



RINFORZO DI TRAVI E PILASTRI DI STRUTTURE IN C.A. MEDIANTE L'UTILIZZO DI POLIMERI FIBRORINFORZATI (FRP)

Autore: Natalino Gattesco

Dipartimento di Ingegneria e Architettura, Università degli Studi di Trieste, piazzale Europa 1, 34127 Trieste

Keywords: *Edifici in c.a., ingegneria sismica, strutture intelaiate, nastri in carbonio, materiali compositi.*



In questo articolo vengono descritte le criticità nei confronti delle azioni sismiche di travi, pilastri e nodi di strutture intelaiate in calcestruzzo armato realizzate dai primi anni del secolo scorso fino all'introduzione delle norme tecniche in materia sismica: vengono analizzate e valutate le principali cause di danno su questi elementi strutturali, tra le quali possiamo enumerare la scarsa, se non assente, presenza (secondo i dettami attuali) di armature longitudinali e trasversali, il posizionamento errato o sfavorevole di tamponamenti non strutturali nonché la presenza di pilastri spesso troppo esili rispetto alle travi di solaio. Focalizzando l'attenzione su questi aspetti e valutando il comportamento degli elementi esistenti in c.a. contestualizzati nella moderna zonizzazione sismica sarà possibile intervenire efficacemente con tecniche che prevedono l'utilizzo dei materiali compositi fibrorinforzati FRP.



A partire dagli anni 30 del secolo scorso, la tecnologia costruttiva del calcestruzzo armato si è imposta in maniera massiccia come sistema costruttivo per l'edilizia pluripiano a scopo residenziale, scolastico e direzionale. Nel secondo dopoguerra e soprattutto a partire dagli anni 50, con lo sviluppo industriale, l'edilizia ha subito una notevole spinta con la realizzazione di nuovi quartieri nelle città utilizzando il calcestruzzo armato poiché più speditivo rispetto alla muratura.

La maggior parte di queste costruzioni sono state progettate per la residenza. In epoca moderna, l'esigenza di variare destinazione d'uso in diversi edifici passando ad attività direzionali e/o pubbliche richiede un maggiore impegno alla struttura, per l'incremento dei carichi variabili e/o dei sovraccarichi permanenti dovuti a impianti, nuovi pavimenti, controsoffitti, ecc. In aggiunta, le norme tecniche dell'epoca della costruzione non sempre erano sufficientemente cautelative per garantire adeguati livelli di sicurezza, per cui spesso, in sede di rifunionalizzazione dell'edificio, è necessaria l'esecuzione di interventi di rinforzo strutturale.

Trattandosi di strutture costituite da telai piani disposti nella direzione longitudinale collegati da solai in latero-cemento nella direzione trasversale, gli interventi riguardano i solai, spesso sottodimensionati o degradati da fenomeni di sfondellamento, le travi e i pilastri. Per i solai si possono adottare le tecniche di rinforzo discusse in Gattesco 2021, per le travi e per i pilastri si possono applicare rinforzi basati sull'impiego di polimeri fibrorinforzati FRP.

Le travi, normalmente necessitano di essere rinforzate sia per incrementare la resistenza flessionale delle sezioni soggette al massimo momento flettente, sia per aumentare la resistenza a taglio delle zone soggette ad elevate sollecitazioni taglianti. Per i pilastri, invece, può essere richiesto un incremento del confinamento del calcestruzzo in prossimità dei nodi, zone spesso sprovviste di un'adeguata staffatura. Se è richiesto un significativo incremento della resistenza dei pilastri, è necessario un intervento con incamiciatura (camicia metallica o in calcestruzzo armato).

Inoltre, i vari terremoti che si sono succeduti in Italia e nel mondo hanno messo in evidenza significative criticità di comportamento degli edifici formati con telai in calcestruzzo armato, soprattutto perché all'epoca della costruzione il sito sul quale sono stati realizzati non era classificato a rischio sismico e nella progettazione non erano stati adottati criteri antisismici.

Queste strutture sono quindi vulnerabili all'eccitazione sismica, sia perché pilastri e travi sono sottodimensionati per resistere alle conseguenti sollecitazioni ma anche perché i collegamenti tra travi e pilastri (nodi) non sono progettati per garantire adeguate capacità di rotazione plastica e di conseguenza sono caratterizzati da una scarsa capacità dissipativa. Inoltre, spesso i telai delle costruzioni esistenti sono privi di staffature nella zona nodale (Figura 1 a,b) ed hanno una ridotta staffatura nei pilastri (Figura 1 b,c) e nelle travi in prossimità della zona nodale.



(a)



(b)



(c)

Figura 1. Esempi di cedimento nodo trave-pilastro: a,b) assenza staffatura nel nodo, b,c) ridotta staffatura nel pilastro in prossimità del nodo.

In questi casi è necessario provvedere al rinforzo della zona nodale, conferendo un'adeguata resistenza a taglio, e a confinare le estremità di travi e pilastri, per scongiurare lo scalzamento di calcestruzzo (Figura 1). Anche questi interventi di rinforzo possono essere eseguiti efficacemente utilizzando polimeri rinforzati con fibre di carbonio disposte in una direzione o in più direzioni.

COMPOSITI IN MATRICE POLIMERICA E FIBRE LUNGHE FRP

I materiali compositi in argomento sono costituiti da matrici polimeriche e normalmente da fibre lunghe continue di carbonio o vetro, e sono comunemente denominati FRP (Fiber Reinforced Polymers). Questi materiali sono utilizzati ampiamente in vari settori da molti anni; da circa due decenni sono entrati nell'attenzione del mondo delle costruzioni civili, soprattutto per interventi di rinforzo di strutture esistenti in calcestruzzo armato, muratura, legno (CNR DT 200 R1/2013). I sistemi utilizzati per questi scopi sono:

- sistemi preformati, costituiti prevalentemente da lamine sottili ottenute per pultrusione;
- sistemi impregnati in situ, costituiti da tessuti di fibre impregnati in opera con resine polimeriche/epossidiche.

