



Caso studio di rinforzo strutturale di edificio in muratura

Giovanni Cerretini^a, Giorgio Giacomini^b

^a Studio Technica, Via del Caravaggio, 43, 50143 Firenze, Italia, giovanni@studiotecnica.net

^b G&P Intech s.r.l., Via Retrone, 39, 36077 Altavilla Vicentina (VI), Italia, g.giacomini@gpintech.com

Keywords: FRP; FRCM; muratura; rischio sismico

ABSTRACT

Un rinforzo strutturale eseguito su una villa del 1200 in muratura mista con l'obiettivo di ottenere un elevato miglioramento sismico valutabile come decremento della Classe di Rischio Sismico [4].

La tecnica di rinforzo prevede l'utilizzo di sistemi FRP con nastri in fibra di carbonio applicati alle murature perimetrali esterne e sistemi FRCM applicati alle pareti interne. La soluzione proposta permette il miglioramento sismico sia nei confronti dei fenomeni di rottura locali sia nel comportamento complessivo di tutta la struttura. Viene prestata particolare attenzione al calcolo dimensionale dei rinforzi ed al contributo combinato delle due tecniche evidenziando le peculiarità dell'una e dell'altra. Il sistema FRP viene impiegato per evitare fenomeni di ribaltamento e per l'incremento delle resistenze a presso-flessione e taglio dei paramenti murari, mentre il sistema FRCM viene impiegato per il miglioramento diffuso delle proprietà meccaniche della muratura. Particolare attenzione viene posta nella valutazione dei valori resistenti di progetto correlati al fenomeno della delaminazione adottando speciali accorgimenti tecnici nella realizzazione dei collegamenti con connettori in fibra aramidica o in CFRP.

La metodologia di intervento permette un passaggio di Classe di Rischio Sismico di almeno 3 livelli, come deducibile dal calcolo del valore PAM [4].

1 INTRODUZIONE

Il presente articolo espone un caso studio consistente in una importante ristrutturazione effettuata su un edificio in muratura situato sulle colline fiorentine.

La progettazione degli interventi di ristrutturazione ha preso in considerazione anche la vulnerabilità sismica dell'edificio e ha avuto come obiettivo l'incremento della resistenza sismica.

Nella trattazione che segue si pone particolare attenzione al rinforzo realizzato con materiali compositi e di come questi siano stati utilizzati affiancandoli a tecniche di rinforzo tradizionali.

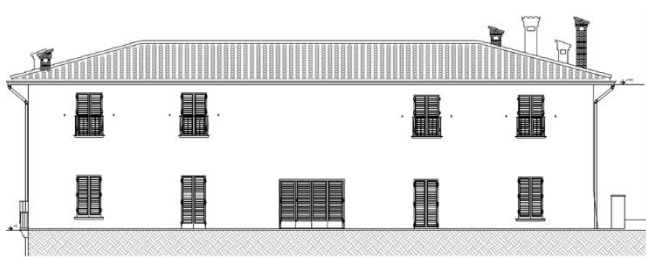


Figura 1. Prospetto frontale dell'edificio.

2 ANALISI STORICA E INDAGINI DIAGNOSTICHE CON CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI

L'edificio nel corso della sua esistenza ha subito svariati interventi di ristrutturazione che hanno comportato lo spostamento delle aperture interne, la modifica dei vani scale e la modifica delle strutture portanti dei solai.

Preliminarmente alla fase progettuale è stata effettuata una estesa ed esaustiva indagine sulle strutture portanti. Sono stati completamente rimossi tutti i rivestimenti e gli intonaci sia sulle pareti che sulle strutture orizzontali. Sono state effettuate indagini endoscopiche per valutare le tipologie e gli spessori delle pareti portanti e prove con martinetti piatti per la caratterizzazione delle murature.

Le murature portanti hanno evidenziato una scarsa qualità e i parametri medi sono risultati pari a:

- $E = 174800 \text{ t/m}^2$.
- $G = 50000 \text{ t/m}^2$.
- $f_{bk} = 1000 \text{ t/m}^2$.
- $f_k = 199 \text{ t/m}^2$.

– $f_{vk0} = 1,87 \text{ t/m}^2$.

