

DOCUMENTO redatto da **AEDES Software** (05.08.2024)

a cura di: Ing. Francesco Pugi, Ing. Alessio Francioso

MODELLAZIONE DELLE CAPRIATE IN Aedes.PCM

LA STRUTTURA 'CAPRIATA'

Negli edifici monumentali, in particolare nelle chiese, è frequente la presenza di coperture lignee impostate su capriate.

Le capriate sono strutture reticolari piane in legno utilizzate come sostegno di una copertura a falde inclinate. La capriata è in grado di incassare internamente le spinte orizzontali dovute alla copertura inclinata: grazie alla sua struttura triangolare, l'elemento orizzontale (catena) compensa le spinte degli elementi inclinati (puntoni): è pertanto una struttura non spingente, aspetto molto importante nei riguardi della stabilità delle pareti murarie su cui si imposta.

La capriata è concepita come elemento strutturale semplicemente appoggiato sui muri, formato da due elementi obliqui (puntoni), legati fra loro nel vertice e mantenuti fissi in basso da un'asta orizzontale (catena), creando di fatto un triangolo praticamente indeformabile.

Si tratta infatti di una struttura piuttosto rigida (essendo reticolare) e di costruzione relativamente semplice, poiché i collegamenti fra le aste sono affidati a giunti realizzati con semplici intagli (giunti di carpenteria) [1].

Oltre ai puntoni e alla catena, sono presenti elementi strutturali secondari, come si può osservare nella capriata Palladiana semplice, che copre luci fino a 20 m. circa (fig. 1).

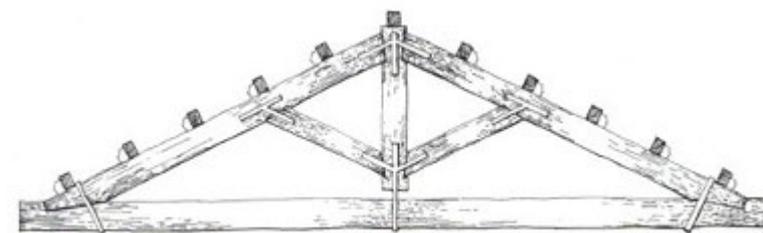


Figura 5-38. Capriata semplice alla Palladio.

Fig. 1. Capriata semplice alla Palladio (da [1])

Il triangolo principale è formato dai due puntoni compressi e dalla catena tesa, mentre il 'monaco' è un elemento verticale che raccorda e chiude le spinte dei puntoni. Sul monaco vengono anche trasferite le spinte delle due 'saette', aste con inclinazione opposta a quella dei puntoni, aventi la funzione di limitare le sollecitazioni flettenti agenti sui puntoni (fig. 2).

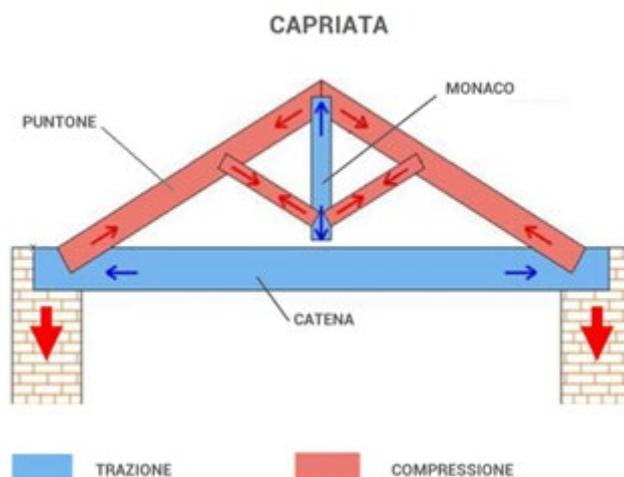


Fig. 2. Sollecitazioni di trazione e di compressione nelle aste di una capriata (da [2])

A partire dagli schemi di base, sono state costruite anche capriate con maggiore complessità, soprattutto per coprire luci superiori a 20 m.; in fig. 3 si riportano le principali tipologie di capriate presenti in edifici civili e monumentali.

