

4.2 RINFORZO A FLESSIONE - PRESSOFLESSIONE

4.2.1 Generalità

4.2.2 Analisi del comportamento allo stato limite ultimo

4.2.2.1 Generalità

4.2.2.2 Stato della struttura all'atto del rinforzo

4.2.2.3 Resistenza di progetto a flessione dell'elemento rinforzato con FRP

4.2.2.4 Resistenza di progetto a flessione dell'elemento rinforzato con FRP in presenza di forza assiale (**pressoflessione**)

4.2.2.5 Collasso per distacco di estremità

4.2.1 Generalità

(1) Il rinforzo a flessione si rende necessario per elementi strutturali soggetti ad un momento flettente di progetto maggiore della corrispondente resistenza. A scopo esemplificativo, di seguito è trattato il caso di flessione retta, che si verifica ad esempio quando l'asse di sollecitazione coincide con un asse di simmetria della sezione trasversale dell'elemento rinforzato.

(2) Il rinforzo a flessione con materiali compositi può essere realizzato applicando al lembo teso dell'elemento da rinforzare una o più lamine preformate, ovvero uno o più strati di tessuto impregnati *in situ*.

4.2.2 Analisi del comportamento allo stato limite ultimo

4.2.2.1 Generalità

(1) Il progetto allo SLU richiede il dimensionamento del rinforzo di FRP in modo che il momento resistente di progetto della sezione rinforzata, M_{Rd} , maggiore di quello sollecitante di progetto, M_{Sd} :

$$M_{Sd} \leq M_{Rd}. \quad (4.13)$$

(2) Le ipotesi fondamentali su cui si basa l'analisi allo SLU delle sezioni di c.a. rinforzate con FRP sono le seguenti:

- conservazione della planarità delle sezioni rette fino a rottura, in modo che il diagramma delle deformazioni normali sia lineare;
- perfetta aderenza tra i materiali componenti (acciaio-calcestruzzo, FRP-calcestruzzo);
- resistenza a trazione nulla del calcestruzzo;
- legami costitutivi del calcestruzzo e dell'acciaio conformi alla Normativa vigente;
- legame costitutivo del composito fibrorinforzato elastico lineare fino a rottura.

(3) L'intervento di rinforzo è consigliato per sezioni a debole armatura. Le regole appresso riportate si riferiscono esclusivamente a tale situazione.

(4) Si ipotizza che la rottura per flessione si manifesti in concomitanza con una delle seguenti condizioni:

- raggiungimento della massima deformazione plastica nel calcestruzzo compresso, ε_{cu} , come definita dalla Normativa vigente;
- raggiungimento di una deformazione massima nel rinforzo di FRP, ε_{fd} , calcolata come:

$$\varepsilon_{fd} = \min \left\{ \eta_a \cdot \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f}, \varepsilon_{fdd} \right\}, \quad (4.14)$$

dove ε_{fk} è la deformazione caratteristica a rottura del rinforzo, η_a e γ_f sono i coefficienti de-finiti rispettivamente nella Tabella 3-1 e nella Tabella 3-2, ε_{fdd} è la deformazione massima per distacco intermedio come definita dalla (4.7) (generalmente il valore minimo nella (4.14) corrisponde ad ε_{fdd}).

(5) È importante verificare che il taglio resistente dell'elemento rinforzato sia superiore a quello associato al diagramma del momento flettente di progetto per il quale si è reso necessario l'intervento di rinforzo a flessione. L'incremento del taglio resistente, eventualmente necessario, deve essere conseguito in accordo con le prescrizioni fornite nel § 4.3.

4.2.2.2 Stato della struttura all'atto del rinforzo

(1) Poiché il rinforzo di FRP viene di solito applicato su una struttura già sollecitata, si deve tenere conto dello stato di deformazione della struttura all'atto del rinforzo.

(2) Se il momento flettente preesistente all'applicazione del rinforzo, M_0 , è inferiore a quello di fessurazione lo stato deformativo iniziale può essere trascurato.

(3) Lo stato di deformazione della struttura all'atto del rinforzo può essere valutato ipotizzando il comportamento elastico lineare dei due materiali costituenti la trave (calcestruzzo ed acciaio) e, in particolare, l'incapacità del calcestruzzo a sopportare sforzi di trazione.