– $\gamma = 2 \text{ t/m}^3$.

L'insieme delle indagini suddette ha permesso di raggiungere un livello di conoscenza LC3.

3 TIPOLOGIA DI INTERVENTO

La soluzione progettuale di partenza prevedeva la sostituzione dei solai esistenti con nuove strutture in legno e acciaio; la sostituzione completa della struttura di copertura; l'inserimento di alcuni telai metallici in corrispondenza delle nuove aperture e interventi di tipo cucì e scuci dove le murature risultavano incoerenti e danneggiate. Tutti questi interventi, pur migliorando il comportamento globale dell'edificio non fornivano un significativo miglioramento della capacità resistente ultima dello stesso.

È stato quindi necessario intervenire anche sulle pareti portanti realizzando la riconnessione delle intersezioni tra i muri di spina con l'inserimento di barre di acciaio, l'incremento di resistenza della pareti portanti esterne mediante applicazione di un sistema di rinforzo FRP e l'incremento di resistenza delle pareti portanti interne dell'edificio mediante applicazione di un sistema di rinforzo FRCM. Le fibre utilizzate per nastri, reti e connettori sono fibre di carbonio.

3.1 Sistema FRP in carbonio

Su tutte le pareti portanti del perimetro esterno dell'edificio è stato utilizzato un sistema di rinforzo costituito da fasce orizzontali in carbonio alla quota dei solai e della copertura per la realizzazione di cordoli perimetrali (la configurazione in pianta dell'edificio ha permesso di ottenere una cerchiatura completa).

Una ulteriore fascia perimetrale è stata posta alla base della fascia di piano del piano terra, in modo da realizzare una trave di muratura armata e al tempo stesso fornire un confinamento orizzontale alle pareti in modo da contrastare eventuali fenomeni di instabilità o ribaltamento verso l'esterno.

Per tutta l'altezza delle pareti sono state realizzate fasce verticali con il duplice scopo di rinforzare la pareti sia nei confronti dei fenomeni di pressoflessione fuori del piano che dei fenomeni di pressoflessione nel piano.

Le murature sono state anche rinforzate a taglio utilizzando croci di Sant'Andrea realizzate sempre con fasce in CFRP.

Tutti i nastri sono stati disposti sia sul lato esterno che sul lato interno dell'edificio e sono

stati realizzati collegamenti passanti con connettori in nastri e barre in fibra di carbonio in tutti i punti di intersezione dei nastri.

Ortogonalmente alla facciata dell'edificio sono state realizzate anche due catene in nastri CFRP e connettori in barre di carbonio.



Figura 2. Prospetto frontale con fasce CFRP alla quota dei solai e della copertura.



Figura 3. Prospetto frontale con aggiunta di fasce CFRP alla quota della fascia di piano terra.



Figura 4. Prospetto frontale con aggiunta di fasce CFRP verticali.



Figura 5. Prospetto frontale con aggiunta di fasce CFRP disposte a Croce di Sant'Andrea.



Figura 6. Scorcio della parete esterna rinforzata.



Figura 7. Dettaglio di una Croce di Sant'Andrea.



Figura 8. Vista di una catena interna.



Figura 9. Particolare del rinforzo sullo spigolo esterno.

3.2 Sistema FRCM

Per le murature interne è stato deciso di intervenire con un sistema FRCM applicando su entrambi i paramenti delle murature portanti una rete in fibra di carbonio e malta di calce.

Le pareti in muratura rinforzata con FRCM hanno proprietà meccaniche dipendenti dai componenti utilizzati, dalla loro qualità e quantità. Le singole proprietà meccaniche sono state calcolate utilizzando le formule seguenti derivate dalle indicazioni del documento del CNR [3].

