

4 RINFORZO DI STRUTTURE MURARIE

Il rinforzo delle strutture in muratura rappresenta una delle applicazioni più importanti per i sistemi FRCM. Tali rinforzi possono essere estesi all'intera superficie dell'elemento murario o essere applicati a strisce di ampiezza sufficiente a contenere opportunamente la sollecitazione tangenziale all'interfaccia muratura - rinforzo.

Le verifiche di sicurezza possono essere condotte nei confronti del solo stato limite ultimo come di seguito indicato.

Di regola, l'incremento della capacità di calcolo dell'elemento rinforzato con FRCM non può risultare superiore del 50% rispetto a quella dell'elemento non rinforzato. La limitazione non si applica per le azioni sismiche.

4.1 RINFORZO DI PARETI SOLLECITATE NEL PROPRIO PIANO

[...]

4.2 RINFORZO DI PARETI FUORI DEL PIANO

[...]

4.3 REALIZZAZIONE DI CORDOLI SOMMITALI

[...]

4.4 CONFINAMENTO DI COLONNE DI MURATURA SOLLECITATE A COMPRESSIONE CENTRATA

[...]

4.5 STRUTTURE A SEMPLICE E DOPPIA CURVATURA

L'impiego di sistemi di rinforzo FRCM è in grado di migliorare il comportamento delle strutture a semplice e doppia curvatura, contrastando l'innescò di possibili meccanismi di collasso.

Un principio che va tenuto presente nel rinforzo di elementi strutturali con tecnologia FRCM è che questi materiali, a differenza di altri sistemi di rinforzo, possono godere di qualche significativa proprietà di duttilità in trazione, legata alla presenza del tratto semiduttile del legame costitutivo a trazione (Figura 2.23, Stadio B), sempre che tale tratto abbia un'estensione non trascurabile, come meglio sarà chiarito nel prosieguo. Pertanto accoppiando il rinforzo duttile ad un materiale in cui l'allungamento si determina per effetto del distacco tra due interfacce, l'elemento risultante è dotato dello stesso carattere di duttilità del rinforzo, purché questo sia in grado di tollerare il relativo sforzo senza perdere la solidarietà con il supporto murario. La possibilità di conferire un comportamento duttile al sistema a livello strutturale si traduce in un aumento della capacità resistente e in un miglioramento qualitativo complessivo, tenendo presente della necessità di un affidabile modello di verifica della integrità del rinforzo e della connessione rinforzo-struttura.

Per non compromettere la duttilità della struttura, la verifica della solidarietà del rinforzo al supporto murario va fatta in relazione allo sforzo di trazione massimo che si può affidare al rinforzo, da valutare relativamente al valore della tensione che determina la transizione dallo stadio A allo stadio B (tratto semiduttile) del diagramma in Fig. 2.23.

Tale tensione (caratteristica) non è inserita tra i parametri di qualificazione elencati nella Linea Guida Ministeriale. Tuttavia è agevolmente ricavabile dai risultati delle prove di qualificazione e per valutazioni preliminari è approssimabile a

$$\sigma_o = \sigma_{uf} / \beta_o \quad (\beta_o = 1.8 \div 2.2). \quad (4.18)$$

Ai fini della verifica del legame al supporto, si assume agente da entrambi i lati dell'elemento di rinforzo uno sforzo pari a $N_o = \sigma_o \cdot A_f$, dove A_f è l'area complessiva della rete secca e σ_o è il valore caratteristico della suddetta tensione.

Nel caso di superficie curva, la curvatura produce una tensione di distacco σ_{ro} (Fig. 4.3) all'interfaccia tra rinforzo e muratura, e tra la rete e la matrice, che deve risultare inferiore alla resistenza a trazione minima σ_{rt} tra quella della matrice e del supporto, per cui occorre verificare:

$$\sigma_{ro} = \frac{N_o}{rb} \leq \frac{\sigma_{rt}}{\gamma_{rt}}, \quad (4.19)$$

dove σ_{rt} è un valore caratteristico e γ_{rt} un fattore parziale, da assumersi uguale ad 1.5.

