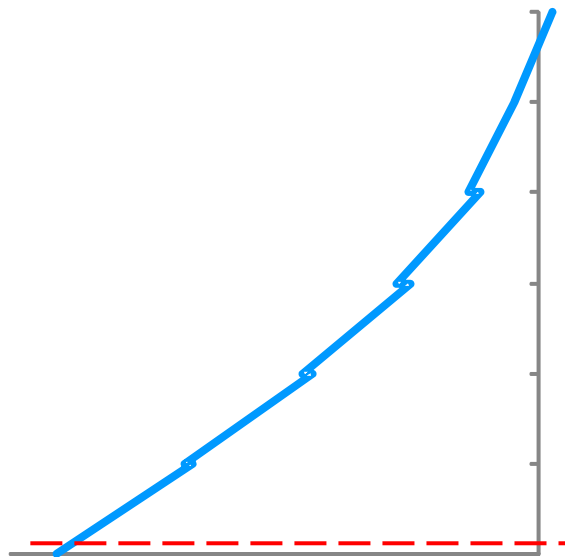
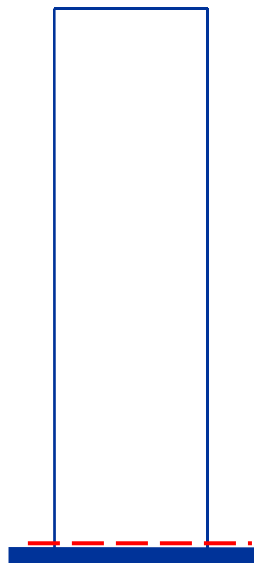
- La normativa cita espressamente la traslazione del diagramma dei momenti che "deve essere in accordo con l'inclinazione degli elementi compressi nel meccanismo resistente a taglio e può essere assunta pari a h_{cr} "
- Questa è chiaramente una regola applicativa, legata ad un possibile modo di tener conto della componente longitudinale
- È possibile in alternativa calcolare l'armatura di parete e non effettuare la traslazione del diagramma dei momenti

Considerazioni

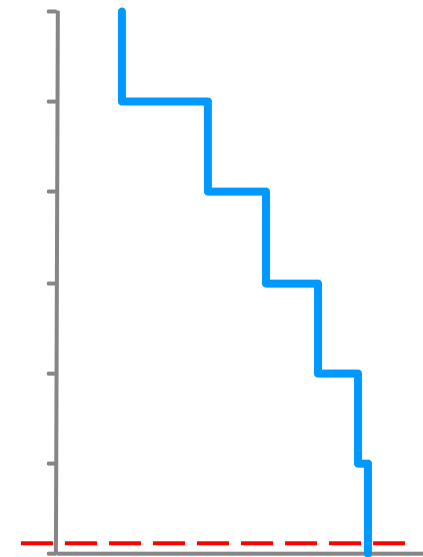
- Come e dove fare le verifiche?

Sezione di base

- momento flettente massimo
- ha poco senso parlare di taglio



Momento flettente



Taglio

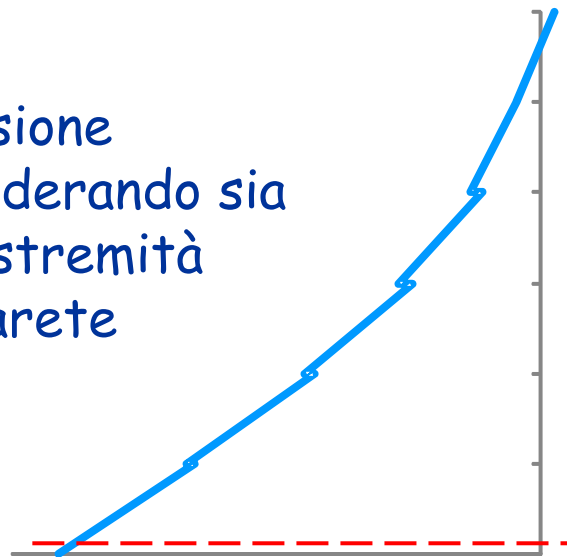
Considerazioni

- Come e dove fare le verifiche?

