

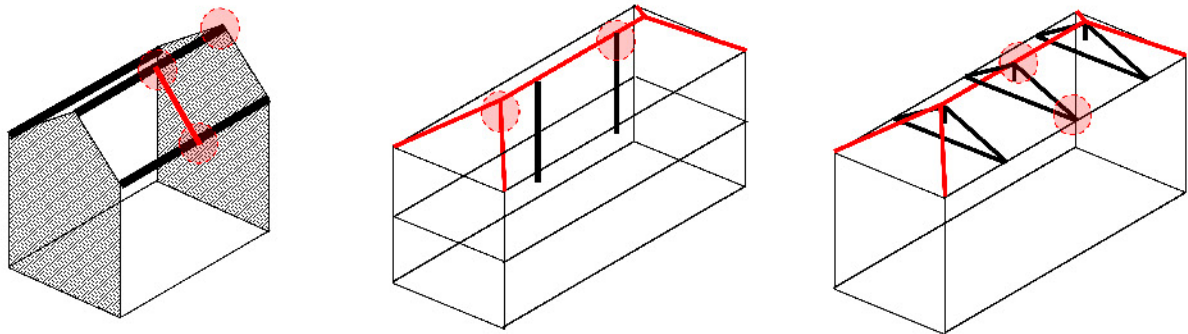
promo_legno

Particolari costruttivi e collegamenti Colmo, gronda, cordolo, ancoraggi

Roberto Tomasi



Corso di approfondimento - tetti e coperture di legno



Lezione C2: particolari costruttivi e collegamenti

ING. ROBERTO TOMASI

**Università degli Studi di Trento
Dipartimento di Ingegneria Meccanica e strutturale**

Indice

1 Introduzione

2 Tecniche di connessione

- 2.1 Resistenza a compressione dei materiali a base di legno
- 2.2 Resistenza a taglio dei connettori a gambo cilindrico
- 2.3 Resistenza ad estrazione dei connettori a gambo cilindrico

3 Tetto ad arcarecci a due falde

- 3.1 Appoggio trave principale
 - 3.1.1 Verifica appoggio
 - 3.1.2 Interazione con l'involucro e struttura sottostante
- 3.2 Collegamento trave principale - secondaria (colmo – trave inclinata)
 - 3.2.1 In appoggio con la trave principale
 - 3.2.2 In spessore con la trave principale
 - 3.2.3 Interazione con l'involucro e struttura sottostante
- 3.3 Collegamento trave principale - secondaria (banchina– trave inclinata)
 - 3.3.1 Verifiche
 - 3.3.1 Interazione con l'involucro e struttura sottostante

4 Tetto a padiglione non spingente

- 4.1 Nodo a tre vie
- 4.2 Soluzione con capriata moderna
- 4.3 Soluzione con capriata tradizionale

5 Altre soluzioni costruttive spingenti

1 Introduzione

La seguente lezione fa parte del materiale didattico del corso di approfondimento di Promo_legno tetti e coperture in legno. Le lezioni C1 e C2 riguardano in modo particolare le problematiche strutturali di una copertura lignea.

L'obiettivo della lezione C2 è illustrare le problematiche di dimensionamento e di verifica dei sistemi di collegamento più comunemente utilizzati nelle coperture in legno, con particolare riguardo al caso delle piccole o medie coperture di civile abitazione. Si vogliono inoltre illustrare e commentare anche le problematiche di interazione tra la struttura e l'involucro edilizio, anche attraverso alcuni particolari costruttivi.

Un prerequisito fondamentale per affrontare i contenuti didattici di questa lezione è la conoscenza di base del calcolo e del dimensionamento delle strutture in legno (anche per esempio una conoscenza dei contenuti del corso Ho_1z di base).

Nel capitolo 2 si riportano alcune richiami sulle conoscenze di base del comportamento strutturale delle giunzioni lignee, necessarie per affrontare i contenuti della lezione C2: per un approfondimento di queste tematiche si rimanda al materiale didattico del corso base di promo_legno (corso Ho_1z) oppure al materiale di apprendimento (prontuari promo_legno).

Nei capitoli successivi si analizzano invece alcune situazioni progettuali molto semplici ma ricorrenti nella pratica progettuale (tetto ad arcarecci, tetto a padiglione etc.) per discutere delle problematiche del calcolo e del dimensionamento e per illustrare alcuni particolari costruttivi.

2 Tecniche di connessione

Le tecniche di connessione tra elementi lignei, comunemente utilizzate, possono differenziarsi sia per il tipo di sollecitazione cui vengono sottoposte in fase di esercizio, sia per i materiali utilizzati per la loro realizzazione. La distinzione più comune è tra le due seguenti tipologie:

- **unioni tradizionali** della carpenteria lignea realizzate attraverso la lavorazione delle superfici di contatto (carpentry joint): in tali unioni le sollecitazioni si trasmettono direttamente tramite sforzi di compressione;
- **unioni meccaniche di tipo moderno**, nelle quali la trasmissione degli sforzi avviene non in maniera diretta, ma attraverso l'inserimento di elementi metallici eventualmente con la presenza di colla (mechanical joint).

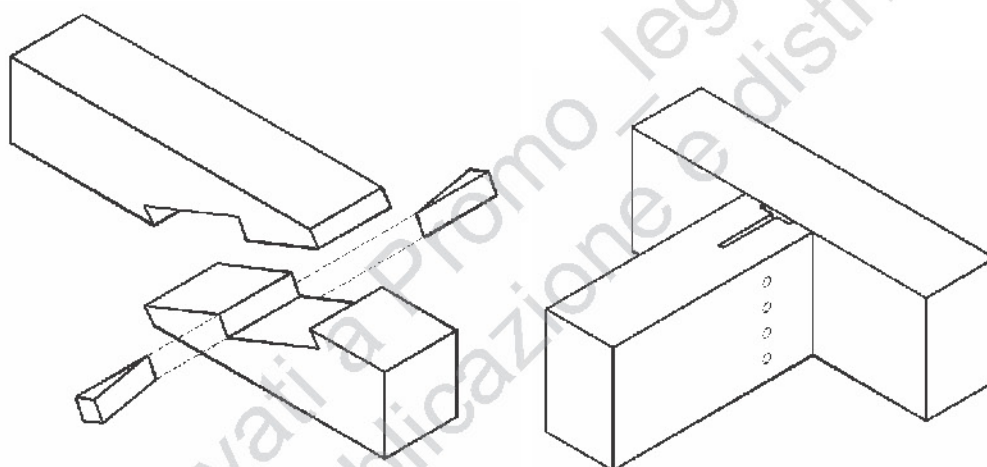


Figura 1 Esempio di collegamento tradizionale (dardo di giove) ed di collegamento moderno (staffa a scomparsa)

Per quanto riguarda i cosiddetti **nodi di carpenteria o connessioni tradizionali**, si indicano con tali termini tipologie di connessione molto utilizzate in passato per il collegamento delle membrature lignee, caratterizzate dalla presenza di superfici intagliate e lavorate al fine di consentire la trasmissione degli sforzi tra gli elementi connessi (figura 1). In tali collegamenti, la trasmissione degli sforzi avviene prevalentemente per contatto diretto tra superfici lignee. Di recente, tali connessioni hanno nuovamente assunto un ruolo importante per le piccole e medie strutture di legno, potendo contare su lavorazioni degli elementi non più realizzate ad ascia ma con moderne macchine a controllo numerico ormai diffuse anche nella piccola e piccolissima azienda di carpenteria.

Per quanto riguarda le unioni meccaniche di tipo moderno possono essere classificate in funzione della tipologia di connettore adottato:

- connettori metallici a gambo cilindrico (chiodi, bulloni, perni, viti e cambre);
- connettori metallici di superficie (caviglie, anelli, piastre dentate).

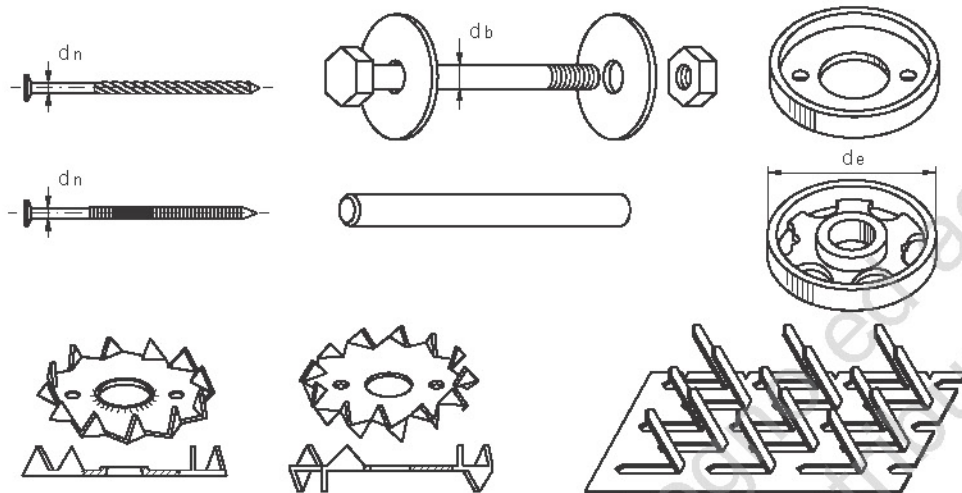


Figura 2 Alcune tipologie di connettori moderni: a gambo cilindrico; di superficie

Nella coperture di piccola o media importanza statica può essere conveniente l'utilizzo di piastre preformate (realizzate con lamiere metalliche di ridotto spessore piegate a freddo, oppure in alluminio), per il collegamento tra travi principali e secondarie, oppure tra travi e pilastri. Tali sistemi sono spesso disponibili a catalogo e dotati di documentazione statica del produttore che certifica i valori minimi di portata in funzione del numero e del tipo di sistemi di connessione utilizzati.

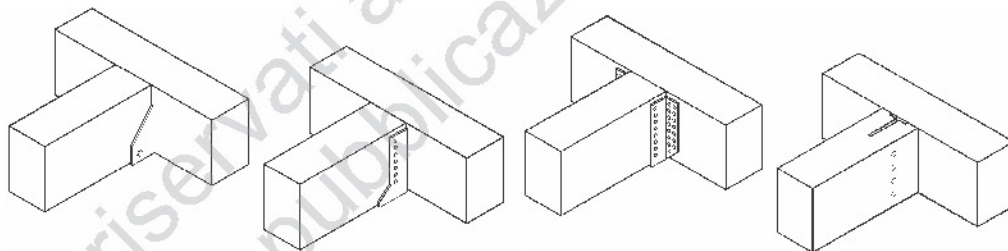


Figura 3 Esempi di collegamento trave principale- trave secondaria

2.1 Resistenza a compressione dei materiali a base di legno

Il comportamento meccanico delle giunzioni di carpenteria, dove la trasmissione degli sforzi avviene principalmente per contatto tra le superficie degli elementi lignei, è quindi legato alla resistenza a compressione del materiale a base di legno. Il comportamento a rottura del legno netto sottoposto a sforzi assiali di compressione è principalmente influenzato dall'angolo tra la direzione della fibratura e la direzione degli sforzi applicati. I valori di resistenza massima si ottengono nel caso di compressione parallela alla fibratura ($f_{c,0,d}$), mentre nel caso di compressione ortogonale alla fibratura si ottengono valori di resistenza inferiori di circa un ordine di grandezza ($f_{c,90,d}$).

Si riportano di seguito i profili prestazioni per il legno massiccio e per il legno lamellare relativi a queste grandezza meccaniche

Classi di resistenza secondo EN 338:2002, per legno di conifere e di pioppo (classi C) e latifoglia escluso pioppo (classi D)

Valori caratteristici di resistenza e modulo elastico per legno massiccio di conifera

	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50	
Resistenze (MPa)													
compressione													
parallela alla fibratura	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29
compressione													
perpendicolare alla fibratura	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2

Valori caratteristici di resistenza e modulo elastico per legno massiccio di latifoglia

	D30	D35	D40	D50	D60	D70	
Resistenze (MPa)							
compressione parallela alla fibratura	$f_{c,0,k}$	23	25	26	29	32	34
compressione perpendicolare alla fibratura	$f_{c,90,k}$	8,0	8,4	8,8	9,7	10,5	13,5

Classi di resistenza secondo EN 1194, per legno lamellare di conifera omogeneo e combinato

Valori caratteristici di resistenza e modulo elastico

	GL24h	GL24c	GL28h	GL28c	GL32h	GL32c	GL36h	GL36c	
Resistenze (MPa)									
compressione									
parallela alla fibratura	$f_{c,0,g,k}$	24,0	21,0	26,5	24,0	29,0	26,5	31,0	29,0
compressione									
perpendicolare alla fibratura	$f_{c,90,g,k}$	2,7	2,4	3,0	2,7	3,3	3,0	3,6	3,3

Nel caso di compressione inclinata rispetto alla fibra si osservano invece valori di resistenza intermedi rispetto ai due casi precedenti, che possono essere determinati attraverso formule di interazione in funzione dell'angolo di inclinazione. Per esempio il documento CNR DT-206 propone la formula di Hankinson per la resistenza a compressione inclinata di un angolo α rispetto alla fibra:

$$\sigma_{c,\alpha,d} \leq \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{f_{c,90,d}} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}$$

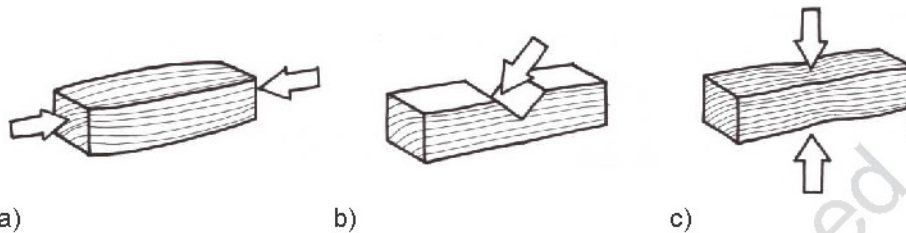


Figura 4 Modalità di collasso per compressione: a) parallela alla fibra; b) inclinata rispetto alla fibra; c) ortogonale alla fibra.

2.3 Resistenza a taglio dei connettori a gambo cilindrico

I connettori metallici più frequentemente utilizzati per assemblare le membrature lignee sono quelli genericamente denominati a gambo cilindrico, come i chiodi, le viti, i bulloni ed i perni.

Le evidenze sperimentali hanno mostrato che i meccanismi di rottura, che si verificano in una connessione lignea con connettori metallici a gambo cilindrico, sono associati a fenomeni di rifollamento (ovvero di schiacciamento localizzato delle fibre legnose nel foro cilindrico) e snervamento (a flessione) del gambo del connettore metallico, con formazione di una o più cerniere plastiche.

Le equazioni della capacità portante della connessione con connettori a gambo cilindrico sono ricavate da semplici considerazioni di equilibrio allo stato limite, con l'ipotesi di un comportamento rigido-plastico per entrambi i materiali, in funzione di due parametri meccanici (resistenza a rifollamento, momento di snervamento) e di due parametri geometrici (diametro del connettore e spessore degli elementi da unire).

Tali equazioni sono riportate in normativa, in funzione delle principali grandezze geometriche e meccaniche, per unioni ad un piano di taglio (il connettore "attraversa" due elementi) o a due piani di taglio (il connettore "attraversa" tre elementi); per unioni legno-legno (cioè con elementi lignei collegati tra loro per mezzo di elementi metallici a gambo cilindrico) e per unioni legno-acciaio (cioè con elementi lignei collegati a piastre metalliche per mezzo degli stessi elementi metallici a gambo cilindrico).

I valori espressi dalle equazioni di normativa si riferiscono alle resistenze caratteristiche per singolo mezzo di unione e per singolo piano di taglio. I valori di progetto (R_d) sono da determinarsi dai valori caratteristici (R_k) in funzione del coefficiente parziale di sicurezza per la proprietà del materiale γ_m , e del coefficiente di correzione k_{mod} che tiene conto dell'effetto, sui parametri di resistenza, sia della durata del carico sia dell'umidità degli elementi.

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_m} \cdot k_{mod}$$

I modi di rottura che possono aver luogo in un collegamento sono sostanzialmente i seguenti:

- modo I: rifollamento di una delle parti lignee connesse;
 modo II e III: rifollamento di una delle parti lignee connesse e contemporaneo snervamento del connettore metallico, con formazione di una o più cerniere plastiche.

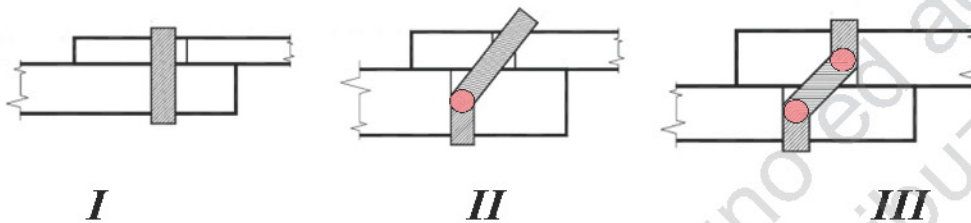


Figura 5 Principali modalità di rottura previste dalla normativa

Si riportano a titolo di esempio le formule per la resistenza caratteristica a taglio nel caso di unioni legno-legno ad un piano di taglio espresse in funzione dei seguenti parametri meccanici e geometrici:

- t_1 e t_2 spessori del legno o del pannello, o profondità di infissione del mezzo di unione
 $f_{h,1,k}$ e $f_{h,2,k}$ resistenze caratteristiche a rifollamento degli elementi di legno caratterizzati dallo spessore, rispettivamente, t_1 e t_2 ;
 d diametro del connettore;
 $M_{y,k}$ valore caratteristico del momento di snervamento del connettore;
 R_k valore caratteristico della resistenza a taglio della connessione per singolo piano di taglio;

$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}}$ rapporto tra le tensioni caratteristiche di rifollamento.

$$F_{l,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d \quad (a) \\ f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d \quad (b) \\ \frac{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1}{1+\beta} \left[\sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \cdot \left(1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2\right)} + \beta^3 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2 - \beta \cdot \left(1 + \frac{t_2}{t_1}\right) \right] \quad (c) \\ 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1}{2+\beta} \left[\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1+\beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2+\beta) \cdot M_{y,k}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (d) \\ 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_2}{1+2 \cdot \beta} \left[\sqrt{2 \cdot \beta^2 \cdot (1+\beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (1+2 \cdot \beta) \cdot M_{y,k}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (e) \\ 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1+\beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (f) \end{array} \right.$$

Si noti in alcune modalità di rottura (c, d, e, f) viene riportato un contributo aggiuntivo di resistenza in funzione del parametro del valore di resistenza $F_{ax,Rk}$ (resistenza caratteristica ad estrazione del connettore a gambo cilindrico). Questo contributo supplementare alla resistenza del connettore descrive un effetto che si osserva sperimentalmente per i modi di rottura II e III nel caso di connettori in grado di opporre una resistenza ad estrazione, dovuto al fatto che per grandi spostamenti questi connettori tendono a comprimere gli elementi lignei collegati, determinando una forza di attrito in prossimità dell'interfaccia degli elementi lignei (**effetto fune**).

