

Corso di aggiornamento professionale

Vulnerabilità Sismica ed Adeguamento di Costruzioni Esistenti in Calcestruzzo Armato

7 maggio – 7 giugno 2013

Aula Magna Seminario Vescovile Via Puccini, 36 - Pistoia



ORDINE DEGLI INGEGNERI
DELLA PROVINCIA DI PISTOIA



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA



Valutazione e riduzione della vulnerabilità degli elementi strutturali, non strutturali ed impianti.

- La conoscenza del manufatto. Indagini in situ distruttive e non distruttive.
- La valutazione della capacità degli elementi strutturali di calcestruzzo armato.
- Il ruolo del confinamento del calcestruzzo e la verifica della duttilità.
- Esempi applicativi: edificio multipiano di calcestruzzo armato ed edificio prefabbricato.

Rosario Gigliotti

rosario.gigliotti@uniroma1.it



PARTE IV

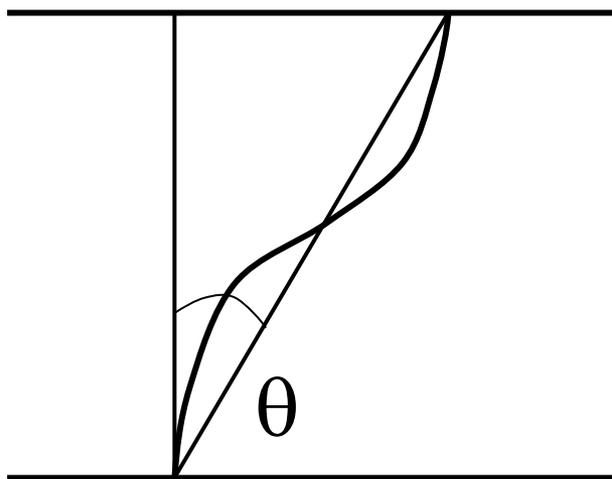
Modelli di capacità per la valutazione

§ C8.7.2.5 – Modelli di capacità per la valutazione

- Gli elementi ed i meccanismi resistenti sono classificati in:
 - “Duttili”:
travi, pilastri e pareti inflesse con e senza sforzo normale
 - “Fragili”:
meccanismi di taglio in travi, pilastri e pareti ed i nodi

Modelli di capacità per la valutazione

- a) Verifica degli e/m duttili
 - Si verifica la rotazione della corda θ



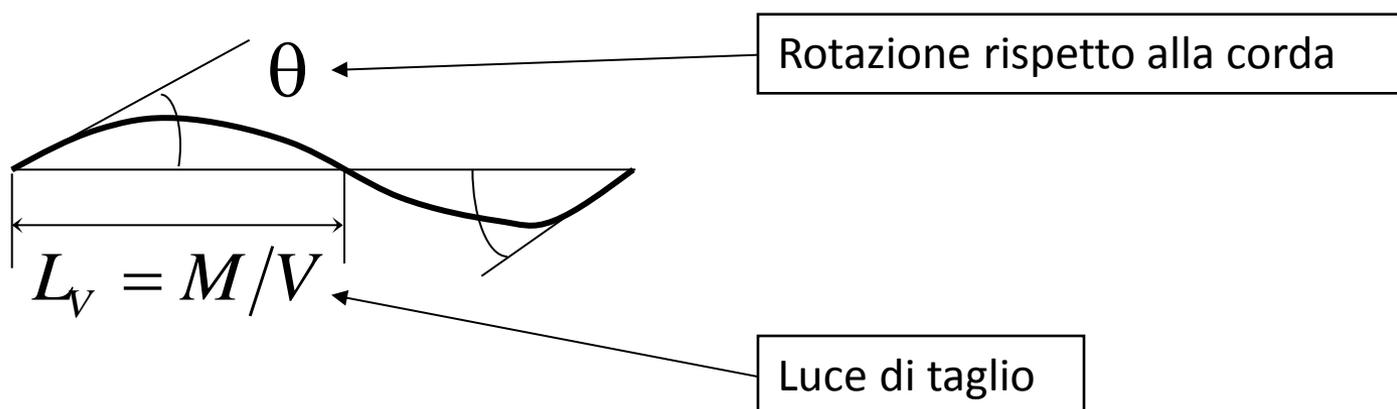
$$\theta_{analisi} \leq \theta_{limite}$$

Modelli di capacità per la valutazione

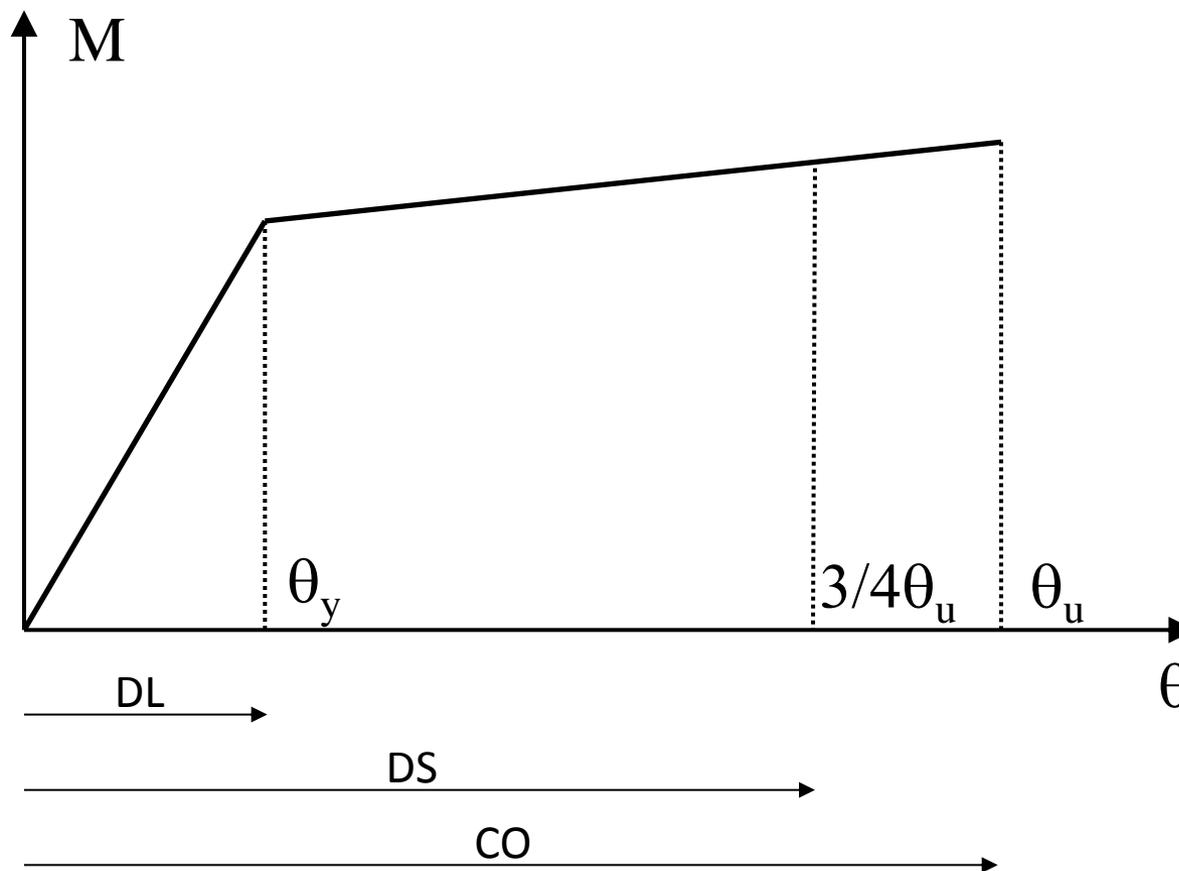
- Travi, pilastri e pareti:

flessione con e senza sforzo normale

- La capacità deformativa è data come : θ



Travi, pilastri e pareti: flessione con e senza sforzo normale



SL di CO (C8A.6.1)