4.2.2.3 Resistenza di progetto a flessione dell'elemento rinforzato con FRP

(1) La valutazione della resistenza flessionale della sezione rinforzata si effettua in accordo con le ipotesi specificate nel § 4.2.2.1, utilizzando l'equazione di equilibrio alla traslazione nella direzione dell'asse della trave e quella alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro delle armature tese, parallelamente all'asse neutro.

(2) Con riferimento alla situazione esemplificativa rappresentata in Figura 4-5, si possono distinguere due tipi di rottura, a seconda che si raggiunga la massima dilatazione del rinforzo di FRP (zona 1) o la massima contrazione del calcestruzzo (zona 2).

(3) Nella zona 1 la rottura si attinge per raggiungimento della deformazione (dilatazione) elastica limite di progetto nel composito: un qualunque diagramma delle deformazioni corrispondente a tale modalità di rottura ha come punto fisso il valore limite della deformazione del composito, ε_{fd} , definito dalla relazione (4.14).

Le deformazioni normali che competono alle diverse fibre della sezione retta, distese parallelamente all'asse neutro, possono essere calcolate invocando la linearità del diagramma attraverso le seguenti relazioni:

- (FRP) $\varepsilon_f = \varepsilon_{fd}$,
- (calcestruzzo al lembo compresso) $\varepsilon_c = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_0) \cdot \frac{x}{(h-x)} \leq \varepsilon_{cu}$,
- (acciaio in compressione) $\varepsilon_{s2} = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_0) \cdot \frac{x-d_2}{(h-x)}$,
- (acciaio in trazione) $\varepsilon_{s1} = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_0) \cdot \frac{d-x}{(h-x)}$,

nelle quali si è utilizzata la simbologia di Figura 4-5. In particolare x è la distanza dell'asse neutro dall'estremo lembo compresso della sezione retta; ε_{fd} è fornita dalla (4.14); ε_{cu} è la deformazione limite che il calcestruzzo può attingere a compressione (deformazione di progetto); ε_0 è la deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza dell'estremo lembo teso, calcolata in accordo con quanto indicato nel § 4.2.2.2.

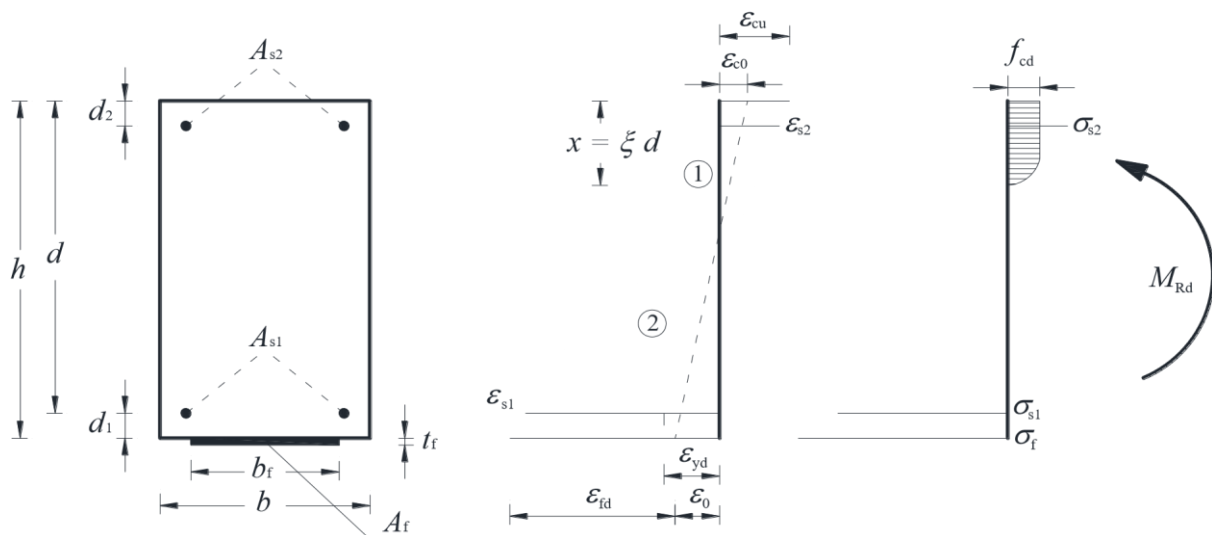


Figura 4-5 – Modalità di rottura di una sezione di c.a. rinforzata esternamente con FRP.

