

Progettazione dei nodi trave-pilastro delle strutture intelaiate in cemento armato secondo il D.M. 2018

Le nuove norme tecniche per le costruzioni (D.M. 2018) entrate in vigore il 22 marzo 2018 prevedono verifiche di resistenza per i nodi delle strutture intelaiate in cemento armato indipendenti dall'ipotesi progettuale adottata:

7.4. COSTRUZIONI DI CALCESTRUZZO

7.4.1. GENERALITÀ

Nel caso di comportamento strutturale non dissipativo, la capacità delle membrature deve essere valutata in accordo con le regole di cui al § 4.1, senza nessun requisito aggiuntivo, a condizione che in nessuna sezione si superi il momento resistente massimo in campo sostanzialmente elastico, come definito al § 4.1.2.3.4.2. Per i nodi trave-pilastro di strutture a comportamento non dissipativo si devono applicare le regole di progetto relative alla CD "B" contenute nel § 7.4.4.3. Per le strutture prefabbricate a comportamento non dissipativo si devono applicare anche le regole generali contenute nel § 7.4.5.

La progettazione dei nodi è in ogni caso intesa come 'in capacità', quindi la sollecitazione di domanda dipende dalla quantità di barre effettivamente presenti nelle travi:

7.4.4.3.1 Verifiche di resistenza (RES)

Il nodo deve essere progettato in maniera tale da evitare una sua rottura anticipata rispetto alle zone delle travi e dei pilastri in esso concorrenti.

In ogni nodo la capacità a taglio deve essere superiore o uguale alla corrispondente domanda.

La domanda a taglio in direzione orizzontale deve essere calcolata tenendo conto delle sollecitazioni più gravose che, per effetto dell'azione sismica, si possono verificare negli elementi che vi confluiscono. In assenza di più accurate valutazioni, la domanda a taglio agente nel nucleo di calcestruzzo del nodo può essere calcolata, per ciascuna direzione dell'azione sismica, come:

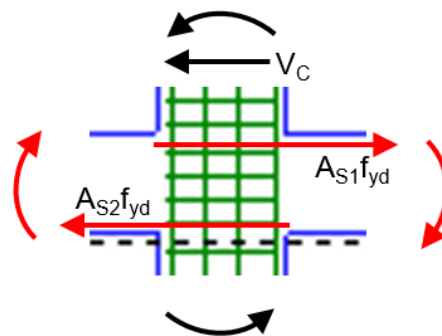
$$V_{jbd} = \gamma_{Rd} \cdot (A_{S1} + A_{S2}) \cdot f_{yd} - V_C \quad \text{per nodi interni} \quad [7.4.6]$$

$$V_{jbd} = \gamma_{Rd} \cdot A_{S1} \cdot f_{yd} - V_C \quad \text{per nodi esterni} \quad [7.4.7]$$

in cui per il valore di γ_{Rd} si veda la Tab. 7.2.I, A_{S1} ed A_{S2} sono rispettivamente l'area dell'armatura superiore ed inferiore della trave e V_C è la forza di taglio nel pilastro al di sopra del nodo, derivante dall'analisi in condizioni sismiche.

Le forze di taglio che agiscono sui nodi devono corrispondere alla più avversa direzione di provenienza dell'azione sismica, la quale si riflette sulla scelta dei valori di A_{S1} , A_{S2} e V_C da utilizzare nelle espressioni [7.4.6] e [7.4.7].

La scelta della sollecitazione di domanda del nodo deriva dal seguente schema, nel quale è considerato il contemporaneo snervamento delle barre delle travi:



Si osserva che un valore di V_C compatibile con la capacità delle travi è almeno il massimo risultante dal calcolo, e che diminuendo l'azione sismica di progetto, a parità di armature delle travi, aumenta la sollecitazione di domanda del nodo.

La definizione della sollecitazione di domanda prescritta dalla norma può causare difficoltà inattese nella progettazione dei nodi se progettualmente si pensa a strutture non dissipative, per le quali le verifiche concettualmente non richiedono sovraresistenze gerarchiche fra i singoli

elementi strutturali. Difficoltà inattese possono essere riscontrate soprattutto in siti a bassa sismicità, dove anche per strutture non dissipative può non esserci l'inversione del momento flettente sulle travi in prossimità del nodo, e quindi per i nodi interni la chiamata in causa della totale capacità delle barre all'intradosso può essere considerata una scelta piuttosto conservativa.

