

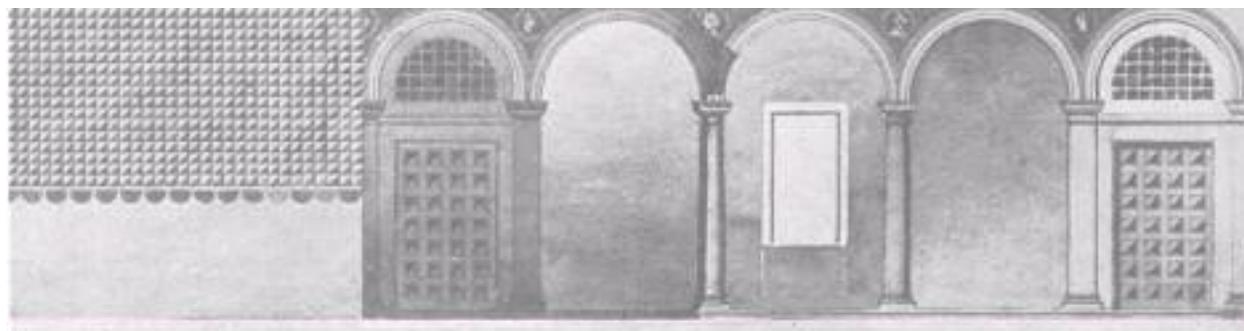
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA TRE – FACOLTA' DI ARCHITETTURA

A.A. 2008-2009

LABORATORIO DI RESTAURO A

Restauro Architettonico – MICHELE ZAMPILLI

Modulo di Conservazione e riqualificazione tecnologica degli edifici – FRANCESCA GEREMIA



Mercoledì 10 Dicembre
ore 9.00

GIOVANNI CANGI _ ingegnere

IL MANUALE DEL RECUPERO STRUTTURALE ANTISISMICO

TETTI IN LEGNO: INTERVENTI DI MIGLIORAMENTO SISMICO



Elaborato tratto dal *Manuale del Recupero Strutturale e Antisismico*
di Giovanni Cangini – DEI Tipografia del Genio Civile di Roma, 2005

Dott. Ing. Giovanni Cangini
Via della Quercia, 3/F
06012 – Città di Castello (PG)
E-mail: ingcangi@tiscali.it

4) TETTI IN LEGNO

Costruzione e miglioramento sismico.

4.1 *Aspetti generali*

La tecnica costruttiva dei tetti in legno realizzati con semplice profilo a capanna (due falde) o del tipo a padiglione (quattro falde) è analoga a quella impiegata per i solai e si basa sul medesimo criterio di assemblaggio dei componenti lignei e laterizi.

Il tetto elementare può essere pertanto associato ad un solaio inclinato e risulta pertanto composto da un'orditura semplice o doppia di travi di sostegno, un "palco" di laterizi in piano ed un "manto" di copertura a protezione delle acque meteoriche costituito da coppi e controcoppi oppure da tegole piane (embrici) e coppi (tetto alla romana).

La struttura appena descritta è sufficiente alla realizzazione di un tetto ove l'edificio presenti murature portanti sufficientemente ravvicinate per fungere da sostegni. In caso contrario, quando la luce degli ambienti da coprire sia estesa, è necessario che l'orditura del tetto venga a sua volta sostenuta da singole travi lignee (puntoni isolati) o da capriate in grado di sostenere ampie porzioni di copertura composto da arcarecci e travicelli.

La tecnica costruttiva dei tetti in legno realizzati con semplice profilo a capanna (due falde) o del tipo a padiglione (quattro falde) è analoga a quella impiegata per i solai e si basa sul medesimo criterio di assemblaggio dei componenti lignei e laterizi.

Il tetto elementare può essere pertanto associato ad un solaio inclinato e risulta pertanto composto da un'orditura semplice o doppia di travi di sostegno, un "palco" di laterizi in piano ed un "manto" di copertura a protezione delle acque meteoriche costituito da coppi e controcoppi oppure da tegole piane (embrici) e coppi (tetto alla romana).

La struttura appena descritta è sufficiente alla realizzazione di un tetto ove l'edificio presenti murature portanti sufficientemente ravvicinate per fungere da sostegni. In caso contrario, quando la luce degli ambienti da coprire sia estesa, è necessario che l'orditura del tetto venga a sua volta sostenuta da singole travi lignee (puntoni isolati) o da capriate in grado di sostenere ampie porzioni di copertura composto da arcarecci e travicelli.

Le capriate, per la particolare configurazione triangolata che conferisce loro notevole resistenza pur utilizzando elementi di sezione ridotta, possono sostituirsi in modo efficace ai muri portanti trasversali, che pertanto vengono spesso interrotti ai livelli inferiori per creare maggiori spazi liberi nel sottotetto e soprattutto per un vantaggioso contenimento dei costi.

Con una orditura tripla (incavallature, arcarecci, travicelli) si possono coprire ambienti di grandi dimensioni, anche là dove un normale solaio in legno non troverebbe i sostegni necessari, tuttavia si tratta di soluzioni che a volte vanno a scapito delle prestazioni antisismiche globali.

Se ci si limita ad un semplice confronto della gerarchia strutturale a partire dalle travi maestre fino al manto di pannelle, le differenze con i solai non sono rilevanti e sembrano marcate sostanzialmente dalla caratteristica pendenza degli spioventi del tetto rispetto alla disposizione piana dei solai e per l'impiego di pannelle sottili in sostituzione delle mezzane, che nelle strutture dei solai devono resistere a maggiori sforzi flessionali. L'inclinazione delle falde, tuttavia, è sufficiente per modificare sensibilmente la configurazione statica degli elementi strutturali, pertanto gli arcarecci ed i travicelli della copertura sono sollecitati in modo diverso dai corrispondenti elementi del solaio piano. Le orditure dei pioventi appoggiate a quote diverse possono far insorgere spinte orizzontali pericolose per la stabilità globale, soprattutto quando applicate al livello sommitale dell'edificio, più esposta all'azione delle sollecitazioni orizzontali, poiché non risulta stabilizzata dall'azione gravitativa di strutture sovrastanti.

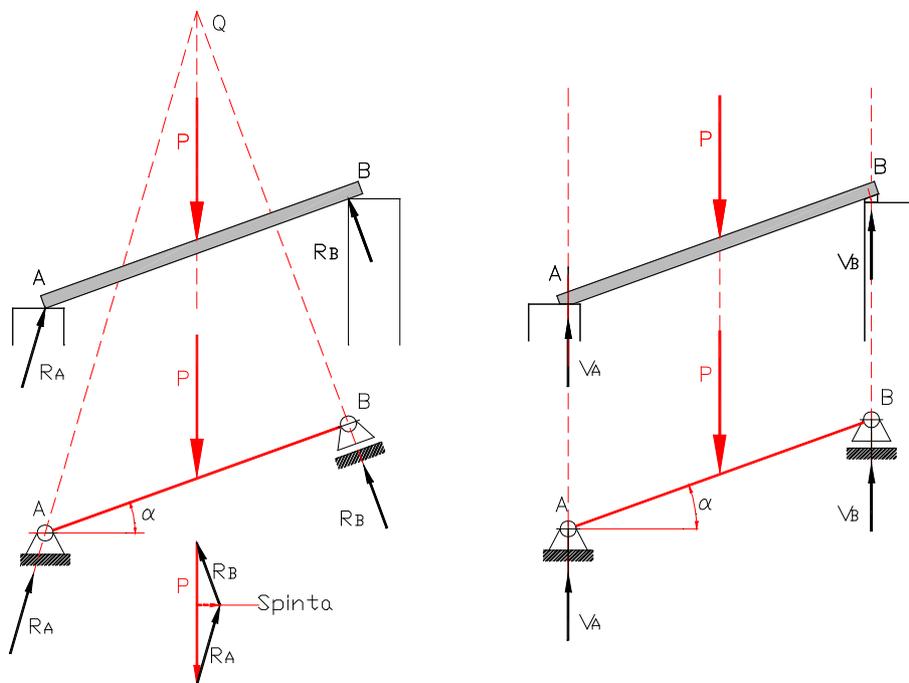
Nelle zone ad alta sismicità la pratica costruttiva premoderna ha selezionato lo sviluppo e l'uso di quelle tecniche che attraverso l'esperienza si sono dimostrate più adatte a scongiurare i dissesti.

Le azioni spingenti sono tipiche delle carpenterie più semplici, costituite da pertiche disposte fra la trave di colmo longitudinale e le pareti perimetrali. Per questo motivo si è portati a considerare come spingente qualsiasi trave con le estremità appoggiate a quote diverse, mentre in realtà l'insorgere della spinta in condizioni statiche è da associare esclusivamente alla conformazione dei vincoli; in pratica si possono evitare effetti spingenti nel caso di travi inclinate, avendo cura di sagomare le testate delle travi in modo che l'interfaccia tra l'elemento ligneo che trasmette il carico e la muratura che lo riceve giacciono su di un piano di appoggio orizzontale.

4.2 *Il problema delle spinte.*

L'analisi dei cinatismi indotti sui muri d'appoggio dalle azioni sismiche ortogonali al piano evidenzia la notevole differenza di comportamento fra le strutture coperte con impalcati piani (lastrici solari) rispetto a quelli coperti da impalcati inclinati (tetti a falde); differenze che sono amplificate dagli effetti dinamici a causa del diverso periodo di oscillazione, caratteristico di ciascuna parete.

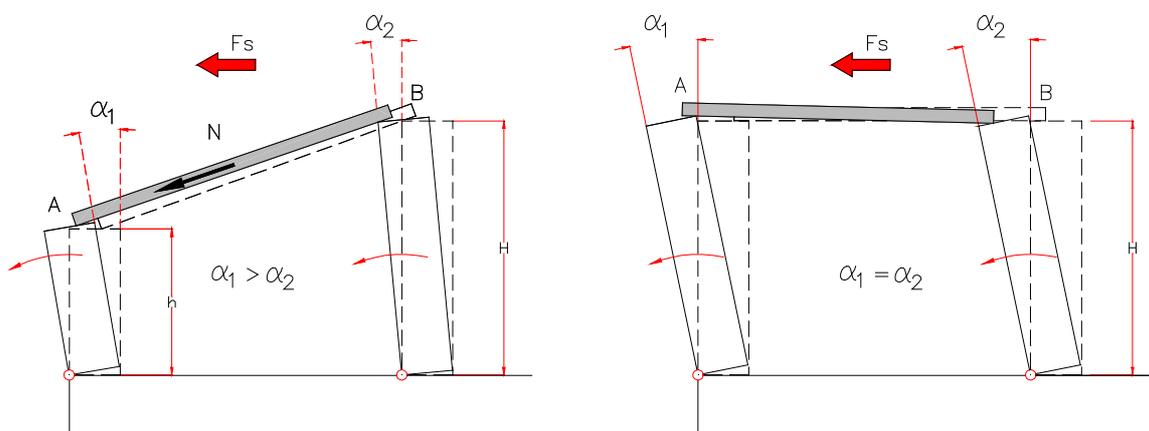
Le travi dei solai di copertura, infatti, ove dotate delle accortezze necessarie a svolgere la funzione di collegamento, introducono un vincolo sommitale che impone delle oscillazioni sincroniche delle pareti, in contrasto con la tendenza che ha ciascun muro di muoversi in modo indipendente dall'altro.



4.1 Condizioni di equilibrio di travi inclinate in funzione della configurazione dei vincoli

Quando invece si collegano pareti di diversa altezza, quale il caso delle coperture inclinate, i puntoni svolgono un'azione regolativa delle oscillazioni. Questa azione provoca l'insorgere di sollecitazioni assiali alternate di trazione e compressione nelle travi, che possono determinare lo sfilamento delle testate o l'innescò di una forte spinta contro la parete più rigida.

Nel caso specifico, a prescindere dalla configurazione dei vincoli, il muro più basso è quello più sollecitato.



4.2 Comportamento cinematico delle murature in presenza di solai piani o inclinati: nel caso di pareti di altezza diversa la trave di collegamento spinge contro il muro più basso per produrre uno spostamento sommitale congruente con quello della parete contrapposta. Al contrario, le pareti che tendono ad oscillare in modo sincronico, non si trasmettono sollecitazioni significative attraverso l'orizzontamento.

Nei solai piani possono insorgere fenomeni simili, quando le pareti d'appoggio hanno rigidezze molto

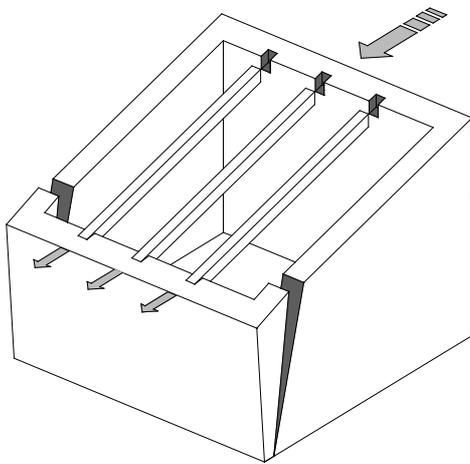
diverse, tuttavia l'altezza uniforme dei muri non produce effetti così marcati come accade per le coperture inclinate.

In ogni caso si osserva che il problema delle spinte trasferite dagli orizzontamenti non è strettamente associato alla disposizione piana o inclinata delle orditure; lo dimostra il fatto che lo sfilamento delle travi si verifica un po' a tutti i livelli. Nel caso dei tetti l'effetto è certamente amplificato.

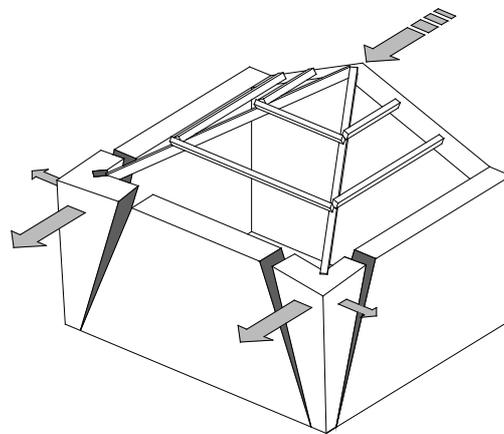
I tetti che presentano orditure spingenti sono pertanto sconsigliati ed in effetti nell'edilizia storica non trovano larga applicazione, anche se vi sono situazioni in cui le travi spingenti non si possono proprio evitare. E' il caso dei tetti a padiglione, nei quali la geometria delle falde impone il ricorso a puntoni inclinati in corrispondenza di compluvi e displuvi.

Questi elementi, inseriti per sostenere le orditure secondarie, sono piuttosto sollecitati e trasferiscono delle forze elevate agli appoggi. E' necessario in questi casi adottare alcuni accorgimenti adatti ad assorbire l'eventuale componente orizzontale che favorisce i meccanismi di ribaltamento delle pareti esposte.