Il modello di normativa qui illustrato consente di determinare la resistenza di un singolo connettore. Nel caso più generale di un collegamento dove sono disposti più connettori a gambo cilindrico occorre tenere in conto di un effetto di gruppo per connettori allineati su una fila, indicato come **numero efficace**.

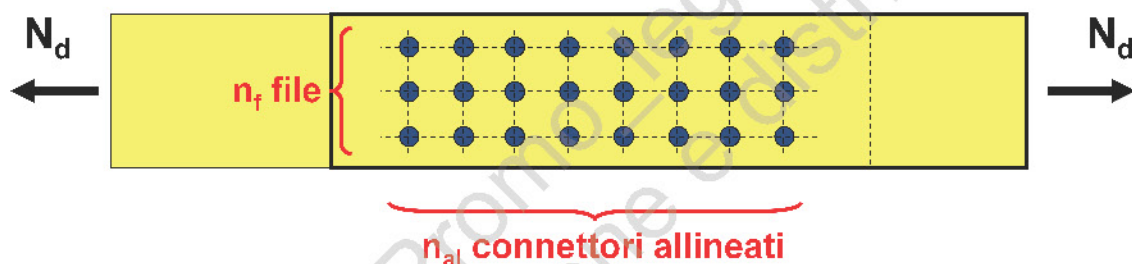


Figura 6 Modalità di determinazione del numero efficace di connettori

La resistenza globale in questo caso si indica con la seguente espressione

$$R_{d,tot} = n_f \cdot n_{al,ef} \cdot R_{con,d}$$

Dove il numero efficace di connettori allineati $n_{al,ef}$ può risultare minore del numero reale di connettori allineati n_{al} .

Il modello di normativa qui illustrato non tiene conto di alcune modalità di collasso, in particolare della parte lignea, associate all'insorgere nel legno di tensioni ortogonali alla direzione della fibratura, e che possono determinare meccanismi di rottura fragili, che possono essere responsabili di collassi strutturali a valori inferiori a quelli previsti dal modello di normativa. Al fine di prevenire tali modalità di rottura si fissano **valori minimi di distanze dei connettori dalle estremità e dai bordi degli elementi**, e **valori minimi di spaziatura tra i mezzi singoli di unione allineati** nella direzione di fibratura o ortogonalmente ad essa.

2.3 Resistenza ad estrazione dei connettori a gambo cilindrico

Alcuni sistemi di collegamento a gambo cilindrico, sono dotati di gambo ad aderenza migliorata oppure filettato, in modo tale da garantire un certo grado di resistenza all'estrazione del connettore. La capacità di resistere all'estrazione può essere sfruttata in molte situazioni ed è quindi fondamentale definire in modo preciso la capacità di resistenza.

Nel caso generale illustrato in figura per un connettore gambo cilindrico sollecitato assialmente si possono individuare due fondamentali meccanismi di rottura:

Estrazione del filetto: in questo meccanismo la parte verso la punta del connettore dotata di filetto si sfilava dall'elemento 1

Estrazione della testa: in questo meccanismo è invece la testa del connettore che si sfilava dall'elemento 2

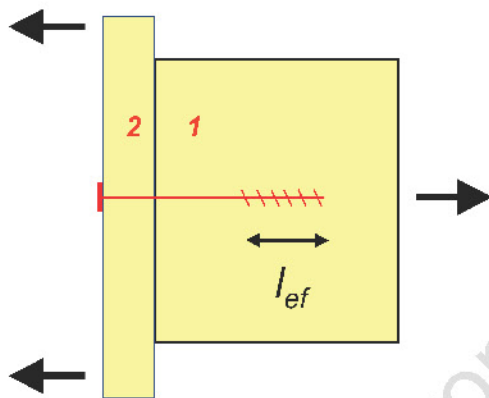


Figura 7 Meccanismi di rottura per la resistenza ad estrazione

La resistenza ad estrazione del connettore sarà quindi pari al minimo valore di resistenza associato ai due meccanismi descritti:

$$R_{ax} = \min\{R_{PUNTA}; R_{TESTA}\}$$

Per determinare la resistenza ad estrazione di un connettore a vite nella EN 1995 (eurocodice 5) viene riportata la seguente procedura di calcolo.

Resistenza assiale in accordo con Eurocodice 5

La **resistenza all'estrazione della punta** è riportata in funzione dell'angolo α' tra la direzione della fibra e la direzione dell'asse della vite (sollecitata ad estrazione), in accordo con la figura. Si noti l'angolo α' è diverso dall'angolo α definito precedentemente come angolo tra la direzione della forza e la direzione della fibra per connettori sollecitati a taglio (si veda per esempio la formula di Hankinson).

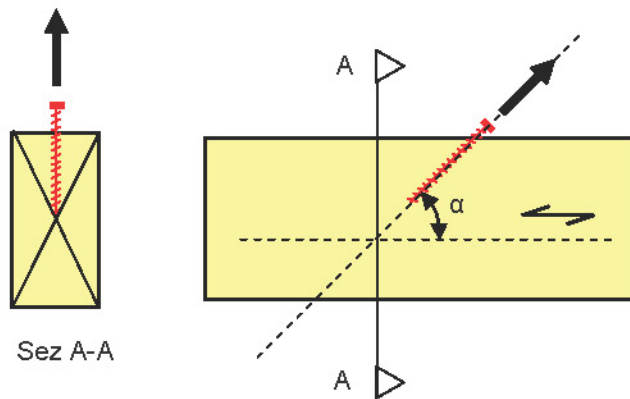


Figura 8 Dipendenza della resistenza ad estrazione dall'angolo di infissione
Resistenza caratteristica ad estrazione della punta filettata

$$F_{ax,\alpha',k} = n_{ef} \cdot (\pi \cdot d \cdot l_{ef})^{0,8} \cdot f_{ax,\alpha',k}$$

dove

l_{ef} lunghezza della parte filettata della vite

$$f_{ax,\alpha',k} = \frac{f_{ax}}{\sin^2 \alpha' + 1,5 \cos^2 \alpha'}$$

dove $f_{ax,k} = 3,6 \times 10^{-3} \rho_k^{1,5}$

La resistenza massima ad estrazione della punta si ha quindi per viti infisse ortogonalmente alla direzione della fibra, la resistenza minima si ha invece per viti infisse parallelamente alla direzione della fibra. Si possono quindi avere i seguenti casi particolari in accordo con la figura.

$$\alpha' = 90^\circ f_{ax,90,k} = f_{ax} \quad (\text{valore massimo})$$

$$\alpha' = 0^\circ f_{ax,0,k} = f_{ax}/1,5 \quad (\text{valore minimo})$$

$$\alpha' = 45^\circ f_{ax,45,k} = f_{ax}/1,25 \quad (\text{valore intermedio})$$

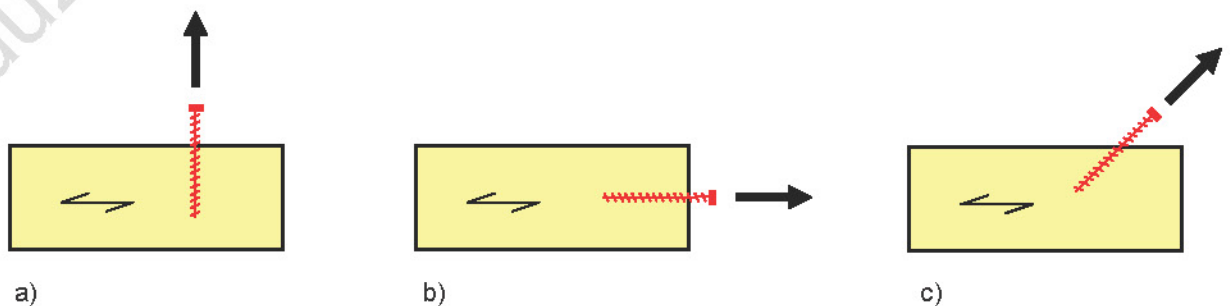


Figura 9 Dipendenza della resistenza ad estrazione dall'angolo di infissione

Si nota che l'eurocodice 5 non fissa dei limiti rispetto all'angolo α' , che può variare da 0° a 90° .

Si nota inoltre che in accordo con l'eurocodice 5 per un gruppo di viti sollecitate ad estrazione si deve tener in conto di un effetto gruppo ad estrazione attraverso il numero efficace $n_{ef} = n^{0,9}$. Si prescrive inoltre una lunghezza minima di infissione della parte filettata della vite pari a $l_{ef} > 6d$.

Nell'Eurocodice 5 non vengono invece riportate espressioni per la resistenza ad estrazione della testa, ma si rimanda ad una determinazione sperimentale in accordo con la EN 1383.

Nel caso di viti sollecitate contemporaneamente a taglio ed estrazione si assume la seguente formula di interazione:

$$\left(\frac{F_{ax,Ed}}{R_{ax,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{F_{lat,Ed}}{R_{lat,Rd}}\right)^2 \leq 1$$

Resistenza assiale in accordo con la Din 1052

Poiché molte viti presenti in commercio presentano un certificato in accordo con la normativa tedesca Din 1052, si riportano di seguito le indicazioni presenti in tale normativa.

Il valore di $R_{ax,d}$ si determina in accordo con DIN 1052 per viti infisse ortogonalmente alla direzione delle fibre:

$$R_{ax,k} = \min\{f_{1,k} \cdot d \cdot l_{ef}; f_{2,k} \cdot d_k^2\} \quad (N)$$

dove

$f_{1,k}$ è il valore caratteristico del parametro di estrazione del gambo della vite, da determinarsi secondo la tabella seguente;

$f_{2,k}$ è il valore caratteristico del parametro di estrazione della testa della vite, da determinarsi secondo la tabella seguente;

l_{ef} lunghezza di infissione della punta filettata;

d è il diametro nominale della vite;

d_k è il diametro della testa della vite;

Valori caratteristici in N/mm^2 dei parametri di estrazione del gambo e della testa della vite

Classe di resistenza	$f_{1,k}$	Classe di resistenza	$f_{2,k}$
1	$60 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_k^2$	A	$60 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_k^2$
2	$70 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_k^2$	B	$80 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_k^2$
3	$80 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_k^2$	C	$100 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_k^2$

Il valore caratteristico della massa volumica ρ_k è espresso in kg/m^3 , con $\rho_k \leq 500 kg/m^3$

Per viti non ortogonali, la resistenza legata al parametro caratteristico α di estrazione del gambo si potrebbe calcolare, in accordo con la normativa, nel modo seguente:

$$R_{ax,k} = f_{1,k} \cdot d \cdot l_{ef} \left/ \left(\sin^2 \alpha' + \frac{4}{3} \cos^2 \alpha' \right) \right.$$

dove α' è l'angolo tra l'asse della vite e la direzione delle fibre ($45^\circ \leq \alpha' \leq 90^\circ$). Con angoli inferiori a 45° non è infatti sperimentalmente noto il comportamento a lungo termine del collegamento, e non è nota l'influenza sui valori di resistenza ad estrazione del ritiro termometrico del materiale.

Anche in accordo con la DIN 1052 la resistenza massima ad estrazione della punta si ha quindi per viti infisse ortogonalmente alla direzione della fibra, la resistenza minima si ha invece per viti infisse a 45° rispetto alla direzione della fibra. Si possono quindi avere i seguenti casi particolari in accordo con la figura.

$$\alpha' = 90^\circ f_{ax,90,k} = f_{ax} \quad (\text{valore massimo})$$

$$\alpha' = 45^\circ f_{ax,45,k} = f_{ax}/1,16 \quad (\text{valore minimo})$$

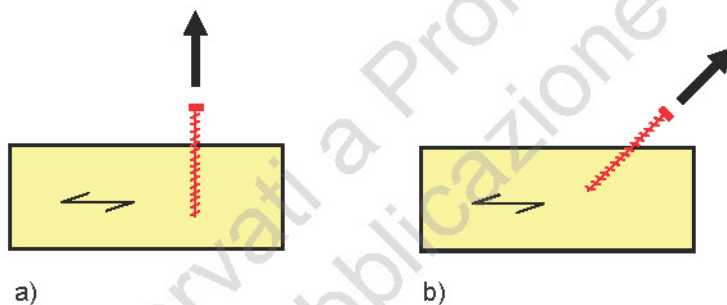


Figura 10 Dipendenza della resistenza ad estrazione dall'angolo di infissione

I certificati dei diversi produttori di viti in accordo con la Din 1052 riportano i valori di $f_{1,k}$ e $f_{2,k}$ da utilizzare nel calcolo della resistenza ad estrazione della vite. Sono ammessi angoli $\alpha' < 45^\circ$ solo per alcune viti se indicato nel certificato (e quindi suffragato da evidenze sperimentali).

3 Tetto ad arcarecci a due falde

Come evidenziato nella lezione C1 il tetto ad arcarecci rappresenta oggi una delle soluzioni strutturali più comuni per tutti i tetti di legno con struttura portante principale costruita con travi di legno massiccio (o lamellare) nell'ambito delle costruzioni ad uso edilizia abitativa e simile.

Il tetto ad arcarecci è una copertura di tipo non spingente, dove, nella configurazione più elementare, gli elementi strutturali principali sono elementi orizzontali in semplice appoggio (arcareccio o trave di colmo, arcareccio o travi di banchina) su cui appoggiano gli elementi secondari (trave inclinata o falso puntone).



Figura 11 Elementi strutturali nel tetto ad arcarecci a due falde

Tutti gli elementi strutturali sono quindi "in semplice" appoggio, tali per cui, per effetto di soli carichi verticali, non trasmettono ai propri vincoli esterni azioni orizzontali.

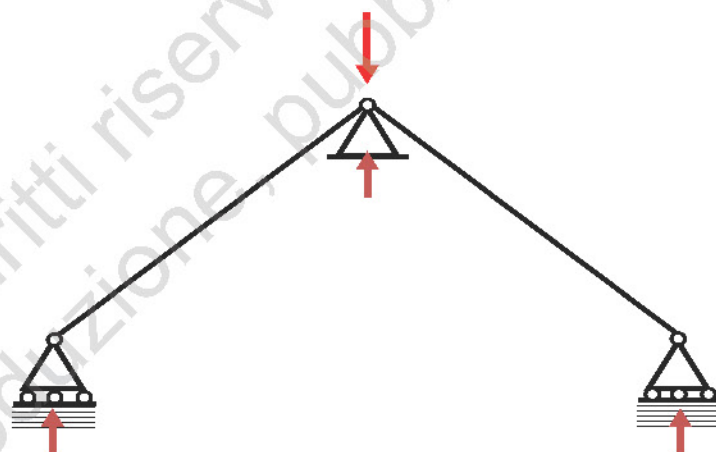


Figura 12 Schema struttura non spingente

Ricorre spesso l'equivoco di considerare il classico "tetto ad arcarecci" spingente, mentre in realtà l'equilibrio alla traslazione orizzontale non dà luogo ad alcuna forza orizzontale agli appoggi (falsi puntoni).

È tuttavia necessario progettare in maniera adeguata i dispositivi di appoggio, in modo tale da garantire che non vi siano configurazioni errate nei vincoli agli appoggi, che possano determinare spinte o addirittura labilità strutturale. Si riportano di seguito alcuni esempi di configurazioni dei vincoli dei falsi puntoni.

