

STRUTTURE LIGNEE – IL CONTROLLO E LA MANUTENZIONE

Stato di fatto di una copertura in legno e gli interventi attuati successivamente per il suo recupero

Vincenzo Giannetto – Ingegnere – Direttore Tecnico - IndaginiStrutturalisrl

Giorgia Campori – Ingegnere - IndaginiStrutturalisrl

Marika Volpe – Ingegnere – IndaginiStrutturalisrl

È sempre centrale il tema che riguarda il controllo e la manutenzione delle strutture in legno e, nella fattispecie, quello delle coperture, in quanto il loro comportamento globale è subordinato al corretto funzionamento di diversi elementi resistenti. A tal proposito, assume particolare rilevanza l'ispezione delle connessioni che esistono tra i diversi elementi che le costituiscono, sia nei riguardi della loro corretta realizzazione, che dello stato di salute vero e proprio del materiale. Pertanto, in considerazione della larga diffusione di questa tipologia di strutture in tutto il territorio nazionale, e delle problematiche che storicamente si sono riscontrate durante le fasi d'esercizio delle stesse, la presente esposizione ha l'obiettivo d'illustrare lo studio di IndaginiStrutturalisrl sullo stato di fatto di una copertura in legno e gli interventi attuati successivamente per il recupero della medesima.



PREMESSA

In Italia, le strutture in legno sono largamente diffuse, poiché offrono numerosi vantaggi, tra cui:

- **Estetica:** il legno conferisce un aspetto naturale e caldo agli ambienti e nella maggior parte dei casi, si sposa bene con l'architettura degli edifici.
- **Sostenibilità:** il legno è una risorsa rinnovabile e, di conseguenza, scegliere di utilizzarlo come materiale da costruzione costituisce, a tutti gli effetti, una scelta ecologica.
- **Isolamento termico:** il legno costituisce un ottimo isolante termico grazie alla sua bassa conducibilità termica, la quale permette di garantire ottimi livelli di comfort termico sia nella stagione estiva che in quella invernale.
- **Resistenza:** con adeguati trattamenti e livelli di manutenzione, il legno garantisce ottime prestazioni da un punto di vista meccanico nel tempo.

Di contro, occorre fare molta attenzione al deterioramento che il legno subisce a seguito dell'esposizione agli agenti atmosferici; infatti, col passare del tempo se non adeguatamente protetto, il legno può anche marcire. Inoltre, è altamente suscettibile agli attacchi ad opera di insetti o all'infestazione da parte di funghi; tutti fenomeni che, se non opportunamente arrestati, possono condurre ad importanti riduzioni delle sezioni resistenti dei singoli elementi e, nel complesso, ad una drastica diminuzione della capacità portante della struttura ai carichi agenti.

CONSIDERAZIONI SULLO STATO DI FATTO DELLA COPERTURA

Nella procedura di valutazione della sicurezza delle strutture esistenti risulta estremamente importante una loro conoscenza dettagliata. A tale scopo, è buona norma effettuare un'attenta ricerca della documentazione riguardante la struttura, con l'obiettivo di comprendere quello che è il progetto originario e le eventuali modifiche accorse nel tempo. Sulla base della documentazione acquisita, vengono pianificate ispezioni visive e campagne di rilievo geometrico.

In particolare, quando non si ha a disposizione alcun progetto, **IndaginiStrutturaliSrl** prevede una serie di campagne di indagini visive, ad opera di un Tecnologo, volte all'identificazione della specie legnosa ed al controllo dello stato di conservazione degli elementi lignei, accompagnata da una campagna di rilievo allo scopo di conoscere l'esatta geometria dei vari elementi che costituiscono la struttura ed il loro comportamento globale da un punto di vista statico.

RILIEVO GEOMETRICO

Prendiamo in considerazione, ad esempio, una copertura costituita da una struttura a capriate di tipologia varia, a causa di probabili interventi postumi; in particolare, nel caso preso ad esempio, si sono individuate ben cinque tipologie diverse.

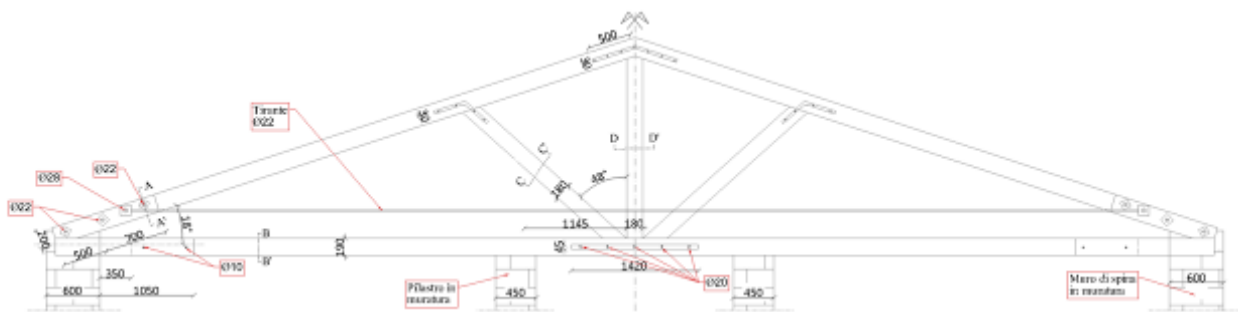


Fig.1 – Capriata Tipologia 1.

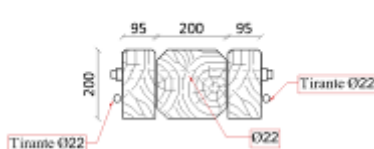


Fig.1(a) – Sezione A – A'.

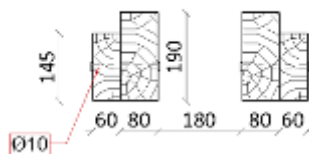


Fig.1(b) – Sezione B – B'.



Fig.1(c) – Sezione C – C'.

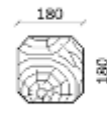


Fig.1(d) – Sezione D – D'.

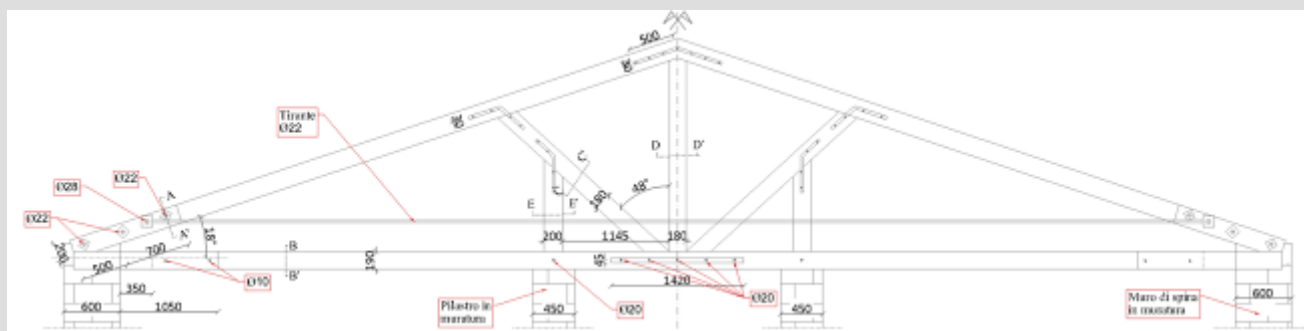


Fig.2 – Capriata Tipologia 2.