Resistenza media a compressione della muratura rinforzata f_{cm} :

$$f_{cm} = (t f_k + 2 t_M f_{Mc}) / (t + 2 t_M) \quad (1)$$

Resistenza media a taglio f_{vkom} :

$$f_{vkom} = 0,54 f_{dd} 2 t_f / (\gamma_{Rd} t) \quad (2)$$

Modulo di elasticità normale equivalente E_{cm} :

$$E_{cm} = (t E + 2 t_M E_M) / (t + 2 t_M) \quad (3)$$

Modulo di elasticità tangenziale equivalente G_{cm} :

$$G_{cm} = 0,4 E_{cm} \quad (4)$$

dove:

- E modulo di elasticità normale della muratura originaria.
- E_{cm} modulo di elasticità normale della muratura rinforzata con FRCM.
- E_M modulo di elasticità normale della malta del sistema FRCM.
- f_{cm} resistenza media a compressione della muratura rinforzata con FRCM.
- f_{dd} resistenza di progetto del rinforzo in fibra.
- f_k resistenza di calcolo a compressione della muratura originaria.
- f_{Mc} resistenza di calcolo a compressione della malta del sistema FRCM.
- f_{vkom} resistenza media a taglio della muratura rinforzata con FRCM.
- G_{cm} modulo di elasticità tangenziale della muratura rinforzata con FRCM.
- t spessore della muratura originaria.
- t_f spessore equivalente del rinforzo in fibra sul singolo lato in direzione orizzontale.
- t_M spessore della malta del sistema FRCM applicata sul singolo lato della muratura.
- γ_{Rd} coefficiente parziale di sicurezza relativo al modello di resistenza.



Figura 10. Vista di una parete interna.



Figura 11. Dettaglio del rinforzo FRCM.



Figura 12. Dettaglio dei connettori.

4 PRESTAZIONI DELLA STRUTTURA RINFORZATA

Per valutare le prestazioni della struttura rinforzata è stato necessario valutare il contributo di resistenza offerto dai rinforzi in fibra. I sistemi FRP e FRCM hanno comportamenti diversi che sono stati semplificati ipotizzando che il sistema FRP contribuisca solo sui parametri di resistenza incrementando la capacità portante dei pannelli murari, mentre il sistema FRCM contribuisca sia alla resistenza che al miglioramento delle caratteristiche meccaniche della muratura incrementando la capacità portante e modificandone le rigidità.

Nel seguito si riportano le indicazioni relative alla modellazione utilizzata e ai calcoli per la valutazione dei parametri resistenti delle murature rinforzate.

4.1 Modellazione di calcolo

La struttura è stata modellata tridimensionalmente schematizzando le pareti portanti di ogni singolo piano con la loro proiezione in pianta.

Lo schema di calcolo utilizzato è quello di tipo *shear-type* in cui le pareti sono assimilate a mensole incastrate e collegate tra loro dalle fasce di piano. Ai fini della verifica delle pareti non è stato tenuto conto del contributo delle travi di collegamento tra i vari setti in quanto è stata considerata l'altezza totale della parete compresa tra i solai.

La geometria utilizzata per le strutture di rinforzo in fibra è compatibile con il suddetto modello di calcolo ed anzi lo rende ancora più coerente rispetto alla struttura reale.

Le pareti rinforzate con i sistemi CFRP sono state modellate con le loro dimensioni effettive e con caratteristiche meccaniche e resistenti uguali a quelle della muratura esistente.

Le pareti rinforzate con i sistemi FRCM sono state modellate con le loro dimensioni effettive e con caratteristiche meccaniche e resistenti migliorate per tenere conto dell'effetto del rinforzo applicato.

La verifica globale dell'edificio è stata eseguita tramite un'analisi statica non lineare, che consiste nell'applicare all'edificio, oltre ai carichi gravitazionali, un sistema di forze orizzontali che vengono incrementate fino ad arrivare ad una resistenza superiore al 25% dell'azione sismica o fino ad arrivare al valore massimo della forza

applicata. In quest'ultimo caso l'edificio non è verificato. Questo garantisce che l'azione sismica sia minore o uguale all'80% dell'azione che genera il collasso dell'edificio, come previsto al par.C.7.8.1.5.4 [2].

Nel modello vengono individuati i setti portanti sui singoli piani dell'edificio.

La modellazione ha permesso di dimensionare i rinforzi ottimizzandone la posizione e la quantità.

4.2 Coefficienti di sicurezza sui materiali

Per i calcoli di verifica sono stati utilizzati i seguenti coefficienti parziali di sicurezza sui materiali:

Tabella 1. Coefficienti parziali di sicurezza sui materiali.

