



# Cordoli sommitali in pultruso e muratura armata con rete in GFRP. Un caso applicativo

Riccardo Vetturini<sup>a</sup>, Chiara Quintaliani<sup>b</sup>, Romina Sisti<sup>c</sup>, Antonio Borri<sup>b</sup>,

<sup>a</sup> *INGENIUM s.r.l. Società di ingegneria, Corso Cavour, 84, 06034, Foligno, Perugia*

<sup>b</sup> *Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Perugia, Via Goffredo Duranti 93, 06125 Perugia*

<sup>c</sup> *Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura, Università degli Studi di Napoli Federico II, Via Claudio 21, 80125 Napoli*

*Keywords: Cordoli sommitali, muratura armata, profili pultrusi, reti in GFRP, miglioramento sismico, edifici storici.*

## SOMMARIO

I cordoli sommitali hanno, tra le loro diverse finalità, quella di favorire un comportamento scatolare agli edifici esistenti in muratura ed evitare l'insorgenza di meccanismi di ribaltamento delle pareti fuori piano per effetto dell'azione sismica.

Nel presente lavoro viene illustrata una particolare modalità di realizzazione, basata sull'utilizzo di muratura armata con reti in GFRP e elementi piatti pultrusi in fibra di vetro. Questa tecnica consente di ottenere un efficace collegamento della falda di copertura al cordolo e del cordolo alla muratura sottostante ed è caratterizzata da una notevole semplicità operativa in cantiere.

Come caso studio viene mostrato il progetto per i lavori di consolidamento del Castello di Fossa (AQ), descrivendo, attraverso alcuni dettagli costruttivi, i collegamenti nei diversi casi di timpani, pareti portanti interne e sporti di gronda.

## 1 INTRODUZIONE

Gli eventi sismici del 2016 nel centro Italia hanno dimostrato l'efficacia degli interventi di consolidamento e rafforzamento eseguiti sugli edifici esistenti in muratura agli inizi degli anni '80 (Sisti et al. 2018).

La realizzazione di un cordolo sommitale è fra gli interventi di consolidamento e miglioramento sismico più diffusi: tale elemento ha varie funzioni; tra le più importanti c'è quella di mantenere la forma della gabbia muraria, impedendo il distacco delle pareti nei cantonali ed ostacolando i meccanismi di ribaltamento fuori piano (Borri e De Maria 2004).

Se per la realizzazione dei cordoli sommitali si adotta la tecnica della muratura armata si ha, in generale, il vantaggio di una maggiore congruenza strutturale con le murature esistenti (Borri et al. 2009), ed anche quello di una maggiore compatibilità, dal punto di vista della conservazione, per quanto riguarda in particolare gli edifici storici.

La realizzazione dei cordoli in muratura armata talvolta può incontrare alcune difficoltà pratiche di realizzazione. In primo luogo, devono essere disponibili sufficienti spazi di lavoro affinché la posa in opera della gabbia metallica d'armatura non risulti difficoltosa. Lo spessore della parete sottostante il cordolo deve risultare di almeno 45 cm, così da consentire che l'armatura metallica sia posizionata a dovere all'interno dell'elemento murario. Inoltre, è necessario impiegare malte cementizie, dal momento che le malte a base di calce, generalmente impiegate per gli interventi sulle murature storiche, facilitano i processi di corrosione delle armature metalliche.

Le problematiche sopra esposte possono essere superate realizzando dei cordoli in muratura armata con reti in GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer). Questa tecnica innovativa è stata proposta e sperimentata attraverso una campagna di indagini riportata in precedenti pubblicazioni (Borri et al. 2016a; Sisti et al. 2016).

La muratura armata con reti in GFRP è caratterizzata da una notevole semplicità operativa in cantiere e consente l'utilizzo di malte

senza particolari limitazioni, dal momento che la durabilità dell'armatura in fibre di vetro, a differenza di quella dell'armatura metallica, non è compromessa dalla presenza di calce.

Questa tecnica, come mostrato nel già citato lavoro (Sisti et al. 2016), consente di realizzare cordoli anche in muratura di pietrame, oltre che in laterizio, e questo aspetto garantisce la compatibilità meccanica del cordolo con la muratura originaria, di qualunque tipologia essa sia. Vengono in questo modo evitati irrigidimenti locali che potrebbero risultare dannosi; cordolo e muratura, se efficacemente collegati tra loro, si comportano come se fossero un unico elemento, con una risposta sismica d'insieme.

La tecnica in questione consente, ove richiesto, di mantenere l'aspetto faccia vista della muratura. Negli interventi in cui sia prevista la ricostruzione della copertura, la parte sommitale della muratura viene smontata e reimpiegata per la realizzazione del cordolo, con evidente risparmio di materiale e vantaggi per la sostenibilità dell'intervento.

Il presente articolo si pone in continuità con gli studi suddetti, illustrando una particolare modalità realizzativa di cordoli in muratura di mattoni, armata con reti in GFRP e piatti pultrusi in fibra di vetro. Come caso studio viene qui mostrato il progetto dell'intervento di consolidamento e restauro del Castello di Fossa (AQ), predisposto da uno degli Autori (l'Ing. Riccardo Vetturini) seguendo la metodologia proposta.

Verranno quindi descritte le modalità di collegamento tra il cordolo e la muratura sottostante, nonché tra il cordolo e la copertura, illustrando, in particolare, le soluzioni adottate in corrispondenza dei diversi elementi architettonici, quali timpani, muri portanti interni e sporti di gronda.

## 2 CORDOLO IN MURATURA ARMATA CON RETI IN GFRP E PROFILI PULTRUSI

La soluzione qui presentata, adottata poi nel caso di studio, prevede l'utilizzo di reti in GFRP disposte in tre diversi strati prevalentemente orizzontali: il primo all'interfaccia tra la base del cordolo e la muratura sottostante, il secondo centralmente e il terzo in corrispondenza della quota di falda (Figura 1).

Come detto, un aspetto particolarmente importante nella realizzazione del cordolo sommitale è il collegamento tra il cordolo, la parete sottostante e la copertura.