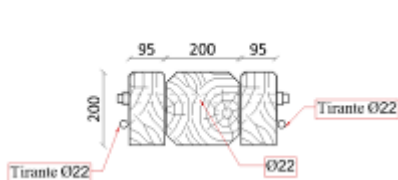


Fig.2(a) – Sezione A - A'.

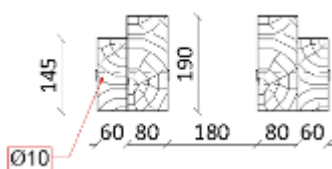
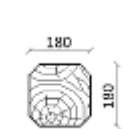
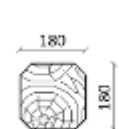


Fig.2(b) – Sezione B - B'.



**Fig.3(c) –
Sezione C - C'.**



**Fig.3(d) –
Sezione D - D'.**



**Fig.3(e) –
Sezione E - E'.**

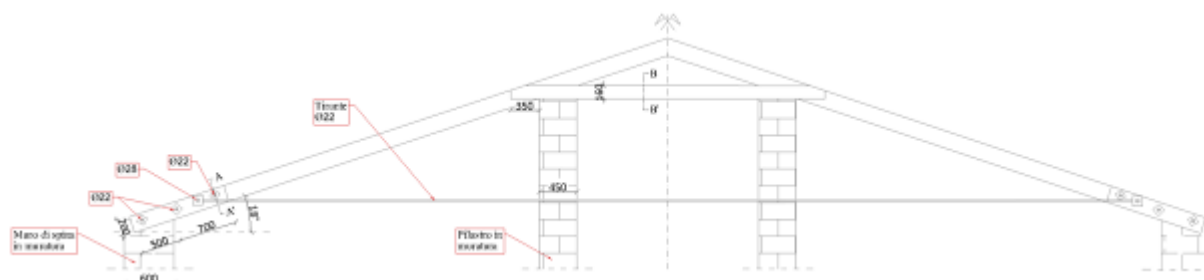


Fig.3 – Capriata Tipologia 3.

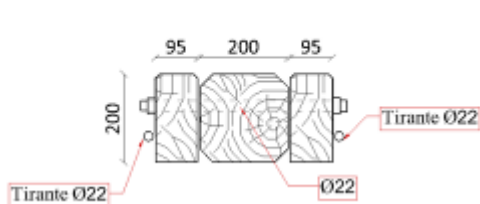


Fig.3(a) – Sezione A - A'.



Fig.3(b) – Sezione B - B'.



Fig.3(c) – Sezione C - C'.

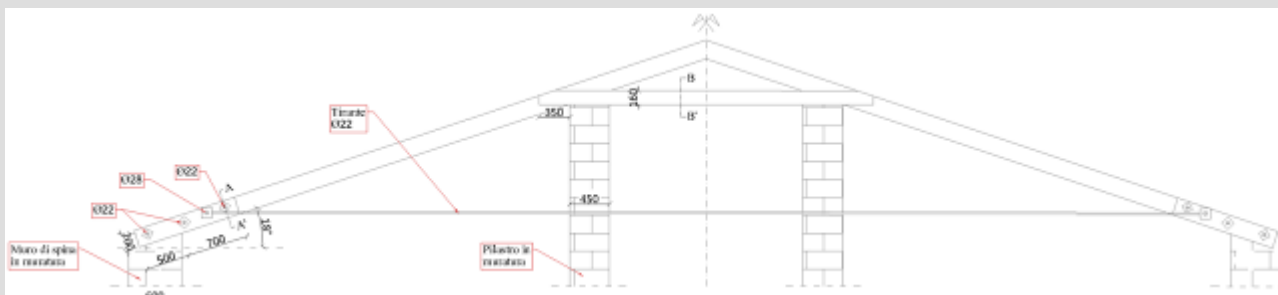


Fig.4 – Capriata Tipologia 4.

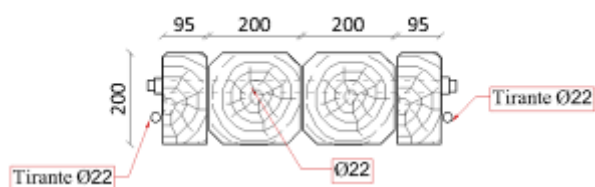


Fig.4(a) – Sezione A - A'.



Fig.4(b) – Sezione B - B'.

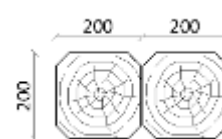


Fig.4(c) – Sezione C - C'.

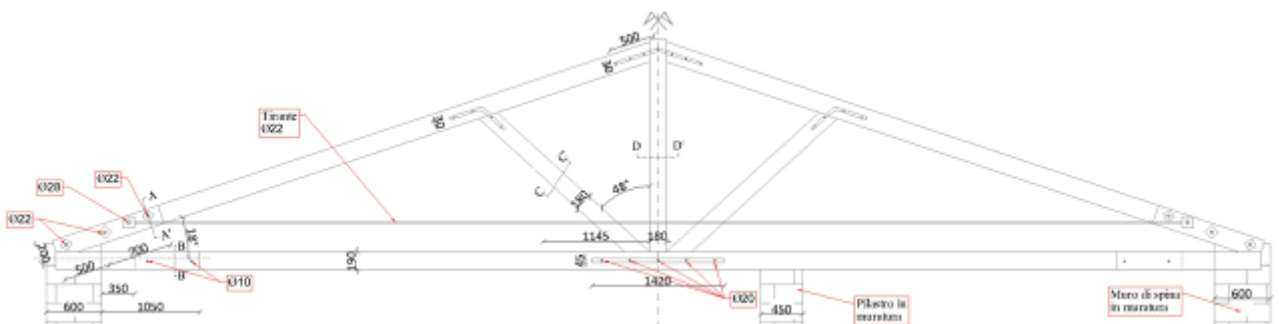


Fig.5 – Capriata Tipologia 5.

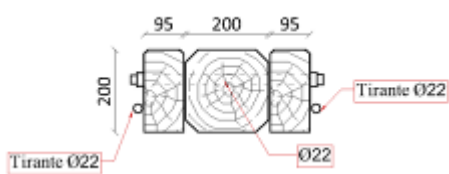


Fig.5(a) – Sezione A - A'.