Nel primo caso, le lamine vengono prodotte in stabilimento e portate in cantiere, dove vengono tagliate a misura e incollate al substrato utilizzando resine epossidiche. Nel secondo caso, invece, si utilizzano dei tessuti secchi uni o multi direzionali che vengono adeguatamente impregnati in situ con resine epossidiche o polimeriche, che fungono anche da adesivo con il substrato.

Le prestazioni di elementi in calcestruzzo armato rinforzati con l'utilizzo di questi materiali sono fortemente dipendenti dall'aderenza tra composito e calcestruzzo in quanto il meccanismo per delaminazione è di tipo fragile. E' quindi necessario dedicare particolare attenzione a questo meccanismo per ritardare la sua attivazione rispetto ai meccanismi di collasso principali dell'elemento strutturale rinforzato.

Meccanismo di rottura per delaminazione

La delaminazione può verificarsi all'interno dell'adesivo, tra calcestruzzo ed adesivo, nel calcestruzzo o all'interno del rinforzo tra i diversi strati di tessuto (Figura 2a). Il collasso per distacco dal supporto del rinforzo applicato ad una trave inflessa può avvenire in quattro diversi modi (Figura 2b): distacco di estremità (modo 1), distacco intermedio, causato da fessure per flessione nella trave (modo 2), distacco causato da fessure diagonali da taglio (modo 3) distacco causato da irregolarità sulla superficie (modo 4). I modi più frequenti sono, comunque, i primi due.

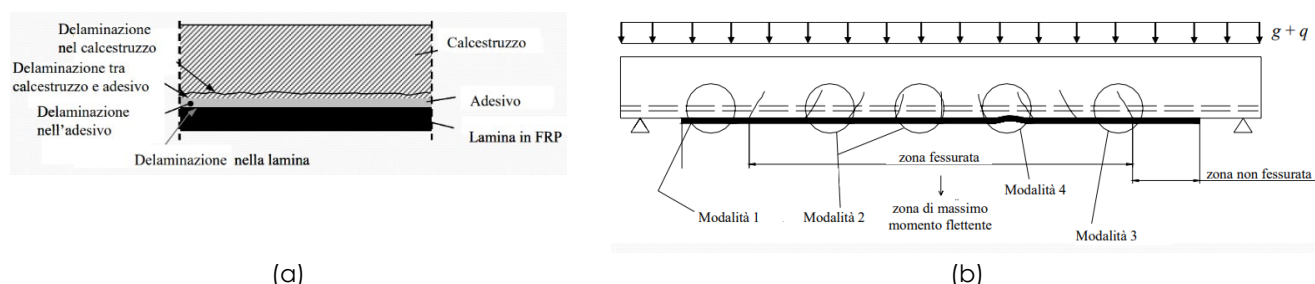


Figura 2. Perdita di aderenza tra rinforzo e calcestruzzo (a) e modi di rottura per distacco dal supporto su trave rinforzata a flessione (b).

La crisi per distacco si verifica per il raggiungimento della massima forza trasmissibile dal rinforzo al calcestruzzo, che viene raggiunta in corrispondenza di un valore ottimale della lunghezza di ancoraggio l_e ; per lunghezze di ancoraggio superiori non si hanno incrementi della forza trasmessa. Il valore di calcolo di tale lunghezza l_{ed} è pari a

$$l_{ed} = \min \left\{ \frac{1}{1.25 f_{bd}} \cdot \sqrt{\frac{\pi^2 E_f t_f \Gamma_{Fd}}{2}}, 200 \text{ mm} \right\}, \quad (1)$$



dove E_f , t_f sono, rispettivamente, il modulo di elasticità nella direzione della forza e lo spessore del composito fibrorinforzato, G_{Fd} è l'energia specifica di frattura, f_{bd} è la tensione tangenziale di aderenza, ricavate dalle relazioni:

$$\Gamma_{Fd} = \frac{k_b k_G}{FC} \cdot \sqrt{f_{cm} f_{ctm}}, \quad f_{bd} = \frac{2 \Gamma_{Fd}}{s_u}, \quad (2)$$

dove f_{cm} , f_{ctm} sono, rispettivamente, i valori medi delle resistenze a compressione e trazione del calcestruzzo in situ, FC è un fattore di confidenza, k_b è un coefficiente correttivo geometrico (varia tra 1.0 e 1.18) e k_G è un altro coefficiente tarato su prove sperimentali (uguale a 0.023, per compositi preformati, e a 0.037, per compositi impregnati in situ), s_u è il valore ultimo dello scorrimento tra FRP e supporto ($=0.25$ mm).

Se il distacco riguarda l'estremità del composito (modo 1 – Figura 2b), e per lunghezze di ancoraggio maggiori o uguali a quella ottimale, la tensione di progetto massima del sistema di rinforzo senza che si verifichi il distacco di estremità è

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{f,d}} \cdot \sqrt{\frac{2 E_f \Gamma_{Fd}}{t_f}}, \quad (3)$$

con $\gamma_{f,d}$, coefficiente parziale che può assumere valori tra 1.20 e 1.50 (CNR DT 200 R1/2013). Per lunghezze di ancoraggio minori di quella ottimale, la tensione di progetto va ridotta secondo la relazione:

$$f_{fdd,rid} = f_{fdd} \frac{l_b}{l_{ed}} \cdot \left(2 - \frac{l_b}{l_{ed}} \right). \quad (4)$$

Per incrementare il valore di f_{fdd} ottenuti con le (3) e (4), è necessario utilizzare dispositivi di ancoraggio specifici (meccanici o chimici). Sono necessari spinotti iniettati nel calcestruzzo per contrastare possibili tensioni di trazione all'interfaccia causate dalla formazione di fessure inclinate da taglio (Figura 3).