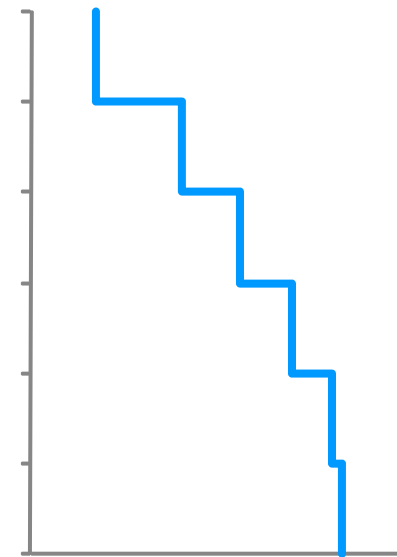
Sezione di base

- momento flettente massimo
- ha poco senso parlare di taglio

- Verifica a flessione composta considerando sia l'armatura di estremità che quella di parete



Momento flettente



Taglio

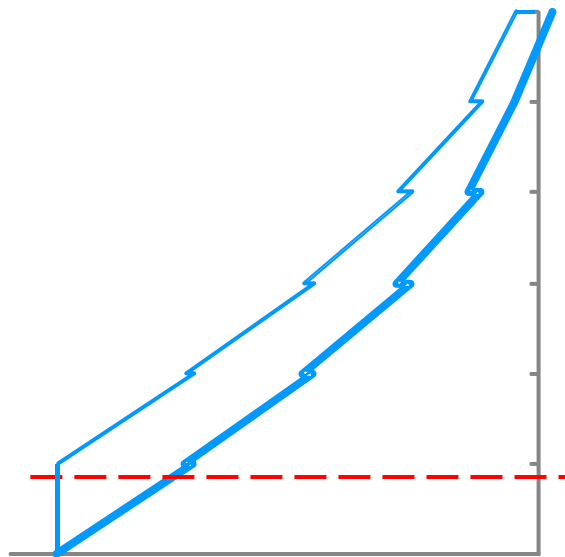
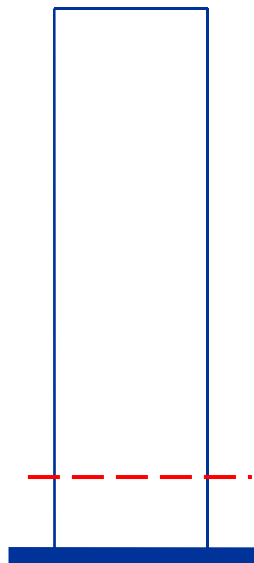
Considerazioni

- Come e dove fare le verifiche?

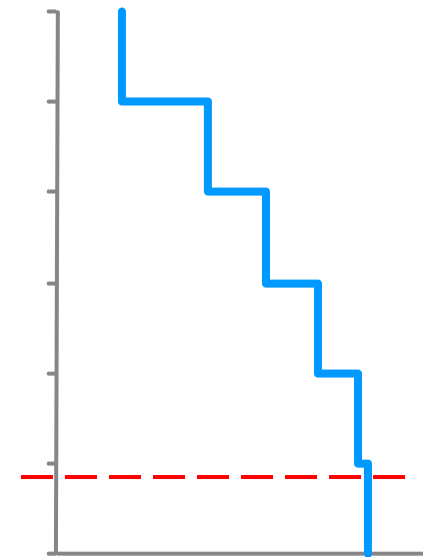
Sezione in testa al primo ordine

- taglio massimo (come al piede)
- momento flettente massimo

con traslazione



Momento flettente



Taglio

Considerazioni

- Come e dove fare le verifiche?

Sezione in testa al primo ordine

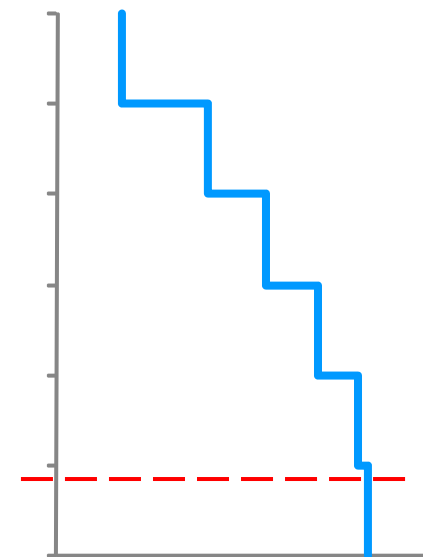
- taglio massimo (come al piede)
- momento flettente massimo

con traslazione

- Verifica a taglio senza prevedere armatura di parete
- Verifica a flessione composta, considerando sia l'armatura di estremità che quella di parete