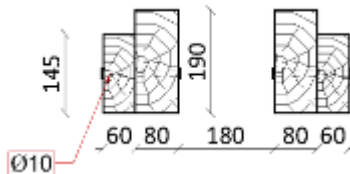


Fig.5(b) – Sezione B - B'.

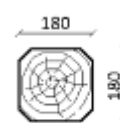


Fig.5(c) –
Sezione C - C'.



Fig.5(d) – Sezione D
- D'.

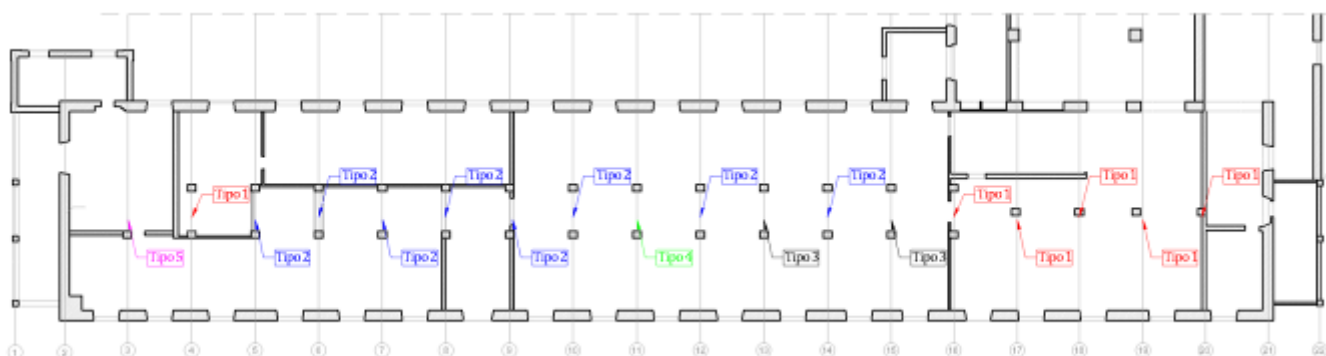


Fig.6 – Planimetria con tipologia di capriate.

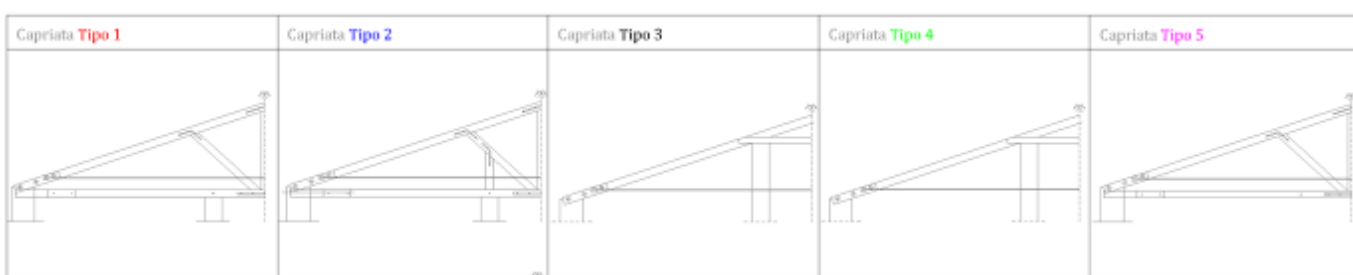


Fig.6(a) – Classificazione capriate.

Trasversalmente alle capriate si sviluppano gli arcarecci; il collegamento di questi ultimi con la capriata è realizzato mediante gattelli in legno, i quali vincolano gli arcarecci a spostarsi solamente in direzione longitudinale al proprio asse **Fig.7(b) e (c)**.

Durante la fase di rilievo è possibile che vengano riscontrate diverse tipologie di sezioni per questa categoria di elementi; nel nostro caso sono tre e vengono di seguito riportate in **Fig.7(a)**. Inoltre, ci sono due diverse disposizioni per gli arcarecci lungo le capriate che costituiscono l'intera copertura; in particolare:

1. La prima disposizione (D1), prevede un numero totale di arcarecci pari a tredici, di cui sei disposti su ogni puntone diagonale ed uno posto in corrispondenza del punto di colmo della capriata.
2. La seconda disposizione (D2), invece, prevede un numero totale di arcarecci pari a quattordici, sette per ogni puntone diagonale; pertanto, nessun arcareccio occupa la posizione in corrispondenza del punto di colmo.

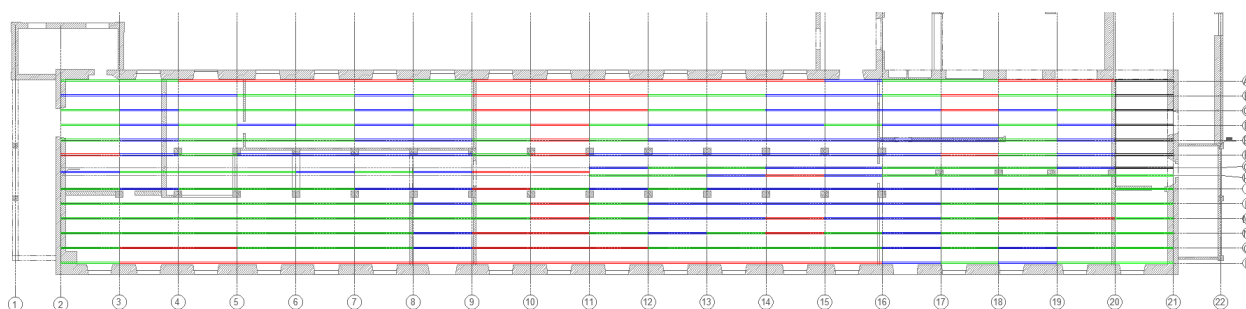
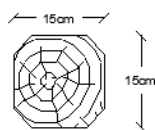


Fig.7 – Planimetria con tipologia di arcarecci.

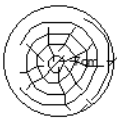
Arcareccio tipo 1

Geometria irregolare:
Sezione quadrata con angoli arrotondati
BxH : 15x15 cm



Arcareccio tipo 2

Geometria regolare:
Sezione circolare
D: 14 cm



Arcareccio tipo 3

Geometria regolare:
Sezione rettangolare
BxH = 15x12 cm

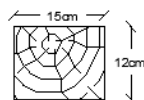


Fig.7(a) – Tipologia arcarecci.

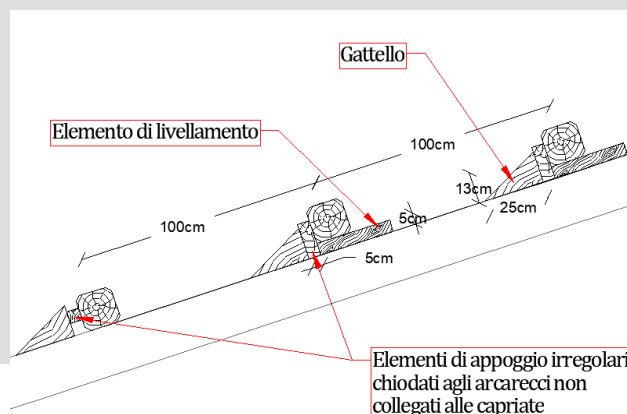


Fig.7(b) – Collegamento arcarecci – capriata.

