

Norme tecniche per le costruzioni vers. 2008

Pier Paolo Rossi

Costruzioni civili e industriali (normativa non sismica)

Analisi della sezione

Taglio (elementi senza armature trasversali)

È consentito l'impiego di solai, piastre e membrature a comportamento analogo, sprovviste di armature trasversali resistenti a taglio.

La resistenza a taglio V_{Rd} di tali elementi deve essere valutata, utilizzando formule di comprovata affidabilità, sulla base della resistenza a trazione del calcestruzzo.

Analisi della sezione

Taglio (elementi senza armature trasversali)

Con riferimento all'elemento fessurato da momento flettente, la resistenza V_{Rd} vale:

$$V_{Rd} = [0.18 k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} / \gamma_c + 0.15 \sigma_{cp}] b_w d$$
$$= (v_{min} + 0.15 \sigma_{cp}) b_w d$$

$$k = 1 + (200/d)^{1/2} \leq 2$$

$$v_{min} = 0.035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2}$$

d è l'altezza utile della sezione (in mm);

$\rho_l = A_{sl} / (b_w d)$ è il rapp. geometrico di armatura long tesa (≤ 0.02);

$\sigma_{cp} = N_{Ed} / A_c$ è la tensione media di compressione ($\leq 0.2 f_{cd}$);

b_w è la larghezza minima della sezione nella parte tesa (in mm).

Analisi della sezione

Taglio (elementi senza armature trasversali)

In presenza di significativi sforzi di trazione, la resistenza a taglio del calcestruzzo è da considerarsi nulla e, in tal caso, non è possibile adottare elementi sprovvisti di armatura trasversale.

Le armature longitudinali, oltre ad assorbire gli sforzi conseguenti alle sollecitazioni di flessione, devono assorbire quelli provocati dal taglio dovuti all'inclinazione delle fessure rispetto all'asse della trave, inclinazione assunta pari a 45° .

Attenzione: in particolare, in corrispondenza degli appoggi, le armature longitudinali devono assorbire uno sforzo pari al taglio sull'appoggio.

Applicazione

Calcolo di V_{Rd}

$$V_{Rd} = [0,18 k (100 \rho_1 f_{ck})^{1/3} / \gamma_c + 0,15 \sigma_{cp}] b_w d \geq (v_{min} + 0,15 \sigma_{cp}) b_w d$$

TRAVE EMERGENTE (b=30 cm ; h=50 cm)

$$d = 46 \text{ cm}$$

$$\rho_l = A_{sl} / b_w d = 4.62 / (0.30 * 0.46) = 0.003348$$

$$k = 1 + (200/d)^{1/2} = 1.66 \leq 2$$

$$V_{Rd} = 52.4 \text{ kN}$$

Applicazione

Calcolo di V_{Rd}

TRAVE A SPESSORE (b=80 cm ; h=24 cm)

$$d = 20 \text{ cm}$$

$$\rho_l = A_{sl}/b_w d = 4.62/(0.80 \cdot 0.20) = 0.002888$$

$$k = 1 + (200/d)^{1/2} = 2$$

$$V_{Rd} = 69.7 \text{ kN}$$

Attenzione: La larghezza b considerata nella verifica a taglio della trave a spessore è calcolata secondo l'impostazione dell'Eurocodice 2 per la verifica a punzonamento. La larghezza non può essere superiore alla somma di larghezza pilastro e tre volte l'altezza utile del solaio (in questo caso $30 + 3 \times 20 = 90 \text{ cm}$).

Analisi della sezione

Taglio (elementi con armature trasversali)

La resistenza a taglio V_{Rd} di elementi dotati di specifica armatura a taglio deve essere valutata sulla base di una schematizzazione a traliccio.

Gli elementi resistenti dell'ideale traliccio sono:

- le armature trasversali
- le armature longitudinali
- il corrente compresso di calcestruzzo
- i puntoni d'anima inclinati.