Fra i metodi tradizionali più efficaci per compensare le spinte dei puntoni la più diffusa consiste nella disposizione di catene in piano sulla proiezione dei puntoni, vincolate da un lato alla testa del puntone e dall'altro alla muratura contrapposta¹. Queste hanno il compito di assorbire le spinte trasferite dalle testate dei puntoni e scaricarle sull'ancoraggio a monte, per essere ridistribuite sulle masse strutturali.



4.3 Tetto ad unico spiovente con meccanismo di ribaltamento per azioni ortogonali amplificato dall'azione del tetto spingente.



4.4 Tetto a padiglione con azione spingente dei puntoni d'angolo.

4.3 *Comportamento sismico delle coperture rigide: effetti statici, cinematici e dinamici.*

Fin qui sono state evidenziate alcune delle principali criticità statiche proprie delle coperture, da mettere in relazione al modo di assemblare gli elementi lignei ed al tipo di connessioni create con i muri d'appoggio.

Si è potuto osservare che i tetti, rispetto ai solai di piano, hanno una maggiore influenza sui fenomeni di dissesto e spesso dei dissesti i difetti costruttivi del tetto costituiscono la causa scatenante. Proprio per questa criticità strutturale, gli interventi di consolidamento del tetto sono capaci di produrre un forte miglioramento della configurazione statica e della risposta sismica dell'intero organismo edilizio.

Prima di illustrare alcune tecniche di miglioramento sismico dei tetti in legno è opportuno, per meglio comprendere le cause stesse dei dissesti, soffermare ancora l'attenzione su alcuni aspetti costruttivi di grande importanza.

In particolare è necessario valutare gli effetti prodotti da alcune recenti tecniche di consolidamento che hanno trovato larga applicazione a partire dagli anni settanta.

Le norme antisismiche in vigore da quel periodo prevedevano la sostituzione sistematica dei solai in legno

¹ Dalle *Disposizioni del Genio Civile e norme tecniche da osservarsi per le riparazioni da eseguire nelle località di Citerna e Monterchi danneggiate dal terremoto del 26 Aprile 1917*: “ I tetti dovranno essere resi non spingenti con l'apposizione di opportune catene.”

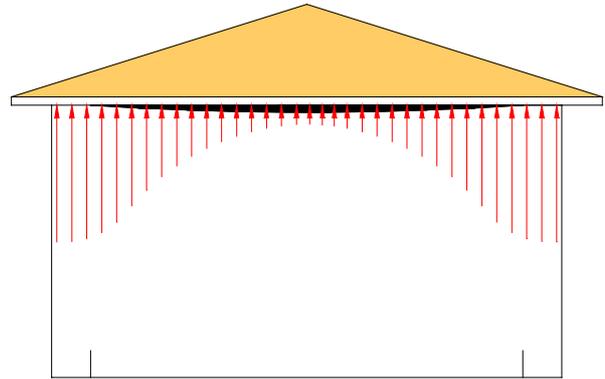
con nuovi orizzontamenti in latero-cemento, soprattutto a livello delle coperture.

In effetti queste aspettative erano legittime. La resistenza dei nuovi solai e l'irrigidimento prodotto a livello sommitale dovevano permettere di ottenere configurazioni scatoleari rispondenti ai modelli di verifica correnti.

Oltre a questo, va considerato l'effetto positivo introdotto dal maggiore peso della copertura. In parte l'aumento di peso andava ad amplificare le forze sismiche, ma si veniva in compenso a determinare un incremento più che proporzionale della resistenza a taglio della muratura: gli effetti positivi di questo intervento a carattere irreversibile sembravano quindi prevalere sulle chiare controindicazioni.

L'esperienza dimostra che la risposta sismica degli edifici consolidati con questi criteri non è poi così semplice da valutare e molti modelli di calcolo di vasto uso non tengono conto di effetti "secondari" capaci di modificare negativamente il comportamento statico atteso.

Un primo fenomeno, di natura statica è dovuto all'eccessiva rigidità dei cordoli in c.a. e, più in generale, dei solai in latero-cemento. Si tratta del cosiddetto *effetto trave*: il cordolo che dovrebbe distribuire i carichi in modo uniforme sulla muratura sottostante si trova invece a trasmettere azioni concentrate alle estremità, per cui si comporta come una trave, scaricando la muratura sottostante.



4.16 Effetto trave dei cordoli in cemento armato.

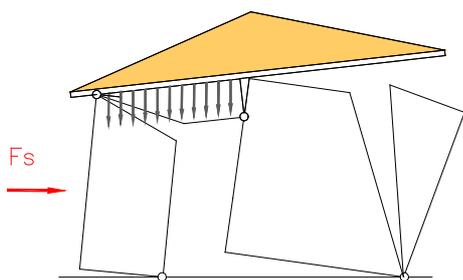
Le fessure che a volte si formano fra cordolo e muratura costituiscono un chiaro indizio di questo pericoloso fenomeno. In questo caso i pochi benefici determinati dall'introduzione di un tetto pesante vengono completamente annullati, mentre si verifica un incremento delle forze sismiche.

Le porzioni di muratura private della compressione stabilizzante tendono a ribaltare per effetto delle azioni ortogonali come se si trattasse di muri isolati, mentre il tetto mantiene la sua integrità.

Un altro aspetto comportamentale emerge attraverso una lettura cinematica della risposta sismica: si osserva chiaramente che i movimenti rotazionali delle pareti non sono congruenti con il profilo d'imposta della copertura rigida, per cui è inevitabile il distacco di alcuni tratti di muratura.

I fenomeni osservati sono invece scongiurati in presenza dei tetti tradizionali deformabili, capaci cioè di adeguarsi alle diverse configurazioni e di mantenere la muratura costantemente sotto carico.

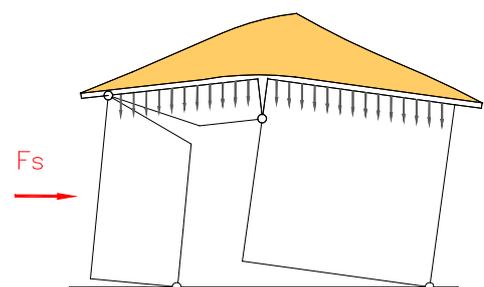
L'effetto dinamico è ancora più pericoloso, perché sfugge alla tradizionale analisi statica equivalente.



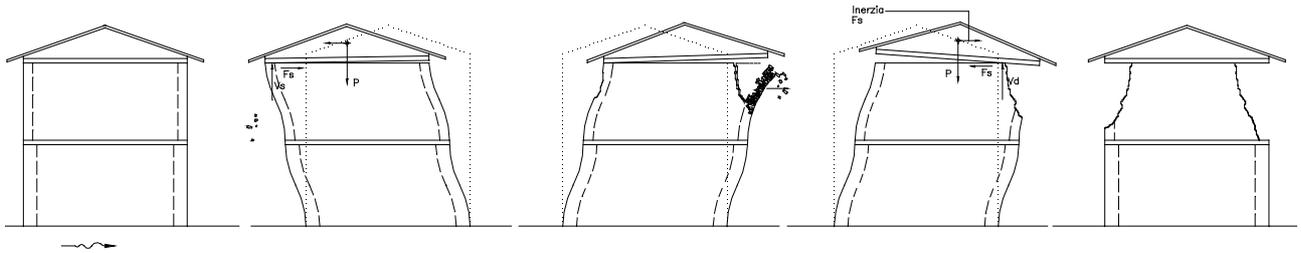
4.17 I tetti indeformabili subiscono rotazioni rigide con conseguente distacco di alcune pareti.



4.18 La foto evidenzia una risposta sismica anomala in presenza di solai rigidi – (Ing. A. Anastasi) Terremoto in Umbria-Marche 1997.



4.19 Il tetto deformabile si modella aderendo alla nuova configurazione delle pareti ruotate per effetto del cinematiso strutturale e va a distribuire il carico in modo più uniforme.



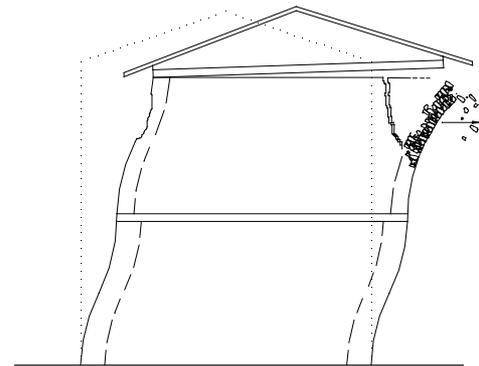
4.20 Fasi dell'effetto sismico dinamico sulle pareti sommitali in presenza di coperture rigide, che per inerzia del tetto (fasi 2 e 3) tendono a sollevarsi dalla parete sottovento che viene così completamente scaricata².

Il tetto rigido viene trascinato nel moto oscillatorio dalla forza di taglio trasmessa dai muri sottostanti a livello del piano d'imposta. Con il baricentro della copertura, situato ad una quota superiore, si genera una coppia d'inerzia che fa impennare il corpo rigido, riducendo di fatto le compressioni sulla parete sottovento.

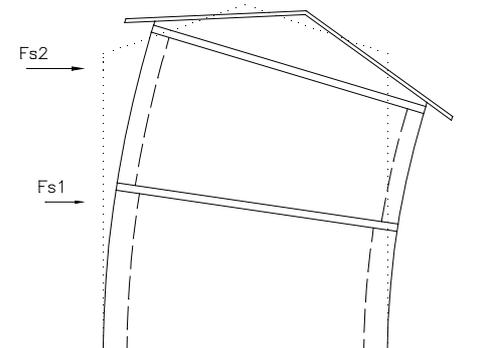
La stessa analisi eseguita con il metodo statico equivalente porta a considerazioni completamente opposte, per il fatto che la forza sismica sembra produrre uno stato di compressione della parete sottovento e quindi un effetto stabilizzante che si traduce in un sensibile incremento della resistenza a taglio.

L'analisi dinamica mostra che l'azione di tale effetto è generalmente ritardata, per cui la compressione della parete di valle si verifica dopo che la stessa ha ricevuto un pericoloso colpo di frusta. Il fenomeno, pertanto, produce conseguenze disastrose su una parete sommitale sostanzialmente scarica. Lo sveltamento di materiale in questi casi è una conseguenza inevitabile.

Il sisma del '97 che ha interessato il territorio umbro-marchigiano ha mostrato questi effetti sugli edifici che, fra gli anni settanta e ottanta, erano stati consolidati a seguito dei danni prodotti dai terremoti coevi.



4.21 Colpo di frusta sulla parete sommitale sottovento: effetto catapulta.



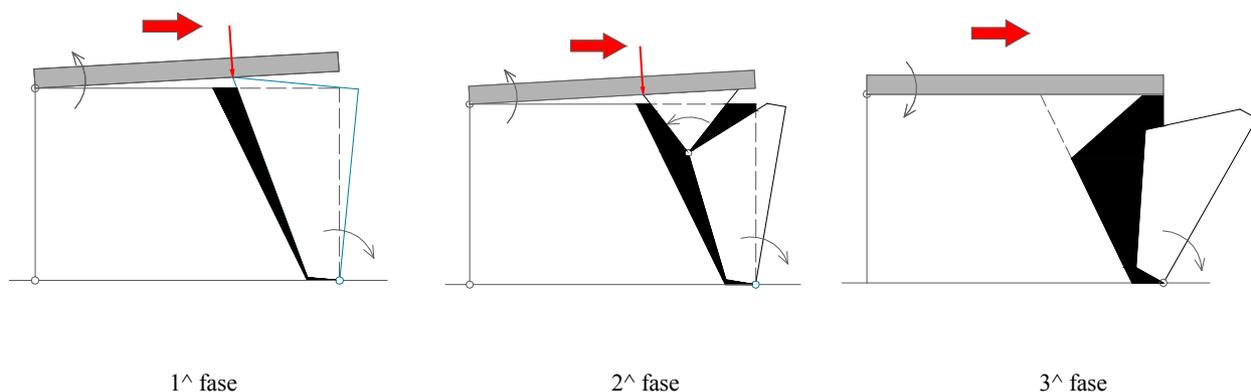
4.22 Stato di compressione teorico (perché ritardato) indotto dall'azione statica equivalente sulla parete sottovento.

Gran parte degli edifici che si sono nuovamente danneggiati hanno manifestato comportamenti anomali rispetto ai modelli di analisi utilizzati per le verifiche sismico-statiche; ovvero, è emersa un'interazione fra elementi verticali e orizzontali che non era stata prevista.

Per questo motivo si è cercato di correggere e migliorare i modelli strutturali adottati per le verifiche sismiche, consapevoli della scarsa attendibilità che questi avevano dimostrato, quando forse era opportuno abbandonare del tutto l'originaria impostazione.

I cordoli in cemento armato, in conseguenza dell'effetto dinamico che porta a scaricare la parete sottovento, vanno pure a modificare i cinematismi di collasso del muro di controvento in senso peggiorativo, secondo le modalità illustrate in fig. 4.23.

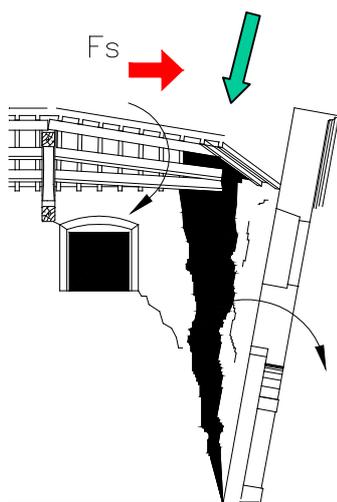
² La sequenza delle fasi sismiche prende a riferimento una struttura elastica che non risponde al reale comportamento delle murature, ma che tuttavia serve a meglio evidenziare il fenomeno dinamico.



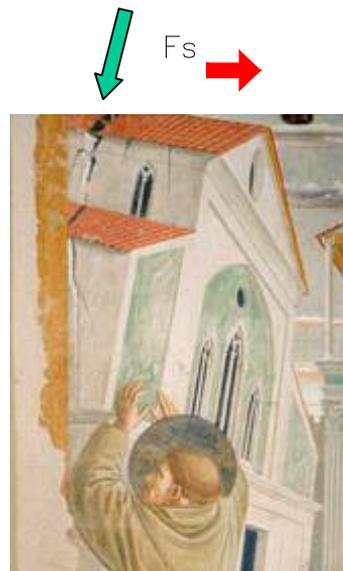
4.23 Evoluzione del meccanismo di rottura per azioni complanari in presenza di cordoli rigidi in cemento armato.

L'eccessivo irrigidimento della copertura rende imprevedibile il comportamento della struttura, a differenza delle costruzioni tradizionali, che per secoli hanno mostrato meccanismi ripetitivi e quindi meglio controllabili.