Momento flettente



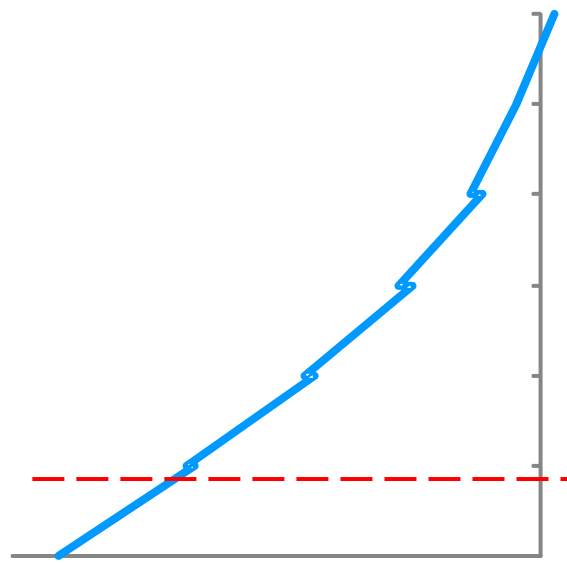
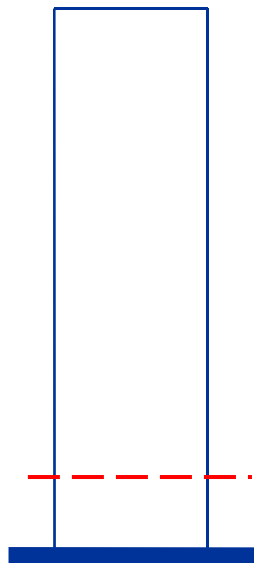
Taglio

Considerazioni

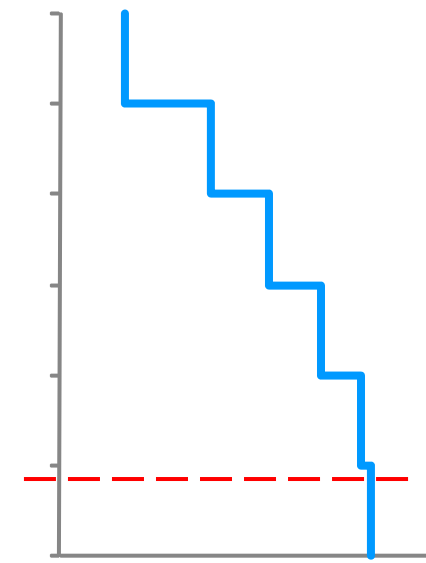
- Come e dove fare le verifiche?

Sezione in testa al primo ordine senza traslazione

- taglio massimo (come al piede)
- momento flettente forte ma minore del massimo



Momento flettente



Taglio

Considerazioni

- Come e dove fare le verifiche?

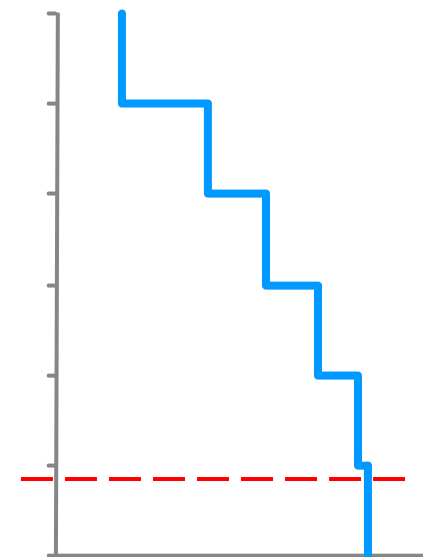
Sezione in testa al primo ordine senza traslazione

- taglio massimo (come al piede)
- momento flettente forte ma minore del massimo

- Verifica a taglio, con calcolo e disposizione di armatura di parete
- Verifica a flessione composta considerando solo l'armatura di estremità



Momento flettente



Taglio

Considerazioni

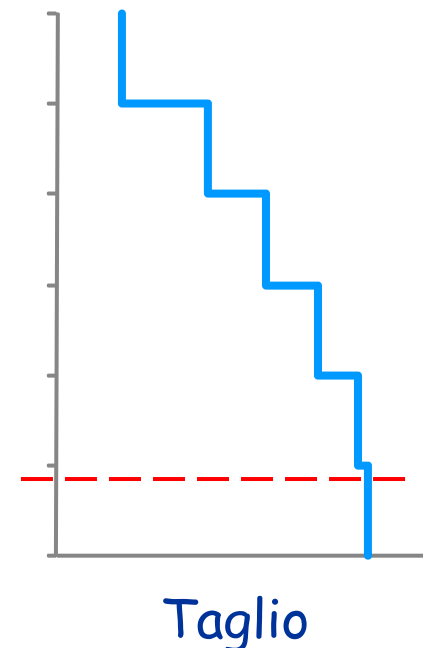
- Come e dove fare le verifiche?