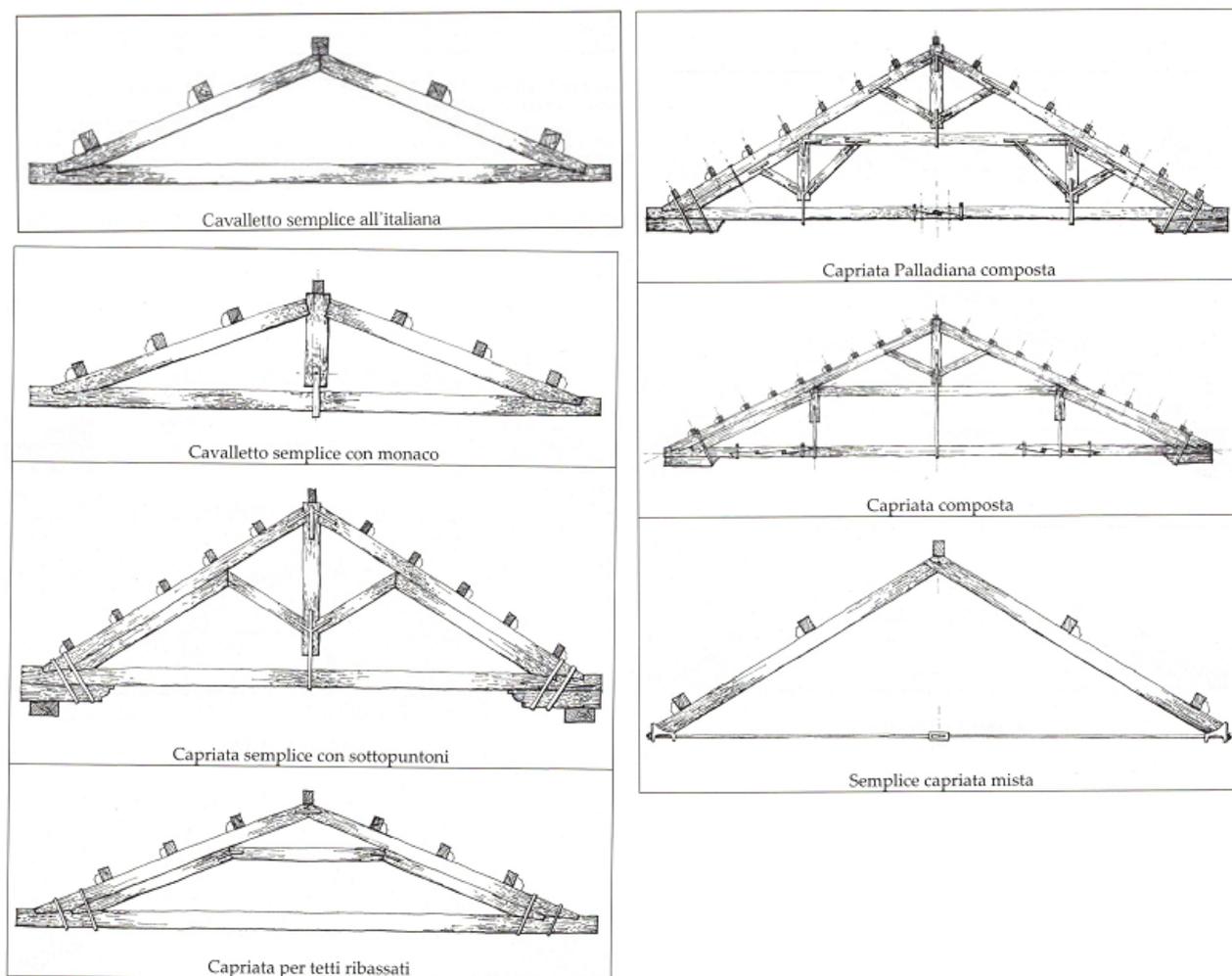


Fig. 3. Tipologie di capriate (da [1])

Più in dettaglio, dal punto di vista dello schema statico, la capriata, nella forma semplice di cavalletto all'italiana, è un telaio a 3 cerniere:

- le forze verticali vengono trasmesse agli appoggi tramite gli sforzi di compressione nei puntoni; la catena, che collega alla base i due puntoni, assorbe la componente orizzontale dello sforzo: in tal modo, sui muri di imposta si scaricano solo forze verticali.
- Minore è l'inclinazione delle aste, maggiore è la componente orizzontale applicata alla catena, e, di conseguenza, lo sforzo di compressione nel puntone.
- Il dimensionamento delle singole aste risulta così prevalentemente governato dallo sforzo normale. Tuttavia, per la verifica di sicurezza dei puntoni, oltre alle verifiche di stabilità, come per tutti gli elementi compressi, si dovrà tener conto dei momenti flettenti indotti dal carico distribuito in copertura dovuto all'orditura secondaria (=arcarecci disposti parallelamente alla linea di gronda, a sostegno della copertura) (fig. 4).