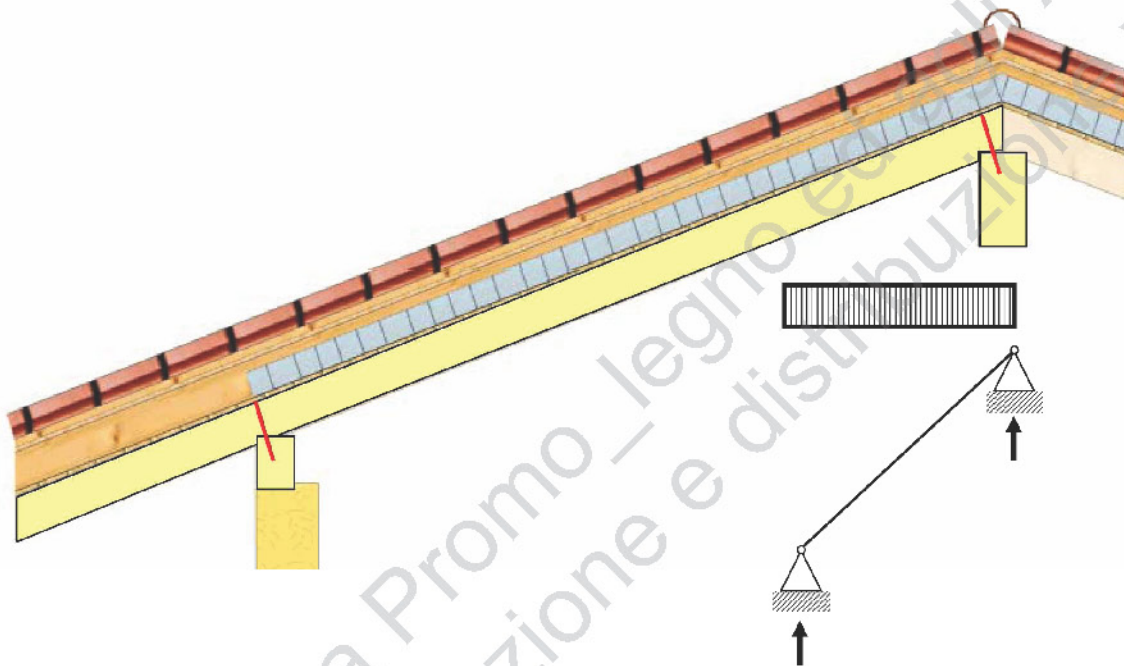


Figura 13 Configurazione corretta dei vincoli in un tetto ad arcarecci con superficie di appoggio orizzontale

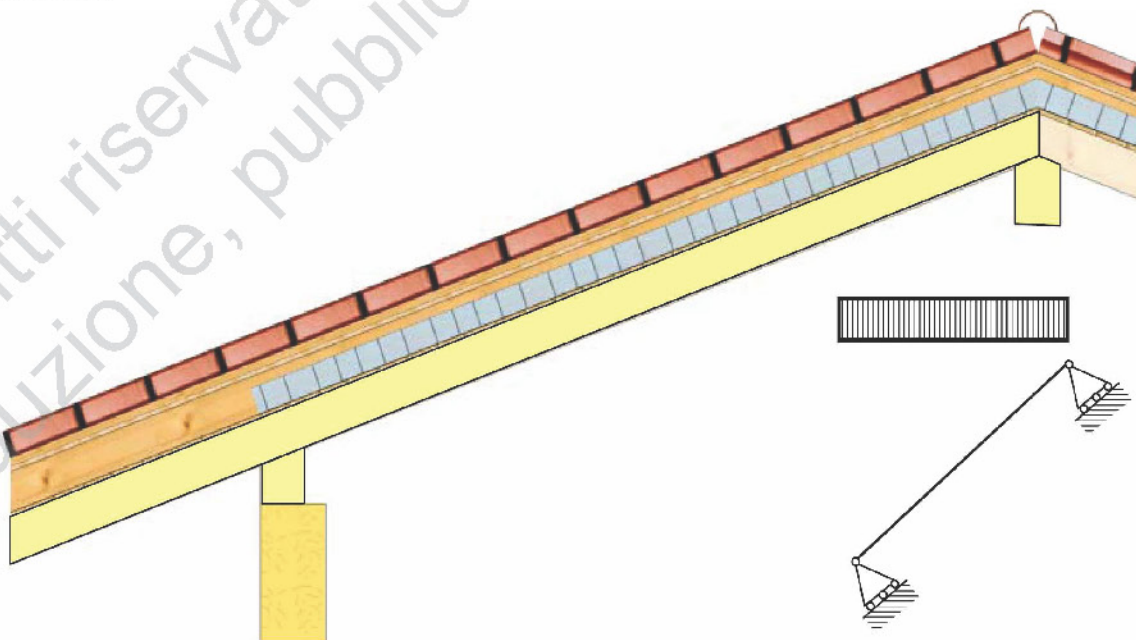


Figura 14 Configurazione non corretta dei vincoli in un tetto ad arcarecci con superficie di appoggio inclinata

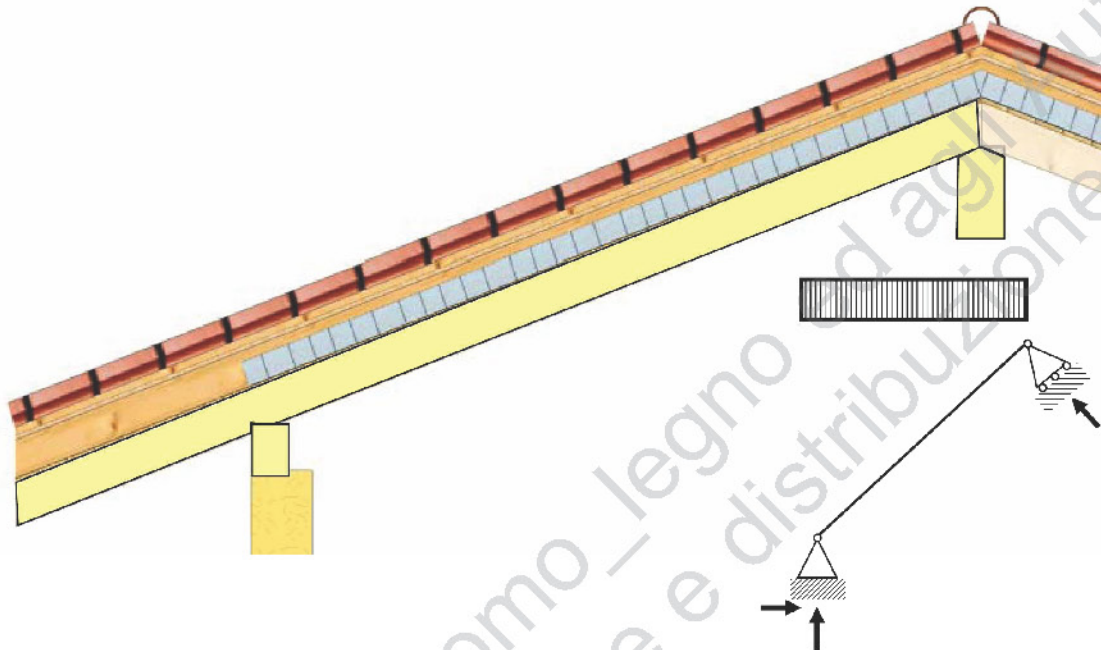


Figura 15 Configurazione non corretta dei vincoli in un tetto ad arcarecci con superficie di appoggio inclinata

Se si evitano gli "errori" descritti dalle figure precedenti, un tetto ad arcarecci non può essere considerato spingente, e non è quindi necessario inserire elementi atti ad equilibrare spinte orizzontali. Tuttavia è sempre una buona norma presidiare gli appoggi con dei sistemi di fissaggio (per esempio viti da legno), in modo tale da solidarizzare l'elemento secondario alla trave di colmo o alla trave di banchina. In questo modo i vincoli possono lavorare in modo "bilatero" (cioè sia in compressione che in trazione) e quindi possono essere in grado di contrastare le azioni di sollevamento dovute al vento. Inoltre possono garantire il trasferimento delle forze orizzontali (dovute al sisma o al vento) agli elementi inferiori. Ovviamente, per poter garantire questo funzionamento, i sistemi di fissaggio devono essere opportunamente dimensionati.

Il carattere più o meno spingente dello schema ad arcarecci dipende anche dalla rigidità della trave di colmo; travi di colmo non sufficientemente rigide possono determinare un abbassamento dell'appoggio tale da non consentire di limitare efficacemente l'azione spingente della copertura, come illustrato in figura.

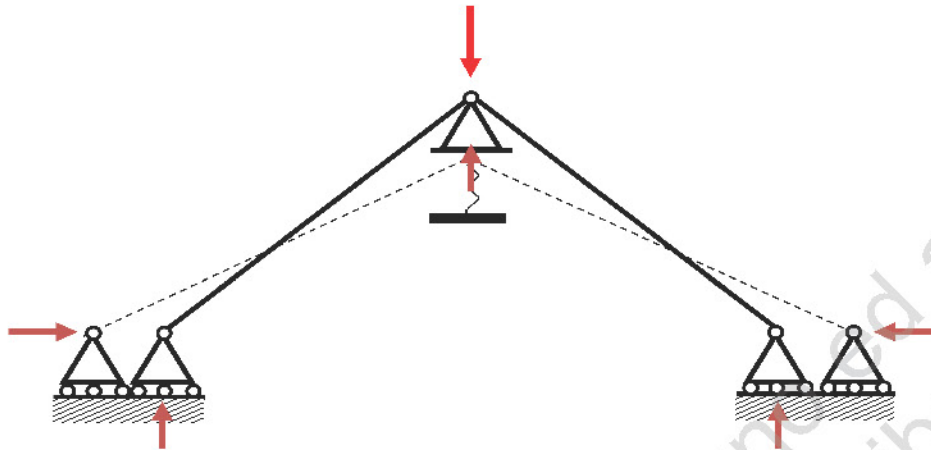


Figura 16 Effetto di spinta sui vincoli dovuta ad eccessiva deformabilità della trave di colmo

Per questa ragione è importante limitare l'inflessione della trave di colmo attraverso le verifiche agli stati limite di servizio (è importante quindi non solo limitare la freccia ad un valore relativo alla luce l della trave, per esempio $l/300$, ma anche ad un valore assoluto).

Con riferimento alla configurazione di tetto ad arcarecci si analizzano di seguito i seguenti particolari costruttivi:

- appoggio trave principale
- collegamento trave principale - secondaria (colmo – trave inclinata)
- collegamento trave principale - secondaria (banchina– trave inclinata)

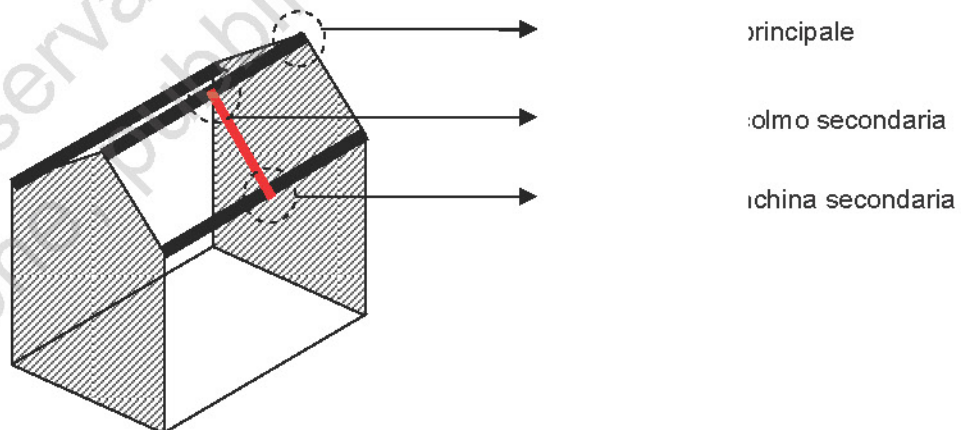


Figura 17 Nodi principali in una struttura ad arcarecci

3.1 Appoggio trave principale

La trave principale di colmo può essere un elemento in semplice appoggio con luce pari alle dimensioni della lunghezza maggiore della pianta dell'edificio (vedi schema A). Secondo tale schema l'elemento principale, che si dimensiona per le verifiche di freccia e verifiche di resistenza a

flessione, potrebbe assumere anche luci elevate (per esempio maggiori di 10 m), che porterebbe ad una trave di colmo con un valore molto alto dell'altezza della sezione (superiore ad 1 m), e quindi una trave molto snella (dato il limite tecnologico di $b = 24$ cm per la larghezza della sezione di base si avrebbe quindi un rapporto $h/b > 4$). La verifica a flessione dovrebbe quindi tenere conto della snellezza della trave (instabilità di trave) sull'intera luce della trave, oppure dell'effetto controventante della copertura (quindi si può assumere un $k_{crit}=1$, ma nel caso occorre verificare anche i controventi di copertura).

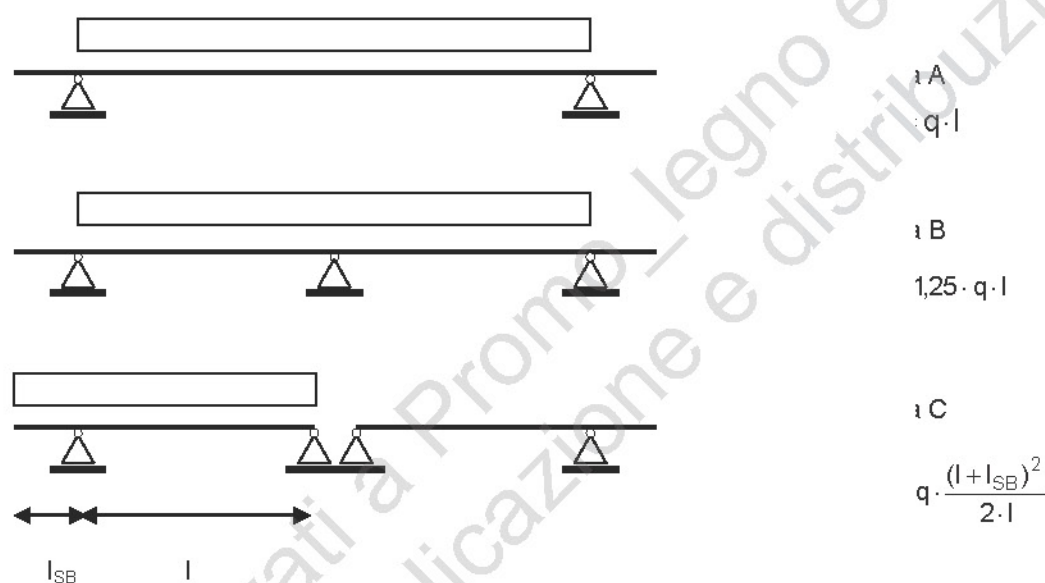


Figura 18 Schemi strutturali per la trave di colmo

Conviene quindi considerare la possibilità che esista almeno un appoggio intermedio per la trave di colmo. Tale soluzione consente una riduzione del momento massimo agente (che diventa quindi il momento negativo all'appoggio = $q l^2 / 8$, dove l è la luce tra gli appoggi, considerando scarichi gli sbalzi esterni), e l'entità della freccia in campata. Si può ottenere quindi una riduzione della sezione della trave (rapporto $h/b < 4$), con un miglioramento anche dal punto di vista estetico e funzionale. Utilizzando un appoggio intermedio (può essere per esempio un pilastro, una capriata, un setto), posso adottare lo schema B (trave continua su tre appoggi), oppure lo schema C (due travi su due appoggi). Lo schema C è probabilmente quello più facilmente praticabile perché ho due travi più corte (se riesco a limitare a 12 m la lunghezza della trave il trasporto è più semplice), inoltre ho un carico all'appoggio minore rispetto al caso B. Nel caso dello schema C il carico massimo si ha nell'appoggio esterno verso lo sbalzo, con l'ipotesi di carico uniformemente distribuito sulla campata e sugli sbalzi.

3.1.1 Verifica appoggio

Per la verifica dell'appoggio occorre considerare due meccanismi resistenti che garantiscono la capacità portante:

- resistenza offerta dalle fibre del legno a comprimersi e schiacciarsi lateralmente;
- “effetti di confinamento”, che si possono spiegare con la collaborazione, al meccanismo resistente, delle fibre adiacenti non caricate, le quali sono sollecitate (localmente) a trazione assorbendo una quota parte del carico. L'entità di questo secondo contributo è indipendente dalla lunghezza dell'impronta di carico, ma è invece proporzionale all'affondamento della piastra e alle dimensioni delle aree laterali all'impronta (“confinamento”).

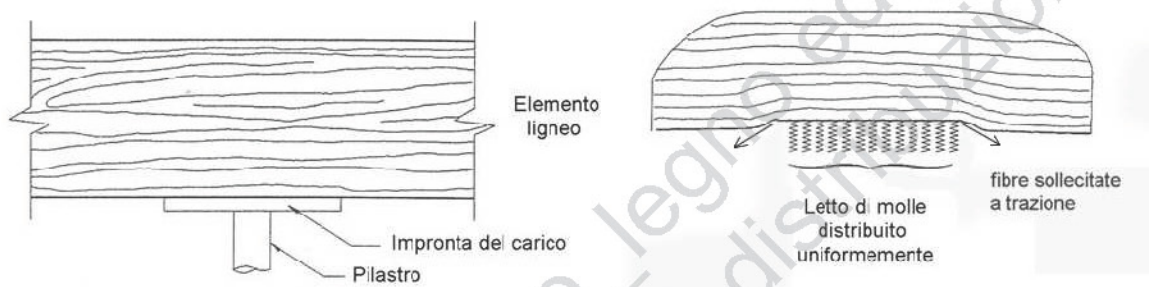


Figura 19 Meccanismi resistenti per compressione all'appoggio

Per la verifica all'appoggio occorre quindi soddisfare la seguente condizione:

$$\sigma_{c,90,d} \leq f_{c,90,d}$$

con: $\sigma_{c,90,d}$ tensione di progetto a compressione ortogonale alla fibratura in funzione della reazione vincolare che la trave determina nella zona di appoggio, e $f_{c,90,d}$ resistenza di progetto a compressione ortogonale alla fibratura.

Quest'ultima sarà calcolata mediante l'espressione:

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{F_{90,d}}{b \cdot l_{ef}}$$

con:

- $F_{90,d}$ forza di compressione esterna ortogonale alla fibratura;
- b base dell'elemento;
- l lunghezza di trave sulla quale agisce $F_{90,d}$;
- l_{ef} lunghezza efficace per tenere conto dell'effetto di confinamento

I diversi documenti normativi definiscono in maniera differente il modo di calcolare la lunghezza efficace. Per esempio il documento italiano CNR-DT206 definisce l_{ef} pari al minimo tra $l + h/3$ e $2 \cdot l$ nel caso di confinamento su due lati; pari al minimo tra $l + h/6$ e $1,5 \cdot l$ nel caso di confinamento solo su un lato.

Si possono quindi determinare diversi contributi dell'effetto di confinamento nel caso dell'appoggio centrale di continuità (schema B), e dell'appoggio laterale nello schema C.

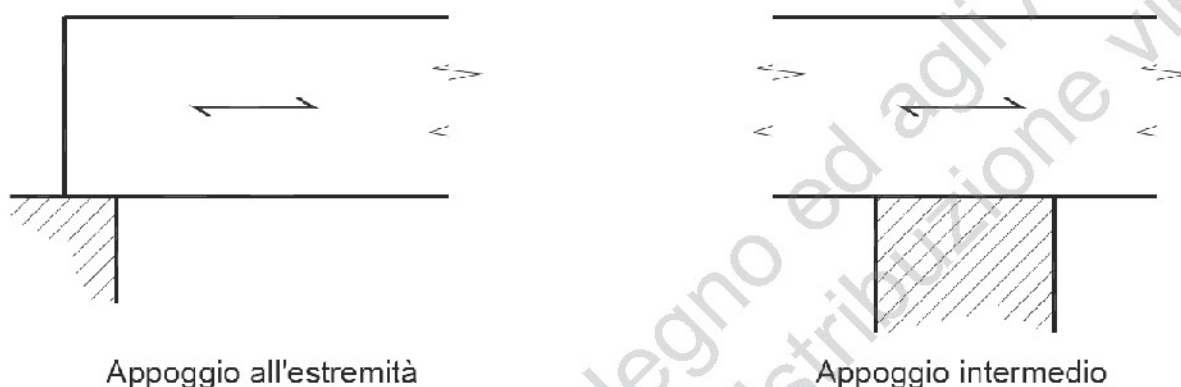


Figura 20 Appoggio estremità e intermedio

A patto di accettare valori di deformazione perpendicolare alla fibratura più elevati, nei diversi documenti normativi viene concesso l'utilizzo di valori superiori per $f_{c,90,\sigma}$. Per esempio il documento italiano CNR-DT206 fissa un limite fino a 1,5 volte quelli dati dalla tabella prestazionale di progetto.