Nella soluzione proposta, l'efficacia del collegamento tra il cordolo e la muratura sottostante è garantita da elementi piatti pultrusi in fibra di vetro, che vengono posti alla sommità del cordolo e collegati alla muratura con perfori armati. Le barre filettate inserite in tali perfori realizzano l'unione tra barra e lamina e possono essere leggermente pretese tramite il dado e la rosetta. I perfori vengono poi riempiti di malta anti ritiro cementizia.

In presenza di coperture con tavolato ligneo, come nel caso di studio, il collegamento tra falda e cordolo è reso efficace impiegando dei nastri forati in acciaio, disposti incrociati con un interasse di 1.5 m circa. I nastri sono disposti al disopra del tavolato, vengono prolungati fin sopra il cordolo e sono ad essi fissati in modo da realizzare il collegamento tra il cordolo e la falda. (Figura 2).

Questo tipo di intervento presuppone lo smontaggio e il rimontaggio della parte sommitale della muratura per un'altezza e uno spessore pari a quello del cordolo, 40-50 cm, ed è applicabile, quindi, nei casi in cui si prevista la sostituzione della copertura originaria. Spesso comunque, la parte sommitale della muratura si presenta ammalorata e decoesa, e quindi un suo consolidamento è necessario indipendentemente dalla realizzazione o meno del cordolo. Nello smontaggio della parte sommitale della muratura esistente è opportuno creare una superficie superiore irregolare, in modo da assicurare un buon ingranamento tra la muratura nuova del cordolo e quella sottostante.

Utilizzare una lamina in pultruso al posto di un piatto in acciaio può offrire diversi vantaggi. In primo luogo, i pultrusi sono leggeri e di facile manovrabilità e ciò consente una riduzione dei costi di gestione delle attrezzature di cantiere e della manodopera. Le lamine in pultruso, inoltre, possono essere forate con facilità durante la fase di messa in opera, adattandole secondo le esigenze che emergono di volta in volta in cantiere e semplificando così le operazioni di disposizione delle barre di ancoraggio del cordolo alla sottostante muratura. Infine, anche in ambienti chimicamente aggressivi, come quelli ad elevata salinità e umidità, i pultrusi non presentano quei problemi di durabilità che invece riguardano gli elementi in acciaio.

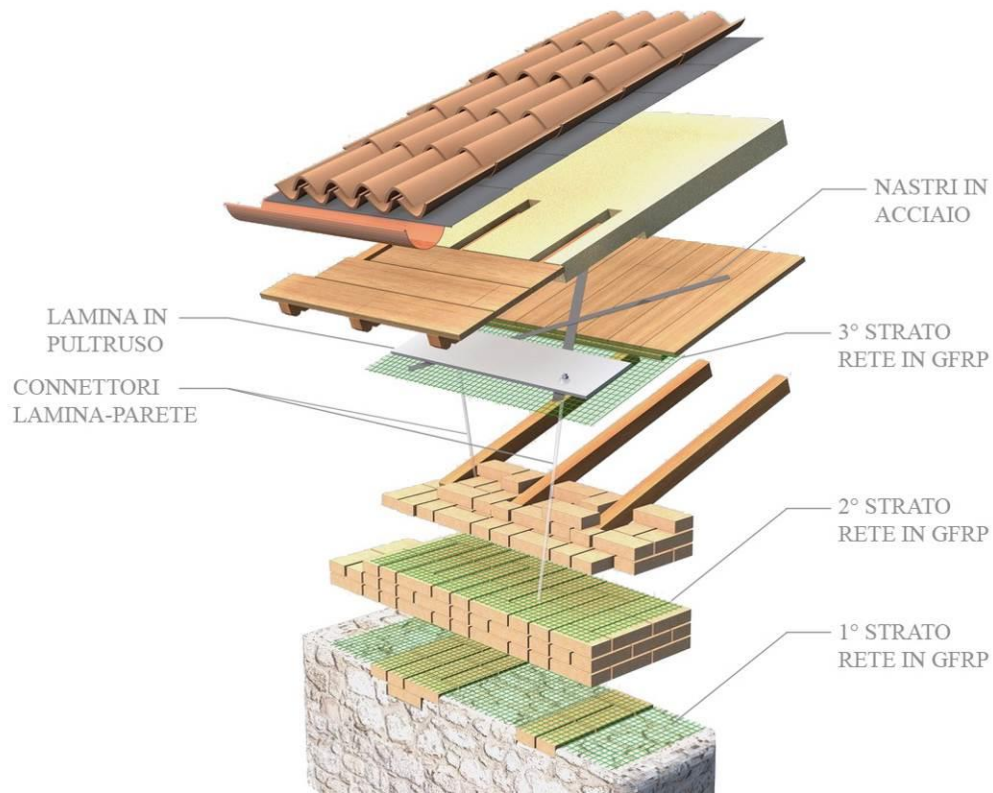


Figura 1. Vista in esploso assometrico degli elementi costitutivi del cordolo sommitale in muratura armata con reti in GFRP e elementi piatti pultrusi in fibra di vetro.