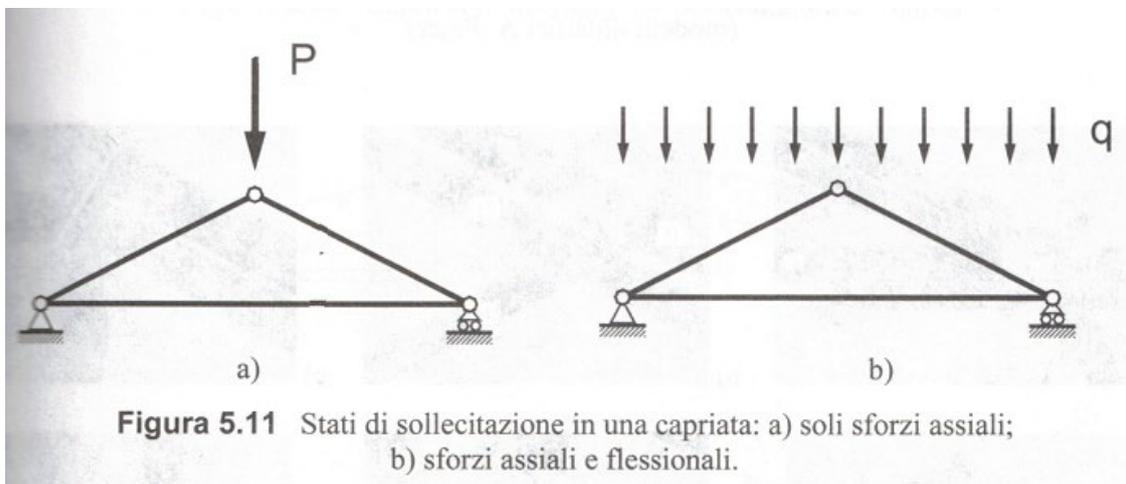


Fig. 4. Sollecitazioni in una capriata elementare (da [3])

Considerando anche la presenza del monaco e delle saette, in generale possiamo osservare che la capriata è soggetta a sforzi di trazione (il monaco e soprattutto la catena), compressione (le saette) e pressoflessione (i puntoni).

E' interessante osservare che il monaco può essere collegato alla catena in due modi differenti [2]:

- con dei ferri ad U o delle cravatte collegate al monaco ma non alla catena, senza quindi connessione tra monaco e catena. Il monaco è debolmente teso ed ha essenzialmente il compito, oltre a quello di limitare la flessione della catena, di assicurare il collegamento tra saette e puntoni e la complanarità della struttura, in quanto collega tutte le aste. Questa connessione è comune dal tardo Rinascimento ed è quella che appare sulla manualistica ottocentesca, ad eccezione della tradizione francese. Tenendo presente il compito del monaco si comprende la possibile spiegazione del nome: il monaco è un elemento che non ha uno scopo apparentemente fondamentale (la statica non viene migliorata sostanzialmente) ma che regola e garantisce silenziosamente il buon andamento di tutto, come fanno i monaci con la preghiera e il loro lavoro intellettuale e materiale;

- con una connessione, più o meno rigida, paragonabile ad un collegamento a cerniera, realizzando una travatura reticolare vera e propria. Questo tipo di connessione, propria del Medioevo, garantisce una maggiore efficienza, cosicché a parità di materiale, una capriata con collegamento monaco-catena a cerniera resiste a carichi superiori rispetto alla capriata utilizzata dopo il Rinascimento.

Nel cavalletto semplice con monaco (capriata con monaco ma senza saette), esclusa la zona locale del nodo con i puntoni, il monaco non è sottoposto ad alcuna sollecitazione, salvo l'eventuale sforzo di trazione dovuto al peso proprio della catena inferiore: per essa, il monaco svolge il ruolo di elemento di ritegno intermedio che ne limita la deformazione flessionale dovuta al peso proprio della catena stessa. Ma in questo schema il monaco non deve mai appoggiare sulla catena, perché ciò potrebbe determinare sulla catena una forza che determina una sollecitazione flessionale aggiuntiva, sollecitazione che va ad interferire con la funzione di tirante che la catena deve svolgere. In presenza di saette, lo sforzo di trazione nel monaco diventa più rilevante.

Per quanto riguarda il **comportamento sismico**, criteri di progettazione dettagliati sono riportati in [1]. Sostanzialmente, le azioni sismiche orizzontali hanno effetto sul calcolo dei collegamenti al muro d'imposta; esse inoltre incrementano sollecitazioni di taglio e flessione nelle aste a causa del carico asimmetrico: le azioni sismiche possono sollecitare i puntoni a tutta luce, venendo meno il vincolo intermedio offerto dalle saette (fig. 5).

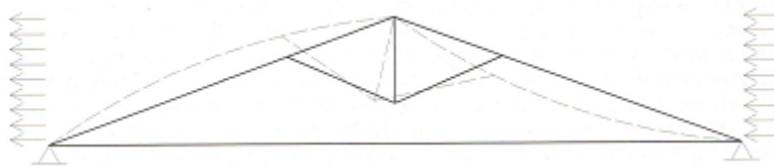


Figura 5-39. Nelle capriate le azioni sismiche orizzontali non è detto che siano trascurabili in quanto, oltre ad avere effetto sui collegamenti a muro, sollecitano anche gli elementi interni con carico antisimmetrico che, per la tipologia di capriata illustrata in figura, sollecita i puntoni a tutta luce perché viene meno il vincolo intermedio offerto dalle saette.