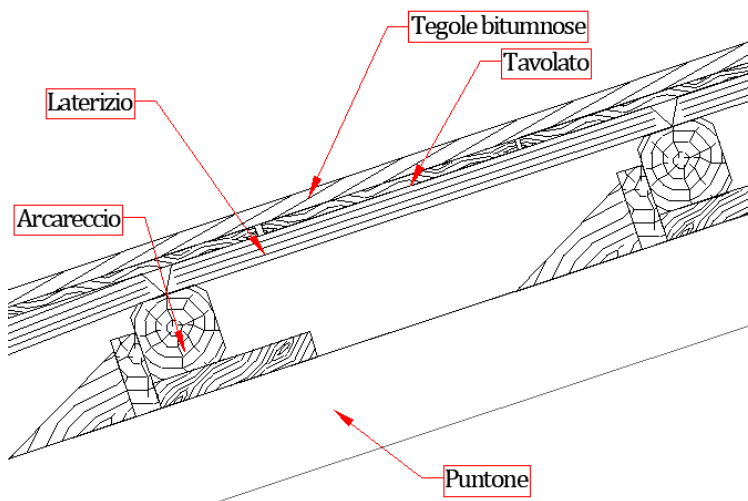


Fig.7(c) – Dettaglio del collegamento arcarecci – capriata.

ISPEZIONE, DIAGNOSI E VALUTAZIONE TECNOLOGICA DELLE STRUTTURE LIGNEE

Lo scopo finale di un'ispezione, diagnosi e valutazione tecnologica di strutture lignee è quella di analizzare lo stato "attuale" del legno, il quale sarà da considerare idoneo qualora non venga riscontrato alcun segno di ammaloramento causato ad esempio dall'attacco di funghi o insetti di qualsivoglia genere. Questo fatto sussiste perché il legno da costruzione non vede peggiorare le sue prestazioni solo col passare del tempo; infatti, al legno in opera si attribuiscono le medesime prestazioni che ha un legno appena realizzato a meno che non si registrino particolari segni di degradamento biologico, meccanico o qualsiasi altro fenomeno che ne possa alterare il corretto comportamento da un punto di vista meccanico.

L'ispezione della copertura oggetto di studio viene effettuata principalmente per l'individuazione della specie legnosa sia delle capriate che degli arcarecci, per valutare lo stato di salute di tutti gli elementi lignei per le ragioni già menzionate e, non meno importante, per verificare lo stato delle testate di ciascuna delle capriate ispezionabili nonché dei vari meccanismi di connessione presenti tra i diversi elementi che le costituiscono.

Dal punto di vista della caratterizzazione del materiale, a seguito dell'ispezione effettuata da un Tecnologo, in una copertura potranno emergere diverse combinazioni di specie, come ad esempio:

- i puntone, il monaco ed i saettoni in legno di castagno (ad es. **Castagno III Categoria in opera**" secondo la UNI11119, oppure equivalentemente "**Castagno/Italia S/D24**" secondo la UNI 11035-2);
- le due "false catene", probabilmente installate in un secondo momento, in legno di abete (**Abete bianco III Categoria in opera**" secondo la UNI11119, oppure equivalentemente "**Castagno/Italia S3/C18**" secondo la UNI 11035-2.
- gli arcarecci ed i travetti per la quasi totalità in legno di castagno (ad es. **Castagno III Categoria in opera**" secondo la UNI11119, oppure equivalentemente "**Castagno/Italia S/D24**" secondo la UNI 11035-2).

Per quel che concerne, invece, la verifica sullo stato di salute degli arcarecci, per semplicità i risultati vengono tradotti in forma grafica; nello specifico, si stabilisce una corrispondenza tra colore e stato di conservazione dell'elemento ligneo:

- **TRATTEGGIO "VERDE"**: indica una situazione in cui gli elementi lignei sono ispezionabili e risultano in buone condizioni di conservazione; pertanto, non sono segnalate particolari criticità di cui tener conto in fase di verifica.
- **TRATTEGGIO "GIALLO"**: indica una situazione in cui gli elementi lignei sono ispezionabili; tale categoria di elementi presenta dei problemi a carico per i quali debbono essere previste misure specifiche seppur non attuate con estrema urgenza dato il basso livello di rischio associato alla problematica riscontrata.
- **TRATTEGGIO "ROSSO"**: indica una situazione in cui gli elementi lignei sono ispezionabili; tale categoria di elementi presenta dei gravi problemi a carico per i quali debbono essere attuate misure di emergenza.

Di seguito, si riporta una planimetria con gli elementi ed il livello di rischio associato.

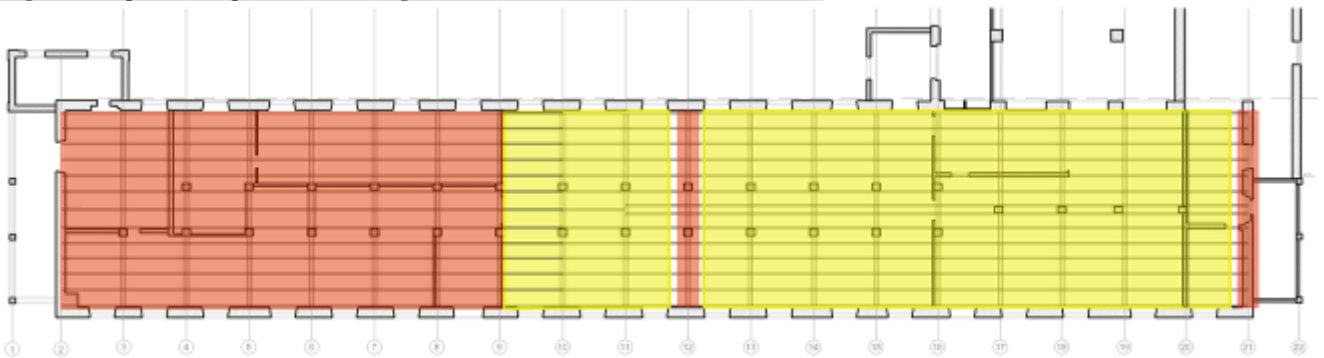


Fig.6 – Pianta dei difetti.

In generale, sia le capriate che gli arcarecci, possono presentare gradi di ammaloramento importanti a causa dall'azione degli insetti Xilofagi Cerambici e dei funghi delle carie del legno favorita con ogni probabilità dalla percolazione d'acqua dal tetto; per le prime i segni più evidenti si registrano in corrispondenza delle sezioni d'appoggio sulla muratura, mentre i secondi, invece, possono essere in evidente "sofferenza" a causa delle sezioni fortemente erose dai fenomeni aggressivi.

