

Considerazioni sull'efficacia delle staffe chiuse

Le staffe svolgono (come ben noto) essenzialmente due funzioni:

- ricucire le lesioni di taglio (ed eventualmente di torsione), permettendo di ottenere diversi vantaggi che si possono riassumere in:
 - consentire la creazione dello schema resistente noto come traliccio di Morsch
 - favorire l'effetto di ingranamento degli inerti lungo le facce delle lesioni (almeno fintanto che il loro impegno statico non è notevole)
 - favorire l'effetto bietta delle barre longitani
- confinare l'armatura compressa

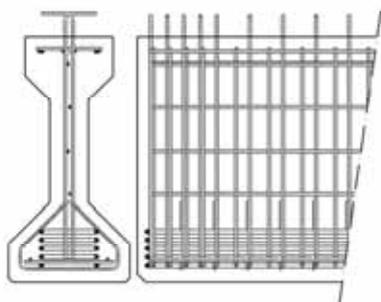


Figura 1 - Esempio di barra compressa instabilizzata in una trave (immagine tratta da N. S. Anderson, J. A. Ramirez, "Detailing of stirrups reinforcement", ACI Structural Journal, Vol. 86, N. 5, 1989, pag. 507-514)

Ovviamente tutti questi compiti possono essere svolti correttamente solo a patto che la staffa sia efficiente, ovvero che non si apra, ma piuttosto si spezzi.

Ciò detto, è palese che la geometria delle staffe è legata a quella della sezione ed alle modalità esecutive. Questa è probabilmente la ragione per cui tutte le norme sono povere di indicazioni sui dettagli esecutivi delle staffe, demandando al progettista scelte che comunque possano garantirne l'efficienza. In ogni caso si possono riscontrare scelte anche sensibilmente diverse da paese a paese. In figura 2 vengono ad esempio confrontate le armature di parete di una trave AASHTO-PCI type III secondo il dettato del Florida Department of Transportation e secondo gli Eurocodici (F. lorio, M.A. Pisani, "Analisi comparativa di due travi da ponte precomprese", l'industria italiana del Cemento, Luglio-Agosto 2004).

Dettaglio della testata secondo FDoT



Dettaglio della testata e sezione corrente secondo Eurocodici

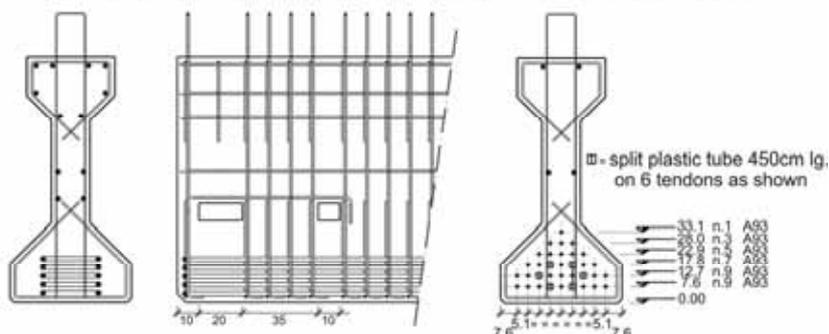


Figura 2

Con riferimento a travi in spessore (ovvero elementi prevalentemente soggetti a flessione) le norme americane (ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete - ACI 318-08 and Commentary," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 473 pp., si veda anche "Wide Beam Stirrup Configurations", Concrete International, Vol.32, N. 3, pagg. 62-64) ammettono due opzioni distinte:

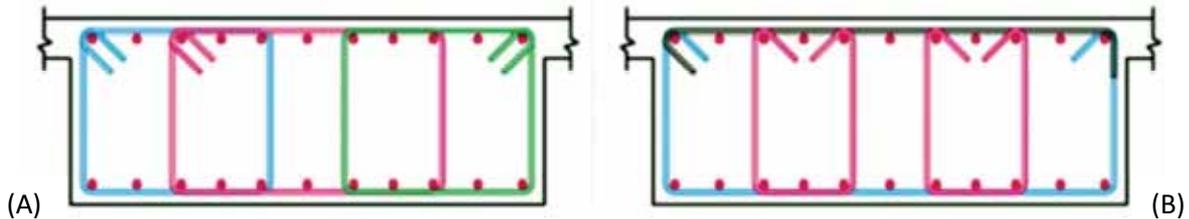


Figura 3

Le staffe presenti nella configurazione (A) sono definite sia dalle norme americane sia negli Eurocodici come "staffe chiuse". L'opzione (B) (che permette un più facile assemblaggio in opera della gabbia d'armatura) prevede invece semplicemente uno spezzone di barra (in nero) che non esercita alcun confinamento dell'armatura compressa (serve solo a sorreggere parte dell'armatura longitudinale presente all'estradosso durante la fase di getto). Se tuttavia il verso del momento flettente cambia lungo lo sviluppo della trave (come avviene ad esempio in una trave continua) gli uncini terminali delle staffe ad U vengono a trovarsi in zona tesa, con il rischio di un loro possibile sfilamento (si veda N.S. Anderson e J.A. Ramirez, "Detailing of stirrup reinforcement", ACI Structural Journal, Vol.86, N.5, 1989, pagg. 507-515).

Allo stesso modo, le staffe di cui in figura 4 hanno dimostrato sul campo di non essere in grado di fornire alcun confinamento all'armatura longitudinale in regime di pressoflessione (ovvero principalmente pilastri e pali di fondazione): al crescere della sollecitazione si stacca il copriferro, mettendo a nudo la zona di ancoraggio delle staffe, così come peraltro visibile in figura 5.

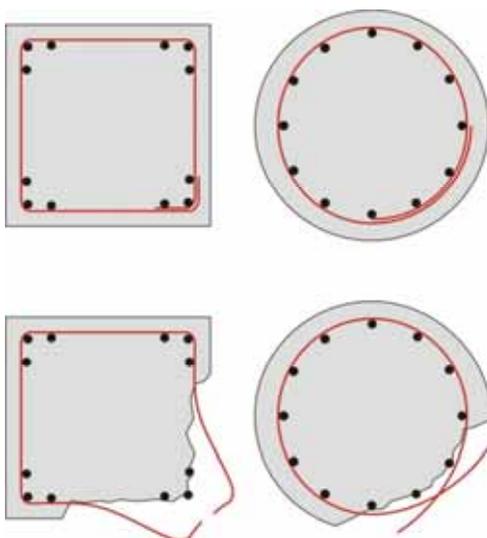


Figura 4



Figura 5 - Assenza di ancoraggio delle staffe nel nucleo della colonna (vedi A. Castellani, D. Benedetti, A. Castoldi, E. Faccioli, G. Grandori, R. Nova, "Costruzioni in zona sismica", Masson Italia Editore, Milano, 1981)

Non è quindi a caso che la norma italiana (“Nuove norme tecniche per le costruzioni”, DM 14 gennaio 2008, pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n. 29 del 4 febbraio 2008 - Suppl. Ordinario n. 30) al paragrafo 7.4.6.2.1 “Travi” imponga che “Nelle zone critiche devono essere previste staffe di contenimento. ... *omissis* ... Per staffa di contenimento si intende una staffa rettangolare, circolare o a spirale, di diametro minimo 6 mm, con ganci a 135° prolungati per almeno 10 diametri alle due estremità. I ganci devono essere assicurati alle barre longitudinali.” Tale tipo di staffe è poi richiamato ai successivo paragrafo 7.4.6.2.2 “Pilastri”. Inoltre trattando di pile e spalle di ponti la stessa norma impone che (paragrafo 7.9.6.2) “Tutte le armature di confinamento, staffe o tiranti, devono terminare con piegature a 135° che si ancorano verso l’interno per una lunghezza minima di 10 diametri.”