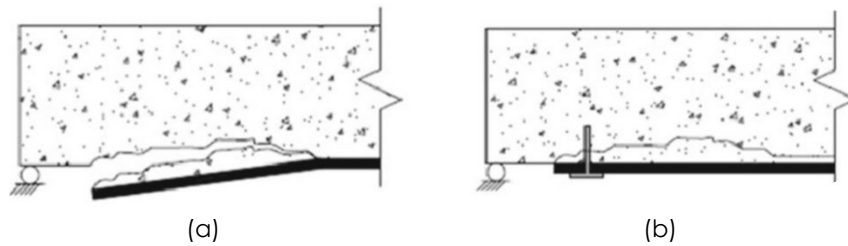


Figura 3. Ancoraggio di estremità: (a) distacco favorito da fessurazione e tensioni di trazione all'interfaccia, (b) applicazione di spinotto per contrastare la trazione.

Nel caso di distacco intermedio (modo 2 – Figura 2b), la tensione di progetto massima nel composito fibrorinforzato è data dalla relazione:

$$f_{fdd,2} = \frac{k_q}{\gamma_{f,d}} \cdot \sqrt{\frac{2 E_f \Gamma_{Fd}}{t_f} \cdot \frac{k_{G,2}}{k_G}}, \quad (5)$$

dove k_q è un coefficiente che tiene conto della condizione di carico (uguale a 1.25, per carichi distribuiti, e a 1.00 in tutti gli altri casi), e $k_{G,2}$ è un coefficiente correttivo da assumersi pari a 0.10, per ogni tipo di rinforzo. Di conseguenza, la massima deformazione che si può assumere nel composito, affinché non si verifichi il distacco intermedio, è

$$\varepsilon_{fdd} = \frac{f_{fdd,2}}{E_f}. \quad (6)$$



RINFORZO DI STRUTTURE A TELAIO IN CALCESTRUZZO ARMATO

Le costruzioni esistenti in calcestruzzo armato sono prevalentemente costituite da un'ossatura di travi e pilastri. Per le criticità evidenziate nell'introduzione, si rendono necessari interventi di rinforzo che riguardano (Dolce e Manfredi 2011):

- l'incremento della resistenza a flessione;
- l'incremento della resistenza a taglio;
- il confinamento del calcestruzzo alle estremità di travi e pilastri;
- il miglioramento delle prestazioni dei nodi di strutture in zona sismica.

Incremento della resistenza a flessione

Il rinforzo a flessione con materiali compositi si può eseguire applicando una lamina preformata oppure uno o più strati di tessuto al lembo teso della trave da rinforzare. In condizioni limite ultime, si richiede di dimensionare il rinforzo necessario per far sì che il momento agente risulti inferiore al momento resistente nella sezione maggiormente sollecitata. Per il calcolo del momento resistente si opera come per le sezioni in c.a. aggiungendo il contributo del composito, assunto perfettamente aderente al calcestruzzo e con un legame costitutivo elastico lineare fino a rottura.

L'intervento di rinforzo è efficace solo per sezioni a debole armatura. Il calcolo del momento resistente si ricava utilizzando le equazioni di equilibrio alla traslazione nella direzione dell'asse della trave ed alla rotazione attorno ad un asse passante per il baricentro delle armature tese. Come evidenziato in Figura 4, si possono distinguere due tipi di rottura: per raggiungimento della massima deformazione nel rinforzo, normalmente pari a ϵ_{fd} (zona 1), o la massima contrazione nel calcestruzzo ϵ_{cu} (zona 2).

Le deformazioni nelle diverse fibre (FRP ϵ_f , armature tese ϵ_{s1} , armature compresse ϵ_{s2} e calcestruzzo ϵ_c), per le due zone di rottura, sono riportate in Figura 4. Nel calcolo è necessario tener conto della deformazione ϵ_0 preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza dell'estremo teso, per la presenza del momento M_0 . Se M_0 è inferiore al momento di prima fessurazione, si può trascurare il suo contributo.

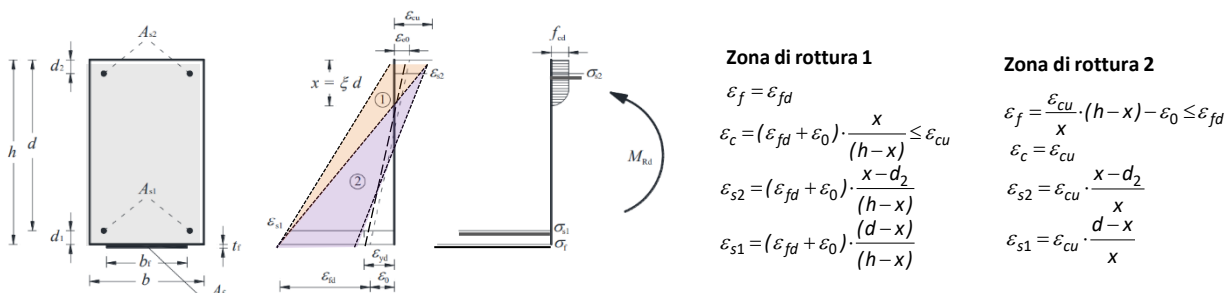


Figura 4. Modalità di rottura di una sezione in c.a. rinforzata con FRP e relazioni di congruenza delle deformazioni nei materiali, rispettivamente, per la zona di rottura 1 e la zona di rottura 2.

Il momento resistente è uguale a

$$M_{Rd} = \psi b x f_{cd} \cdot (d - \lambda x) + A_{s2} \sigma_{s2} \cdot (d - d_2) + A_f E_f \epsilon_f d_1, \quad (7)$$

con la posizione dell'asse neutro ricavata dalla relazione:

$$x = \frac{A_{s1} f_{yd} + A_f E_f \epsilon_f - A_{s2} \sigma_{s2}}{\psi b f_{cd}}. \quad (8)$$

I coefficienti adimensionali ψ e λ rappresentano, rispettivamente, la risultante delle compressioni sul calcestruzzo e la distanza di questa dal lembo superiore.