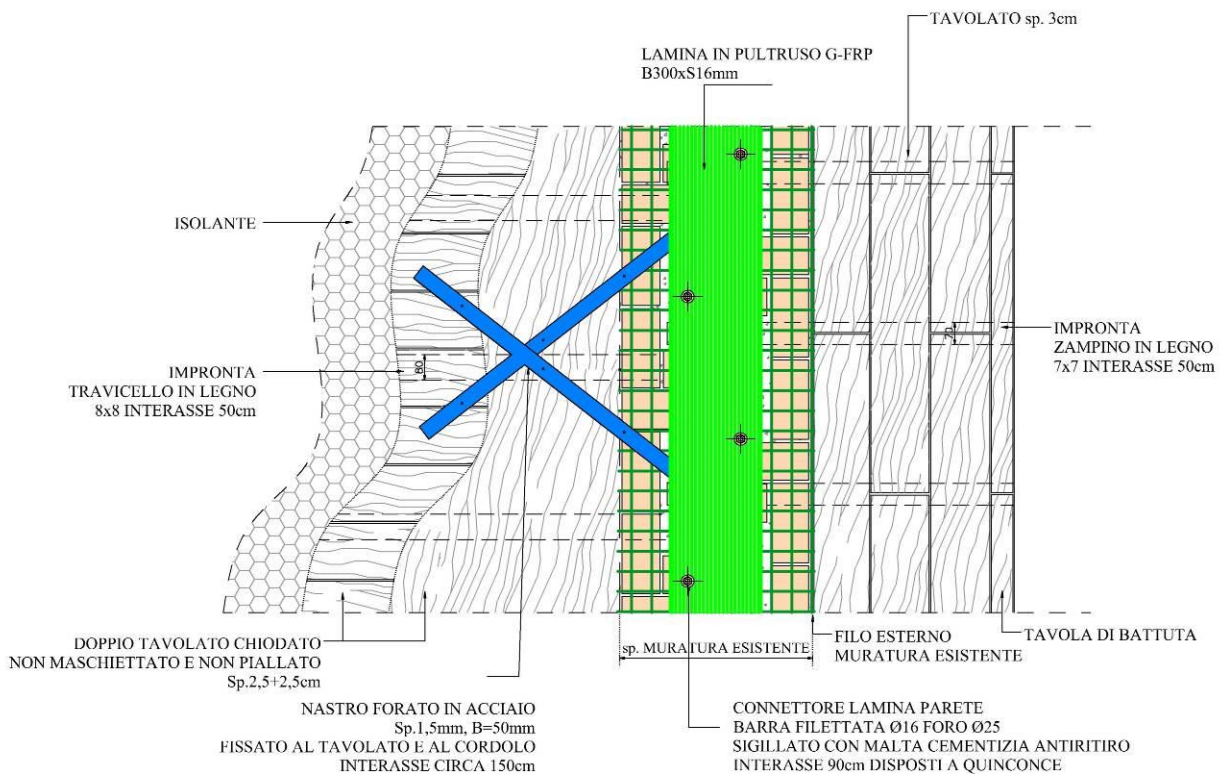


Figura 2. Pianta del cordolo in muratura armata con reti in GFRP ed elementi piatti pultrusi in fibra di vetro. Si notino: i nastri forati in acciaio, fissati alla rete e al tavolato della copertura così da realizzare il collegamento tra il cordolo e la falda e la disposizione dei connettori che realizzano il collegamento tra il cordolo e la muratura sottostante.

### 3 IL CASO STUDIO DEL CASTELLO DI FOSSA

#### 3.1 Inquadramento generale

Fossa è un piccolo borgo di origini medioevali che si trova a pochi chilometri da L'Aquila, nella media valle del fiume Aterno.

Il Castello di Fossa è stato edificato sul versante del monte Circolo, nella parte sommitale dell'insediamento (Figura 3a). Originariamente aveva funzioni difensive; è stato poi trasformato in residenze private e adesso si pone in continuità con il tessuto urbano del borgo.

Si tratta di un forte della tipologia "castello recinto" di forma romboidale, all'interno del quale si trovano una torre cilindrica e due differenti aggregati: uno centrale ed uno a ridosso delle mura (rispettivamente rappresentati in rosso e blu in Figura 3b), entrambi formati da più corpi di fabbrica.

Dalle indagini effettuate sulle murature è emerso che la maggior parte è formata da doppio paramento in pietra calcarea, sbazzata in modo irregolare. Gli elementi lapidei sono disposti in ricorsi sub-orizzontali più o meno regolari con una cura particolare nella scelta e nella posa in opera delle pietre che costituiscono i cantonali.

Alcune porzioni di muratura, opera di rifacimenti più recenti, sono realizzate in mattoni, foratini e cemento.

I solai sono in ferro e tavelloni, in ferro e voltine e in legno; sono inoltre presenti volte in pietra e in mattoni pieni.

In seguito al terremoto del 6 aprile 2009, alcune coperture originarie in legno, a doppia orditura, sono crollate e gli edifici di cui si

componono il Castello di Fossa sono stati classificati come "inagibili", con esito "E" nelle schede AeDES.

#### 3.2 Progetto degli interventi di miglioramento sismico

Gli interventi di miglioramento sismico sono finalizzati alla riparazione, alla riduzione delle vulnerabilità e all'incremento delle capacità degli edifici, in termini sia di resistenza che di duttilità. Consistono in interventi diffusi sulle murature, nel consolidamento delle volte esistenti e dei solai in ferro, nella costruzione di nuovi solai in acciaio e in legno e nel rifacimento delle coperture tramite elementi lignei.

Per ciò che riguarda gli interventi sulle murature, sono previsti:

- interventi volti a restituire continuità e compattezza alla muratura: scuci-cuci e la chiusura delle numerose nicchie presenti;
- interventi volti al rafforzamento delle murature: iniezioni di miscele leganti e intonaci armati con reti in GFRP sulle pareti interne;
- interventi volti a garantire la connessione tra pareti ortogonali e ad impedire il ribaltamento delle facciate: inserimento di tiranti in piatti di acciaio con capo chiave di varia forma e tipologia, sia nel rispetto di ragioni statiche che estetiche e conservative dei prospetti esterni.
- interventi di ricostruzione delle porzioni murarie crollate.