Le verifiche di resistenza (le stesse previste dal D.M. 2008 per le strutture progettate in classe di duttilità alta) sono basate sull'ipotesi di un meccanismo a traliccio, e quindi sono previsti i controlli sulla compressione e sulla trazione diagonale del calcestruzzo:

La capacità a taglio del nodo è fornita da un meccanismo a traliccio che, a seguito della fessurazione diagonale, vede operare contemporaneamente un meccanismo di taglio compressione ed un meccanismo di taglio trazione. Si devono pertanto soddisfare requisiti atti a garantire l'efficacia dei due meccanismi.

La verifica a compressione diagonale è eseguita controllando con la [7.4.8] che la resistenza del puntone di calcestruzzo sia maggiore dell'azione di domanda definita in precedenza:

La compressione nel puntone diagonale indotta dal meccanismo a traliccio non deve eccedere la resistenza a compressione del calcestruzzo. In assenza di modelli più accurati, il requisito può ritenersi soddisfatto se:

$$V_{jbd} \leq \eta \cdot f_{cd} \cdot b_j \cdot h_{jc} \cdot \sqrt{1 - \frac{v_d}{\eta}} \quad [7.4.8]$$

in cui

$$\eta = \alpha_j \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \quad \text{con } f_{ck} \text{ espresso in MPa} \quad [7.4.9]$$

ed α_j è un coefficiente che vale 0,6 per nodi interni e 0,48 per nodi esterni, v_d è la forza assiale nel pilastro al di sopra del nodo, normalizzata rispetto alla resistenza a compressione della sezione di solo calcestruzzo, h_{jc} è la distanza tra le giaciture più esterne delle armature del pilastro, b_j è la larghezza effettiva del nodo. Quest'ultima è assunta pari alla minore tra:

- a) la maggiore tra le larghezze della sezione del pilastro e della sezione della trave;
- b) la minore tra le larghezze della sezione del pilastro e della sezione della trave, ambedue aumentate di metà altezza della sezione del pilastro.

La verifica a trazione diagonale è eseguita controllando con la [7.4.10] che il confinamento del nodo sia adeguato. Se il confinamento è adeguato la verifica è soddisfatta, altrimenti il taglio nel nodo è affidato alle sole staffe e la verifica è eseguita con le [7.4.11] e [7.4.12]:

Per evitare che la massima trazione diagonale del calcestruzzo ecceda la f_{ctd} deve essere previsto un adeguato confinamento. In assenza di modelli più accurati, si possono disporre nel nodo staffe orizzontali di diametro non inferiore a 6 mm, in modo che:

$$\frac{A_{sh} \cdot f_{ywd}}{b_j \cdot h_{jw}} \geq \frac{[V_{jbd} / (b_j \cdot h_{jc})]^2}{f_{ctd} + v_d \cdot f_{cd}} - f_{ctd} \quad [7.4.10]$$

in cui i simboli già utilizzati hanno il significato in precedenza illustrato, A_{sh} è l'area totale della sezione delle staffe e h_{jw} è la distanza tra le giaciture di armature superiori e inferiori della trave.

In alternativa, l'integrità del nodo a seguito della fessurazione diagonale può essere garantita integralmente dalle staffe orizzontali se:

$$A_{sh} \cdot f_{ywd} \geq \gamma_{Rd} \cdot (A_{s1} + A_{s2}) \cdot f_{yd} \cdot (1 - 0,8v_d) \quad \text{per nodi interni} \quad [7.4.11]$$

$$A_{sh} \cdot f_{ywd} \geq \gamma_{Rd} \cdot A_{s2} \cdot f_{yd} \cdot (1 - 0,8v_d) \quad \text{per nodi esterni} \quad [7.4.12]$$

dove per il valore di γ_{Rd} si veda la Tab. 7.2.I, A_{s1} ed A_{s2} hanno il valore visto in precedenza, v_d è la forza assiale normalizzata agente al di sopra del nodo, per i nodi interni, al di sotto del nodo, per i nodi esterni.