Capacità di rotazione ultima di collasso

$$\theta_u = \frac{1}{\gamma_{el}} 0,016 \cdot (0,3^v) \left[\frac{\max(0,01; \omega')}{\max(0,01; \omega)} f_c \right]^{0,225} \left(\frac{L_v}{h} \right)^{0,35} 25^{\left(\alpha \rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c} \right)} (1,25^{100 \rho_d})$$

Dove: $\gamma_{el} = 1.5$ per elementi primari, $=1$ per elementi secondari (definiti in 4.3.2)
 $v = N/(A_c f_c)$ è lo sforzo assiale normalizzato

$\omega = A_s f_y / (b h f_c)$ percentuali meccaniche di armatura in traz. e comp.

$\omega' = A'_s f_y / (b h f_c)$

$\rho_{sx} = A_{sx} / b_w s_h$ percentuale di armatura trasversale

ρ_d percentuale di armatura diagonale

$\alpha = \left(1 - \frac{s_h}{2b_o} \right) \left(1 - \frac{s_h}{2h_o} \right) \left(1 - \frac{\sum b_i^2}{6h_o b_o} \right)$ fattore di efficienza del confinamento

SL di CO (C8A.6.1)

In presenza di barre lisce il valore dato dall'espressione precedente (11.A.1) deve essere moltiplicato per 0.575

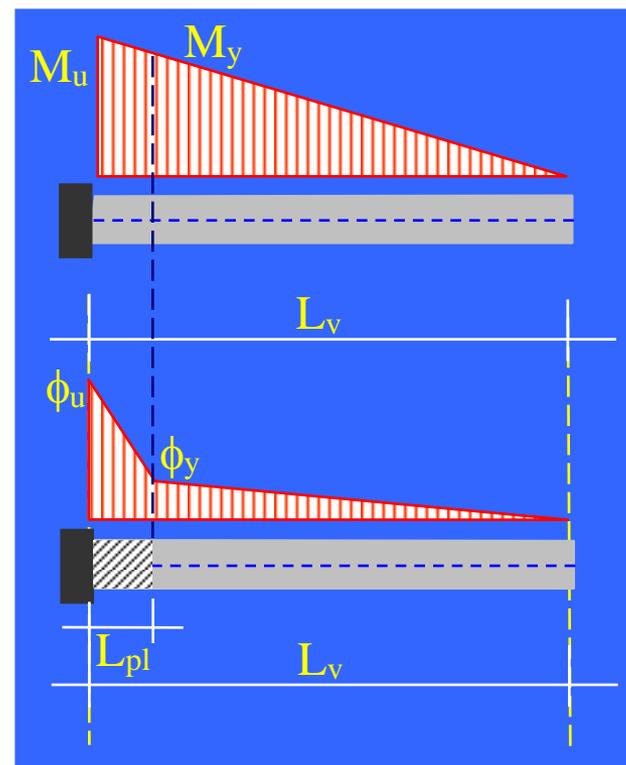
In alternativa:

$$\theta_u = \frac{1}{\gamma_{el}} \left(\theta_y + (\phi_u - \phi_y) L_{pl} \left(1 - \frac{0,5L_{pl}}{L_v} \right) \right)$$

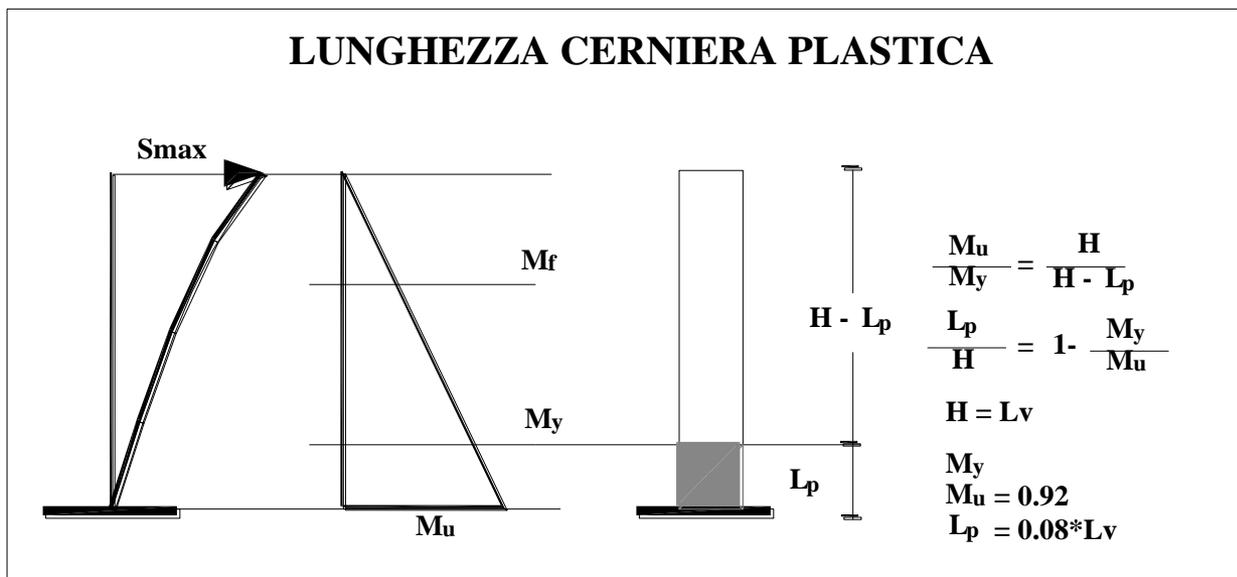
$$L_{pl} = 0,1L_v + 0,17h + 0,24 \frac{d_{bL} f_y (MPa)}{\sqrt{f_c (MPa)}}$$

lunghezza di cerniera plastica

d_{bL} diametro (medio) delle barre longitudinali



Travi, pilastri e pareti: flessione con e senza sforzo normale



$$L_{pl} = 0,1L_V + 0,17h + 0,24 \frac{d_{bL} f_y (MPa)}{\sqrt{f_c (MPa)}} \quad (11.A.4)$$

d_{bL} = diametro barre longitudinali

SLV-SLD

- La capacità di rotazione per lo SLV è:

