

L'USO DELL'ACCIAIO NEL CONSOLIDAMENTO DELLE CAPRIATE E DEI SOLAI IN LEGNO

Lorenzo Jurina

DIS – Politecnico di Milano – www.jurina.it

- Alcune premesse sui criteri del consolidamento
- La copertura ed i solai di casa ex-Masciadri - Arcene (Bergamo)
- La copertura e i solai del "Baco da seta" nella villa Della Porta Bozzolo-Casalzuigno (Varese)
- La copertura di una torre del Castello Visconteo - Pavia
- Le capriate dell'ex Monastero di S. Clara - Pavia
- La copertura lignea della ex chiesa di San Carpofofo - Milano
- Le capriate lignee della "Cavallerizza" nel Castello di Vigevano (Pavia)
- I solai lignei di Villa S. Carlo Borromeo - Senago (Mi)
- I solai dei nuovi locali dell'Associazione Beth Amidrash-Mishkan Shmuel Beth Shlomo - Milano
- I solai dell'edificio adiacente alla chiesa di San Pietro all'Olmo - Cornaredo (Milano)
- L'organo Prestinari nella Chiesa Vecchia Di S.Pietro All'Olmo – Cornaredo (Milano)
- I solai di Palazzo Pallavicino – Cremona
- I solai di Casa Bossi – Novara
- I solai del Palazzo della Ex caserma Zanardi Bonfiglio - Voghera
- La copertura di Palazzo Silva Persichelli – Cremona
- Le coperture lignee dell' ex Filanda Meroni - Soncino (Cremona)
- La copertura di Palazzo della Ragione- Milano
- I solai del palazzo della Magnifica Comunità di Fiemme – Cavalese (Trento)
- Conclusioni
- Bibliografia

Alcune premesse sui criteri del consolidamento

L'introduzione dell'acciaio nel consolidamento delle strutture lignee è, come noto, una pratica adottata sovente nel passato. Elementi metallici venivano spesso chiamati in causa a sopperire l'inefficienza strutturale di componenti lignei, a cui venivano affiancati per "collaborazione" o "sostituzione" funzionale.

Dal medioevo in poi l'impiego di catene, cerchiature, grappe ed elementi metallici di connessione si è diffuso come soluzione privilegiata per assorbire gli sforzi di trazione che si presentavano negli elementi strutturali, oppure per migliorare collegamenti difettosi o per ripristinare quelli del tutto mancanti. Esempi illustri si possono rintracciare in numerosi monumenti del passato dove la scelta di componenti metalliche, sia in interventi di consolidamento a posteriori, sia all'atto stesso della costruzione della fabbrica, ha frequentemente caratterizzato l'edilizia storica.

Superando il pregiudizio della presunta incompatibilità dell'acciaio con i materiali dell'edilizia storica (con riferimento alle questioni della differente rigidità e della ridotta durabilità nel tempo), è possibile evidenziare come l'acciaio sia un materiale idoneo a risolvere, con efficienza e talora con eleganza, gran parte dei problemi statici, soprattutto con l'adozione di sistemi a barre o a cavo posti in contatto e "forzati" ad agire in parallelo alla struttura esistente.

Gli esempi di consolidamento di solai e capriate lignee, che, senza alcuna pretesa di esaustività, verranno di seguito illustrati come casi emblematici di cui si ha personale conoscenza, costituiscono scelte progettuali elaborate dall'autore con l'obiettivo di definire di volta in volta soluzioni adeguate alle peculiarità di ciascun caso, nella considerazione delle valenze derivanti da un approccio attento alla realtà complessiva della fabbrica.

Un uso consapevole dell'acciaio per il consolidamento può difatti avvenire con intenti e metodologie coerenti con la pratica della conservazione, come parte di un processo più ampio che coinvolga il manufatto storico. Gli obiettivi a cui si può mirare sono molteplici: minimo intervento, specificità della soluzione rispetto all'unicità del oggetto su cui operare, adattabilità nel tempo, manutenibilità, reversibilità, potenzialità compositiva-distintiva dell'aggiunta, riconoscibilità all'interno della connotazione testimoniale /valore documentario dell'esistente.

Il consolidamento, inteso sia come intervento singolo ed eccezionale, oppure come parte di una ampia gamma di interventi pensati per un edificio, deve essere organizzato con la premessa di un approccio obiettivo dei fenomeni di degrado e dissesto per valutare **se** e **dove** si riscontri una effettiva esigenza di intervento, con la convinzione che l'oggetto dell'analisi costituisce un "unicum irripetibile" da conoscere e rispettare.

"[...] è possibile esercitare il massimo rispetto della conservazione, limitando le operazioni al minimo indispensabile e fermandole "prima del giusto" (Pratali, 1993)" al fine di minimizzare l'impatto dell'intervento, scegliendo la soluzione maggiormente compatibile e rispettosa dello stato di fatto.

Ritengo che nella formulazione di un progetto di consolidamento sia indispensabile il raggiungimento di alcuni obiettivi che garantiscano il massimo rispetto dell'opera, essendo al contempo coscienti che qualsiasi tipo di intervento è per sua natura una modificazione dell'opera stessa.

Tra questi obiettivi ricordiamo:

1. Consentire la massima permanenza della materia autentica, limitando le trasformazioni (demolizioni, sostituzioni, ripristini, etc.) allo stretto necessario, in altre parole, "intervenire per necessità comprovata";
2. Riconoscere la variabile tempo come un segno positivo capace di aggiungere valore e non sottrarlo alla fabbrica, memoria storica di se stessa;
3. Utilizzare conoscenze oggettive, puntuali e strettamente correlate all'edificio o alla situazione patologica specifica ;
4. Formulare decisioni solamente sulla scorta di valutazioni tecniche supportate da una conoscenza approfondita;
5. Realizzare interventi riconoscibili e reversibili che siano un'aggiunta o che affianchino l'esistente, al fine di rendere possibile nel tempo il controllo, il monitoraggio, ulteriori interventi manutentivi ed eventualmente la loro rimozione;
6. Stabilire un corretto programma di manutenzione nel tempo.

Sulla scorta di queste valutazioni, si deve determinare la scelta dell'intervento e della tecnologia che meglio soddisfino il raggiungimento degli obiettivi.

L'acciaio, e in particolare l'acciaio inox, consente interventi capaci di affiancare l'esistente, permettendone la lettura. Senza alcuna sostituzione e sottrazione si può intervenire con un'aggiunta riconoscibile, caratterizzante e facilmente rimovibile e quindi reversibile. Stai poi alla capacità progettuale inventare soluzioni esteticamente piacevoli e ben armonizzate con l'insieme.

Il materiale acciaio favorisce naturalmente anche la possibilità di uso compositivo delle aggiunte, permettendo tra l'altro ingombri minimi in ragione della notevole resistenza.

Gli esempi che seguono intendono illustrare sinteticamente le possibilità ed i limiti dell'uso dell'acciaio nel consolidamento di strutture in legno.

La copertura di casa ex-Masciadri ad Arcene (BG)

L'edificio rurale di casa ex Masciadri presentava una situazione di degrado molto avanzata: pareti di facciata ampiamente fessurate, cedimenti localizzati di fondazione, profonde fessure tra il muro di spina ed i muri trasversali, tetto non più impermeabile e forti flessioni delle capriate sotto peso proprio. In particolare la copertura era costituita da una serie numerosa di capriatelle a due puntoni, con una catena lignea posta in posizione anomala, ossia ad una quota più alta dell'usuale, a circa metà puntone, in modo da consentire il transito nella zona sottostante. In questo modo i puntoni, nella loro parte inferiore, lavorano "a sbalzo" e pertanto non risultano prevalentemente compressi, come nelle normali capriate, ma sottoposti ad una forte azione flessionale. I puntoni si presentavano piegati e la

capriata tendeva ad abbassarsi sotto carichi accidentali trasmettendo una forte spinta orizzontale alla parete .

La situazione risultava pericolosa sia per la parete, che presentava una evidente fessura continua da rotazione verso l'esterno a livello del pavimento, sia soprattutto per le capriate che, soggette a carichi meteorici eccezionali potevano arrivare al collasso.

Per completare il quadro va notato che il giunto "a mezzo legno" tra puntone e catena indeboliva l'estremità superiore dello sbalzo, ovvero il punto più sollecitato, con una forte riduzione della sezione resistente.

La soluzione realizzata è consistita nella posa di un due *tiranti metallici "sagomati"* che lambiscono inferiormente la porzione a sbalzo dei puntoni e la catena, inducendo una sollecitazione flessionale di verso opposto a quella provocata dai carichi verticali. (Figura 1). L'intento era, ovviamente, di continuare a consentire il transito nell'ampio locale di sottotetto che una nuova catena aggiunta a quota delle imposte avrebbe impedito.

Mettendo in trazione i cavi mediante un tenditore centrale si ottiene un avvicinamento delle estremità della capriatella e contemporaneamente una loro inflessione in senso contrario a quella indotta dai carichi su di esse gravanti. Sottolineiamo che per il corretto funzionamento del sistema di consolidamento è necessario che i vincoli alla base consentano un avvicinamento relativo in direzione orizzontale, altrimenti il sistema adottato risulterebbe non solo inefficace ma addirittura controproducente, portando cioè ad un incremento della flessione sul puntone. Tale avvicinamento è, di fatto, consentito dalla cedevolezza della parete di appoggio, fessurata a quota pavimento, che può ruotare, funzionando come una specie di biella incernierata, riducendo il suo strapiombo verso l'esterno.

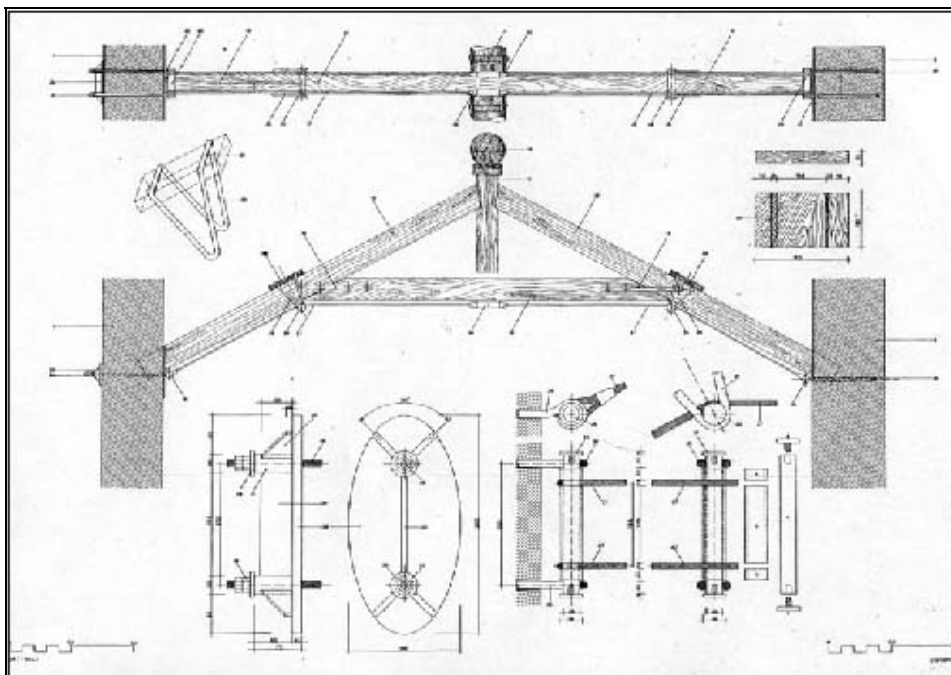


Figura 1. Dettagli del progetto di consolidamento delle capriatelle mediante l'impiego di tirante metallico "sagomato"

L'analisi numerica condotta sulla capriata ha simulato varie condizioni di vincolo e di consolidamento ed ha fornito risposte soddisfacenti (Tabella 1), che indicano *una possibilità di ridurre gli sforzi flessionali* sul legno tale da riportare la copertura al rispetto delle vigenti norme.

Si noti come il miglioramento ottenuto sia evidente dei casi B e B' (con vincoli a cerniera e carrello, coerenti con la situazione effettiva) mentre nei casi A ed A' (con vincoli cerniera-cerniera tali da impedire spostamenti orizzontali alle estremità della capriata) l'introduzione dei cavi porterebbe ad un peggioramento statico.

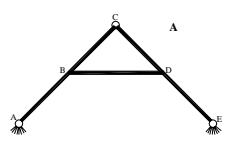
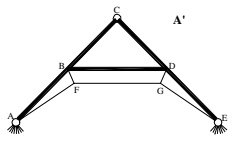
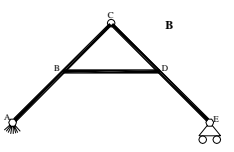
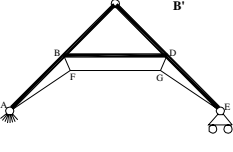
Struttura				
Valori				
Spost. Verticale punto C	-0,50 mm	-0,60 mm	-9,8 mm	-5,7 mm
Spost. Verticale punto D	-0,17 mm	-0,50 mm	-9,0 mm	-5,4 mm
Spost. Orizzontale punto D	-0,0013 mm	-0,10 mm	+5,5 mm	+2,8 mm
Taglio su asta AB	-	+63 daN	+1355 daN	+817 daN
Azione assiale asta AB	-3139 daN	-5472 daN	-777 daN	-4912 daN
Azione assiale asta BC	-3115 daN	-3168 daN	-4279 daN	-3817 daN
Azione assiale asta BD	+28 daN	-2566 daN	+4040 daN	-1143 daN
Azione assiale asta FG	-	+3549 daN	-	+4650 daN
Azione assiale asta AF	-	+3183 daN	-	+4170 daN
Azione assiale asta BF	-	+1357 daN	-	+1778 daN
Momento flettente pt. D	-	+54 daN	+1171 daN	+706 daN

Tabella 1. Alcuni risultati della modellazione numerica

Ad incrementare la sicurezza del giunto catena-puntone si è sovrapposta a quest'ultimo una piastra metallica chiodata che è in grado di ridare continuità al puntone, debilitato dall' incalmo per l'alloggio della catena che ne ha ridotto la sezione.

Particolarmente curati sono stati i dettagli di ancoraggio dei cavi alla muratura, realizzati con l'aiuto di golfari in acciaio inox, e del semplice ma efficace dispositivo per il rinvio dei cavi attorno ad un perno cilindrico, posto in corrispondenza del giunto catena-puntone e realizzato con una barra sagomata semplicemente messa a cavallo del puntone (Figura 2 a, b, c, d, e).

Tali dettagli, lasciati a vista, intendono affermare la continuità della logica strutturale tra la soluzione precedente e quella attuale, con un accostamento dichiarato tra tecnologie e materiali che risultano complementari anche se caratteristici di epoche diverse.

A causa dei fenomeni di rilassamento dei cavi in acciaio e del progressivo "accomodamento" dei giunti della struttura lignea, la tesatura dei cavi si è dovuta effettuare in numerose e successive fasi con l'ausilio di una chiave dinamometrica per il controllo dei carichi applicati.



Figura 2 a, b, c, d, e. Dettagli dell'intervento di consolidamento con utilizzo di un cavo sagomato post tesato, in posizione intradossale, per consolidare i puntoni a sbalzo, fortemente inflessi

Al di sopra delle capriate si è intervenuti sulle falde di copertura raddoppiando lo spessore del tavolato con l'aggiunta di nuove tavole avvitate a quelle esistenti, poste in direzione ortogonale a queste. L'intento era quello di creare due falde dotate di una forte rigidità nel loro piano, irrigidite dalle capriatelle sottostanti, così da costituire un elemento diaframma capace di distribuire eventuali carichi orizzontali, posto a copertura dell'edificio. Per favorire ulteriormente la resistenza flessionale delle falde, si sono utilizzati cavi metallici tesati, uno posto vicino al colmo e l'altro vicino all'imposta di ognuna delle due falde, interposti tra l'assito esistente e l'assito aggiunto, in grado di costituire i correnti tesi di un elemento lastra, sollecitato flessionalmente nel piano.

La medesima soluzione di raddoppio dell'assito è stata realizzata anche a livello del solaio di sottotetto, incrementandone in modo notevole la portata in previsione di un utilizzo pubblico.

Si sono adottate tavole di spessore 30 mm collegate con viti a quelle sottostanti. La scelta del tipo di vite e soprattutto del passo minimo è stata definita dopo prove di carico "a taglio" condotte presso il Politecnico di Milano.

I solai del piano sottostante, costituiti da travetti tondi appena sbazzati, di diametro 15 cm, di luce superiore a 4 metri, sono stati rinforzati con una modalità molto semplice, vale a dire con il raddoppio degli elementi.

Per impedire tuttavia che la esecuzione degli scassi per le testate indebolisse le pareti si sono utilizzati profili metallici ad L, fissati con barre filettate alle pareti trasversali di ogni locale, sopra alle quali sono stati appoggiati i nuovi travetti lignei (Figura 3). I travetti originari, già in opera, sono stati anch'essi "forzati" contro la trave ad L mediante cunei in legno, per migliorarne l'appoggio a parete. Il profilo ad L è stato utilizzato anche con la funzione di tirante parallelo alla pareti trasversali, tutte ampiamente fessurate e indebolite da canne fumarie. Alle due estremità sono state infatti saldate barre filettate che attraversano le pareti longitudinali e sono contrastate all'esterno con piastre metalliche. Per ottenere un corretto comportamento di insieme è stato fondamentale effettuare in fase iniziale il tiro della catena, che risultava libera e quindi tesabile, e solo successivamente il collegamento bullonato alla parete per consentirle di lavorare a taglio, ossia di sopportare i travetti lignei.



Figura 3. Vista agli appoggi del solaio, con il profilato metallico in parete.

La copertura del "Baco da seta" nella villa Della Porta Bozzolo, Casalzuigno (Varese)

Gli interventi su questo edificio di proprietà del FAI, denominato "Baco da seta", sito in adiacenza alla Villa Della Porta Bozzolo, hanno riguardato principalmente la copertura che mostrava una difettosità molto accentuata del legno, sottoposto a rilevanti carichi permanenti dovuti alla presenza di "medoni" in cotto (Figura 4 a, b, , Figura 5) .



Figura 4 a, b. Elementi della struttura lignea con deformazioni e difettosità accentuate.



Figura 5. Gli elementi della copertura lignea oggetto degli interventi di consolidamento o restauro (in giallo le capriate, in blue i falsi puntoni, in rosso i puntoni ed in verde le terzere)

La prima operazione è stata quella di completare la geometria esistente delle capriate aggiungendo nuove saette, dove mancanti o rimosse, e di procedere alla sostituzione degli elementi maggiormente degradati.

Le poche parti compromesse irrimediabilmente sono state ricostruite mediante protesi lignee, mentre i nodi degradati sono stati riportati in condizione di efficienza strutturale attraverso l'inserimento di barre passanti in acciaio inox.

Alcuni dei puntoni delle capriate e alcuni falsi puntoni risultavano tuttavia particolarmente impegnati e sono stati consolidati mediante una sorta di **trave reticolare mista** il cui corrente superiore compresso è rappresentato da due piatti metallici paralleli, collocati tra i medoni ed i coppi, e il cui corrente inferiore teso è costituito dal puntone stesso, che verrà così impegnato prevalentemente a trazione. Si ottiene un elemento strutturale composto legno-acciaio, in cui le sollecitazioni di taglio vengono supportate da connettori diagonali in acciaio a

vista, che sono saldati alle piastre metalliche superiori ed inghisati ai puntoni inferiori con resine epossidiche (Figura 6 a, b) L'adozione di due piastre parallele a costituire il corrente superiore consente una grande facilità nella posa dei connettori diagonali, che solo successivamente vengono saldati alle piastre. Nel caso si debbano consolidare travi poste su una linea di displuvio, l'uso di due piastre consente di adattarsi perfettamente alle due falde concorrenti. In una prima fase progettuale, come si osserva in alcune foto del prototipo realizzato, si era prevista una sola piastra di maggiori dimensioni, forata in corrispondenza del passaggio dei connettori, al posto delle due piastre parallele, di area equivalente. Questa soluzione è stata abbandonata in quanto i fori realizzati in officina risultavano troppo vincolanti per i connettori, la cui posizione, durante la fase di esecuzione, non poteva essere modificata.