Per semplicità, nel proseguo, si riportano schematicamente gli interventi che possono essere previsti a seguito di una prima ispezione effettuata.

Per tutte le strutture lignee:

- Un trattamento generalizzato con adeguato prodotto insetticida a base di permetrina su tutte le superfici lignee.

Per gli arcarecci

- Una verifica statica nei riguardi delle diverse sezioni tipologiche, effettuata considerando le effettive sezioni resistenti, cioè quelle misurate a valle della pulitura di tutte le strutture lignee e della rimozione delle parti ammalorate mediante spazzolatura e aspirazione dei depositi e delle marcescenze.

Per le capriate

- La ricostruzione delle testate attraverso l'utilizzo di lamelle incollate in opera mediante resina epossidica, rese solidali all'elemento esistente con l'ausilio di lamine in compensato.
- La ricostruzione di nuovi appoggi alle murature per tutte le unità lignee principali attraverso l'utilizzo di mensole lignee – metalliche solidarizzate ai puntoni esistenti mediante opportune staffe di cinturazione o coppie di perni calibrati.

VERIFICA STATICA DEGLI ARCARECCI

Lo studio di **Indagini Strutturali Srl** si concentrerà sulla valutazione della sicurezza offerta dagli arcarecci in virtù della situazione riscontrata durante la fase d'ispezione, ampiamente descritta nei Paragrafi precedenti.

La valutazione della sicurezza deve essere svolta secondo il metodo degli stati limite. I requisiti di resistenza, rigidità, funzionalità, durabilità e robustezza si garantiscono verificando gli stati limite ultimi e gli stati limite d'esercizio della struttura, dei singoli componenti strutturali e dei collegamenti (§4.4.1. delle NTC2018).

La durata del carico e l'umidità del legno influiscono sulle sue proprietà. I valori di progetto per le proprietà del materiale, a partire dai valori caratteristici, si assegnano con riferimento combinato alla classe di servizio e alle classi di durata del carico (§4.4.6. delle NTC2018).

Il sistema delle classi di servizio ha lo scopo di definire la dipendenza delle resistenze di progetto e dei moduli elastici del legno e materiali da esso derivati dalle condizioni ambientali (§4.4.5. delle NTC2018).

Di seguito si riportano brevemente alcune caratteristiche generali fondamentali ai fini dell'analisi.

<i>Caratteristiche generali</i>	
Materiale	Legno Massiccio
Classe di resistenza (Gruppo EN338/ EN 11035)	D24
Classe di servizio	1
γ_M	1,5

Tabella 1. Caratteristiche legno in opera.

<i>Parametri di Rigidezza del materiale</i>			
Modulo elastico parallelo medio	$E_{0,mean}$	12500	[MPa]
Modulo elastico ortogonale medio	$E_{90,mean}$	830	[MPa]
Modulo elastico parallelo caratteristico	$E_{0,05}$	10500	[MPa]
Modulo elastico tangenziale medio	G_{mean}	780	[MPa]
Modulo elastico tangenziale caratteristico	$G_{0,05}$	655,20	[MPa]

Tabella 2. Proprietà meccaniche del materiale.

Il valore di progetto X_d di una proprietà del materiale (o della resistenza di un collegamento) viene calcolato mediante la relazione (§4.4.6. delle NTC2018):

$$X_d = \frac{k_{mod} \cdot X_k}{\gamma_M}$$

Se una combinazione di carico comprende azioni appartenenti a differenti classi di durata del carico si dovrà scegliere un valore di k_{mod} che corrisponde all'azione di minor durata (§4.4.6. delle NTC2018).

Al termine delle operazioni di pulitura effettuate sul legno, si procede al rilievo delle sezioni effettive degli arcarecci, cioè quelle depurate dalle porzioni ammalorate; in particolare, un dato rilievo può portare all'individuazione delle sezioni riportate nella Tabella 3.

<i>ARCARECCI</i>	
Sezione	Peso Proprio[kN/m]
(14x13) cm	0,106
(13x13) cm	0,098
(12x12) cm	0,084
(12x13) cm	0,094
(14x12) cm	0,097

Tabella 3. Sezioni tipologiche degli arcarecci.

Grazie al rilievo geometrico, è possibile valutare lo spessore dei vari elementi che compongono il solaio di copertura e, di conseguenza, calcolare il peso di quest'ultimo al m². Successivamente, considerando l'area di influenza del solaio sul singolo arcareccio, si potrà valutare il carico che, a metro lineare, graverà su ciascuno di essi.

Ai fini del calcolo, verranno considerate le due diverse disposizioni già menzionate e le corrispettive aree di influenza del solaio sui diversi elementi in legno, oggetto delle verifiche.

<i>Analisi dei carichi - 1m² di solaio</i>	
Tavolato	
Tavelle	
Impermeabilizzazione	
TOTALE	0,59 kN/m²

Tabella 4. Analisi dei carichi solai.

Oltre ai carichi permanenti non strutturali, occorre valutare l'entità dei carichi variabili quali neve, vento e i sovraccarichi derivanti dalla categoria d'uso dell'edificio; a tal proposito, si considera un sovraccarico variabile, associato alle coperture accessibili per sola manutenzione, di $q_k=0,5 \text{ kN/m}^2$.

Per il calcolo del carico neve si fa riferimento al Capitolo §3.4. delle NTC2018. Di seguito, si riportano i valori dei parametri necessari al calcolo del carico neve, relativi alla copertura oggetto di studio.

<i>Carichi Variabili: Carico Neve</i>			
Coefficiente di Forma	μ_i	0,8	
Coefficiente di Esposizione	C_E	1,1	
Coefficiente Termico	C_t	1	
Valore caratteristico della neve al suolo	q_{sk}	0,6	kN/m ²

Tabella 5. Carico neve.

Essendo una copertura a doppia falda, gli schemi di carico adottati sono stati schematicamente riportati nell'immagine di Fig.7 (§3.4.3.3. delle NTC2018).

Si riportano, di seguito, i valori dei parametri necessari al calcolo del carico neve, relativamente alla copertura oggetto di studio.

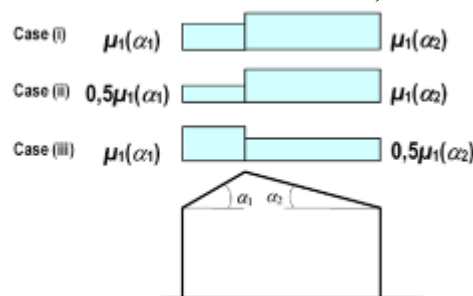


Fig.7 – Schemi di carico.

Invece, ai fini del calcolo del carico dovuto all'azione del vento, si è fatto riferimento al Paragrafo §3.3.4. delle NTC2018.