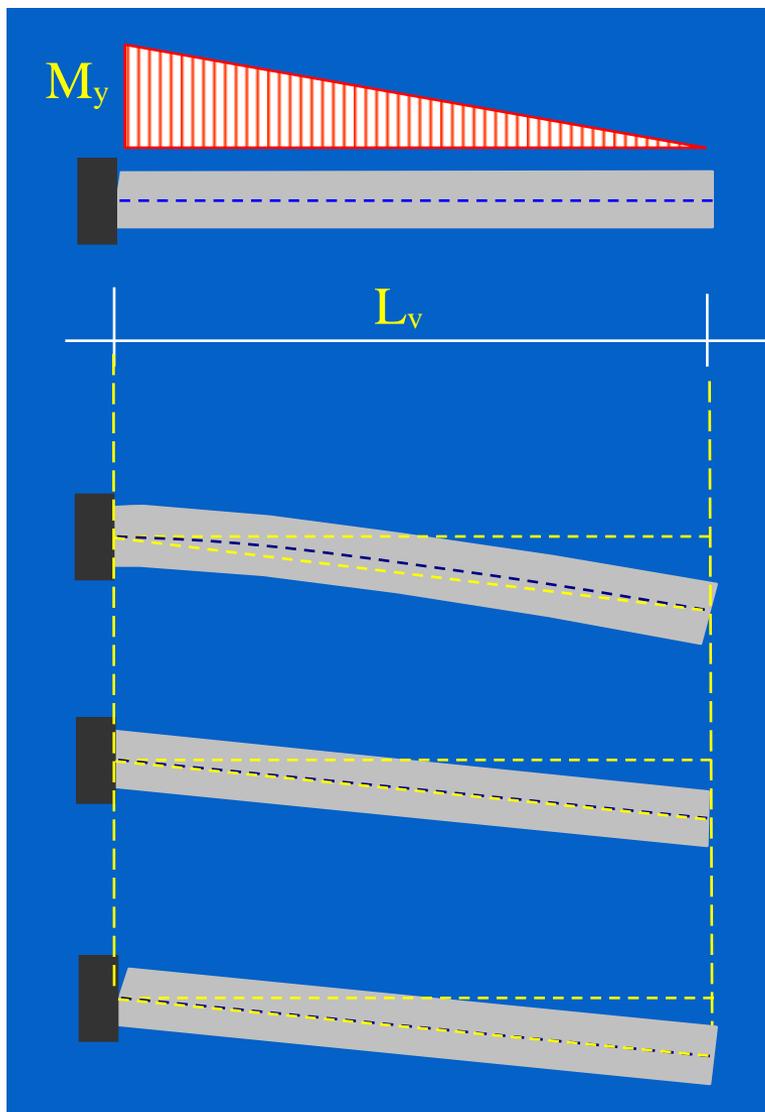
$$\theta_{DS} = \frac{3}{4} \theta_u$$

- La capacità di rotazione per lo SLE è:

$$\theta_y = \phi_y \frac{L_v}{3} + 0,0013 \left(1 + 1,5 \frac{h}{L_v} \right) + 0,13 \phi_y \frac{d_b f_y}{\sqrt{f_c}} \quad (\text{per travi pilastri})$$

$$\theta_y = \phi_y \frac{L_v}{3} + 0,002 \left(1 - 0,125 \frac{L_v}{h} \right) + 0,13 \phi_y \frac{d_b f_y}{\sqrt{f_c}} \quad (\text{per pareti})$$

SLV-SLD



- Rotazione di snervamento

$$\theta_{DL} \equiv \theta_y = \phi_y \frac{L_v}{3} + 0,0013 \left(1 + 1,5 \frac{h}{L_v} \right) + 0,13 \phi_y \frac{d_b f_y}{\sqrt{f_c}}$$

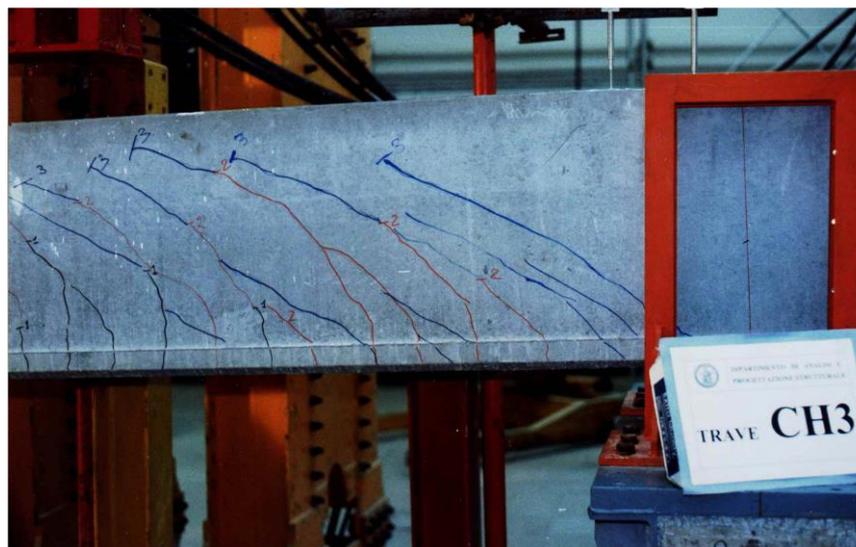
Contributo
flessionale

Contributo tagliante

Scorrimento delle
barre

Travi e pilastri: taglio

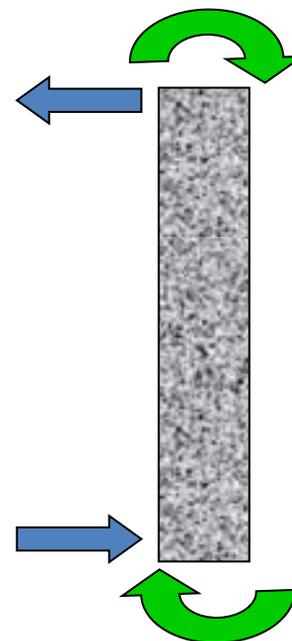
- SL di CO, DS, DL
 - La resistenza a taglio si valuta come per il caso di nuove costruzioni per situazioni non sismiche
 - NB: cambiano le azioni