L'inclinazione θ dei puntoni di calcestruzzo rispetto all'asse della trave deve rispettare i limiti seguenti:

$$1 \leq \operatorname{ctg} \theta \leq 2.5$$

Nota: nell'Eurocodice 2 (2005) si suggerisce un eguale limite per $\operatorname{ctg} \theta$.

Il limite è diverso nel documento italiano di applicaz. dell'EC2 (1993)

$$1 \leq \operatorname{ctg} \theta \leq 2$$

Analisi della sezione

Taglio (elementi con armature trasversali)

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

$$V_{Rsd} = 0.9 d \frac{A_{sw}}{s} f_{yd} (\operatorname{ctg} \alpha + \operatorname{ctg} \theta) \sin \alpha$$

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

$$V_{Rcd} = 0.9 d b_w \alpha_c f'_{cd} (\operatorname{ctg} \alpha + \operatorname{ctg} \theta) / (1 + \operatorname{ctg}^2 \theta)$$

3. La resistenza a taglio è la minore delle due sopra definite:

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

Analisi della sezione

Taglio (elementi con armature trasversali)

La resistenza di calcolo a "taglio compressione" si calcola con:

$$V_{Rcd} = 0.9 d b_w \alpha_c f'_{cd} (\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\theta) / (1 + \text{ctg}^2\theta)$$

dove:

f'_{cd} resist. a compressione ridotta del cls d'anima ($f'_{cd} = 0.5 f_{cd}$);

Nota: nell'Eurocodice 2 (2005), se la tensione di progetto dell'armatura trasversale è inferiore all'80% del valore caratteristico della tensione di snervamento, si suggeriscono i seguenti valori di f'_{cd}

$$\begin{array}{ll} 0.6 f_{cd} & \text{per } f_{ck} \leq 60 \text{ MPa} \\ (0.9 - f_{ck}/200) f_{cd} \geq 0.5 f_{cd} & \text{per } f_{ck} \geq 60 \text{ MPa} \end{array}$$

nell'Eurocodice 2 (1993) si suggeriscono i seguenti valori di f'_{cd}

$$(0.7 - f_{ck}/200) f_{cd} \geq 0.5 f_{cd}$$

Analisi della sezione

Taglio (elementi con armature trasversali)

La resistenza di calcolo a "taglio compressione" si calcola con:

$$V_{Rcd} = 0.9 d b_w \alpha_c f_{cd} (\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\theta) / (1 + \text{ctg}^2\theta)$$

dove:

α_c coefficiente maggiorativo pari a 1 per membrane non compresse

$$1 + \sigma_{cp} / f_{cd} \quad \text{per} \quad 0 \leq \sigma_{cp} < 0.25 f_{cd}$$

$$1.25 \quad \text{per} \quad 0.25 f_{cd} \leq \sigma_{cp} \leq 0.5 f_{cd}$$

$$2.5(1 - \sigma_{cp} / f_{cd}) \quad \text{per} \quad 0.5 f_{cd} < \sigma_{cp} < f_{cd}$$

Nota: nell'Eurocodice 2 (1994) si suggeriscono i seguenti valori di α_c
 $1.67 (1 - \sigma_{cp} / f_{cd}) \leq 1$

dove:

$\sigma_{cp} = (N_{Sd} - f_{yk} A_{s2} / \gamma_s) / A_c$ è la tensione media efficace nel cls dovuta alla forza assiale.

A_{s2} è l'area di armatura che risulta compressa allo stato limite ultimo

Analisi della sezione

Taglio (elementi con armature trasversali)

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

$$\operatorname{ctg}\theta_I \leq \operatorname{ctg}\theta$$

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

$$a_l = 0,9 d (\operatorname{ctg}\theta - \operatorname{ctg}\alpha) / 2 \geq 0$$

Analisi della sezione

Casi particolari

Nel caso di elementi ad altezza variabile o con cavi da precompressione inclinati, il taglio di calcolo viene assunto pari a:

$$V_{Ed} = V_d + V_{md} + V_{pd}$$

dove:

- V_d valore di calcolo del taglio dovuto ai carichi esterni;
- V_{md} valore di calcolo della componente di taglio dovuta all'inclinazione dei lembi della membratura;
- V_{pd} valore di calcolo della componente di taglio dovuta alla precompressione.