Sezione in testa al primo ordine

- taglio massimo (come al piede)
- momento flettente forte ma minore del massimo

Più semplicemente

- Verifica a taglio
- Calcolo dell'armatura longitudinale per il taglio, da disporre dove si preferisce
- Verifica a flessione composta considerando la restante armatura



Verifica a taglio di pareti tozze

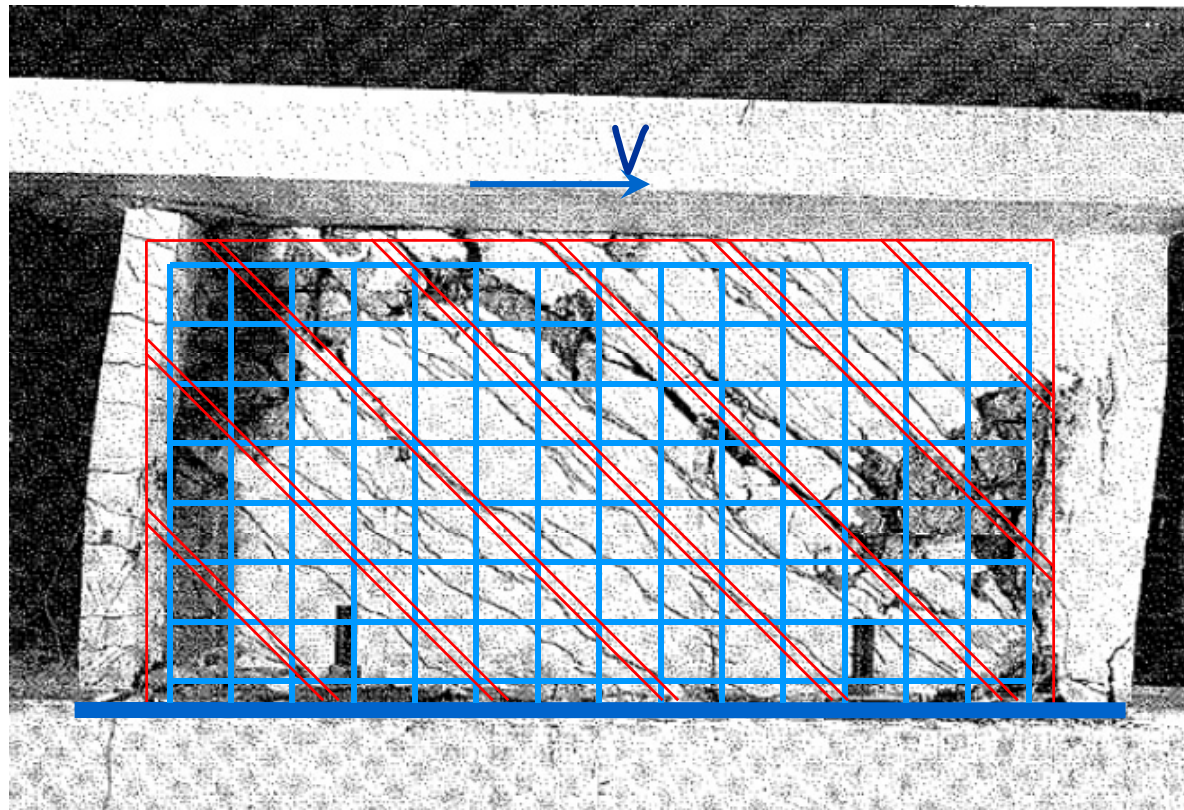
Verifica a taglio di parete tozza

modelli di calcolo

- Si ragiona con considerazioni di equilibrio che in sostanza non sono diverse da quelle adottate per il traliccio di Mörsch (o per i campi di tensione)
- Il puntone compresso è considerato inclinato a 45° , come nel tradizionale traliccio di Mörsch
 - Per il comportamento dopo lo snervamento delle armature a taglio si riprende il modello "normale"
- Le vere particolarità sono:
 - Il fatto che, essendo l_w molto grande, si parte dal taglio per unità di lunghezza
 - Il fatto che il modello considera esplicitamente sia armature trasversali che longitudinali