Travi e pilastri: taglio

- b) Verifica degli e/m fragili

Taglio agente:
$$V = \frac{M_{\text{sup}} + M_{\text{inf}}}{h}$$

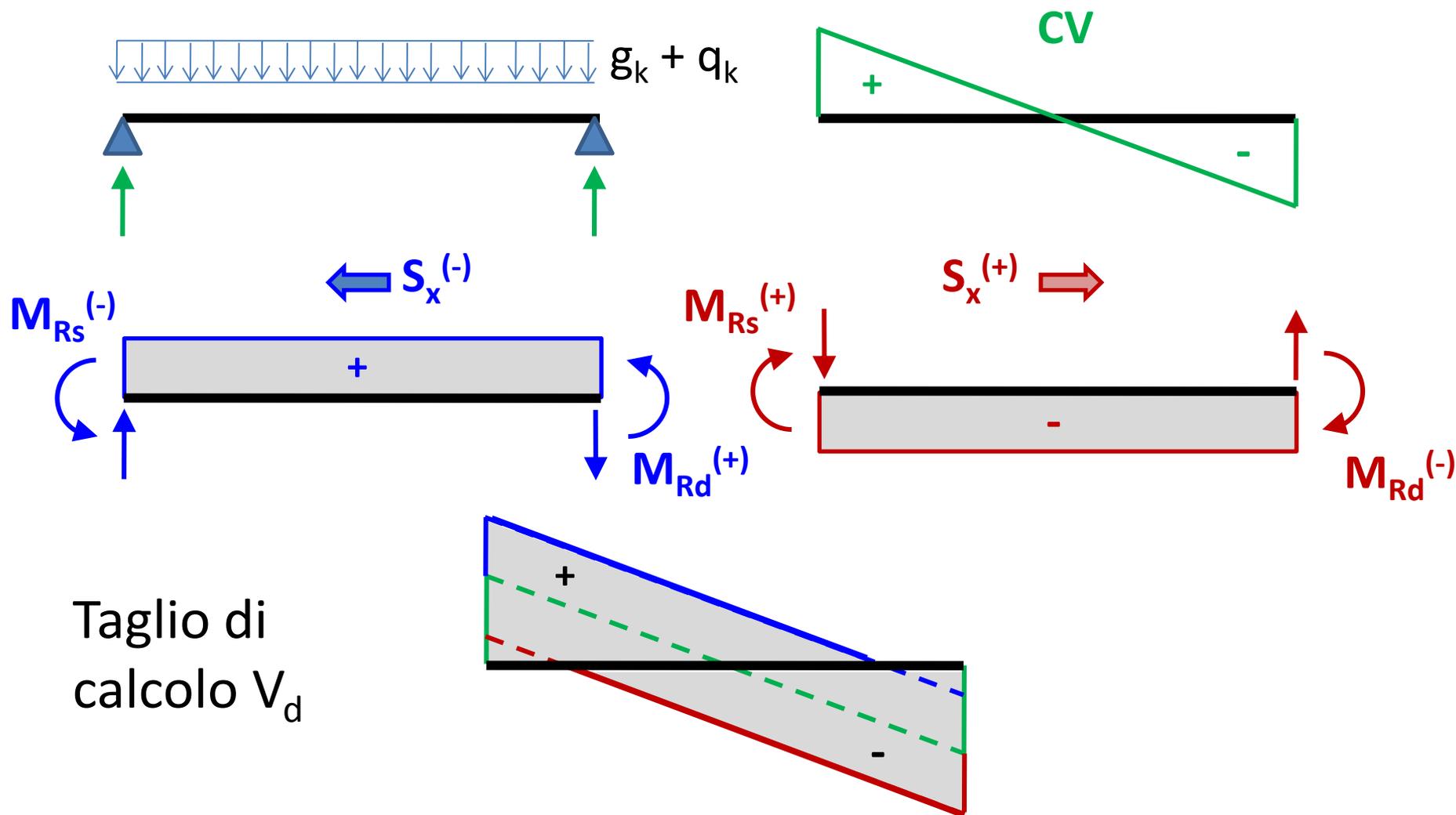


- Sforzo di taglio di verifica (solo an. lin.):
 - Se M_{sup} e M_{inf} ottenuti dall'analisi sono minori di $M_{R\text{sup}}$ e $M_{R\text{inf}}$ (momenti resistenti), V si calcola utilizzando M_{sup} e M_{inf} dall'analisi
 - Se M_{sup} e M_{inf} ottenuti dall'analisi sono maggiori di $M_{R\text{sup}}$ e $M_{R\text{inf}}$, V si calcola utilizzando $M_{R\text{sup}}$ e $M_{R\text{inf}}$, moltiplicati per il FC

- Verifica:

$$V_{\text{agente}} \leq \frac{V_{\text{resist.}} (\gamma_m)}{FC}$$

Travi: taglio



4.2.2.3.1. DM'96

Verifica del conglomerato

La verifica consiste nel confrontare il taglio di calcolo con una espressione cautelativa della resistenza a compressione delle bielle inclinate

$$V_{Sdu} \leq 0.30 f_{cd} \cdot b_w \cdot d$$

dove f_{cd} è la resistenza di calcolo a compressione del calcestruzzo

4.2.2.3.2. DM'96 - Verifica dell'armatura trasversale d'anima

- Il taglio di calcolo deve risultare inferiore od al limite uguale alla somma della resistenza della armatura d'anima e del contributo degli altri elementi del traliccio ideale
- **Comunque la resistenza di calcolo dell'armatura d'anima deve risultare non inferiore alla metà del taglio di calcolo.**

4.2.2.3.2. DM'96 - Verifica dell'armatura trasversale d'anima

L'armatura trasversale deve verificare:

$$V_{Sdu} \leq V_{cd} + V_{wd} \quad \text{con} \quad V_{wd} \geq V_{Sdu}/2$$

in cui (cls come senza staffe):

$$V_{cd} = 0.25 f_{ctd} \cdot r (1 + 50 \rho_l) \cdot b_w \cdot d \cdot \delta$$

$$V_{wd} = A_{sw} \cdot f_{ywd} \cdot 0.90 d / s$$

4.1.1.3.2. NTC – Elementi con armature trasversali resistenti al 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 θ 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:

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

4.1.1.3.2. NTC – Elementi con armature trasversali resistenti al taglio

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

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

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 σ_{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;	
α	angolo di inclinazione dell'armatura trasversale rispetto all'asse della trave;	
f'_{cd}	resistenza a compressione ridotta del calcestruzzo d'anima ($f'_{cd} = 0,5 \cdot f_{cd}$);	
α_c	coefficiente maggiorativo pari a	
	1	per membrane 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 $0,5 f_{cd} < \sigma_{cp} < f_{cd}$

4.1.1.3.2. NTC – Elementi con armature trasversali resistenti al taglio

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

$$(\operatorname{ctg}\theta_I \leq \operatorname{ctg}\theta) \quad (4.1.21)$$

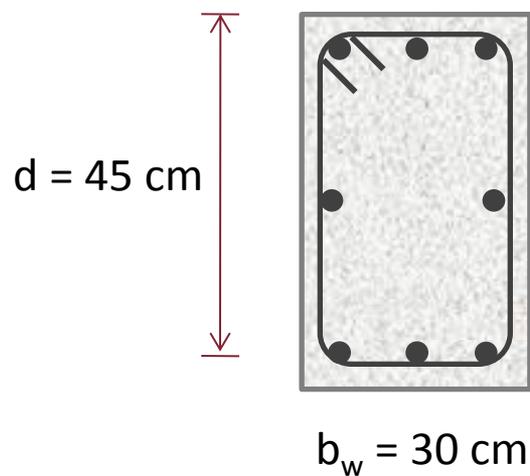
dove θ_I è l'angolo di inclinazione della prima fessurazione ricavato da $\operatorname{ctg}\theta_I = \tau/\sigma_I$ mentre τ e σ_I sono rispettivamente la tensione tangenziale e la tensione principale di trazione sulla corda baricentrica della sezione intesa interamente reagente.