Il metodo descritto consente di incrementare la capacità flessionale del puntone, modificandone notevolmente l'inerzia. Tra i suoi vantaggi, notiamo che i medoni in cotto del tetto vengono lasciati in opera, agendo al di sopra di questi, mediante semplici forature con trapano. (Figura 7 a, b, c, d).

Gli elementi diagonali restano a vista nel salone sottostante senza tuttavia costituire una presenza eccessivamente invasiva.

Allo scopo di contenere le spinte orizzontali comunque esercitate dai falsi puntoni sono state disposte catene lungo il perimetro della muratura.

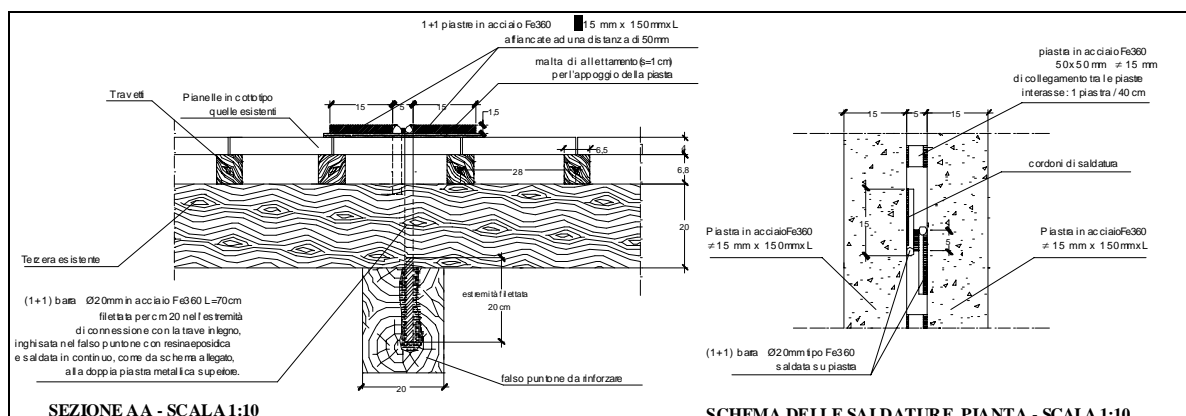
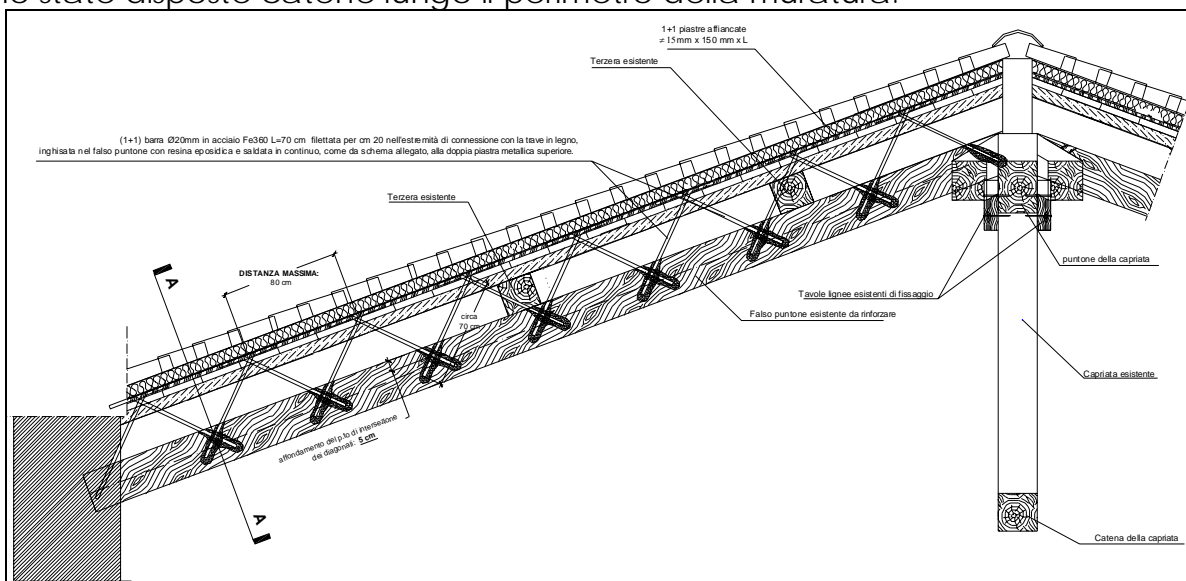


Figura 6 a, b. Il consolidamento della copertura lignea mediante realizzazione di una struttura reticolare mista.



Figura 7 a, b, c, d. Dettagli di realizzazione dell' intervento in copertura

A verifica dell'efficacia del sistema adottato, è stata effettuata una *prova di carico* su un " puntone tipo " , di diametro 16cm circa, rinforzato secondo le modalità esposte. (Figura 8 a, b). La trave è stata caricata applicando una zavorra nella parte centrale, di entità tale da superare le sollecitazioni dello stato di esercizio (Figura 9, Figura 10).

che si è manifestato per cedimento del corrente ligneo.

Le prove sperimentali condotte hanno evidenziato un buon comportamento della trave a "sezione mista" legno-acciaio, che si è comportata in modo lineare, con limitati residui anelatici.



Figura 8. Prove di carico. a) Saldatura dei diagonali ϕ 20 mm alla piastra metallica posta in sommità. b) Il sistema di rinforzo secondo la configurazione finale di intervento



Figura 9. Prove di carico: prima fase di carico sulla parte centrale (fino a $P=1300$ kg), a scarico ultimato non si osservano danneggiamenti.

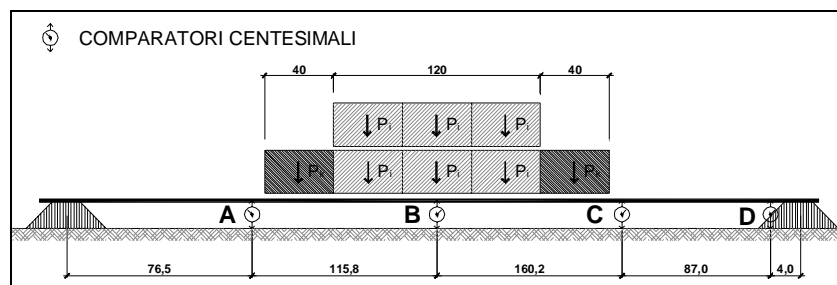


Figura 10. Schema indicante l'ubicazione dei comparatori centesimali digitali, l'entità e la posizione dei carichi.

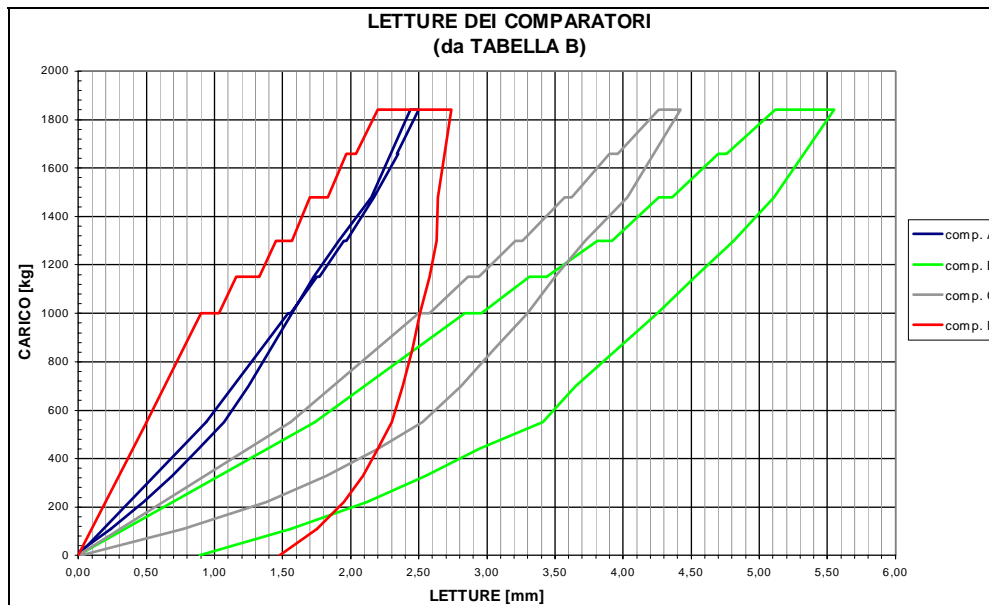


Figura 11. Grafico carico-spostamento

E' stata effettuata una modellazione numerica ad elementi finiti in campo lineare, simulando la struttura reticolare mediante elementi TRAVE in cui il corrente inferiore è l'elemento in legno (diametro 16 cm), il corrente superiore è la piastra in acciaio (sezione 300x 15 mm) e le diagonali sono barre in acciaio 20 mm.

Utilizzando valori standard dei moduli elastici e una ipotesi di giunto ad incastro tra tutti gli elementi, la freccia elastica massima calcolata risulta pari a 7,11 mm, superiore ai 5,55 mm misurati sul comparatore centrale a carico massimo (P=1840 kg). La struttura reale risulta cioè più rigida di quella simulata.

I migliori risultati ottenuti dalla struttura reale rispetto alla simulazione numerica sono probabilmente legati al non trascurabile grado d'incastro degli elementi diagonali, con una diminuzione consistente della lunghezza libera l'inflessione.

Non è stato rilevato né dalla modellazione numerica, né dalla prova di carico alcun fenomeno di instabilità degli elementi compressi (piatto superiore metallico e barre diagonali). Questo rende possibile, operativamente, realizzare una distribuzione geometrica più regolare degli elementi diagonali che può prescindere dalla presenza o meno di sottostanti terzere o zeppe di contrasto, rendendo più facile e flessibile la esecuzione in opera del consolidamento.

In fase di progettazione era stata avanzata la proposta di una soluzione alternativa, di tipo attivo, che prevedeva l'uso di una *struttura reticolare tridimensionale* realizzata con tiranti di piccolo diametro posti in opera nella parte inferiore della copertura e forzati mediante aste telescopiche, a sostegno dei puntoni (Figura 12 a, b, c).

Questo sistema consente, attraverso la regolazione della lunghezza dei puntelli telescopici, di fornire ai puntoni di copertura la presollecitazione preventivamente decisa e rende operabili successive modifiche nel tempo.

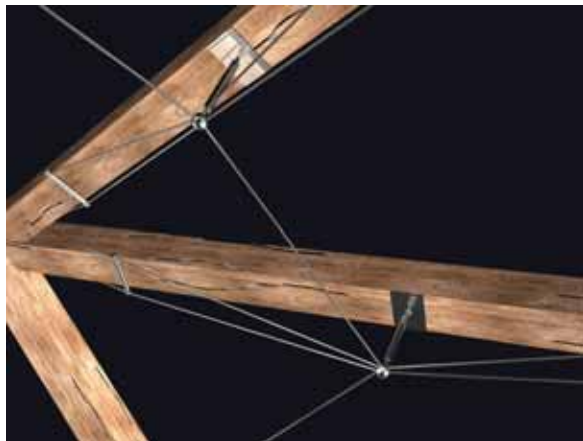


Figura 12 a,b,c. Proposta progettuale di consolidamento della copertura, consistente nella realizzazione di una struttura reticolare tridimensionale costituita da tiranti di piccolo diametro nella parte inferiore della copertura, forzati a sostegno dei puntoni mediante aste telescopiche.

Una soluzione di consolidamento di quest'ultimo tipo, economica e rispettosa dell'esistente in quanto semplicemente addossata alle capriate in opera, è stata realizzata per il consolidamento del tetto della torre sud-est del castello di Pavia. Un intervento analogo, ma nell'ambito dell'architettura di nuova realizzazione, è stato realizzato presso un albergo di Erevan in Armenia. (Figura 13 a, b).



Figura 13 a, b. Copertura realizzata ad Erevan, Armenia.

Copertura di una torre del Castello Visconteo di Pavia

I lavori di sistemazione della copertura hanno evidenziato come l'orditura lignea principale fosse sottodimensionata rispetto ai carichi di esercizio previsti dalla normativa.

I falsi puntoni diagonali della copertura sono stati rinforzati mediante l'aggiunta di tiranti di piccolo diametro posti inferiormente a collaborare con la struttura esistente (Figura 14). Il tesaggio di questi elementi è consentito dalla presenza di aste telescopiche (Figura 15). Il bloccaggio dei cavi in sommità si avvale di quattro "cuffie" metalliche appoggiate all'estremità delle travi e collegate mutuamente tra loro sopra al nodo, in modo da non scorrere, riuscendo evitando contemporaneamente l'uso di connettori di collegamento. Tavolette in legno interposte tra i falsi puntoni e le cuffie impediscono deleteri effetti di condensa.

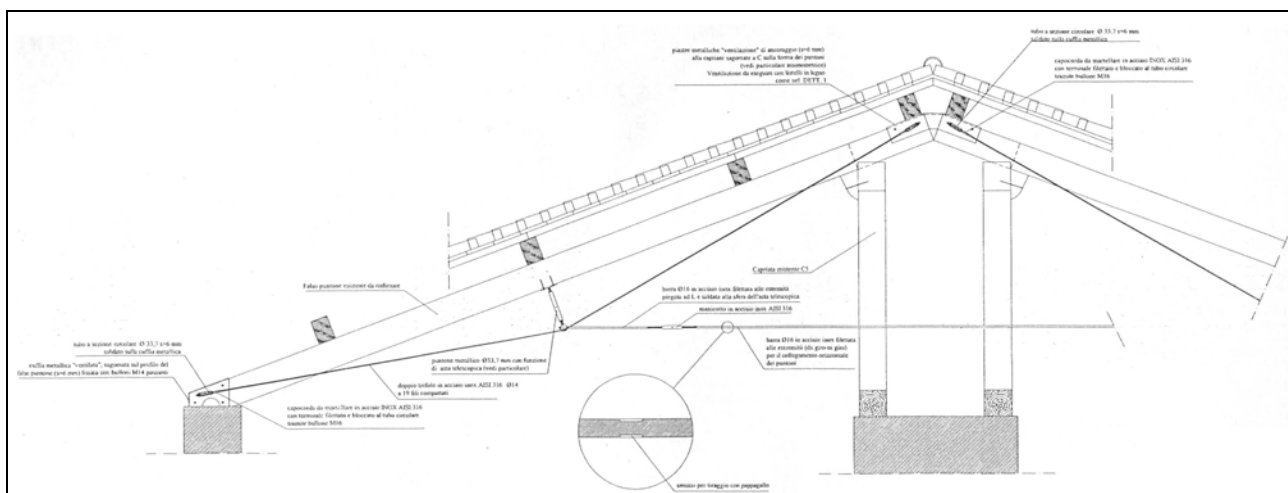


Figura 14. La struttura reticolare spaziale utilizzata per l'intervento sui falsi puntoni

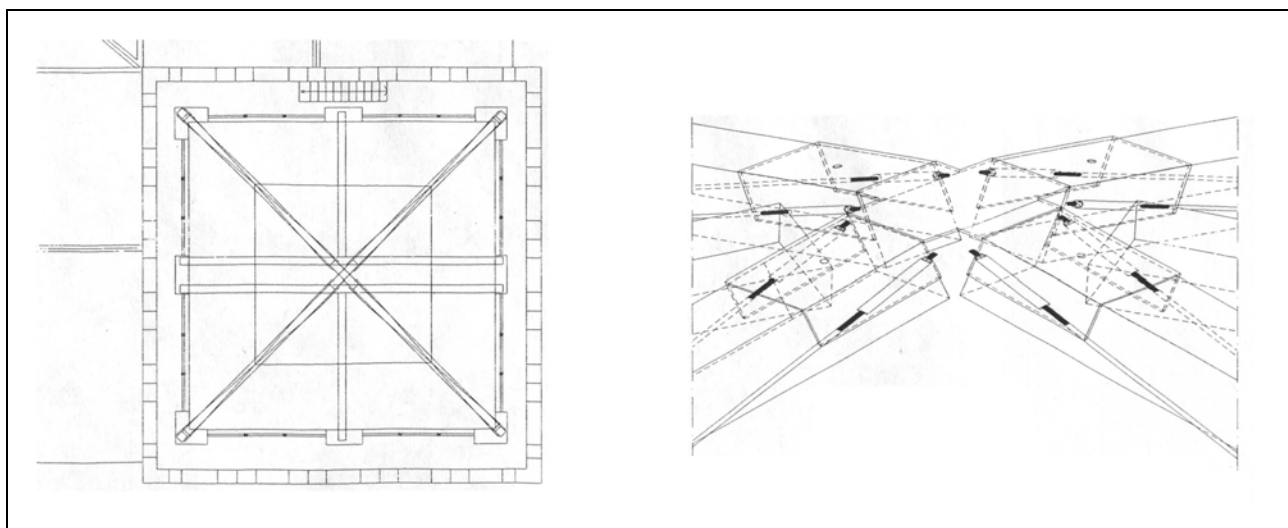


Figura 15. Pianta e dettaglio assonometrico del sistema di rinforzo nella zona di colmo.



Figura 16. La copertura a struttura reticolare realizzata.

Le capriate dell'ex Monastero di S. Clara a Pavia

Gli interventi sulle strutture lignee dell'ex Monastero di S. Clara a Pavia hanno previsto un intervento generale di pulizia e disinfestazione della piccola e grande orditura da insetti e funghi, nonché la rimozione puntuale degli elementi fortemente ammalorati e la loro sostituzione con elementi di egual essenza e la messa in sicurezza degli appoggi tra puntone e catene delle capriate di copertura mediante l'impiego di carpenteria metallica.

L' intervento di consolidamento è stato realizzato su quindici capriate, con luce di otto metri ed appoggi molto degradati, poste a sostegno del tetto. Il livello di marcescenza degli appoggi era avanzato, ma non tale da far propendere per una sostituzione completa della capriata e neppure per una protesi locale del giunto. Si è optato, invece, per una soluzione composita che consente un allargamento della zona di appoggio, impiegando legno lamellare, piatti e tiranti inox a fianco del materiale esistente. In pratica si realizza una sorta di nuova capriata leggera, caratterizzata da elementi tesi, parallela a quella in opera. (Figura 19) Occorre notare che le catene lignee delle attuali capriate risultano a vista dai locali sottostanti, in quanto costituiscono il supporto dell'assito di sottotetto. Si dovevano pertanto realizzare i nuovi appoggi tra la capriata e la muratura a una quota superiore a quella degli appoggi esistenti, giudicati inaffidabili (Figura 17, Figura 18 a, b). Si sono utilizzati segmenti di trave in legno lamellare (bilancini), a sbalzo rispetto alla capriata, collegati ai puntoni mediante fermi,. Il tutto è ubicato nel sottotetto, al di sopra dell'assito esistente. I bilancini poggiano sulla muratura a fianco della capriata scaricando le reazioni vincolari in una posizione diversa da quella di origine. Nel fare questo sono soggetti a rotazione, ma quest'ultima viene bilanciata da tiranti inox che convergono verso il colmo della capriata, e da un tirante orizzontale, sempre in inox, che collega in orizzontale i due bilancini. I particolari di collegamento della struttura nuova a quella esistente sono stati progettati cercando di favorire una operatività di cantiere che tenesse conto delle inevitabili tolleranze e delle differenze geometriche tra le varie capriate. L'uso di tiranti inox di ridotto diametro, flessibili e leggeri, ha consentito una messa in opera piuttosto rapida (Figura 21 a, b).

Lo scopo primario dell'intervento era il confinamento del giunto puntone-catena ed il trasferimento dei carichi alla muratura mediante una nuova struttura lignea, ma la modellazione numerica ha indicato anche una diminuzione delle sollecitazioni sui puntoni, dovuta al benefico effetto indotto dal momento concentrato in prossimità dell'appoggio dal "bilancino", che è sollecitato a ruotare verso l'alto dai tiranti diagonali. Questi ultimi, va sottolineato, si incrociano a cavallo del giunto di colmo, confinandolo, ossia contribuendo a migliorarne il comportamento statico. Tavolette in legno poste nei punti di contatto tra cavo e legno evitano danneggiamenti locali.