Un'attenzione particolare va dedicata per scongiurare il collasso per distacco di estremità; bisogna, infatti, verificare che la tensione nel composito, nella sezione dalla quale si rende necessario il rinforzo per la resistenza a flessione dell'elemento, non superi la resistenza al distacco (f_{td} o $f_{td,rid}$). Per tener conto della



possibilità di fessure inclinate per taglio, si deve applicare la traslazione del diagramma del momento di una quantità pari a $0.9 d (1 - \cot \alpha)$, con α inclinazione dell'armatura d'anima.

Si possono utilizzare opportuni dispositivi speciali di ancoraggio nelle zone di estremità (serraggio meccanico, spinotti, fiocchi in fibra, nastri trasversali), per ridurre le lunghezze richieste; tali dispositivi devono essere opportunamente certificati.

A valle delle verifiche allo Stato Limite Ultimo, è necessario, come per gli elementi in calcestruzzo armato, eseguire le verifiche agli Stati Limite di Esercizio: verifiche tensionali nei materiali, verifiche di fessurazione e verifiche di deformazione. In particolare le verifiche tensionali sull'acciaio di armatura sono particolarmente importanti per evitare che l'acciaio delle armature esistenti possa snervarsi in esercizio. Infatti, con i carichi presenti sulla trave prima dell'intervento, il livello tensionale può essere già sensibilmente elevato e prossimo alla tensione di snervamento. Il rinforzo, in questi casi, può portare ad un limitato beneficio (limitata deformazione disponibile per il composito); per incrementare l'efficacia, si può procedere allo scarico parziale di trave/solaio esistenti con l'impiego di dispositivi per il sollevamento (martinetti idraulici, sistemi a vite, ecc.). Per le verifiche di controllo della fessurazione, non ci sono modelli accurati disponibili e quindi si possono impiegare gli stessi utilizzati per il calcestruzzo armato con opportune modifiche per tener conto della presenza del rinforzo.

Incremento della resistenza a taglio

Frequentemente gli elementi strutturali che risultano sottodimensionati a flessione presentano una carenza di resistenza anche a taglio; inoltre, la disposizione delle armature per il taglio spesso non ha seguito le indicazioni progettuali, oppure, le disposizioni normative dell'epoca della costruzione non erano conservative nei confronti di questa caratteristica di sollecitazione. Allora, se le verifiche eseguite con le

normative attuali, tenendo conto sia dei contributi del calcestruzzo che delle armature d'anima presenti, non risultano soddisfatte, è necessaria l'applicazione di un sistema di rinforzo che permetta di raggiungere la resistenza richiesta.

Il rinforzo a taglio di travi in calcestruzzo armato si può realizzare applicando dei nastri o tessuti in composito incollati sulla superficie esterna. Nel caso di nastri monodimensionali possono essere disposti perpendicolari o inclinati rispetto all'asse della trave, come le staffe e i ferri piegati. I nastri in composito possono essere disposti affiancati o distanziati (Figura 5).

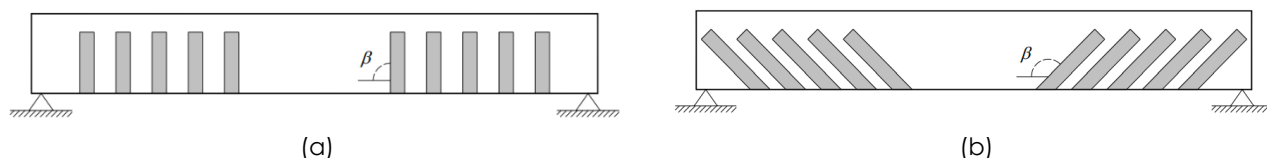


Figura 5. Disposizioni nastri per rinforzo a taglio: a) perpendicolari all'asse della trave, b) inclinati rispetto all'asse della trave.

Frequentemente le travi sostengono una soletta in calcestruzzo per cui è possibile intervenire solamente su una parte della superficie laterale, di conseguenza i nastri vengono disposti a U. Diversamente, se si può intervenire su tutta la superficie laterale, si adotta la disposizione in avvolgimento. La disposizione a U richiede una particolare verifica dell'efficacia dell'ancoraggio dei nastri al corrente compresso della trave, per cui è necessario prevedere opportuni dispositivi speciali; fra questi si hanno dei sistemi meccanici di serraggio delle estremità dei nastri e solidarizzati all'intradosso della trave oppure fiocchi in vetro/carbonio ancorati al corrente compresso mediante iniezione o avvolgimento. Queste tecniche, e altre, richiedono dimostrazione di una comprovata efficacia da parte del progettista. La disposizione in avvolgimento è la soluzione più efficace, ma richiede l'esecuzione di sedi per passare attraverso la soletta superiore.

La presenza di nastri in composito applicati per incrementare la resistenza a taglio comporta un incremento della resistenza a taglio trazione dell'elemento non rinforzato con un termine aggiuntivo, valutato in base al meccanismo a traliccio di Mörsch, pari a



$$V_{Rd,f} = \frac{1}{1.2} \cdot 0.9d f_{fed} 2t_f (\cot \theta + \cot \beta) \frac{b_f}{p_f}, \quad (9)$$

dove d è l'altezza utile della sezione, f_{fed} è la resistenza efficace del sistema di rinforzo, t_f è lo spessore del composito, b_f e p_f sono, rispettivamente, la larghezza e il passo dei nastri (misurati in direzione perpendicolare alle fibre).