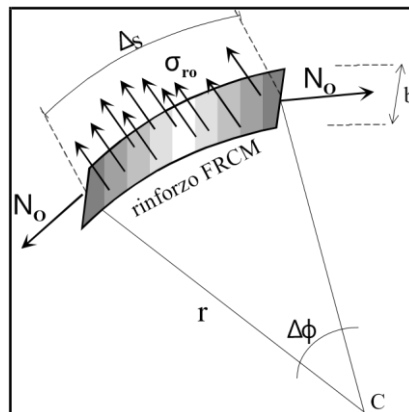


Fig. 4.3 - Elemento di rinforzo applicato all'intradosso e tensione radiale di distacco.

Assunta verificata la (4.19), va poi eseguita la verifica di tenuta del rinforzo in relazione ai carichi applicati. Con riferimento all'equilibrio di un elemento di arco, per l'interfaccia tra il rinforzo e l'elemento murario, va verificato che (vedere Cap. 13, Appendice 2):

$$\sigma_{max} = \frac{\sigma_r}{2} + \sqrt{\frac{\sigma_r^2}{4} + \tau^2} \leq \frac{\sigma_{rt}}{\gamma_{rt}}, \quad (4.20)$$

dove:

- τ_r è la sollecitazione tangenziale all'interfaccia
- σ_r è la sollecitazione ortogonale all'interfaccia.

4.5.1 Strutture a singola curvatura

La analisi della capacità statica delle strutture murarie può effettuarsi con pari efficacia sia attraverso l'esame di modi di collasso (metodo cinematico) che attraverso la ricerca dei percorsi di equilibrio ammissibile (metodo statico). Va rilevato che, se le due procedure sono attuate con tutta la necessaria precisione, i risultati ottenuti sono del tutto equivalenti. Diverso è il caso in cui uno dei procedimenti o entrambi siano applicati in maniera approssimata in quanto, in tal caso, il metodo statico produce sempre un risultato a vantaggio di sicurezza e quindi è del tutto affidabile, mentre il metodo cinematico è più delicato perché produce risultati a svantaggio di sicurezza, a meno che i cinematismi di riferimento non siano selezionati molto accuratamente.

4.5.1.1 Verifica e identificazione del rinforzo mediante l'approccio cinematico

Il collasso dei sistemi strutturali a singola curvatura può essere ricondotto alla formazione di cerniere unilaterali che nascono a causa della limitata resistenza a trazione della muratura, producendo l'innescò di un meccanismo cinematico.

Considerato che le cerniere unilaterali in assenza di resistenza a trazione non producono dissipazione di energia, tale meccanismo si traduce in un collasso della struttura se i carichi agenti compiono un lavoro maggiore di zero.

La condizione di collasso, che si verifica quando il lavoro dei carichi agenti è maggiore di zero, può essere valutata sulla base degli spostamenti dedotti da diagrammi costruiti con la teoria delle catene cinematiche.

Se il grado di sicurezza nei confronti del collasso cinematico non è adeguato, è possibile contrastare la formazione dei meccanismi cinematici più pericolosi predisponendo all'intradosso o all'estradosso dei rinforzi di materiale FRCC in posizione tale da impedire la libera apertura delle cerniere unilaterali coinvolte. In tal modo resta limitata la possibilità di formazione dei cinematismi più pericolosi col conseguente incremento del grado di sicurezza.

Ammissa la affidabilità del legame tra rinforzo e struttura, se si attivano cerniere in corrispondenza del rinforzo, per ogni cerniera andrà considerato un lavoro pari al valore dello sforzo limite N_0 per lo spostamento relativo tra i lembi della fessura associata alla cerniera, sempre che il tratto semiduttile abbia un'estensione tale da consentire al rinforzo FRCC di subire il competente allungamento permanendo nello stadio B. Il verificarsi di tale circostanza è condizione necessaria per l'applicabilità dell'approccio cinematico.

4.5.1.2 Verifica e identificazione del rinforzo mediante l'approccio statico

Una alternativa al metodo sopra illustrato consiste nel verificare la possibilità della struttura di equilibrare i carichi applicati senza violare le proprietà resistenti del materiale di cui è costituita. Per strutture a semplice curvatura, quali archi mono- o pluri-arcate, o anche volte assimilabili ad una sequenza di archi tra loro in qualche modo collaboranti, quali ad esempio le volte a botte, si può fare riferimento ad un sistema isostatico equivalente in cui le caratteristiche di sollecitazione dipendono da un numero di interazioni iperstatiche scelte in modo opportuno, secondo i metodi consolidati della teoria delle strutture.