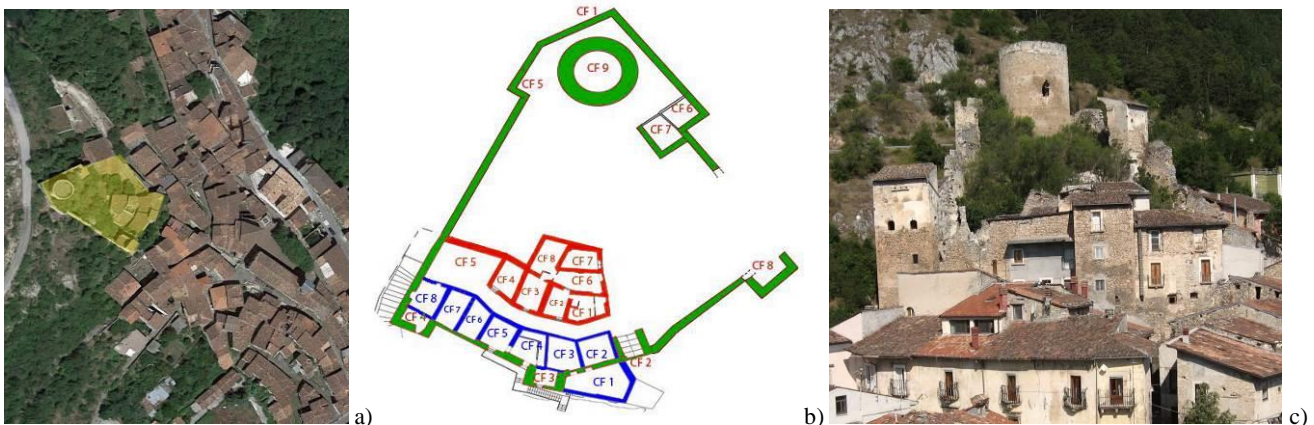


Figura 3. a) Foto satellitare dell'insediamento di Fossa (AQ), in giallo è evidenziato il Castello di Fossa. b) Pianta del Castello di Fossa. Il progetto di restauro ha interessato i due aggregati rappresentati in rosso e blu. c) Vista del Castello di Fossa.

Il consolidamento delle volte in folio esistenti verrà effettuato adottando la tecnica “tabicada armata” (Borri et al. 2016b), che prevede la costruzione, all’estradosso della volta, di ulteriori due strati di laterizi in folio. Le giaciture dei laterizi dei diversi strati vengono opportunamente sfalsate tra loro e la malta di calce idraulica fra gli strati è armata con rete in fibra di vetro.

Le volte in pietra verranno rinforzate all’estradosso applicando uno strato di calce idraulica con rete in fibra di vetro (Gattesco e Boem, 2019). In luogo del riempimento originale verranno realizzati frenelli in laterizio che, disposti parallelamente alle direttrici delle volte, partecipano alla capacità resistente dell’arco equivalente che caratterizza le volte stesse. Per il consolidamento dei solai in ferro, dopo aver rimosso i pavimenti e i sottostanti massetti e riempimenti, si prevede di applicare dei connettori a taglio (profili UPN) saldati all’estradosso delle travi esistenti e di realizzare una soletta in calcestruzzo alleggerito, armata con rete elettrosaldata. La realizzazione di una sezione resistente mista acciaio-calcestruzzo armato permette di incrementare la resistenza e la rigidità del solaio, di collegare fra loro le travi tramite la soletta armata e consente di aumentare il grado di vincolo all’appoggio delle travi.

Per quanto riguarda le coperture, il progetto prevede che vengano ricostruite secondo la configurazione originaria. Per non incrementare le masse nella parte più alta degli edifici, nel rispetto delle indicazioni delle NTC 2018 e della Circolare n.7 del 2019, al paragrafo C.8.7.4.1, verranno realizzate coperture in legno a doppia orditura costituite da travi principali, travicelli secondari e un doppio tavolato chiodato.

Il progetto prevede la realizzazione di cordoli in muratura armata con rete in GFRP e piatti pultrusi, secondo la tecnica proposta nel presente articolo, in grado di assorbire le eventuali spinte derivanti da configurazioni spingenti delle coperture.

### 3.3 Descrizione dei sistemi di collegamento del cordolo in muratura armata con reti in GFRP e profili pultrusi

Come detto, un efficace sistema di collegamento tra il cordolo e la muratura sottostante e il cordolo e la copertura gioca un ruolo fondamentale nel garantire una risposta congruente di questi diversi elementi strutturali. Di seguito verranno descritti, attraverso i relativi dettagli costruttivi, i collegamenti in corrispondenza di timpani, pareti portanti interne

e sporti di gronda, situazioni riassunte schematicamente in Figura 4.

### 3.4 Timpani

Nel realizzare il cordolo in muratura armata alla sommità di un timpano murario (Figura 4, caso B) si riscontra il problema di come rimontare la cimasa muraria. La tessitura muraria dovrebbe infatti essere realizzata con giunti di malta orizzontali e verticali, sia per ragioni estetiche, nell’eventualità che i paramenti vengano mantenuti a faccia vista, sia per ragioni di tipo conservativo, che prevedono il ripristino del tessuto murario secondo la regola costruttiva originaria. Tuttavia, se la tessitura muraria fosse realizzata con giunti orizzontali, non sarebbe possibile posizionare la rete secondo il piano inclinato definito dal profilo scalettato della muratura a mattoni. In questi casi si è quindi deciso di minimizzare la porzione muraria con giacitura inclinata alla sola porzione in cui debbano essere posizionate le reti (Figura 5).

Eventuali esigenze estetiche potrebbero essere risolte prevedendo un “rivestimento” esterno di 15 cm a faccia vista, a giacitura orizzontale. In questo caso la rete andrebbe mantenuta 15 cm più all’interno.

Le travi principali della copertura vengono inserite all’interno del cordolo, disposte sopra una tavola di appoggio in legno di 2 cm di spessore.

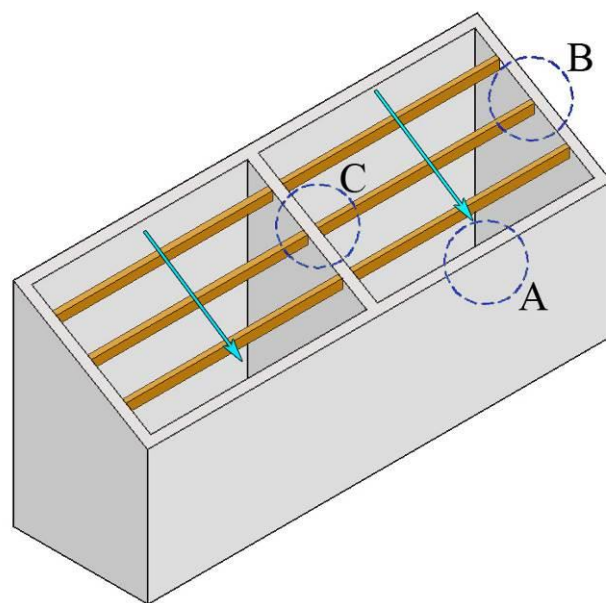


Figura 4. Rappresentazione tridimensionale dei casi descritti. A: Sporto di gronda; B: Timpano; C: Parete interna.