Una prova concreta si ottiene dal riscontro fra il cinematismo di ribaltamento rilevato nella facciata della chiesa di Santo Stefano a Bonsciano - PG (Fig. 4.24), danneggiata dal sisma del 1997, e quello rappresentato da Benozzo Gozzoli, alla fine del '400, nel ciclo pittorico di San Francesco a Montefalco - PG, dove l'artista riproduce un meccanismo identico, probabilmente osservato dal vero ed utilizzato nella raffigurazione simbolica del santo che sostiene la Chiesa pericolante (Fig. 4.25).



4.24 Santo Stefano di Bonsciano – Città di Castello (PG).
Cinematismo classico di ribaltamento della facciata.

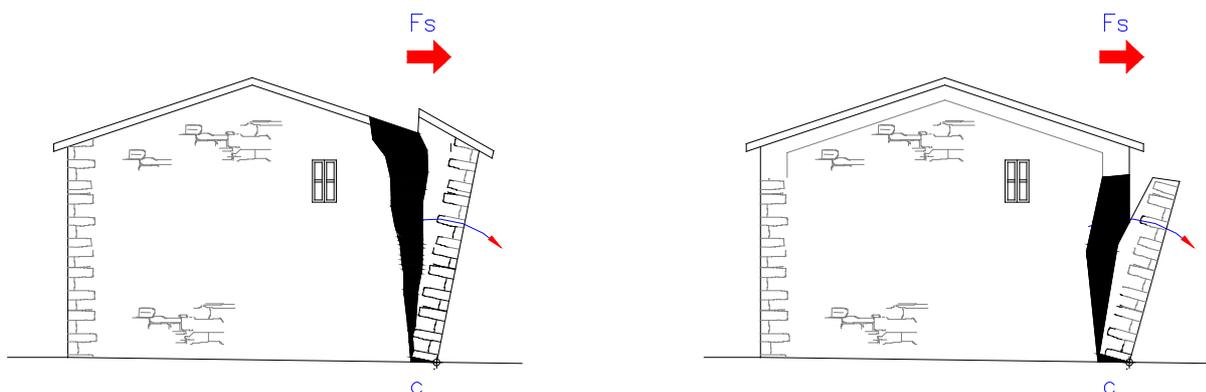


4.25 Particolare tratto dal ciclo pittorico di S. Francesco - Benozzo Gozzoli
Montefalco (PG)

Il cuneo tende comunque a distaccarsi nel modo canonico, per seguire il classico cinematismo di ribaltamento. La rotazione però viene impedita dal peso proprio del tetto rigido, che ne determina la rottura e la separazione in due macroelementi, con quello inferiore che rimane attaccato al cantonale e raggiunge un rapido collasso per riduzione delle azioni stabilizzanti.

Si osserva che il moltiplicatore di collasso relativo a questa nuova configurazione è più piccolo di quello stimato per il meccanismo di danno originario.

Un intervento certamente meno invasivo e che assicura un buon livello di flessibilità del solaio di copertura, consiste nel mantenimento della struttura lignea o, nel caso sia necessario, nella sostituzione dei componenti strutturali, comunque sempre nel rispetto della tipologia costruttiva originaria.



4.26 Modifica del cinematismo di collasso del muro d'angolo rilevato in un edificio di civile abitazione consolidato con cordolo di coronamento in cemento armato; il profilo delle lesioni primitive è associato al cinematismo classico, caratterizzato dal distacco del cantonale che si trascina una porzione cuneiforme della parete complanare all'azione sismica³.

4.4 Cordoli in muratura armata.

Per ottenere un significativo miglioramento del comportamento d'insieme e quindi per far collaborare le strutture murarie, l'inserimento di cordoli sommitali è comunque necessario.

La funzione strutturale dei cordoli viene esplicitata attraverso tre prestazioni statiche fondamentali, che consistono nella capacità di:

- assorbire le sollecitazioni assiali e di ripartirle sulle murature d'imposta,
- ripartire i carichi concentrati verticali in modo da agevolarne la diffusione nella muratura sottostante;
- contrastare i pericolosi meccanismi di danno fuori del piano, come illustrati nel cap.1.

Per far fronte a queste esigenze si possono adottare varie soluzioni, tuttavia ogni tipo di cordolo presenta delle peculiarità che lo distinguono dagli altri, per cui prevalgono alcune prestazioni statiche rispetto ad altre. Quelli in cemento armato sono adatti per assorbire gli sforzi assiali, ma sono troppo rigidi per garantire l'uniforme diffusione dei carichi concentrati verticali e di conseguenza non si dimostrano efficaci nel contenere i meccanismi fuori del piano.

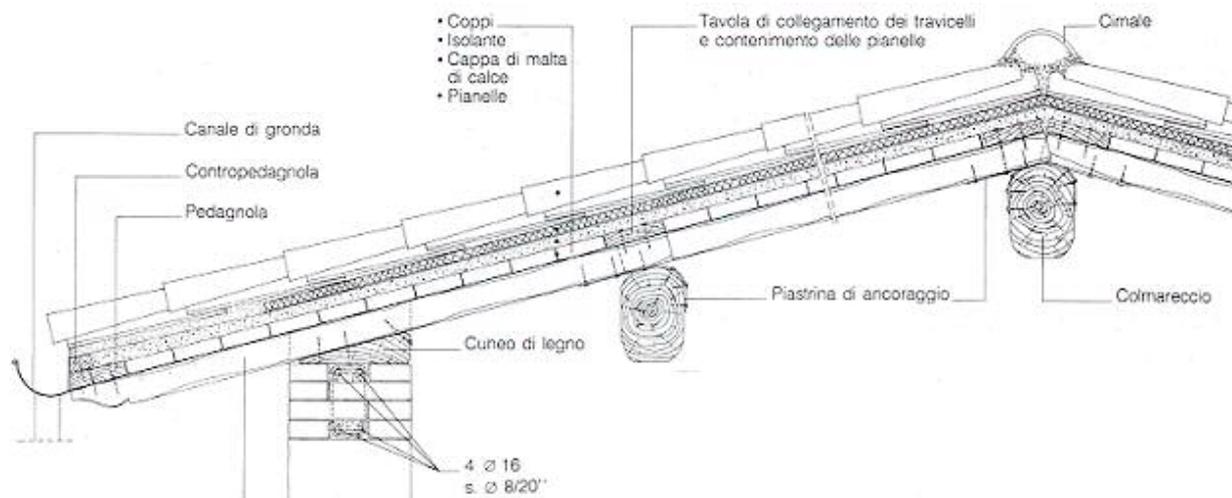
I cordoli d'acciaio, realizzati con profilati metallici di produzione industriale, tipo HEA, IPE o sezioni composte, appoggiati direttamente sulle murature sommitali, sono anch'essi adatti ad assorbire gli sforzi assiali, ma hanno il difetto di ricondurre l'intero sforzo sull'ancoraggio a monte, inoltre risultano poco compatibili con la struttura muraria di supporto. La situazione migliora con la creazione di un complesso sistema di connessioni attraverso perforazioni armate, che però influiscono in modo sproporzionato sui costi di realizzazione.

Un'altra soluzione, introdotta di recente e associata alla diffusione delle fibre in materiali compositi, consiste nella fasciatura sommitale degli edifici in muratura con nastri disposti all'esterno a livello del sottogronda. I nastri assorbono gli sforzi assiali, contrastano il rigonfiamento delle pareti verso l'esterno, ma sono del tutto inefficaci nella ripartizione dei carichi verticali.

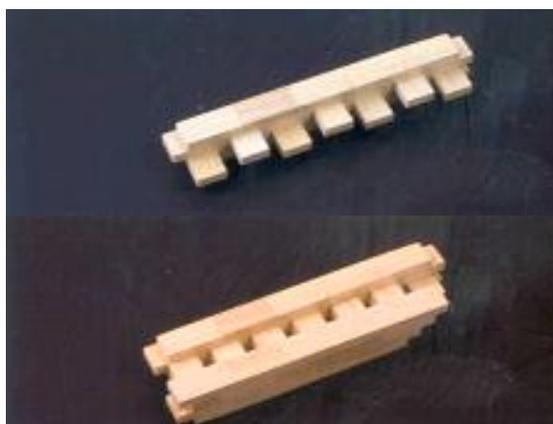
Un soluzione più compatibile con la natura della costruzione in muratura tradizionale e alternativa al cemento armato, peraltro idonea per far fronte in modo equilibrato a tutte le funzioni statiche richieste, è rappresentata dai cordoli in muratura armata, realizzati secondo la tecnica proposta alla fine degli anni '80 nel "Manuale del Recupero di Città di Castello".

Questa soluzione strutturale, inizialmente passata inosservata, è quella che si addice maggiormente alla soluzione dei problemi sopra evidenziati nel rispetto delle prescrizioni dettate dalla normativa vigente.

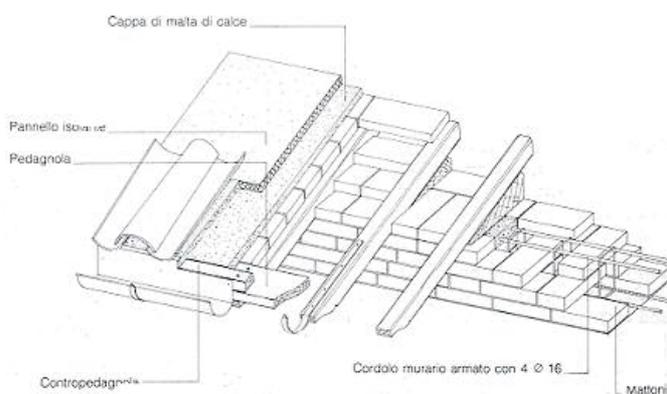
³ Edificio rurale in loc. Lippiano, Monte Santa Maria Tiberina (PG) – Proprietà Geom. S. Fiordelli.



4.27 Miglioramento strutturale dei tetti in legno con introduzione di cordoli in muratura armata su muro di tre teste.



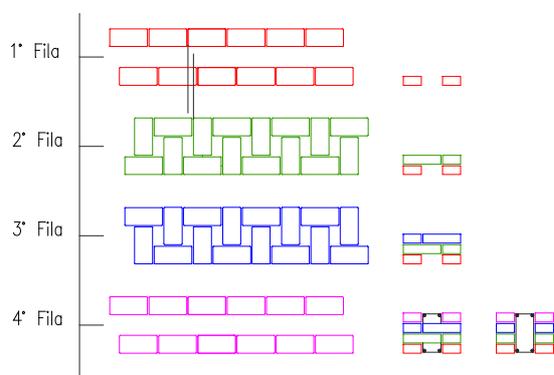
4.28 Modello in legno di cordolo in muratura armata su muro di tre teste.



4.29 Vista assonometrica del cordolo in muratura e delle armature interne.

Il cordolo in muratura, infatti, assolve la funzione prioritaria di ripartizione dei carichi verticali, crea le condizioni per una reciproca collaborazione fra le murature e permette di contrastare il ribaltamento delle pareti fuori del piano, grazie alla flessibilità che determina una buona aderenza con la muratura anche in condizioni dinamiche.

Questo tipo di cordolo si distingue da quelli in cemento armato nel principio costruttivo e quindi nel funzionamento statico; esso contiene le stesse armature prescritte dalle norme, ma viene realizzato a strati e non attraverso un getto di calcestruzzo.



4.30 Schema delle fasi costruttive del cordolo in muratura armata⁴.

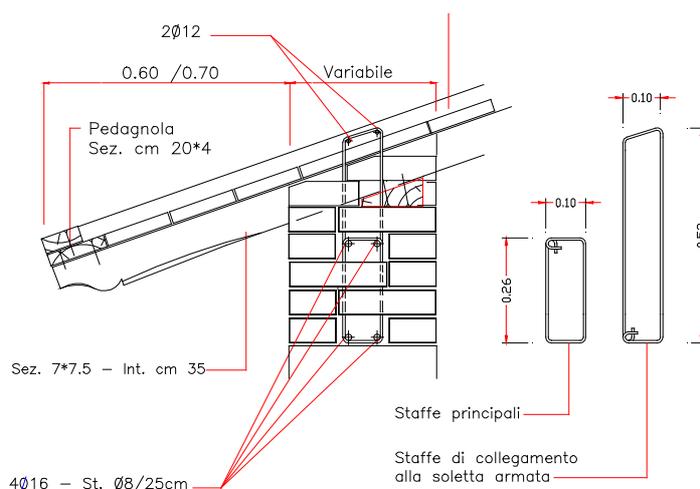
Questo permette di ridurre la resistenza a taglio fra un filare e l'altro rendendo l'elemento strutturale molto più flessibile.

L'assemblaggio dei laterizi varia in relazione allo spessore della muratura. Il tipo canonico a tre teste prevede un primo filare di mattoni posti in direzione longitudinale (per costa) per consentire il posizionamento delle armature inferiori. Il quarto filare presenta le stesse caratteristiche e consente di disporre le barre superiori, mentre i due intermedi sono quelli che realizzano la connessione fra i paramenti.

⁴ Particolare costruttivo-esecutivo rielaborato dal Geom. S. Lacavalla della Scuola Professionale Edile di Perugia, per la realizzazione di cordoli in muratura armata nell'ambito degli interventi programmati presso il "Cantiere Scuola" attivato nel Monastero di Santa Chiara delle Murate a Città di Castello.

Il passo regolare dei mattoni, disposti alternativamente di costa e di testa, permette di lasciare i vuoti adatti al posizionamento delle staffe di collegamento che chiudono la gabbia metallica.

L'interasse delle staffe deve coincidere con una testa e ½ di mattone, per fare in modo che la costruzione risulti semplificata ed il risultato qualitativamente migliore.



4.31 Sezione tipo di un cordolo in muratura armata e particolare del sistema di connessione con la soletta sull'estradosso della falda.

Per migliorare le connessioni con la struttura del tetto in legno a doppia orditura è necessario alternare due tipi di staffe di altezza diversa.

Le armature restano confinate nella parte centrale del cordolo e contribuiscono a migliorarne la flessibilità senza compromettere la funzione statica.

Mediante un'accurata disposizione delle pianelle sopra i travicelli è possibile evitare il contatto diretto degli elementi in legno con il calcestruzzo della soletta mentre si ricava lo spazio per il passaggio delle staffe. Per fissare la rete elettrosaldata si utilizzano armature aggiuntive infilate nella parte superiore delle staffe e poste sopra la rete stessa.

Il getto della soletta di cls, opportunamente dosato con inerti di argilla espansa strutturale, realizza la connessione fra il cordolo e l'orizzontamento. Le pianelle distese sopra il muro nella direzione dei travicelli proteggono l'elemento ligneo dal contatto diretto con il calcestruzzo.



4.32 Fasi esecutive del cordolo in muratura armata: disposizione pianellato e rete metallica sull'estradosso.



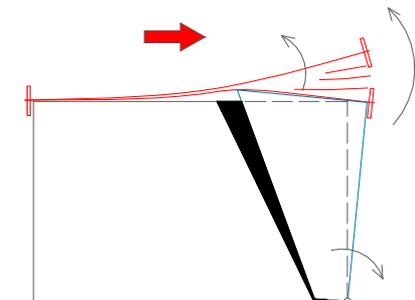
4.33 Fasi esecutive del cordolo in muratura armata: realizzazione della soletta di ripartizione.