Coefficiente parziale	Simbolo	Valore
Muratura	γ_M	2,50
Muratura azioni sismiche	γ_M	2,00
Rinforzo FRP	γ_f	1,10
Delaminazione FRP	γ_f	1,50

4.3 Calcolo della resistenza a delaminazione

Come noto, il limite di resistenza dei sistemi di rinforzo in fibra, collegati esternamente alle strutture da rinforzare, dipende principalmente dalla capacità di resistere al fenomeno della delaminazione. Per questo motivo il primo passo seguito per il dimensionamento è stato quello di valutare la capacità di resistenza a delaminazione utilizzando le indicazioni della documentazione tecnica del CNR [3].

La capacità resistente ridotta del rinforzo C-NET 170 BL e malta Limecrete applicato in un singolo strato per sola aderenza vale:

$$f_{fdd,rid} = 567 \text{ MPa}$$

La capacità resistente ridotta del rinforzo C-NET 170 BL e malta Limecrete applicato in un singolo strato con connettori distribuiti vale:

$$f_{fdd,rid} = 850 \text{ MPa}$$

La capacità resistente ridotta del rinforzo C-Sheet 240/300 largo 20 cm ed applicato in un singolo strato con connettori di estremità vale:

$$f_{fdd,rid} = 605 \text{ MPa}, N_{FRP} = 20570 \text{ N}$$

La capacità resistente ridotta del rinforzo C-Sheet 240/300 largo 20 cm ed applicato in due strati sovrapposti con connettori di estremità vale:

$$f_{fdd,rid} = 439 \text{ MPa}, N_{FRP} = 29852 \text{ N}$$

4.4 Calcolo delle proprietà meccaniche di muratura rinforzata con sistema FRCM

Lo spessore della muratura originaria è variabile tra 30 e 55 cm, la malta utilizzata per il sistema FRCM è il Limecrete M15 applicato con uno spessore di 25 mm per ogni lato e rete in fibra di carbonio C-NET 170BL.

Le caratteristiche meccaniche e resistenti sono le seguenti:

- Muratura originaria
- $E = 1748 \text{ MPa}$
 - $G = 500 \text{ MPa}$
 - $f_k = 1,99 \text{ MPa}$
 - $f_{vko} = 0,0187 \text{ MPa}$
- Malta Limecrete M15
- $E_M = 15000 \text{ MPa}$
 - $f_M = 15 \text{ MPa}$
- Tessuto C-NET 170BL
- $E_f = 240 \text{ GPa}$
 - $f_{fad} = 850 \text{ MPa}$

Nella tabella seguente si riportano i risultati per i vari spessori della muratura originaria.

Tabella 2. Caratteristiche meccaniche e resistenti delle murature rinforzate con FRCM.

t [mm]	f_{cm} [MPa]	f_{vkom} [MPa]	E_{cm} [MPa]	G_{cm} [MPa]
300	3,85	0,121	3641	1456
400	3,44	0,099	3220	1288
450	3,29	0,091	3073	1229
500	3,17	0,084	2953	1181
550	3,07	0,079	2852	1141

4.5 Calcolo del momento resistente fuori dal piano del sistema CFRP

Le fasce verticali in CFRP offrono una resistenza nei confronti delle azioni di pressoflessione fuori dal piano. Il nastro in CFRP conferisce una resistenza a trazione che la muratura ordinaria non ha e di conseguenza permette al paramento murario di resistere anche a momenti flettenti.

Nel caso in oggetto i valori del momento resistente di progetto calcolati con l'utilizzo di 2 lamine di CFRP larghe 200 mm poste con un passo di 1750 mm sono riportati nella tabella seguente:

Tabella 3. Caratteristiche meccaniche e resistenti delle murature rinforzate con FRCM.

Spessore muratura s [mm]	$M_{Rd,FRP}$ [t·m]
350	1,01
450	1,22
500	1,39
650	1,80

4.5.1 Calcolo del dominio resistente del sistema CFRP

Si può affermare che in generale la resistenza a trazione offerta dai nastri in CFRP non solo fornisce una resistenza al momento flettente ma modifica l'intero dominio resistente del paramento murario come evidenziato nei grafici della seguente figura.