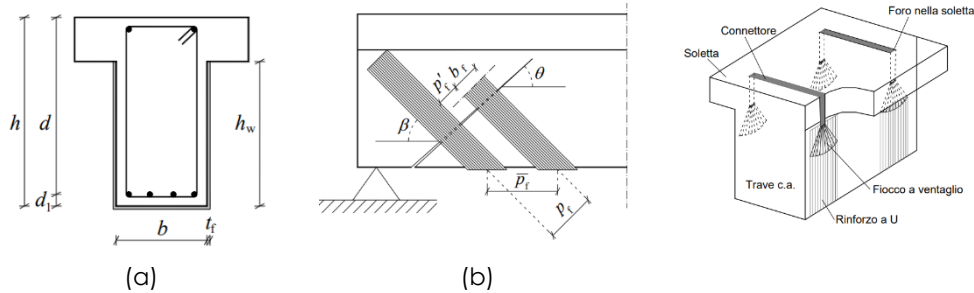


Figura 6. Rinforzo con nastri ad U: a) sezione trasversale, b) disposizione longitudinale nastri, c) ancoraggio a fiocco.

Nel caso di applicazione ad U (Figura 6), l'incollaggio del nastro frequentemente non avviene nel corrente superiore della trave ma nel dente di calcestruzzo al di sopra della fessura da taglio; bisogna scongiurare l'innescio del distacco del composito dal supporto. Come già detto, in questi casi è opportuno utilizzare appositi dispositivi di ancoraggio (e.g. Figura 6c); diversamente si può utilizzare una tensione efficace del sistema di rinforzo fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{l_{ed} \cdot \sin \beta}{\min(0.9d, h_w)} \right], \quad (10)$$

con b_w altezza dell'anima della trave e β angolo di inclinazione delle fibre (Figura 6). Nel caso di sezioni prossime ad un appoggio di continuità (momento che tende le fibre superiori) diventa assolutamente necessario utilizzare dispositivi di ancoraggio speciali per garantire un efficace collegamento dei nastri con il corrente teso superiore (Figura 6c).

Nel caso di elementi disposti in avvolgimento su sezione rettangolare, il valore della tensione efficace è data dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{6} \cdot \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min(0.9d, h_w)} \right] + \frac{1}{2} (\phi_R f_{fd} - f_{fdd}) \cdot \left[1 - \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min(0.9d, h_w)} \right], \quad (11)$$

con

$$\phi_R = 0.2 + 1.6 \frac{r_c}{b}, \quad (12)$$

dove r_c è il raggio di curvatura realizzato in corrispondenza dello spigolo della sezione rinforzata; il rapporto r_c/b varia fra 0 e 0.5.

Il confinamento del calcestruzzo alle estremità di travi e pilastri

Il confinamento di elementi in calcestruzzo armato può portare ad un buon incremento della capacità portante e ad un significativo aumento della duttilità. Il confinamento può essere realizzato utilizzando compositi fibrorinforzati in avvolgimento perimetrale dell'elemento strutturale. Questo intervento consente di migliorare in maniera significativa la capacità di rotazione plastica delle sezioni di estremità di travi e pilastri evitando lo scalzamento del calcestruzzo e l'annullamento di taglio e momento resistenti, con conseguenze molto gravi per la costruzione.

L'incremento di resistenza dipende dalla rigidità del rinforzo, dalla forma della sezione trasversale e dalla spaziatura del rinforzo lungo l'asse dell'elemento. In assenza di fenomeni di instabilità, la resistenza di progetto di un pilastro soggetto ad azione assiale è data dalla relazione:



$$N_{Rcc,d} = \frac{1}{1.1} \cdot A_c f_{ccd} + A_s f_{yd}, \quad (13)$$

dove A_c e f_{ccd} sono, rispettivamente, l'area della sezione trasversale e la resistenza di progetto del calcestruzzo confinato, A_s e f_{yd} sono, rispettivamente, l'area e la tensione di snervamento di progetto dell'armatura metallica presente. La resistenza del calcestruzzo confinato è pari a

$$\frac{f_{ccd}}{f_{cd}} = 1 + 2.6 \cdot \left(\frac{k_{eff} f_1}{f_{cd}} \right)^{2/3}, \quad (15)$$

dove f_{cd} è la resistenza a compressione di progetto del calcestruzzo non confinato, f_1 è la pressione laterale di confinamento e k_{eff} è un coefficiente di efficienza (≤ 1). Quest'ultimo esprime il rapporto tra il volume di calcestruzzo efficacemente confinato ed il volume dell'elemento di calcestruzzo.

La pressione di confinamento è pari a

$$f_1 = \frac{1}{2} \rho_f E_f \varepsilon_{fd,rid}, \quad (16)$$

dove ρ_f è la percentuale volumetrica di rinforzo e $\varepsilon_{fd,rid}$ è una deformazione ridotta di calcolo del composito $[\min(h_a \varepsilon_{fk}/g_f, 0.4\%)]$. Il coefficiente k_{eff} tiene conto della forma della sezione, della distanza fra i rinforzi in direzione assiale e dell'inclinazione del rinforzo

$$k_{eff} = k_H \cdot k_V \cdot k_\alpha. \quad (17)$$

I tre coefficienti possono essere calcolati con le relazioni:

$$k_H = 1 \cdot \frac{b'^2 + h'^2}{3 A_g}, \quad k_V = \left(1 - \frac{\rho'_f}{2 d_{min}} \right), \quad k_\alpha = \frac{1}{1 + (\tan \alpha_f)^2}. \quad (18)$$

I parametri delle (18) sono illustrati in Figura 7. A_g è la sezione trasversale della sezione confinata, d_{min} è la dimensione trasversale minima (diametro per gli elementi circolari). Per gli elementi a sezione circolare li coefficiente k_H è unitario. Infine, normalmente l'angolo α_f è prossimo a zero e quindi k_α è unitario.

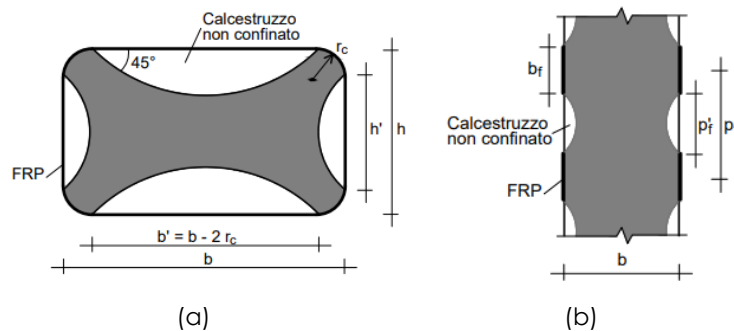


Figura 7. Confinamento di elementi in calcestruzzo armato: a) porzione di sezione trasversale efficacemente confinata, b) sezione longitudinale efficacemente confinata.