Verifica a taglio di parete tozza

modelli di calcolo



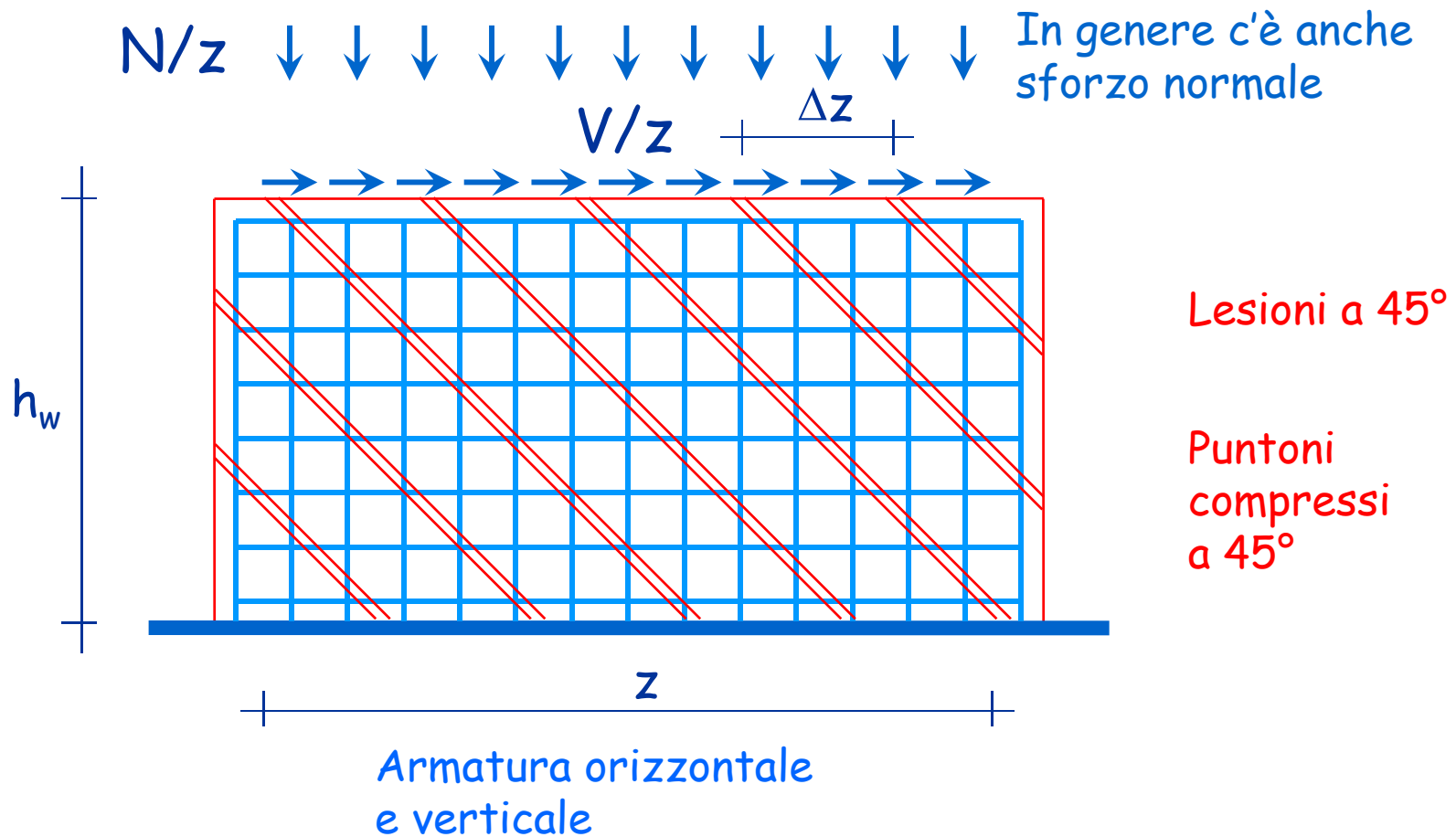
Lesioni a 45°

Puntoni
compressi
a 45°

Armatura orizzontale
e verticale

Verifica a taglio di parete tozza

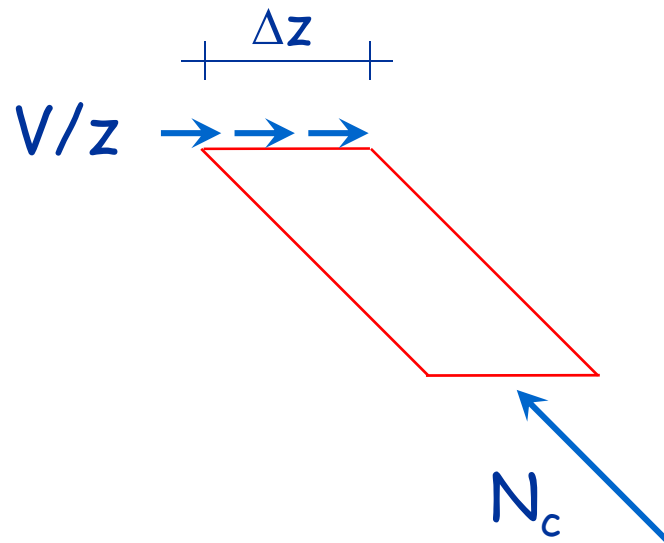
modelli di calcolo



Resistenza del calcestruzzo

compressione del calcestruzzo d'anima

- Il collasso può avvenire per **schacciamento** del calcestruzzo d'anima



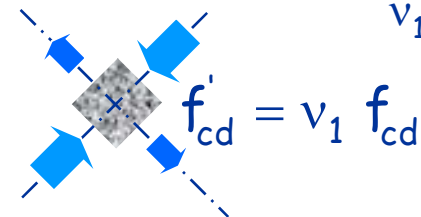
$$N_c = V \frac{\Delta z}{z} \sqrt{2}$$

$$A_c = \frac{b_w \Delta z}{\sqrt{2}}$$

ponendo

$$\sigma_c = f'_{cd}$$

$$v_1 = 0.5$$



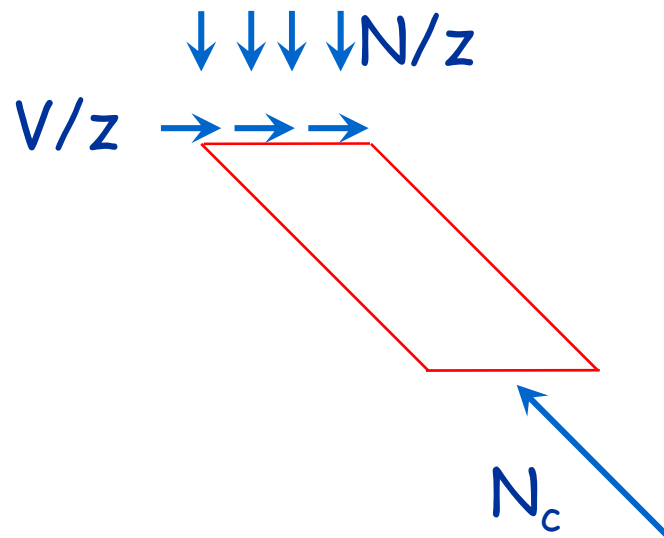