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

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

Taglio - NTC vs D.M. 96

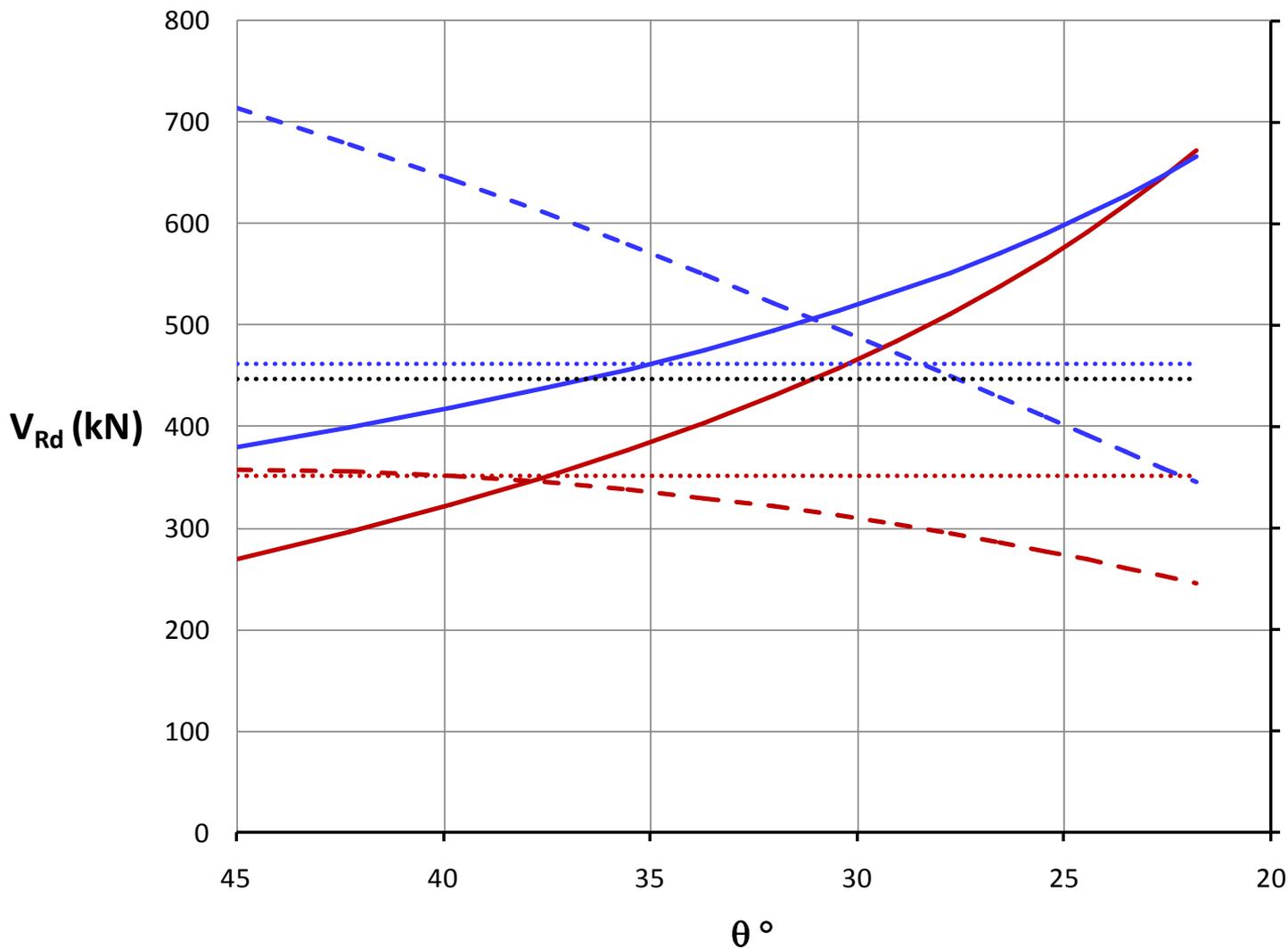
Esempio applicativo



Geometria	b_w	mm	300
	d	mm	450
	ϕ_{st}	mm	8
	$n_{b,st}$	-	2
	A_{sw}	mm ²	100,53
	s	mm	var.
Materiali	f_{yk}	N/mm²	380
	f_{yd}	N/mm ²	330,43
	R_{ck}	MPa	25
	f_{ck}	MPa	20,75

Taglio - NTC vs D.M. 96

S = 50 mm

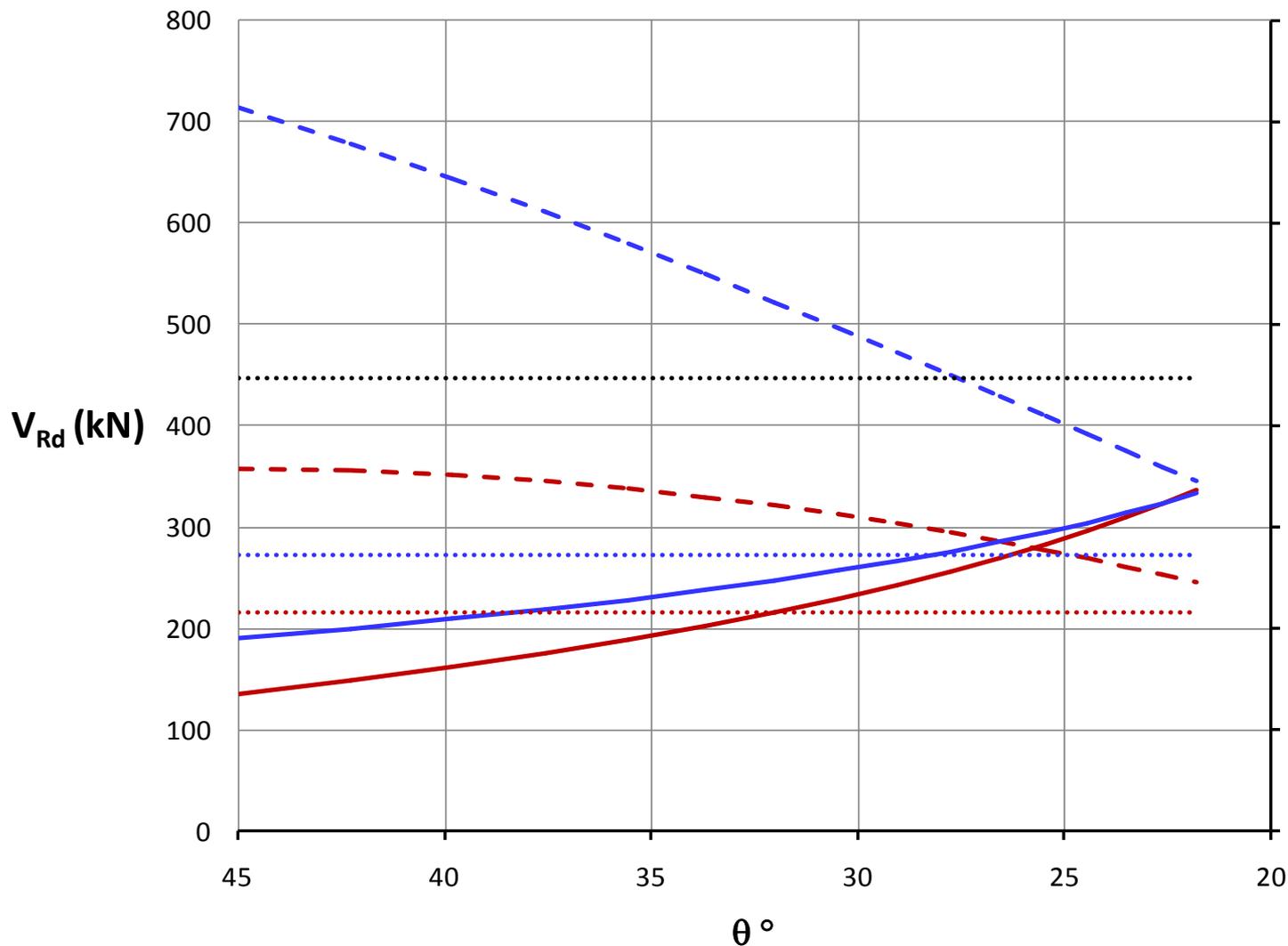


— VRsd	NTC 2008
- - VRcd	
— VRsd	
- - VRcd	
..... Vsdu,1	D.M. '96
..... Vsdu,2	
..... Vsdu,2	

- piegati
- staffe
- res. compr. bielle cls (DM96)