La trave di colmo è l'elemento strutturale su cui gravano una buona parte dei carichi di copertura, quindi le reazioni agli appoggi possono assumere anche valori elevati.

Qualora la verifica concernente le sollecitazioni di compressione all'appoggio, realizzata secondo uno dei metodi descritti nel precedente paragrafo, non sia soddisfatta, esiste la possibilità di ricorrere a particolari sistemi di rinforzo dell'appoggio basati sull'utilizzo di elementi rigidi disposti trasversalmente alla direzione delle fibre, ed in grado di diffondere il carico su una superficie più ampia.

Tale fenomeno di diffusione avviene tramite un meccanismo analogo a quello dei pali di fondazione nel terreno, grazie al quale gli elementi rigidi (i pali) infissi in un mezzo più "morbido" (il terreno), consentono di portare in profondità il carico agente sulla fondazione superficiale. Nella pratica costruttiva odierna è ormai invalso l'utilizzo, come elementi rigidi, di viti autofilettanti a tutto filetto, avvitate perpendicolarmente alla direzione della fibratura in modo tale che la testa della vite sia completamente affondata nel legno. Le viti devono essere distribuite in modo uniforme su tutta la superficie d'appoggio per garantire l'uniformità delle trasmissioni del carico. Inoltre tra l'appoggio così rinforzato e l'elemento sottostante, deve essere posta una piastra di acciaio (vedi figura) al fine di garantire che la trasmissione dei carichi all'interno della trave avvenga effettivamente tramite gli elementi di rinforzo.

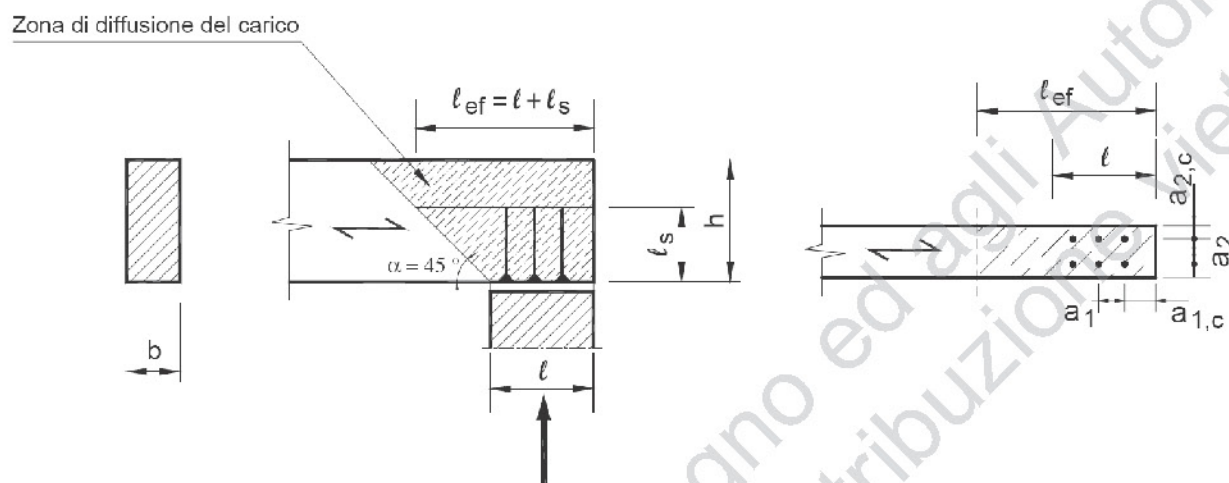


Figura 21 Rinforzo strutturale nella zona di appoggio

Il dimensionamento di questi sistemi di rinforzo non è attualmente regolamentato da alcun documento normativo, tuttavia sono stati recentemente proposti alcuni modelli di calcolo per queste applicazioni riportati anche nei certificati dei produttori di viti a tutto filetto.

3.1.2. Interazione con l'involucro e struttura sottostante

La presenza di una trave di colmo crea comunque delle interazioni importanti con l'involucro (pacchetto di copertura e strato di coibentazione) e con la struttura di coronamento (cordolo).

Per quanto riguarda le interazioni con la struttura di coronamento (cordolo), occorre tenere presente le problematiche nella realizzazione di un cordolo date dalla presenza dei timpani laterali.

La necessità di "chiudere" il cordolo di coronamento anche nei tratti corti del perimetro murario crea dei problemi sia di natura esecutiva che statica.

Di seguito sono illustrate due possibili soluzioni.

La soluzione di **cordolo orizzontale** può determinare dei problemi funzionali, anche per la possibile intersezione con eventuali aperture presenti nel timpano: inoltre la parte sovrastante il cordolo rimane comunque scollegata con gli altri setti murari.

La soluzione con il **cordolo inclinato** può dare luogo a complicazioni di tipo esecutivo, anche nella zona di intersezione con la trave di colmo: tuttavia tali complicazioni sono compensate da una più efficace cerchiatura delle murature perimetrali.

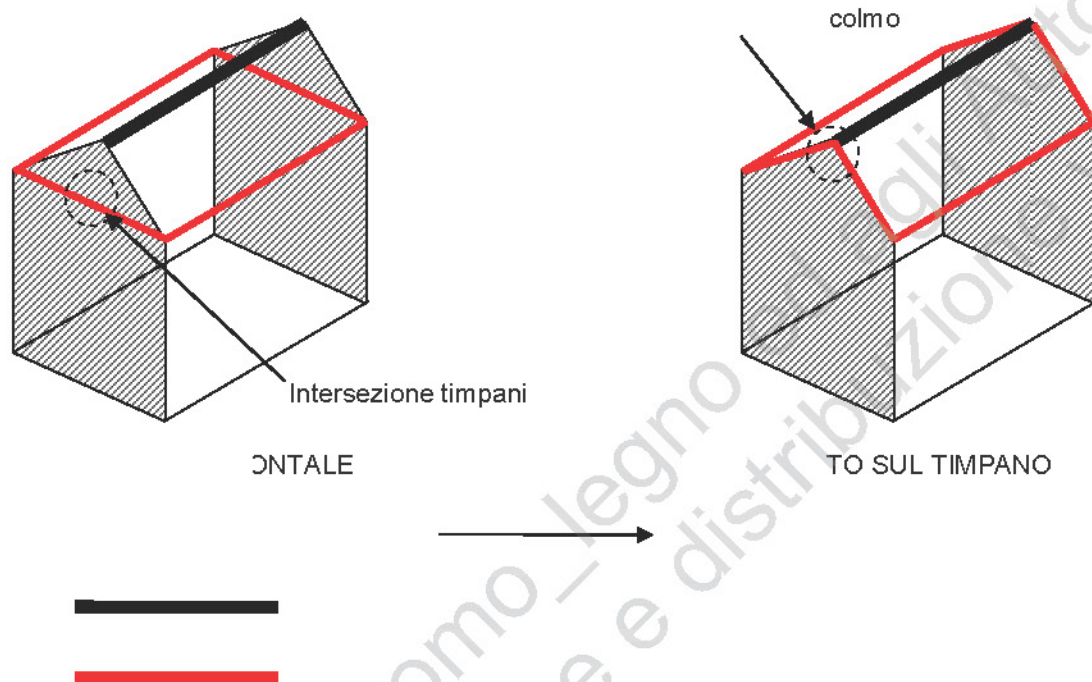


Figura 22 Interazione del cordolo con la copertura e le strutture verticali

Adottando la soluzione con cordolo inclinato, si possono comunque avere delle difficoltà costruttive nella zona di intersezione con la trave di colmo. Essendo infatti questa trave di un'altezza maggiore rispetto alla trave di banchina, appoggiare la trave di colmo direttamente sul cordolo potrebbe creare delle difficoltà nel raccordare le superfici. D'altro lato non è consigliare prevedere un'interruzione del cordolo in c.a. per permettere l'inserimento della trave di colmo.

Una possibile soluzione è illustrata in figura, dove si prevede una riduzione della sezione nel tratto a sbalzo della trave di colmo, ed una riduzione di sezione del cordolo in c.a. nella zona di intersezione, che rimane quindi continuo senza interruzione.

Con tale soluzione il cordolo può anche fungere da "vincolo torsionale" per la trave principale.

Per quanto riguarda le interazioni con l'involucro (pacchetto di copertura e strato di coibentazione), la trave passante rappresenta comunque un ponte termico inevitabile, che dovrebbe essere quindi opportunamente considerato nei calcoli della dispersione termica. Inoltre nella parte a sbalzo, non venendo posto un pacchetto isolante, occorre prevedere un appoggio "rialzato" delle travi secondarie (si vedano le figure seguenti).

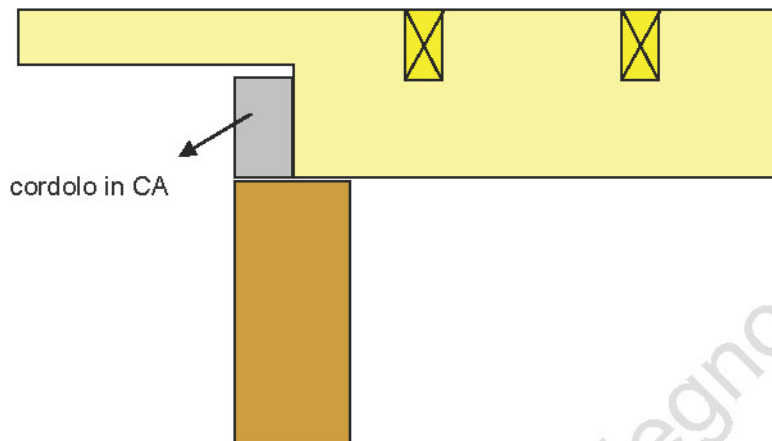


Figura 23 Particolare intersezione cordolo perimetrale trave di colmo

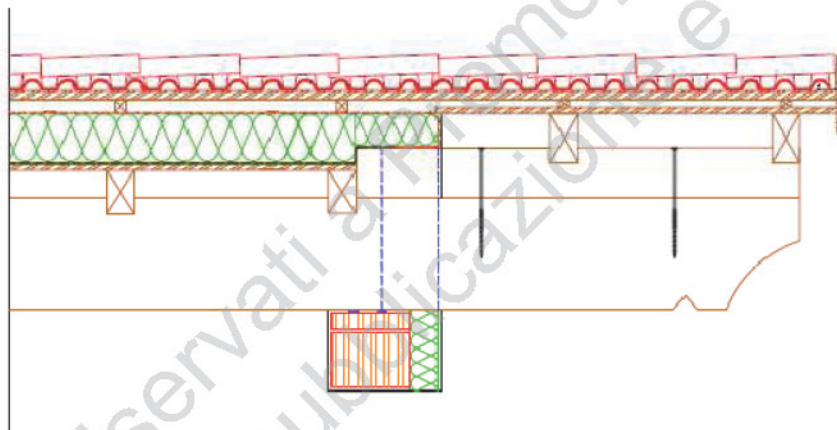


Figura 24 trave di colmo intersezione con l'involucro

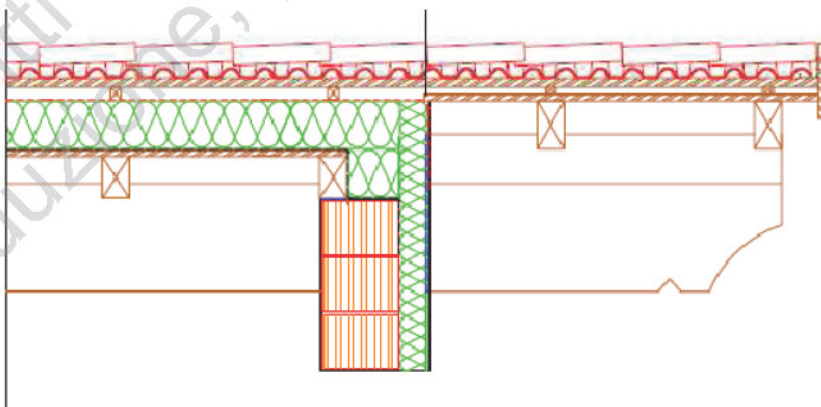


Figura 25 trave di colmo intersezione con l'involucro

3.2 Collegamento trave principale - secondaria (colmo – trave inclinata)

La trave secondaria viene dimensionata per verifiche di freccia e verifiche di resistenza con uno schema statico di trave inclinata in semplice appoggio.

Il collegamento trave principale-secondaria (colmo-arcareccio) può essere concepito in due modi: in appoggio sulla trave principale, oppure in spessore con la trave principale.

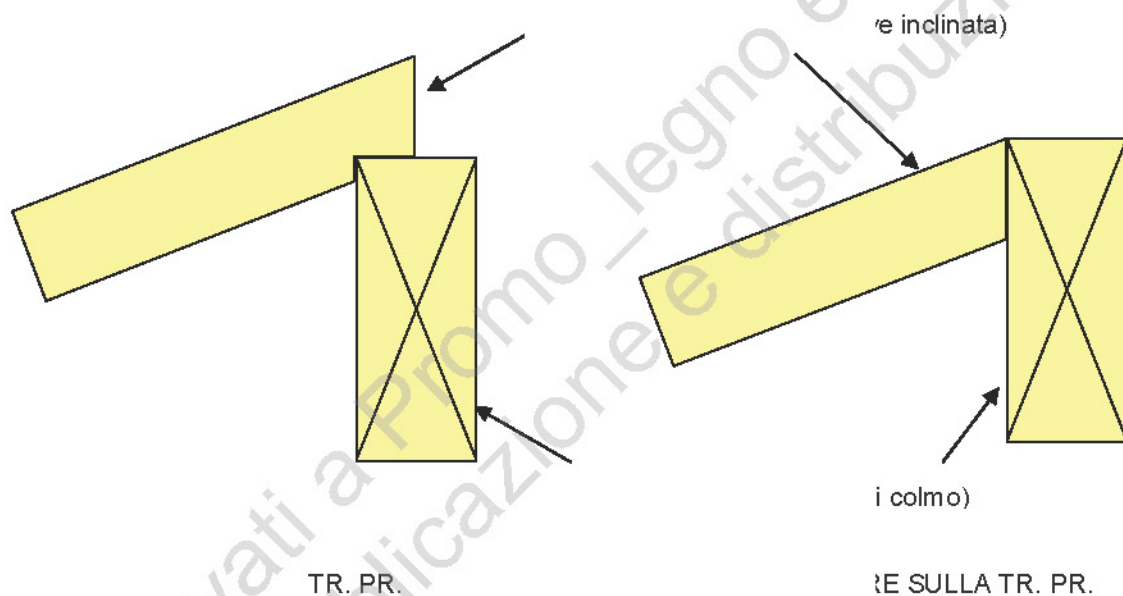


Figura 26 Collegamento tra trave principale e trave secondaria

3.2.1 In appoggio con la trave principale

Il **collegamento in appoggio con la trave di colmo**, nel caso di trave inclinata, determina una sovrapposizione delle geometrie degli elementi strutturali che impone la necessità di intagliare localmente le superfici degli elementi. E' fondamentale che la superficie dell'intaglio sia orizzontale, e quindi la soluzione è quella di creare un intaglio orizzontale sulla trave secondaria. Va evitata la soluzione con un intaglio inclinato sulla trave principale, che non permetterebbe la trasmissione degli sforzi in modo diretto, ma imporrebbe l'inserimento di un connettore che lavora a taglio: l'utilizzo di connettori è comunque necessario per assorbire eventuali forze dirette verso l'alto (forze di sollevamento dovute al vento), oppure forze orizzontali (sisma e vento).

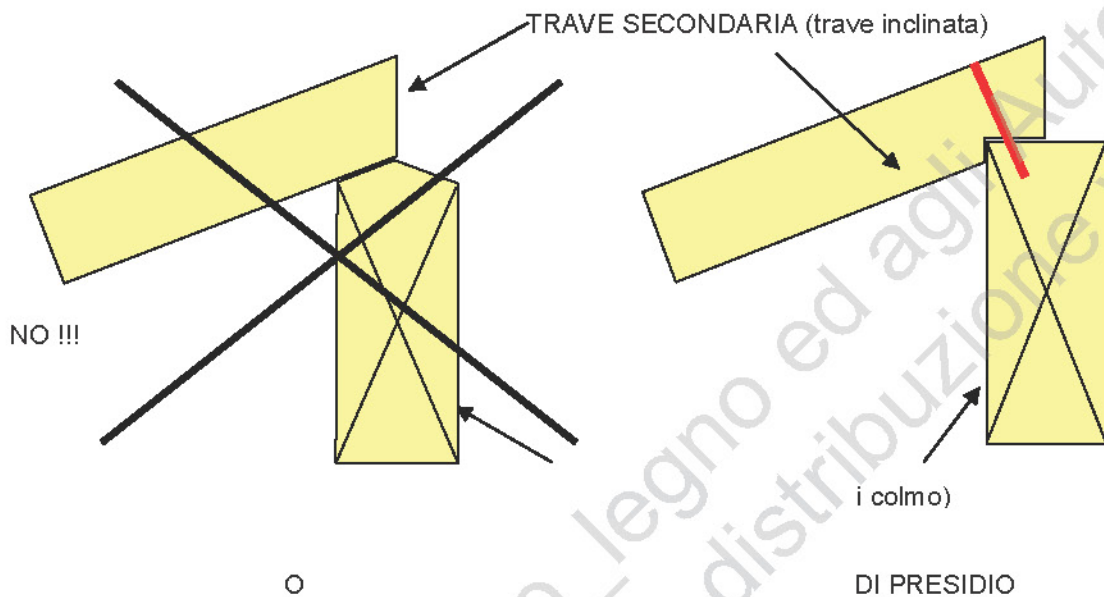


Figura 27 Collegamento tra trave principale e trave secondaria

Questa soluzione può essere più pratica dal punto di vista esecutivo e di montaggio, a spese di un maggiore ingombro della struttura del tetto.