I cordoli in muratura armata non sono da assimilare ai tiranti sommitali che a volte vengono disposti a coronamento delle pareti; questi, infatti, assolvono solo in parte alle funzioni specifiche richieste ai cordoli.

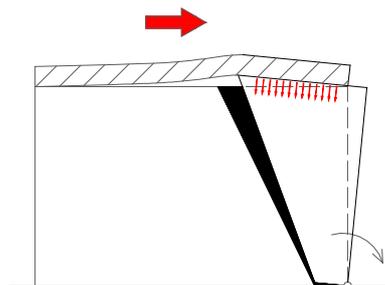
Il tirante sommitale, infatti, non garantisce la ripartizione dei carichi verticali concentrati, se non indirettamente per effetto della resistenza a trazione che amplifica l'angolo di diffusione. Inoltre la barra metallica singola tende a riportare l'intero sforzo sull'ancoraggio a monte, dove scarica delle azioni concentrate molto elevate. Il cordolo invece distribuisce le forze in modo pressoché uniforme su tutta la parete d'appoggio.

Il tirante singolo costituisce comunque una buona soluzione, da preferire certamente ai cordoli in cemento armato, avendo cura però di creare delle connessioni con la muratura mediante ancoraggi verticali.

Un altro fenomeno da considerare riguarda il pericolo d'espulsione della singola catena per effetto del moto cinematico delle pareti.



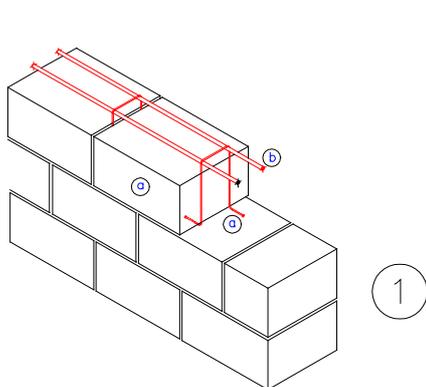
4.34 Rischio di espulsione della catene metalliche sommitali in assenza di carichi adeguati.



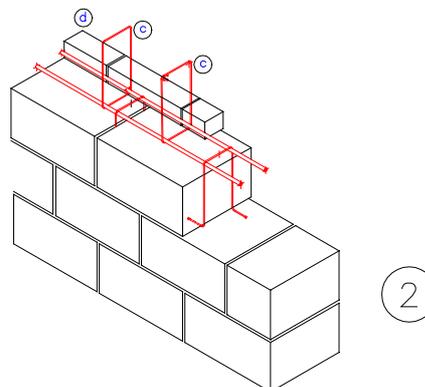
4.35 Meccanismo di rottura per azioni complanari in presenza di cordoli flessibili in muratura armata

Questo rischio sussiste anche per i cordoli in muratura in assenza di un adeguato carico stabilizzante, tuttavia il cordolo può contare quanto meno sul contrasto assicurato dal peso proprio; la catena, invece, si può liberare con più facilità della muratura sovrastante.

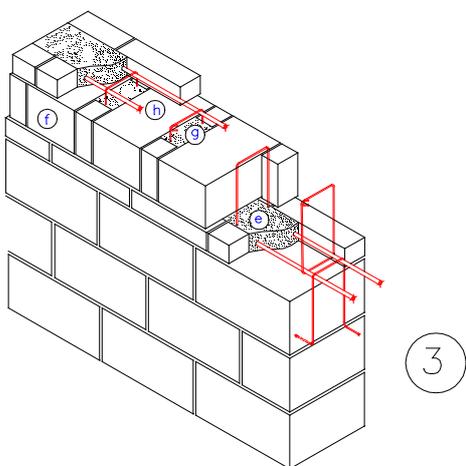
Il cordolo in muratura armata illustrato in precedenza è proposto per una muratura laterizia, pertanto il passo delle staffe ed il sistema d'ingranamento fra i due paramenti avviene attraverso un'accurata disposizione dei mattoni trasversali e longitudinali.



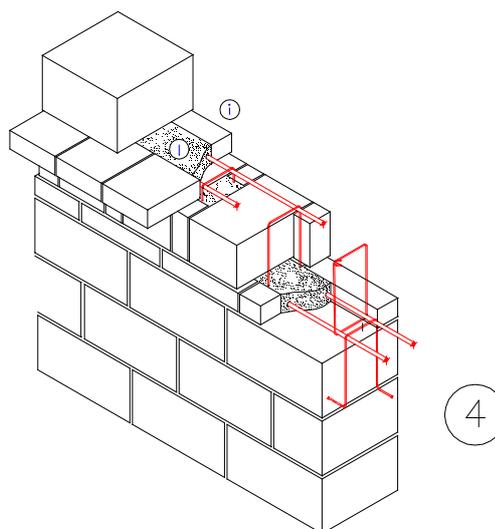
- a) Disposizione filare d'appoggio con spille inferiori.
- b) Inserimento barre longitudinali inferiori.



- c) Disposizione staffe con interasse di cm 35 ca. Disposizione filari laterali di mezzi terzaroli.



- e) Riempimento con malta del canale inferiore.
- f) Disposizione del filare centrale
- g) Riempimento con malta dei vuoti centrali
- h) Inserimento delle armature longitudinali superiori



- i) Disposizione filari laterali di mezzi terzaroli, come (d)
- l) Riempimento con malta del canale superiore

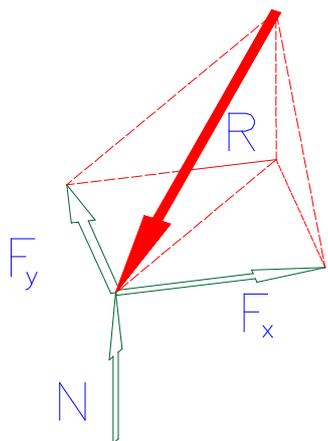
4.36 Fasi costruttive di un cordolo in muratura armata con elementi in pietra.

Con lo stesso criterio è possibile proporre soluzioni simili per la muratura di pietrame, utilizzando i formati più comuni dei blocchi e sottomisure degli stessi.

Un esempio interessante è rappresentato dal cordolo sommitale in pietra proposto per l'edilizia palermitana e illustrato in Fig. 4.36; le fasi costruttive rispondono a quelle del cordolo laterizio, con alcune semplificazioni dovute alla maggiori dimensioni delle pietre locali rispetto ai mattoni.

In questo caso è previsto l'uso di spille inferiori che hanno la funzione di legare il cordolo con la muratura d'imposta, inoltre, il filare superiore di terzaroli e mezzi terzaroli, va a costituire direttamente l'elemento di gronda.

Nell'edilizia palermitana gli sporti del tetto sono piuttosto contenuti e la tecnica costruttiva ne risulta molto semplificata.



4.37 Scomposizione della forza trasmessa dal puntone al muro d'angolo

Una funzione molto importante dei cordoli è quella di contrastare le eventuali spinte trasferite alle pareti dalle travi di copertura in condizioni sismiche.

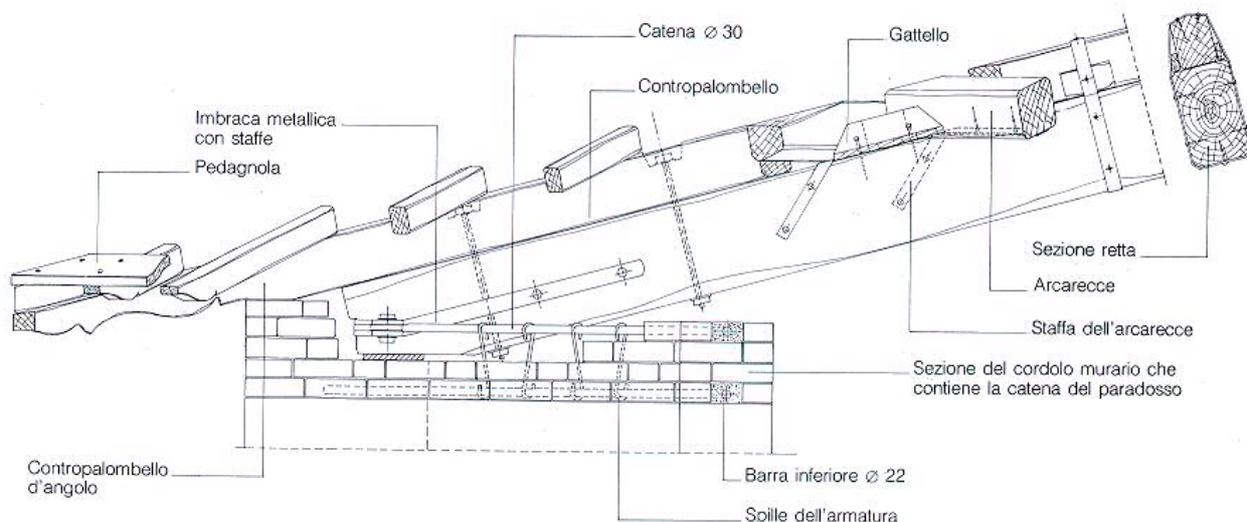
L'azione spingente e la componente di carico verticale trasmesse dai puntoni diagonali dei tetti a padiglione, vengono assorbite dalle armature del cordolo vincolate alle testate inferiori delle travi.

Al contrario dei tiranti diagonali, che possono compromettere la fruibilità degli spazi di sottotetto, il cordolo permette di assorbire la forza orizzontale secondo due componenti parallele alle pareti.

In questo modo la spinta viene assorbita e ridistribuita sulla sommità dei muri perimetrali, senza causare dissesti localizzati.

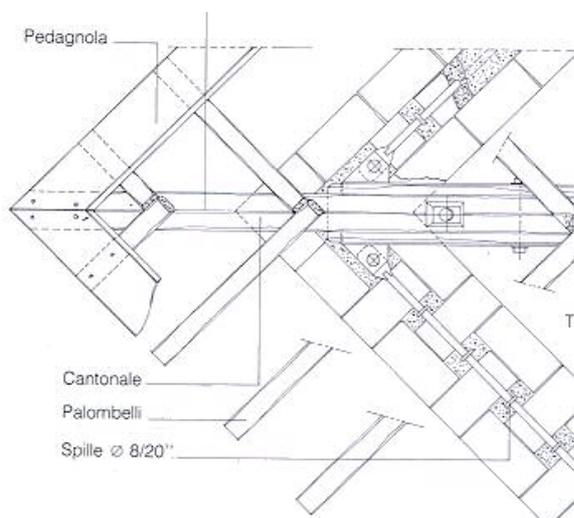
Per rendere più efficace il sistema di trattenuta è opportuno dimensionare le armature per questa specifica funzione, ovvero, se si utilizzano le armature del cordolo per assorbire la spinta sismica, sarà necessario incrementare la sezione dei tondini rispetto a quelle minime prescritte dalle norme.

Nell'esempio che di seguito si illustra, caratterizzato da un cordolo in muratura di laterizio armata con due barre e spille di collegamento, viene proposto un tondino $\phi 30$ in sostituzione del $\phi 22$ d'estradosso.

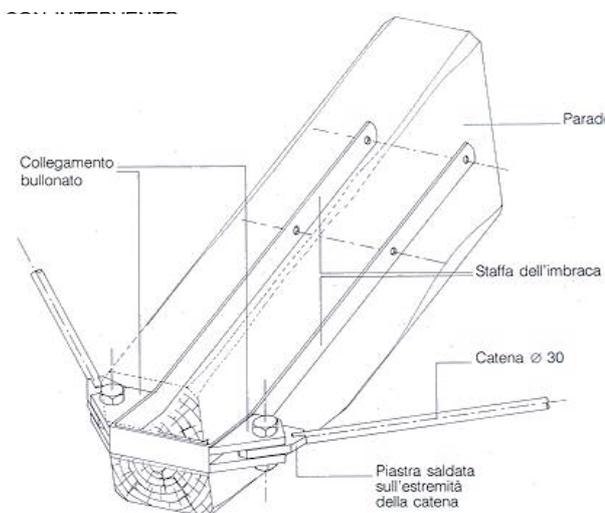


4.38 Profilo della soluzione costruttiva per un puntone diagonale sul muro d'angolo: sistema d'appoggio e ancoraggio.

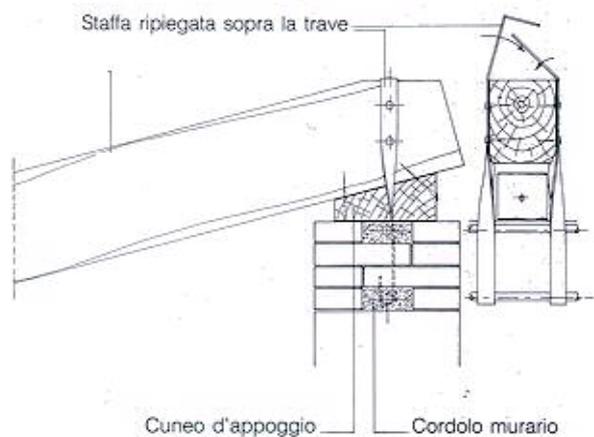
Mediante una corretta analisi degli spessori occupati dalle orditure lignee e dalla sovrastruttura in relazione al profilo del cordolo sommitale, si possono posizionare le armature alla quota utile per l'ancoraggio in testa del puntone, coincidente sostanzialmente con l'asse dello stesso elemento strutturale. Non sempre questo intervento è agevole e spesso richiede la demolizione di un'ampia fascia di muratura sommitale per non alterare le quote di gronda.



4.39 Pianta del muro d'angolo con cordolo sommitale e armature di ancoraggio del puntone



4.40 Particolare del sistema di ancoraggio della testata alle armature superiori del cordolo in muratura armata



4.41 Particolare costruttivo della testata superiore di trave potenzialmente spingente, con predisposizione del cuneo per l'appoggio in piano.



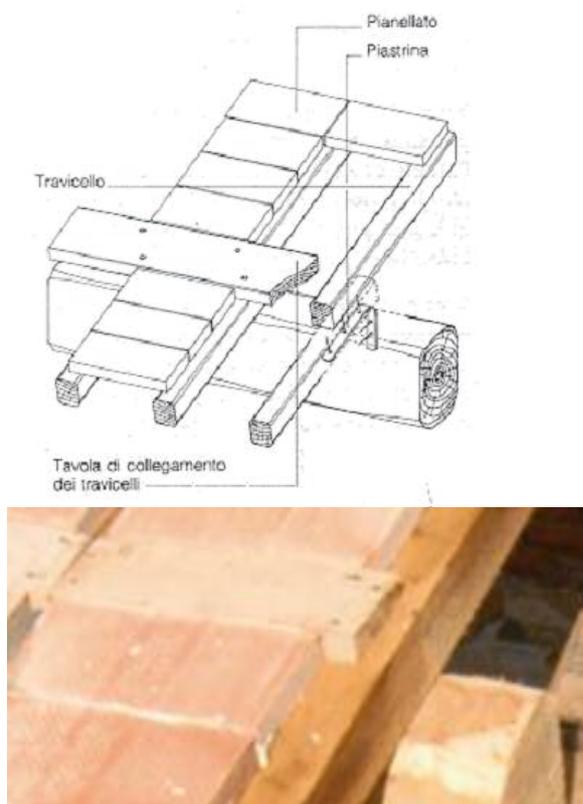
Se l'ancoraggio della testata sul muro d'angolo va realizzata con molta cura, altrettanta attenzione richiede l'appoggio superiore, perché è da questo che possono originarsi le spinte responsabili di frequenti dissesti. La presenza di cordoli di coronamento capaci di annullare gli effetti delle spinte, non deve mai costituire pretesto per semplificare la realizzazione degli altri vincoli; la struttura, infatti, deve avere una configurazione statica adeguata a prescindere dai presidi antisismici presenti.