Taglio - NTC vs D.M. 96

S = 100 mm

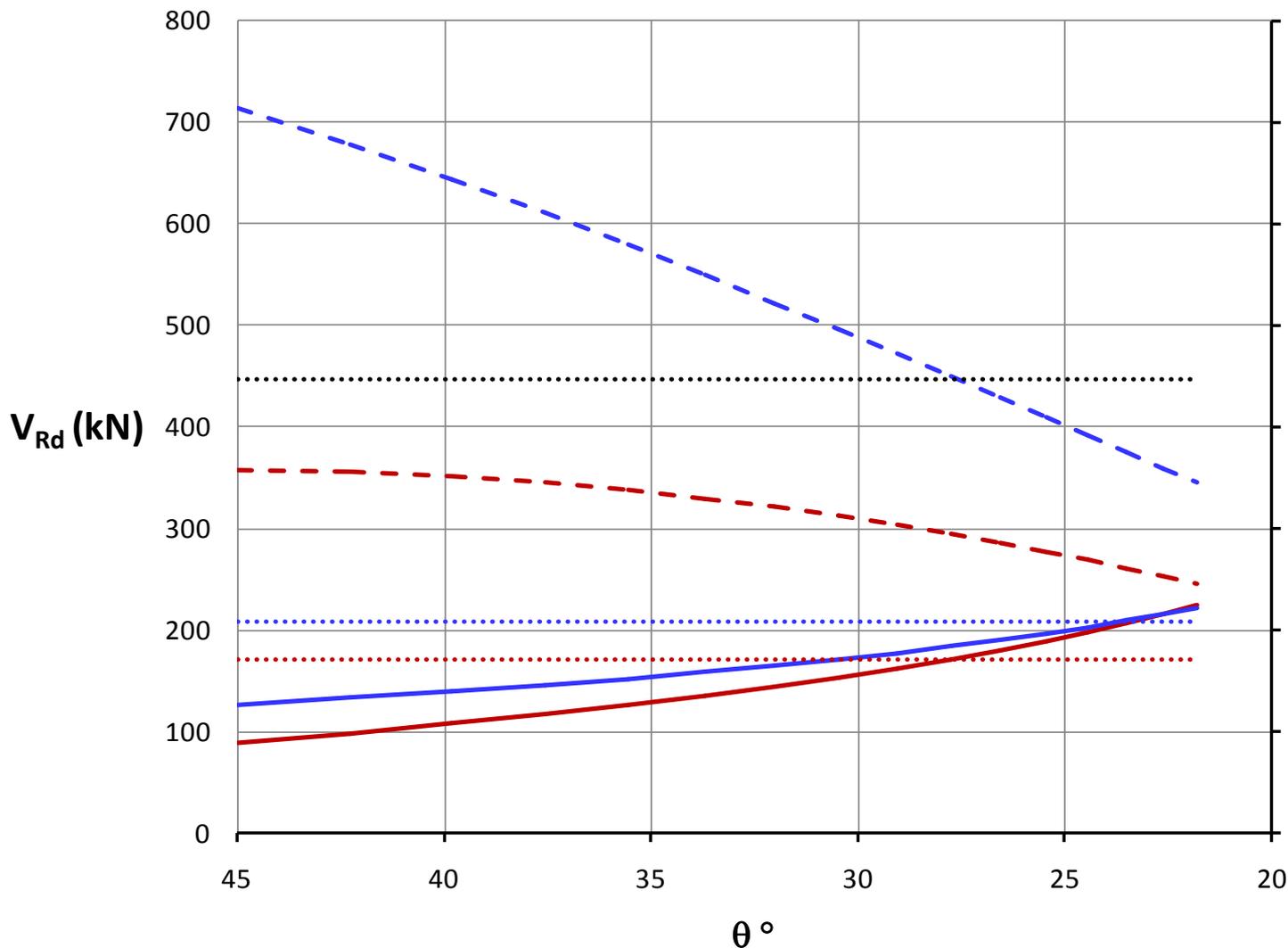


— VRsd	NTC 2008
- - VRcd	
— VRsd	
- - VRcd	
..... Vsdu,1	D.M. '96
..... Vsdu,2	
..... Vsdu,2	

- piegati
- staffe
- res. compr. bielle cls (DM96)

Taglio - NTC vs D.M. 96

S = 150 mm



— VRsd	NTC 2008
- - VRcd	
— VRsd	
- - VRcd	
..... Vsdu,1	D.M. '96
..... Vsdu,2	
..... Vsdu,2	

- piegati
- staffe
- res. compr. bielle cls (DM96)

Nodi trave-pilastro

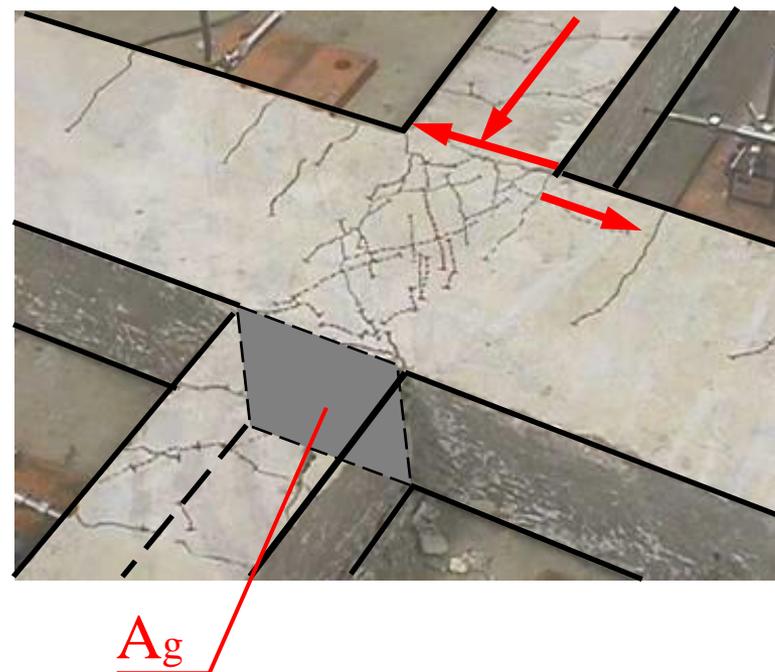
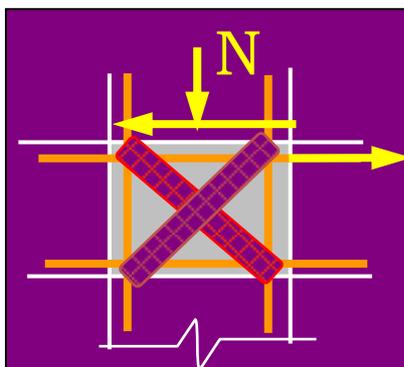
- Solo per i nodi non interamente confinati deve essere verificata:

- La resistenza a trazione

$$\sigma_{nt} = \frac{N}{2A_g} - \sqrt{\left(\frac{N}{2A_g}\right)^2 + \left(\frac{V_n}{A_g}\right)^2} \leq 0.3\sqrt{f_c} \quad (f_c \text{ in MPa})$$

- La resistenza a compressione

$$\sigma_{nc} = \frac{N}{2A_g} + \sqrt{\left(\frac{N}{2A_g}\right)^2 + \left(\frac{V_n}{A_g}\right)^2} \leq 0.5f_c$$