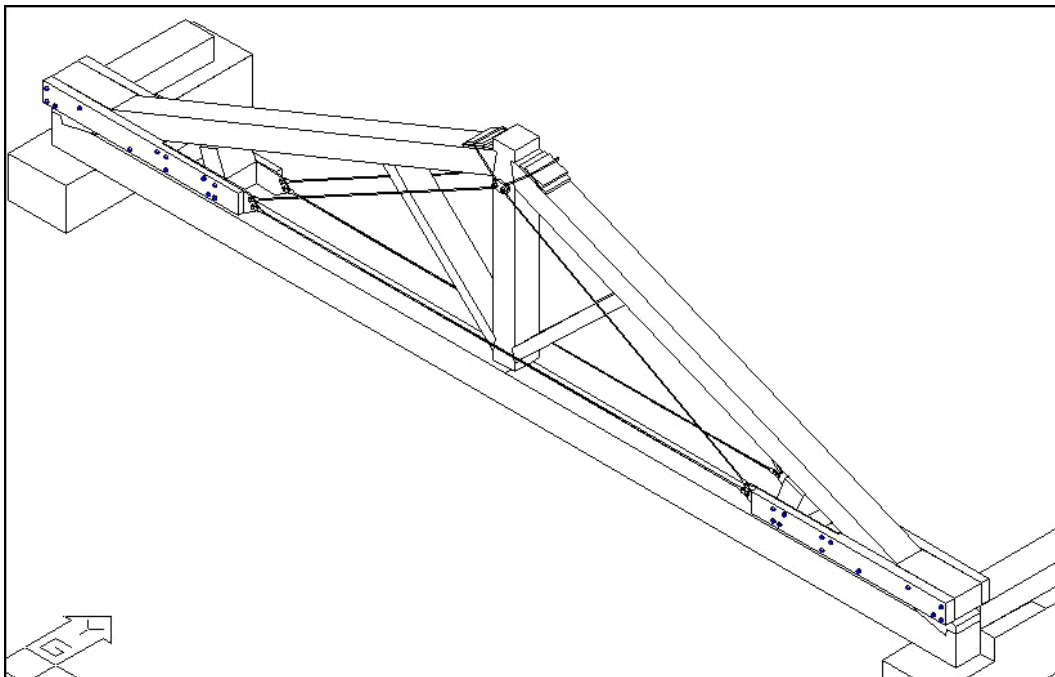


Figura 17. Intervento di consolidamento delle capriate ampiamente degradate agli appoggi, mediante cavi esterni post tesati e "bilancini" in legno lamellare appoggiati sulla muratura

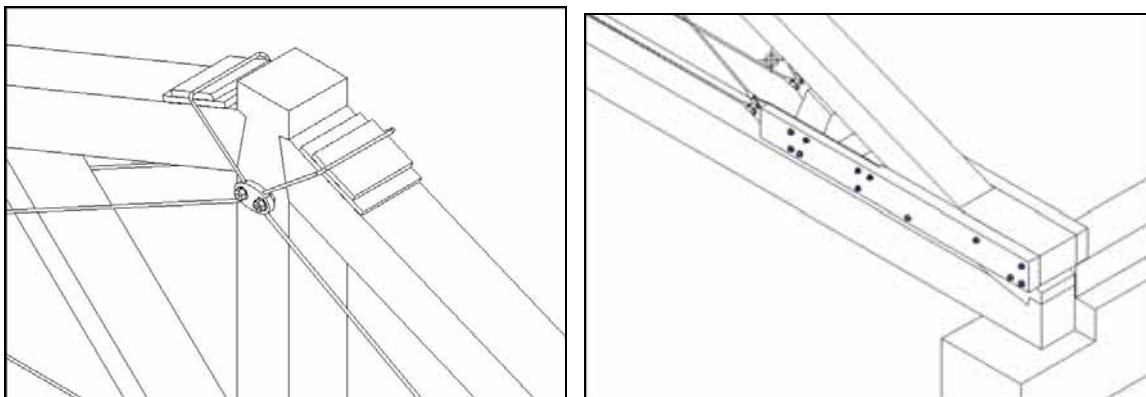


Figura 18 a, b. Dettagli di progetto del sistema di rinforzo nel nodo monaco-puntone e agli appoggi



Figura 19. Realizzazione del consolidamento mediante cavi esterni post tesati e "bilancini" in legno lamellare appoggiati sulla muratura.



Figura 20 a, b. Particolari dell'intervento di consolidamento realizzato

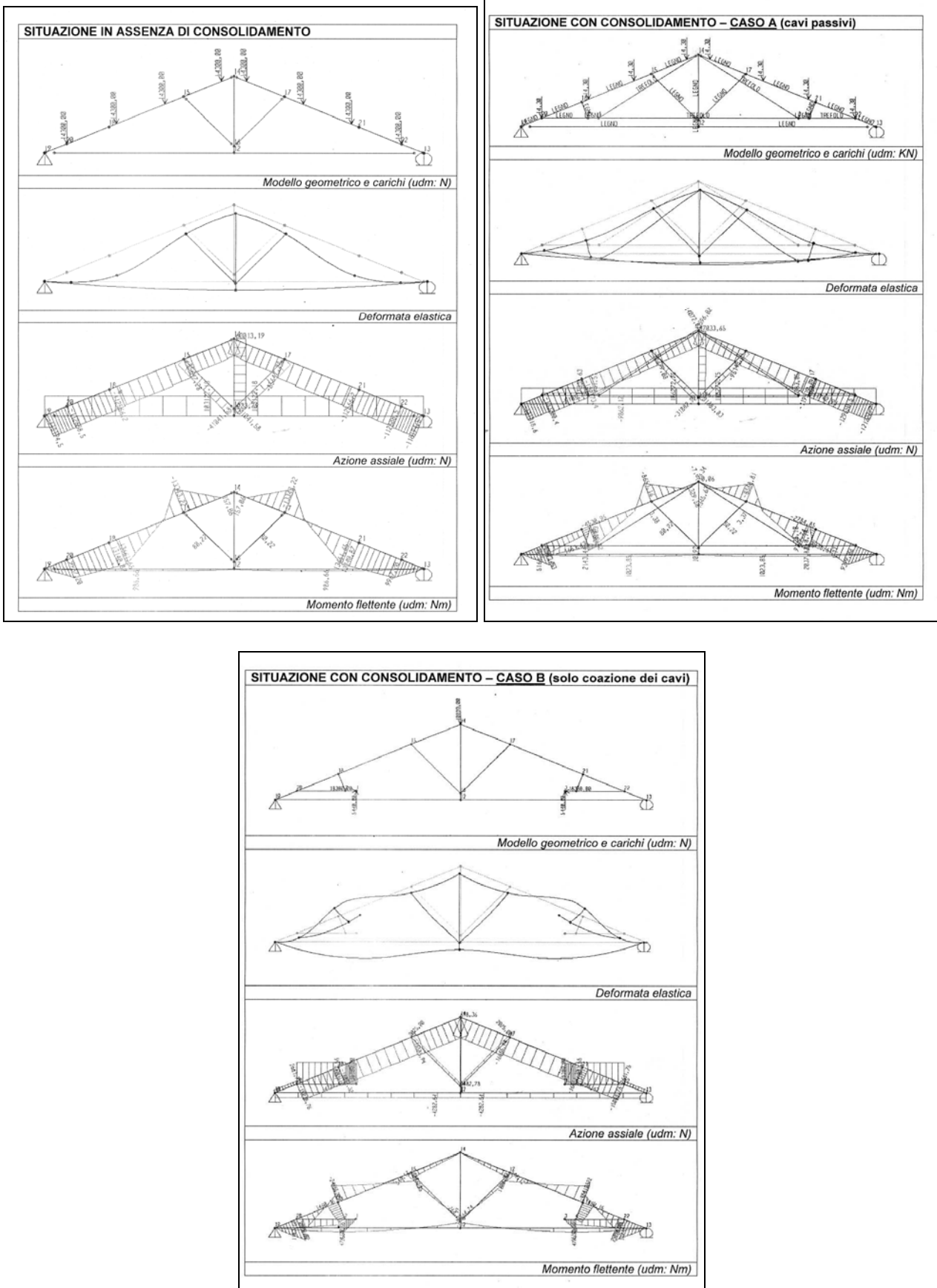


Figura 21 a,b,c. Casi a confronto nella modellazione numerica.

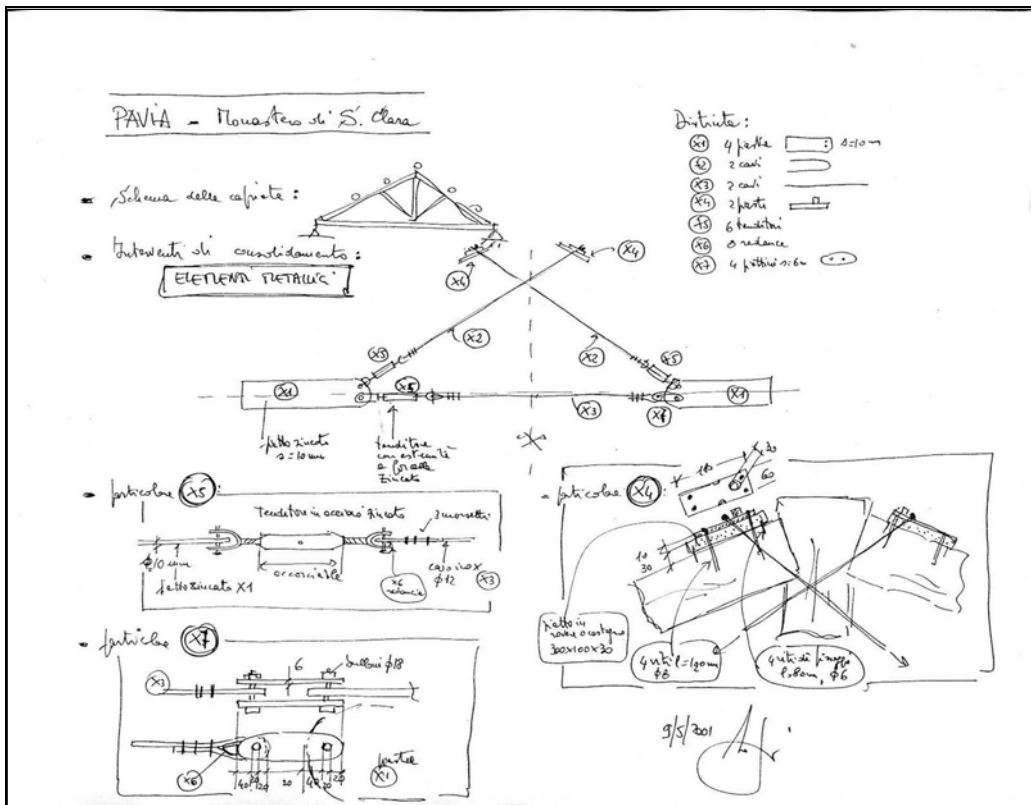
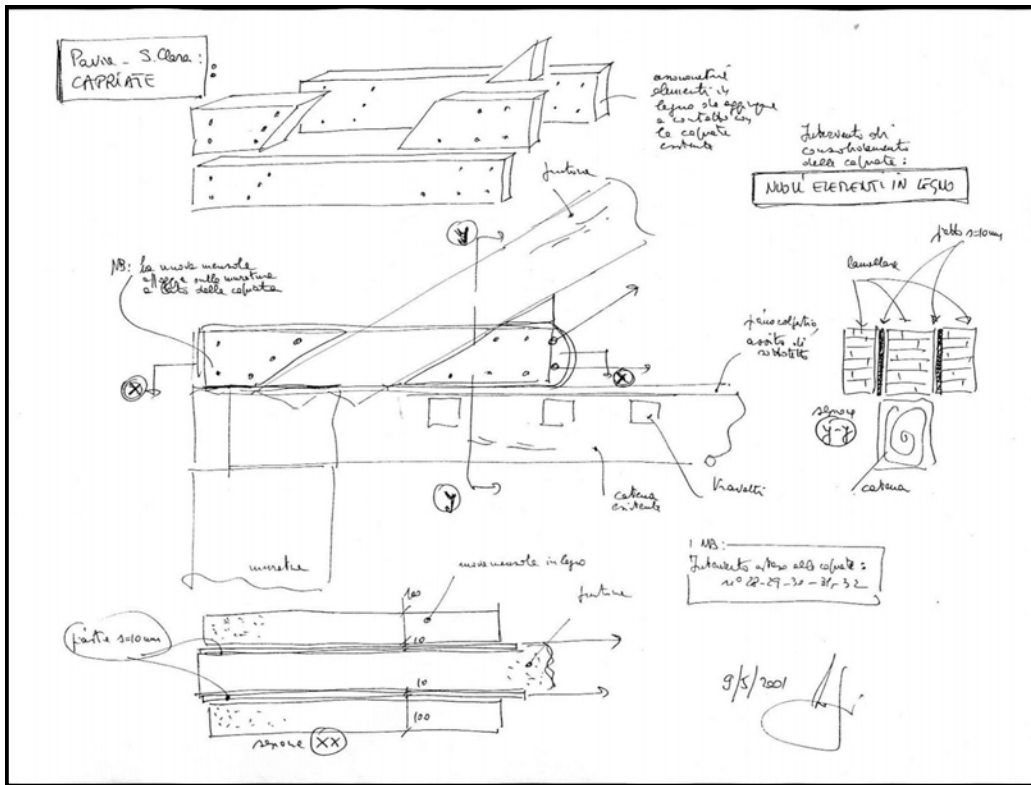


Figura 22 a, b. Schizzi di progetto.

La copertura lignea della ex chiesa di San Carpoforo – Milano

Simile al precedente è l'intervento adottato per consolidare le capriate esistenti nella chiesa di San Carpoforo a Milano, delle quali un progetto preliminare aveva previsto la completa sostituzione.

Durante i sopralluoghi si sono osservati vari sintomi di degrado che interessavano i giunti tra gli elementi strutturali (ed in particolare il giunto puntone-catena, il giunto puntone-monaco ed il giunto centrale a dardo di Giove tra le due metà della catena). Inoltre i puntoni apparivano inflessi sotto l'azione dei forti carichi concentrati, trasmessi dalle terzere.

A rinforzo dei giunti puntone-catena, negli anni '50 erano stati introdotti elementi di "cuffia" metallica, decisamente invasivi da un punto di vista formale ed ampiamente ossidati. Inoltre il contatto ferro-legno, senza interposizione di elementi sacrificali in legno, aveva causato fenomeni locali di marcescenza.

Da un punto di vista geometrico alcune capriate risultavano leggermente coricate su un fianco e presentavano il monaco disassato rispetto ai puntoni. Da ultimo erano rilevabili segni di divaricamento dei puntoni a seguito dello scorrimento rispetto alla catena e segnali di sofferenza in quest'ultima, in corrispondenza del nodo centrale.

Lo stato di degrado degli elementi lignei, comunque, non era tale da giustificarne la sostituzione e si è quindi optato per un intervento conservativo, intenzionalmente leggero. L'intervento si è articolato in due fasi. La prima, di tipo locale, ha riguardato il ripristino dei giunti mediante zeppe in legno e barre filettate passanti e la integrazione con tradizionali fettonature in legno di alcune zone delle capriate che presentavano lacune dovute a inneschi di incendio provocati da bombe incendiarie. La seconda fase, di tipo globale, ha mirato a fornire un nuovo meccanismo resistente, parallelo a quello originario, mediante l'uso di un puntone ligneo e di tre funi in acciaio inox, a supporto della catena e dei puntoni (Figura 23, Figura 24).

La prima fune è parallela alla catena in legno ed agisce in collaborazione con questa. Le altre due funi, simmetriche rispetto alla mezzeria, svolgono tre funzioni statiche. In primo luogo legano tra loro il puntone inclinato e la catena lignea nel giunto di appoggio a terra. In secondo luogo legano tra loro i due puntoni ed il monaco nel giunto al colmo della capriata, stringendoli l'uno contro l'altro. In terzo luogo, il più importante, forniscono un sostegno ai puntoni inflessi, proprio nel punto intermedio, al di sotto delle pesanti terzere, mediante l'introduzione di due nuovi pilastri verticali in legno, forzati dal basso verso l'alto.

Notiamo che i tre tiranti sono costituiti ciascuno da un anello chiuso regolabile in lunghezza e tesabile con due tenditori. Ciò consente di risolvere senza elementi invasivi le connessioni con la struttura esistente, limitandosi a posizionare il cavo esternamente alla capriata, sulle due fiancate, ad appoggiandolo a cavallo di questa in soli quattro punti, con tavolette di ripartizione in legno.

L'intervento, oltre ad aver risolto i problemi statici che lo avevano reso necessario, è risultato anche sufficientemente gradevole e decisamente economico.

Per stabilizzare le capriate che presentavano, chi più chi meno, una leggera inclinazione rispetto alla verticale, si è adottato un cavo orizzontale che ha attraversato, inanellandole, tutte le capriate, per poi essere fissato alla muratura dei timpani murari di estremità. In particolare il monaco è stato attraversato da

una barra filettata terminante con golfari femmina e, collegandosi a questi, tra capriata e capriata è stato steso un segmento di cavo dotato di tenditore di regolazione della lunghezza. Le capriate in questo modo vengono fissate nella geometria a cui il tempo le ha condotte, impedendo tuttavia il verificarsi di ulteriori spostamenti relativi dovuti all'accatastamento tra capriata e capriata. Per completare l'opera, le recenti cuffie metalliche sono state rimosse e sostituite con perni metallici passanti.

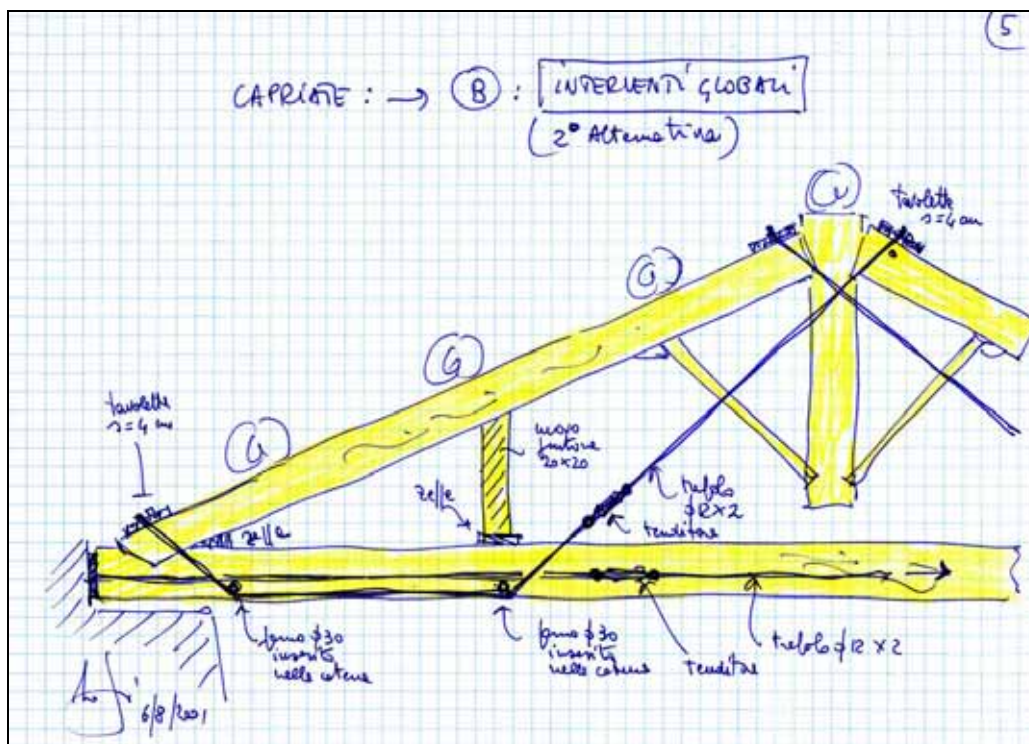


Figura 23. Schizzo di progetto.



Figura 24. Intervento di consolidamento degli appoggi e delle capriate mediante cavi esterni post tesi, con inserimento di un nuovo puntello ligneo di contrasto della falda



Figura 25. Dettagli di realizzazione.