Considerando che si è assunta nulla la resistenza a trazione della muratura, la struttura può tollerare i carichi applicati senza collassare se è possibile graduare le iperstatiche in modo tale che la risultante degli sforzi ricada all'interno della sezione retta della struttura (arco, piedritti, ecc.), ovvero se la

curva delle pressioni, costruita come la curva funicolare di carichi e reazioni vincolari, risulta ovunque interna al profilo della struttura.

Se la verifica di stabilità sopra menzionata ha dato invece esito negativo, identificata quindi una linea delle pressioni “non ammissibile”, la stabilità della struttura può essere assicurata predisponendo il rinforzo all’intradosso e/o all’estradosso in modo da coprire tutta la estensione della arcata lungo la quale la linea delle pressioni sfora dal profilo della struttura.

Una volta disposto il rinforzo e recuperata quindi la ammissibilità della linea delle pressioni, resta da verificare che la muratura e il rinforzo siano in grado di tollerare con sicurezza i rispettivi sforzi. A tale scopo occorre individuare le sezioni più sollecitate, come quella corrispondente alla posizione della massima distanza della linea delle pressioni dalla linea media della struttura a curvatura, che risulta sollecitata a compressione eccentrica e taglio come illustrato in Fig. 4.4, dove N è lo sforzo normale nella situazione di verifica e T il relativo sforzo di taglio; N_m è la risultante delle compressioni nella muratura mentre N_f è lo sforzo di trazione nel rinforzo.

Le relative verifiche di resistenza saranno effettuate secondo i metodi e i criteri esposti nel paragrafo 4.2 integrati con quanto illustrato in Cap. 12 Appendice 1.

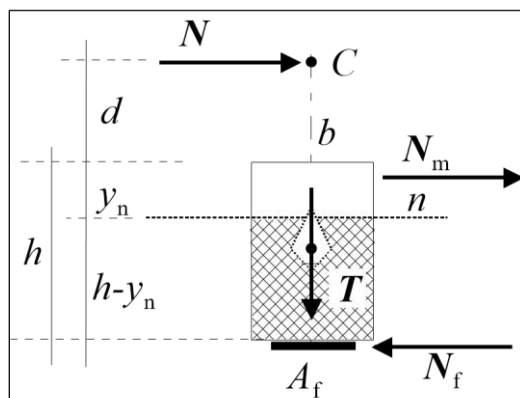


Figura 4.4 - Sezione retta di verifica.

4.5.2 Volte a botte

Le strutture a semplice curvatura, quali le volte a botte, possono riguardarsi come costituite da una sequenza di arcate parallele, e pertanto possono essere rinforzate e verificate con le stesse modalità riportate nei paragrafi precedenti. Al fine di assicurare la compattezza del sistema strutturale è opportuno predisporre anche rinforzi longitudinali lungo la direzione delle generatrici della volta. La densità del rinforzo deve essere adeguata a preservare la diffusione dell’effetto di rinforzo su tutta la muratura costituente la volta, e pertanto è bene che l’interasse p_f tra i rinforzi risponda alla seguente relazione:

$$p_f \leq 3t + b_f, \quad (4.21)$$

dove:

- b è lo spessore della volta
- b_f è la larghezza dei rinforzi adottati.

4.5.3 Strutture a doppia curvatura

La caratterizzazione del collasso delle strutture a doppia curvatura in generale coinvolge cinematismi di non semplice identificazione, e per i quali quindi si deve preferire effettuare la valutazione del beneficio del rinforzo verificando la ammissibilità delle soluzioni equilibrate in termini di tensioni e/o di sforzi interni.

Di massima lo studio della statica di una volta in muratura, per la quale è sempre prudente assumere che il materiale non possa sostenere un regime di trazione, si può eseguire tramite la identificazione di una membrana delle pressioni che svolge lo stesso ruolo della linea delle pressioni nel caso delle strutture a curvatura singola.