Nel caso in cui il legame costitutivo assunto per le barre di acciaio sia bilineare con incrudimento, è generalmente superfluo verificare l'entità della deformazione esibita dalle armature metalliche tese allo SLU, in quanto, per i valori usuali della deformazione limite delle fibre, ε_{fd} , e del calcestruzzo, ε_{cu} , il valore di progetto della suddetta deformazione non viene mai attinto. Nel caso in cui la deformazione ultima dell'acciaio stabilita dalla Normativa vigente dovesse essere superata, se ne deve tenere conto nel calcolo della posizione dell'asse neutro e conseguentemente in quello del momento resistente.

(4) Nella zona 2 la rottura avviene per schiacciamento del calcestruzzo con acciaio teso snervato, mentre la deformazione del composito non eccede quella limite: in tal caso resta fissata la deformazione massima di progetto del calcestruzzo compresso, ε_{cu} , in funzione della quale si ricavano, per linearità, le deformazioni normali negli altri materiali. Le relazioni da utilizzare sono le seguenti con il significato dei simboli già introdotto:

- (FRP) $\varepsilon_f = \frac{\varepsilon_{cu}}{x} \cdot (h - x) - \varepsilon_0 \leq \varepsilon_{fd}$,
- (calcestruzzo al lembo compresso) $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$,
- (acciaio in compressione) $\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{x - d_2}{x}$,
- (acciaio in trazione) $\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{d - x}{x}$.

(5) Per entrambi i tipi di rottura (asse neutro in zona 1 o in zona 2), la posizione, x , dell'asse neutro è determinata a partire dall'equazione di equilibrio alla traslazione lungo l'asse della trave:

$$0 = \psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} - A_{s1} \cdot \sigma_{s1} - A_f \cdot \sigma_f, \quad (4.15)$$

essendo f_{cd} il valore di progetto della resistenza a compressione del calcestruzzo preesistente calcolato come indicato al § 3.3.3(6). Nel caso di interventi su calcestruzzi giovani va valutata l'opportunità di applicare un coefficiente riduttivo per le resistenze di lunga durata.

Il valore del momento resistente, M_{Rd} , può essere determinato a partire dall'equazione di equilibrio alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro delle armature tese e parallelo all'asse neutro:

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot [\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} \cdot (d - \lambda \cdot x) + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} \cdot (d - d_2) + A_f \cdot \sigma_f \cdot d_1], \quad (4.16)$$

dove il coefficiente parziale γ_{Rd} deve essere assunto pari a 1.00 (Tabella 3-1, § 3.4.2).

Nelle equazioni (4.15) e (4.16) i coefficienti adimensionali ψ e λ rappresentano, rispettivamente, l'intensità del risultante degli sforzi di compressione e la distanza di quest'ultimo dall'estremo lembo compresso rapportati, nell'ordine, a $b \cdot x \cdot f_{cd}$ ed a x .

(6) Poiché il rinforzo di FRP ha un comportamento elastico lineare fino a rottura, la sua tensione di lavoro può essere calcolata come prodotto della competente deformazione per il modulo di elasticità normale nella direzione dell'asse della trave.

4.2.2.4 Resistenza di progetto a flessione dell'elemento rinforzato con FRP in presenza di forza assiale (pressoflessione)

(1) Valgono i principi e le regole di applicazione introdotti nel § 4.2.2.1, dal punto (1) al punto (5), tenendo altresì conto della dipendenza del valore di progetto del momento resistente della sezione rinforzata, M_{Rd} , da quello dello sforzo normale sollecitante, N_{Sd} .

(2) L'efficacia dell'azione del rinforzo in corrispondenza delle zone nodali deve essere assicurata attraverso l'adozione di idonee soluzioni costruttive atte a garantire sia un adeguato ancoraggio del composito, sia la trasmissione degli sforzi di trazione da quest'ultimo al nodo. Inoltre, il sistema di rinforzo a pressoflessione deve garantire che il collasso avvenga per rottura del composito, la quale deve perciò precedere il distacco dal supporto. Tale condizione può essere ottenuta, ad esempio, ricorrendo ad un confinamento trasversale. Conseguentemente, è lecito adottare per la f_{fd} il valore fornito dal primo termine in parentesi nella (4.14).

Il raggiungimento degli obiettivi costruttivi sopra indicati deve essere validato mediante adeguate indagini sperimentali.

(3) Valgono le regole di applicazione introdotte nel § 4.2.2.3, dal punto (2) al punto (6), con l'unica variante che al primo membro della (4.15) deve figurare lo sforzo normale sollecitante di progetto, N_{sd} .

