

TECNICHE INNOVATIVE NEL CONSOLIDAMENTO DI CAPRIATE E SOLAI IN LEGNO

Lorenzo Jurina, Politecnico di Milano

www.jurina.it

Introduzione

L'uso 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 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 soddisfa 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 capiate sotto peso proprio. In particolare la copertura era costituita da una serie numerosa di capriatelle a due puntone, 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 puntone, 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 puntone 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 puntone 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.

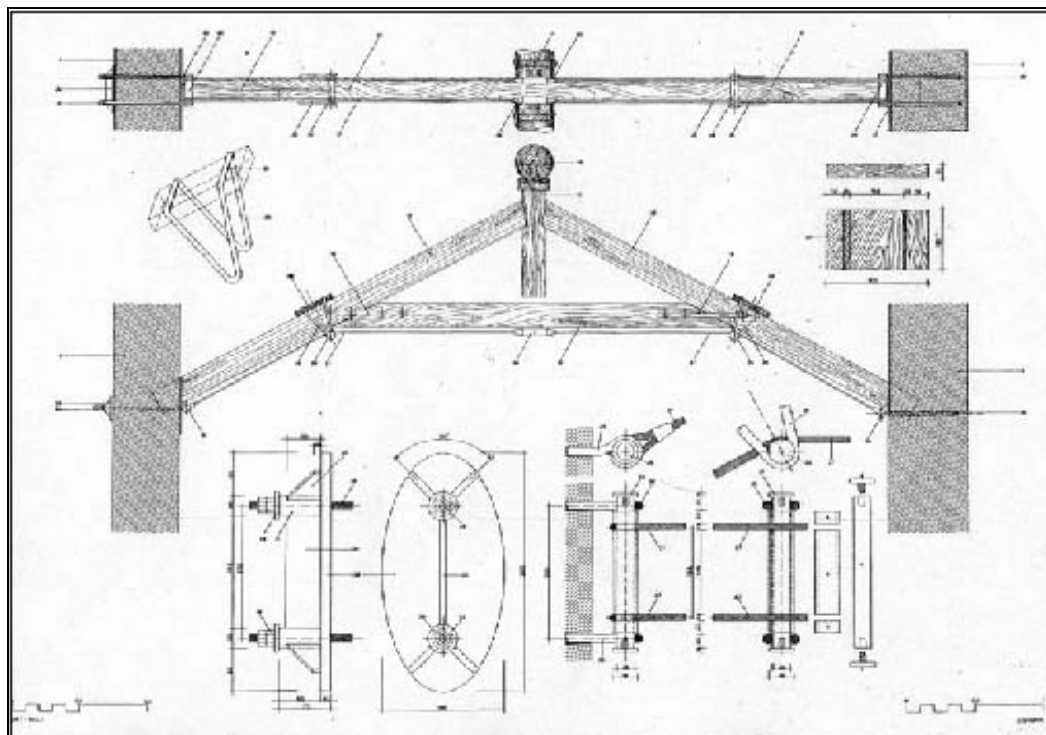


Figura 1. Dettagli del progetto di consolidamento delle capriatelle mediante l'impiego di tirante metallico "sagomato".

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

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,).

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. 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 scorrimento” condotte presso il Politecnico di Milano.

I solai del piano sottostante, costituiti da travetti tondi appena sbozzati, di diametro 15 cm, di luce superiore a 400 cm, 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 resistere a carichi verticali, ossia di sopportare i travetti lignei .

Figura 3. Vista agli appoggi del solaio, con il raddoppio delle travi lignee ed il nuovo profilo a 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 blu 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 piastre metalliche 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 sopportate 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 dislivello, 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.