Le capriate lignee della "Cavallerizza" nel Castello di Vigevano (Pavia)

L'edificio è un ampio salone coperto con tetto a due falde, sostenuto da 14 capriate lignee di ridotto interasse (4 metri) ma di grande luce (22 metri) (Figura 26). La destinazione ad uso pubblico della sala sottostante e la contemporanea presenza di difetti sui giunti delle capriate, unita alla inusuale snellezza degli elementi lignei adottati, ha consigliato di intraprendere un'accurata campagna diagnostica al fine di valutarne la sicurezza e di definire eventuali interventi di consolidamento. Al termine della prima fase conoscitiva si era giunti a ipotizzare che la parziale precarietà di conservazione delle capriate della Cavallerizza fosse imputabile soltanto all'inefficienza dei sistemi di collegamento tra alcune membrature ed alla difettosità locale del materiale (soprattutto quello di recente sostituzione), piuttosto che ad un degrado globalizzato. La necessità di valutare l'effettiva incidenza dei difetti riscontrati ha così portato ad eseguire prove sperimentali di carico su due delle quattordici capriate (la V e la VI), quelle giudicate più rappresentative del comportamento dell'intera copertura. Le prove, realizzate con zavorra di contrasto piazzata a terra e 5 martinetti idraulici legati alla capriata da fasce in poliestere, hanno fornito risultati ampiamente soddisfacenti sia in termini di resistenza che di rigidezza globale, dando così testimonianza di un buon comportamento di assieme anche sotto carichi particolarmente gravosi, (superiori ai 150 daN/mq sull'intera superficie di falda.)

In parallelo alle prove di carico statico è stata eseguita una verifica numerica delle capriate mediante l'uso di un modello agli elementi finiti, allo scopo di individuare le sollecitazioni sui singoli elementi e di valutarne la deformabilità. Il modello è stato "calibrato" utilizzando i dati delle prove sperimentali. In altre parole, essendo nota la geometria della struttura ed i carichi applicati, si è modificata ripetutamente la rigidezza torsionale dei giunti ed il modulo elastico del legno fino a che i risultati del modello, in termini di spostamenti, sono risultati sostanzialmente coincidenti con quelli ottenuti sperimentalmente, misurati in quindici punti. Tra i parametri da individuare c'era anche il grado di collaborazione meccanica esistente tra le due travi accostate che costituiscono i puntone e che sono collegate tra loro da alcune graffe intermedie. In altre parole si trattava di individuare il più appropriato momento di inerzia del puntone composto.

Con il modello numerico così caratterizzato si è proceduto ad ulteriori analisi della struttura, come si presenta attualmente, ossia senza consolidamenti, assoggettandola a varie condizioni di carico accidentale, anche asimmetriche, tra cui neve e vento.

Al termine di questa analisi sperimentale e numerica i risultati hanno indicato un livello di sicurezza giudicato sufficiente, tale da consentire di adottare la scelta minima, ossia quella ottimale del "non-intervento", almeno in fase transitoria. Per completezza si è comunque formulata una proposta "leggera" di miglioramento strutturale delle capriate che prevede anzitutto l'uso di due cavi metallici, esterni alla catena lignea e in aderenza a questa, in modo da collaborare con i due giunti intermedi a "dardo di Giove", presenti ai terzi della lunghissima catena inferiore e fortemente sollecitati a trazione. Un secondo intervento prevede la chiodatura mutua delle due travi che costituiscono il puntone ed il sovrappuntone, mediante semplici barre filettate passanti, al fine di incrementarne il momento di

inerzia complessivo. Un terzo intervento prevede di collegare tra loro tutte le capriate a livello delle catene, come una specie di collana, utilizzando due lunghe barre metalliche orizzontali che le vincolano alla muratura di testata.

Scopo di questa proposta è di imporre due vincoli intermedi, ai terzi della luce, per limitare le oscillazioni accidentali delle catene lignee. Durante i sopralluoghi con piattaforma a braccio mobile si è infatti verificato come un urto anche modesto inducesse vibrazioni consistenti nella catena lignea, con pericolo di degrado dei vincoli.

Per verificare l'efficacia dell'intervento descritto si è utilizzato il modello numerico in fase dinamica attraverso il quale si è potuto *individuare la frequenza propria di vibrazione flessionale fuori piano della catena* nella situazione attuale e nella situazione strallata.

Nel primo modello si è simulata la situazione attuale, che ha fornito una frequenza propria della catena di 1,762 Hz . Nel secondo modello, in cui si è simulato l'inserimento delle due catene metalliche, si è ottenuta una frequenza propria di 7,418 Hz .



Figura 26 a,b. Immagini della copertura dall'intradosso.

I Solai lignei di Villa S. Carlo Borromeo – Senago (Milano)

Gli ampi saloni della villa San Carlo Borromeo sono stati oggetto di ripetuti interventi durante l'ultimo secolo a seguito di nuove destinazioni di uso dei locali. Sono stati adottati criteri diversi, dalla semplice sostituzione legno su legno, alla rimozione di travi lignee sostituite da travi in ferro cassettonate, alle più recenti soluzioni miste di cappa collaborante legno- cls.

Tra gli interventi di consolidamento più recenti desidero commentare la soluzione realizzata per il solaio di un vano destinato a ospitare due camere d'albergo, separate da una parete in laterizio che avrebbe costituito un carico eccessivo per il solaio sottostante.

Il ridotto spessore a disposizione per la parte strutturale e per gli impianti ha suggerito di adottare un elemento di sostegno "pensile" a cui il solaio stesso potesse essere appeso, costituito da una trave reticolare in acciaio in corrispondenza del previsto divisorio.

Il solaio è stato rinforzato localmente mediante una soletta collaborante di piccolo spessore appoggiata ad una doppia L inserita nel suo spessore, la quale a sua volta è sostenuta mediante tiranti dalla trave reticolare posta più in alto. Quest'ultima è incastrata alle pareti perimetrali ed è realizzata con profili UNP120 in acciaio Fe360, doppi nel caso dei correnti e singoli nel caso dei diagonali (Figura II. 1, Figura II. 2, Figura II. 3).

Il carico assegnato alla trave è costituito da tutta la parete divisoria e dal peso dei solai e dei sovraccarichi competenti per area di influenza.

Per limitare il rischio di fessurazioni della parete divisoria si è imposto un limite di deformabilità massima pari ad 1/500 della luce.

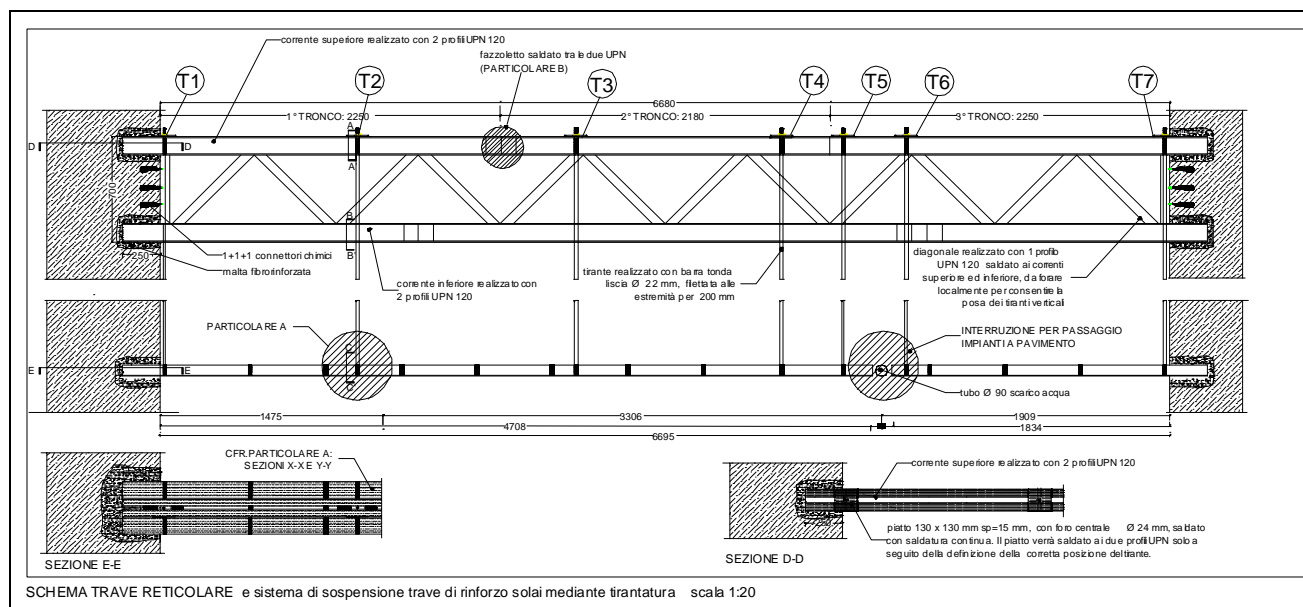


Figura II. 1 . Dettagli degli elaborati di progetto per la realizzazione della trave reticolare.

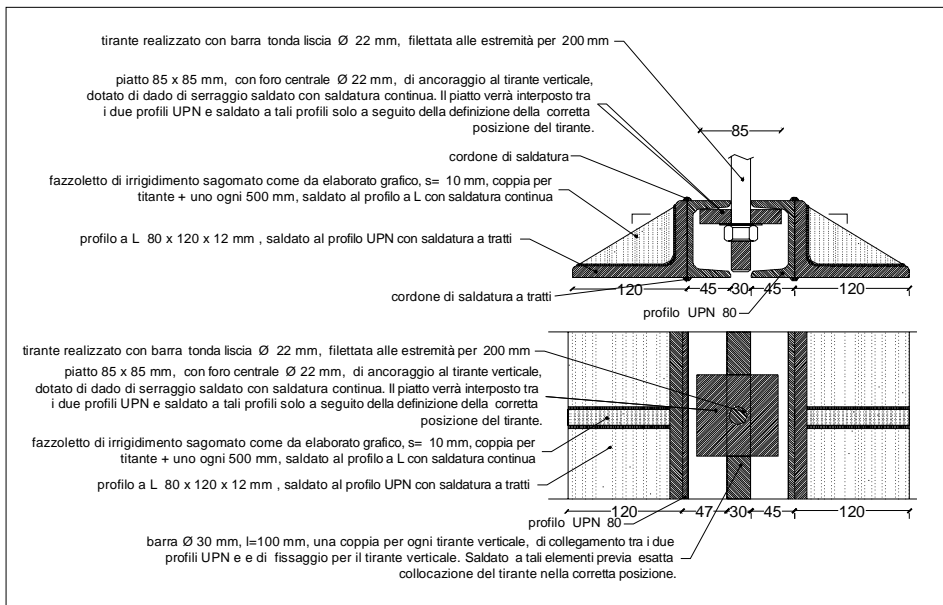


Figura II. 2. Dettagli del sistema di sospensione al nodo con il solaio.



Figura II. 3 a,b,c. Immagini durante la fase di realizzazione dell'intervento.

Nei restanti solai di primo, secondo e terzo piano sono stati realizzati interventi legati alle diverse realtà costruttive riscontrate che hanno imposto l'adozione di soluzioni mirate e diversificate, in cui l'impiego dell'acciaio ha consentito massima adattabilità e minima rimozione di materiale esistente.

Il consolidamento di buona parte dei solai lignei è avvenuto mediante la realizzazione di sezioni miste legno-clt con cappa collaborante in calcestruzzo alleggerito. Si è utilizzata con successo la tecnica di connettori diagonali incrociati, fissati con resine epossidiche, soprattutto per il rinforzo delle travi principali. In altri casi le travi erano state sostituite in passato da una coppia di putrelle metalliche celate da una fodera lignea decorata.

Si è realizzato il collegamento con la soletta soprastante mediante connettori metallici sagomati a "manubrio" (Figura II. 5), saldati a passo regolare alle travi e annegate nella soletta in clt.

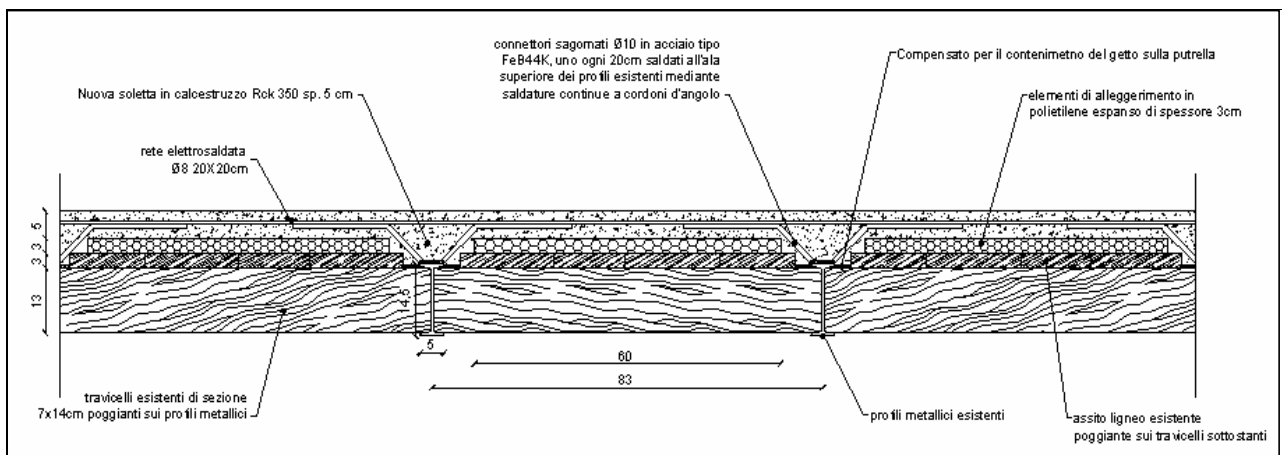


Figura II. 4. Dettagli di progetto.



Figura II. 5 Connetto rmetallici sagomati a "manubrio"

In altri casi, dove non si poteva realizzare la cappa collaborante per problemi di ridotto spazio a disposizione, sono stati adottati due profili quadri, posti sopra alle assi del tavolato, collegati alle travi sottostanti mediante piastre metalliche inclinate.



Figura II. 6 Vista intradossale di solaio in legno con trave primaria costituita da coppia di putrelle rivestite da foderina lignea decorata

In altri casi ancora le travi principali erano spezzate in mezzeria e sono state affiancate da una coppia di profilati ad L, irrigiditi da triangoli e tra loro mutuamente collegate. L'intervento, di una certa invasività formale, viene contenuto all'interno del controsoffitto decorato, rimosso per la posa in opera della nuova trave(Figura II. 7).



Figura II. 7. Il rinforzo delle travi spezzate in mezzeria mediante affianco di coppia di profilati ad L.

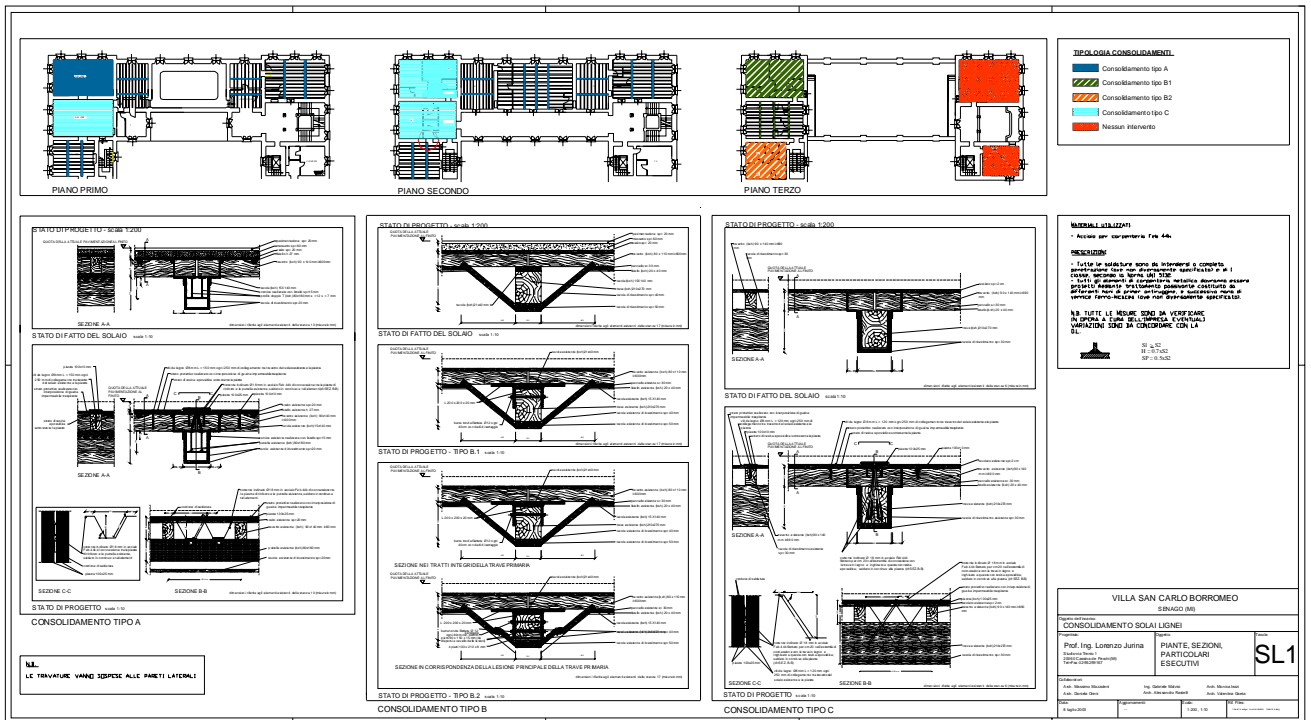
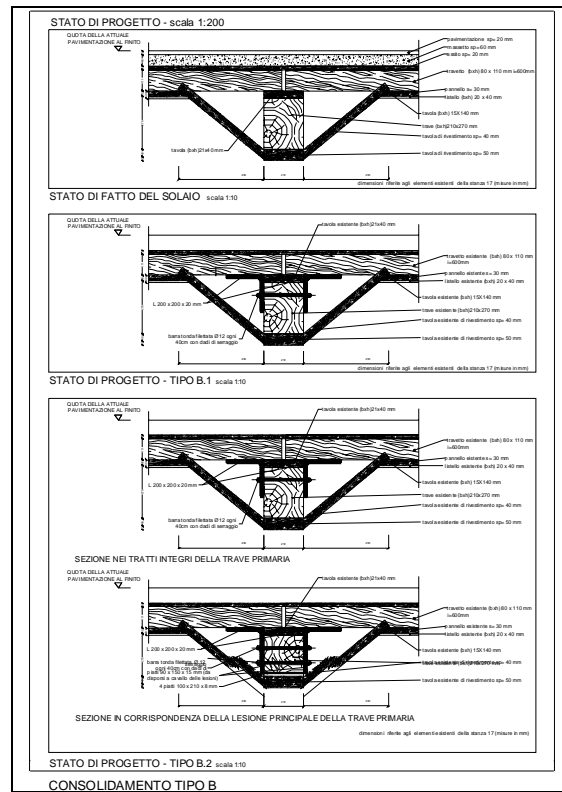
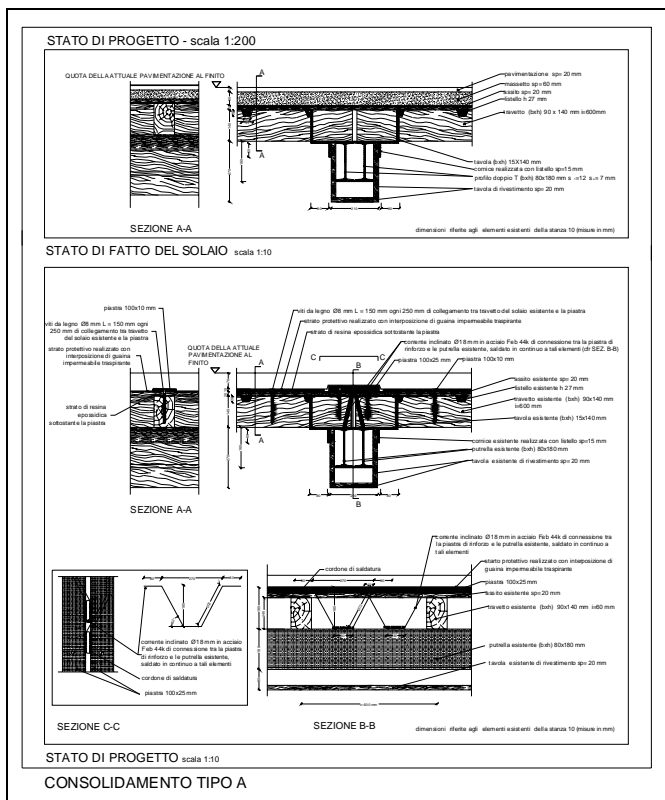


Figura II. 8. Elaborato grafico di progetto.