Fig. 5. Sollecitazioni sismiche nella capriata

Ancora in [1], si osserva giustamente che grande attenzione va riservata al collegamento dei vari elementi tra loro e con i muri d'imposta. I giunti interni fra le varie aste sono collegamenti "a gravità" monolateri, che funzionano ottimamente con azioni verticali verso il basso, ma quando le forze si invertono (vanno verso l'alto per effetto del sisma o del vento) sono necessari elementi metallici aggiuntivi.

Per i particolari costruttivi relativi alle coperture con capriate si rimanda alla letteratura specializzata [4] (un esempio di intervento di consolidamento è riportato in fig. 6).

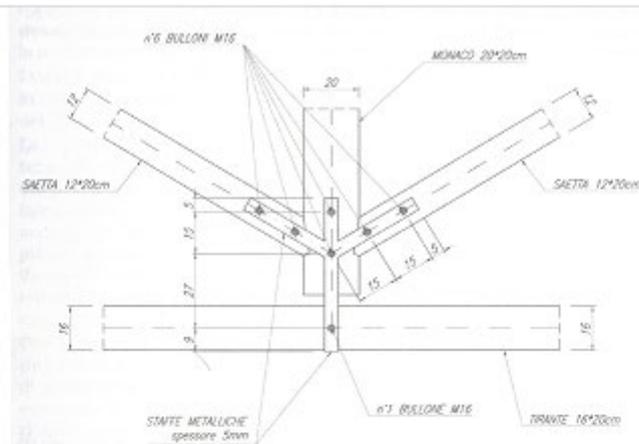


Fig. 25.3.j – Capriata in legno. Nodo contraffisso-monaco-contraffisso con collegamento al tirante sottostante

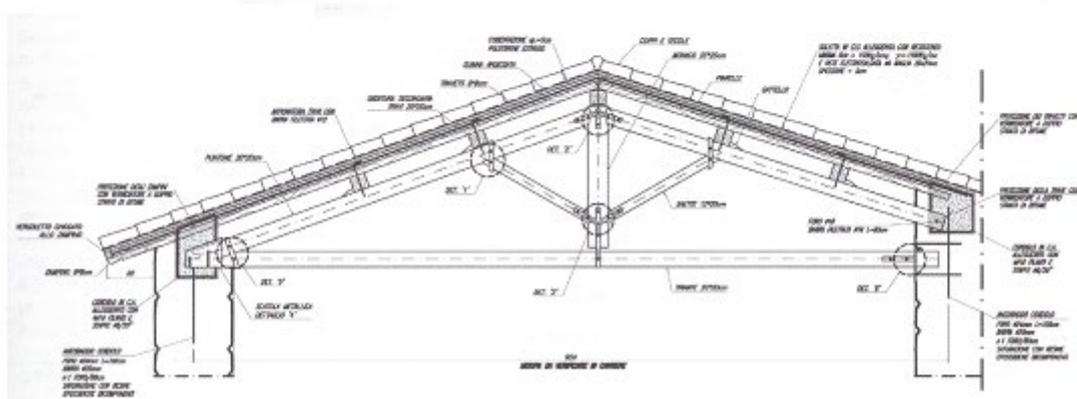


Fig. 25.3.1 – Ricostruzione di una capriata di legno mancante di un intero appoggio

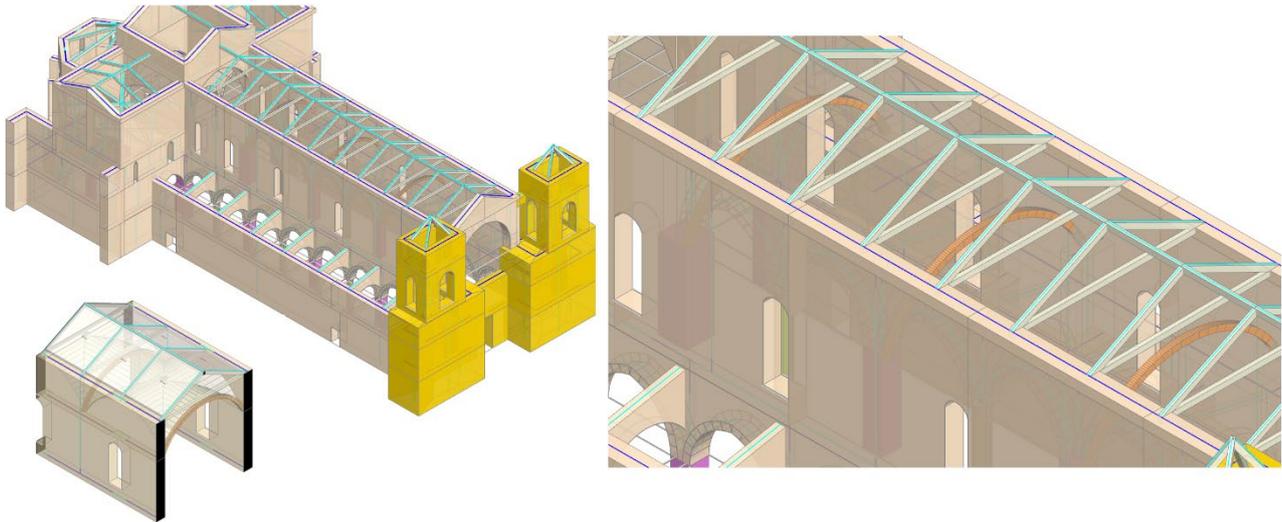
Fig. 6. Particolari costruttivi per il consolidamento delle capriate (da [4])