Una seconda tavola, disposta al disopra della trave principale, protegge la trave stessa dalla posa in opera degli strati superiori di mattoni di completamento del cordolo. È necessario lasciare intorno alle teste delle travi, protette con carta catramata, uno spazio libero di areazione di circa 3 cm.

Vengono disposti due strati di rete in GFRP: uno subito sotto le travi principali; l'altro alla quota del tavolato (Figura 6).

Per realizzare il collegamento trave-cordolo-muratura sottostante vengono impiegati due connettori metallici di 16 mm di diametro che attraversano ciascuna trave lignea. I connettori sono fissati alla lamina in pultruso con dado e rosetta e i perfori vengono, in questo caso, riempiti con resina epossidica.

Come accennato, il collegamento tra il cordolo e la copertura viene assicurato, impiegando dei nastri forati in acciaio. I nastri forati, di spessore 1,5 mm e larghezza 50 mm, sono disposti incrociati con un interasse di 1.5 m e vengono fissati al tavolato e alla rete.

### 3.5 Parete interna

Nei casi in cui l'orditura di due solai adiacenti è tale da dover inserire le travi principali all'interno di un cordolo realizzato su una parete interna, (Figura 4, caso C) la soluzione proposta è simile a quella illustrata nel caso del timpano.

In questo caso, tuttavia, il cordolo è armato con tre strati di rete: uno strato sotto le travi principali e gli altri due sopra di esse.

Il collegamento tra il cordolo e la copertura è realizzato attraverso dei nastri forati in acciaio, disposti sopra al tavolato e prolungati al disopra del cordolo.

Le travi principali sono disposte su una tavola lignea di 2,5 cm di spessore e sono protette superiormente da un'altra tavola, e in testa con carta catramata (Figura 7). Il collegamento con la muratura sottostante è realizzato attraverso quattro connettori metallici di diametro 16 mm, due per ciascuna trave. I fori dei connettori vengono sigillati con resina epossidica. In corrispondenza dell'incrocio tra le pareti, le lamine in pultruso vengono sovrapposte e viene impiegato un doppio connettore (Figura 8).

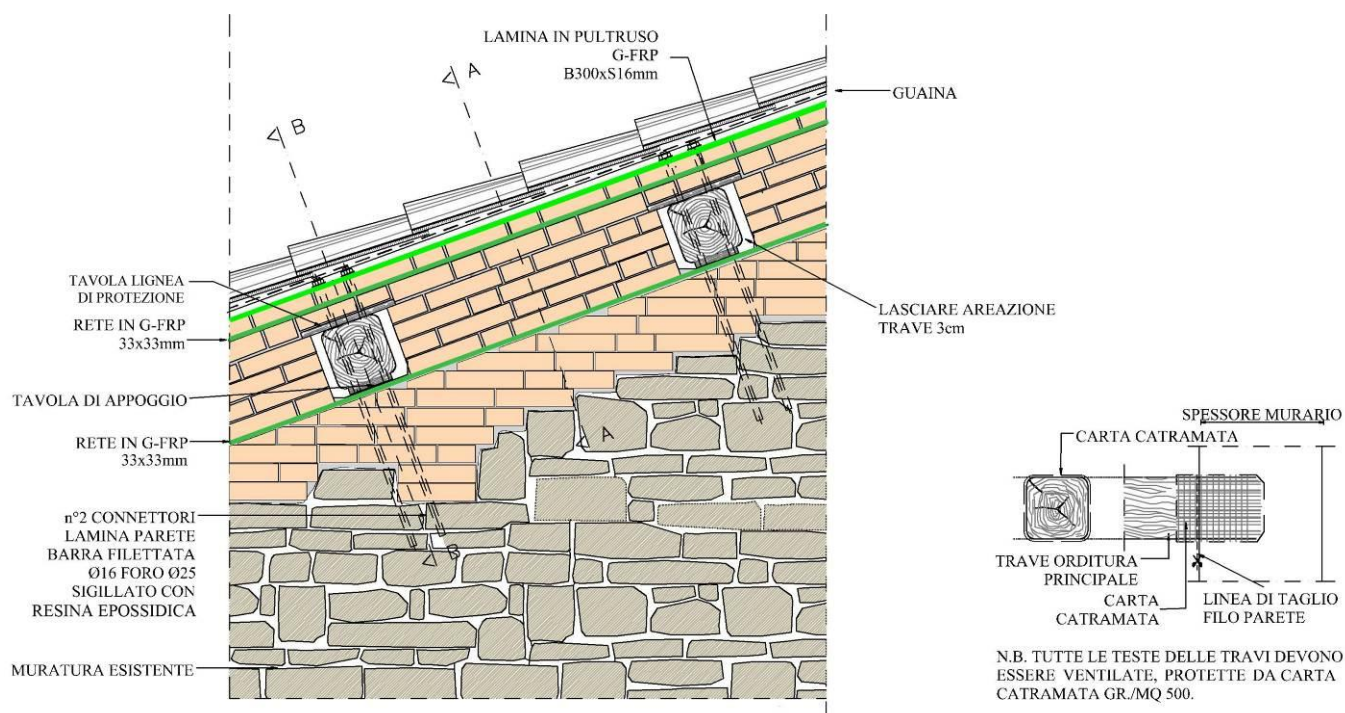


Figura 5. Vista in sezione del timpano. La sezione è effettuata secondo il piano C-C indicato in Figura 6.