Le verifiche da effettuare sono le seguenti:

- Compressione all'appoggio
- Verifica dell'intaglio
- Dimensionamento elemento di presidio (carico da vento di sollevamento, sisma o vento trasversale)
- Eventuale dimensionamento del rinforzo strutturale nella zona di intaglio

La verifica di compressione sulla superficie di appoggio (sulla trave principale) non dà solitamente problemi, sia perché le reazioni all'appoggio non sono così elevate, sia perché la superficie di appoggio da adottare può essere anche sufficientemente ampia (si può adottare teoricamente fino a metà dello spessore della trave principale).

La verifica più importante in questo caso è quella dell'intaglio: la dimensione geometrica dell'intaglio è determinata dall'ipotesi di avere un appoggio per la trave secondaria pari a metà spessore della trave principale. Sotto queste ipotesi l'altezza dell'intaglio assume il valore $t = b_{TP}/2 \cdot \sin \alpha_F$.

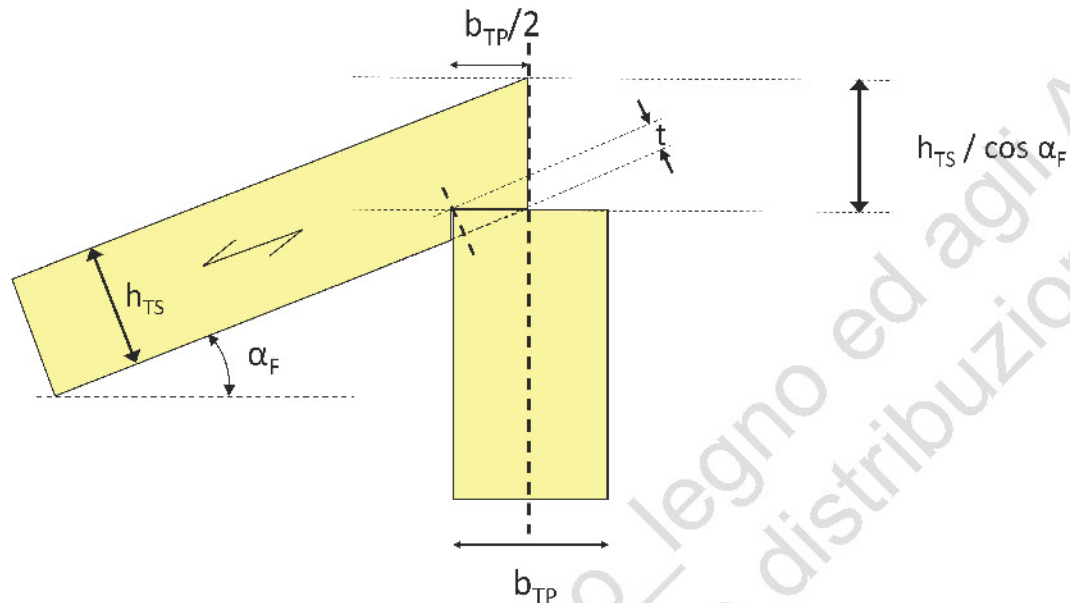


Figura 28 L'altezza dell'intaglio assume il valore $t = b_{TP}/2 \cdot \sin \alpha_F$

Per le verifiche dell'intaglio si possono adottare le relazioni riportate nei diversi documenti normativi per il caso di trave orizzontale intagliata.

Riferendosi alla figura seguente, per membrature a sezione trasversale rettangolare con fibratura parallela all'asse, la disuguaglianza da soddisfare all'estremità intagliata è la seguente:

$$\tau_d = \frac{1,5 \cdot V_d}{b \cdot h_e} \leq k_v \cdot f_{v,d}$$

dove

τ_d è la tensione massima tangenziale di progetto;

$f_{v,d}$ è la resistenza di progetto a taglio;

k_v è un fattore riduttivo;

b è la base della trave;

h_e è l'altezza minima di trave intagliata.

$$k_v = \min \left\{ 1, k_{90} \cdot k_\varepsilon \right\}$$

$$k_{90} = \frac{k_n}{\sqrt{h} \cdot \left(\sqrt{\alpha} \cdot (1 - \alpha) + 0,8 \cdot \frac{c}{h} \cdot \sqrt{\frac{1}{\alpha} - \alpha^2} \right)}$$

dove

$$k_\varepsilon = 1 + \frac{1,1}{\tan \varepsilon \cdot \sqrt{h} \cdot \tan \varepsilon}$$

e

con

h altezza della trave (mm);

c distanza tra il punto di applicazione della reazione all'appoggio e l'angolo dell'intaglio (mm);
 ε inclinazione dell'angolo d'intaglio;
 $\alpha = h_e/h$;

k_n è un parametro da assumersi pari a

$k_n = 5$ per legno massiccio e legno bilam/trilam;

$k_n = 6,5$ per legno lamellare incollato;

$k_n = 4,5$ per legno microlamellare (LVL).

La relazione per k_n è valida per $\alpha \geq 0,5$ e per $c/h \leq 0,4$ (queste limitazioni non valgono per carichi di breve durata e per intagli rinforzati).

Volendo limitare l'altezza del tetto si può intagliare in misura maggiore la trave secondaria, con possibili problemi nel verificare l'intaglio: nell'esempio si propone un intaglio pari a metà dello spessore della trave principale (il massimo ammesso dalla normativa), ed il dimensionamento del rinforzo adottando una vite a filetto completo. Per verificare tale vite ad estrazione occorre fare riferimento alle indicazioni riportate nel paragrafo 2.

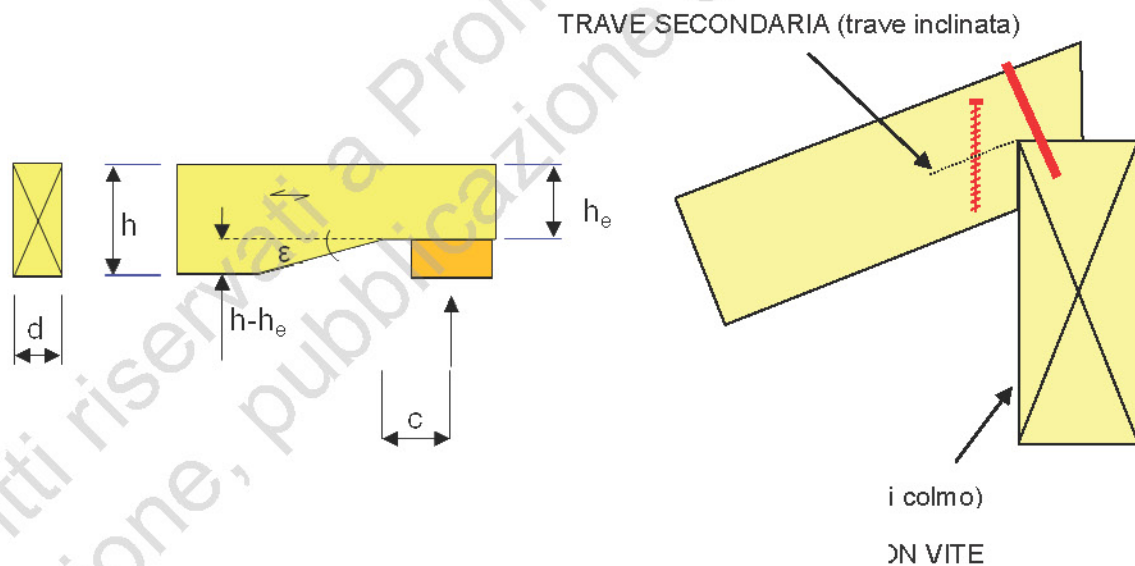


Figura 29 Indebolimento per intaglio nella zona di appoggio

Inoltre è possibile verificare l'elemento di presidio (vite) per forze orizzontali e forze di sollevamento dovute al vento.

3.2.2 In spessore con la trave principale

Il **collegamento in spessore con la trave principale**, riduce l'ingombro della struttura del tetto, ma può essere più impegnativo sia per gli aspetti costruttivi che di calcolo. Si analizzano i seguenti casi:

Tappa a pareti verticali
Coda di rondine
Viti incrociate
Scarpa o staffa metallica

Tappa a pareti verticali

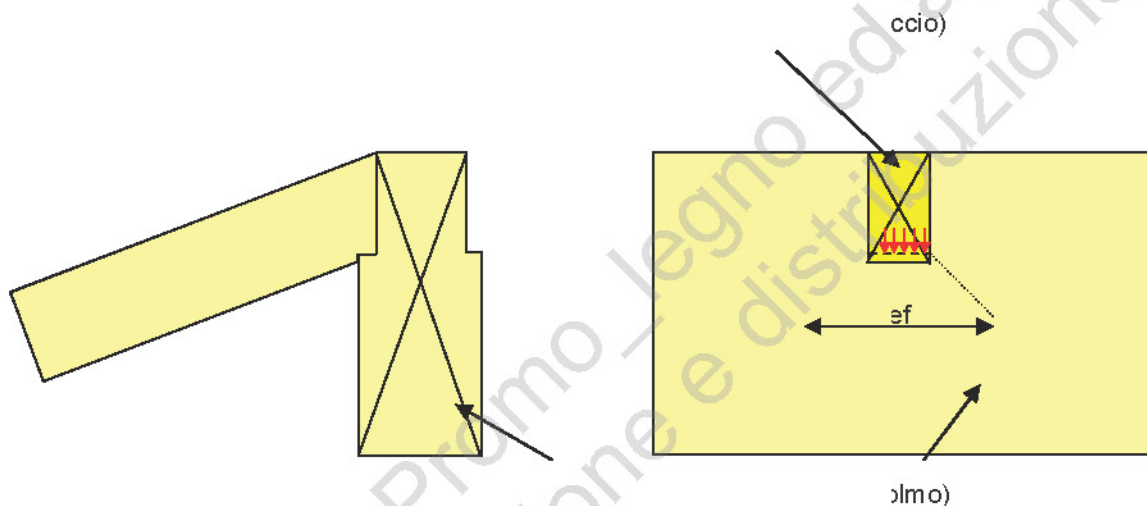


Figura 30 Soluzione con tasche a pareti verticali

Questa soluzione obbliga ad eseguire sia un intaglio della trave principale (tasca nella trave principale), che nella trave secondaria. E' tuttavia una soluzione abbastanza agevole dal punto di vista costruttivo (non obbliga all'utilizzo di supporti durante il montaggio).

Le verifiche principali di questo collegamento sono: verifica di compressione all'appoggio; verifica dell'intaglio sulla trave secondaria; verifica della trave principale con sezione ridotta; verifica per carichi appesi.

La dimensione dell'intaglio nella trave principale è dovuto alla verifica per compressione all'appoggio (ortogonale alla fibra per la trave principale) che solitamente impone un intaglio di almeno 2 o 3 cm. Si deve poi tenere in conto anche dell'effetto dell'intaglio sia sulla trave secondaria (intaglio all'appoggio) sia sulla trave principale (riduzione della sezione della trave principale per effetto dell'intaglio). La verifica sulla trave principale impone di rivedere le caratteristiche geometriche della sezione in funzione dell'intaglio (area, momento di inerzia, modulo di resistenza), e quindi di ricontrollare le verifiche di freccia e tensione flessionale.

Poiché la reazione della trave secondaria non si trasmette direttamente all'estradosso della trave principale ma ad una quota inferiore, occorre effettuare le verifiche per carichi appesi previste dalla normativa per controllare la trazione ortogonale alle fibre nella zona di appoggio della trave principale.

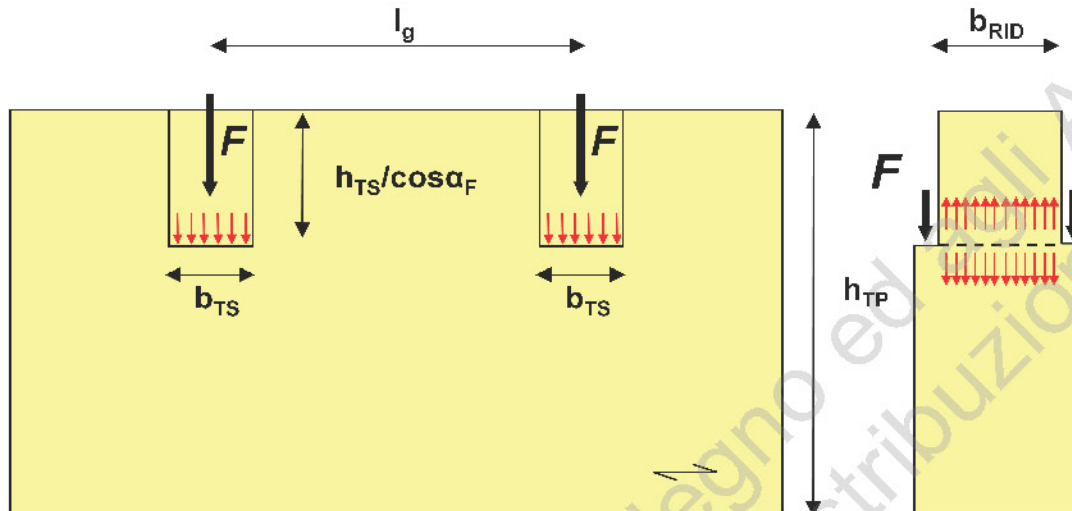


Figura 31 Verifica per trazione ortogonale alle fibre sulla trave principale

In tali tipologie di collegamento la verifica del comportamento al fuoco rappresenta un punto critico; infatti tale resistenza è legata alla profondità dell'appoggio sulla trave principale, che per ragioni costruttive è comunque limitato a 2-3 cm. Considerando una velocità di carbonizzazione delle superfici laterali della trave principale esposte al fuoco pari a 0,7mm/min, questo significa che questo tipo di collegamento non potrà superare i R30 di resistenza al fuoco.

Se si vuole ottenere valori di resistenza al fuoco superiori si dovrà considerare altre tipologie di collegamento per esempio quelle illustrate di seguito con connettori metallici a scomparsa.

Coda di rondine

La coda di rondine può essere vista come una variazione del collegamento descritto in precedenza. In questo caso le pareti del tenone presenti sulla testa della trave secondaria non sono verticali ma presentano un doppia inclinazione secondo gli angoli α_c ; β_c come illustrato in figura.

L'inclinazione α_c delle pareti del tenone caratterizza la tipica conformazione "a coda di rondine" del giunto, il cui scopo è consentire un minimo grado di resistenza allo sfilamento della trave secondaria dalla propria sede di appoggio. L'inclinazione β_c delle pareti verticali ha lo scopo di consentire una più efficace distribuzione degli sforzi tra la superficie del tenone nella trave secondaria e la superficie della tasca presente nella trave principale.

I vantaggi di questo tipo di collegamento sono gli stessi del collegamento a tappa con pareti verticali: si riesce infatti ad affiancare la trave secondaria a quella principale con operazioni di montaggio piuttosto semplici.

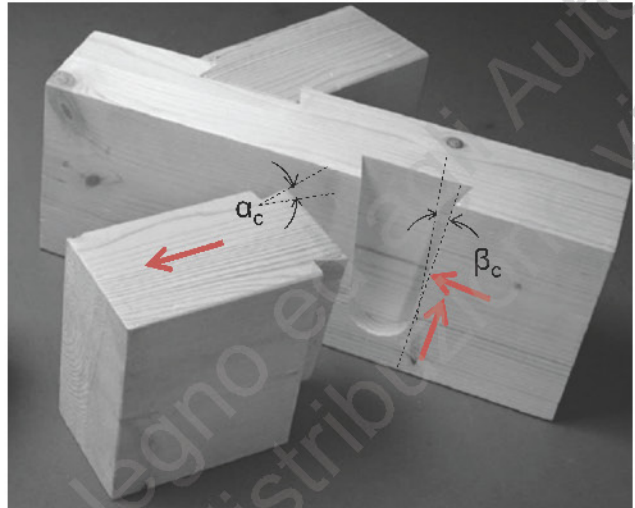
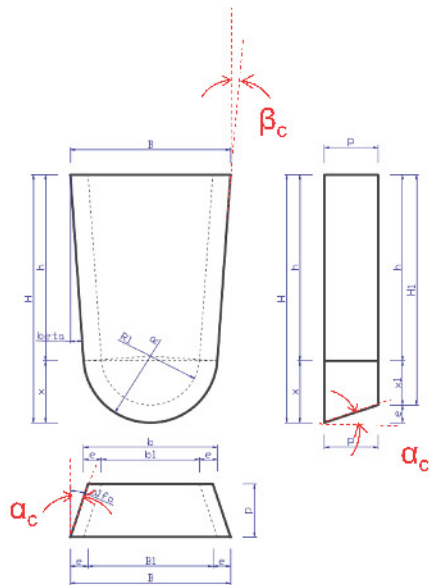


Figura 32 Esempi di collegamento a coda di rondine in una copertura e geometria del tenone

Il collegamento a coda di rondine tradizionalmente presente sia nella carpenteria lignea tradizionale sia nella falegnameria, ha ritrovato recentemente un'ampia diffusione grazie alla diffusione delle macchine a controllo numerico, che consentono di realizzare la geometria del nodo con minime tolleranze di esecuzione.