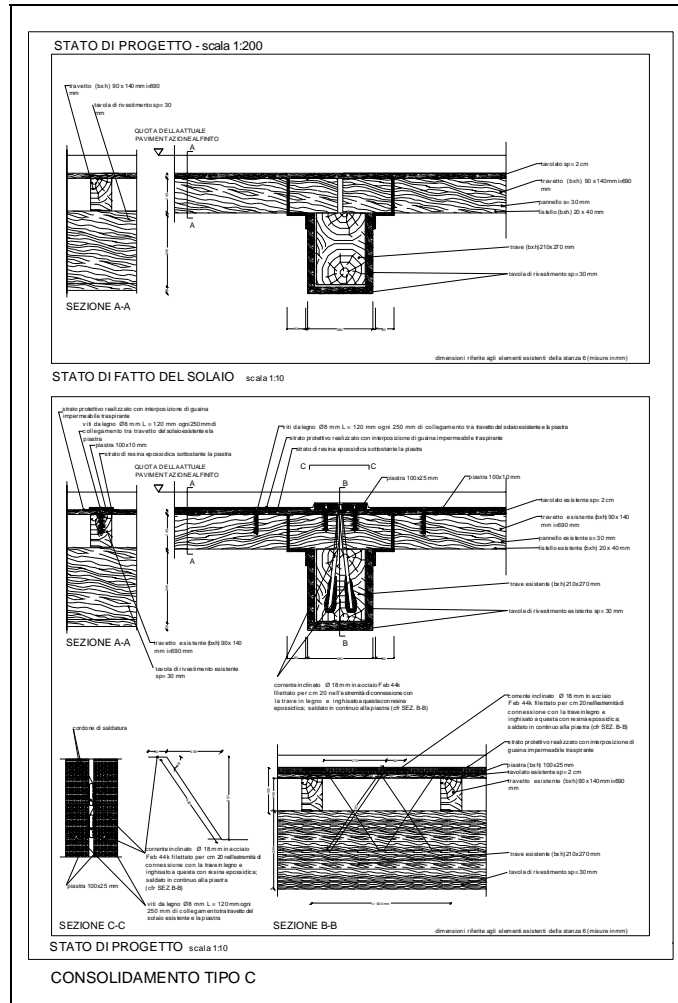


Figura II. 9. Particolari di progetto.

Consolidamento dei solai della Associazione Beth Amidrash – Milano

Anche in questo caso l'orditura secondaria è in legno e l'orditura principale in putrelle di ferro. Il sistema di consolidamento adottato per il rinforzo dei solai ha fatto ricorso ad una sezione collaborante mista costituita dagli esistenti profili metallici abbinati ad una cappa in cls armato superiore, così da incrementare considerevolmente l'inerzia complessiva e da garantire un maggior irrigidimento anche in senso trasversale (Figura II. 10).

Tale nuova sezione in cls è resa solidale ai profilati metallici mediante connettori sagomati in acciaio saldati sull'ala superiore delle travi così come illustrato nell'immagine che segue.

Al fine di ridurre i carichi permanenti si è inserito in estradosso uno strato di alleggerimento in polistirene espanso dello spessore di 3 cm.

In corrispondenza delle murature portanti perimetrali si è prevista la realizzazione di connettori murari inghisati con resina epossidica così da garantire una migliore continuità fra gli orizzontamenti e le murature ed incrementare l'effetto di irrigidimento complessivo dell'intervento (Figura II. 11).



Figura II. 10. Immagini di cantiere.

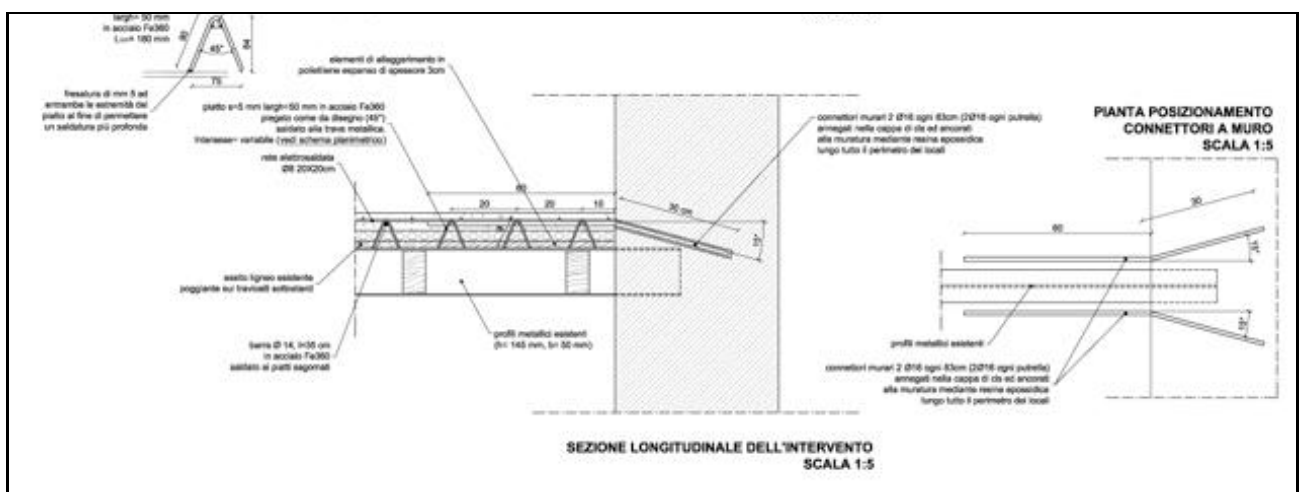


Figura II. 11. Dettagli di progetto

I solai dell'edificio adiacente alla Chiesa di S. Pietro all'Olmo - Cornaredo (Milano)

Le soluzioni progettate prevedono per lo più sezioni miste legno-acciaio-calcestruzzo per il rinforzo della orditura minore dei solai.

Nel caso delle travi principali si è prevista la realizzazione di soluzioni "reticolari" con uso di connettori incrociati a taglio e, in taluni casi, l'adozione di tiranti post-tesati esterni alla trave. La presenza di un controsoffitto incannucciato non rimovibile e l'ingombro costituito dai travetti fissati con incalmo alle travi principali (e non appoggiati superiormente) ha obbligato a trovare soluzioni inconsuete.

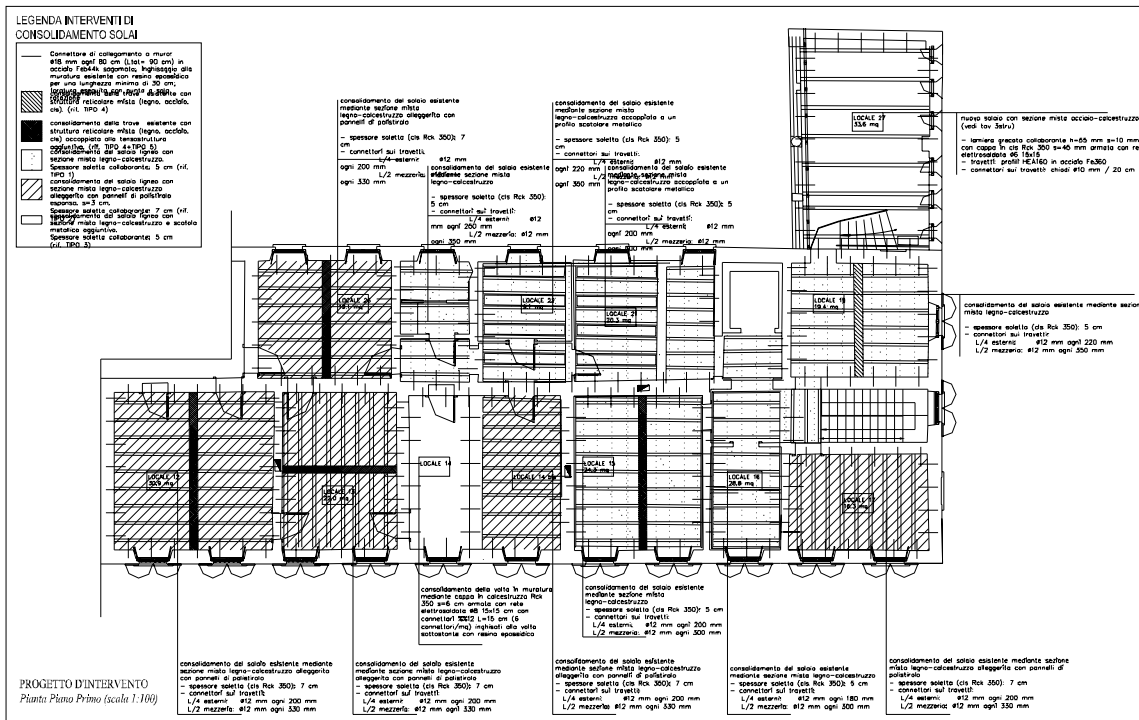


Figura II. 12. Tavola di progetto

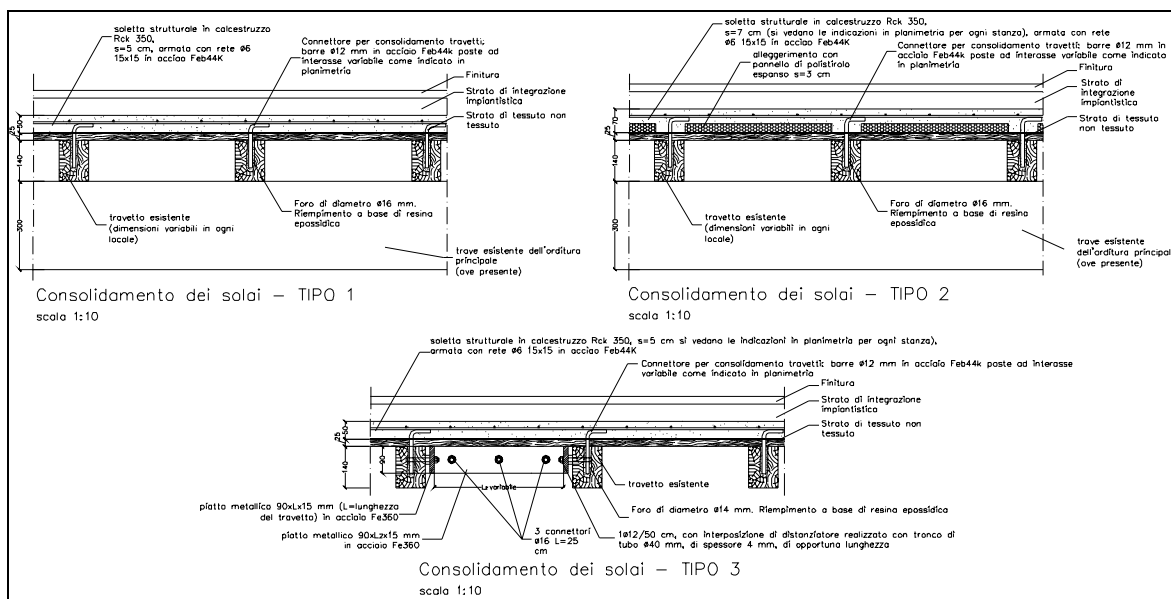


Figura II. 13. Dettagli di progetto

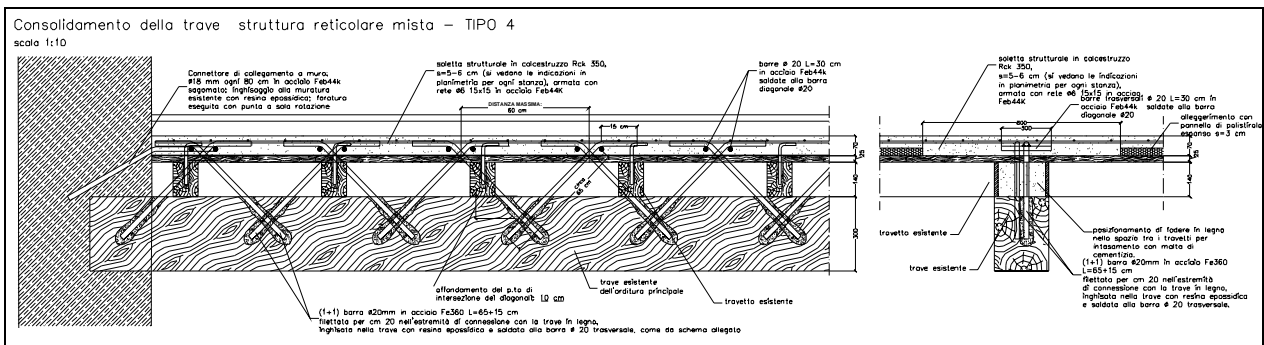


Figura II. 14. Dettagli di progetto

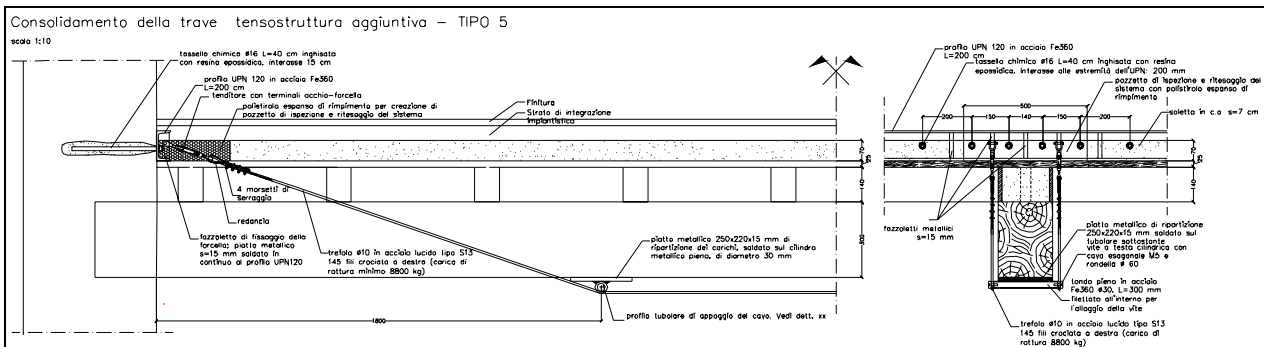


Figura II. 15. dettagli di progetto

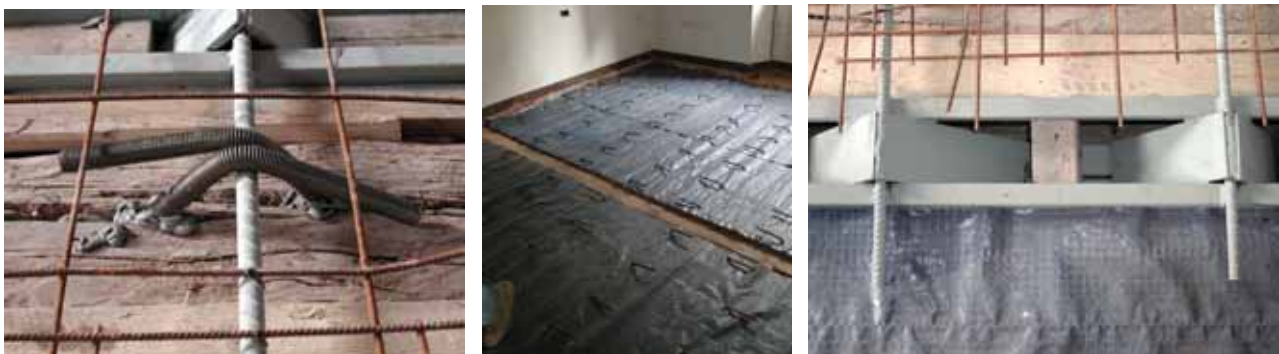


Figura II. 16. Immagini dell'intervento in fase di realizzazione.

Un esempio è rappresentato dalla adozione di due travi metalliche reticolari a fianco di alcune travi lignee principali. La nuova trave è costituita da correnti piatti inseriti nel ridottissimo spazio sotto ai travetti i quali vengono collegati a due tubi quadri posti sopra all'assito mediante piastre a forma di V, saldate in opera, in modo da non interferire con i travetti stessi. Una barra saldata sulla testa della V consente un migliore collegamento con i connettori infissi nella trave lignea e con la soletta in cls di completamento.

L'ORGANO PRESTINARI NELLA CHIESA VECCHIA DI S.PIETRO ALL'OLMO - CORNAREDO (MI)

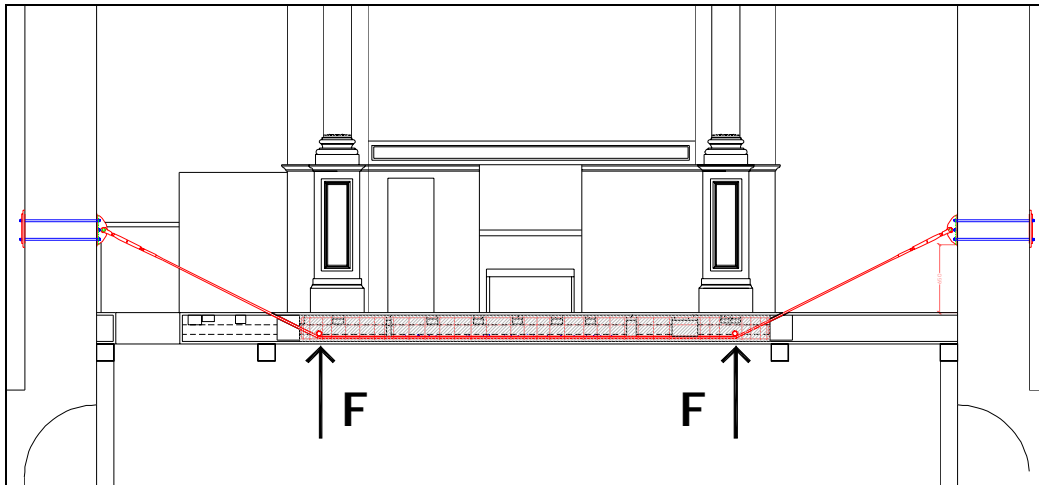


Figura II. 17. Schema di funzionamento.

La struttura della cantoria presente nella chiesa di S.Pietro all’Olmo di Cornaredo (MI) è realizzata con travi lignee a sbalzo collegate trasversalmente e solo parzialmente sostenute da due tiranti, inseriti nel volume dell’organo, che lo appendono alla parete di facciata. Sul solaio grava un notevole carico permanente, costituito dall’organo stesso, dalle casse e dai mantici. Fenomeni di degrado meccanico degli elementi lignei, affiancati ai fenomeni viscosi e a probabile rilassamento del tirante di sospensione hanno portato nel tempo ad un incremento preoccupante della deformabilità globale della struttura. Attualmente la struttura è stata puntellata precauzionalmente. Per diminuire la deformabilità del solaio occorre vincolare lo spostamento dell’estremità libera della mensola aggiungendo un nuovo appoggio che interferisca il meno possibile con l’esistente. La soluzione è quella di utilizzare un cavo sagomato che, celato dietro la balaustra ed ancorato alla murature, sostenga una trave contenuta nel solaio, la quale a sua volta sostenga i travetti nella loro estremità libera.

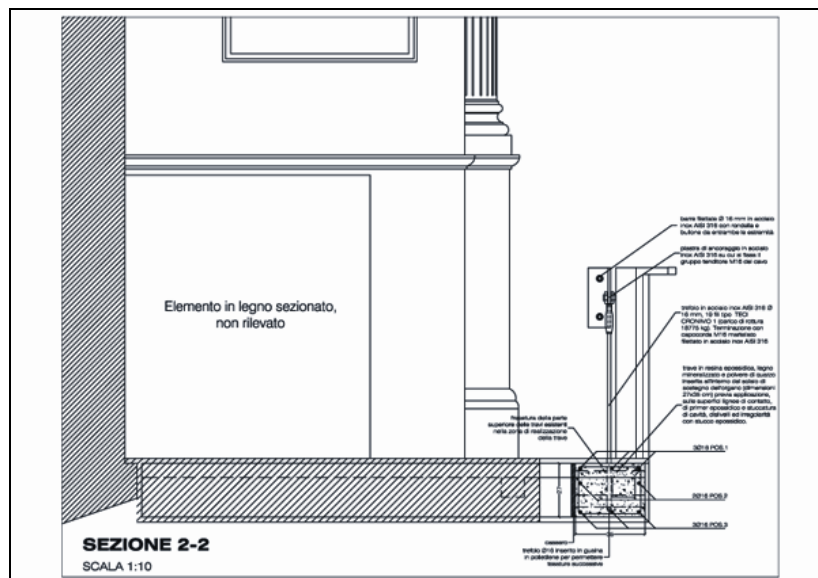


Figura II. 18. Sezione trasversale di progetto.