Nel caso di elementi soggetti a pressoflessione, il confinamento consente di incrementare in maniera significativa la loro duttilità. Si può considerare un valore della deformazione ultima del calcestruzzo come segue:

$$\varepsilon_{ccu} = 0.0035 + 0.015 \cdot \sqrt{\frac{k_{eff} f_1}{f_{cd}}}. \quad (19)$$



Miglioramento delle prestazioni dei nodi di strutture in zona sismica

Le strutture intelaiate in calcestruzzo armato costruite in zone non classificate sismiche all'epoca della costruzione normalmente richiedono particolari interventi per migliorare le loro prestazioni in caso vengano soggette ad eccitazione sismica, in modo da scongiurare il loro danneggiamento o addirittura il loro collasso. Le principali criticità manifestate da tali strutture, in caso vengano soggette ad eccitazione sismica, riguardano il comportamento delle estremità di travi e pilastri e la resistenza delle zone nodali.

Nelle strutture intelaiate dimensionate per sopportare i carichi verticali, si trova spesso la condizione di trave forte-pilastro debole e quindi, in caso vengano soggette ad eccitazione sismica, la formazione delle cerniere plastiche avviene alle estremità dei pilastri conducendo al cedimento anticipato per formazione di cinematismo di piano (Figura 8a). Inoltre, la presenza di azioni assiali elevate nelle colonne fa sì che le sezioni dei pilastri hanno una rottura di tipo fragile (capacità di rotazione plastica molto ridotta – Figura 8c). In queste strutture è necessario favorire la modifica della posizione delle cerniere plastiche, dai pilastri (Figura 8a) alle travi (Figura 8b), in modo da coinvolgere nella dissipazione di energia tutta la struttura, non un solo piano, e con capacità di spostamento molto più elevata, legata alla maggiore capacità di rotazione plastica delle travi (elementi semplicemente inflessi). La capacità di rotazione plastica, infatti, è legata al materiale che governa la rottura; se è l'acciaio, materiale duttile, la rotazione plastica è elevata, se è il calcestruzzo, materiale poco duttile, la rotazione plastica tende ad annullarsi. Di conseguenza, all'aumentare dell'azione assiale si ha una significativa riduzione della capacità di rotazione plastica negli elementi in calcestruzzo armato (Figura 8c).

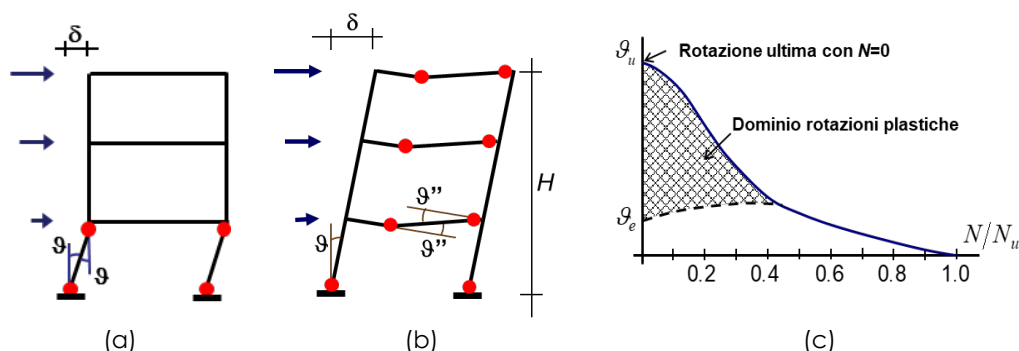


Figura 8. Cinematismo da azioni sismiche: a) pilastri deboli-travi forti, b) pilastri forti-travi deboli, c) capacità di rotazione plastica al variare dell'azione assiale.

Per favorire questo spostamento di posizione delle cerniere plastiche, è necessario, quindi, incrementare la resistenza flessionale e tagliante delle estremità dei pilastri di ogni piano. In particolare si applicano rinforzi longitudinali, per incrementare la resistenza a pressoflessione, con aggiunta di una fasciatura trasversale in avvolgimento in prossimità delle estremità, per confinare il calcestruzzo e per incrementare la resistenza a taglio. Come già detto, il confinamento del calcestruzzo consente di contrastare lo scalzamento del calcestruzzo (Figura 1c) e di incrementare la deformazione ultima a compressione del calcestruzzo. Per evitare che le cerniere plastiche si formino all'estremità dei pilastri (Figura 8a), è alle volte necessario eseguire un intervento di rinforzo più invasivo, con applicazione di incamiciatura in calcestruzzo armato o metallica.

Nelle travi, è normalmente necessario aggiungere una fasciatura con nastri in avvolgimento alle estremità, per confinare il calcestruzzo e per incrementare la resistenza a taglio. Il confinamento alle estremità delle travi favorisce un significativo aumento della capacità di rotazione plastica.

In pratica bisogna fare in modo che la somma dei momenti resistenti dei pilastri in prossimità di un nodo risulti non minore della somma dei momenti resistenti delle travi che concorrono nello stesso nodo, amplificata di un coefficiente di sovrarresistenza g_{Rd} (NTC 2018).