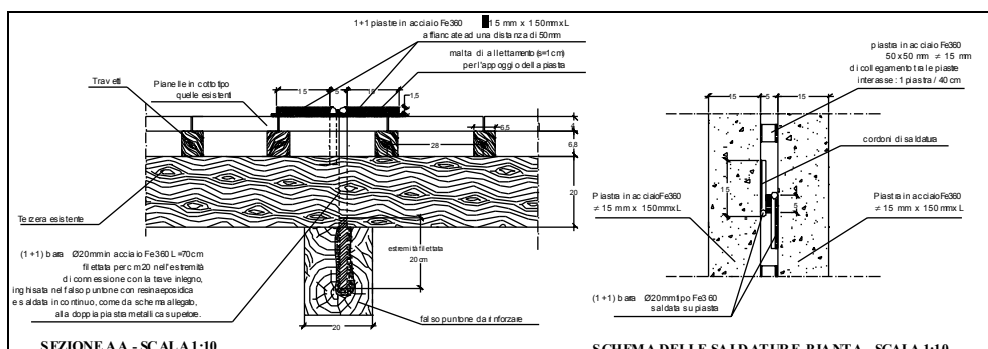
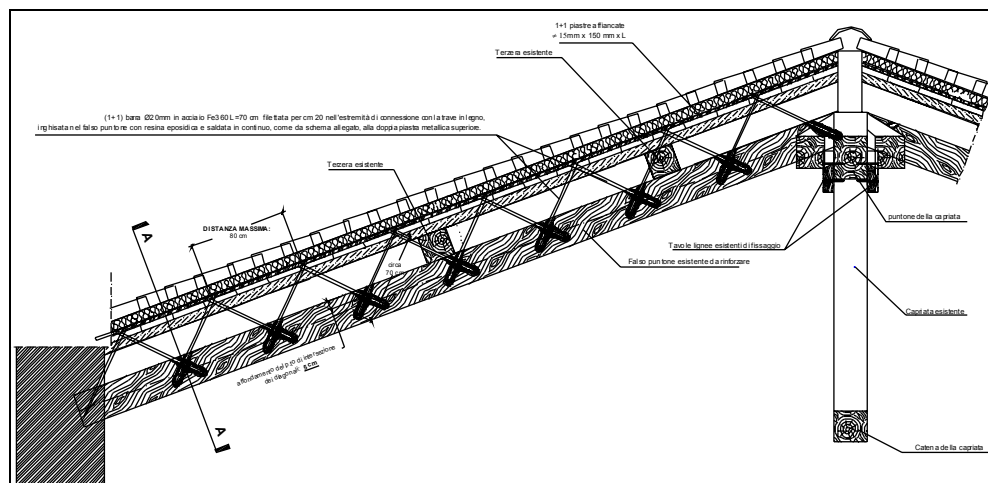


Figura 6 a, b. Il consolidamento della copertura lignea mediante realizzazione di una struttura reticolare mista.



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 di diametro 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 (a $P=1300$ daN). A scarico ultimato non si osservano danneggiamenti.

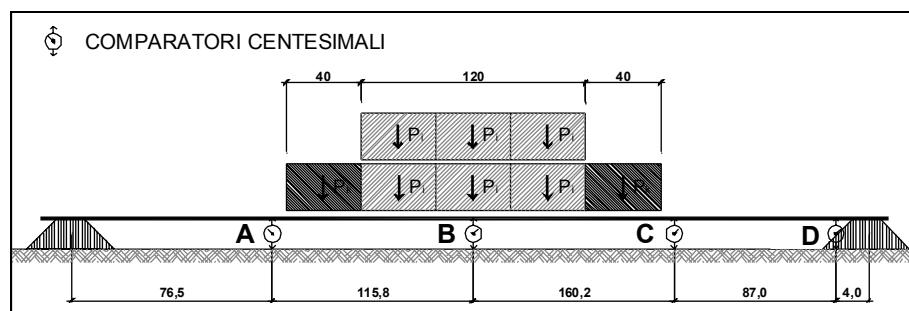


Figura 10. Prova di carico con l'ubicazione dei comparatori centesimali e la posizione dei carichi.