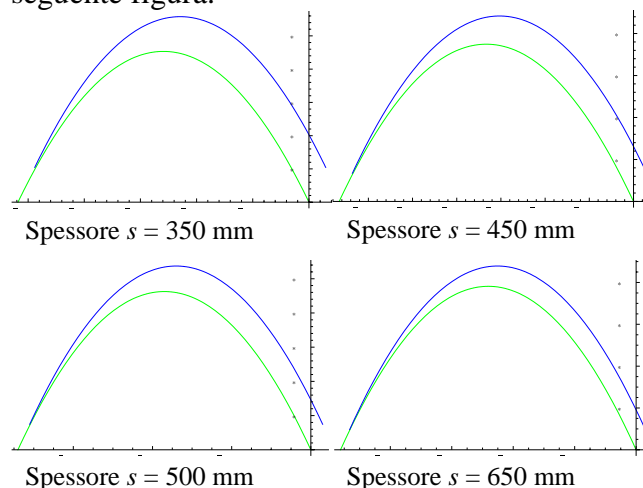


Figura 13. Diagrammi resistenti N-M (unità di misura N, mm) per azioni fuori dal piano delle murature di spessore s .

4.6 Calcolo della resistenza a taglio del sistema CFRP

Il rinforzo a taglio viene realizzato con fasce CFRP disposte a Croce di Sant'Andrea su entrambe le facce delle murature perimetrali.

La resistenza dei singoli rinforzi viene calcolata in accordo con quanto indicato nella documentazione tecnica del CNR [3] sulla base delle dimensioni e dello spostamento massimo calcolato allo SLU con l'ausilio del software di calcolo.

Per tutti i setti modellati e rinforzati con croci di sant'Andrea è stato calcolato l'incremento di resistenza a taglio $V_{Rd, fib}$ ed a titolo di esempio si riporta una tabella con un estratto dei valori calcolati per alcuni setti.

Tabella 4. $V_{Rd, fib}$ in direzione X al piano terra.

Numero setto	$V_{Rd, fib}$ [kN]
...	...
9	33,62
11	34,84
...	...
Totale direzione X	312,79

Una volta eseguiti tutti i calcoli si ottengono i contributi totali per ogni piano e per ogni direzione di applicazione della sollecitazione sismica.

I valori degli incrementi totali di resistenza a taglio del piano terra sono pari a:

$$V_{Rd, fib, PT, X} = 31 \text{ t}, V_{Rd, fib, PT, Y} = 20 \text{ t}$$

I valori degli incrementi totali di resistenza a taglio del piano primo sono pari a:

$$V_{Rd, fib, PP, X} = 33 \text{ t}, V_{Rd, fib, PP, Y} = 23 \text{ t}$$

4.7 Verifica a ribaltamento delle pareti perimetrali

Il fenomeno del ribaltamento viene impedito dalle fasce perimetrali orizzontali che cerchiano l'intero edificio alla quota dei solai e della copertura.

Con l'ausilio del software di calcolo è stato stimato che il valore del massimo momento ribaltante $M_{Rib, max}$ sulle pareti perimetrali vale:

$$M_{Rib, max} = 23,70 \text{ t} \cdot \text{m}$$

Imponendo l'equilibrio alla rotazione al piede della parete si può stimare il valore della forza che deve contrastare il momento ribaltante nel modo seguente:

$$2 F_{Ed} h^* = M_{Rib, max} \quad (5)$$

La forza agente sulla fascia FRP che deve contrastare il momento ribaltante è stata stimata ipotizzando un'altezza di applicazione h^* pari a 3m (a favore di sicurezza dato che l'altezza reale è maggiore). Nel caso in oggetto si ha:

$$F_{Ed} = 23,70 / (2 \times 3) = 3,95 \text{ t} = 39,5 \text{ kN}$$

Essendo la cerchiatura orizzontale realizzata con una fascia in CFRP continua si può considerare che la resistenza a trazione sia quella massima a rottura del rinforzo FRP trascurando i fenomeni di delaminazione che possono essere considerati trascurabili in accordo con quanto previsto nel documento tecnico del CNR [3] il valore di resistenza F_{Rd} è stato calcolato nel modo seguente:

$$F_{Rd} = E_f b_f t_f \eta_a \varepsilon_{fk} / \gamma_f \quad (6)$$

Quindi:

$$F_{Rd} = 240000 \times 200 \times 0,17 \times 0,85 \times 0,01583 / 1,1 = 99815 \text{ N} = 100 \text{ kN}$$