Verifiche di resistenza dei nodi

Nodi trave-pilastro

La verifica di resistenza deve essere eseguita solo per i nodi non interamente confinati come definiti al § 7.4.4.3 delle NTC. Deve essere verificata sia la resistenza a trazione diagonale che quella a compressione diagonale. Per la verifica si possono adottare le seguenti espressioni:

- per la resistenza a trazione:

$$\sigma_{nt} = \left| \frac{N}{2A_g} - \sqrt{\left(\frac{N}{2A_g}\right)^2 + \left(\frac{V_n}{A_g}\right)^2} \right| \leq 0,3\sqrt{f_c} \quad (f_c \text{ in MPa}) \quad (8.7.2.2)$$

- per la resistenza a compressione:

$$\sigma_{nc} = \frac{N}{2A_g} + \sqrt{\left(\frac{N}{2A_g}\right)^2 + \left(\frac{V_n}{A_g}\right)^2} \leq 0,5f_c \quad (8.7.2.3)$$

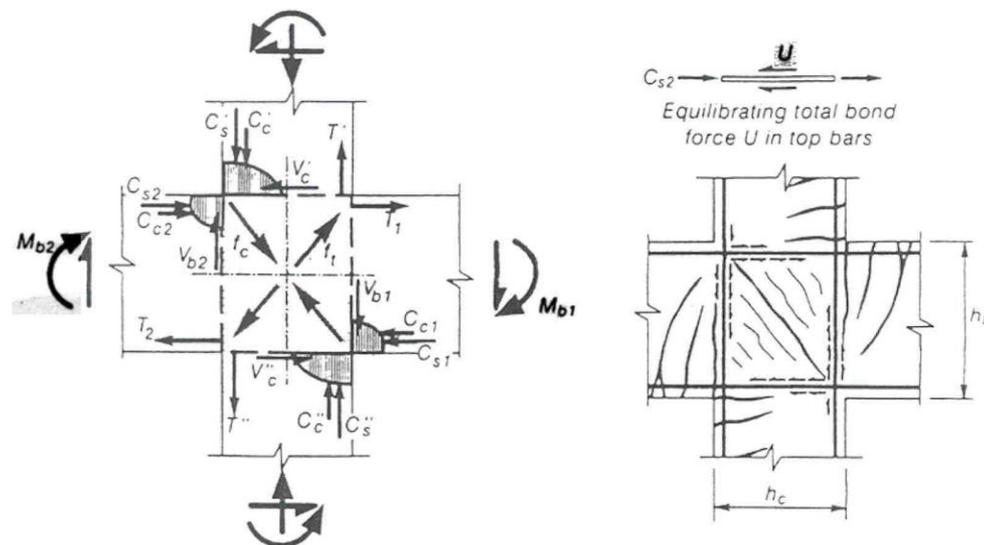
dove N indica l'azione assiale presente nel pilastro superiore, V_n indica il taglio totale agente sul nodo, considerando sia il taglio derivante dall'azione presente nel pilastro superiore, sia quello dovuto alla sollecitazione di trazione presente nell'armatura longitudinale superiore della trave, A_g indica la sezione orizzontale del nodo. Le resistenze dei materiali sono ottenute come media delle prove eseguite in sito e da fonti aggiuntive di informazione, divise per il fattore di confidenza appropriato in relazione al Livello di Conoscenza raggiunto e per il coefficiente parziale del materiale.

NODI TRAVE-PILASTRO

Nelle strutture esistenti i nodi sono in genere poco armati o addirittura privi di armatura trasversale.

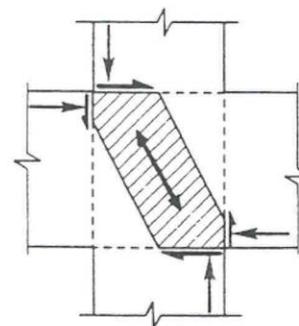
Pertanto, occorre verificarne la capacità, in termini di resistenza, a partire dalle resistenze degli elementi duttili adiacenti.

L'apertura delle lesioni diagonali si verifica quando la tensione principale di trazione all'interno del pannello nodale supera la resistenza a trazione del calcestruzzo.

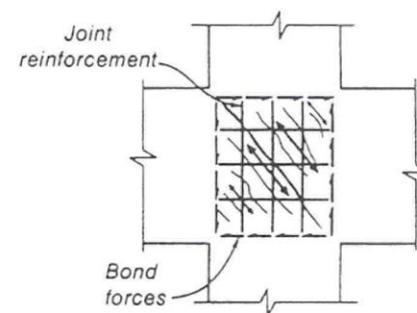


a) Sollecitazioni delle travi e dei pilastri agenti sul nodo

b) Quadro fessurativo e tensioni di aderenza fessurazione diagonale per trazione avvenuta nel pannello nodale



c) Meccanismo della biella diagonale di calcestruzzo: equilibrio tra le forze di compressione delle travi e dei pilastri e parzialmente delle forze di aderenza nella zona compressa



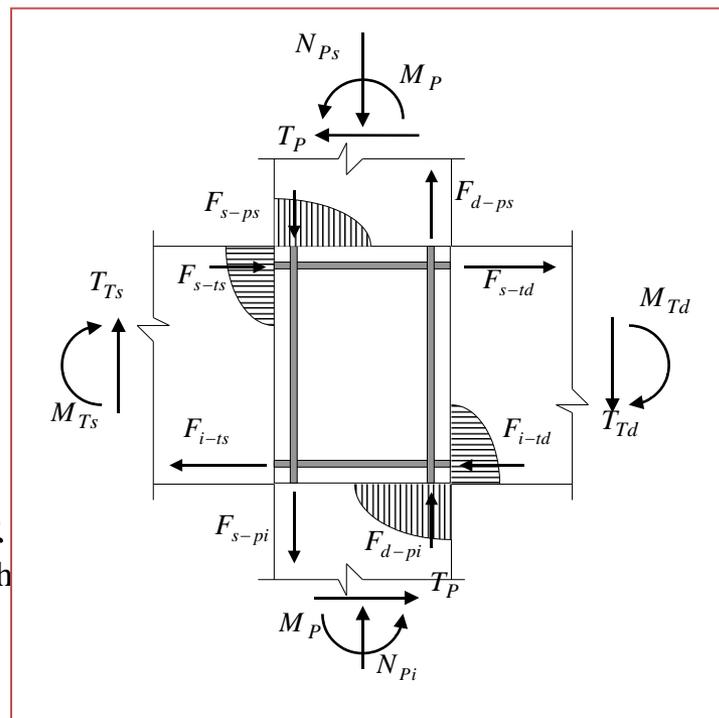
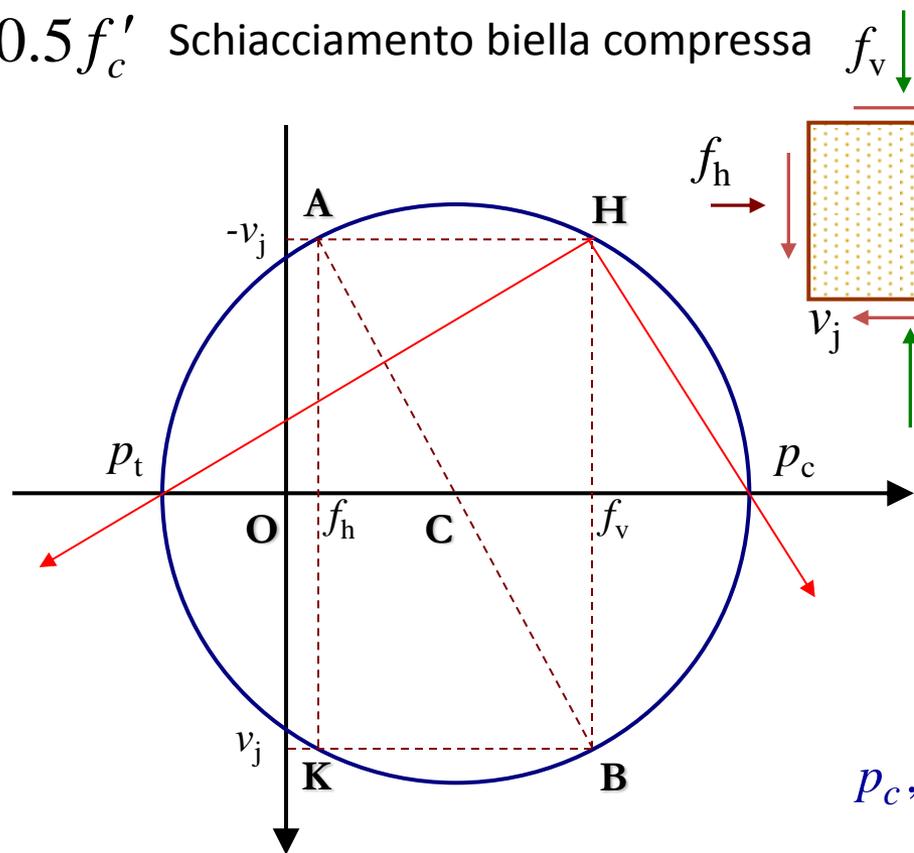
d) Meccanismo della fessurazione diagonale diffusa: armature orizzontali e verticali necessarie per l'equilibrio dopo la rottura per trazione