La nuova trave viene realizzata mediante colatura di un conglomerato ottenuto dalla miscela di resina epossidica fluida, legno mineralizzato e polvere di quarzo, al fine di ottenere una buona resistenza, un peso ridotto e un costo non eccessivo. Questa trave viene armata con barre in acciaio Feb44k e al suo interno si inserisce un tubo in teflon dentro al quale potrà scorrere il cavo metallico. L'intervento viene realizzato operando dall'alto, smontando una striscia di assito ligneo che, ad operazione terminata, verrà rimontata.

I solai di Palazzo Pallavicino - Cremona

In gran parte delle strutture lignee costituenti i solai dell'edificio si sono riscontrati fenomeni più o meno accentuati di marcescenza o di degrado biotico che hanno portato ad una drastica riduzione delle sezioni resistenti degli stessi. A questo deve essere poi aggiunta la necessità progettuale di un incremento della capacità portante delle strutture derivata dall'aumento dei carichi accidentali.

Il principio generale utilizzato è stato quello di massimizzare la permanenza delle strutture preesistenti affiancando ad esse dei sistemi di rinforzo il meno possibile invasivi e caratterizzati da un elevato grado di reversibilità.

I solai lignei dell'edificio dei diversi locali dell'edificio, non in grado di sostenere i nuovi carichi accidentali, sono stati oggetto di interventi specifici sugli elementi dell'ordito principale e secondario a seconda delle indicazioni ottenute dal calcolo.

In taluni casi la semplice soluzione di legno su legno è risultata sufficiente, in altri si è fatto ricorso a strutture esterne rappresentate da travi metalliche che creano appoggi intermedi per le travi esistenti, costituendo di fatto un graticcio bi-direzionale (Figura II. 19 a, b, c).



Figura II. 19 a, b, c. Dettagli del graticcio costituito da nuove travi metalliche.

Tra le tecniche più inusuali di consolidamento adottate, si illustra il sistema di sostegno di un solaio ligneo particolarmente sollecitato, dovendo sopportare una aula conferenze. E' stata prevista la realizzazione di una tensostruttura d' acciaio all'intradosso dei solai (Figura II. 20), realizzata con cavi metallici e puntoni telescopici, capace di offrire appoggi intermedi alle travi lignee principali e quindi di garantire un notevole sgravio in termini di sollecitazioni taglianti e flettenti.

Il sistema è stato concepito in modo da consentire una definizione accurata della spinta esercitata sulle travi lignee, mediante la regolazione della lunghezza dei puntoni telescopici.

Il nuovo intervento risulta chiaramente distinto dalla struttura originaria e poco invasivo in considerazione del fatto che le uniche opere murarie da effettuare sono le perforazioni per l'alloggiamento delle barre in corrispondenza degli innesti murari.

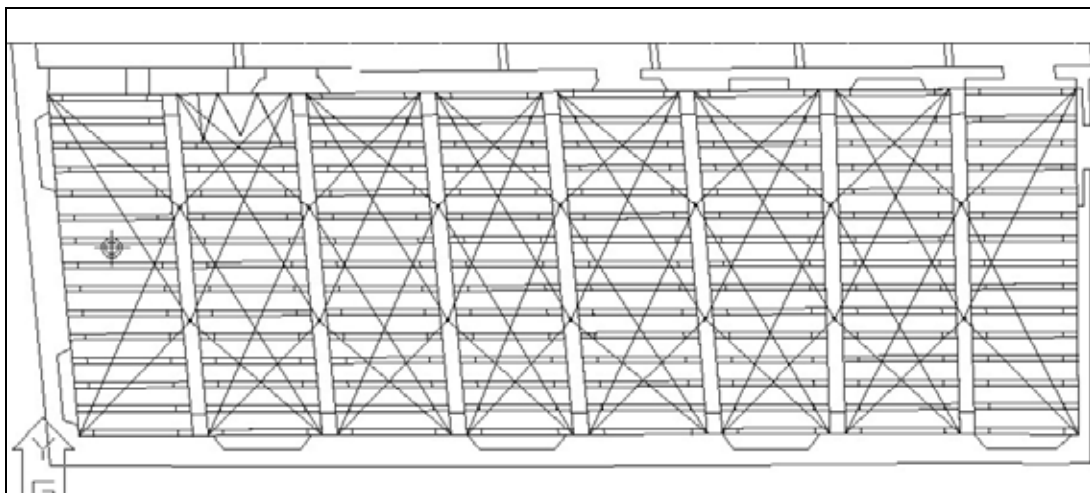


Figura II. 20. Schema planimetrico della struttura reticolare spaziale

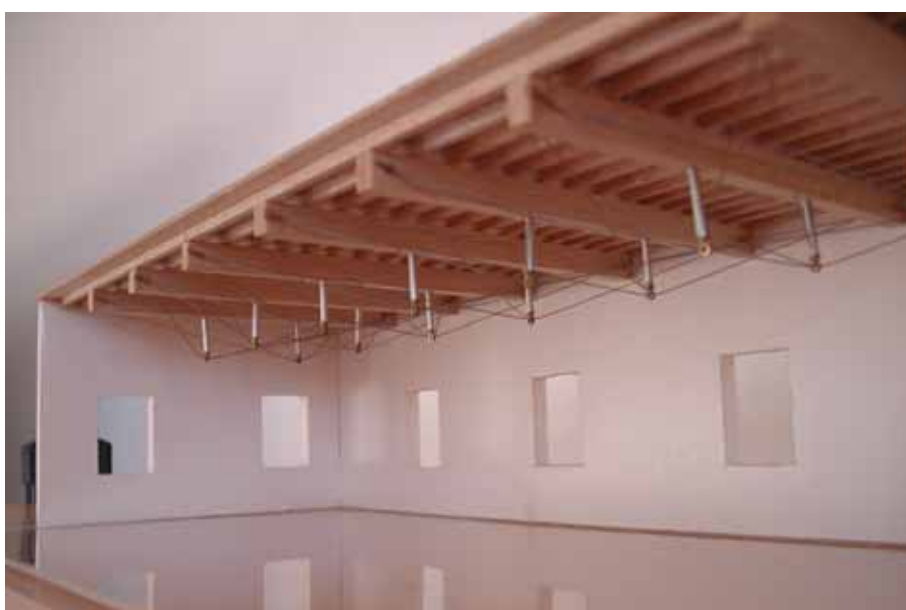


Figura II. 21. Modello in scala della struttura reticolare spaziale



Figura II. 22 a, b, c. Modello realizzato in scala reale in situ per la messa in opera del rinforzo di solaio ligneo con struttura reticolare in trifolium di acciaio: dettaglio dell'attacco alla parete e i puntoni telescopici

Pare interessante notare come si sia modificato il progetto dei capochiavi dei cavi di sostegno passando dalla ipotesi di progetto alla fase di esecuzione dei lavori (Figura II. 23, Figura II. 24 a, b).

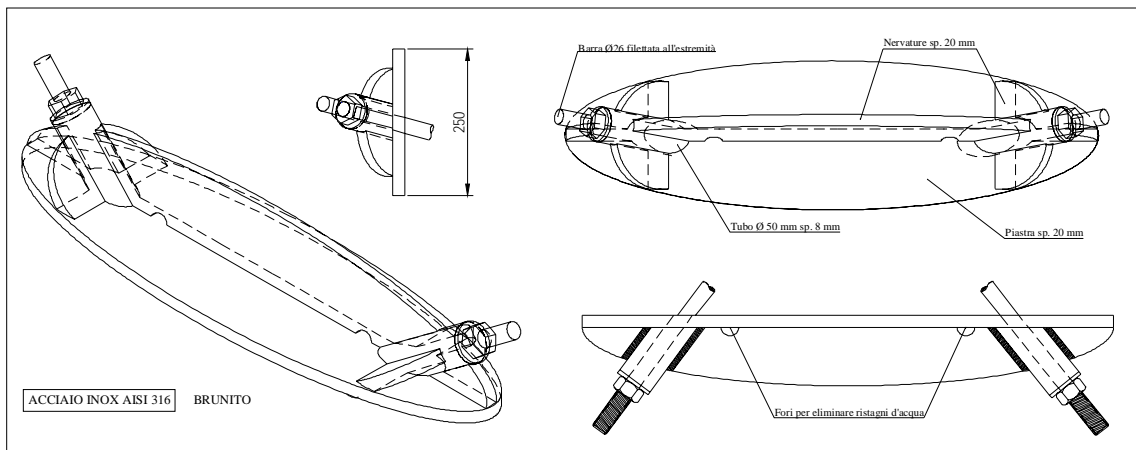


Figura II. 23. Dettagli di progetto del capochiave



Figura II. 24 a, b. Capochiave realizzato

I solai di Casa Bossi – Novara

I solai in legno presentano una tipologia ad orditura semplice nascosti da un controsoffitto in cannucciato intonacato. La definizione della configurazione geometrica e strutturale è avvenuta attraverso l'impiego di indagini georadar. Un caso emblematico è stato quello del solaio del locale al piano ammezzato la cui complessa articolazione costruttiva (Figura II. 25) è derivata dalle innumerevoli fasi di intervento succedutesi nel tempo il cui effetto è stato un preoccupante incremento dei carichi permanenti e delle conseguenti sollecitazioni.

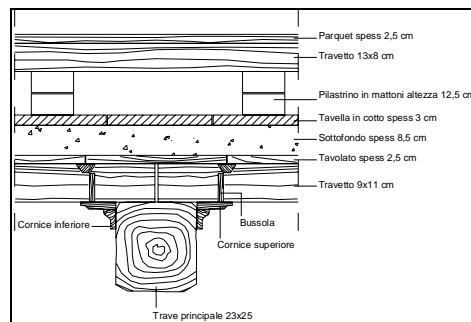


Figura II. 25. Stato di fatto: sezione trasversale dei solai

Si è optato per un intervento che sfrutta l'intercapedine presente al di sotto del parquet, mediante l'introduzione di travi HEA 120 collaboranti con la trave principale. Due ulteriori travi HEA 120 parallele rompitrattano i travetti secondari (Figura II. 26).

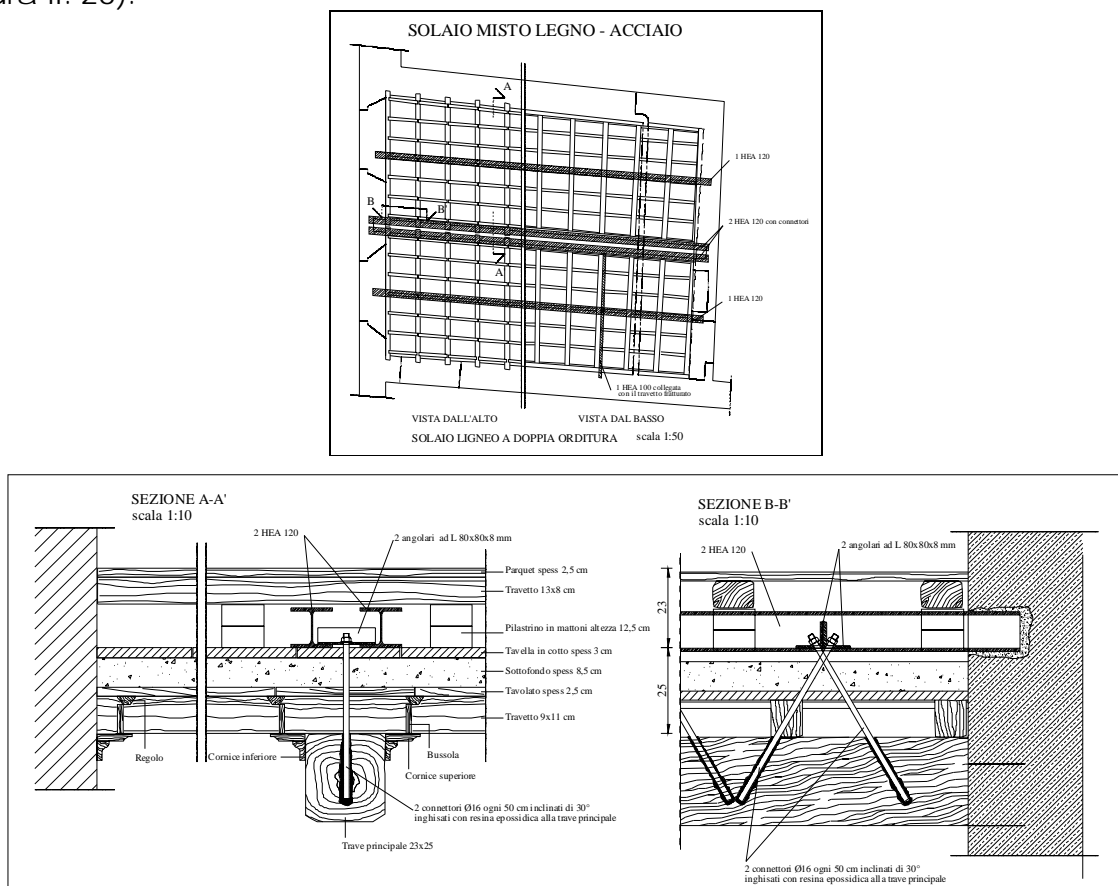


Figura II. 26. a, b. Progetto

I solai del Palazzo della Ex caserma Zanardi Bonfiglio di Voghera

Uno dei solai di maggiore luce, nella zona di spigolo dell'edificio, mostrava segni di forte inflessione, ma non era tale da richiedere sostituzioni di elementi parziale o totale. Per l'ordito secondario si è optato per un intervento a sezione mista legno-cis, mentre per l'ordito principale si è progettata la messa in opera del un sistema a graticcio, con sei segmenti di trave di nuova realizzazione in legno lamellare. All'intradosso, nel punto di intersezioni tra le travi ortogonali, è presente un puntone telescopico che, allungato opportunamente, mette in tensione due coppie di cavi incrociati poste inferiormente all'impalcato, che risulta così post-teso. Si realizza in sostanza un solaio ligneo incrociato, a struttura mista legno-cavi in acciaio, senza incremento dello spessore strutturale. Particolare attenzione hanno richiesto i dettagli di collegamento tra le travi nuove e quelle originarie e tra i cavi in acciaio e le teste delle travi lignee.

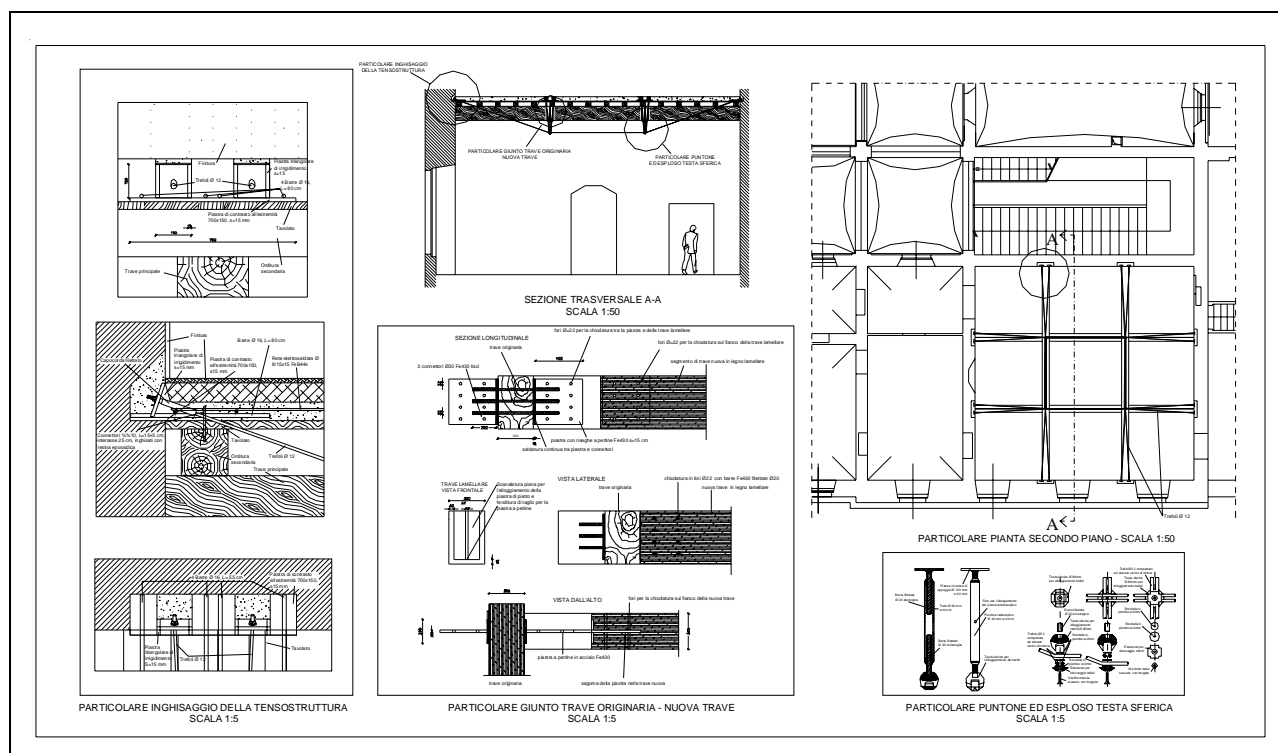


Figura II. 27. Dettagli di progetto.

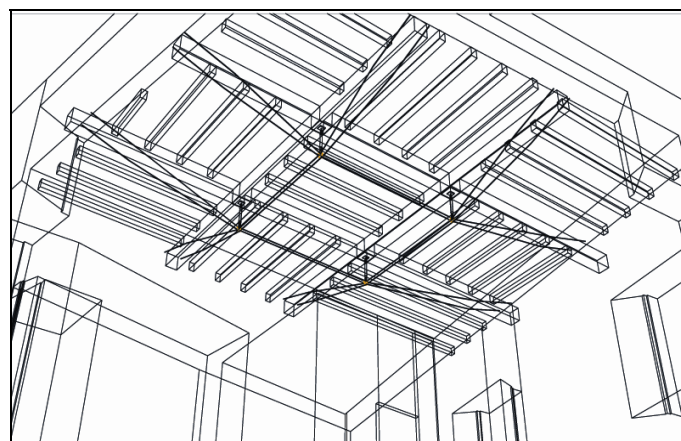


Figura II. 28. Schema assometrico dell'intervento.