Analisi della sezione

Casi particolari

Il taglio all'appoggio determinato da carichi applicati alla distanza $a_v \leq 2d$ dall'appoggio stesso si potrà ridurre nel rapporto $a_v/2d$, con l'osservanza delle seguenti prescrizioni:

- nel caso di appoggio di estremità, l'armatura di trazione necessaria nella sezione ove è applicato il carico più vicino all'appoggio sia prolungata e ancorata al di là dell'asse teorico di appoggio;
- nel caso di appoggio intermedio l'armatura di trazione all'appoggio sia prolungata sin dove necessario e comunque fino alla sezione ove è applicato il carico più lontano compreso nella zona con $a_v \leq 2d$.

Nota: nell'Eurocodice 2 (2005) si impone $a_v = 2d$ per carichi applicati alla distanza $a_v \leq 2d$ dall'appoggio stesso. Questa riduzione si considera solo per la verifica in elementi in assenza di armatura trasversale.

Analisi della sezione

Casi particolari

Nota: nell'Eurocodice 2 (1993), per elementi senza armatura a taglio, e per elementi con armatura a taglio quando viene utilizzato il metodo normale di calcolo a taglio è permesso un incremento della resistenza a taglio, solo per i carichi concentrati situati ad una distanza $x \leq 2,5 d$ dal filo dell'appoggio.

Il valore τ_{Rd} nella stima di V_{Rd1} può essere moltiplicato per un fattore β pari a:

$$\beta = 2,5 d/x, \quad \text{con } 1,0 \leq \beta \leq \underline{5.0}$$

Quando questo incremento viene considerato, V_{Rd1} e l'armatura a taglio devono di regola essere calcolati in tutte le sezioni critiche sulla distanza $2,5 d$ dal filo dell'appoggio, adottando invece $\beta = 1,0$ dal lato della campata per i carichi concentrati pertinenti; la massima armatura a taglio così ottenuta deve, di regola, essere disposta sull'intera distanza pari a $2,5 d$ dall'appoggio.

Analisi della sezione

Casi particolari

Nota: (Eurocodice 2, 1993), a causa dell'incremento di resistenza dovuto al trasferimento diretto dei carichi vicini agli appoggi, per travi o piastre con carico uniformemente distribuito sarà generalmente cautelativo assumere nel tratto terminale il valore di V_{sd} calcolato alla distanza d da un appoggio diretto.

Analisi della sezione

Casi particolari

- Nel caso di elementi con armature trasversali resistenti al taglio, si deve verificare che lo sforzo di taglio V_{Ed} , calcolato in questo modo, soddisfi la condizione

$$V_{Ed} \leq A_s f_{yd} \sin \alpha$$

dove $A_s f_{yd}$ è la resistenza dell'armatura trasversale contenuta nella zona di lunghezza $0,75 a_v$ centrata tra carico ed appoggio e che attraversa la fessura di taglio inclinata ivi compresa.

- Lo sforzo di taglio V_{Ed} , calcolato senza la riduzione $a_v/2d$, deve comunque sempre rispettare la condizione

$$V_{Ed} \leq 0,5 b_w d v f_{cd}$$

essendo $v = 0,5$ un coefficiente di riduzione della resistenza del calcestruzzo fessurato per taglio.

Analisi della sezione

Casi particolari

Se per particolari modalità di applicazione dei carichi gli sforzi degli elementi tesi del traliccio risultano incrementati, le armature dovranno essere opportunamente adeguate.

Analisi della sezione

Punzonamento

Le lastre devono essere verificate nei riguardi del punzonamento allo stato limite ultimo, in corrispondenza dei pilastri e di carichi concentrati.