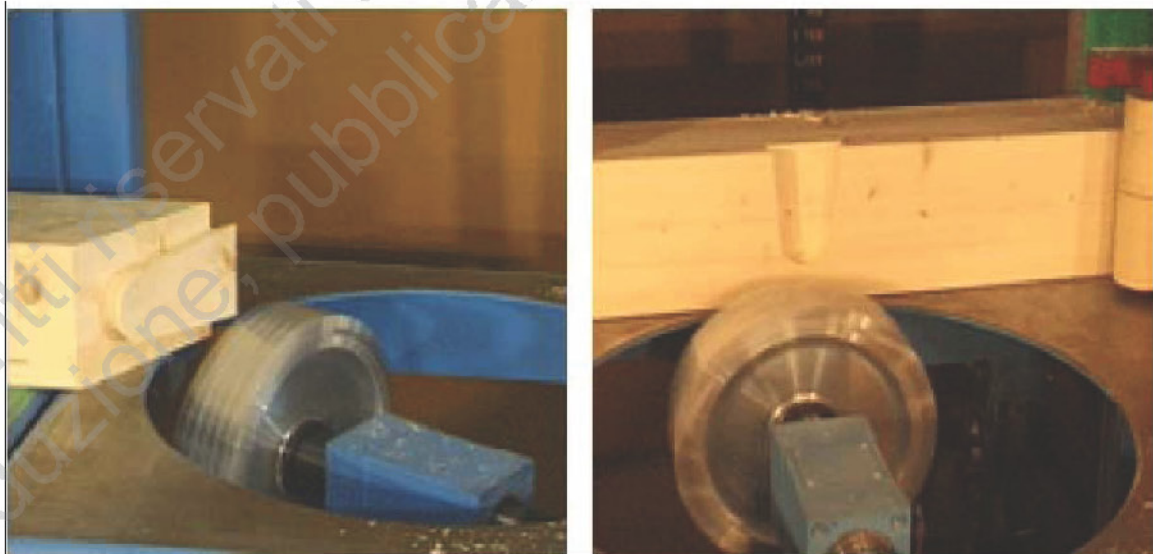


Figura 33 Lavorazione della coda di rondine con macchina a controllo numerico: testa delle trave secondaria; tasca presente sulla trave principale

Esistono tuttavia dei limiti legati alla grandezza ed alla forma delle travi che la macchina a controllo numerico può lavorare. Sempre in relazione alla modalità di lavorazione delle macchine a controllo

numerico, esistono inoltre delle grandezze del giunto che rimangono fisse. I limiti dimensionali e le grandezze fisse del giunto sono in funzione della tipologia di macchina a controllo numerico.

Le verifiche sono analoghe a quelle della tappa a pareti verticali. Occorre naturalmente tenere in conto della geometria particolare della coda di rondine nella definizione dell'area resistente a taglio, e della superficie di appoggio.

Data la presenza di pareti non verticali ma inclinate, si possono avere due diversi meccanismi di trasmissione dei carichi diversi in funzione della geometria della zona bassa del giunto a coda di rondine.

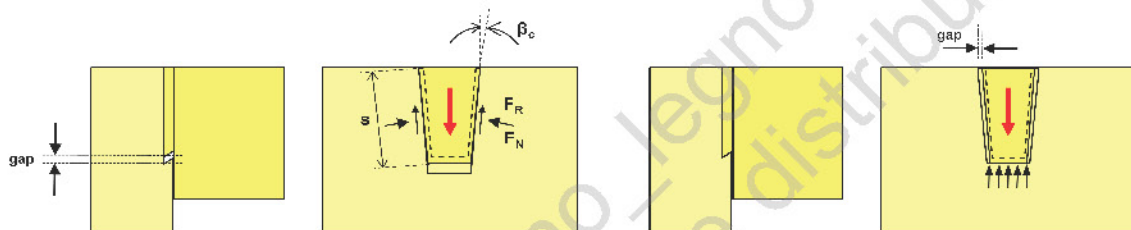


Figura 34 Meccanismi di trasmissione dei carichi in funzione della geometria della coda di rondine

Se esiste un gap sufficiente tra la superficie inferiore del tenone e la superficie inferiore della tasca nella trave principale, allora la trasmissione degli sforzi avviene lungo le pareti inclinate e non nella zona inferiore del tenone. Questo migliora la verifica per carichi appesi della trave principale (infatti la risultante dei carichi si sposta un po' verso l'estradosso della trave), però impone una verifica per compressione ortogonale alla fibra delle pareti laterali del tenone.

Indicato come F_N la forza che si trasmette per contatto tra le superfici verticali inclinate del tenone e la superficie della tasca nella trave principale, si può ricavare il valore della forza di attrito tra le pareti.

$$F_R = \mu \cdot F_N$$

Dove si assume solitamente come coefficiente di attrito tra le superfici di legno il parametro $\mu = 0,3$.

Le componenti verticali delle forze F_N e F_R equilibrano la forza F di appoggio, per cui si ha:

$$F = 2 \cdot (F_N \cdot \sin \beta_c + F_R \cdot \cos \beta_c) = 2 \cdot F_N (\sin \beta_c + \mu \cdot \cos \beta_c)$$

Da cui si ricava il valore della forza F_N che si trasmette alle pareti verticali inclinati.

$$F_N = \frac{F}{(\sin \beta_c + \mu \cdot \cos \beta_c)}$$

Se la geometria del tenone e della tasca sono praticamente coincidenti, allora ci si deve aspettare una trasmissione degli sforzi a compressione solo nella parte bassa del tenone (anche per effetto

del ritiro igroscopico maggiore nel tenone rispetto alla tasca della trave, che determina la formazione di un gap per ritiro tra le pareti verticali inclinate, il caricamento della parte inferiore del tenone). In questo caso la verifica per carichi appesi è analoga a quella già illustrata per la tappa, mentre nella verifica a compressione ortogonale alla fibra la superficie resistente da assumere è la parte bassa del tenone

Viti disposte con una configurazione ad X

Il collegamento tra la trave principale e la trave secondaria avviene tramite l'utilizzo di viti auto foranti a filetto completo disposte con una configurazione ad X ed infisse con lo stesso angolo θ rispetto all'orizzontale (solitamente $\theta = 45^\circ$).

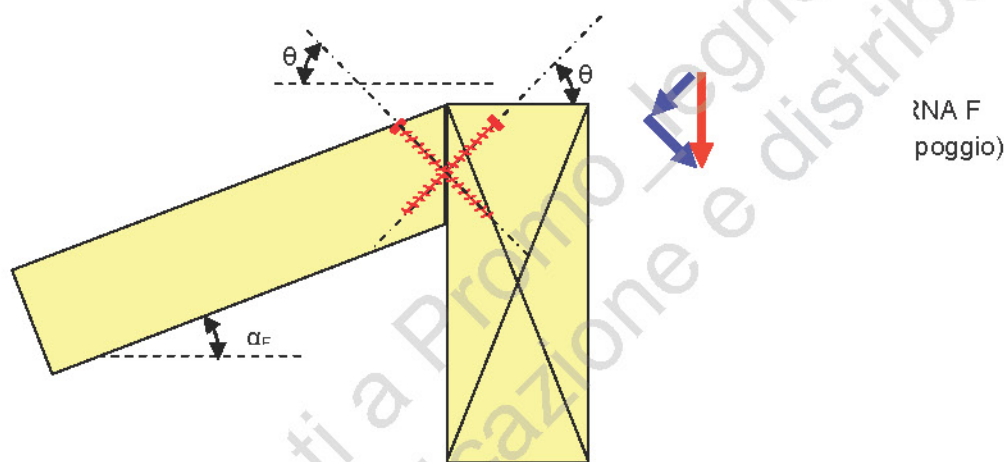


Figura 35 schema di distribuzione delle forze sui connettori

Questa soluzione unisce vantaggi pratici (facilità di montaggio) ad un migliore comportamento meccanico, un migliore comportamento al fuoco ed una maggiore qualità estetica (gli elementi metallici sono a scomparsa).

La vite inserita nella trave principale lavora prevalentemente a trazione, mentre la vite inserita nella trave secondaria lavora prevalentemente a compressione. Nei modelli di calcolo a traliccio adottati per questi collegamenti si suppone che, ai fini della capacità portante, si attivi solamente la resistenza parallela al gambo del connettore: in questo modo le viti fungono da diagonali tese e compresse, e la trasmissione degli sforzi avviene secondo la modalità illustrata in figura.

La forza di compressione e di trazione che agisce parallelamente al gambo delle viti risulta pari a (con $\theta = 45^\circ$):

$$F_T = \frac{F}{2 \cdot \cos \vartheta} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot F$$

$$F_C = \frac{F}{2 \cdot \cos \vartheta} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot F$$

Queste forze devono essere confrontate con i valori di resistenza all'estrazione delle viti, che trattandosi di viti a tutto filetto sono condizionate dalla resistenza allo sfilamento del gambo filettato della vite (la resistenza ad estrazione della testa diventa quindi trascurabile, perché in tali viti la dimensione della testa è ridotta al minimo da consentire l'alloggiamento dell'inserito torx).

Poiché la resistenza allo sfilamento del gambo filettato dipende dall'angolo α' tra la direzione della fibra e l'asse della vite, la resistenza ad estrazione della vite può essere molto diversa se si considera la trave principale o la trave secondaria.

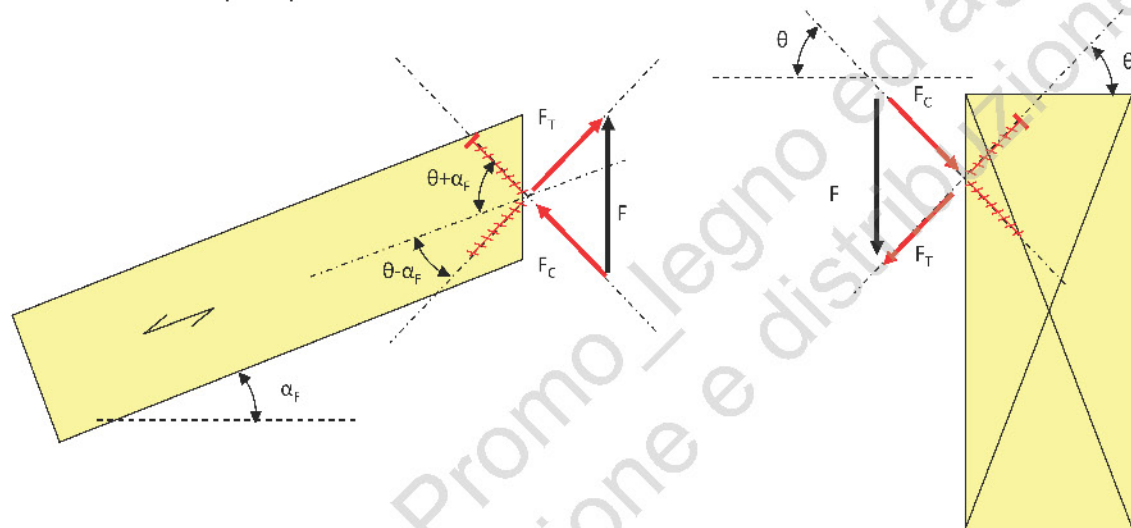


Figura 36 determinazione della resistenza ad estrazione nella trave principale e nella trave secondaria

Resistenza estrazione vite infisse nella trave principale: in questo caso l'angolo α' tra la direzione della fibra e l'asse della vite è pari a 90° , e per quanto illustrato nel paragrafo 2 la resistenza ad estrazione è massima.

Resistenza estrazione vite infisse nella trave secondaria: in questo caso l'angolo α' tra la direzione della fibra e l'asse della vite è pari diverso per la vite a compressione (pari a $\theta + \alpha_f$) e per la vite a trazione (pari a $\theta - \alpha_f$), dove θ è l'angolo di infissione rispetto all'orizzontale, mentre α_f è l'angolo di inclinazione della trave secondaria (pendenza della falda).

Se il collegamento con viti incrociate disposte ad X non interessa tutta l'altezza della trave secondaria, al fine di tenere in considerazione gli stati di trazione ortogonali alla fibra, si deve considerare come se ci fosse un intaglio nella zona di appoggio come illustrato in figura.

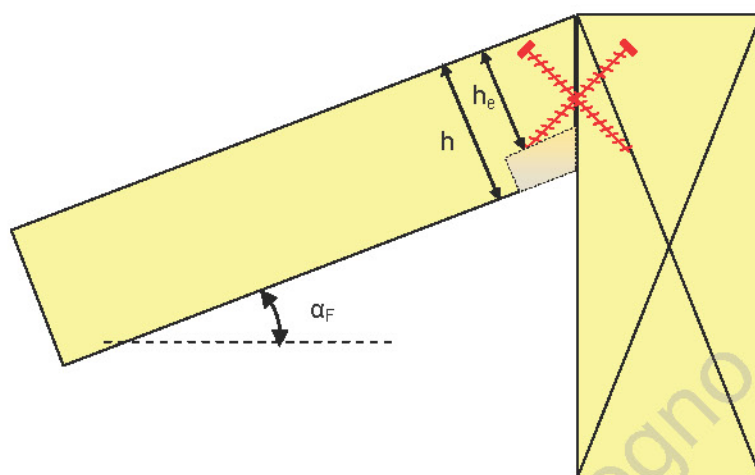


Figura 37 verifica dell'intaglio all'appoggio per un collegamento con viti incrociate ad X

Scarpa o staffa metallica

Nella coperture di piccola o media importanza statica il collegamento tra trave principale e trave secondaria può avvenire per mezzo di elementi metallici bidimensionali piegati a freddo o saldati (scarpe metalliche e staffe a scomparsa).

Tali sistemi sono spesso disponibili a catalogo e dotati di documentazione statica del produttore che certifica i valori minimi di portata in funzione del numero e del tipo di sistemi di connessioni utilizzati.

In questo caso si devono quindi verificare i connettori metallici a gambo cilindrico che si utilizzano nel collegamento, che possono essere sollecitati da azioni assiali oppure da azioni di taglio.

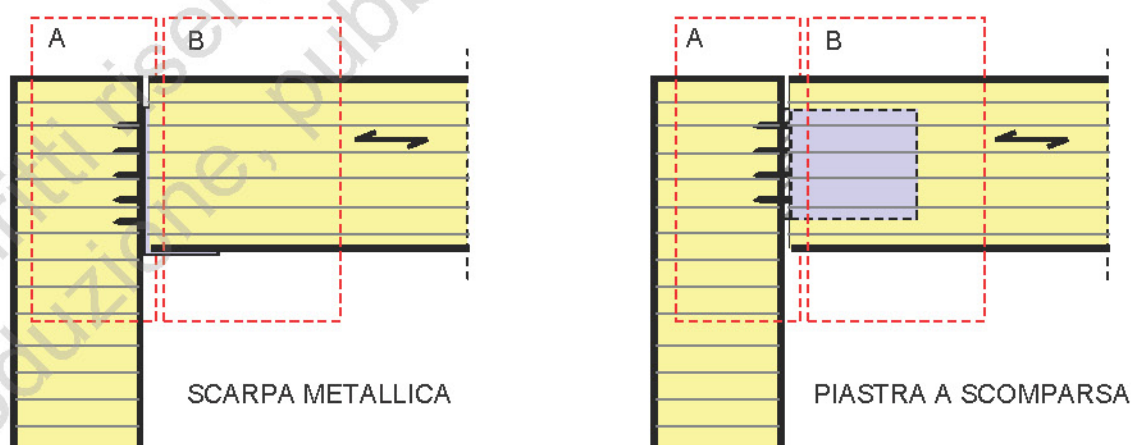


Figura 38 modelli di calcolo per unioni con scarpe metalliche e staffe a scomparsa

Come illustrato in figura, si tratta sempre di dimensionare un collegamento con connettore a gambo cilindrico (chiodo, vite o bullone), tra un elemento metallico (piastra di acciaio o alluminio) ed un elemento ligneo (trave principale – trave secondaria). In particolare si ha sempre un'unione di tipo A

(unione ad un piano di taglio tra la trave principale ed una piastra metallica), ed un'unione di tipo B (unione ad uno o due piani di taglio tra la trave secondaria ed una piastra metallica).

Le forze che agiscono sui connettori a gambo cilindrico devono essere determinate considerando opportuni modelli di trasmissione delle forze tra le diverse parti del giunto. Si consideri per esempio il caso della connessione con scarpetta metallica illustrato in figura.

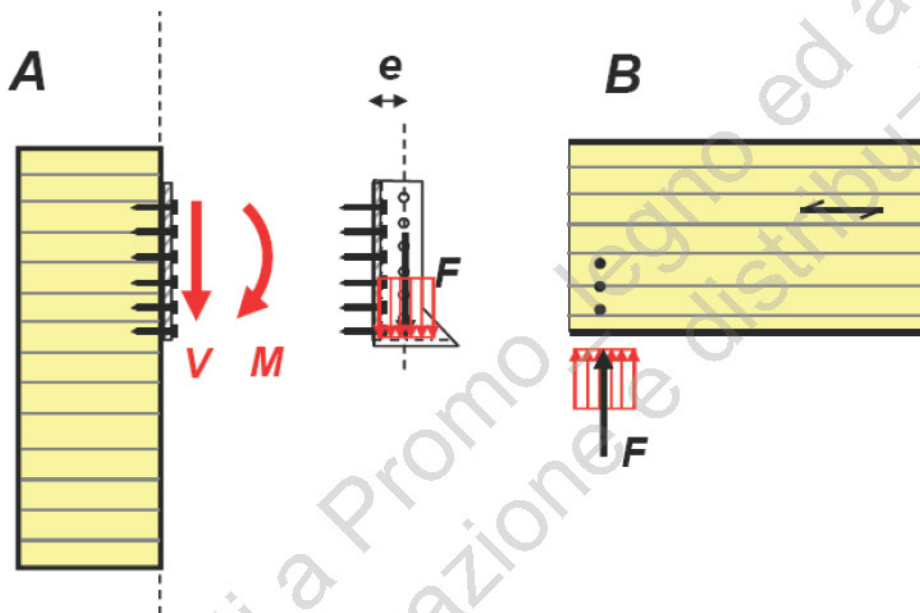


Figura 39 modelli di calcolo per unioni con scarpe metalliche e staffe a scomparsa

Nella parte B del collegamento la trasmissione delle forze dalla trave secondaria alla scarpetta può avvenire per contatto diretto tra la superficie del legno e quella della lamiera, oppure attraverso un sistema di connettori a gambo cilindrico che lavorano a taglio.

La forza di taglio si trasmette attraverso la scarpetta metallica alla trave principale con una eccentricità e : tale eccentricità determina quindi una forza di taglio e momento sulla parte A del collegamento, ovvero del collegamento chiodato tra la scarpetta metallica e la trave principale.

Un possibile modello meccanico di trasmissione degli sollecitazioni esterne sui singoli connettori è illustrato nel dettaglio in figura, dove si considera la forza di compressione concentrata nel punto O, ed una distribuzione lineare delle sollecitazioni di estrazione sui chiodi.