si ottiene

$$V_{Rd,max} = \frac{1}{2} f'_{cd} b z$$

Resistenza del calcestruzzo

compressione del calcestruzzo d'anima

- Il collasso può avvenire per **schacciamento** del calcestruzzo d'anima



In presenza di sforzo normale

$$V_{Rd,max} = \frac{1}{2} \alpha_c f'_{cd} b z$$

$$\alpha_c = \alpha_c(N)$$

Come $V_{Rd,max}$ di pareti snelle per $\cot \theta = 1$

Resistenza dell'armatura a taglio

trazione dell'armatura d'anima orizzontale

- Il collasso può avvenire per snervamento dell'armatura orizzontale (staffe)

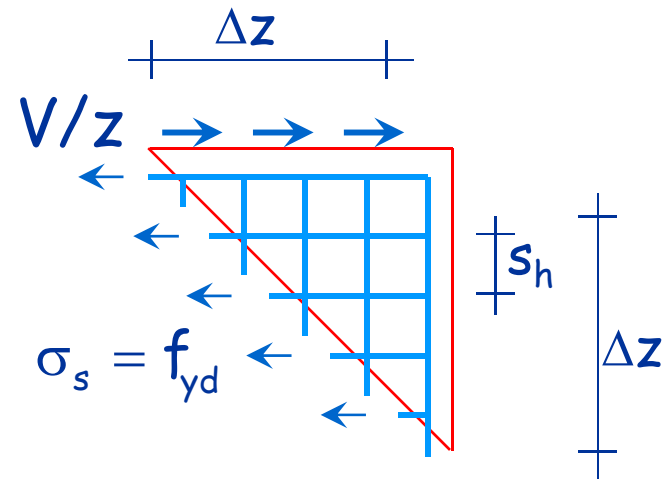
$$F_h = V \frac{\Delta z}{z} = A_s f_{yd}$$