La capacità di rotazione plastica allo Stato Limite di Collasso, per travi e pilastri, se non valutata mediante analisi non lineari, può essere stimata con la seguente relazione (Circolare 21-01-2019):



$$g_u = \frac{1}{\gamma_{el}} \cdot \left(g_y + (\phi_u - \phi_y) L_{pl} \left(1 - \frac{0.5 L_{pl}}{L_v} \right) \right), \quad (20)$$

dove g_{el} è un coefficiente assunto pari a 1.5, J_y è la rotazione allo snervamento delle armature metalliche, f_u è la curvatura ultima della sezione in argomento, considerando la deformazione ultima del calcestruzzo confinato (equazione 19) e la deformazione ultima del composito, f_y è la curvatura della sezione al raggiungimento dello snervamento dell'acciaio d'armatura, L_v è la luce di taglio ($L_v = M/V$), L_{pl} è la lunghezza di cerniera plastica ricavabile con la relazione:

$$L_{pl} = 0.1 L_v + 0.17 h + 0.24 \frac{d_{bl} f_y}{\sqrt{f_c}}. \quad (21)$$

Nell'equazione (21), h è l'altezza della sezione, d_{bl} è il diametro medio delle armature longitudinali ed f_c , f_y sono, rispettivamente, la resistenza a compressione media del calcestruzzo e la tensione di snervamento media nell'acciaio d'armatura.

La rotazione allo snervamento delle barre può essere valutata con la relazione:

$$g_y = \phi_y \frac{L_v}{3} + 0.0013 \left(1 + 1.5 \frac{h}{L_v} \right) + 0.13 \phi_y \frac{d_{bl} f_y}{\sqrt{f_c}}. \quad (22)$$

Il valore della capacità di rotazione plastica allo Stato Limite di salvaguardia della Vita è pari ai 3/4 di quella ottenuta con la (20).

Dal rapporto tra la curvatura ultima e quella allo snervamento si ricava la capacità di duttilità in curvatura; dalle rotazioni si possono ricavare gli spostamenti in sommità ultimi e allo snervamento e di conseguenza la capacità di duttilità in spostamento. La domanda di duttilità richiesta nelle NTC 2018 deve risultare inferiore a queste capacità.

Siccome il meccanismo di collasso per taglio è un meccanismo fragile, bisogna dimensionare il rinforzo trasversale per resistere a un valore del taglio alle estremità dei pilastri ricavato con la relazione:

$$V_{Ed} = \frac{\gamma_{Rd} (M_{Rd}^s + M_{Rd}^i)}{l_c}, \quad (23)$$

dove, γ_{Rd} è un coefficiente di sovrarresistenza (NTC 2018), M_{Rd}^s , M_{Rd}^i sono, rispettivamente, i momenti resistenti nelle sezioni superiore e inferiore del pilastro, l_c è l'altezza del pilastro. Nel valutare il taglio resistente, bisogna tener conto della riduzione di resistenza dovuta alle condizioni cicliche.

Infine, nei nodi bisogna verificare che questi non collassino con le forze che vengono trasmesse da travi e pilastri. Si esegue una verifica di resistenza, in quanto, come per il taglio, il meccanismo di rottura è di tipo fragile. Si può procedere con una procedura semplificata che prevede la verifica di resistenza a trazione diagonale e a compressione diagonale della zona nodale.

La tensione di trazione diagonale nel nodo può essere ricavata con la relazione:

$$\sigma_{jt} = \frac{N}{2A_j} - \sqrt{\left(\frac{N}{2A_j} \right)^2 + \left(\frac{V_j}{A_j} \right)^2}, \quad (24)$$

e la tensione di compressione diagonale si può ricavare con la relazione:

$$\sigma_{jc} = \frac{N}{2A_j} + \sqrt{\left(\frac{N}{2A_j} \right)^2 + \left(\frac{V_j}{A_j} \right)^2}, \quad (25)$$



dove, N è l'azione assiale nel pilastro superiore, A_j è l'area efficace del nodo (NTC 2018) e V_j è il taglio totale agente sul nodo:

$$V_j = \gamma_{Rd} \cdot A_{s1} f_{yd} - V_c, \quad (26)$$

con V_c è il taglio nel pilastro sopra il nodo e A_{s1} è l'area di armatura superiore della trave.

La tensione di compressione deve risultare inferiore alla resistenza del calcestruzzo ridotta al 50%; la tensione di trazione va invece affidata al tessuto di rinforzo applicato sulla zona nodale. Normalmente si applica un tessuto multidirezionale (bidimensionale o quadridimensionale), per consentire di assorbire le tensioni di trazione diagonali. Va curato adeguatamente l'ancoraggio di questi tessuti.

Nella Figura 9a,b è illustrato il rinforzo della zona nodale con applicazione di un tessuto multidirezionale prolungato nelle travi adiacenti; incollaggio di nastri unidirezionali a U nelle due travi per un breve tratto di trave, per migliorare l'ancoraggio del tessuto multidirezionale applicato sul nodo. Nella Figura 9c,d è illustrato lo stesso nodo con confinamento di travi e pilastro nelle zone prossime al nodo, per incrementare la duttilità flessionale degli elementi stessi.