In mancanza di un'armatura trasversale appositamente dimensionata, la resistenza al punzonamento deve essere valutata, utilizzando formule di comprovata affidabilità, sulla base della resistenza a trazione del calcestruzzo, intendendo la sollecitazione distribuita su di un perimetro efficace di piastra distante $2d$ dall'impronta caricata, con d altezza utile (media) della piastra stessa.

Nel caso in cui si disponga una apposita armatura, l'intero sforzo allo stato limite ultimo dovrà essere affidato all'armatura.

Nel caso di piastre di fondazione si adotteranno opportuni adattamenti del modello sopra citato.

Analisi della sezione

Torsione

- Qualora l'equilibrio statico di una struttura dipenda dalla resistenza torsionale degli elementi che la compongono, è necessario condurre la verifica di resistenza nei riguardi delle sollecitazioni torcenti.
- Qualora, invece, in strutture iperstatiche, la torsione insorga solo per esigenze di congruenza e la sicurezza della struttura non dipenda dalla resistenza torsionale, non sarà generalmente necessario condurre le verifiche.

Per elementi prismatici sottoposti a torsione semplice o combinata con altre sollecitazioni, che abbiano sezione piena o cava, lo schema resistente è costituito da un traliccio periferico in cui gli sforzi di trazione sono affidati alle armature longitudinali e trasversali ivi contenute e gli sforzi di compressione sono affidati alle bielle di calcestruzzo.

Analisi della sezione

Torsione

Con riferimento al calcestruzzo la resistenza si calcola con

$$T_{Rcd} = 2 A t f'_{cd} \operatorname{ctg} \theta / (1 + \operatorname{ctg}^2 \theta)$$

dove

t è lo spessore della sezione cava; per sezioni piene $t = A_c / u$ dove A_c è l'area della sezione ed u è il suo perimetro; t deve essere assunta comunque ≥ 2 volte la distanza fra il bordo e il centro dell'armatura longitudinale.

Le armature longitudinali e trasversali del traliccio resistente devono essere poste entro lo spessore t del profilo periferico. Le barre longitudinali possono essere distribuite lungo detto profilo, ma comunque una barra deve essere presente su tutti i suoi spigoli.

Analisi della sezione

Torsione

Con riferimento alle staffe la resistenza si calcola con

$$T_{Rsd} = 2 A \frac{A_s}{s} f_{yd} \operatorname{ctg} \theta$$

Con riferimento all'armatura longitudinale la resistenza si calcola con

$$T_{Rld} = 2 A \frac{\Sigma A_l}{u_m} \frac{f_{yd}}{\operatorname{ctg} \theta}$$

dove

A area racchiusa dalla fibra media del profilo periferico;

A_s area delle staffe;

u_m perimetro medio del nucleo resistente

s passo delle staffe;

ΣA_l area complessiva delle barre longitudinali.

Analisi della sezione

Torsione

L'inclinazione θ delle bielle compresse di calcestruzzo rispetto all'asse della trave deve rispettare i limiti seguenti

$$0,4 \leq \operatorname{ctg} \theta \leq 2,5$$

Entro questi limiti, nel caso di torsione pura, può porsi

$$\operatorname{ctg} \theta = (a_l/a_s)^{\frac{1}{2}}$$

con

$$a_l = \sum A_l/u_m$$

$$a_s = A_s/s$$

Analisi della sezione

Torsione

La resistenza alla torsione della trave è la minore delle tre sopra definite:

$$T_{Rd} = \min (T_{Rcd}, T_{Rsd}, T_{Rld})$$

Nel caso di elementi per i quali lo schema resistente di traliccio periferico non sia applicabile, quali gli elementi a pareti sottili a sezione aperta, dovranno utilizzarsi metodi di calcolo fondati su ipotesi teoriche e risultati sperimentali chiaramente comprovati.

Analisi della sezione

Sollecitazioni composte

Torsione, flessione e sforzo normale

Le armature longitudinali calcolate come sopra indicato per la resistenza nei riguardi della sollecitazione torcente devono essere aggiunte a quelle calcolate nei riguardi delle verifiche per flessione.