La copertura di Palazzo Silva Persichelli – Cremona

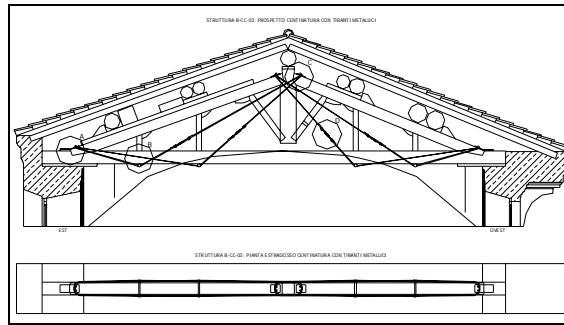


Figura II. 29

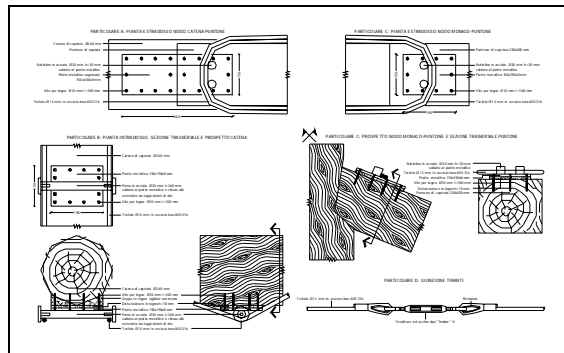


Figura II. 30

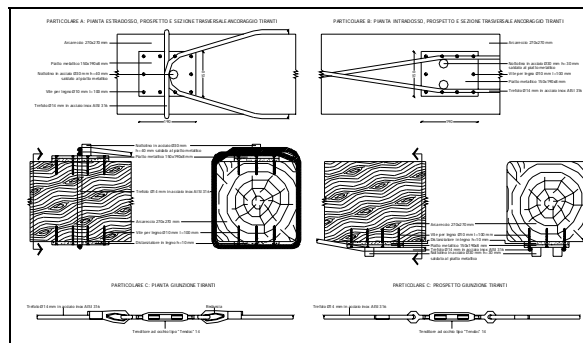


Figura II. 31

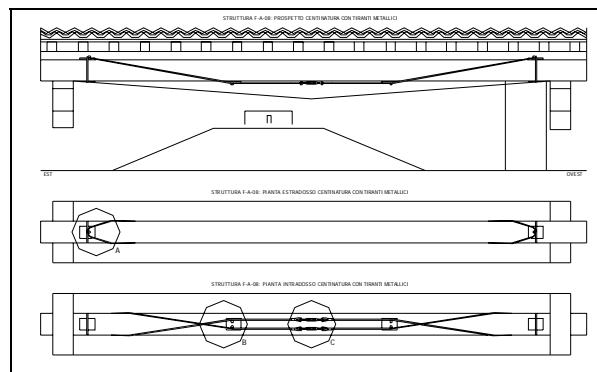


Figura II. 32

Ex Filanda Meroni - Soncino (Cremona)

Nel progetto di trasformazione di un edificio rustico e di una adiacente filanda, in prossimità del Castello di Soncino, due volumi di grandi dimensioni abbisognano di intervento di consolidamento, in quanto verranno parzialmente svuotati dei solai esistenti e destinati ad ospitare rispettivamente il nuovo teatro e la biblioteca. Il **nuovo teatro** presenta in pianta uno sviluppo allungato ed una totale assenza di setti di controvento intermedi. Presenta inoltre uno sviluppo notevole in altezza, caratteristica che costituisce un fattore di grande vulnerabilità, di cui tenere conto nei confronti delle sollecitazioni sismiche.

In questa situazione geometrica infatti risultano maggiori rispetto alla situazione originaria sia la snellezza delle pareti longitudinali, sia il momento ribaltante a quota fondazione in caso di sollecitazione sismica, sia il momento flettente lungo lo sviluppo delle pareti stesse.

Di qui la necessità di realizzare un efficace diaframma di irrigidimento e di ripartizione delle azioni sismiche disposto nella parte sommitale dell'edificio. Tale diaframma verrà vincolato a due nuovi setti di controvento posti alle estremità della lunga galleria, trasversalmente ad essa.

L'obiettivo è quello di offrire alle lunghe pareti longitudinali prive di contrasti un vincolo sommitale diffuso e sufficientemente rigido in grado di ridurre in maniera marcata gli spostamenti della copertura, specie nella zona intermedia.

Il progetto prevede la realizzazione di nuove travi metalliche sagomate ad arco, ("boomerang") intercalate alle capriate lignee esistenti, le quali, assieme a una serie di cavi metallici di controvento incrociati e a due correnti longitudinali aderenti alle pareti lunghe dell'edificio, andranno a costituire una lunga trave reticolare, in grado di fornire un vincolo orizzontale alla quota del sottotetto.

Data la rilevante altezza dell'edificio si è resa necessaria la adozione di un sistema di presidio flessionale a supporto delle snelle pareti longitudinali, costituito da profili in acciaio verticali resi collaboranti con la muratura mediante tasselli chimici e collegati a quota intermedia da un secondo profilo orizzontale corrente (Figura II. 33, Figura II. 34).

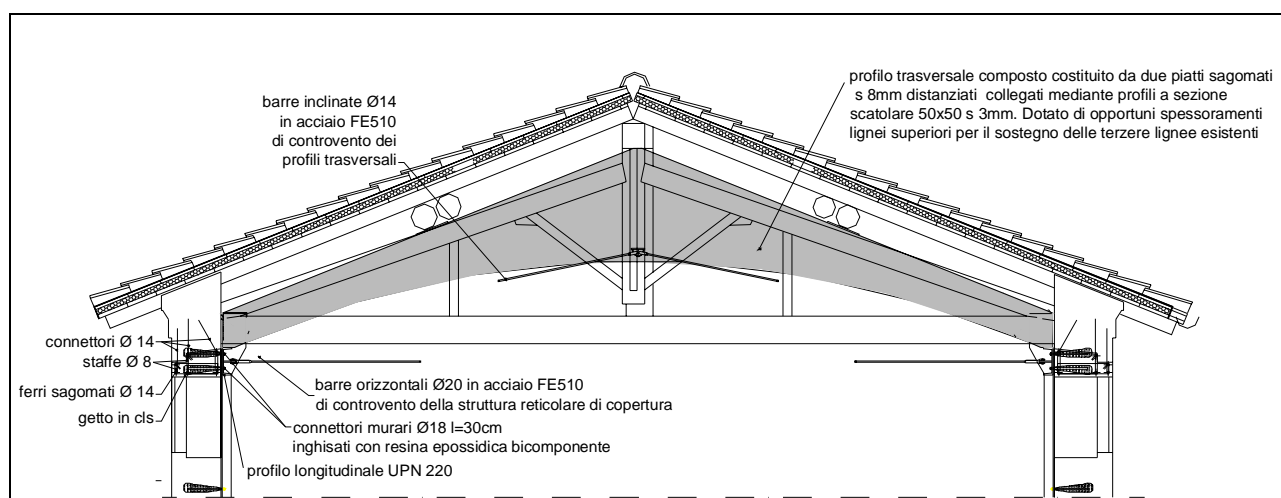


Figura II. 33. Gli interventi previsti per l'area destinata a teatro

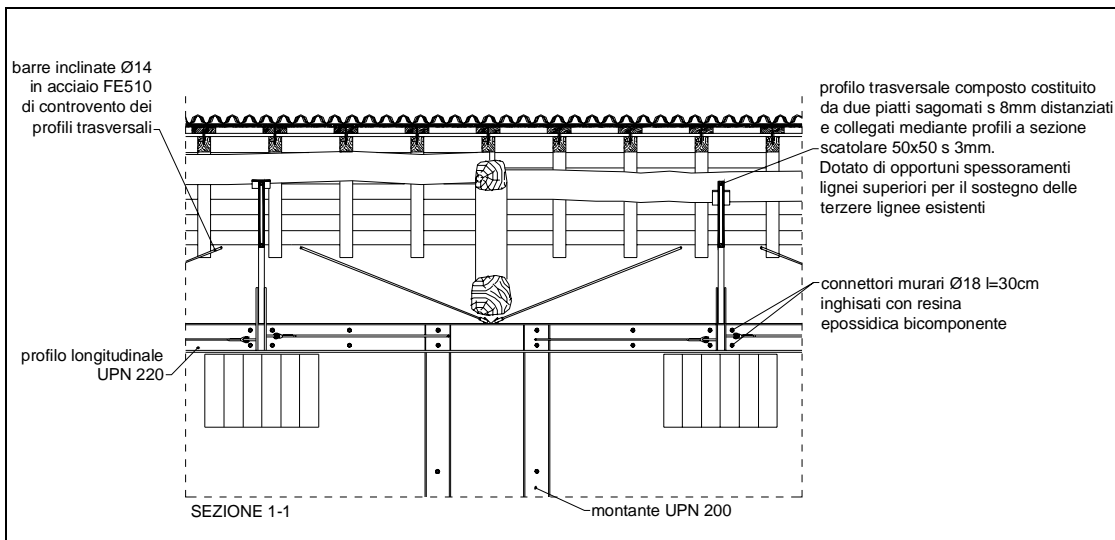


Figura II. 34. Gli interventi previsti per l'area destinata a teatro.

La **nuova biblioteca** si caratterizza, dal punto di vista strutturale, per uno sviluppo in pianta marcatamente longitudinale e per la presenza di estese superfici vetrate su entrambe le pareti lunghe.

La configurazione planimetrica allungata e la contemporanea totale assenza di pareti intermedie in grado di irrigidire quelle longitudinali ha comportato la necessità di progettare un efficace sistema di irrigidimento a livello dell'imposta della copertura. Tale sistema è costituito da un profilo metallico a C perimetrale fittamente collegato al coronamento murario, da una serie di tiranti incrociati ad esso fissati, e dalle capriate lignee esistenti. Queste ultime saranno chiamate a svolgere la funzione di traversi compressi in una struttura reticolare, dopo essere state debitamente irrigidite attraverso la realizzazione di collegamenti reticolari in estradosso ai puntoni. Si realizza così una grande trave reticolare, con giacitura orizzontale, vincolata ai due setti di estremità e capace di offrire un vincolo sufficientemente rigido nei confronti dello spostamento delle pareti longitudinali, lungo tutto il loro sviluppo (Figura II. 35).

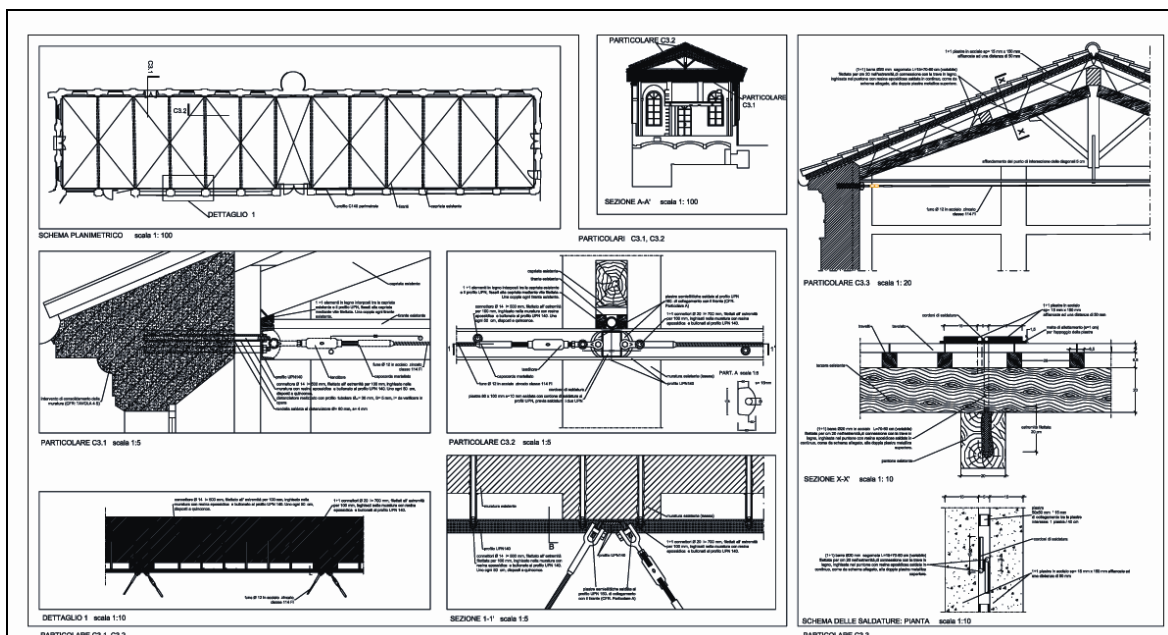


Figura II. 35. Gli interventi previsti per l'area destinata a biblioteca.

La nuova configurazione strutturale così determinata consentirà di ottenere sulle pareti longitudinali un vincolo sommitale sufficientemente rigido, così da garantire, in caso di forzante sismica, un sostanziale abbassamento dei periodi propri di vibrazione della struttura ed una conseguente riduzione dei valori massimi di spostamento in copertura.

La soluzione adottata è concettualmente analoga a quanto adottato a Milano, nel consolidamento del Palazzo della Ragione, nel 1978.

La copertura di Palazzo della Ragione- Milano

Obiettivo dell'intervento in copertura è stato la realizzazione di un "elemento diaframma" capace di contrastare la deformazione flessionale delle murature longitudinali del corpo di fabbrica, dovuta a forze ortogonali al piano.

Oltre all'incremento di rigidità della copertura nel suo piano, si mirava a migliorare il mutuo collegamento con le pareti portanti, longitudinali e trasversali e garantire un miglior trasferimento dei carichi.

Si è dunque proposto l'utilizzo di elementi di rinforzo in acciaio per la realizzazione del diaframma rigido a livello della copertura con funzione di controvento e di vincolo superiore alle pareti longitudinali, mediante disposizione di 24 tiranti metallici incrociati, opportunamente post-tesi.

La soluzione adottata è pertanto di consolidamento attivo.

L'ancoraggio dei tiranti ad una catena perimetrale in costituita da un profilo a C, disposto sotto l'appoggio delle capriate, completa l'intervento con un'azione di cerchiaggio interno.

Lo schema derivato dalla modellazione numerica (Figura II. 36) mostra come le due pareti longitudinali, collegate agli estremi, sottoposte ad una forza normale al loro piano, hanno come effetto una deformazione solo in parte assorbibile da collegamenti ortogonali al loro piano (es. capriate lignee), idonei a contrastare la deformazione flessionale. Mediante inserimento di tiranti incrociati, si esplica invece un'azione efficace di contrasto alla deformazione al taglio.

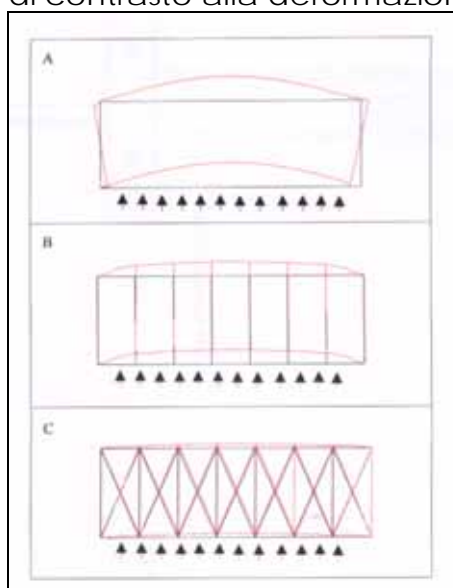


Figura II. 36. Schema del modello sottoposto ad azioni normali al piano delle murature longitudinali

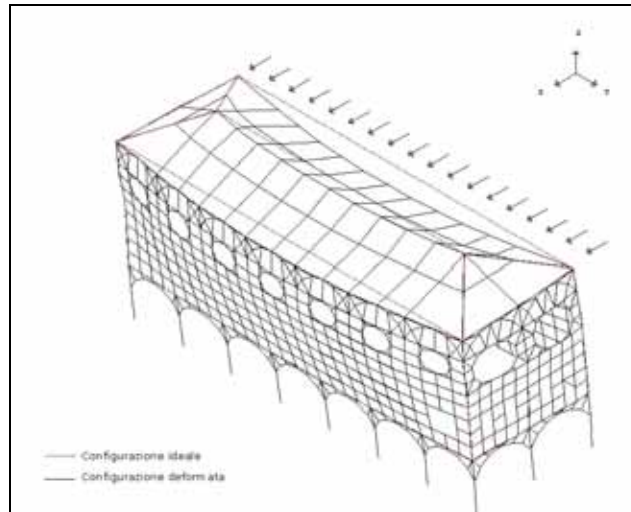


Figura II. 37. Deformata del modello sottoposto a spinte da vento o sisma.

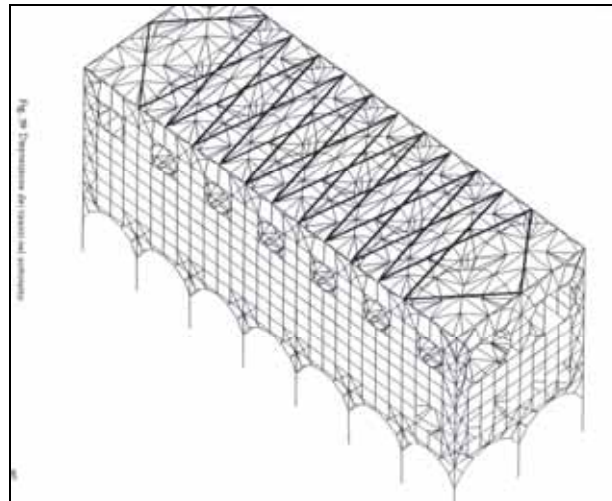


Figura II. 38. Il modello con la disposizione del rinforzo.

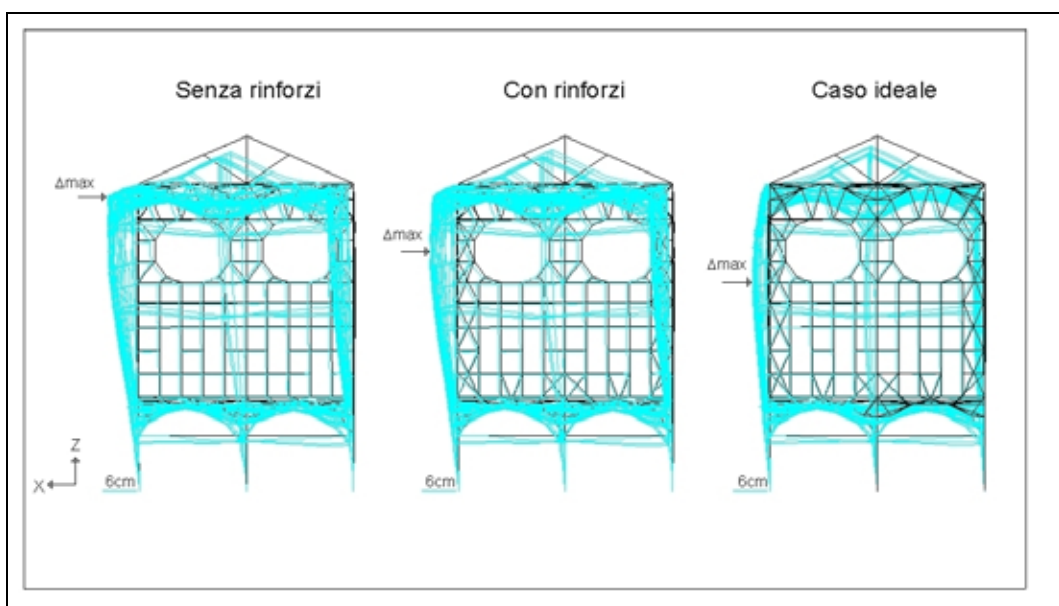


Figura II. 39 Confronto dell' andamento della deformata.

I solai del Palazzo della Magnifica Comunità di Fiemme – Cavalese (Trento)

Il progetto di restauro del Palazzo della Magnifica Comunità di Fiemme prevedeva la riorganizzazione di alcuni spazi interni ed una conseguente variazione dei carichi gravanti sugli orizzontamenti. I solai lignei, connotati da una forte presenza di decorazioni, sono stati quindi oggetto di consolidamento specifico, in cui per ciascun ambiente sono state valutate differenti soluzioni.

I fenomeni di dissesto, analizzati in fase di diagnostica, risultavano derivanti dalla compresenza di più cause tra cui l' eccentricità delle murature rispetto alle fondazioni, gli elevati carichi accidentali, le diverse fasi di costruzione che avevano prodotto nel tempo una lenta ma continua rotazione verso l'esterno delle pareti. Il progetto di consolidamento dei solai ha tenuto conto, oltre che della necessità di aumentare la capacità portante e adeguarla alle nuove destinazioni d'uso, anche dell' esigenza di conferire a tali orizzontamenti la funzione di contrastare il divaricamento in atto della muratura in elevazione.

Gli interventi di consolidamento proposti hanno avuto inoltre l'obiettivo di realizzare una membrana rigida orizzontale in grado di assorbire gli sforzi generati da eventi sismici. Da qui la scelta di realizzare una soluzione mista calcestruzzo-legno, con l'adozione di connettori, che, a causa delle decorazioni presenti, dovevano essere "a secco" (Figura II. 40.)



Figura II. 40. La soluzione mista calcestruzzo-legno, con connettori a secco in alluminio filettato

La connessione tra la soletta e la muratura perimetrale è stata prevista mediante connettori metallici a parete (Figura II. 41), con l'impiego di iniezioni con miscele compatibili laddove la malta non garantiva più la continuità del paramento.