MODELLAZIONE IN Aedes.PCM

Per modellare una capriata, ottenendo un comportamento strutturale teorico corrispondente a quello reale, sono necessari alcuni accorgimenti.

- Innanzitutto, è necessario **disattivare l'Analisi per Fasi Costruttive** (Manuale d'uso di Aedes.PCM, §3.2.4.1). Tale metodologia, nell'analisi della struttura sotto i carichi permanenti, prevede che i nodi di sommità dei maschi murari abbiano rotazioni X e Y bloccate (vincolamento shear-type). Con questa ipotesi, il comportamento del muro perimetrale si allontana da quello di muro libero, con momento trasversale nullo in sommità.

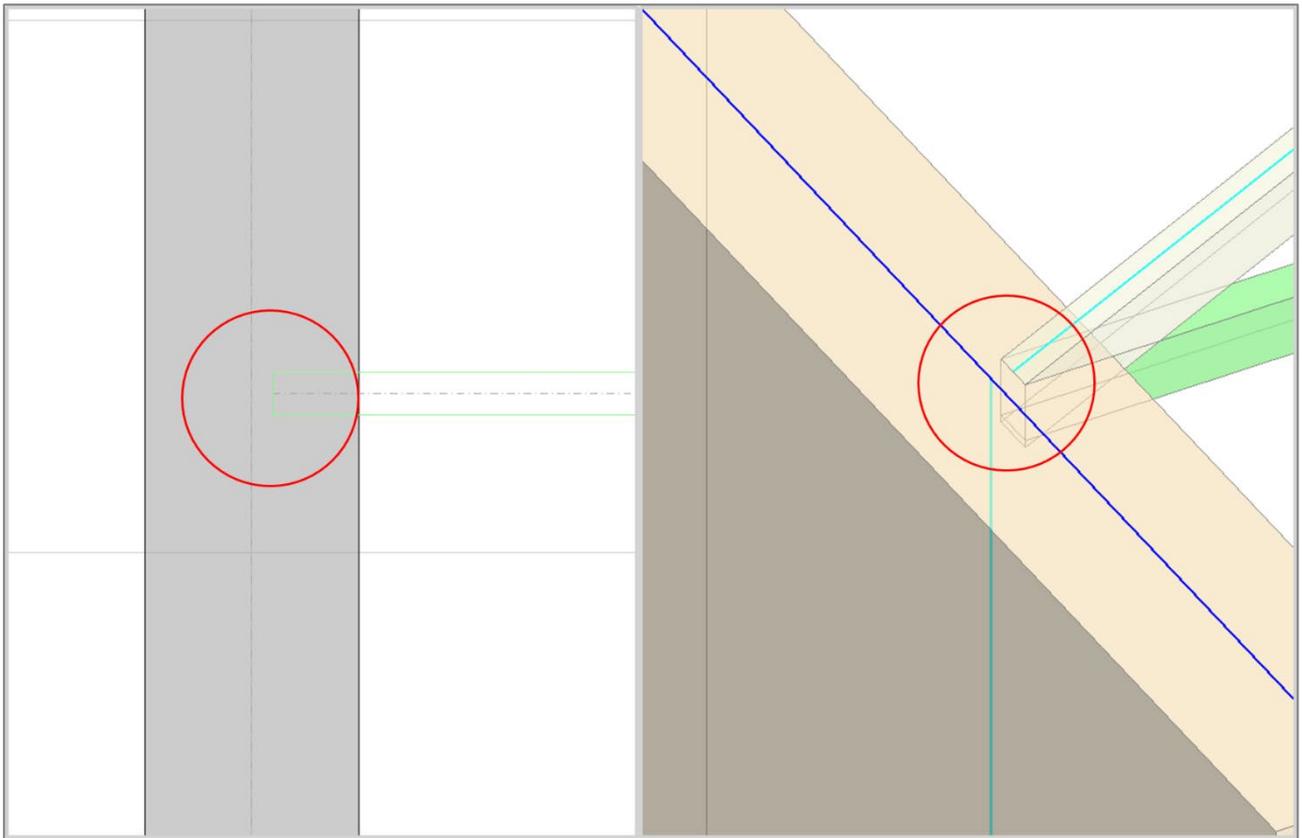
Si tratta di un'ipotesi frequentemente utilizzata nei modelli di edifici residenziali (a pareti e solai) in quanto gestisce correttamente le azioni statiche evitando tagli e momenti prodotti dai carichi permanenti quali i pesi propri, tagli e momenti che altrimenti tendono a rendere non soddisfatte le verifiche statiche come conseguenza puramente teorica del modello a telaio equivalente. Per gli edifici monumentali, tuttavia, l'analisi per fasi costruttive può generare effetti indesiderati, e quindi è preferibile non attivarla.