4.5 Miglioramento delle connessioni interne.

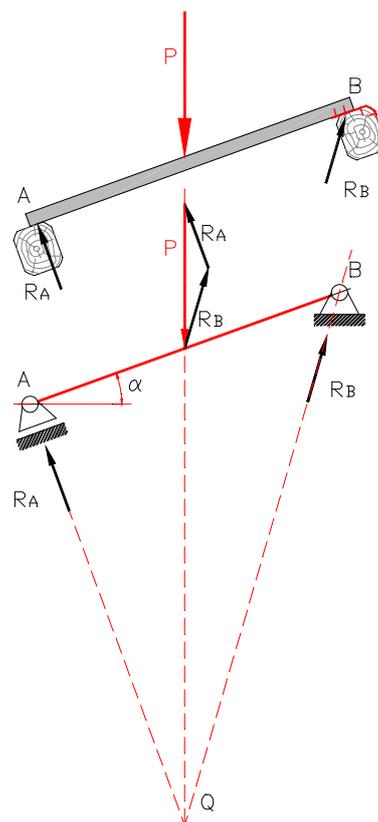
Intervenendo opportunamente nelle modalità di assemblaggio della carpenteria lignea del tetto, si possono realizzare miglioramenti relativi alla connessione fra arcarecci e travicelli apparentemente secondari e tuttavia rilevanti sulla dinamica degli stati deformativi.

In primo luogo, negli interventi di ricostruzione con nuovi elementi è preferibile utilizzare travicelli a doppia campata, al fine di limitare le frecce e migliorare le connessioni. Inoltre, per un corretto vincolo della testata del travicello, è consigliabile applicare un lamierino sotto l'appoggio a monte, da fissare con piccoli chiodi e da risvoltare (e fissare) sulla superficie dell'arcareccio (Fig. 4.42)

Ne deriva uno schema statico ottimale, con il travicello appeso alla cerniera superiore e semplicemente appoggiato sul carrello inferiore, pertanto sottoposto ad una tenso-flessione che produce effetti positivi a lungo termine contro i fenomeni deformativi lenti.



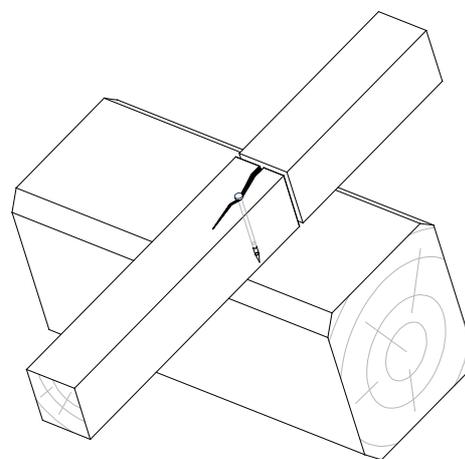
4.42 Sistema di ancoraggio dell'orditura lignea secondaria alle travi maestre del tetto.



4.43 Schema statico dei travicelli appesi all'appoggio superiore.

Non è indispensabile realizzare questo vincolo su ogni travicello, è sufficiente fissarne solo uno ogni tre, a condizione che sull'estradosso si disponga una tavola trasversale di collegamento in sostituzione di un intero filare di pianelle. La tavola funge pure da rompitrattra contro lo scorrimento del manto di pianelle.

Il sistema normalmente usato per fissare i travicelli agli arcarecci consiste nell'uso di grossi chiodi, da 10 o 12 cm, che hanno il grosso inconveniente di spaccare le testate o di *arare* le fibre dello scarso *franco di legno* residuo, risultando così scarsamente efficaci.



4.44 Fessurazione delle testate dei travicelli in conseguenza della chiodatura.

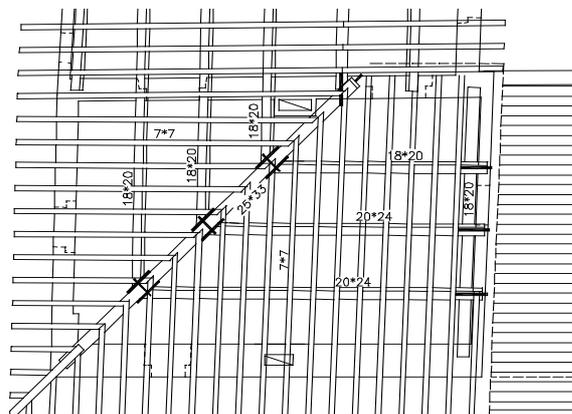
La realizzazione di buone connessioni fra le orditure maestre del tetto ed i muri portanti, attraverso i cordoli sommitali in muratura armata, risolve molti problemi strutturali della copertura che possono essere determinanti per la stabilità globale. Il sistema può essere ancora migliorato utilizzando le travature secondarie, che assolvono funzioni comunque importanti nel quadro statico d'insieme. I travicelli, infatti, attraverso la tavola d'estradosso posta in corrispondenza delle travi maestre realizzano un sistema di connessioni che permette di ripartire le azioni trasmesse lungo il piano di falda

Il buon funzionamento della carpenteria lignea del tetto presuppone l'esistenza di ottimi collegamenti fra le orditure, non sempre realizzabili con facilità e soprattutto con soluzioni economiche.

Occorre inoltre considerare che sovente le migliori soluzioni strutturali entrano in conflitto con esigenze di ordine funzionale poco compatibili con la sicurezza. Sono sempre più frequenti i casi di recupero degli spazi di sottotetto ad uso abitativo, dove l'altezza eccessiva delle orditure organizzate su tre ordini compromette la fruibilità dello spazio utile. Una soluzione adottata da molti progettisti consiste nel connettere gli arcarecci al fianco dei puntoni, recuperando in tal modo un'altezza di circa 20-25 cm corrispondente allo spessore di questi elementi.

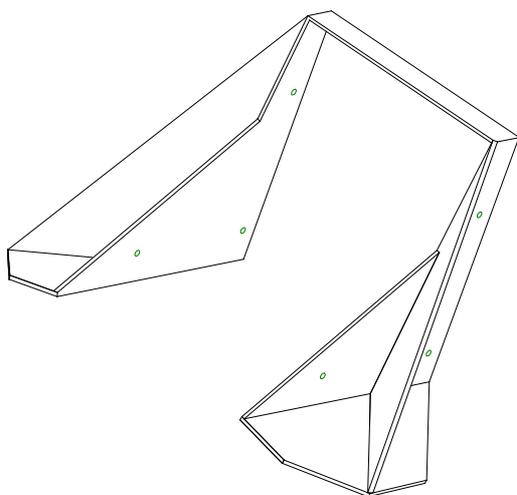
Usava in passato realizzare un'incavo sul fianco del puntone, della profondità di circa 2 cm, sagomato secondo l'impronta dell'arcareccio da inserire; per il fissaggio si utilizzava un grosso chiodo posto a "tradimento". La soluzione è indubbiamente efficace, tuttavia non convince pienamente sotto l'aspetto della sicurezza statica.

Una soluzione sicuramente più affidabile per evitare lo sfilamento delle travi, soprattutto in zona sismica, prevede l'uso di staffe metalliche poste a cavallo del puntone, atte ad impedire lo sfilamento e lo scorrimento dei legni.



4.45 Tetto a padiglione con arcarecci disposti nello spessore del puntone diagonale

4.46 Configurazione dell'innesto degli arcarecci a spessore con la trave maestra



4.47 Staffa d'appoggio per le testate degli arcarecci.



4.48 Sulla testa dell'arcareccio viene praticato un taglio per innestare l'anima della piastra.

4.6 Impiego delle travi con contraffisso.

Il tema del sottodimensionamento delle orditure lignee, già evidenziato per le strutture dei solai, si presenta di frequente anche nelle strutture dei tetti, dove per le carpenterie lignee, non destinate alla vista, spesso prevale l'impiego di elementi di recupero, non di rado di sezione insufficiente.

Il deterioramento delle coperture rischia di passare inosservato per lungo tempo, a meno di un controllo sistematico che raramente si verifica. Bisogna inoltre osservare come prevalga, di fronte a dissesti localizzati, la tendenza a rinviare gli interventi risolutivi a favore di soluzioni provvisorie perché economiche.

Uno sguardo alle tecniche di consolidamento già illustrate per le strutture dei solai in legno permette di individuare alcune soluzioni che sembrano particolarmente adatte per intervenire sulle travi di copertura. Va tenuto conto, infatti, che le falde dei tetti garantiscono uno spazio sufficiente per ospitare sistemi di rinforzo alquanto efficaci, senza compromettere necessariamente l'uso dei locali di sottotetto.

Una tecnica d'intervento da applicare su singoli elementi strutturali, oppure in modo diffuso, consiste nell'uso di tiranti con contraffissi, che permettono di trasformare le travi ordinarie in un sistema reticolare di elevata resistenza.

Questa soluzione è proponibile sia per il rinforzo di travi esistenti sia in caso di sostituzione degli elementi. Ne illustriamo di seguito le peculiarità attraverso la presentazione di tre diversi interventi (due in questo paragrafo ed uno nel successivo) che evidenziano la notevole flessibilità di questo accorgimento.

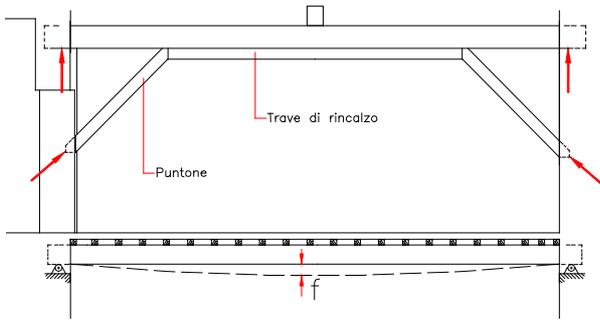
Il primo intervento riguarda il tetto di un edificio di civile abitazione⁵ caratterizzato da una maglia muraria anomala, di ml 7,30 x ml 10,35, situazione che già in passato aveva richiesto l'adozione di una soluzione costruttiva piuttosto complessa, con l'inserimento di elementi di contrasto spingenti. In questo caso si rendeva necessario consolidare il solaio di sottotetto, fortemente incurvato per effetto del peso proprio e certamente inadeguato rispetto ai nuovi carichi di esercizio.

L'elemento resistente, dimensionato per sostenere il tetto ed il solaio piano gravante sulla catena, è costituito da una trave maestra con unico contraffisso, che elimina la spinta presente nella configurazione originaria. Il nuovo schema statico si dimostra efficace ed in linea con le prescrizioni normative. Sull'elemento portante principale sono appoggiate due travi mediane longitudinali che fungono da rompitratta per gli arcarecci orditi secondo la dimensione minore.

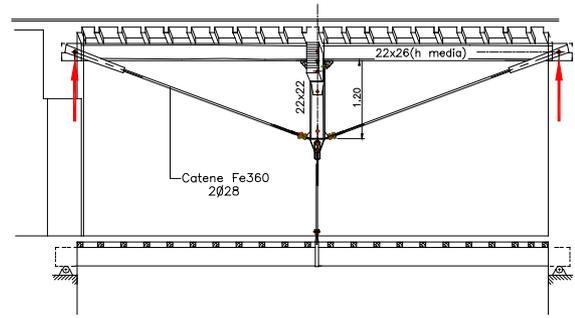
La soluzione di progetto ripropone la gerarchia strutturale del tetto originario ed utilizza gli stessi appoggi delle travi esistenti, in modo da non alterare il sistema di diffusione dei carichi che ha prodotto l'assestamento della muratura sottostante. Il cordolo in muratura armata che segue l'intero perimetro della maglia muraria offre ulteriori vantaggi nella ripartizione degli sforzi.



⁵ Intervento di miglioramento sismico su edificio privato di Proprietà Zigrino-Guerri, situato in Città di Castello (PG), via S. Florido. Progetto e D.L. Ing. G. Cangì. Impresa esecutrice INFOEdil di Capecci M. & C., Città di Castello (PG) – 2001-02.



4.49 Configurazione spingente del tetto originario



4.50 Trave con contraffisso a sostegno della copertura e del solaio di sottotetto (dim. ml 7.30 x ml 10.35)

La trave originaria destinata a sostenere la parte centrale della copertura presentava una flessione piuttosto evidente, nonostante il peso contenuto del tetto di pianelle privo di caldana.

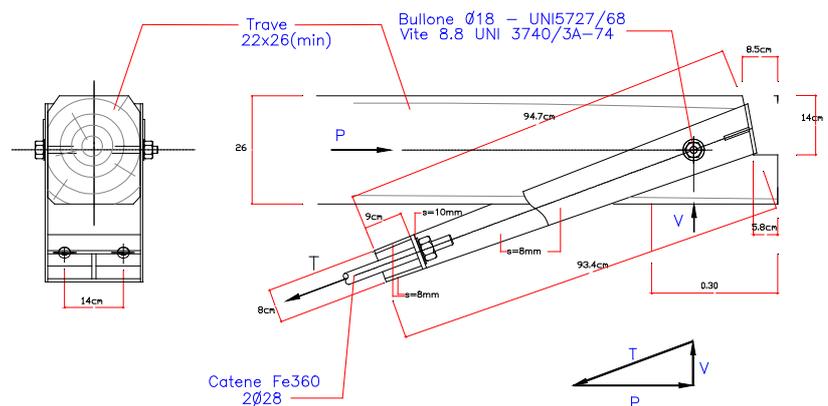
Il tentativo di contrastare le deformazioni con l'introduzione di saette appoggiate sui muri laterali, ha contrastato l'aggravarsi della situazione, ma ha determinato una sollecitazione spingente ortogonale ai muri d'appoggio non certo trascurabile.

La realizzazione della trave con contraffisso centrale pone problemi funzionali che devono essere valutati in fase di progetto; in pratica la struttura assume la configurazione di una capriata ribaltata, dove i componenti strutturali lavorano al contrario rispetto all'incavallatura classica.