In poche parole la staffa chiusa (descritta in figura 3A) rappresenta in generale la soluzione più efficiente ed affidabile, se ben confezionate (rispetto dei raggi minimi di curvatura ecc.). Sono altrettanto efficaci le staffe del tipo descritto in figura 4 purché le estremità siano saldate l’una all’altra (salvo verificare la qualità e la lunghezza dei cordoni di saldatura). Nelle incamiciature non c’è lo spazio fisico per disporre staffe chiuse con uncini a 135°, mentre la saldatura in opera delle staffe è difficile ed onerosa, per cui sono stati brevettati sistemi con cui si possono ottenere le staffe chiuse attraverso una connessione meccanica quale quella mostrata in figura 7.

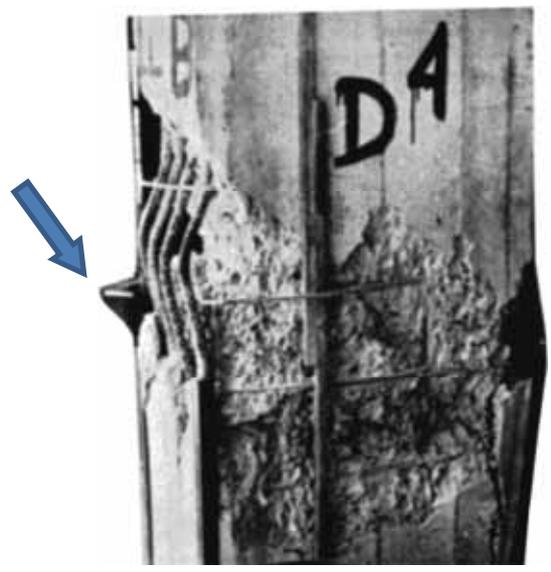
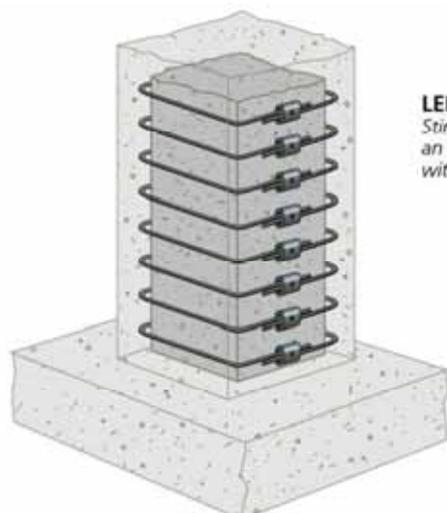


Figura 6 - Staffe ben confezionate. La crisi del pilastro è avvenuta a seguito della rottura per trazione delle staffe (vedi A. Castellani, D. Benedetti, A. Castoldi, E. Faccioli, G. Grandori, R. Nova, “Costruzioni in zona sismia”, Masson Italia Editore, Milano, 1981)



LENTON QUICK-WEDGE
Stirrups are joined at two locations around an existing column. The column is encased with additional concrete pour.

Figura 7 – Staffe chiuse ottenute con unioni meccaniche di due barre ad U (immagine tratta da “Lenton - Mechanical rebar splicing systems”, ERICO International Corporation, 2004)

Le considerazioni fatte riguardo all'efficacia di una staffa chiusa in acciaio in linea di principio si applicano anche alle staffe in vetroresina (GFRP - Glass Fibre Reinforced Polymer). Già nel caso di staffe metalliche si è avuto modo di osservare che queste devono essere "ben confezionate", intendendo con ciò che siano rispettate alcune regole specifiche quali sono in particolare il rispetto del raggio minimo di curvatura (in modo da garantire una deformazione plastica che non comporti la formazione di cricche) ed un adeguato livello di aderenza delle barre (requisito richiesto nella qualificazione delle barre stesse). E' quindi necessario un attento esame della tecnologia di produzione delle staffe GFRP per poter stabilire quali siano i requisiti necessari ad un prodotto "ben confezionato".