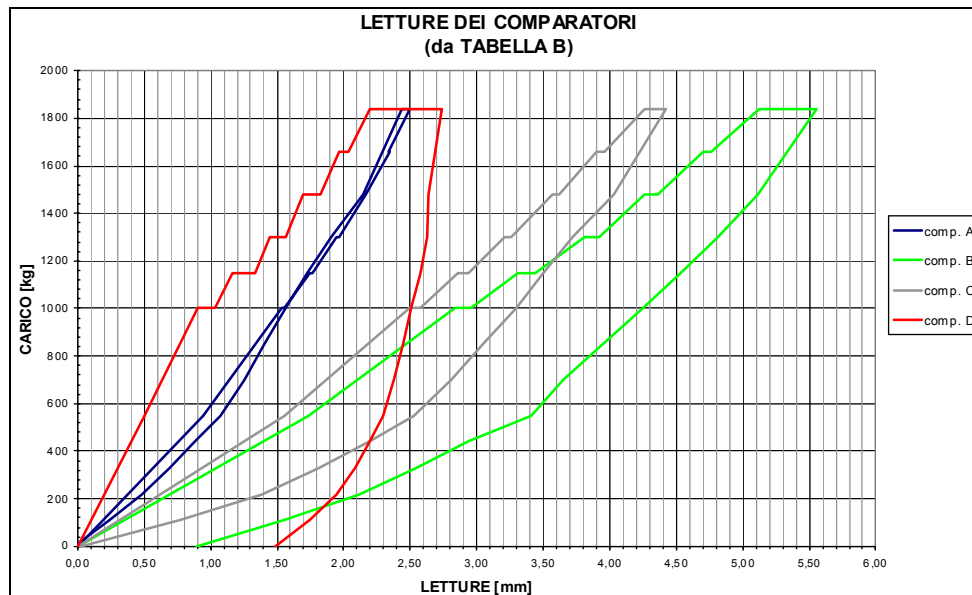


Figura 11. Grafico carico-spostamento .

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 di diametro 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 di 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).

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. 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.

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 puntelli 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 15. Intervento di consolidamento degli appoggi e delle capriate mediante cavi esterni post tesati, con inserimento di un nuovo puntello ligneo di contrasto della falda



Figura 16. Dettagli di realizzazione.

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-calcestruzzo.

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 17, Figura 18).

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.

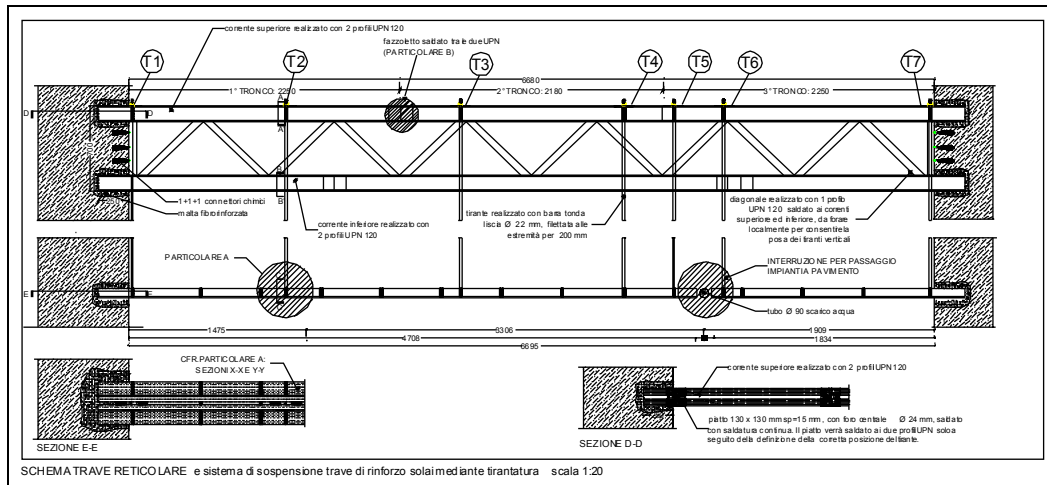


Figura 17. Dettagli degli elaborati di progetto per la realizzazione della trave reticolare.