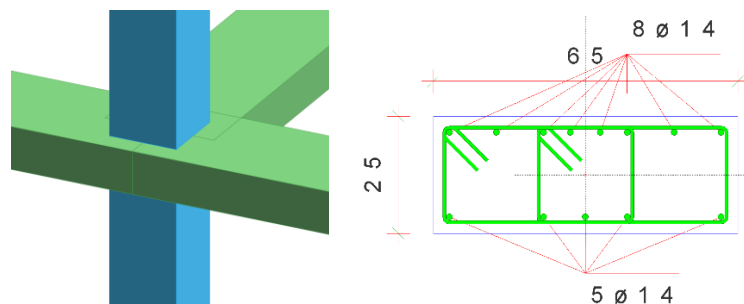
Le maggiori difficoltà nella progettazione dei nodi dipendono dalla verifica a trazione diagonale, per la quale risulta generalmente importante dimensionare le staffe in modo da ottenere un adeguato confinamento. Si osserva infatti che se il confinamento non è adeguato allora, ad esempio per un nodo interno con $v_d \sim 0.1$, è necessaria un'area di staffe almeno pari alla somma di

quella delle barre all'intradosso ed all'estradosso della trave. Si osserva inoltre che nell'utilizzo della [7.4.10] non è tenuto in conto se il nodo è interamente confinato o meno.

La normativa permette l'utilizzo di modelli più accurati, tuttavia gli EuroCodici, a cui viene fatto riferimento come norma di comprovata validità, propongono un modello di verifica similare.

La necessità di verificare i nodi secondo i suddetti criteri porta a dover disporre maggiori quantitativi di staffe rispetto a quanto risultava sufficiente nella progettazione di strutture a bassa duttilità secondo le precedenti normative, per le quali era previsto solo un minimo di regolamento. In particolare l'utilizzo di travi in spessore risulta notevolmente penalizzante, come si desume dal seguente semplice esempio.

Consideriamo un nodo interno fra un pilastro 40x40 cm e travi in spessore 65x25 cm in cls C28/35 ed acciaio B450C. In ogni caso il copriferro a bordo staffa è di 2.5 cm e si utilizzano staffe Φ 8. Le travi sono armate con 8 Φ 14 all'estradosso e 5 Φ 14 all'intradosso, ed hanno una flessione ultima pari a $M_{Rd} = -93\text{kNm} / +60\text{kNm}$.



Si esegue la progettazione rispetto alla direzione per cui il nodo risulta interno, la compressione del pilastro sopra il nodo è pari a 300kN ed il taglio nella direzione di progetto è 50kN.

Dati:

f_{yd}	391.30 N/mm ²
f_{ck}	29.05 N/mm ²
f_{cd}	16.46 N/mm ²
f_{ctd}	1.32 N/mm ²
b_j	600 mm
h_{jc}	312 mm
h_{jw}	180 mm
α_j	0.6
γ_{RD}	1.1
V_C	50 kN
N	300 kN
$A_{S1}+A_{S2}$	2001.19 mm ²

Domanda a taglio agente nel nucleo di calcestruzzo:

$$V_{jbd} = \gamma_{RD}(A_{S1}+A_{S2})f_{yd}-V_C = 811.38 \text{ kN}$$

Verifica a compressione [7.4.8]:

$$v_d = N/(B_{pil}H_{pil}f_{cd}) = 0.11390$$

$$\eta = \alpha_j(1-f_{ck}/250) = 0.53028$$

$$V_{jRd} = \eta f_{cd} b_j h_{jc} \text{rad} q(1-v_d/\eta) = 1448.03 \text{ kN} > V_{jbd}.$$

Progetto staffe a trazione, area minima per confinamento adeguato [7.4.10]:

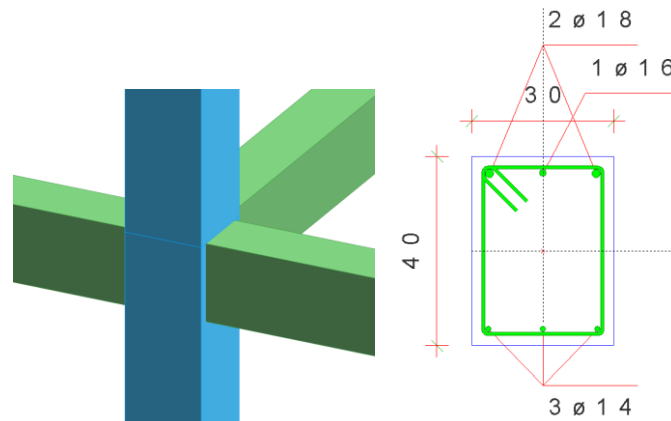
$$A_{Sh,min,0} = \{ [V_{jbd}/(b_j h_{jc})]^2 / (f_{ctd} + v_d f_{cd}) - f_{ctd} \} b_j h_{jw} / f_{yd} = 1258.53 \text{ mm}^2$$

Progetto staffe a trazione, area minima per confinamento non adeguato [7.4.11]:

$$A_{Sh,min,1} = \gamma_{RD}(A_{S1}+A_{S2})(1-0.8v_d) = 2000.73 \text{ mm}^2$$

La verifica a compressione è soddisfatta. Nell'ipotesi di confinamento non adeguato la quantità di staffe necessarie a soddisfare le verifiche sarebbe maggiore rispetto a quella sufficiente ad ottenere una condizione di confinamento adeguato, quindi per soddisfare anche la verifica a trazione è sufficiente disporre staffe per 1258.53 mm^2 , in modo che il confinamento sia adeguato. Per un nodo verificato servono quindi 7 staffe $\Phi 8$ a 4 braccia da disporre nello spazio di 180 mm fra le giaciture delle barre della trave, cioè ad un passo di circa 25 mm. Quindi il nodo non è praticamente armabile.

La progettabilità del nodo può essere ottenuta utilizzando travi ricalate $30 \times 40 \text{ cm}$ armate con $2\Phi 18 + 1\Phi 16$ all'estradosso e $3\Phi 14$ all'intradosso, ottenendo quindi flessioni ultime, paragonabili al caso precedente, pari a $M_{Rd} = -94 \text{ kNm} / +62 \text{ kNm}$.



Si considerano le stesse sollecitazioni sul pilastro del caso precedente.

Dati:

f_{yd}	391.30 N/mm ²
f_{ck}	29.05 N/mm ²
f_{cd}	16.46 N/mm ²
f_{ctd}	1.32 N/mm ²
b_j	400 mm
h_{jc}	312 mm
h_{jw}	330 mm
α_j	0.6
γ_{RD}	1.1
V_C	50 kN
N	300 kN
$A_{S1} + A_{S2}$	1171.81 mm ²

Domanda a taglio agente nel nucleo di calcestruzzo:

$$V_{jbd} = \gamma_{RD}(A_{S1} + A_{S2})f_{yd} - V_C = 454.39 \text{ kN}$$

Verifica a compressione [7.4.8]:

$$v_d = N / (B_{pil} H_{pil} f_{cd}) = 0.11390$$

$$\eta = \alpha_j (1 - f_{ck} / 250) = 0.53028$$

$$V_{jRd} = \eta f_{cd} b_j h_{jc} \alpha_d q (1 - v_d / \eta) = 965.35 \text{ kN} > V_{jbd}.$$

Progetto staffe a trazione, area minima per confinamento adeguato [7.4.10]:

$$A_{sh, \min, 0} = \{ [V_{jbd} / (b_j h_{jc})]^2 / (f_{ctd} + v_d f_{cd}) - f_{ctd} \} b_j h_{jw} / f_{yd} = 954.36 \text{ mm}^2$$

Progetto staffe a trazione, area minima per confinamento non adeguato [7.4.11]:

$$A_{sh, \min, 1} = \gamma_{RD}(A_{S1} + A_{S2})(1 - 0.8v_d) = 1171.54 \text{ mm}^2$$