Le barre GFRP vengono in genere prodotte con il processo della poltrusione, schematicamente descritto in figura 8. Questo metodo produttivo permette di ottenere barre rettilinee. Il

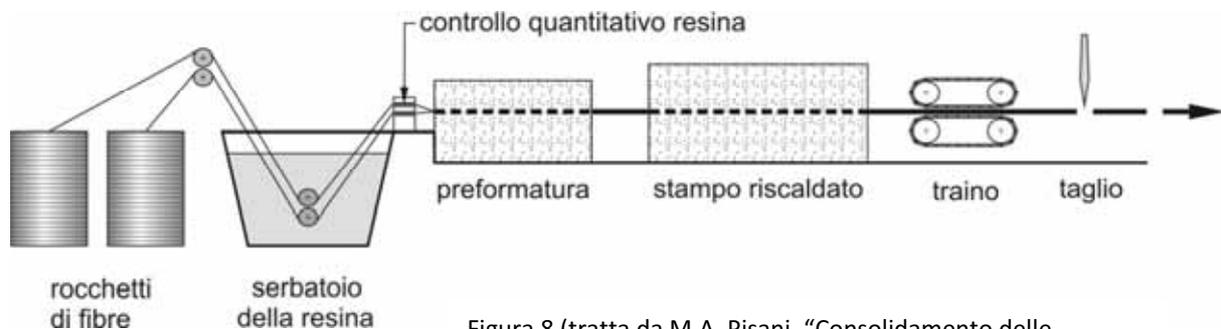


Figura 8 (tratta da M.A. Pisani, "Consolidamento delle strutture", Hoepli, Milano, 2008, pp.452)

comportamento meccanico delle fibre è elasto-fragile, per cui non è possibile piegare le barre posteriormente alla polimerizzazione della matrice resinosa. E' dunque necessario inibire la polimerizzazione della resina nelle zone di piegatura, piegare a mano le stesse e quindi introdurre la staffa in un forno per completare il processo di polimerizzazione. Questa soluzione presenta però un problema: le fibre sono disposte parallelamente le une alle altre per cui quando vengono piegate tendono a schiacciarsi in uno dei modi descritti in figura 9.

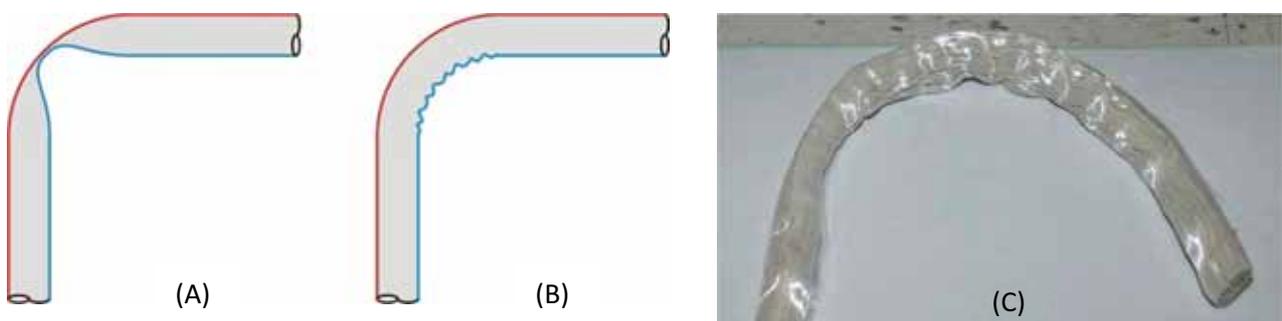


Figura 9 – Difetti di parallelismo delle fibre nelle piegature delle barre FRP (la figura 9C è tratta da: E. A. Ahmed, A. K. El-Sayed, E. El-Salakawy, B. Benmokrane, "Bend strength of FRP stirrups: somparison and evaluation of testing methods", ASCE Journal of Composites for Construction, Vol. 14, No. 1, 2010, pag. 3-10).