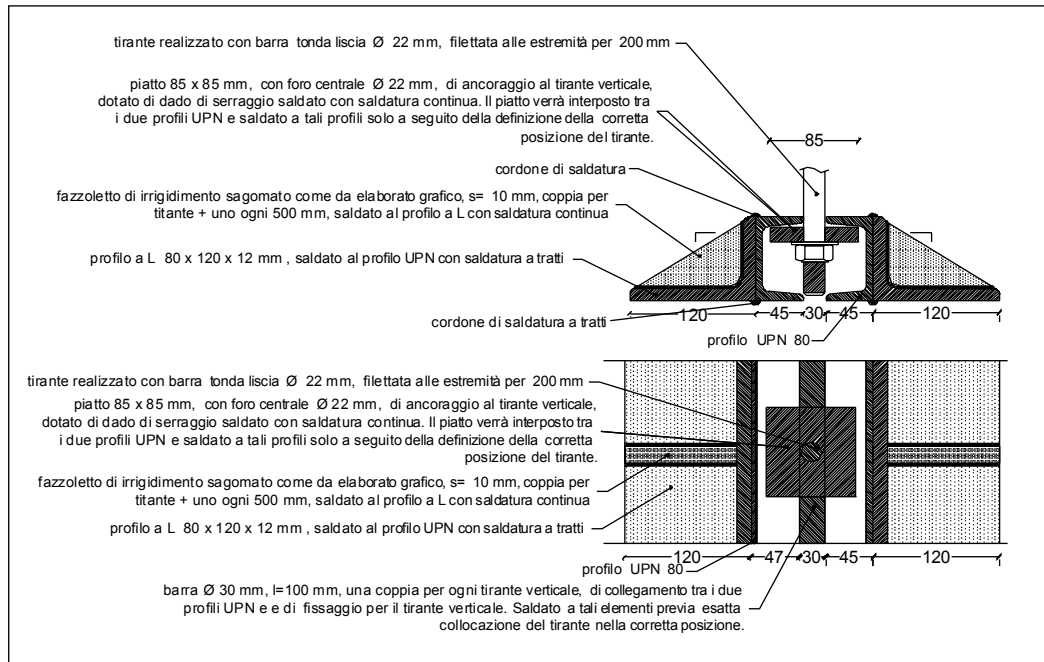


Figura 18. Dettagli del sistema di sospensione al nodo con il solaio.



Figura 19. a,b. 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-clc 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 contenute all'interno da una fodera lignea decorata.

Si è realizzato il collegamento con la soletta soprastante mediante connettori metallici sagomati a "manubrio" (Figura 20), saldati a passo regolare alle travi e annegate nella soletta in calcestruzzo.

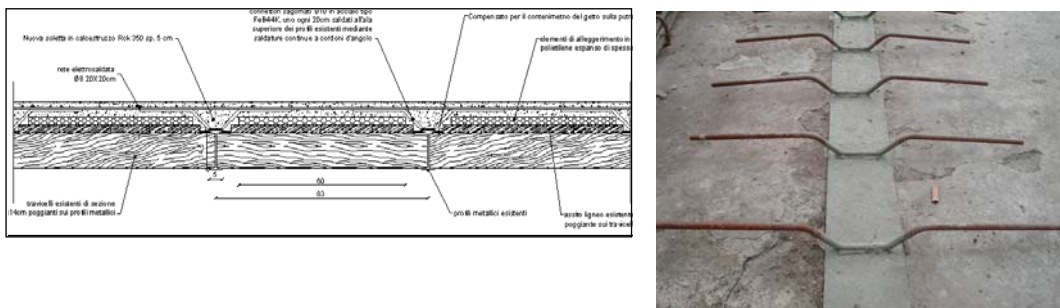


Figura 20. Dettagli di progetto e vista dei connettori metallici sagomati a "manubrio".