Resistenza del nodo

Criteri di resistenza per i nodi non confinati

$0.3\sqrt{f'_c}$ (MPa) – prima fessurazione

$0.5f'_c$ Schiacciamento biella compressa



$$\overline{OC} = \frac{f_v + f_h}{2}$$

$$R = \overline{CA} = \frac{1}{2} \sqrt{\overline{AH}^2 + \overline{BH}^2} = \frac{1}{2} \sqrt{(f_v - f_h)^2 + (2v_j)^2}$$

$$p_c, p_t = \overline{OC} \pm R = \frac{f_v + f_h}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{f_v - f_h}{2}\right)^2 + v_j^2}$$

Nodi trave-pilastro

resistenza a trazione:

$$\sigma_{nt} = \left| \frac{N}{2A_g} - \sqrt{\left(\frac{N}{2A_g}\right)^2 + \left(\frac{V_n}{A_g}\right)^2} \right| \leq 0.3\sqrt{f_c}$$

resistenza a compressione:

$$\sigma_{nc} = \frac{N}{2A_g} + \sqrt{\left(\frac{N}{2A_g}\right)^2 + \left(\frac{V_n}{A_g}\right)^2} \leq 0.5f_c$$

dove:

N indica l'azione assiale presente nel pilastro superiore,

V_n indica il taglio totale agente sul nodo, considerando sia il taglio derivante dall'azione presente nel pilastro superiore, sia quello dovuto alla sollecitazione di trazione presente nell'armatura longitudinale superiore della trave,

A_g indica la sezione orizzontale del nodo.

Le resistenze dei materiali sono ottenute come media delle prove eseguite in sito e da fonti aggiuntive di informazione, divise per il fattore di confidenza appropriato in relazione al Livello di Conoscenza raggiunto e per il coefficiente parziale del materiale.

NODI TRAVE-PILASTRO

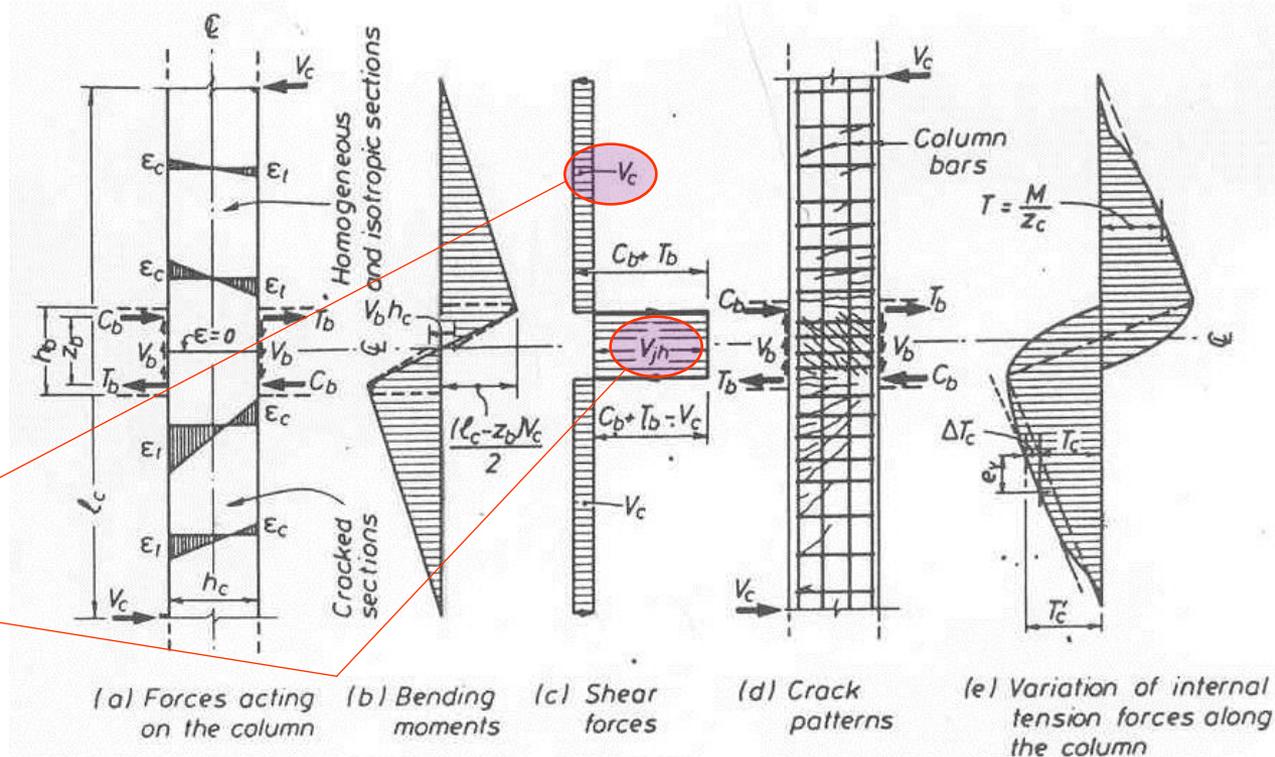
Sollecitazioni nei nodi

Il taglio nel nodo è molto maggiore del taglio nel pilastro

Si considera il nodo come parte del pilastro.

$$V_c = \frac{2T_b z_b + V_b h_c}{l_c}$$

$$V_{jh} = C_b + T_b - V_c$$



- V_c taglio nel pilastro
- V_{jh} taglio nel nodo
- d_y è il *drift* elastico di piano
- T_b trazione delle barre di armatura della trave
- z_b braccio delle forze interne nella trave
- h_c dimensione della sezione del pilastro
- l_c altezza del pilastro (distanza tra i due punti di inversione del momento)