- Un'altra questione riguarda **il vincolamento tra capriata e muro perimetrale**.

Si deve rappresentare la possibilità per un appoggio di traslare orizzontalmente: ciò corrisponde ad un vincolo cerniera-carrello, che consente l'allontanamento dei nodi di sommità dei maschi murari dal punto di appoggio della capriata.

Per ottenere tale vincolamento è necessario modificare il modello geometrico facendo in modo che i nodi di estremità della capriata siano leggermente distanziati dall'asse mediano della muratura perimetrale (ad esempio di 10 cm). In questo modo nella generazione del modello strutturale, saranno creati due link rigidi che collegano le estremità della capriata ai muri perimetrali. Per ottenere il carrello è necessario liberare la traslazione all'estremo finale di uno di questi due link rigidi. La modellazione è illustrata nelle immagini seguenti.



Proprietà Report Curva di capacità

Asta 12

Caratteristiche

Tipologia	Link Rigido
Da analizzare	Si
Piano	Piano 2
Lunghezza	0.100
Direzione	-1.000,0.000,0.000
Sezione	-

Paramento

Gruppo strutturale	
--------------------	--

Carico

Carichi	0
Carico Uniforme 1: qZ	0.000
Carico Uniforme 1: CCE	Permanente
Carico Uniforme 2: qZ	0.000
Carico Uniforme 2: CCE	Permanente
Carico Uniforme 3: qZ	0.000
Carico Uniforme 3: CCE	Permanente

Nodi

Nodo iniziale i	13
Nodo finale j	6

Vincoli

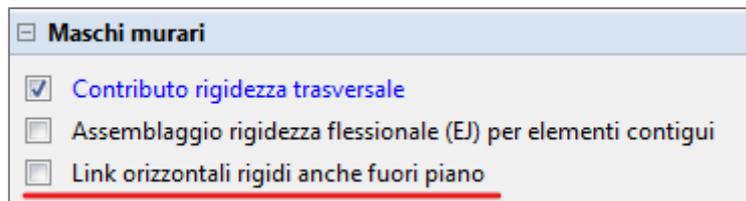
Tipo	Generico
Vincolo iniziale	000000
Vincolo finale	100000
Traslazione x	Libera
Traslazione y	Bloccata
Traslazione z	Bloccata
Rotazione x	Bloccata
Rotazione y	Bloccata
Rotazione z	Bloccata
Grado d'incastro iniziale	1.0, 1.0
Grado d'incastro finale	1.0, 1.0

Fasi costruttive

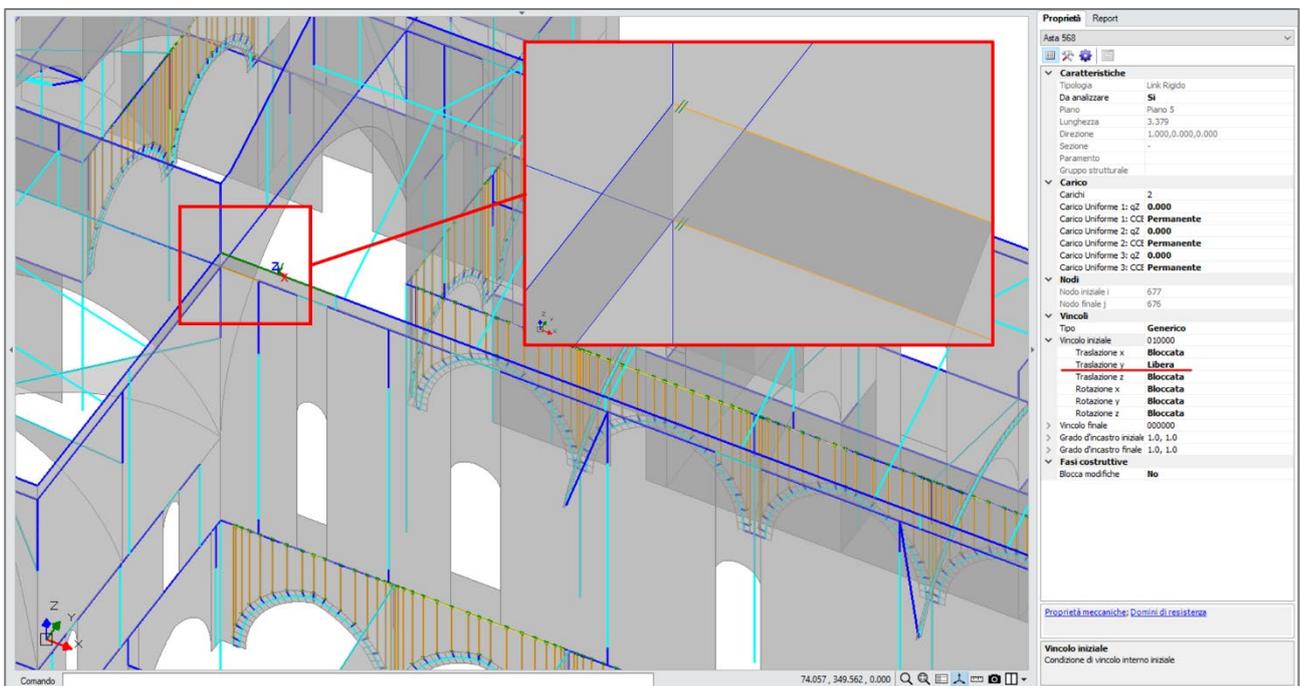
Blocca modifiche	No
------------------	----