Si applicano inoltre le seguenti regole:

- nella zona tesa all'armatura longitudinale richiesta dalla sollecitazione di flessione e sforzo normale, deve essere aggiunta l'armatura richiesta dalla torsione;
- nella zona compressa, se la tensione di trazione dovuta alla torsione è minore della tensione di compressione nel calcestruzzo dovuta alla flessione e allo sforzo normale, non è necessaria armatura longitudinale aggiuntiva per torsione.

Analisi della sezione

Sollecitazioni composte

Torsione e taglio

Per quanto riguarda la crisi lato calcestruzzo, la resistenza massima di una membratura soggetta a torsione e taglio è limitata dalla resistenza delle bielle compresse di calcestruzzo. Per non eccedere tale resistenza deve essere soddisfatta la seguente condizione:

$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rcd}} + \frac{V_{Ed}}{V_{Rcd}} \leq 1$$

I calcoli per il progetto delle staffe possono effettuarsi separatamente per la torsione e per il taglio, sommando o sottraendo su ogni lato le aree richieste sulla base del verso delle relative tensioni.

Attenzione: per l'angolo θ delle bielle compresse di conglomerato cementizio deve essere assunto un unico valore per le due verifiche di taglio e torsione.

Stati limite d'esercizio

- Verifiche di deformabilità
- Verifiche di vibrazione
- Verifiche di fessurazione
- Verifiche delle tensioni di esercizio
- Verifiche a fatica per quanto riguarda eventuali danni che possano compromettere la durabilità.

Verifica di deformabilità

Per quanto riguarda i limiti di deformabilità, essi devono essere congruenti con le prestazioni richieste alla struttura anche in relazione alla destinazione d'uso, con riferimento alle esigenze statiche, funzionali ed estetiche.

Per quanto riguarda i valori limite, essi dovranno essere commisurati a specifiche esigenze e potranno essere dedotti da documentazione tecnica di comprovata validità.

Verifica delle vibrazioni

Quando necessario si effettuerà la verifica delle vibrazioni:

- al fine di assicurare accettabili livelli di benessere (dal punto di vista delle sensazioni percepite dagli utenti),
- al fine di prevenire possibili danni negli elementi secondari e nei componenti non strutturali,
- in tutti i casi per i quali le vibrazioni possono danneggiare il funzionamento di macchine e apparecchiature,

Verifica di fessurazione

Per assicurare la funzionalità e la durata delle strutture è necessario:

- realizzare un sufficiente ricoprimento delle armature con calcestruzzo di buona qualità e compattezza, bassa porosità e bassa permeabilità;
- non superare uno stato limite di fessurazione adeguato alle condizioni ambientali, alle sollecitazioni ed alla sensibilità delle armature alla corrosione;
- tener conto delle esigenze estetiche.

Verifica di fessurazione

Stati limite di fessurazione

- a) **stato limite di decompressione** nel quale, per la combinazione di azioni prescelta, la tensione normale è ovunque di compressione ed al più uguale a 0;
- b) **stato limite di formazione delle fessure**, nel quale, per la combinazione di azioni prescelta, la tensione normale di trazione nella fibra più sollecitata è:

$$\sigma_t = \frac{f_{ctm}}{1.2}$$

- c) **stato limite di apertura delle fessure**, nel quale, per la combinazione di azioni prescelta, il valore limite di apertura della fessura calcolato al livello considerato è pari ad uno dei seguenti valori nominali:
 - $w_1 = 0.2 \text{ mm}$
 - $w_2 = 0.3 \text{ mm}$
 - $w_3 = 0.4 \text{ mm}$

Verifica di fessurazione

Combinazioni di azioni

Si prendono in considerazione le seguenti combinazioni:

- **Combinazioni quasi permanenti;**
- **Combinazioni frequenti.**

Verifica di fessurazione

Condizioni ambientali

Le condizioni ambientali, ai fini della protezione contro la corrosione delle armature metalliche, possono essere suddivise in ordinarie, aggressive e molto aggressive con riferimento alle classi di esposizione definite nelle Linee Guida per il calcestruzzo strutturale emesse dal Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