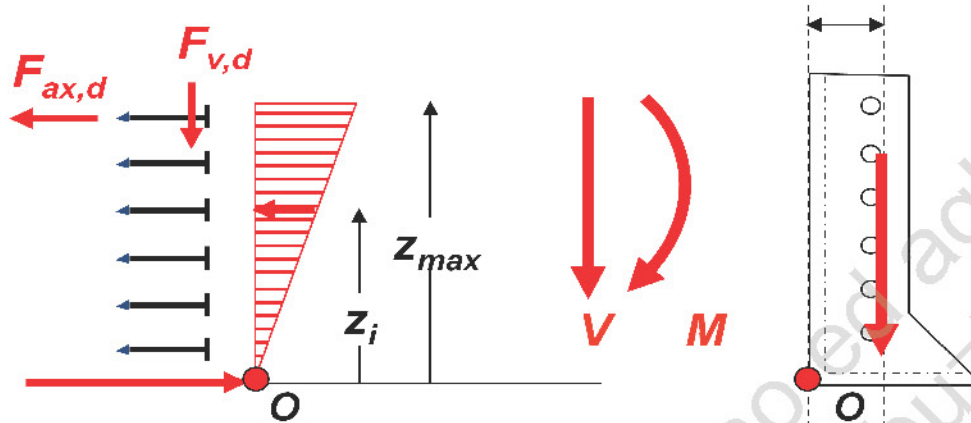


Figura 40 un possibile modello di calcolo per determinare la sollecitazione delle unioni

La forza di taglio assorbita dal singolo chiodo è uguale per tutti i chiodi ed è pari alla forza totale trasmessa dal giunto diviso il numero di chiodi:

$$F_{vj} = \frac{V}{n_i}$$

La forza di estrazione è invece massima sul chiodo più alto: assumendo una distribuzione lineare delle forze di estrazione connettori, si può determinare la forza di estrazione sul chiodo i -esimo in funzione della forza di estrazione del chiodo più sollecitato attraverso la seguente formula:

$$F_{axj} = z_i \cdot \frac{F_{ax,max}}{z_{max}}$$

Per equilibrio alla rotazione intorno al punto O si può determinare l'espressione del momento flettente in funzione della forza di estrazione sui chiodi. Sostituendo la relazione lineare precedente si ottiene quindi in pochi passaggi la relazione tra la forza di estrazione del chiodo più sollecitato ed il momento agente:

$$M = \sum F_{axi} \cdot z_i = F_{ax,max} \cdot \frac{\sum z_i^2}{z_{max}}$$

$$F_{ax,max} = M \cdot \frac{z_{max}}{\sum z_i^2}$$

La verifica per taglio ed estrazione va quindi effettuata sul chiodo più alto (che risulta infatti quello più sollecitato ad estrazione).

$$\left(\frac{F_{ax,d}}{R_{ax,d}} \right)^2 + \left(\frac{F_{v,d}}{R_{v,d}} \right)^2 \cong 1$$

Combinando le espressioni precedenti si può ottenere una formula per la resistenza a taglio dell'intero collegamento associato alla rottura della connessione di tipo A.

$$R_d = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{z_{\max} \cdot e}{R_{ax,d} \cdot \sum z_i^2}\right)^2 + \frac{1}{n^2 \cdot R_{v,d}^2}}}$$

Tale modello può essere applicato anche al caso delle connessioni con staffe a scomparsa.

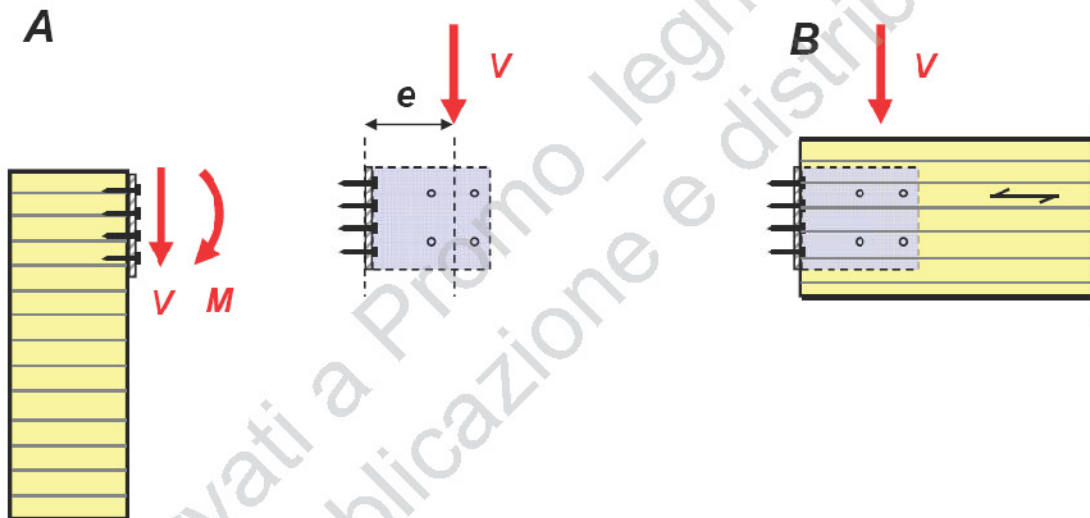


Figura 41 Modello di calcolo di calcolo per unioni con scarpie metalliche e staffe a scomparsa

In tale caso tuttavia, come illustrato in figura, non risulta immediato determinare l'altezza z_{\max} , che influenza direttamente il valore di resistenza della connessione. Si può però assumere a favore di sicurezza z_{\max} pari all'altezza della piastra collegata alla trave principale.

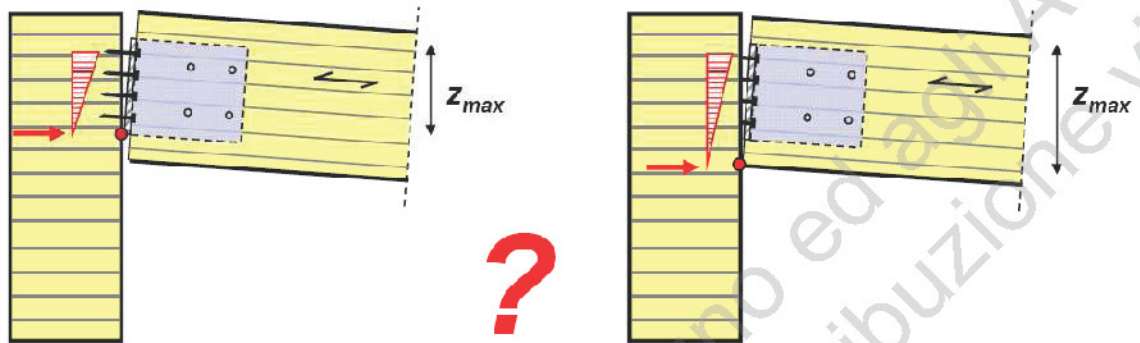
A *Possibili modelli di comportamento*

Figura 42 Modello di comportamento meccanico per la soluzione con staffa a scomparsa

Le considerazioni fin qui fatte si possono adottare anche nel caso di secondaria inclinata. Si adottano in questo caso staffe in alluminio che possono essere tagliate dal costruttore secondo le esigenze di progetto, ovvero con un angolo pari all'inclinazione della falda.

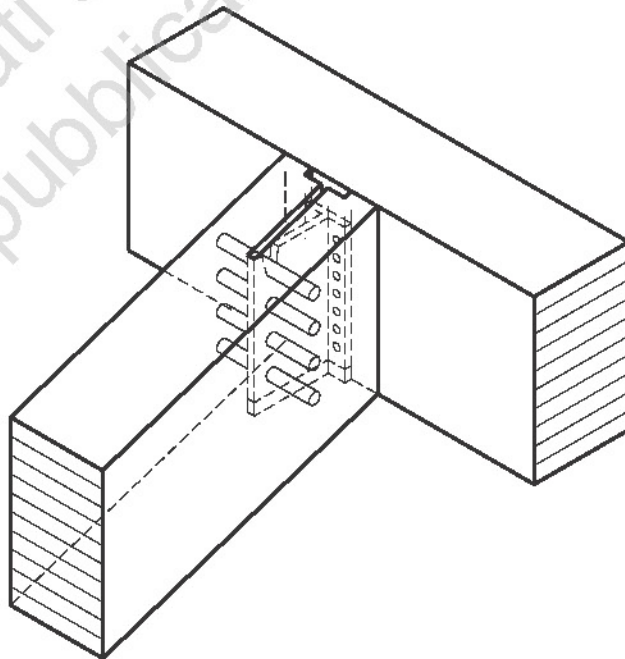


Figura 43 Soluzione con staffa a scomparsa e secondaria inclinata

3.2.3 Interazione con l'involucro e struttura sottostante

Nella zona di appoggio alla trave di colmo l'interazione delle travi secondarie con l'involucro non pone particolari problemi. Un esempio comune di pacchetto di copertura può essere quello illustrato in figura ed illustrato anche in altre lezioni del corso: gli strati di isolante ed il manto di copertura sono posizionati superiormente all'estradosso della secondaria, in modo tale che la struttura sia completamente dalla parte "calda" del pacchetto. Soluzioni alternative possono prevedere invece il posizionamento dello strato isolante tra gli elementi secondari, anche con l'obiettivo di ridurre lo spessore globale del pacchetto (con l'inconveniente relativo alla formazioni di ponti termici tra interno esterno, si veda anche il contenuto delle lezioni B1 e B2).

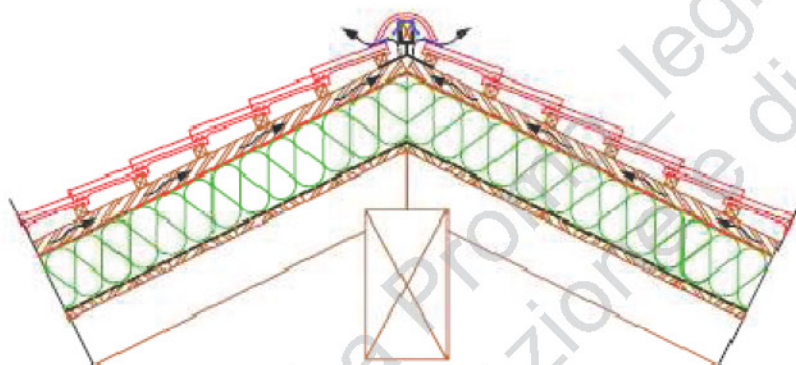


Figura 44 Particolare dell'involucro edilizio nella zona di colmo

3.3 Collegamento trave principale - secondaria (banchina- trave secondaria)

La trave secondaria è "passante" sulla trave di banchina o sul cordolo, che rappresenta quindi un appoggio intermedio tra la zona di campata e lo sbalzo esterno sulla gronda. Come già illustrato è necessario prevedere una superficie di appoggio orizzontale, che si può ottenere attraverso un intaglio della trave secondaria.

La trave di banchina ha un ruolo molto importante in una copertura. È un elemento di sacrificio (evita il contatto della zona intagliata della trave secondaria con superficie dove può esserci maggiore umidità), ma nello stesso tempo ha anche una funzione strutturale (collega le travi orizzontali tra di loro, distribuisce più uniformemente i carichi). L'elemento secondario deve essere opportunamente ancorato alla banchina e la banchina al cordolo sottostante come illustrato nelle figure riportate in seguito. Si possono utilizzare allo scopo per esempio tasselli chimici oppure meccanici.

3.3.1 Verifiche

La presenza di un intaglio sulla trave secondaria ha in questo caso un effetto più limitato rispetto all'appoggio sul colmo. Infatti, per la presenza di un momento negativo all'appoggio, l'effetto di questo intaglio è comunque, dal punto di vista strutturale, limitato.

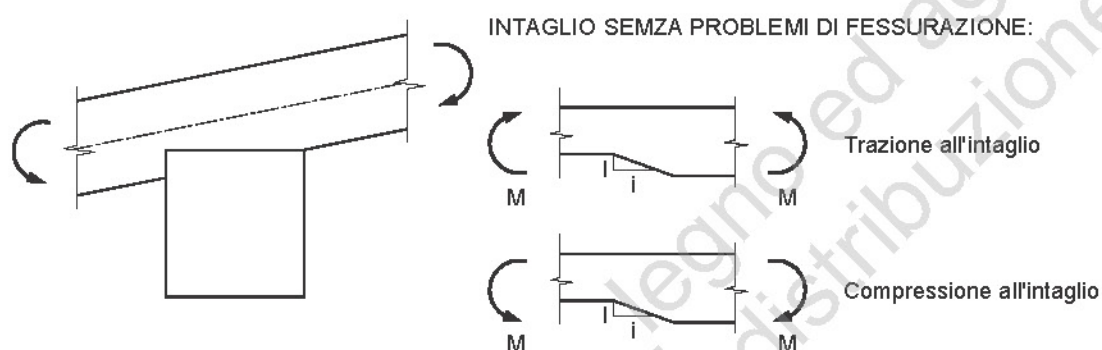


Figura 45 Comportamento meccanico della trave secondaria intagliata nella zona di appoggio con la trave di banchina

Nella verifica allo schiacciamento nella zona di appoggio deve essere effettuata la verifica per compressione ortogonale alla fibra sulla trave di banchina.

3.3.1 Interazione con l'involucro e struttura sottostante

Si possono fare in questo caso considerazioni molto simili a quelle proposte per la trave di colmo. La trave secondaria è comunque un elemento "passante" che quindi interferisce con l'involucro edilizio in particolare con lo strato di coibentazione (ponte termico). In figura viene illustrato il particolare costruttivo nella zona di intersezione con il setto verticale: si noti come lo strato di isolante termico sulla copertura non viene fatto proseguire nella zona di gronda, dove viene sostituito da un elemento ligneo.

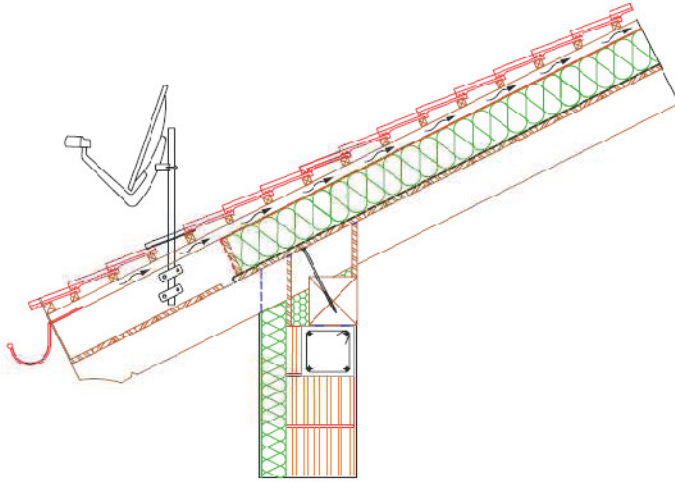


Figura 46 particolare costruttivo nella zona di intersezione con il setto verticale

Al fine di evitare la presenza di un ponte termico nella zona di intersezione tra il setto verticale e la copertura è possibile adottare la soluzione illustrata in figura. La trave secondaria è interrotta in prossimità dell'appoggio di banchina non proseguendo oltre lo sbalzo, consentendo in questo modo di chiudere completamente l'involucro con uno strato di coibente termico. Lo sbalzo di gronda è ottenuto invece con un elemento a mensola fissato superiormente alla trave secondaria per un tratto adeguato ad assorbire il momento flettente indotto dalla gronda.

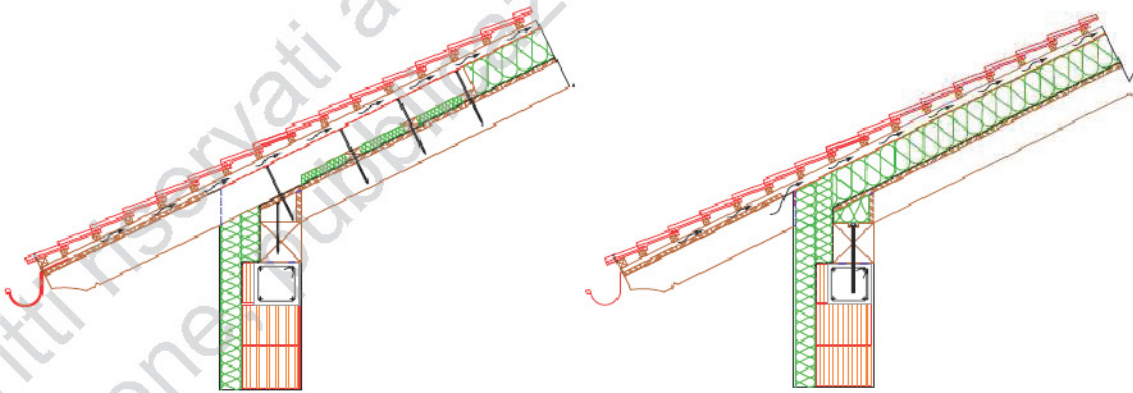


Figura 47 particolare costruttivo nella zona di intersezione con il setto verticale.

4 Tetto a padiglione non spingente

Il tetto a padiglione i setti verticali a timpano sono sostituiti dalla falde inclinate del tetto. Se la struttura del tetto è realizzata con travi secondarie che poggiano su di un trave centrale di colmo e sulle travi di banchina sul perimetro, le considerazioni sino qui fatte sui collegamenti tra i diversi elementi strutturali si possono applicare anche al caso della copertura a padiglione.

Si deve tuttavia osservare in questo caso che la mancanza dei setti laterali a timpano impone la necessità di introdurre degli appoggi supplementari per la trave di colmo. Vengono in figura illustrate due soluzioni costruttive per realizzare gli appoggi: setti o pilastri intermedi; elementi di trave reticolare non rettilinee (capriate).