- Una volta disattivate le fasi costruttive e modificato il vincolamento delle capriate, il muro perimetrale può non essere ancora libero di inflettersi come se fosse una mensola. Questo accade se il muro è collegato rigidamente alle pareti ortogonali per mezzo dei link rigidi orizzontali sulla sommità del muro stesso.

L'effetto di questo "incatenamento" può essere ridotto se si ipotizza che i link orizzontali sulla sommità dei maschi siano infinitamente rigidi nel piano del muro (piano verticale), ma dotati di rigidità finita fuori piano (cioè nel piano di flessione orizzontale). Per adottare questa ipotesi è sufficiente disattivare la seguente opzione in Parametri di Calcolo > Muratura.



In alternativa, per svincolare completamente il muro perimetrale della navata e permettergli di inflettersi come se fosse una mensola, è necessario svincolare la traslazione Y nei link rigidi che lo collegano alla muratura ortogonale. Questo tipo di svincolamento è illustrato nella figura seguente e deve essere applicato ad entrambi le estremità del muro perimetrale.

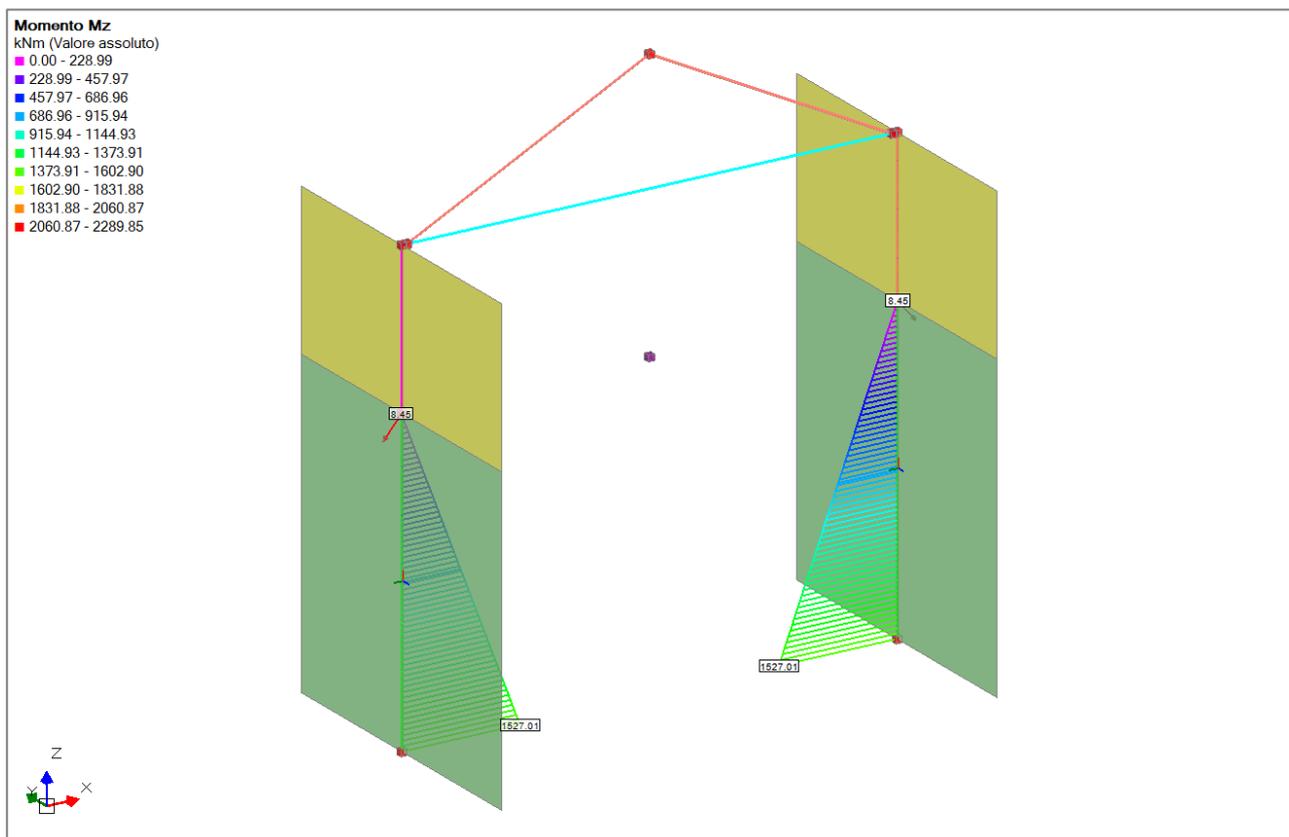


Attenzione: Nell'applicare gli svincolamenti illustrati finora, l'analisi potrebbe interrompersi segnalando la presenza di nodi con spostamenti eccessivi, cioè nodi con alcune componenti di spostamento che superano la soglia di labilità (di default impostata pari a 100 mm). Data la possibile complessità della struttura analizzata, questa soglia potrebbe essere troppo restrittiva. Per incrementare la soglia di labilità è necessario accedere alle opzioni avanzate digitando "avanzate" nella riga di comando e confermando con Invio.

- Un caso interessante è la presenza di **strutture voltate che si impostano ad un'altezza intermedia del muro**, ad una quota posta al di sotto della capriata. Se i muri perimetrali non sono interrotti in corrispondenza dell'imposta, le spinte sono riportate sulla sommità del muro. In particolare, i blocchi di imposta degli archi trasversali sono collegati per mezzo di link rigidi ai nodi sommitali dei maschi perimetrali, mentre le spinte delle volte sono applicate per mezzo di carichi concentrati nei nodi strutturali più vicini (anche questi in posizione sommitale, non alla quota di imposta). Questa semplificazione scaturisce dalla necessità di schematizzare la struttura per mezzo di un telaio equivalente, in cui si preferisce rispettare la reale lunghezza deformabile dei maschi murari piuttosto che interromperli per accogliere le spinte trasversali. Tra l'altro posizionando la spinta ad una quota più elevata si agisce a favore di sicurezza in quanto si ottengono sollecitazioni di flessione maggiori alla base del maschio. Nell'analisi cinematica dei meccanismi locali di collasso, invece, la spinta delle volte è considerata agente alla reale quota di imposta.