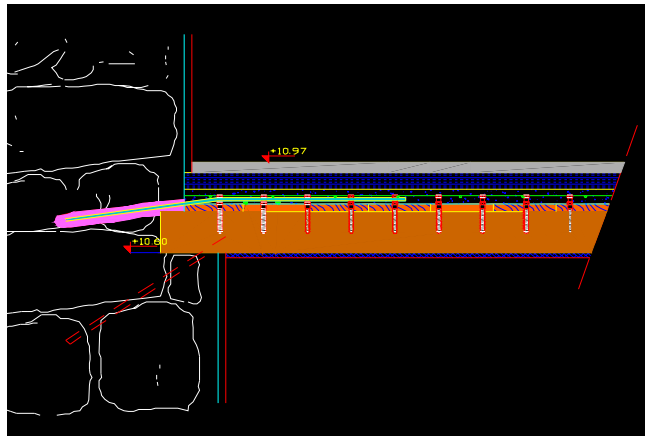


Figura II. 41

Tiranti metallici di collegamento tra parete e parete sono stati previsti in appositi alloggiamenti a pavimento, come misura ulteriore per contrastare la tendenza alla divaricazione delle pareti.

Gli interventi al primo livello sono stati previsti principalmente dall'intradosso in quanto la presenza di pavimenti preziosi impediva ogni azione dal di sopra. In un locale si è scelto di intervenire con una struttura a graticcio (Figura II. 42 a, b), realizzata con piatti metallici incrociati diagonalmente, posti sotto al solaio e lasciati a vista. Ogni trave risulta così appoggiata in almeno un punto intermedio, con una notevole riduzione dei momenti flettenti sotto carico. I piatti diagonali sono in grado inoltre di trasferire sforzi di taglio nel piano orizzontale, collegando le porzioni adiacenti di solaio in un unico elemento di diaframma, in grado di distribuire i carichi in caso di terremoto.

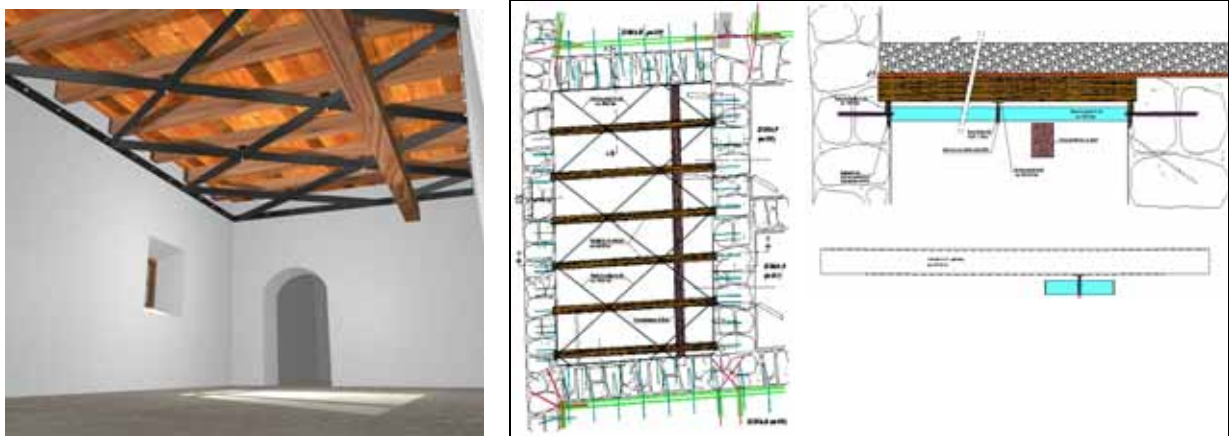


Figura II. 42 a, b. Struttura reticolare di primo piano

Al secondo piano gli elementi d'orditura del solaio mostravano uno stato di degrado e di dissesto molto marcato, con problemi di collasso locale in prossimità degli appoggi alla muratura e degrado biologico da funghi e da insetti.

La complessità dei vincoli progettuali era accentuata dalla presenza di ricche articolazioni decorative intradossali.

Si è optato per inserire un dormiente ligneo perpendicolare alle travi, sostenuto da cavetti inclinati opportunamente regolabili in lunghezza e tesabili (Figura II. 43 a, b).

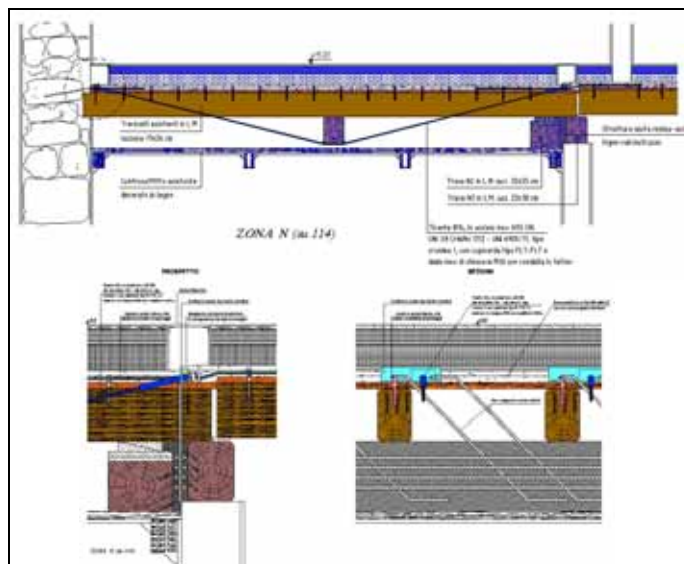


Figura II. 43 a, b. Lo stato di fatto all'intradosso e dettagli di progetto

Negli ambienti destinati ad uffici amministrativi, il solaio è completamente decorato. La soluzione studiata per rinforzare l'ordito principale prevede la realizzazione di una trave reticolare in estradosso, in corrispondenza dell'asse longitudinale delle travi principali stesse. Il nuovo elemento strutturale viene reso solidale alla trave lignea mediante connettori metallici e alla soletta in cls mediante staffe saldate.

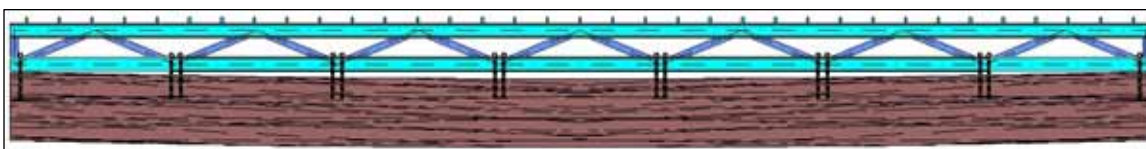
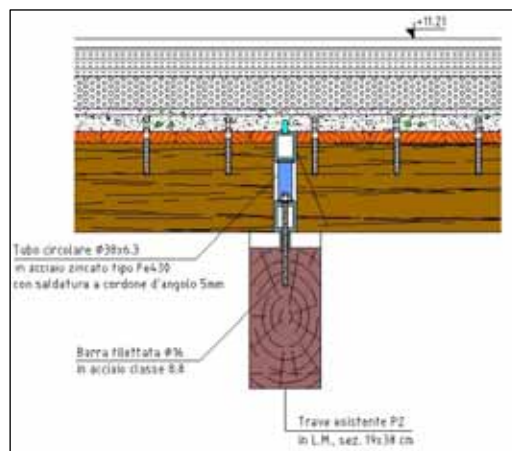


Figura II. 44. Uffici amministrativi: immagine dello stato di fatto e dettagli di intervento.

Le travi di sostegno di uno dei corridoi si presentavano particolarmente sollecitate. Per esse si è arrivati alla definizione di due soluzioni diversificate. A sostegno della trave di bordo delle scale sono stati previsti due cavi verticali paralleli ancorati in diagonale alla muratura superiore, in corrispondenza del dormiente del solaio (Figura II. 46, a). che funge da contrasto orizzontale compresso.

Per l'altra trave dello stesso ambiente, eccessivamente inflessa, si è operata una riduzione della luce, creando due ulteriori appoggi intermedi. Considerato che sotto alla trave è presente un tamponamento in muratura, si è previsto di posizionare due puntelli in acciaio, contenuti nello spessore murario, in adiacenza degli stipiti della porta, nella mezzeria della campata. Il carico verticale trasmesso dalla trave ai puntelli viene recuperato mediante due cavi inclinati che collegano le estremità inferiori dei profili alla muratura soprastante, in corrispondenza delle teste della trave da rinforzare (Figura II. 46, b).



Figura II. 45. a, b. Solaio della stanza del consiglio.

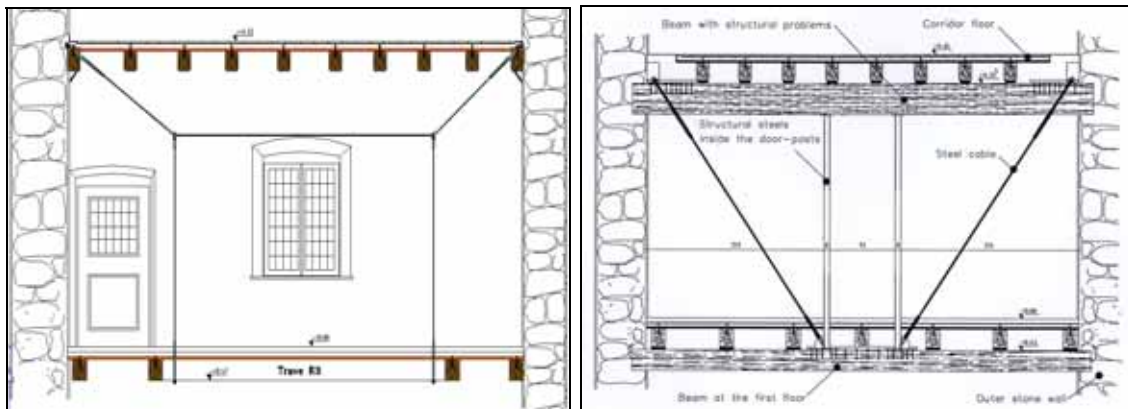


Figura II. 46. a) Soluzione per la trave di bordo scala. B) Soluzione per la seconda trave rinforzata.

Al disopra della stanza del Consiglio è stato previsto l'intervento di maggior impatto. Le altissime travi dell'orditura principale, ciascuna magistralmente costituita da due sezioni lignee sovrapposte e giuntate mediante staffe, risultavano al limite delle capacità resistente. La soluzione elaborata prevede la realizzazione all'estradosso di una nuova struttura reticolare spaziale in acciaio a cui le travi lignee principali possano esser sospese. Tale struttura, oltre assorbendo i carichi verticali della struttura, agisce anche da diaframma, irrigidendo il piano orizzontale la scatola edilizia (Figura II. 47 a, b, c).

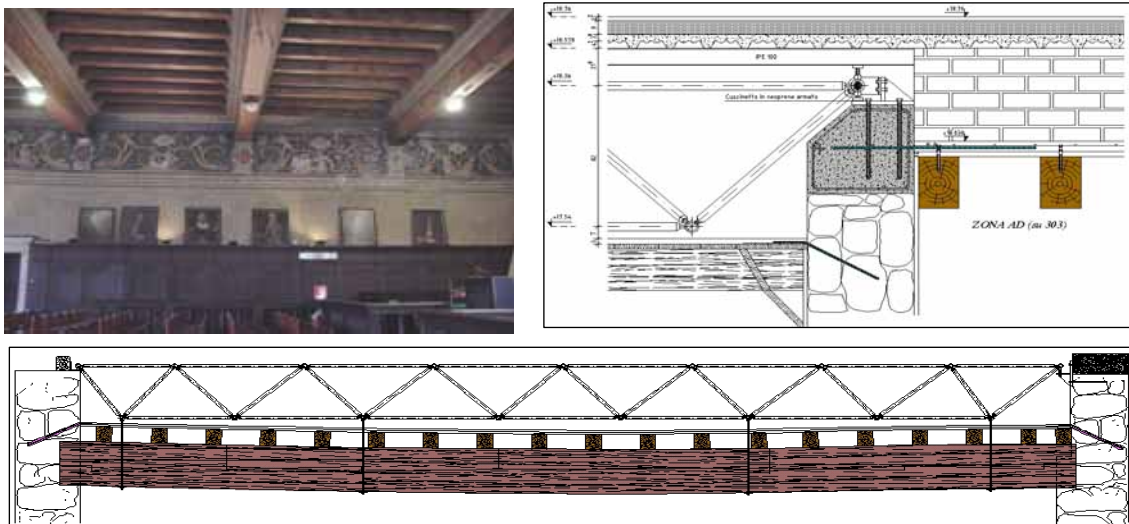


Figura II. 47 a, b, c. La struttura reticolare spaziale al di sopra del solaio

Conclusione

Gli esempi descritti, pur nella loro sinteticità, mostrano le possibilità e la grande flessibilità di uso degli elementi leggeri in acciaio, ed in particolare dei tiranti, nelle applicazioni del consolidamento strutturale di elementi lignei.

Sono state presentate soluzioni con elementi a scomparsa, oppure totalmente a vista o parzialmente a vista; soluzioni passive, soluzioni attive o soluzioni parzialmente attive; soluzioni in acciaio normale o in acciaio inox, a seconda del grado di rischio che il loro utilizzo prospettava.

Sempre più fattibili e vicine appaiono soluzioni dove il materiale acciaio verrà sostituito o affiancato da composti fibrosi di eccezionali caratteristiche dal punto di vista meccanico e della durabilità.

Molte sono pertanto le soluzioni rese possibili dall'apporto di materiali ed elementi strutturali leggeri, soprattutto con modalità di funzionamento "attivo" come quelle sopra illustrate, ma va sottolineato che la soluzione migliore, tra tutte le possibili, va ricercata tra quelle che riconoscono la assoluta singolarità ed irripetibilità dell'opera monumentale.

Questa priorità deve spingere il professionista ed il ricercatore alla individuazione di una scelta progettuale, ossia di un compromesso culturale, tecnico ed economico, capace di sfruttare in modo ottimale le risorse tecnologiche, gli strumenti di previsione e controllo ed i materiali disponibili, nel tentativo di consegnare al futuro, in condizioni dignitose, l'opera che gli è stata affidata.

I casi presentati sono stati progettati in collaborazione con molti colleghi architetti ed impiantisti, che desidero qui ringraziare.

La progettazione è stata effettuata da :

Casa ex-Masciadri - Arcene (Bergamo):
archh. D. Vitale, C. Di Biase, M. Minocci, ing. L. Jurina

"Baco da seta" nella villa Della Porta Bozzolo- Casalzuigno (Varese):
arch. P. Bassani, ing. L. Jurina

Torre del Castello Visconteo – Pavia:
prof. arch. Colli, ing. L. Jurina

Ex Monastero di S. Clara – Pavia:
archh. V. Prina, R. Toma, E. Pinna, ing. L. Jurina

Ex chiesa di San Carpofofo – Milano:
Ing. A. Carenzi, ing. L. Jurina

La "Cavallerizza" nel Castello di Vigevano (Pavia):
ing. L. Jurina

Villa S. Carlo Borromeo - Senago (Milano):
ing. L. Jurina

Associazione Beth Amidrash-Mishkan Shmuel Beth Shlomo – Milano:
ing. L. Jurina

Edificio adiacente alla chiesa di San Pietro all'Olmo - Cornaredo (Milano):
archh. M.Cavallin, A.Chiari, M.Jadicicco, ing. L. Jurina

L'organo Prestinari nella Chiesa Vecchia Di S.Pietro All'Olmo – Cornaredo (Milano):
archh. M.Cavallin, A.Chiari, M.Jadicicco, ing. L. Jurina

Palazzo Pallavicino – Cremona:
arch. A. Grimoldi, arch. T. Becker, ing. L. Jurina

Casa Bossi, Novara:
arch. P. Colombo, arch. C. Feiffer, ing. L. Jurina

Palazzo della Ex caserma Zanardi Bonfiglio – Voghera:
ing. L. Jurina

Palazzo della Ragione- Milano:
arch. M.Dezzi Bardeschi, ing. L. Jurina

Ex Filanda Meroni - Soncino (Cremona):
Archh. M. Bigozzi, G. Celada, M. Celada, E. Soffientini, M&L, ing. L. Jurina

Palazzo della Magnifica Comunità di Fiemme – Cavalese (Trento):
Archh. A. Marastoni, A. Marastoni, L. Marastoni, arch. C Salizzoni , ing. U. Braitto ,
ing. M. Sontacchi, ing. L. Jurina

Bibliografia

Albatici R., Braitto U., Jurina L., Sontacchi M., *New technology for the preservation of historical buildings: case study of the Magnifica Comunità Palace at Cavalese* Atti del convegno IAHS - International Association for Housing Science XXXI World congress Housing: Process and Products, Montreal, Quebec Canada, maggio 2003.

Barbisan U., Laner F., *Capriate e tetti in legno : progetto e recupero : tipologie, esempi di dimensionamento, particolari costruttivi, criteri e tecnologie per il recupero, manti di copertura* , Milano, F. Angeli, 2000.

Berti M., Bonafede L., Faccio P. (a cura di) *Il legno nelle costruzioni antiche: aspetti delle antiche tecniche costruttive e possibilità di recupero*, atti del convegno, Padova 14 dicembre 1991.

Bonamini G. et al. *Il manuale del legno strutturale: Ispezione e diagnosi in opera Vol I* , Roma Mancosu, 2001.

Ceccotti A., et al., *Restauro conservativo di capriate lignee: la Pieve di S. Marino: progettazione, prove di lavoro, fasi esecutive*, Torino, CLUT, 1998.

Di Biase C., Jurina L. *Un grandioso caseggiato ad uso colonico*. I temi del restauro, TeMa, 2000.

Jurina L., Bonaldi P. Rossi P.P., *Indagini sperimentali e numeriche sui dissesti del Palazzo della Ragione di Milano*, XIV Cong. Naz. Geotecnica, Firenze, 1980

Jurina L. *Strutture in legno: soluzioni leggere per il consolidamento* in *L'edilizia* , n. 4, pp.16-23, 2002.

Jurina L., *Consolidacion estatica de edificios monumentales por medio de tirantes metalicos* III Congr. Int. Rehabilitacion, Granada, 1996.

Jurina L., Demartini R., *Pavia, Castello Visconteo (1926-1997): un "sostegno" per Ambrogio Annoni*, ANANKE, n.24/1998.

Jurina L., *I tiranti metallici nel consolidamento degli edifici monumentali* XVI Convegno CTA, Ancona, 1997.

Jurina L., *Il confinamento laterale delle pareti in muratura mediante tiranti inseriti nelle "buche pontae"*, Convegno nazionale *La meccanica delle Murature tra teoria e progetto*, Messina, Settembre 1996.

Jurina L., *Il consolidamento strutturale della Torre S.Dalmazio a Pavia*, XV Convegno Naz. CTA, Riva del Garda, 1995.

Jurina L., Jadiccico Spignese M., *L'acciaio inox nel consolidamento degli edifici storici* in Atti del convegno *Progettare e costruire con l'acciaio inossidabile*, Milano, 29 novembre 2000.

Jurina L., *La possibilità dell'approccio reversibile negli interventi di consolidamento strutturale*, Atti del XIX Convegno Scienza e Beni Culturali *La reversibilità nel restauro. Riflessioni, Esperienze, percorsi di ricerche*, Bressanone, 1-4 luglio 2003.

Jurina L., *Strutture in legno: Soluzioni leggere per il consolidamento in Recupero e conservazione*, n. 50, pp. 65-68.

Jurina L., Treccani G.P., *Archeologia del costruito: interventi di consolidamento* Atti del Convegno *Il progetto di restauro architettonico. Dall'Analisi all'intervento*, Trento 2002, pp. 89-98.

Pratali Maffei S., *Conservazione e manutenzione del costruito: Ipotesi e proposte per un Capitolato Speciale d'Appalto, tesi di dottorato di ricerca in Conservazione dei beni architettonici*, facoltà di Architettura, Politecnico di Milano, 1993.

Ruskin J., *Le sette lampade dell'architettura*, Sesta lampada, Jaca Book, Milano, 1981.

Tampone G. (a cura di) *Il restauro del legno*, Firenze, Nardini 1989.

Tampone G. (a cura di) *Legno nel restauro e restauro del legno* atti del Congresso nazionale, Firenze, 30 novembre-3 dicembre 1983.

Tampone G. (a cura di), *Legno e restauro: ricerche e restauri su architetture e manufatti lignei*, Firenze, Messaggerie toscane, 1989.

Tampone G. *Il restauro delle strutture di legno : il legname da costruzione, le strutture lignee e il loro studio, restauro, tecniche di esecuzione del restauro*, Milano, Hoepli, 1996.

Tampone G., Mannucci M., Macchioni N., *Strutture in legno. Cultura, conservazione, restauro*, de Lettera Editore, Milano 2002.