<i>Carichi Variabili: Carico Vento</i>			
Velocità di riferimento del vento	V_r	27	m/s
Pressione cinetica di riferimento	q_r	0,46	kN/m ²
Altezza di gronda	Z_{gronda}	4,7	m
Altezza del tetto	Z_{tetto}	6,5	m
	K_r	0,2	
Categoria di Esposizione III	Z_0	0,1	m
	Z_{min}	5	m
Coefficiente di Esposizione	$c_e(Z_{gronda})$	2,96	m
	$c_e(Z_{tetto})$	3,20	
Coefficiente Dinamico	c_d	1	

Fig.8 – Carico vento..

La valutazione della sicurezza delle strutture deve essere effettuata sia durante la fase di esercizio della stessa, allo scopo di verificare che le deformazioni indotte dai carichi applicati e dalle variazioni di umidità siano contenute entro limiti accettabili tali da garantire la funzionalità dell'opera ed allo stesso tempo determinati requisiti estetici, sia allo stato limite ultimo cioè considerando le varie azioni, sia permanenti che variabili, amplificate dei relativi coefficienti previsti dall'NTC2018, allo scopo di verificare l'idoneità, in termini di resistenza e rigidezza degli elementi.

Noti tutti i carichi agenti, si procede con il calcolo delle combinazioni secondo il Paragrafo §2.5.3 delle NTC2018. Attraverso la Tab. 2.5.I (§2.5.1 delle NTC2018) si individuano, in funzione della categoria di azione variabile considerata, il relativo coefficiente da adottare nelle diverse combinazioni.

Per semplicità, lo schema statico adottato è quello di trave doppiamente appoggiata. Ciascun arcareccio, infatti, "poggia" sulle due capriate adiacenti ad esso ed ha una lunghezza pari a 3,82 m, la quale coincide proprio con l'interasse che esiste tra una capriata e l'altra.

Definito lo schema statico ed il carico agente tramite le combinazioni di carico, è possibile venire a conoscenza dello stato di sollecitazione (Compressione N, Trazione T, Momento Flettente M) agente sul singolo arcareccio e, di conseguenza, procedere con le verifiche previste in accordo con quanto prescritto nelle NTC2018 ai Paragrafi §4.4.7. e §4.4.8.

Considerando il particolare comportamento reologico del legno e dei materiali derivati dal legno, si devono valutare sia la deformazione istantanea che quella a lungo termine (§4.4.7. delle NTC2018).

La deformazione istantanea si calcola usando i valori medi dei moduli elastici, mentre per quel che riguarda il calcolo di quella a lungo termine, i valori utilizzati sono gli stessi ma ridotti opportunamente del fattore $\frac{1}{1+K_{def}}$.

Il coefficiente K_{def} tiene conto dell'aumento di deformabilità che si registra nel tempo a causa dell'effetto prodotto dal fenomeno della viscosità, quello dell'umidità e dalla combinazione dei due; nella presente analisi, tale coefficiente è stato definito in accordo con quanto riportato nelle NTC2018 alla Tab. 4.4.V.

La Normativa, in mancanza di indicazioni precise, prescrive le seguenti limitazioni:

$$\text{Freccia istantanea: } f_i < \frac{L}{300};$$

$$\text{Freccia Finale: } f_{finale} < \frac{L}{200}$$

VERIFICA ALLO STATO LIMITE ULTIMO

A causa dell'anisotropia che caratterizza il materiale, le verifiche degli stati tensionali di trazione e compressione si devono eseguire tenendo conto dell'angolo tra la direzione della fibratura e la direzione di azione della tensione stessa.

Per la natura dei carichi considerati nella presente analisi, il singolo arcareccio è soggetto solamente alle sollecitazioni di taglio e momento flettente; lo stato di sollecitazione agente sul singolo elemento è descritto schematicamente nell'immagine di seguito riportata.

Quindi il singolo travetto è stato sottoposto alla verifica a flessione semplice e a taglio coerentemente con quanto prescritto dalle NTC2018 ai Paragrafi §4.4.8.1.6. e 4.4.8.9.

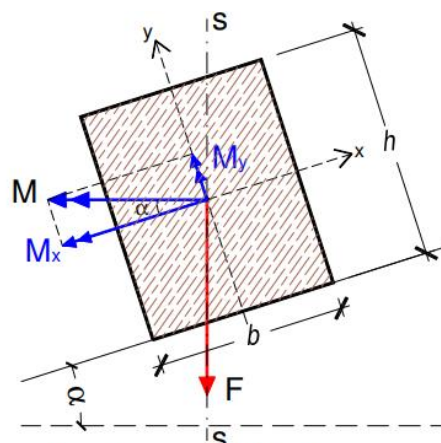


Fig.9 – Stato di sollecitazione agente sul singolo arcareccio.

Per semplicità, si riporta nelle varie tabelle, l'esito delle verifiche sia allo SLE che allo SLU per ciascuna delle sezioni rilevate dopo le operazioni di pulitura. Tali verifiche sono condotte considerando le due diverse disposizioni (D1 e D2) con le quali sono predisposti gli arcarecci lungo le capriate ed allo stesso tempo per ciascuna di esse, si analizzano le due diverse posizioni occupate dal singolo

elemento (P1, individua l'arcareccio disposto più vicino alla sezione di appoggio e P2 una qualsiasi altra posizione occupata dagli arcarecci), poiché a seconda della diversa posizione assunta, su di esso agisce un carico leggermente diverso.

DISPOSIZIONE ARCARECCI n°1 - Posizione 1				
Sezione	Verifica allo SLE		Verifica SLU	
	Freccia istantanea	Freccia finale	Flessione	Taglio
(14x13) cm	Verificato	Verificato	Verificato	Verificato
(13x13) cm	Verificato	Verificato	Verificato	Verificato
(12x12) cm	Verificato	Verificato	Verificato	Verificato
(12x13) cm	Verificato	Verificato	Verificato	Verificato
(14x12) cm	Verificato	Verificato	Verificato	Verificato

Tabella 6. Esito verifiche arcarecci D1 – P1.

DISPOSIZIONE ARCARECCI n°1 - Posizione 2				
Sezione	Verifica allo SLE		Verifica SLU	
	Freccia istantanea	Freccia finale	Flessione	Taglio
(14x13) cm	Verificato	Non Verificato	Verificato	Verificato
(13x13) cm	Verificato	Non Verificato	Verificato	Verificato
(12x12) cm	Non Verificato	Non Verificato	Verificato	Verificato
(12x13) cm	Non Verificato	Non Verificato	Verificato	Verificato
(14x12) cm	Non Verificato	Non Verificato	Verificato	Verificato

Tabella 7. Esito verifiche arcarecci D1 – P2.