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 21. Vista intradossale di solaio in legno con trave primaria costituita da coppia di putrelle rivestite da fodera lignea decorata

In altri casi ancora le travi principali erano spezzate in mezzera 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 22).



Figura 22. Il rinforzo delle travi spezzate in mezzera mediante affianco di coppia di profilati ad L.

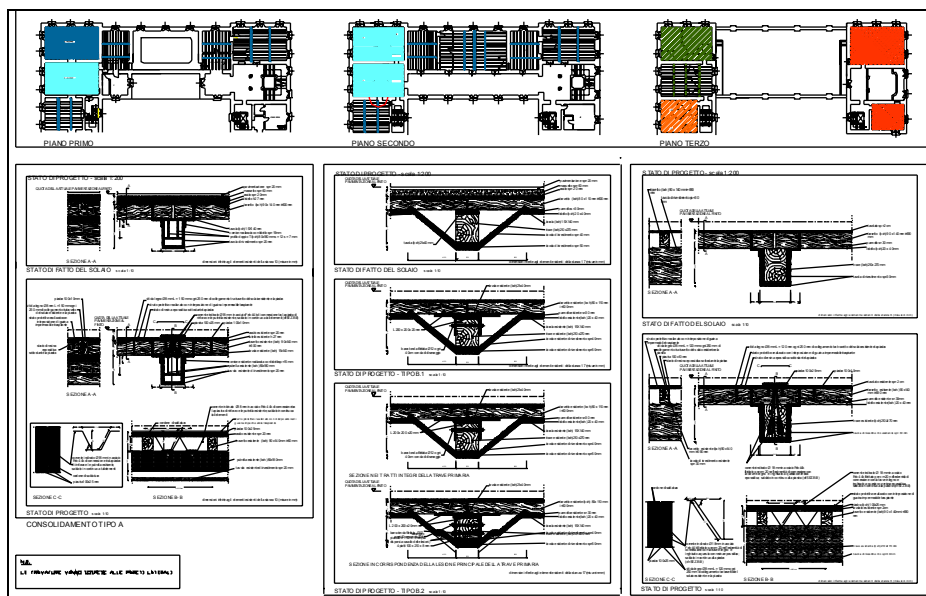


Figura 23. Particolari di progetto.

Consolidamento dei solai della Galleria Vittorio Emanuele II- 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 24).

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 25).



Figura 24. Immagini di cantiere.

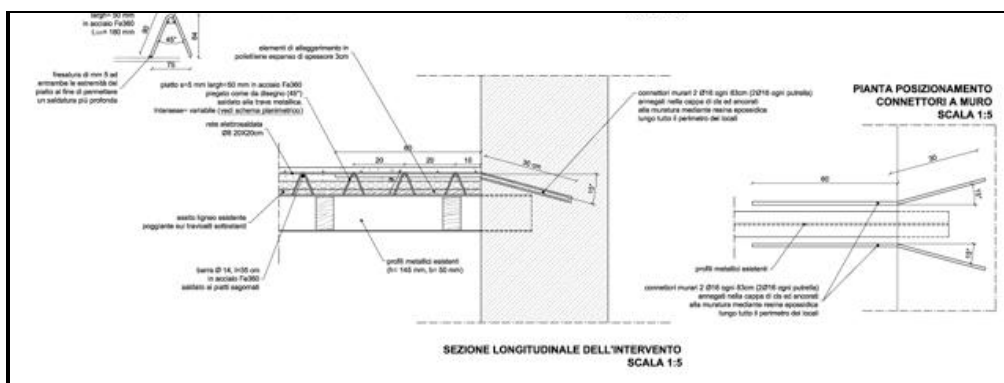


Figura 25. Dettagli di progetto

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 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 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 30).



Figura 30. a, b, c. Dettagli del graticcio costituito da nuove travi metalliche.