Per considerare la spinta di archi e volte alla quota di imposta anche nel modello a telaio equivalente, è necessario suddividere la modellazione in due piani, un piano con altezza pari all'imposta, in cui inserire volte e archi trasversali, e un piano superiore in cui modellare la restante muratura perimetrale e le capriate.

Questo tipo di modellazione è illustrata nell'immagine seguente.



- Infine, un'osservazione particolare riguarda il **comportamento statico e sismico di una capriata**. Il vincolamento suggerito per rispettare la trasmissione statica al muro di imposta del solo carico verticale, riservando la spinta all'equilibrio interno della catena, genera in analisi sismica azioni

orizzontali inerziali (prodotte dalla copertura) asimmetriche, in quanto esse migrano sull'estremità incernierata e non su quella con vincolo carrello.

Ciò corrisponde al caso reale di appoggio con carrello previsto anche per le sollecitazioni sismiche, soluzione che in generale si dovrà accompagnare alla capacità del vincolo di sostenere lo spostamento orizzontale sismico della capriata stessa.

Se invece è prevista una connessione rigida fra appoggio della capriata e muro, che abbia effetto non sulle azioni statiche (per le quali la capriata è equilibrata con spinta interna, sostenuta dalla catena e non trasmessa al muro), ma sulle sismiche, sarebbe necessario diversificare il vincolamento fra statica e sismica.

Peraltro, l'azione sismica proveniente da una copertura generalmente in legno è sostanzialmente bassa rispetto all'entità delle azioni corrispondenti alle strutture portanti murarie, e gli effetti si possono considerare secondari.

Tuttavia, al fine di incrementare la precisione dell'analisi è prevista nel piano di aggiornamento di Aedes.PCM la possibilità di gestire di un vincolo variabile fra condizioni statiche e sismiche in modo da rappresentare correttamente tutti i casi sopra detti.

Riferimenti bibliografici

[1] A. Ceccotti, M. Follesa, M. P. Lauriola: Le strutture di legno in zona sismica, Criteri e regole per la progettazione ed il restauro, CLUT Editrice, 2005

[2] M. Giuliani: Architetto. Manuale per l'esame di Stato e per l'esercizio della professione, Grafill, 2016

[3] M. Piazza, R. Tomasi, R. Modena: Strutture in legno. Materiale, calcolo e progetto secondo le nuove normative europee, Hoepli, 2005

[4] M. Mariani: Trattato sul consolidamento e restauro degli edifici in muratura, DEI, 2012