$$A_s = A_{sh} \frac{\Delta z}{s_h}$$

si ottiene

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sh}}{s_h} z f_{yd}$$

Come $V_{Rd,s}$ di pareti snelle
per $\cot \theta = 1$



Resistenza dell'armatura a taglio

trazione dell'armatura d'anima orizzontale

- Il collasso può avvenire per **snervamento dell'armatura orizzontale (staffe)**

$$F_h = V \frac{\Delta z}{z} = A_s f_{yd}$$

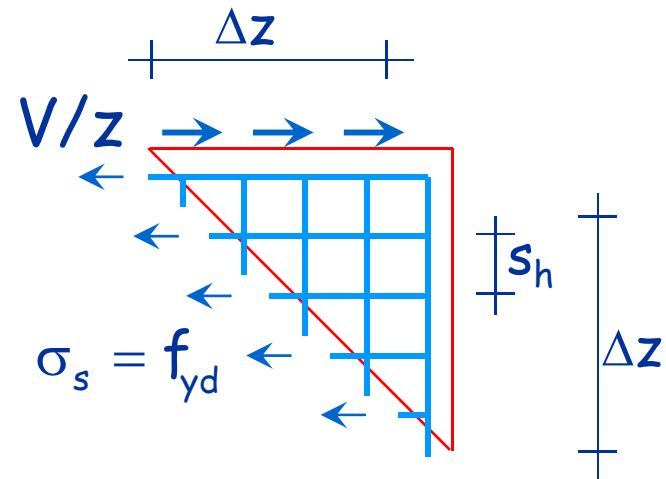
$$A_s = A_{sh} \frac{\Delta z}{s_h}$$

si ottiene

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sh}}{s_h} z f_{yd}$$



$$\begin{cases} V_{Rd,s} = \rho_h b_w z f_{yd} \\ \rho_h = \frac{A_{sh}}{b_w s_h} \end{cases}$$