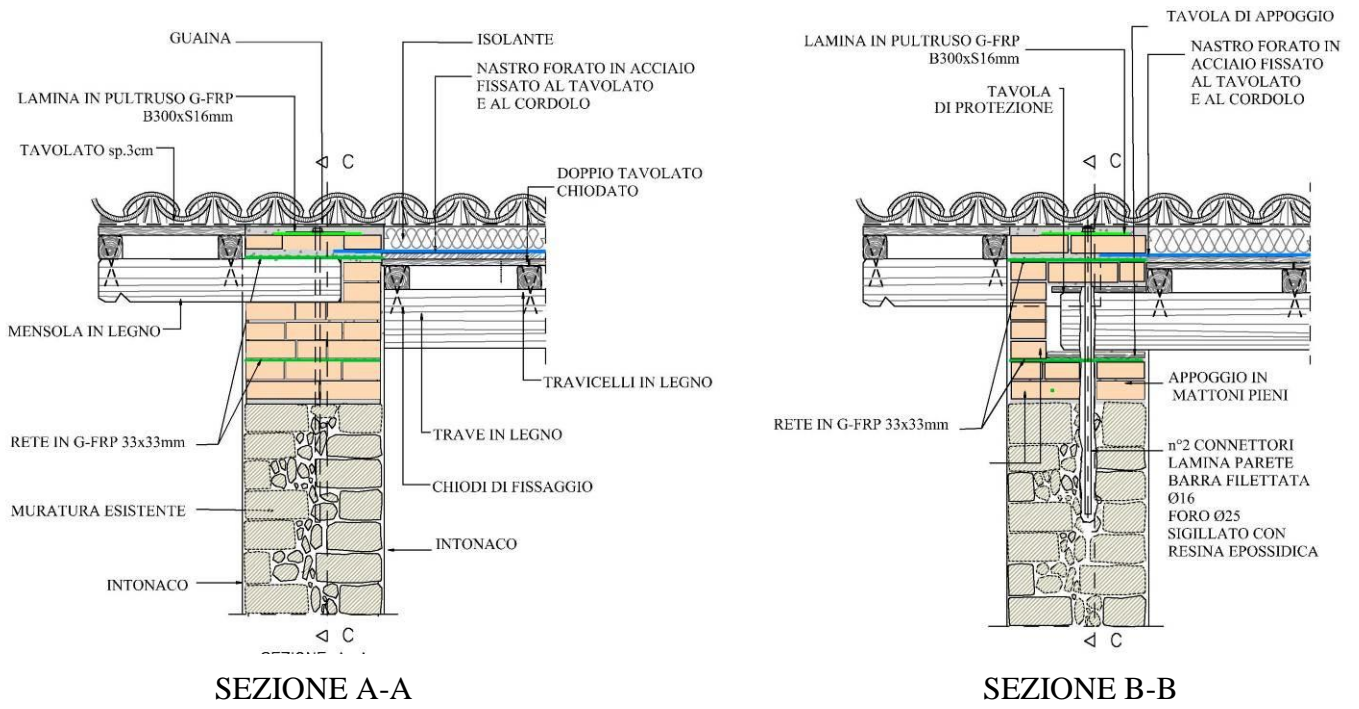


Figura 6. Particolari costruttivi del timpano. I piani di sezione A-A e B-B sono indicati in Figura 5.

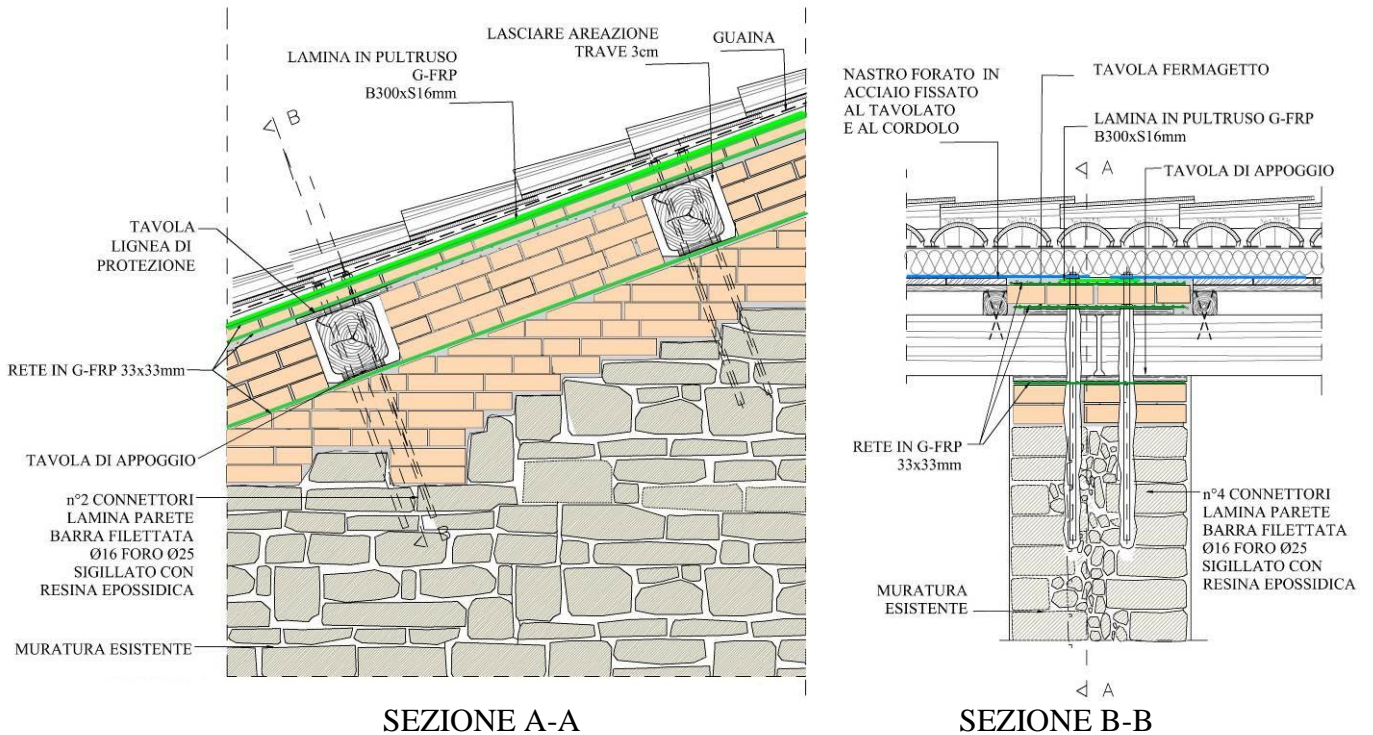


Figura 7. Particolari costruttivi del cordolo in corrispondenza di una parete interna su cui si inseriscono le travi principali di due solai adiacenti.