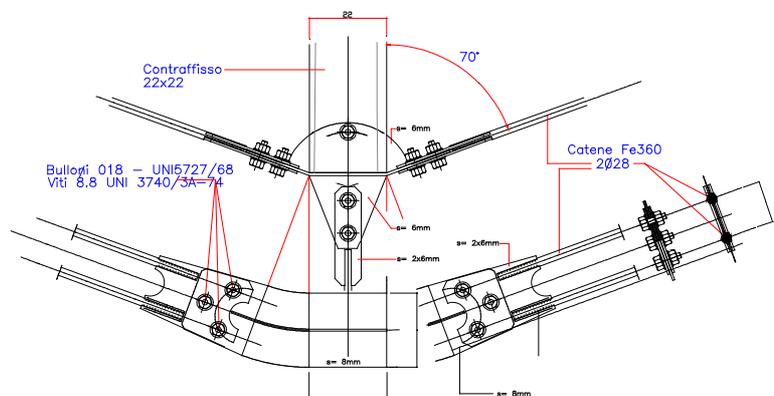
Nel complesso la struttura acquista una rigidità così elevata che permette di appendere pure le travi del solaio di sottotetto e di contenere gli stati deformativi.

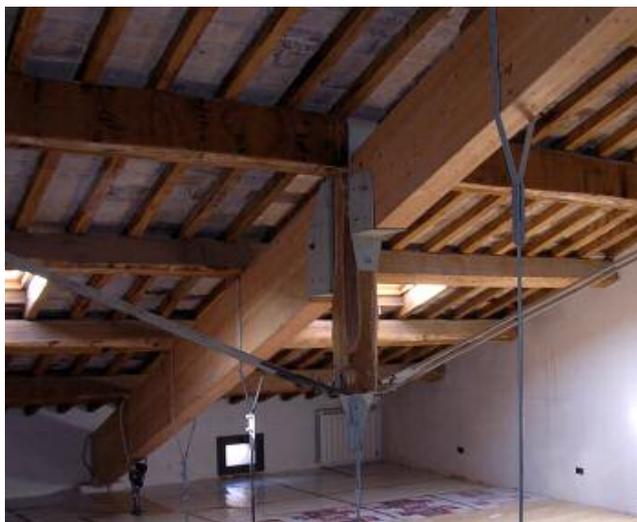


4.51 Particolare costruttivo ed esecutivo del nodo d'appoggio e sistema d'ancoraggio del tirante doppio.



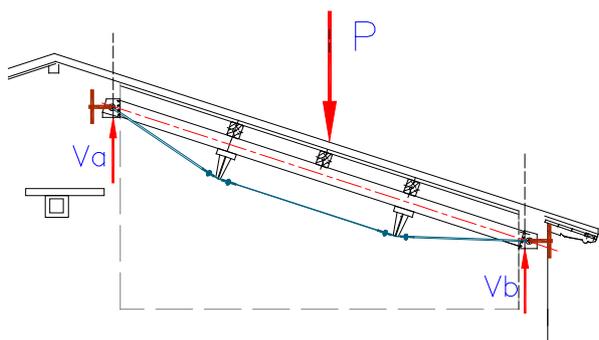
4.52 Particolare costruttivo ed esecutivo del nodo inferiore del contraffisso.





4.53 Trave con contraffisso ricavata dall'arcareccio centrale: viste d'insieme.

Il secondo intervento presenta una soluzione strutturale a doppio contraffisso adottata per il nuovo tetto in legno del Monastero di Santa Chiara delle Murate a Città di Castello⁶; anche in questo caso la struttura è stata ricostruita nel rispetto della geometria originaria, solo che al posto di due grossi puntoni rompitratta, molto deformati, sono state inserite travi con contraffissi.



4.54 Configurazione statica di progetto della trave con tiranti e doppio contraffisso.



4.55 Soluzione costruttiva dei tiranti metallici e dei contraffissi in legno di castagno.

L'intervento è stato preceduto dalla demolizione di una fascia di muratura sommitale, necessaria per costruire i cordoli in muratura armata senza incrementare la quota di gronda.

Le testate delle nuove travi sono state sagomate per creare appoggi orizzontali e sono state appese al cordolo tramite staffe. In realtà, per una buona ripartizione dei carichi concentrati, le travi andrebbero impostate sopra il cordolo, ma questo avrebbe comportato la demolizione di una fascia di muratura troppo alta.

La soluzione di appendere le travi al cordolo facendo uso di elementi metallici garantisce lo stesso effetto con notevole risparmio.

Per mettere in tensione le staffe di sostegno è sufficiente appoggiare le travi su sottili cuscini di poliuretano, da eliminare successivamente mediante una fiamma ossidrica dopo la realizzazione del sistema di ancoraggio al cordolo. In questo modo la trave si troverà appesa alla struttura muraria producendo un ottimo effetto stabilizzante.

⁶ Intervento di riparazione danno e restauro antisismico ala ovest del Monastero di Santa Chiara delle Murate a Città di Castello (PG) eseguito con finanziamento della Regione Umbria, Ufficio Temporaneo per l'attività di ricostruzione degli edifici danneggiati dal sisma del 1997 ai sensi della L.R. n. 32/98. Progetto e D.L. Ing. G. Cangi – Arch. G. Boni. Impresa esecutrice: C.E.S.A. di Falcini Enzo, Città di Castello (PG). Direttore di Cantiere Geom. M. Caselli – 2001-03.



4.56 Monastero di Santa Chiara delle Murate – Città di Castello: travi rompitratta con tiranti e contraffissi

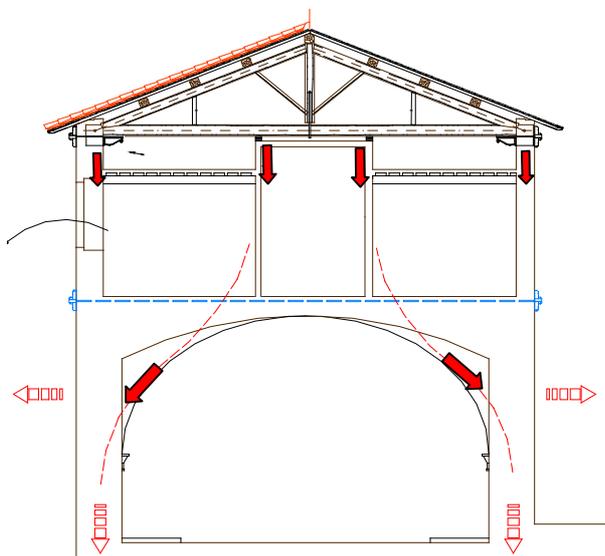
I particolari costruttivi dei nodi sono gli stessi illustrati per il caso precedente, fatta eccezione per piccole modifiche dovute alla presenza di due contraffissi e quindi alla diversa geometria dei tiranti.

E' opportuno far notare che la configurazione a doppio contraffisso è adatta per le strutture di copertura, dove i carichi statici sono distribuiti in modo piuttosto uniforme lungo la falda. Quando sono invece presenti carichi concentrati asimmetrici, questa soluzione può innescare sollecitazioni di taglio e flessione molto elevate nei singoli tratti della trave.

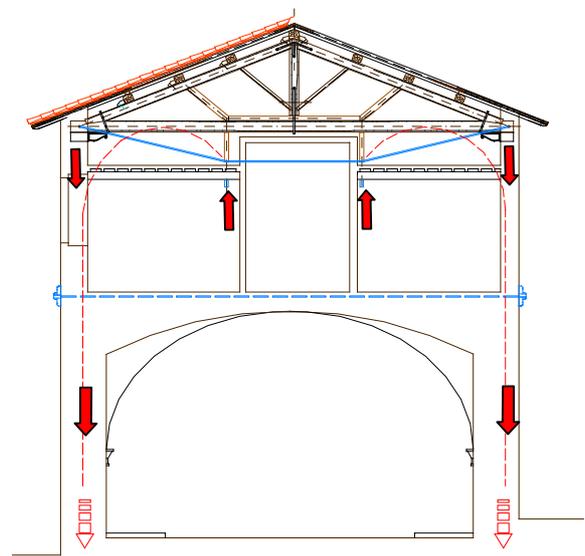
4.7 Rinforzo delle capriate mediante contraffissi.

Il terzo esempio relativo all'applicazione di questa tecnica riguarda l'intervento di consolidamento di una grande copertura su incavallature lignee presso la foresteria dello stesso Monastero delle Murate⁷.

In questo caso il sistema dei tiranti con contraffissi è stato adottato per il recupero di una serie di capriate molto deformate che si sono appoggiate sulle pareti divisorie dell'ambiente sottostante.



4.57 Configurazione originaria spingente: capriate appoggiate sui muri centrali in falso



4.58 Soluzione di progetto con nuovo assetto statico delle capriate rinforzate

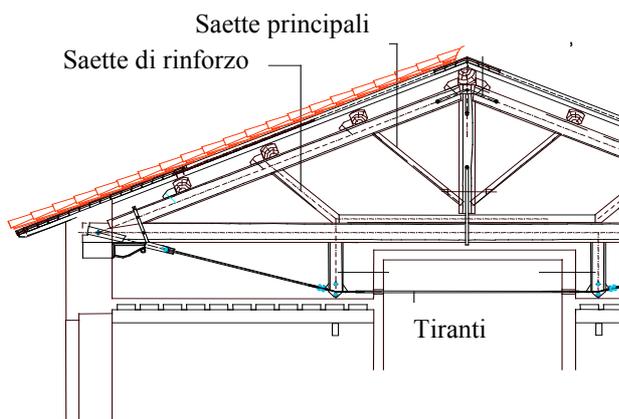
⁷ Intervento di riparazione danno e restauro antisismico alla Foresteria del Monastero di Santa Chiara delle Murate a Città di Castello (PG) finanziato dalla Regione Umbria - Direzione Cultura, Turismo, Istruzione, Formazione e Lavoro, Ufficio Temporaneo Attività di Ricostruzione per i Beni Culturali 2002 e Interventi Integrativi, con fondi finalizzati alla riparazione dei danni provocati dalle crisi sismiche del 1997 ai sensi della L.R. n. 32/98.

Progetto e D.L. Ing. G. Cangi. Impresa esecutrice: C.E.S.A. di Falcini Enzo, Città di Castello (PG). Direttore di Cantiere Geom. M. Caselli – 2004.

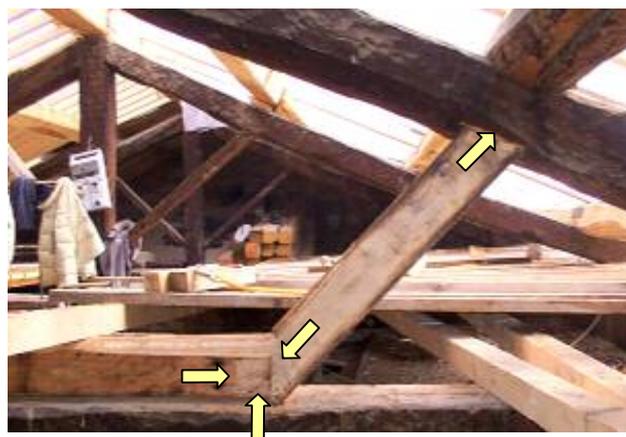
Si tratta di un intervento in copertura finalizzato al miglioramento sismico globale, che prevede la modifica dello schema statico generale.

Il meccanismo di danno, innescato dalla spinta della volta del piano nobile contro le pareti laterali, si è amplificato nel tempo a causa dell'appesantimento causato dalla costruzione di due pareti laterizie che sostengono i nuovi solai di soffittatura. Ad aggravare la situazione ha contribuito l'assestamento delle capriate che si sono appoggiate pericolosamente sulla sommità di questi muri, per cui la volta del piano primo ha assunto una funzione portante per la stessa copertura.

Per migliorare la configurazione d'insieme si è scelto di intervenire sulle capriate per sollevarle dai muri centrali; l'operazione si è resa possibile attraverso la disposizione di tiranti e contraffissi e l'introduzione di saette di rinalzo.



4.59 Particolare della configurazione statica di progetto con tiranti e contraffissi



4.60 Fase d'inserimento delle saette laterali allineate ai punti d'appoggio degli arcarecci

Lo schema statico di progetto deriva dalla configurazione originaria con l'aggiunta di aste tese e compresse che realizzano un sistema adatto a ricondurre i pesi sui muri laterali.

Il miglioramento delle prestazioni sismiche della struttura deriva dal nuovo andamento degli sforzi interni, che raggiungono le fondazioni seguendo un percorso modificato rispetto a quello della configurazione originaria; i cordoli in muratura armata realizzati a coronamento dei muri portanti forniscono un'ulteriore contributo alla stabilità globale.

Rispetto agli interventi di sostituzione delle coperture esistenti, è stato privilegiato in questo caso il recupero funzionale dei componenti lignei deteriorati, reso possibile semplicemente attraverso una riduzione delle sollecitazioni interne nonostante l'incremento dei carichi complessivi.

4.8 Ricostruzione di tetti con capriate.

La ricostruzione integrale dei tetti in legno permette di eseguire interventi più incisivi e di maggiore effetto ai fini del miglioramento sismico. E' necessario comunque operare una distinzione fra gli interventi che pur nella sostituzione integrale della copertura tendono a conservare la gerarchia strutturale e la posizione delle travature e quelli dove, invece, viene modificata anche la configurazione strutturale creando un nuovo assetto statico.

Questi ultimi interventi richiedono maggiore cautela. Infatti, variare la configurazione statica originaria non costituisce di per sé un fatto negativo e, al contrario, può risultare risolutivo per l'eliminazione di configurazioni statiche patologiche, ma richiede un'attenta analisi dei nuovi percorsi preferenziali che vengono a determinarsi nella diffusione degli sforzi di compressione.

Gli esempi illustrati di seguito riguardano la sostituzione delle coperture completamente deteriorate di un antico complesso abbaziale ed evidenziano diversi modi di operare in funzione delle esigenze statiche, funzionali e distributive emerse in fase di progettazione.

L'Abbadia di Uselle⁸, situata nel territorio montano del comune di San Giustino, fra Umbria e Toscana, comprende la chiesa caratterizzata da un impianto a "T", tipico delle abbazie vallombrosane al cui tipo l'edificio va ricondotto, ed una canonica sorta su di una preesistente torre d'avvistamento.

L'intervento ha interessato tutte le coperture, ma su due parti merita soffermare l'attenzione, per l'importante funzione che le nuove strutture progettate svolgono ai fini del miglioramento sismico globale.

In questo caso infatti, i tetti assumono una funzione di trattenuta delle pareti d'imposta di grande rilievo nel quadro statico globale. Il tetto della chiesa, in particolare, è sostenuto da incavallature semplici, le cui catene hanno la funzione di tenere unite le pareti laterali e di contrastare i fenomeni di ribaltamento che già in passato si erano manifestati.