5 VALUTAZIONE DEL MIGLIORAMENTO SISMICO

La valutazione del miglioramento ottenuto con l'intervento proposto è stata effettuata confrontando gli indicatori di rischio iniziali e di progetto.

È stata stimata l'accelerazione massima che è in grado di supportare l'edificio considerando il valore della forza reattiva ottenuto con il modello di calcolo ed il contributo della resistenza a taglio dei rinforzi FRP.

Il fattore di sicurezza della struttura è dato dall'indicatore di rischio sismico in termini di accelerazione $I_{S-V, PGA}$ ed è pari al minimo valore tra quelli calcolati in ogni direzione principale per ogni piano dell'edificio. Le forze reattive valgono:

$$F_{Rd, PT, X} = 448 + V_{Rd, fib, PT, X} = 448 + 31 = 479 \text{ t}$$

$$F_{Rd, PT, Y} = 492 + V_{Rd, fib, PT, Y} = 492 + 20 = 512 \text{ t}$$

$$F_{Rd, PP, X} = 205 + V_{Rd, fib, PP, X} = 205 + 33 = 238 \text{ t}$$

$$F_{Rd, PP, Y} = 259 + V_{Rd, fib, PP, Y} = 259 + 23 = 282 \text{ t}$$

Nella seguente tabella vengono riportati i valori delle forze reattive, delle azioni sismiche di progetto e del coefficiente di sicurezza.

Tabella 5. Valori dei coefficienti di sicurezza.

Piano	Dir.	Reazione F_{Rd} [t]	Sisma F_{Ed} [t]	F_{Ed} / F_{Rd} [/]
Primo	X	238	308	0,77
Primo	Y	282	308	0,92
Terra	X	479	710	0,67
Terra	Y	512	710	0,72

L'indicatore di rischio in termini di accelerazione $I_{S-V, PGA}$ vale:

$$I_{S-V, PGA} = 0,67$$

Con l'intervento proposto quindi il valore dell'indicatore di rischio passa dal valore iniziale $I_{S-V, PGA, I}$ di 0,17 al valore di 0,67

$$I_{S-V, PGA, I} = 0,17$$

$$I_{S-V, PGA} = 0,67$$

$$I_{S-V, PGA} > I_{S-V, PGA, I}$$

5.1 Calcolo del PAM e della Classe di Rischio Sismico

Il confronto tra gli stati attuale e di progetto evidenzia il netto miglioramento sismico ottenuto complessivamente dall'edificio, sia in termini generali che in termini di fenomeni locali.

La modellazione eseguita ed i calcoli esposti permettono anche di individuare il parametro PAM (Perdita Annuale Media attesa) [4] e la Classe di Rischio Sismico [4] dell'edificio sia nello stato attuale che in quello di progetto. I risultati riportati nella tabella seguente evidenziano come con l'intervento proposto si sia ottenuto un passaggio di ben 3 classi dalla G alla D.

Tabella 6. Confronto tra stato attuale e stato di progetto.

Parametro	Stato attuale	Stato di progetto
PGA_{DLC}		0,1341 g
PGA_{DLC}	0,027 g	0,090 g
$I_{S-V,PGA}$	0,17	0,67
PAM	23,31%	3,27%
Classe di rischio	G	D

RIFERIMENTI

- [1] D.M. 14.01.2008. *Nuove norme tecniche per le costruzioni.*
- [2] Circolare 02.02.2009 n.617. *Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14 gennaio 2008.*
- [3] 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.*
- [4] D.M. 28.02.2017 n. 58. *Approvazione delle linee guida per la classificazione di rischio sismico delle costruzioni nonché delle modalità per l'attestazione dell'efficacia degli interventi effettuati.*