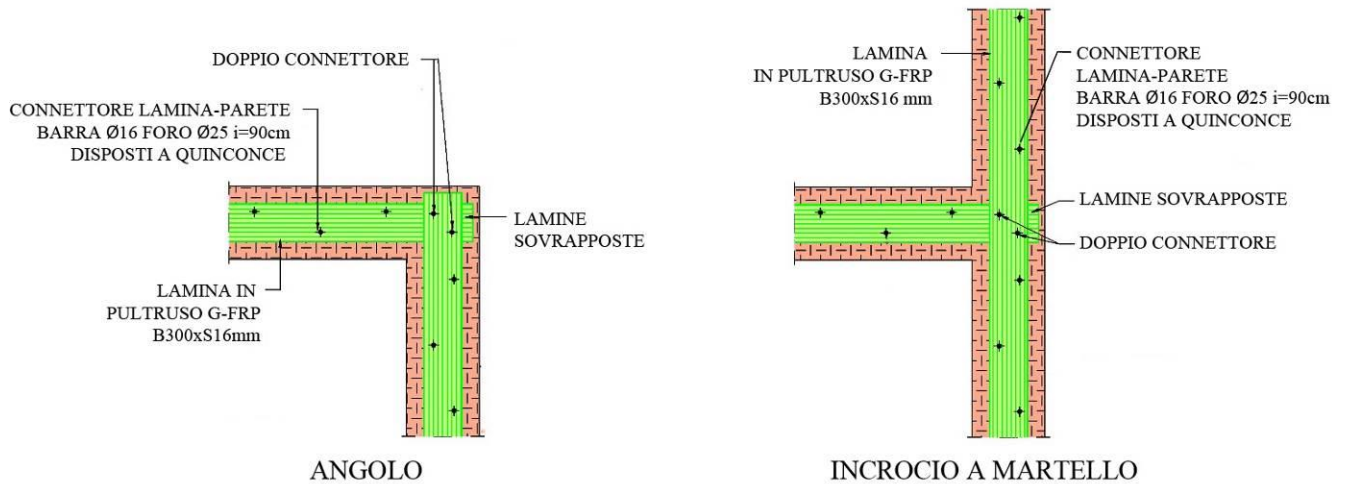


Figura 8. Disposizione delle lamine e dei perfori armati in corrispondenza dell'angolo murario e di un incrocio interno a martello.

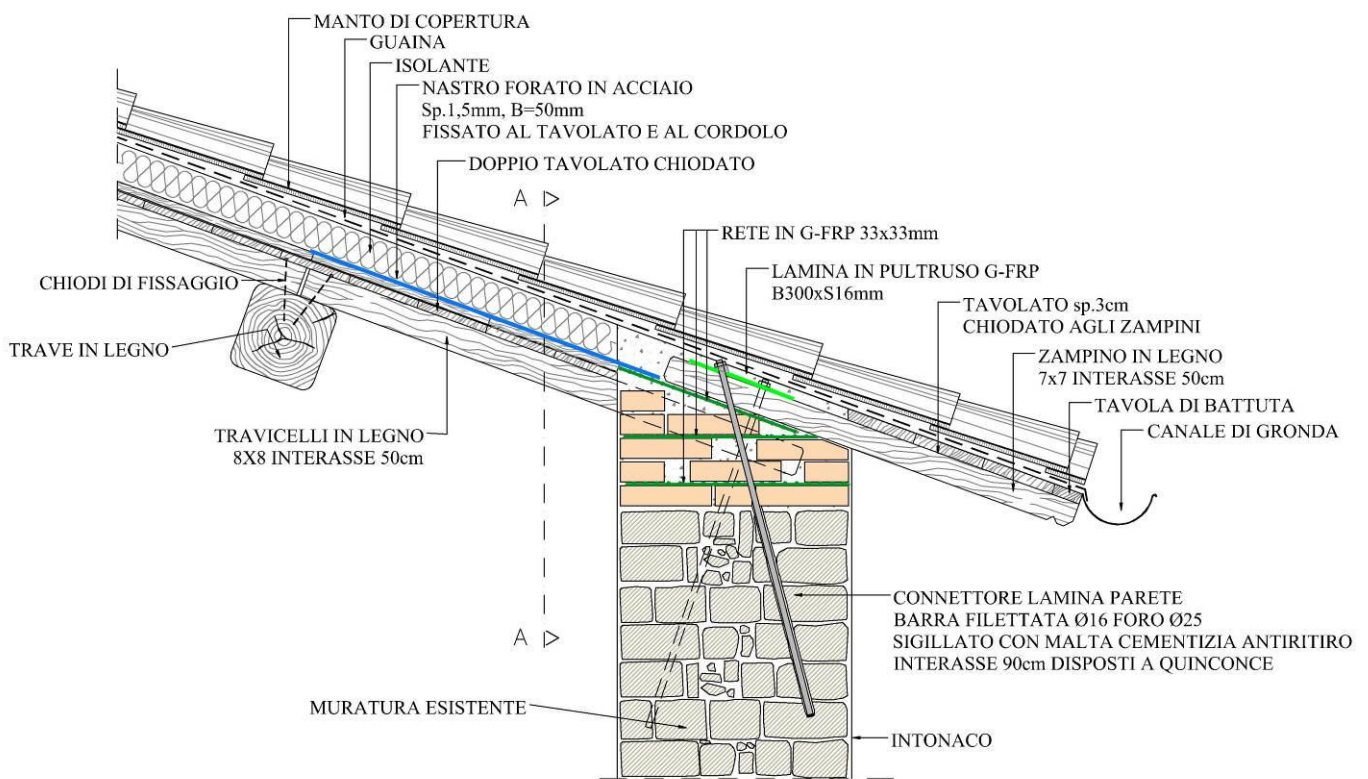


Figura 9. Particolare del cordolo in corrispondenza dello sporto di gronda.

### 3.6 Sporto di gronda

Nel caso dello sporto di gronda (Figura 4, caso A) vengono disposti tre strati di rete: il primo alla base del cordolo, il secondo in posizione intermedia e il terzo alla quota del tavolato della copertura (figure 9 e 10).