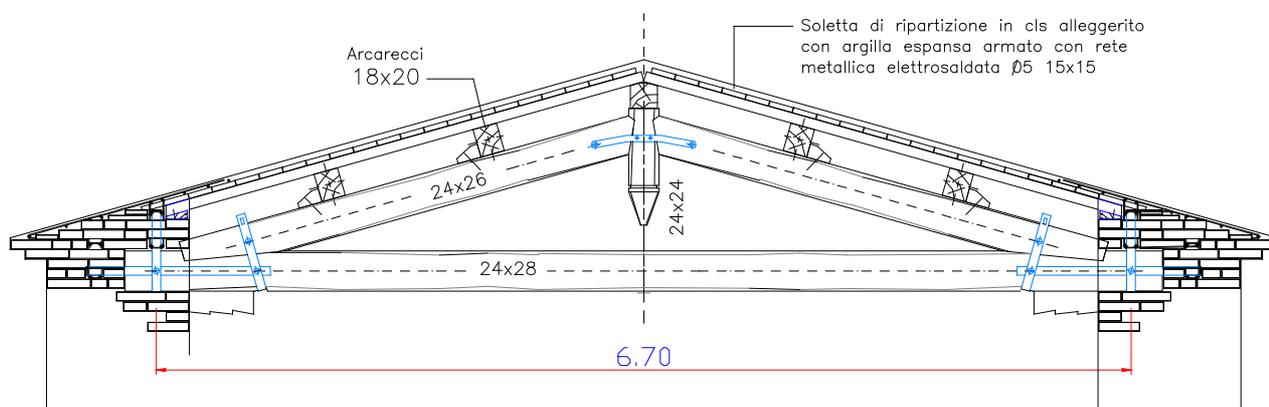
Questo è uno dei motivi che ha indotto a posizionare le nuove travi nelle stesse sedi delle orditure originali; soluzione che invece non è stata adottata per il tetto della canonica. In questo caso infatti si è conservata la disposizione degli arcarecci, ma è stata inserita una capriata trasversale al corpo di fabbrica che funge da rompitratta e soprattutto da catena in grado di trattenere le pareti contrapposte.

Si tratta di interventi in cui alle coperture compete una funzione antisismica che in qualche modo prevale rispetto alle funzioni statiche ordinarie. Tuttavia la copertura può svolgere questo delicato compito solo attraverso un adeguato sistema di connessione fra l'orizzontamento e le pareti portanti, che può essere garantito adottando le soluzioni già proposte.

4.9 Tetto su incavallature semplici.

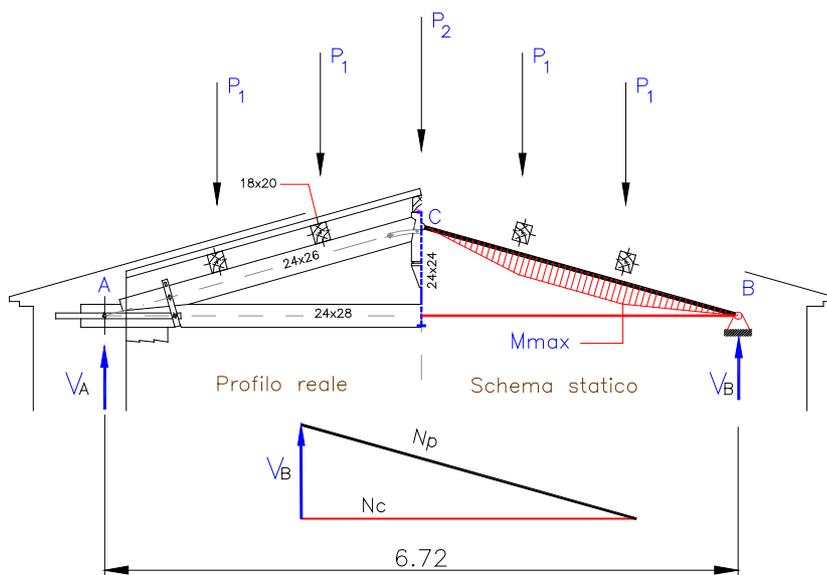
La copertura della chiesa a navata unica è sostenuta da una serie di capriate impostate sulle pareti laterali poste ad interasse regolare di circa 3 metri.

La configurazione ad incavallatura semplice è arricchita da alcuni particolari che la distinguono rispetto al tipo base; il monaco, come già specificato, sembra non svolgere alcuna funzione strutturale, ma in realtà permette di evitare il contatto diretto fra le dei teste dei puntoni e nella configurazione di progetto contribuisce a sostenere la catena lignea che altrimenti tenderebbe a flettere in modo evidente.



4.61 Configurazione di progetto della capriata ad incavallatura semplice. I nodi d'unione fra la catena ed i puntoni sono rinforzati con un sistema di staffature che connettono gli elementi lignei al cordolo sommitale in muratura armata.

⁸ L'intervento di riparazione danno e miglioramento sismico è stato finanziato dalla Regione Umbria - Direzione Cultura, Turismo, Istruzione, Formazione e Lavoro, Ufficio Temporaneo Attività di Ricostruzione per i Beni Culturali 2002 e Interventi Integrativi, con fondi finalizzati alla riparazione dei danni provocati dalle crisi sismiche del 1997 ai sensi della L.R. n. 32/98. Progetto architettonico e D.L.: Arch. F. Raschi – Geom. A. Renzetti. Progetto strutturale: Ing. G. Cangini.



4.62 Schema statico della capriata con diagramma delle forze del nodo d'appoggio.

Il calcolo degli sforzi delle aste può essere eseguito con i tradizionali metodi grafici, che attraverso l'uso del computer assicurano un notevole livello di precisione.

In particolare il vecchio metodo *cremoniano* consente di avere risultati di precisione e permette di individuare molti problemi connessi con la geometria strutturale già a livello grafico.

Il caso esaminato è di particolare semplicità, ma il metodo risulta ancora più utile nell'analisi di geometrie complesse.

Per le travi sottoposte a carichi concentrati fuori dei nodi è necessario considerare anche lo sforzo flessionale combinato con la sollecitazione di sforzo normale che compete a ciascuna asta.



4.63 Capriate, arcarecci e travicelli del tetto della chiesa: fasi esecutive. Sulla sommità delle pareti si individuano i filari di mattoni che compongono il cordolo in muratura armata.



4.64 Sistema di connessione fra catena-puntone, con staffa d'ancoraggio al cordolo sommitale.

Il funzionamento del sistema di ancoraggio è affidato alle testate delle catene, che devono essere ben connesse ai puntoni ma soprattutto ai muri d'appoggio.

La doppia staffa posta ai lati della catena prosegue all'interno della muratura fino ad ancorarsi alle armature del cordolo esterno, visibile in Fig. 4.65 l'elevato spessore della parete richiede, infatti, un doppio cordolo, armato con 8 barre $\Phi 16$.

Il primo cordolo è posto sul lato esterno allo stesso livello della catena, l'altro è situato sull'estradosso, ma collegato al primo, come si vede nello schema grafico in Fig. 4.61.

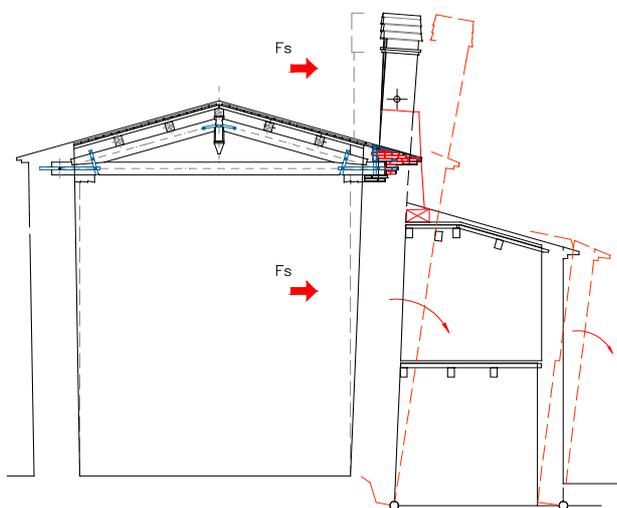
Le capriate, pertanto, sono appese al cordolo con un'ulteriore staffa verticale che viene fatta passare sotto la catena e risvoltata sulle armature del cordolo superiore.

Per mettere in tensione la staffa di sostegno si adotta il sistema illustrato in precedenza, inserendo un appoggio provvisorio in poliuretano, da rimuovere prima del completamento dell'estradosso.

La prova dell'importante funzione statica svolta dalle capriate nel trattenere le pareti laterali è fornita dalla foto 4.65 che documenta le fasi costruttive del cordolo.



4.65 Fasi esecutive del cordolo sommitale in muratura armata: particolare del cordolo esterno



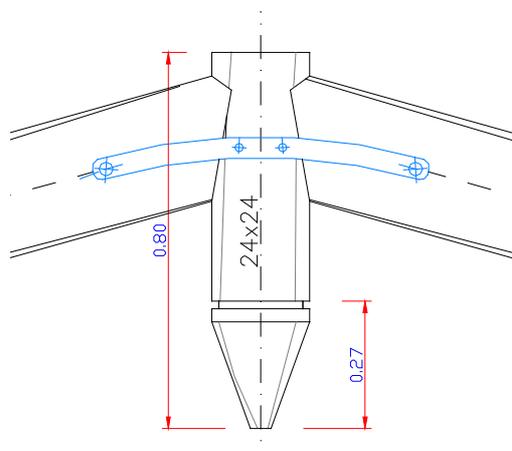
4.66 Particolare della configurazione statica di progetto con tiranti e contraffissi

I mattoni sono stati impostati fra un appoggio e l'altro seguendo il profilo sommitale della parete fortemente incurvata fra gli appoggi successivi.

Il fenomeno di ribaltamento della parete è accentuato in alcuni tratti dal trascinarsi causato dal campanile a vela, che ha prodotto un forte sbilanciamento verso l'esterno.

Il problema non è risolvibile attraverso il solo ancoraggio delle catene, tuttavia si ottiene un notevole miglioramento con il semplice ripristino delle connessioni sommitali.

Negli interventi in zona sismica è importante ricordare che lo stato di esercizio ipotizzato in condizioni statiche può essere completamente stravolto dagli effetti dinamici indotti dal sisma, per cui è possibile che le aste compresse si trovino sottoposte a sforzi di trazione, così come può avvenire il contrario, con effetti ancora più preoccupanti.



4.67 Particolare costruttivo ed esecutivo del monaco con tirante centrale.



Per questo motivo è sconsigliato utilizzare elementi snelli come le catene metalliche, efficaci in fase statica, ma incapaci di offrire il minimo contributo per eventuali azioni di contrasto.

La riduzione degli sforzi di compressione determina un allentamento dei nodi fino al distacco dei componenti strutturali che difficilmente vanno a riposizionarsi correttamente.

Per evitare questi fenomeni è necessario disporre delle piastre metalliche o dei semplici ferri piatti fissati con chiodi passanti. Nel caso specifico il nodo superiore del monaco, dove convergono i due puntoni, è rinforzato con un doppio ferro piatto curvato secondo il profilo delle falde; non vi sono chiodi in asse al monaco per consentire il passaggio del cavo metallico a sostegno della catena.



L'assenza di pareti trasversali di controvento nell'ampia navata della chiesa espone la maglia muraria al rischio di deformazioni planimetriche molto pericolose, per cui è necessario irrigidire le falde mediante dei controventi metallici ancorati sul vertice delle capriate e sulle armature dei cordoli perimetrali.

La rete elettrosaldata risvoltata sulla linea di colmo ed il getto della soletta con inerti di argilla espansa vanno a completare l'opera.

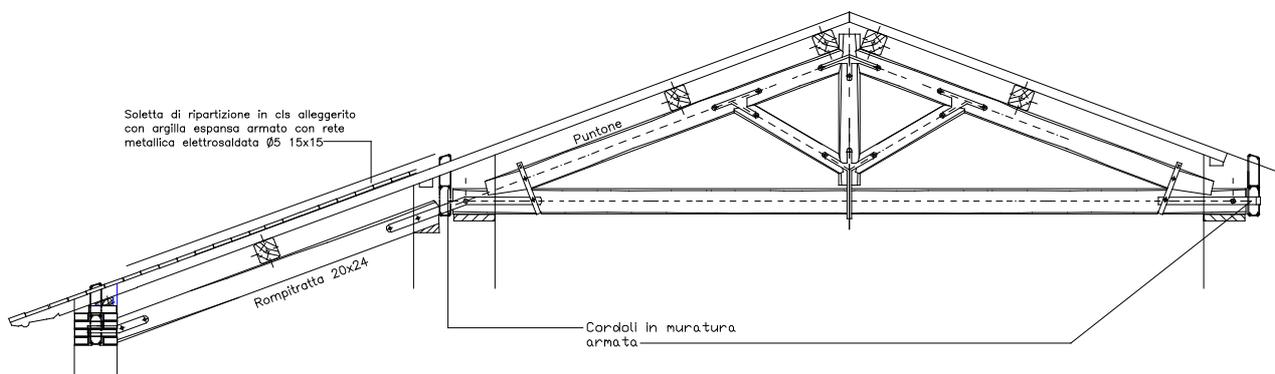
4.68 Disposizione di ferri piatti sull'estradosso della falda con funzione di controventi.

4.10 Nuove coperture su capriate classiche.

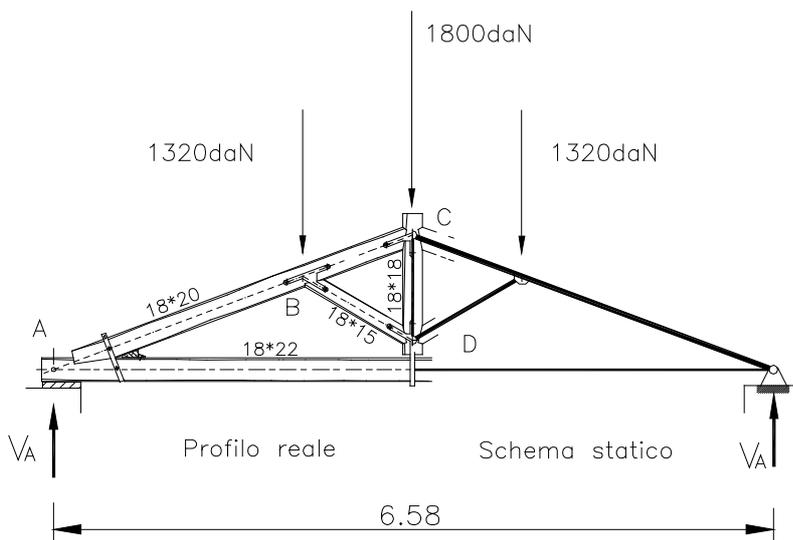
L'altro esempio di tetto interamente ricostruito con una nuova carpenteria lignea presenta una geometria classica che ben si adatta alla pendenza delle falde e all'interasse delle pareti. Uno dei puntoni presenta un prolungamento nella maglia muraria adiacente.

I particolari costruttivi non differiscono molto da quelli già illustrati, fatta eccezione per il minore spessore dei muri portanti che richiedono cordoli di dimensioni ordinarie.