Resistenza dell'armatura a taglio

trazione dell'armatura d'anima verticale

- Il collasso può avvenire per snervamento dell'armatura verticale

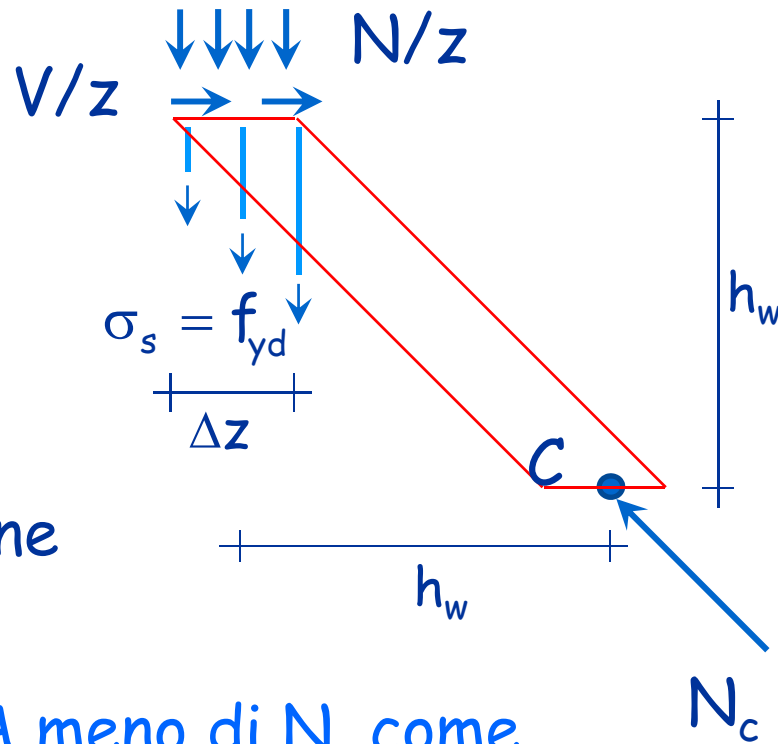
$$F_h = V \frac{\Delta z}{z}$$

$$F_v = A_{sv} \frac{\Delta z}{s_v} f_{yd} + N \frac{\Delta z}{z}$$

dall'equilibrio alla rotazione
attorno a C

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sv}}{s_v} z f_{yd} + N$$

A meno di N , come
pareti snelle per $\cot \theta = 1$



Resistenza dell'armatura a taglio

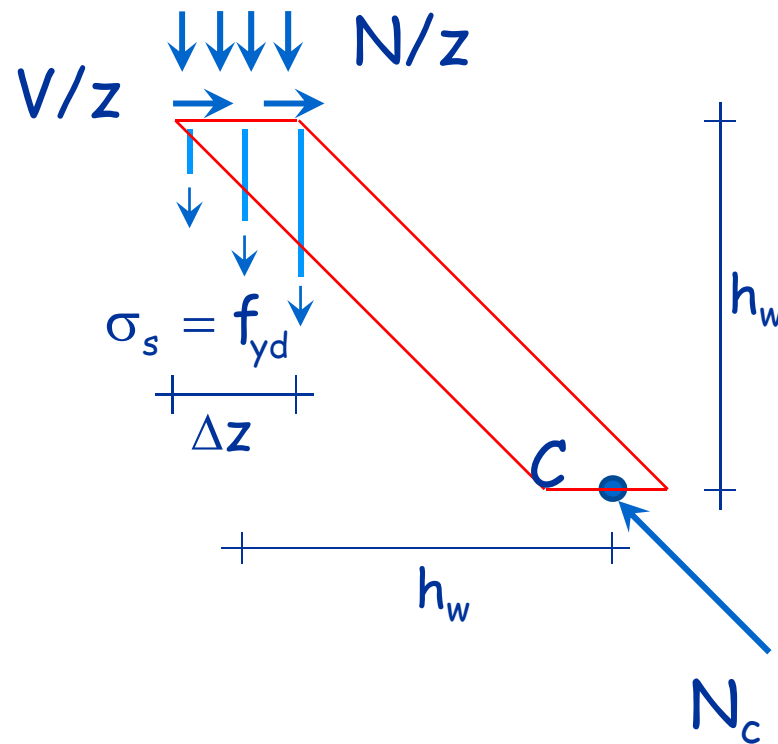
trazione dell'armatura d'anima verticale

- Il collasso può avvenire per **snervamento dell'armatura verticale**

$$\begin{cases} V_{Rd,s} = \rho_v b_w z f_{yd} + N \\ \rho_v = \frac{A_{sv}}{b_w s_v} \end{cases}$$



$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sv}}{s_v} z f_{yd} + N$$



Resistenza dell'armatura a taglio

trazione dell'armatura d'anima verticale e orizzontale

- Le indicazioni di normativa richiamano il metodo "normale"

- Armatura orizzontale

$$V_{Rd,s} = V_{Rd,c} + 0.75 \rho_h b_w \alpha_s l_w f_{yd}$$

$$\text{con } \alpha_s = \frac{M_{Ed}}{V_{Ed} l_w}$$

$V_{Rd,c}$ = resistenza in assenza di armatura a taglio

- Armatura verticale

$$\rho_h b_w z f_{yd} \leq \rho_v b_w z f_{yd} + N_{Ed,min}$$

L'armatura orizzontale deve snervarsi prima di quella verticale

Resistenza a taglio

in assenza di armatura a taglio

- Valgono le indicazioni generali
- Si utilizza il modello "a pettine" che tiene conto di
 - effetto spinotto
 - ingranamento degli inerti
 - influenza dell'azione assiale

$$V_{Rd,c} = \left[\underbrace{0.18 k \frac{\sqrt[3]{100 \rho_l f_{ck}}}{\gamma_c}}_{\geq v_{min}} + 0.15 \sigma_{cp} \right] b d$$

$$\geq v_{min} = 0.035 \sqrt{k^3 f_{ck}}$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2$$

d in mm

$V_{Rd,c} = 0$
se N_{Ed} è di trazione

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} \leq 0.2 f_{cd}$$

$$\rho_l = \frac{A_s}{b d} \leq 0.02$$

Considerazioni

- La normativa dice di usare le espressioni indicate in precedenza solo per pareti tozze ($\alpha_s < 2$) in classe di duttilità A
- Mancherebbero quindi indicazioni specifiche per pareti tozze in classe di duttilità B

Penso invece che queste indicazioni debbano sempre essere utilizzate nel caso di pareti tozze, indipendentemente dalla classe di duttilità

La bozza delle NTC 2013 richiede l'applicazione di queste indicazioni per entrambe le classi duttilità