(4) In alternativa a quanto previsto nel punto (5) del precedente § 4.2.2.3, è possibile valutare la resistenza di progetto a pressoflessione dell'elemento rinforzato con FRP seguendo il procedimento semplificato descritto nell'Appendice E.

4.2.2.5 Collasso per distacco di estremità

(1) Il distacco di estremità dipende da una serie di fattori quali l'ubicazione della zona di formazione delle fessure, la tipologia di queste ultime (fessure taglianti e/o flessionali), la presenza di irregolarità sulla superficie di applicazione del rinforzo e la concentrazione tensionale nelle zone di ancoraggio.

(2) Nel caso di elementi inflessi di c.a., una volta che sia stata individuata la sezione a partire dalla quale è necessario il rinforzo di FRP per incrementarne il momento resistente, si deve verificare che la tensione cui la suddetta sezione è soggetta allo SLU non superi il massimo valore ammissibile nei riguardi del fenomeno di distacco di estremità. Tale valore massimo è funzione della lunghezza della zona di ancoraggio, a sua volta dipendente dalla distanza a^* della summenzionata sezione dall'appoggio (Figura 4-6). Per $a^* \geq l_{ed}$ è suggerito di prevedere una lunghezza di ancoraggio $l_b \geq l_{ed}$. Per $a^* < l_{ed}$ è inevitabile che sia $l_b < l_{ed}$. Nel primo caso il massimo valore ammissibile per la tensione di trazione nel composito nei riguardi del fenomeno di distacco di estremità è f_{idd} (eq.(4.4)); nel secondo caso è $f_{idd,rid}$ (eq. (4.5)).

(3) Qualora l'ancoraggio sia realizzato in una zona soggetta a prevalenti sollecitazioni taglianti, che possono indurre fessure inclinate, la forza di trazione mobilitata nel composito, alla distanza a^* , deve essere calcolata dopo aver operato un'opportuna traslazione del diagramma del momento flettente, di entità a_1 . Tale traslazione deve avvenire nel verso che dà luogo ad un aumento del valore assoluto del momento flettente (Figura 4-6).

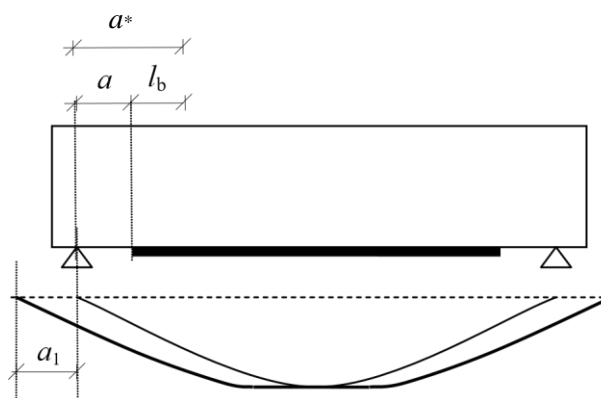


Figura 4-6 – Traslazione del diagramma del momento flettente.

Sul piano operativo, generalmente, la forza di ancoraggio può essere valutata incrementando il momento di calcolo sollecitante della seguente quantità:

$$M = V_{sd} * a_1, \quad (4.17)$$

dove V_{Sd} è il taglio sollecitante di progetto, $a_1 = 0.9 \cdot d \cdot (1 - \cot \alpha)$, α è l'inclinazione dell'armatura a taglio e d è l'altezza utile della sezione.

(4) In presenza di dispositivi speciali per l'ancoraggio delle estremità dei sistemi di rinforzo, è possibile omettere le verifiche di cui ai punti precedenti a condizione di disporre di un'opportuna certificazione di tali dispositivi basata su adeguate indagini sperimentali. La certificazione deve riguardare i materiali impiegati (adesivi e rinforzi), gli specifici sistemi utilizzati per migliorare l'ancoraggio (barre trasversali annegate nel copriferro, fasciatura trasversale mediante tessuti, ecc.), la successione delle fasi indicate dal Produttore e/o del Fornitore per la preparazione delle superfici, i tempi di esecuzione e le condizioni ambientali.

(5) In presenza di momenti negativi alle estremità dell'elemento rinforzato, a meno di valutazioni più specifiche o di adozione di dispositivi speciali d'ancoraggio, è consigliato di limitare l'applicazione del composito FRP alla sola zona soggetta a momento positivo, valutando α^* a partire dalla sezione a momento nullo.