DISPOSIZIONE ARCARECCI n°2 - Posizione 1				
Sezione	Verifica allo SLE		Verifica SLU	
	Freccia istantanea	Freccia finale	Flessione	Taglio
(14x13) cm	Verificato	Non Verificato	Verificato	Verificato
(13x13) cm	Verificato	Non Verificato	Verificato	Verificato
(12x12) cm	Non Verificato	Non Verificato	Verificato	Verificato
(12x13) cm	Verificato	Non Verificato	Verificato	Verificato
(14x12) cm	Non Verificato	Non Verificato	Verificato	Verificato

Tabella 8. Esito verifiche arcarecci D2 – P1.

DISPOSIZIONE ARCARECCI n°2 - Posizione 2				
Sezione	Verifica allo SLE		Verifica SLU	
	Freccia istantanea	Freccia finale	Flessione	Taglio
(14x13) cm	Verificato	Non Verificato	Verificato	Verificato
(13x13) cm	Non Verificato	Non Verificato	Verificato	Verificato
(12x12) cm	Non Verificato	Non Verificato	Verificato	Verificato
(12x13) cm	Non Verificato	Non Verificato	Verificato	Verificato
(14x12) cm	Non Verificato	Non Verificato	Verificato	Verificato

Tabella 9. Esito verifiche arcarecci D2 – P2.

INTERVENTI DI RECUPERO

In generale, attuare interventi di recupero piuttosto che nuove ricostruzioni non solo permette di conservare il valore storico e l'autenticità stessa degli edifici, ma promuove anche il concetto di *sostenibilità*; poiché si riduce il consumo delle risorse e il conseguente impatto ambientale.

Chiaramente, diventa di fondamentale importanza non solo la valutazione dell'efficacia degli interventi messi in atto, ma anche l'influenza che questi hanno nei confronti degli altri elementi strutturali che costituiscono l'edificio e che in qualche modo ne risentono.

In particolare, tali interventi debbono riguardare singole parti e/o elementi della struttura e, aspetto fondamentale, non devono modificare significativamente il comportamento globale della struttura.

Di seguito, vengono descritti gli interventi di recupero da mettere in atto sulla copertura oggetto di studio allo scopo di risolvere le problematiche riscontrate e descritte ampiamente nei paragrafi precedenti.

PROGETTO E VERIFICA DEL ROMPITRATTA

Allo scopo di contrastare l'eccessiva deformabilità riscontrata, occorre procedere alla progettazione di un rompitratta, cioè di un sistema costituito da due puntoni inclinati (coerentemente con l'inclinazione delle due falde che costituiscono la copertura oggetto di studio) collegati in sommità; il sistema di connessione è un "collegamento a mezzo legno" mediante una coppia di perni calibrati $\phi 14$. Per quanto riguarda, invece, il collegamento tra gli arcarecci ed il rompitratta, quest'ultimo è realizzato mediante i gattelli già presenti in opera per mezzo di viti a legno.

Più complesso è il collegamento con la muratura perimetrale; a tal riguardo, è prevista la presenza di un ulteriore elemento localizzato tra il rompitratta e la muratura allo scopo di ripartire il carico agente su quest'ultima e, sempre per mezzo di tale elemento e di opportune staffe di fissaggio e connettori a barra, è possibile eseguirne il corretto ancoraggio alla muratura stessa.

Operando in questo modo, cioè, prevedendo l'inserimento di questi rompitratta tra una capriata e l'altra, sostanzialmente si dimezza l'area d'influenza associata alla singola capriata e, conseguentemente, anche il carico agente su di essa.

Come precedentemente riportato, la valutazione dei carichi agenti viene effettuata in accordo con quanto riportato nelle NTC2018 al Paragrafo §2.5.3, tenendo conto delle due diverse disposizioni degli arcarecci sopra descritte; il carico dovuto a questi ultimi è schematizzato mediante forze concentrate agenti sui due puntoni che costituiscono il rompitratta i quali, a loro volta, sono schematizzati attraverso travi doppiamente appoggiate.

Noti i carichi agenti opportunamente combinati fra loro (con le medesime modalità sopra descritte, in accordo con il paragrafo §2.5.3 delle NTC2018) e ipotizzando una sezione per i due puntoni di (18x22) cm, si procede al calcolo delle relative sollecitazioni, le quali permetteranno l'effettuazione di tutte le verifiche richieste in accordo con i Paragrafi §4.4.7. e §4.4.8. delle NTC2018.

In particolare, per la natura dei carichi agenti e l'inclinazione con la quale vengono messi in opera i due puntoni costituenti il rompitratta, oltre che alla sollecitazione di taglio e momento flettente, tali elementi risultano soggetti anche a sforzo normale e, di conseguenza, anche a presso – flessione (a causa dell'azione concomitante di sforzo normale e momento flettente).

La totalità delle verifiche, sia in esercizio che allo stato limite ultimo, ha restituito esito positivo per la sezione ipotizzata la quale, pertanto, è stata adottata come sezione di progetto.



Fig.10 – Rompitratta.

Chiaramente, anche per i rompitratta sono realizzati ad hoc gli appoggi in corrispondenza della muratura; come si evince dalle immagini di seguito riportate, la soluzione d'appoggio è ottenuta utilizzando una tavola, sempre allo scopo di ripartire il più uniformemente possibile il carico sulla muratura, su cui è poi fissata, per mezzo di una barra filettata, una mensolina in acciaio opportunamente forata per il passaggio di apposite viti a legno.

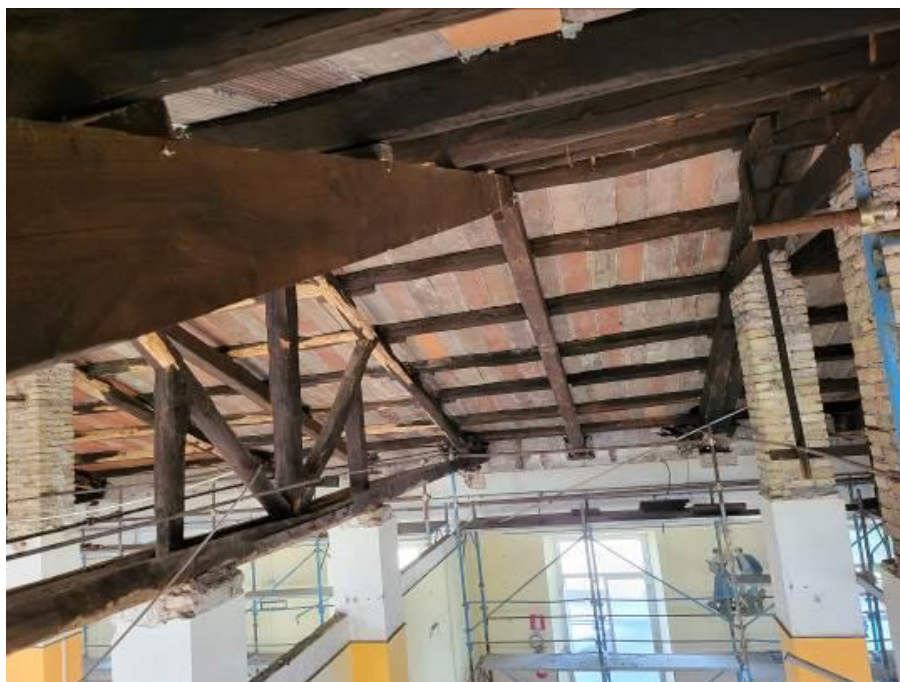


Fig.11 – Rompitratta.