Per evitare questo problema la barra viene localmente torta (sul suo asse longitudinale) e quindi piegata. Operando in questo modo però gran parte delle fibre costituenti la sezione resistente risultano avere andamento elicoidale all'interno della curva (mentre quelle centrali hanno andamento ondulato), il che ne riduce enormemente (circa il 50%, si veda E. A. Ahmed, A. K. El-Sayed, E. El-Salakawy, B. Benmokrane, "Bend strength of FRP stirrups: somparison and evaluation of testing methods", ASCE Journal of Composites for Construction, Vol. 14, No. 1, 2010, pag. 3-10) la resistenza, che in queste zone andrebbe certificata con specifiche prove di laboratorio.

Un caso del tutto diverso è quello che prevede la fabbricazione di staffe chiuse (anulari) attraverso un processo produttivo mirato. In questo caso infatti la staffa viene formata avvolgendo le fibre resinate su un rocchetto che ha la forma desiderata ed a posteriori si procede alla polimerizzazione della matrice resinosa. Questo processo produttivo permette di garantire che le fibre siano ovunque tra loro parallele, con notevoli benefici per il comportamento meccanica del prodotto finito. Questa tecnologia presenta un secondo vantaggio accessorio: non ci sono estremità da ancorare al calcestruzzo.

A proposito dell'ancoraggio delle barre GFRP può essere utile ricordare che la tensione tangenziale massima di aderenza delle barre in composito con il calcestruzzo è sempre inferiore a quella di una barra in acciaio ad aderenza migliorata. Ciò è conseguenza del fatto che nelle prove di pull-out le barre in acciaio si sfilano disgregando il calcestruzzo circostante, mentre nelle barre in composito è la superficie in resina polimerica che si stacca dal sottostante substrato di fibre, con il calcestruzzo circostante ancora perfettamente integro. Per questa ragione anche la questione del ramo terminale pari a 10 diametri andrebbe corretta sulla base di adeguate prove di laboratorio da svolgere sullo specifico prodotto (la superficie delle barre in composito è finita in modo molto diversificato da prodotto a prodotto). Il problema della lunghezza di ancoraggio è poi cruciale nel caso in cui si adottino in una paratia prevalentemente soggetta a flessione staffe ad U accoppiate per semplice sovrapposizione, quali quelle riportate in figura 10A, mentre l'adozione delle moiette

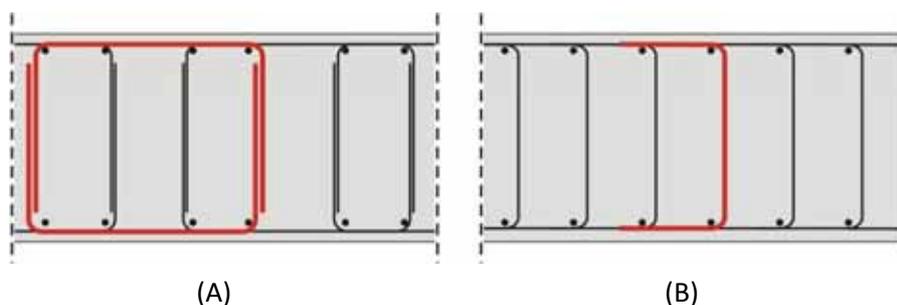


Figura 10

descritte in figura 10B è comunque particolarmente criticabile sia con riferimento alle norme italiane sia in relazione a quanto precedentemente ricordato a commento di figura 3B (relative alle norme statunitensi).

Queste brevi note non intendono pubblicizzare un prodotto, ma solo descrivere alcuni problemi relativi ai particolari costruttivi delle staffe in GFRP.

Prof. Ing. Marco Andrea Pisani

iscritto all'Albo professionale degli Ingegneri della Provincia di Milano al n. 13486

Professore di I fascia di Consolidamento delle Strutture presso il Politecnico di Milano

Membro del gruppo di studio che ha prodotto il Documento Tecnico CNR-DT 203/2006 "Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Strutture di Calcestruzzo armato con Barre di Materiale Composito Fibrorinforzato"