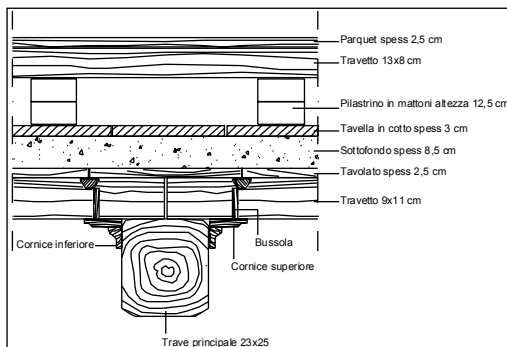
Tra le tecniche più inusuali di consolidamento adottate, è stata prevista la realizzazione di una tensostruttura d'acciaio all'intradosso dei solai¹, come sistema di sostegno di un solaio ligneo particolarmente sollecitato, adibito a aula

¹ L. Jurina, *Tecniche ed esperienze nel consolidamento "attivo" di edifici monumentali*, Atti del Seminario sul tema: "Evoluzione nella sperimentazione per le costruzioni" Dubrovnik, Croatia, 28 aprile-5 maggio 2001.

conferenze. La struttura è realizzata con cavi metallici e puntoni telescopici, capace di offrire appoggi intermedi alle travi lignee principali e garantire un notevole sgravo in termini di sollecitazioni taglianti e flettenti. Il sistema è 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 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 per degli innesti murari.

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 31) 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 31. 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 32).

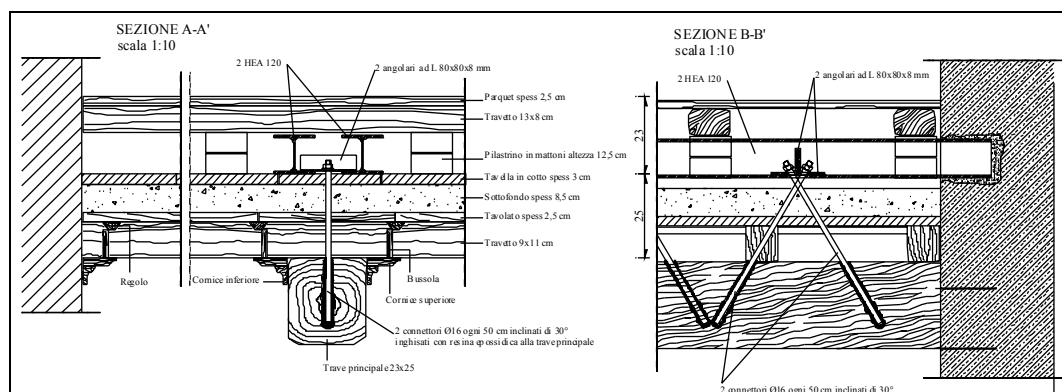


Figura 32. Progetto

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-cls, mentre per l'ordito principale si è progettata la messa in opera di un sistema a graticcio, con sei segmenti di trave di nuova realizzazione in legno lamellare.