La verifica a compressione è soddisfatta. Nell'ipotesi di confinamento non adeguato la quantità di staffe necessarie a soddisfare le verifiche sarebbe maggiore rispetto a quella sufficiente ad ottenere una condizione di confinamento adeguato, quindi per soddisfare anche la verifica a

trazione è sufficiente disporre staffe per 954.36 mm^2 , in modo che il confinamento sia adeguato. Per un nodo verificato servono quindi 5 staffe $\Phi 8$ a 4 braccia da disporre nello spazio di 330 mm fra le giaciture delle barre della trave, cioè ad un passo di circa 66 mm. Quindi il nodo risulta al limite armabile.

Nelle seguenti tabelle è indicata la quantità di staffe necessaria ad ottenere un adeguato confinamento al variare della classe del calcestruzzo. I risultati sono ottenuti mantenendo costante il valore della domanda a taglio agente nel nucleo di calcestruzzo (l'aumento della classe del cls ha poca rilevanza nelle verifiche a flessione senza compressione che determina l'armatura delle travi). In funzione dell'area di staffe minima è indicato il numero minimo di staffe $\Phi 8$ a 4 braccia necessario ed il relativo passo.

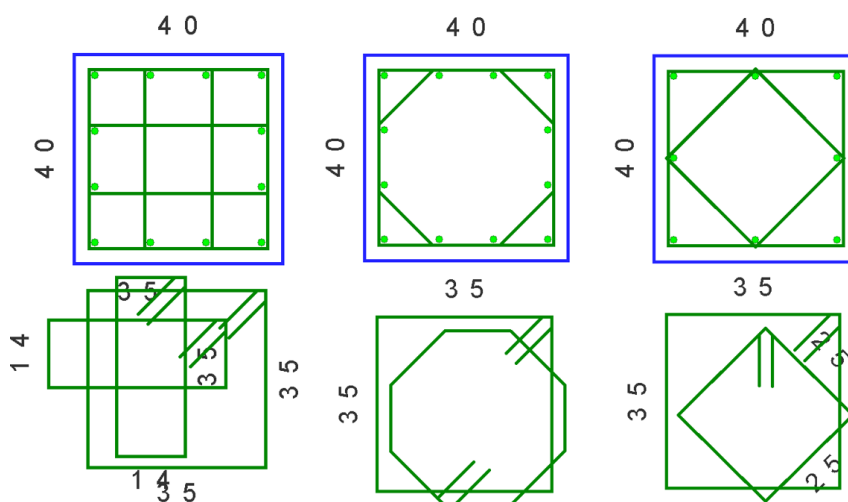
Nodo con trave 65x25 est:8 Φ 14 int:5 Φ 14

CLS	$A_{sh,min} \text{ mm}^2$	Num. staffe	Passo mm
C25/30	1363.25	7	25
C28/35	1258.53	7	25
C30/37	1219.73	7	25
C32/40	1166.67	6	30
C35/45	1078.91	6	30
C40/50	1001.71	5	36

Nodo con trave 30x40 est:2 Φ 18+1 Φ 16 int:3 Φ 14

CLS	$A_{sh,min} \text{ mm}^2$	Num. staffe	Passo mm
C25/30	1057.58	6	55
C28/35	954.36	5	66
C30/37	915.93	5	66
C32/40	863.21	5	66
C35/45	775.61	4	82
C40/50	698.10	4	82

In questo esempio risulta quindi impossibile utilizzare travi in spessore, ed in ogni caso risulta necessario utilizzare staffe a 4 braccia:



Il semplice esempio appena illustrato ha lo scopo di evidenziare le criticità nella progettazione dei nodi trave-pilastro delle strutture intelaiate in cemento armato secondo il D.M. 2018. Il caso in analisi prevede condizioni che si ritengono non sfavorevoli alla progettabilità. Da questo punto di

vista sono fattori penalizzanti, oltre l'aumento delle barre nelle travi, anche la diminuzione della compressione e del taglio sul pilastro. Risulteranno quindi progettabili con maggiori difficoltà i nodi dei piani superiori, in particolare i nodi delle coperture, per i quali non c'è né compressione né taglio equilibrante.