Condizioni ambientali	Classi di esposizione
Ordinarie	X0, XC1,XC2,XC3, XF1
Aggressive	XC4, XD1, XS1, XA1, XA2, XF2, XF3
Molto aggressive	XD2, XD3, XS2, XS3, XA3, XF4

Verifica di fessurazione

Sensibilità delle armatura alla corrosione

Le armature si distinguono in due gruppi:

- **ARMATURE SENSIBILI** acciai da precompresso
- **ARMATURE POCO SENSIBILI** acciai ordinari

Nota: Per gli acciai zincati e per quelli inossidabili si può tener conto della loro minor sensibilità alla corrosione.

Verifica di fessurazione

Scelta degli stati limite di fessurazione

Gruppi di esigenze	Condizioni ambientali	Combinazioni di azioni	Armatura			
			Sensibile		Poco sensibile	
			Stato limite	w_d	Stato limite	w_d
a	Ordinarie	Frequente	Ap. Fessure	$\leq w_2$	Ap. Fessure	$\leq w_3$
		Quasi permanente	Ap. Fessure	$\leq w_1$	Ap. Fessure	$\leq w_2$
b	Aggressive	Frequente	Ap. Fessure	$\leq w_1$	Ap. Fessure	$\leq w_2$
		Quasi permanente	Decompressione	-	Ap. Fessure	$\leq w_1$
c	Molto aggressive	Frequente	Formazione fessure	-	Ap. Fessure	$\leq w_1$
		Quasi permanente	Decompressione	-	Ap. Fessure	$\leq w_1$

Verifica di fessurazione

Verifica allo stato limite di fessurazione

Stato limite di decompressione e di formazione delle fessure

Le tensioni sono calcolate in base alle caratteristiche geometriche e meccaniche della sezione omogeneizzata non fessurata.

Verifica di fessurazione

Verifica allo stato limite di fessurazione

Stato limite di apertura delle fessure

Il valore di calcolo di apertura delle fessure (w_d) non deve superare i valori limite. Il valore di calcolo è dato da:

$$w_d = 1,7 w_m$$

dove w_m , rappresenta l'ampiezza media delle fessure.

L'ampiezza media delle fessure w_m è calcolata come prodotto della deformazione media delle barre d'armatura ϵ_{sm} per la distanza media tra le fessure Δ_{sm} :

$$w_m = \epsilon_{sm} \Delta_{sm}$$

Per il calcolo di ϵ_{sm} , e Δ_{sm} vanno utilizzati criteri consolidati riportati nella letteratura tecnica.

Verifica di fessurazione

Verifica allo stato limite di fessurazione

Stato limite di apertura delle fessure

Nota: La verifica dell'ampiezza di fessurazione può anche essere condotta senza calcolo diretto, limitando la tensione di trazione nell'armatura, valutata nella sezione parzializzata per la combinazione di carico pertinente, ad un massimo correlato al diametro delle barre ed alla loro spaziatura.

Verifica di fessurazione

Verifica allo stato limite di fessurazione

Tensione massima di compressione del cls in condizioni di esercizio

La massima tensione di compressione del calcestruzzo σ_c , deve rispettare la limitazione seguente:

$$\begin{aligned}\sigma_c &< 0,60 f_{ck} && \text{per combinazione caratteristica (rara)} \\ \sigma_c &< 0,45 f_{ck} && \text{per combinazione quasi permanente.}\end{aligned}$$

Nota: Nel caso di elementi piani (solette, pareti, ...) gettati in opera con calcestruzzi ordinari e con spessori di calcestruzzo minori di 50 mm i valori limite sopra scritti vanno ridotti del 20%.

Verifica di fessurazione

Verifica allo stato limite di fessurazione

Tensione massima dell'acciaio in condizioni di esercizio

Per l'acciaio la tensione massima σ_s per effetto delle azioni dovute alla combinazione caratteristica deve rispettare la limitazione seguente:

$$\sigma_s < 0.8 f_{yk}$$

FINE