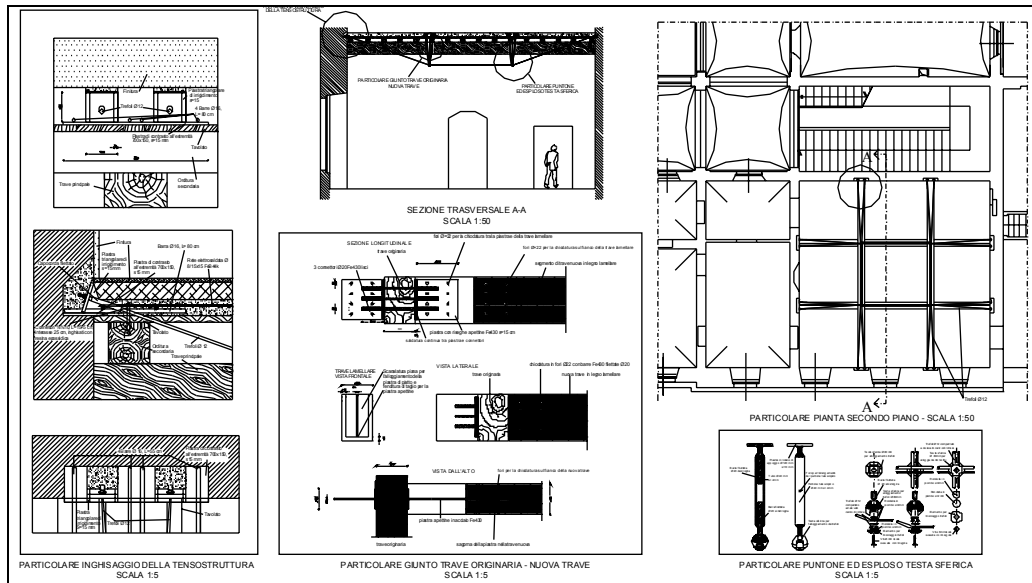


Figura 33. Dettagli di progetto.

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

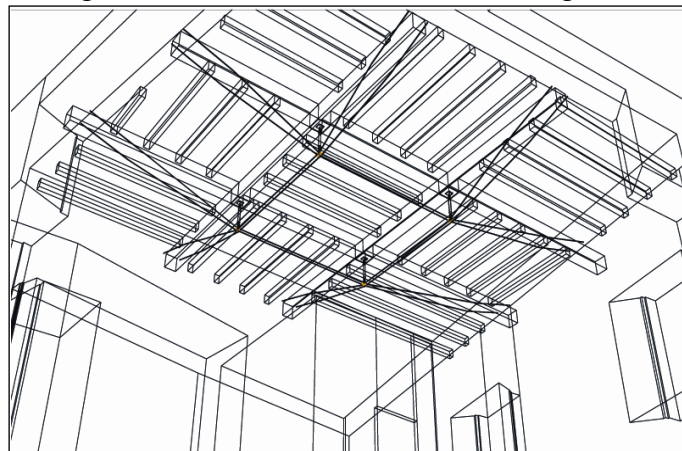


Figura 34. Schema assonometrico dell'intervento.

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.

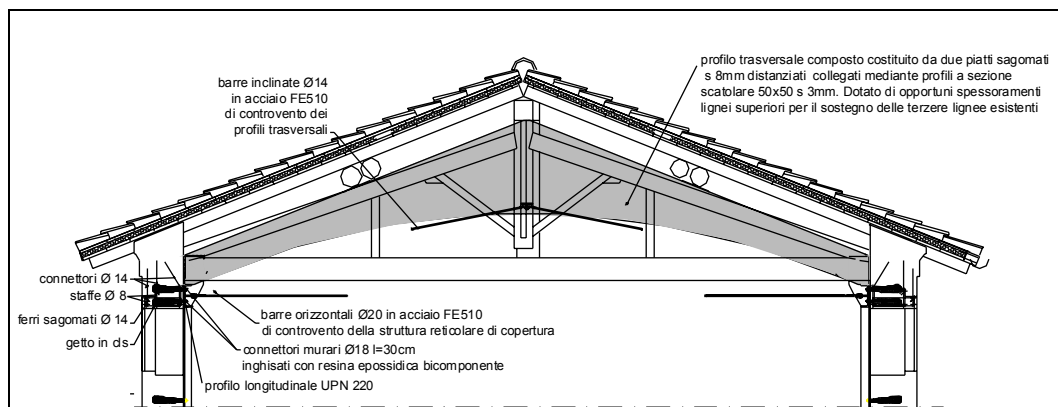


Figura 35. Gli interventi previsti per l'area destinata a teatro

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 36, Figura 34).