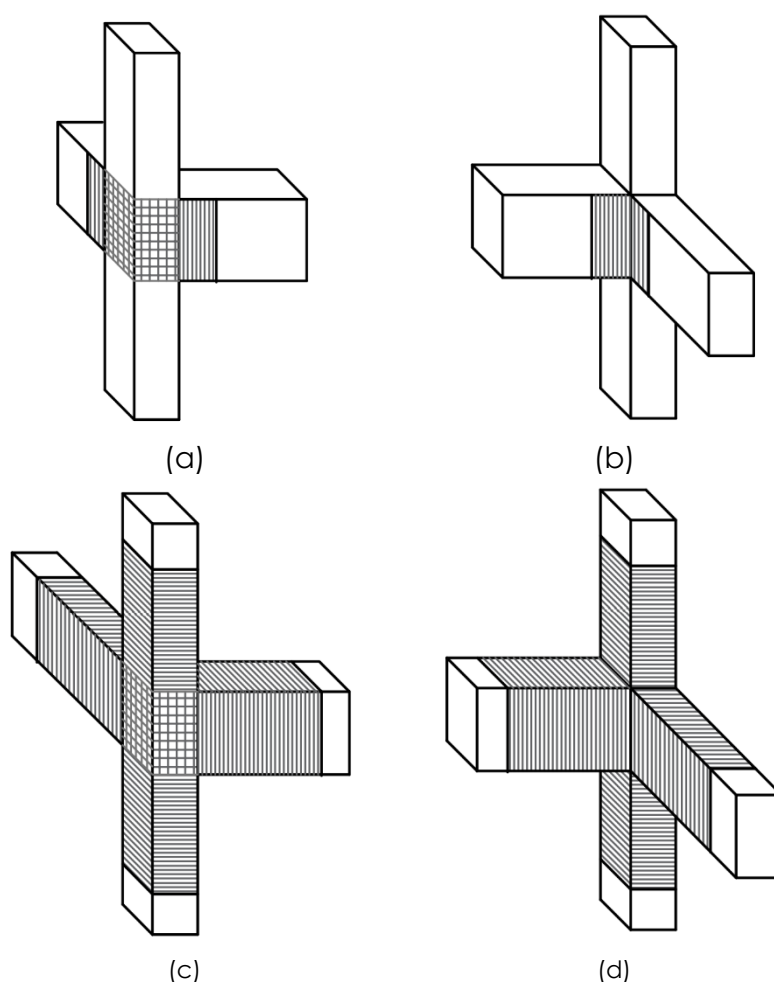


Figura 9. Rinforzo nodi trave-pilastro: a,b) rinforzo applicato sul nodo con nastri a U nelle due travi per migliorare l'aderenza, c,d) rinforzo applicato sul nodo e confinamento di travi e pilastro.

L'intervento illustrato in Figura 9c,d risulta anche efficace per contrastare l'instabilità delle barre di armatura in zona nodale causata da staffe troppo diradate. Infatti, il confinamento con la fasciatura avvolgente in fibra contribuisce efficacemente a contenere soprattutto le barre disposte agli angoli della sezione del pilastro.



LEGGI ANCHE

<https://www.ingenio-web.it/29477-criticita-degli-edifici-a-telaio-in-calcestruzzo-armato-soggetti-ad-eccitazione-sismica>

<https://www.ingenio-web.it/29740-valutare-le-criticita-degli-edifici-a-telaio-in-ca-nei-confronti-delle-azioni-sismiche-in-un-caso-studio>

<https://www.ingenio-web.it/29872-tamponamenti-di-edifici-a-telaio-in-ca-qual-e-il-contributo-nelle-prestazioni-sismiche>

<https://www.ingenio-web.it/30175-il-ruolo-dei-tamponamenti-nel-comportamento-sismico-di-edifici-a-telaio-in-ca-casi-studio-e-analisi-fem>

<https://www.ingenio-web.it/30289-criticita-strutturali-dei-solai-in-laterocemento-e-tecniche-di-rinforzo-con-nastri-in-composito>

BIBLIOGRAFIA

Circolare 21-01-2019, Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle "Norme Tecniche per le Costruzioni" di cui al DM 17-01-2018, Circolare Consiglio Superiore Lavori Pubblici n. 7.

CNR DT 200 R1/2013, Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati, Consiglio Nazionale delle Ricerche, 10 ottobre 2013.

D.M. 17-01-2018, Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni", Consiglio Superiore Lavori Pubblici.

Dolce M., Manfredi G., 2011 "Linee guida per la riparazione e rafforzamento di elementi strutturali, tamponature e partizioni." Reluis, Doppiavoce.

Gattesco N., "Criticita' Strutturali dei Solai in Laterocemento e Tecniche di Rinforzo con Nastri in Composito." Ingenio, marzo 2021.



FIBRE NET: gli specialisti del rinforzo strutturale

Idee, passione, esperienza e ingegno italiano in continua evoluzione

La storia di FIBRE NET inizia nel 2001 con una visione: sviluppare un prodotto del tutto nuovo non presente sul mercato, una rete in GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer). Nasce [RI-STRUTTURA](#), la risposta evoluta alla classica rete elettrosaldata che, diversamente dal sistema tradizionale, consente di rispettare la compatibilità muraria soprattutto negli edifici storici garantendo un miglioramento strutturale omogeneo e diffuso oltre alla durabilità e reversibilità dell'intervento.

Da allora, forte di un'intensa attività di R&S supportata da Università e istituti di ricerca, l'evoluzione dell'azienda ha portato all'ideazione, sviluppo e industrializzazione di diversi sistemi per il rinforzo strutturale in materiale composito fibro rinforzato, certificati e validati che sono andati a migliorare le performance di intervento dei sistemi tradizionali.

Oggi l'azienda produce presso i propri stabilimenti prodotti e sistemi compositi fibrorinforzati che trovano largo utilizzo in edilizia e nel settore infrastrutturale, nel consolidamento, nel miglioramento e adeguamento sismico e nella messa in sicurezza di strutture esistenti.



Non solo produzione

FIBRE NET si pone come partner specializzato, in grado di affiancare enti, progettisti ed imprese nelle scelte più opportune, efficaci e sostenibili mirate al consolidamento, al miglioramento e adeguamento strutturale, al mantenimento della durabilità del bene.

Al compimento dei suoi primi 20 anni, FIBRE NET è riconosciuta come produttore di riferimento di materiali innovativi e sistemi tecnologicamente avanzati, come promotore nella ricerca e sviluppo e nella formazione culturale, come player dalla solida competenza progettuale ed esecutiva.

Aspetti, questi, che delineano una realtà aziendale operativa, dinamica e intraprendente, costituita da un team giovane e tecnicamente preparato che fa della passione per il proprio lavoro la spinta verso l'innovazione.

FIBRE NET mette a disposizione dei propri partners laboratori, attrezzature e competenza per l'esecuzione di prove, anche *on-site*, per la diagnosi delle problematiche, per la caratterizzazione meccanica e chimica di materiali e cicli di intervento.