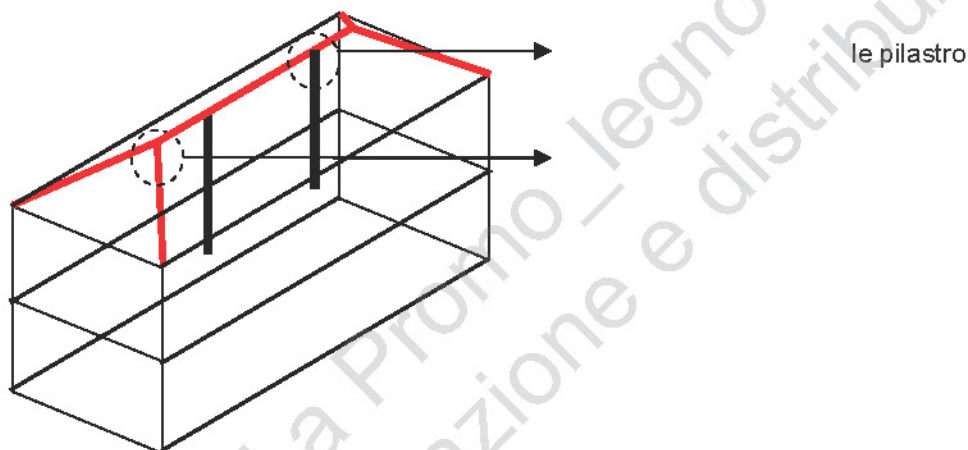


Figura 48 Soluzione con setti o pilastri intermedi

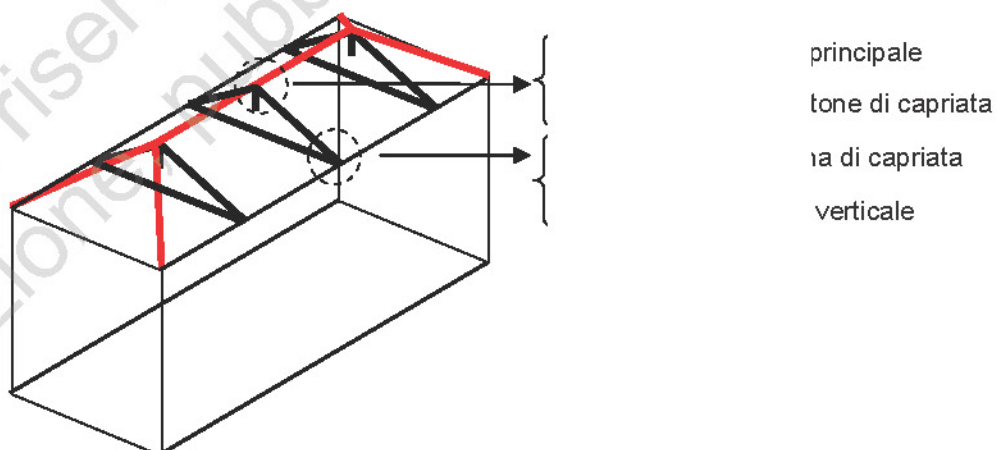


Figura 49 Soluzione con capriate

Le due soluzioni costruttive possono porre diversi problemi di definizione e di dimensionamento dei particolari di collegamento.

Nel caso della soluzione a pilastri il particolare dell'appoggio può essere analizzato in maniera analoga a quanto fatto in precedenza. Si tratta infatti di verificare l'appoggio della trave di colmo per compressione ortogonale alle fibre (con eventuale progettazione di sistemi di ritenuta e di ritegno torsionale).

La soluzione con capriata intermedia può offrire soluzioni interessanti perché permette di realizzare più appoggi per la trave di colmo, senza condizionare la compartimentazione degli spazi sotto la copertura. Importante sottolineare la differenza, anche a livello di particolari costruttivi, tra una soluzione "moderna" (capriata con collegamenti metallici, con possibilità di rialzare la catena) e tra una soluzione "tradizionale" (capriata con elementi intagliati e collegamenti di carpenteria).

Nel caso della soluzione a capriata devono essere analizzati i nodi di intersezione di questo elemento strutturale con la trave di copertura e con il setto verticale, nonché i nodi interni all'elemento strutturale (nodo puntone-tirante, nodo puntone-puntone).

In entrambe le soluzioni è da definire anche il particolare costruttivo di collegamento tra la trave di colmo e le travi diagonali che formano le falde a timpano inclinato. Si tratta in ogni caso di un giunto a tre vie, ovvero di un collegamento realizzato tra tre aste convergenti (la trave di colmo più i due diagonali).

4.1 Nodo a tre vie

Molto spesso il nodo a tre vie si pone al di fuori della zona di appoggio della trave principale, per cui si tratta di un collegamento alla trave principale dei due diagonali, che può essere realizzato in modi diversi, per esempio attraverso l'utilizzo di piastre metalliche e connettori a gambo cilindrico, oppure senza utilizzare piastre metalliche, ma con solamente connettori cilindrici di grosso diametro passanti lateralmente (vedi in figura).

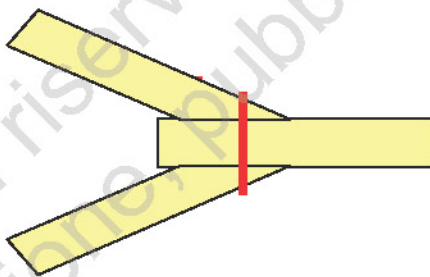


Figura 50 Particolari costruttivi nella soluzione del nodo a tre vie

Nella soluzione con bulloni passanti lateralmente bisogna osservare che gli assi dei due elementi, visti sia in pianta che in sezione, presentano un angolo tra loro minore di 90° . Il collegamento viene realizzato senza l'ausilio di piastre metalliche, ma semplicemente con connettori passanti a gambo cilindrico (per esempio bulloni o viti), disposti in una configurazione quindi diversa da quella prevista dalla normativa per le connessioni a gambo cilindrico (per esempio l'inclinazione dell'asse del connettore rispetto all'elemento ligneo non è presa in considerazione dalla normativa per definire la resistenza al rifollamento).

Occorre in ogni caso sottolineare che in entrambe le soluzioni il nodo a tre vie si configura come un vincolo a cerniera, non in grado quindi di assorbire sollecitazioni di momento flettente.

4.2 Soluzione con capriata moderna

La soluzione con capriata moderna permette diversi vantaggi non solo strutturali rispetto alla capriata tradizionale: si pensi ad esempio alla possibilità di rialzare il tirante e quindi di migliorare la funzionalità degli spazi sotto la copertura.

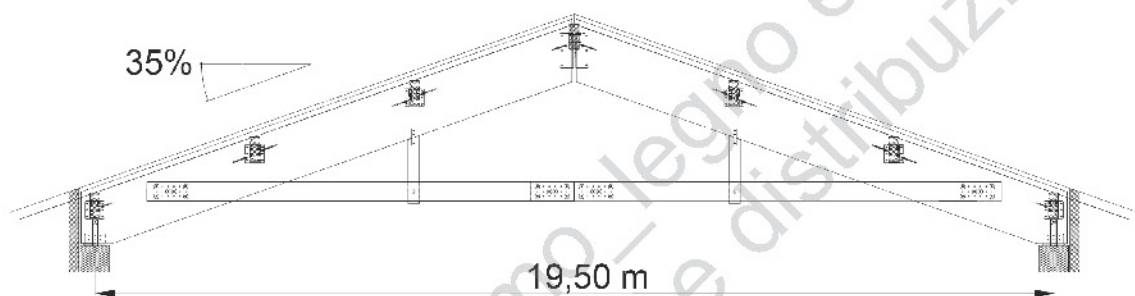


Figura 51 Soluzione con capriata moderna

Il nodo tra la capriata e la trave principale può essere realizzato interrompendo la trave principale come nella figura.

Il nodo puntone – puntone di capriata può essere realizzato con un unico elemento metallico utilizzato anche per collegare la trave principale.

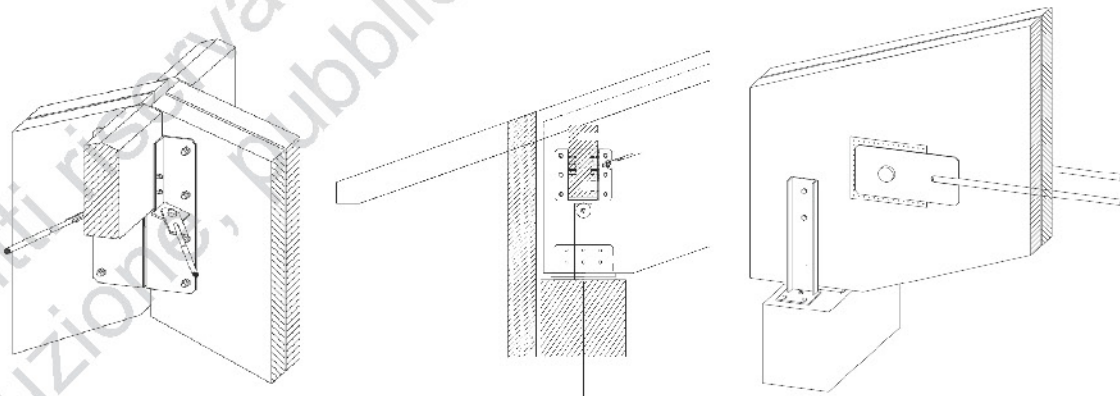


Figura 52 Particolari costruttivi

Per quanto riguarda il nodo capriata- setto verticale la soluzione “moderna” permette meglio di mantenere la struttura all’interno dell’involucro, con maggiori vantaggi, come illustrato nelle figure precedenti.

Il tirante rialzato deve essere analizzato in maniera corretta dal punto di vista del calcolo, tenendo in conto della concentrazione degli sforzi che si determina sui punti (momento flettente sui puntone, verifica del collegamento).

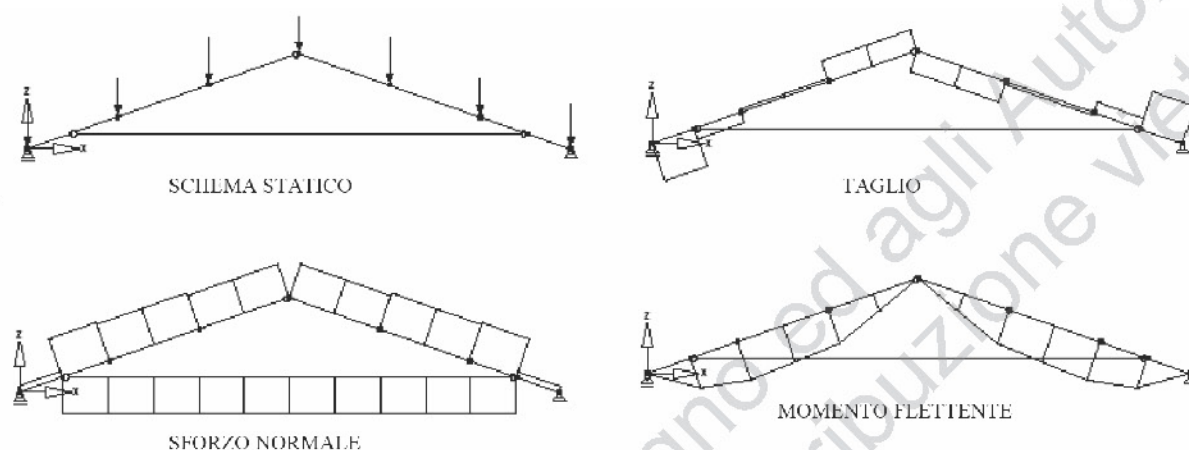


Figura 53 Esempio di analisi strutturale di una capriata

Maggiori dettagli su queste verifiche sono riportati nell'esempio della lezione E (esempio di calcolo).

4.3 Soluzione con capriata tradizionale

La soluzione di capriata tradizionale può essere molto interessante anche per il valore estetico e culturale, però non è sempre strutturalmente così efficiente. I collegamenti di carpenteria per esempio determinano un indebolimento degli elementi strutturali e delle eccentricità nella trasmissione dei carichi che possono condizionare il progetto e la geometria della capriata. Inoltre non sono possibili soluzioni a catena rialzata, quindi con un limite sull'utilizzo degli spazi inferiori.

Il nodo tra la capriata e la trave principale può essere realizzato con la trave principale in appoggio sul monaco come nella figura; il nodo puntone – puntone di capriata con nodi di carpenteria.

Per quanto riguarda il nodo capriata- setto verticale nella soluzione tradizionale è più complicato mantenere la struttura all'interno dell'involucro, per la necessità di avere una lunghezza del tacco sufficiente (per esempio sarebbe da evitare che la testata della catena fuoriesca dall'involucro, si veda per esempio la seguente figura).

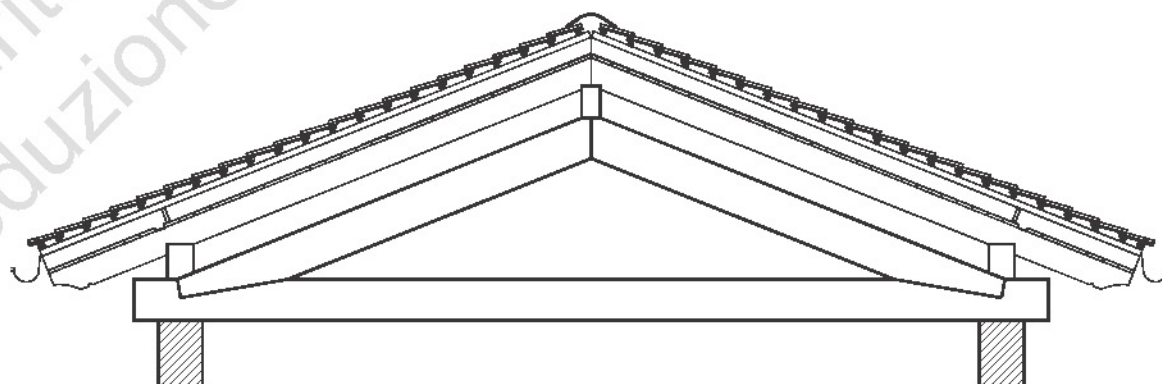


Figura 54 Esempio di capriata tradizionale ed interazione con la trave di colmo

Nel caso di capriata "tradizionale" il nodo puntone- catena di capriata è un collegamento intagliato puntone-catena. Come illustrato in figura si possono realizzare diverse tipologie di collegamenti a seconda della geometria dell'intaglio: collegamento a dente semplice; collegamento a dente arretrato; collegamento a dente doppio.

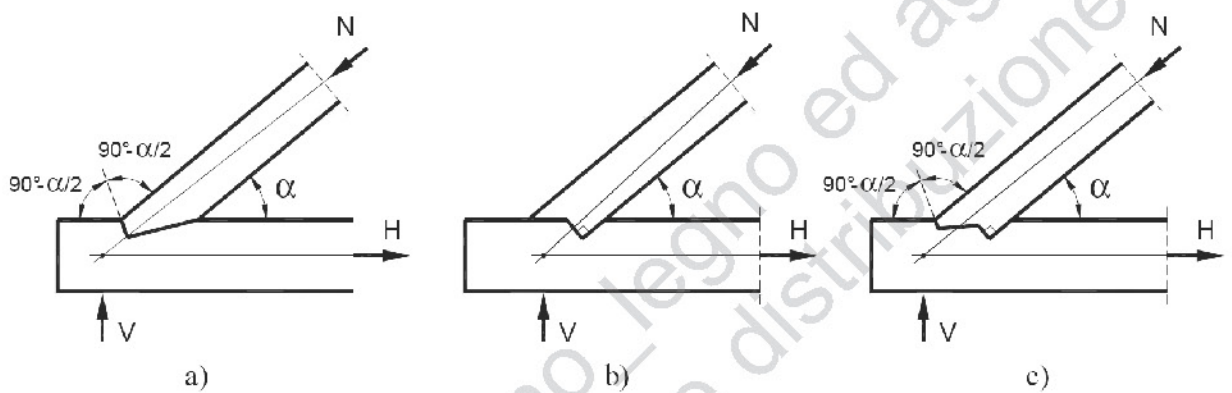


Figura 55 Diverse tipologie di collegamento tradizionale nel nodo puntone-catena

5. Altre soluzioni costruttive spingenti

Tale tipologia strutturale si configura come una struttura di tipo spingente, dove, come illustrato in figura, la presenza di forze verticali determina delle componenti di spinta orizzontale ai vincoli. Tale componente può anche essere molto alta e quindi non può essere assorbita dalle pareti verticali. Nel caso delle strutture a setti portanti in muratura il divieto di utilizzare strutture spingenti è esplicitamente prescritto dalla Norme Tecniche per le Costruzioni al punto 7.8.1.4 (Criteri di progetto e requisiti geometrici): *“Le strutture costituenti orizzontamenti e coperture non devono essere spingenti. Eventuali spinte orizzontali, valutate tenendo in conto l'azione sismica, devono essere assorbite per mezzo di idonei elementi strutturali.”*

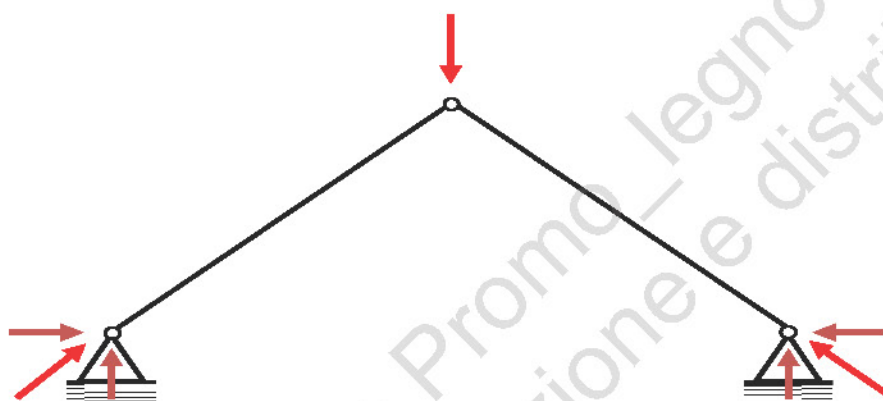


Figura 56 Schema statico di una configurazione spingente

La spinta orizzontale presente al piede dei puntoni deve essere quindi assorbita e trasmessa agli elementi sottostanti mediante strutture idonee per esempio delle catene orizzontali atte ad assorbire la spinta. Nei piani mansardati questo si può ottenere sfruttando come elemento atto ad assorbire la spina dei puntoni sull'ultimo solaio orizzontale (in questo caso l'imposta della copertura deve quindi coincidere con l'ultimo solaio). Si veda in figura una possibile soluzione di intaglio a mezzo legno per il collegamento in sommità dei puntoni.

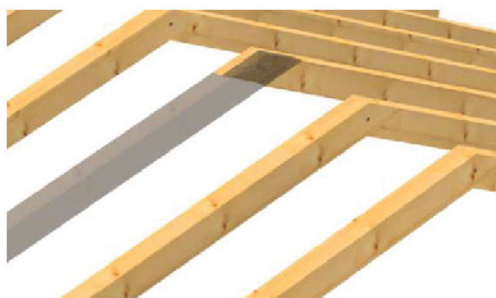


Figura 57 Particolari di collegamento per il tetto a puntoni