Fig.12 – Dettaglio appoggio.



Fig.13 – Dettaglio appoggio.

RICOSTRUZIONE DELLE TESTATE DELLE CAPRIATE E DELL'APPOGGIO ALLA MURATURA

Durante le diverse campagne di rilievo effettuate, si sono individuate le testate caratterizzate da un grado di marcescenza elevato, sulle quali è necessario prevedere degli interventi di recupero.

La prima fase di cantiere, data la criticità della zona d'intervento, prevede la puntellatura delle varie testate; successivamente, a valle della rimozione dei materiali presenti all'estradosso sarà possibile effettuare la pulitura totale del legno dalle marcescenze presenti e, in generale, della zona di alloggiamento a muro dell'intero sistema.

L'intervento di recupero previsto consiste di diverse fasi:

1. Inserimento all'interno della sezione esistente, previa realizzazione di opportune sedi mediante tagli verticali, di una coppia di lamine in compensato ad uso strutturale;
2. La coppia di lamine, successivamente, è fissata al puntone esistente mediante spinotti in legno duro passanti;
3. Posa in opera delle tavole in lamellare opportunamente sagomate mediante incollaggio con resine epossidiche;
4. Inserimento di bulloni calibrati e serraggio mediante dado e piastra metallica.

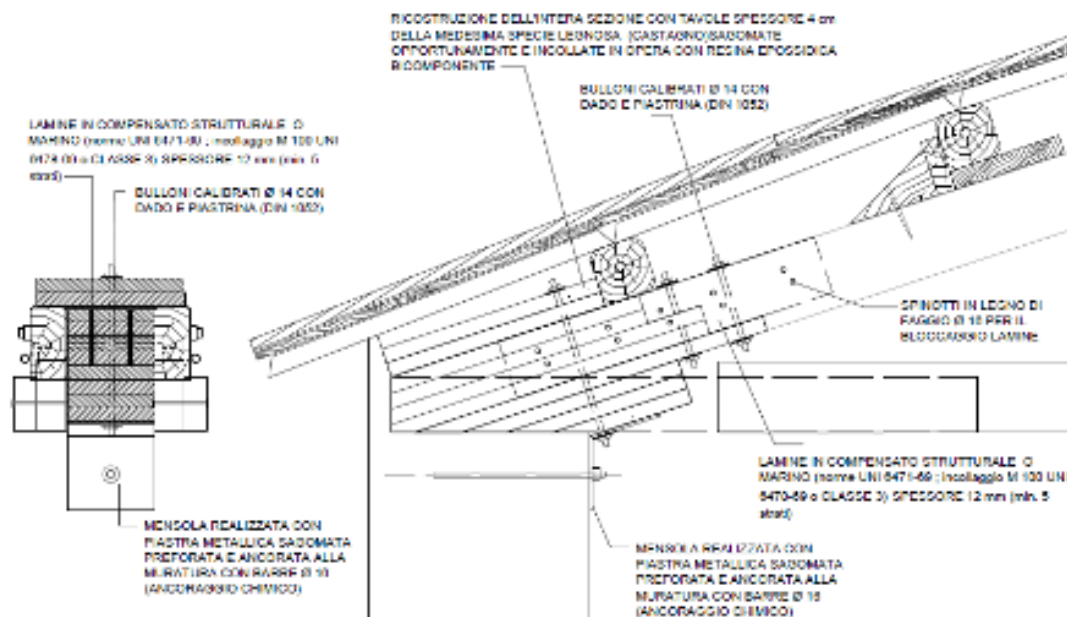


Fig.14 – Ricostruzione dell'appoggio della capriata alla muratura.

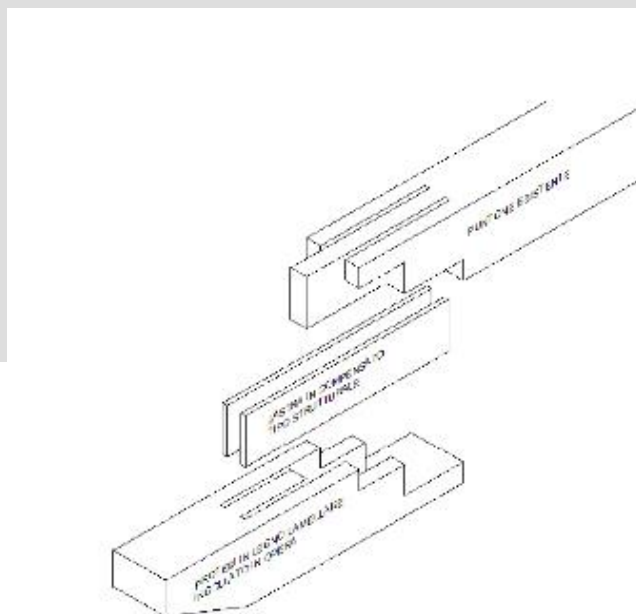


Fig.15 – Schema degli elementi per la ricostruzione dell'appoggio.



Fig.16 – Vista laterale della ricostruzione totale della testata e dell'appoggio.



Fig.17 – Vista dall'alto della ricostruzione totale della capriata e dell'appoggio.

CONCLUSIONI

Lo studio condotto da **Indagini Strutturali Srl** sulla copertura in legno ha rivelato una serie di criticità significative. L'attacco degli insetti e le conseguenti marcescenze riscontrate nel materiale hanno compromesso alcune sezioni richiedendo, in talune circostanze, un'attenta valutazione, come nel caso degli arcarecci e di alcune capriate.

Nello specifico, la diminuzione delle sezioni resistenti riscontrata in alcuni elementi ha messo in luce la necessità di pianificare interventi mirati: a tal proposito, il progetto del rompitratta si è profilato come una soluzione efficace per alleviare i carichi agenti sulle capriate e sugli arcarecci, offrendo una strategia relativamente semplice ed efficace per l'attuazione di un rinforzo strutturale. Inoltre, lo studio condotto ha compreso anche la messa a punto di nuove soluzioni d'appoggio alla muratura, garantendo una migliore integrazione e stabilità complessiva del sistema.

La combinazione di interventi mirati, dalla verifica statica degli arcarecci al progetto del rompitratta, insieme alle nuove soluzioni d'appoggio sviluppate, ha contribuito a creare un quadro completo di interventi finalizzati a preservare l'integrità strutturale e la funzionalità della copertura in legno.