Il dimensionamento delle aste è stato eseguito con lo stesso metodo *cremoniano* che permette di visualizzare i rapporti fra le forze in rapporto alle misure ed alla geometria della struttura.

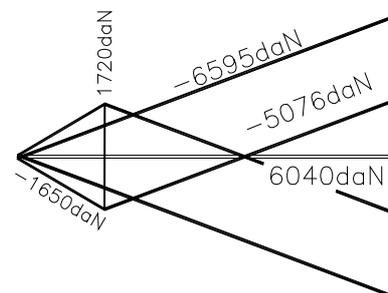


4.69 Capriata centrale a sostegno del tetto della canonica con prolungamento di falda.



4.70 Profilo reale e schema statico della capriata .

4.71 Diagramma cremoniano per la risoluzione grafica



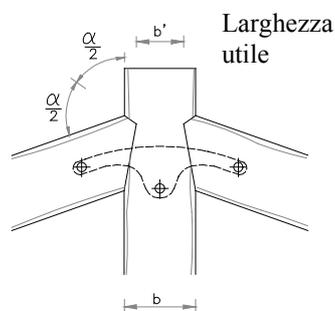
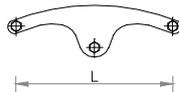
4.72 Vista d'insieme della nuova copertura con capriata in legno.

Anche in questo caso, le staffe metalliche ed il sistema di connessione fra i componenti lignei ed i muri d'appoggio risultano determinanti per la stabilità globale. L'incavallatura sostiene il tetto, mentre la catena della capriata tiene unite le pareti della canonica.

Per la corretta realizzazione dei nodi che connettono gli elementi è necessario rispettare alcune regole nel taglio dei legni e nella geometria delle staffe.

Le incisioni praticate nelle aste devono garantire l'innesto degli altri elementi senza troppo intaccare la sezione resistente. I meccanismi di rottura dei nodi possono riguardare lo strappo del monaco o della catena, ma è più probabile che si verifichi lo scorrimento per rottura a taglio della zecca di contrasto.

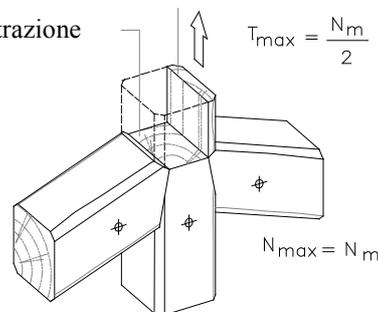
Staffa metallica superiore



4.73 Nodo superiore monaco-puntoni

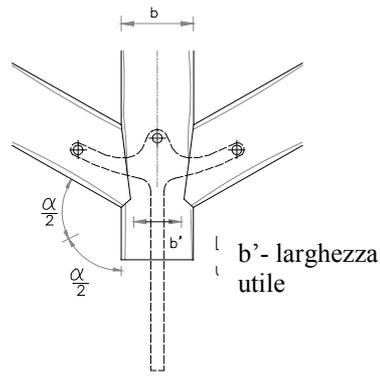
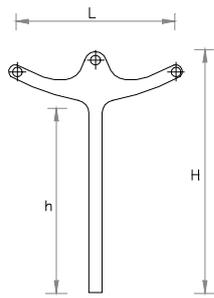
Verifica a taglio

Verifica a trazione



4.74 Sezioni resistenti a trazione/taglio sulla testa del monaco

Staffa metallica inferiore

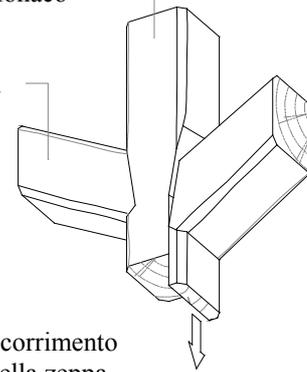


4.75 Nodo inferiore monaco-saette

Monaco

Saetta

Scorrimento della zeppa



$$\tau_{max} = \frac{N_m}{2}$$

Verifica a taglio

4.76 Sezione resistente a taglio alla base del monaco

I nodi della struttura in legno devono funzionare a prescindere dalla presenza delle staffe, che comunque vanno inserite per evitare i fenomeni descritti, che possono essere causati da eventuali sollecitazioni anomale esterne o tensioni interne ai materiali.

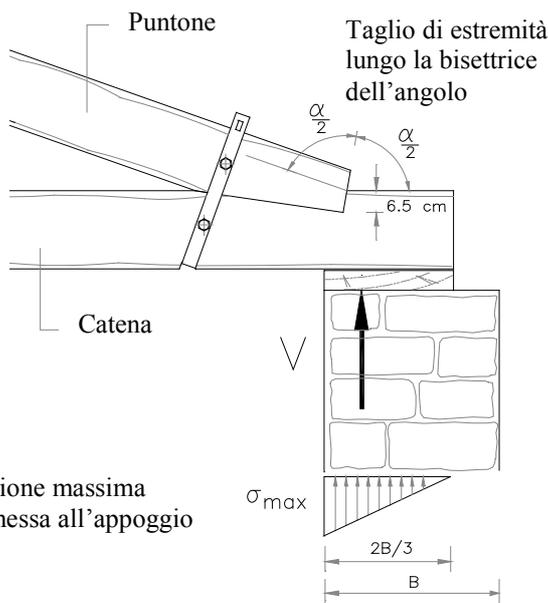
Fra tutte le staffature, una in particolare è sempre da prevedere e riguarda il nodo fra puntone e catena: è questo uno dei punti più delicati dell'elemento strutturale. Lo sforzo di compressione del puntone trasmesso alla testa della catena attraverso l'intacca praticata sull'estradosso, produce infatti sulla zeppa di contrasto una sollecitazione a taglio molto elevata.

La corretta realizzazione del nodo permette di scongiurare fenomeni di dissesto immediati, bisogna però tenere conto che le testate delle travi tendono a deteriorarsi rapidamente, per cui si possono innescare meccanismi di rottura molto pericolosi.

La fasciatura metallica realizzata con ferro piatto fra la testa del puntone e l'estremità della catena, munita di un tradizionale sistema di tensionamento a doppia zeppa, offre la sicurezza necessaria per garantire il funzionamento del nodo.

E' necessario comunque effettuare controlli frequenti della fasciatura, a causa dei naturali fenomeni di ritiro del legno, che possono produrre l'allentamento e il distacco dei ferri.

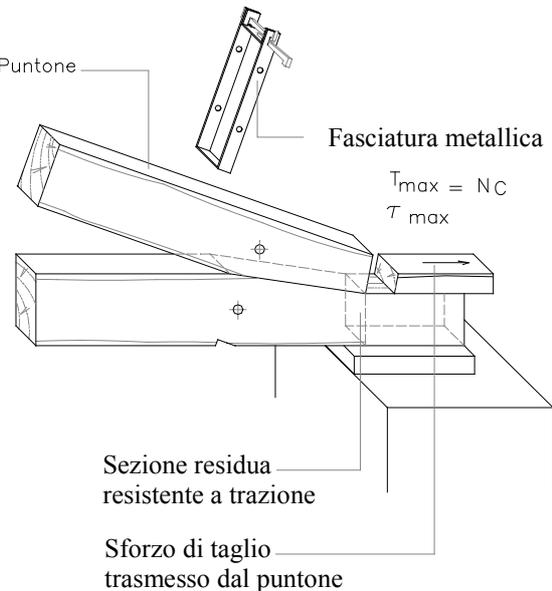
Puntone



Tensione massima trasmessa all'appoggio

Puntone

Fasciatura metallica

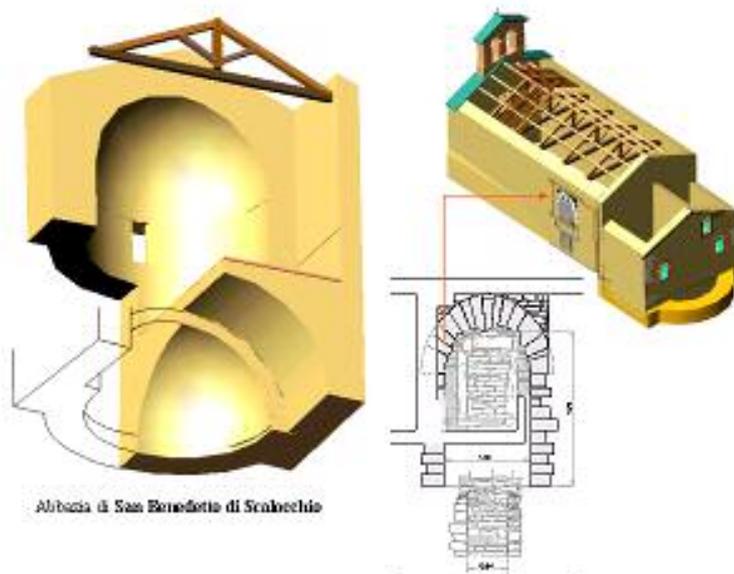
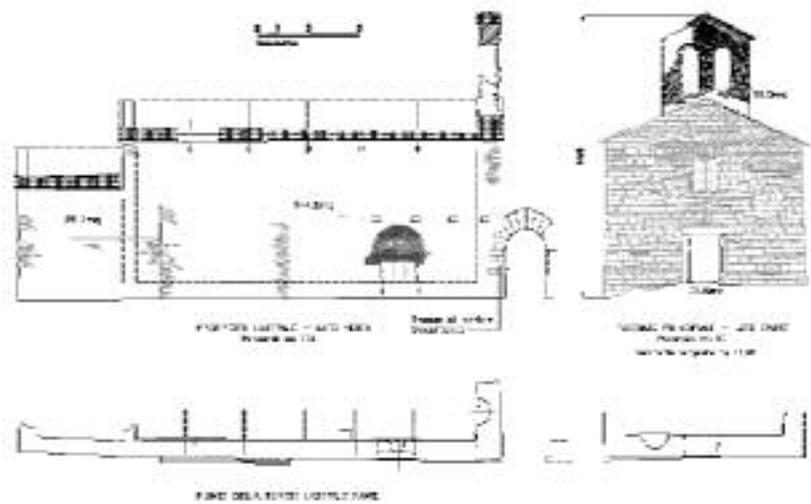
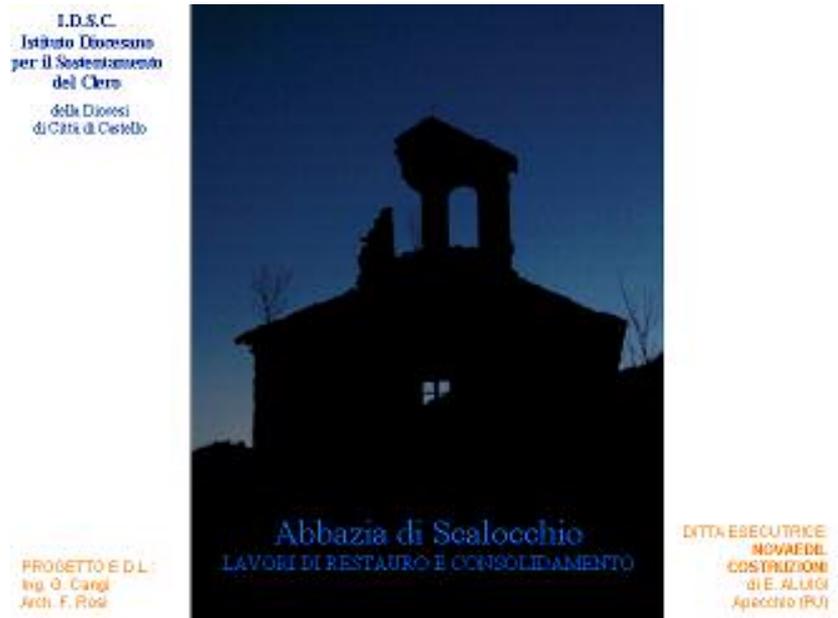


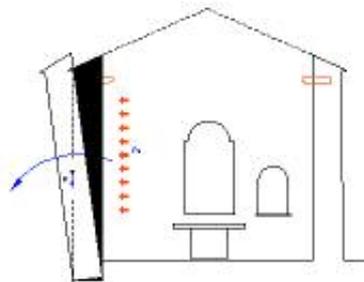
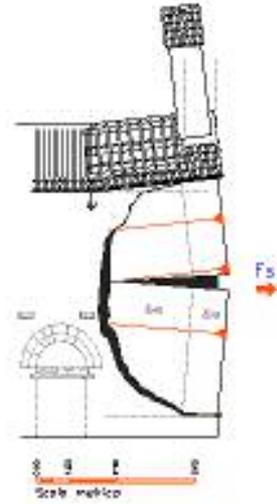
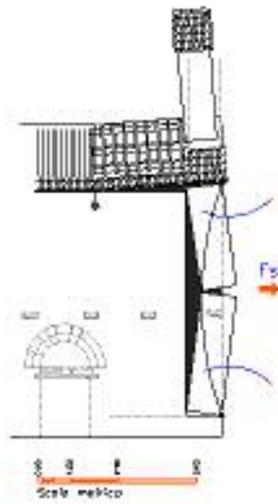
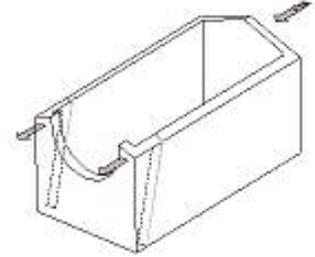
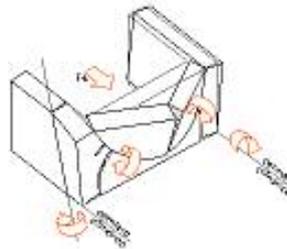
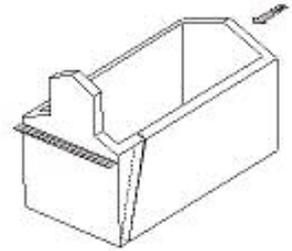
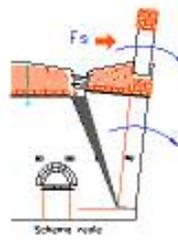
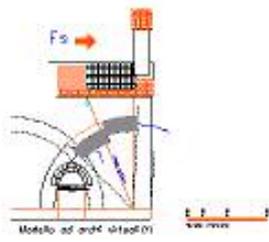
4.77 Particolare nodo d'appoggio catena-puntone

4.78 Meccanismo di rottura a taglio della catena

4.11 Atri esempi d'intervento (Immagini)

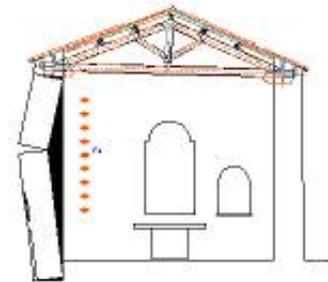
L'Abbazia di San Benedetto di Scalocchio (Città di Castello – PG)





SEZIONE TRASVERSALE A-A'

Cinemathema principale



SEZIONE TRASVERSALE A-A'

Cinemathema secondario