Il terzo strato di rete è fissato al tavolato attraverso nastri forati in acciaio che si inseriscono nel cordolo. L'efficacia del collegamento tra il cordolo e la muratura sottostante è garantita da perfori armati di diametro 16 mm, disposti a quinconce con

andamento inclinato e con interasse di circa 90 cm. I connettori sono collegati alla lamina in pultruso attraverso dado e rosetta, e il foro, di 25 mm di diametro, è riempito di malta cementizia antiritiro. La lamina in pultruso ed i relativi perfori costituiscono così anche un efficace ancoraggio per gli zampini.



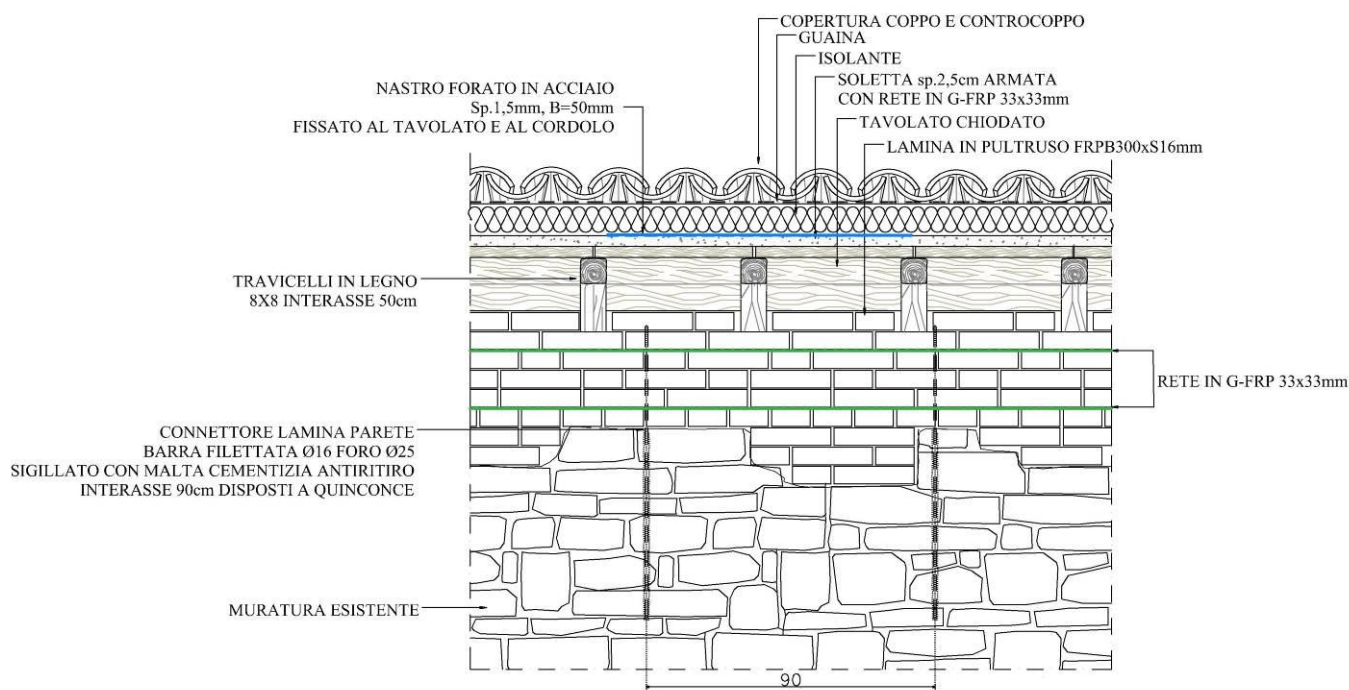


Figura 10. Sezione del cordolo in corrispondenza dello sporto di gronda. La sezione è effettuata secondo il piano A-A- indicato in Figura 9.

#### 4 CONCLUSIONI

La tecnica qui descritta per la realizzazione di cordoli sommitali in muratura armata con reti in GFRP e lamine in pultruso può essere adattata ai diversi casi che si presentano nella realtà degli edifici esistenti. In questo senso sono stati descritti i dettagli costruttivi in corrispondenza di punti particolari delle costruzioni murarie come timpani, pareti portanti interne e sporti di gronda.

L'impiego delle reti in GFRP consente di evitare le problematiche conservative legate all'uso dell'acciaio, laddove sia necessario utilizzare malte a base di calce.

L'impiego dei pultrusi, leggeri e facilmente lavorabili, consente di semplificare e velocizzare le operazioni di posa e realizzazione del cordolo, e ne permette la realizzazione anche in ambienti particolarmente aggressivi, dove l'uso di elementi in acciaio porterebbe al rapido sviluppo di fenomeni corrosivi.

#### BIBLIOGRAFIA

Borri, A., De Maria, A., 2004. Alcune considerazioni in materia di analisi e di interventi sugli edifici in muratura in zona sismica. *Atti del XI Congresso Nazionale "L'ingegneria Sismica in Italia"*, Genova, 25-29 gennaio.

Borri, A., Castori, G., Grazini, A., 2009. Retrofitting of masonry building with reinforced masonry ring-beam.

*Construction and Building Materials* 23 (2009), pp. 1892–1901. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2008.09.012G.

Borri, A., Sisti, R., Corradi, M., Giannantoni, A., 2016. Cordoli in muratura in pietrame faccia a vista. *Structural* 202,10.12917/Stru202.05.

Borri A., Castori G., Sisti, R., Corradi, Vetturini, R., Di Marco, G., 2016. Rinforzo di volte in folio mediante la tecnica tabicada armata: applicazione in un palazzo storico a L'Aquila. *Structural*, paper 09, DOI 10.12917/Stru204.09.

Gattesco, N., Boem, I., 2019. Review of experimental tests and numerical study on masonry vaults reinforced through fiber-reinforced mortar coating. *Bulletin of Earthquake Engineering*, <https://doi.org/10.1007/s10518-019-00619-y>

Sisti, R., Corradi, M., Borri, A., 2016. An experimental study on the influence of composite materials used to reinforce masonry ring beams. *Construction and Building Materials* 122 (2016), pp. 231–241.

Sisti, R., Di Ludovico, M., Borri, A., Prota, A., 2018. Damage assessment and the effectiveness of prevention: the response of ordinary unreinforced masonry buildings in Norcia during the Central Italy 2016–2017 seismic sequence. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2018, <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0448-z>.