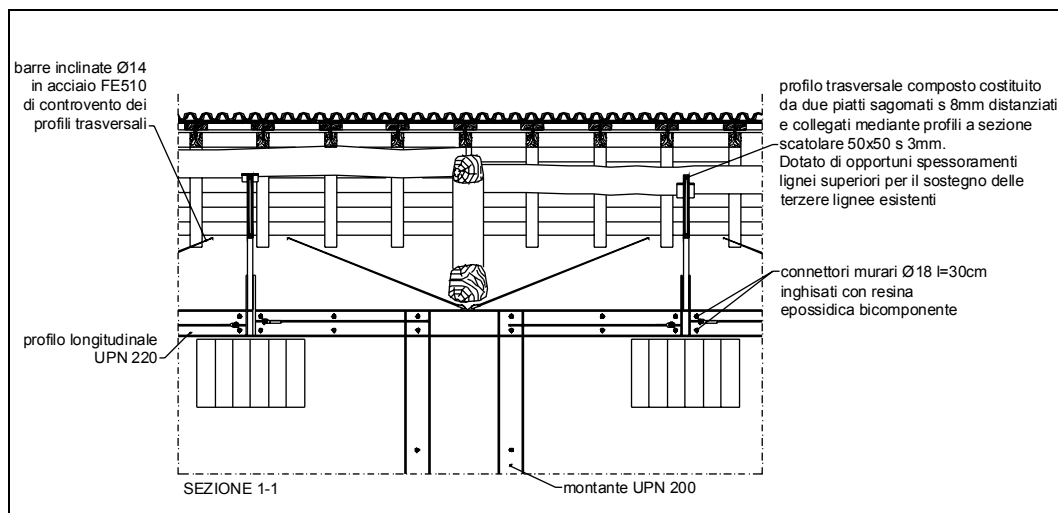


Figura 36. Gli interventi previsti per l'area destinata a teatro.

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 37).

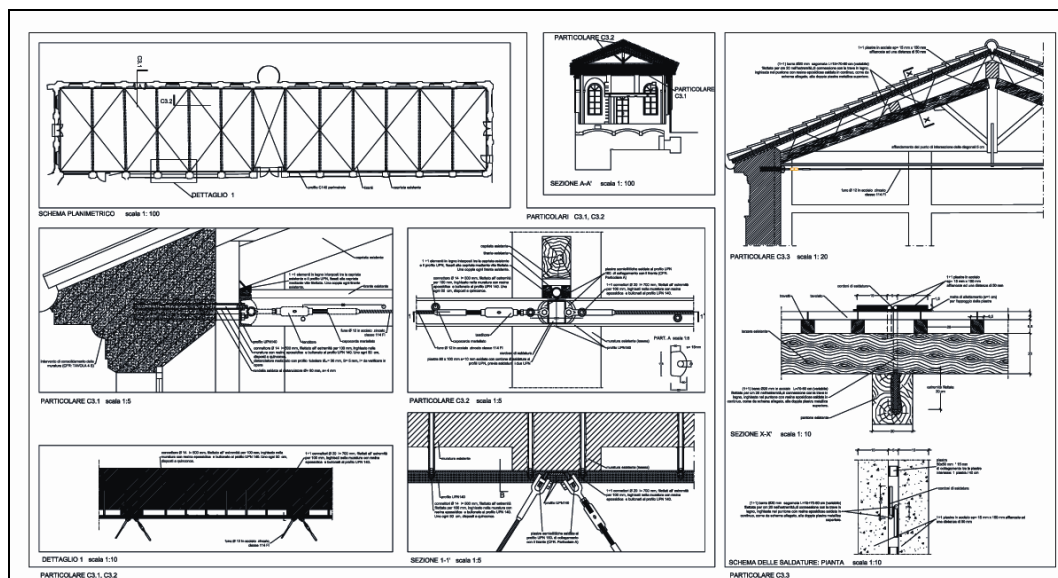


Figura 37. Gli interventi previsti per l'area destinata a biblioteca.

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 38) 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 38. Schema del modello sottoposto ad azioni normali al piano delle murature longitudinali

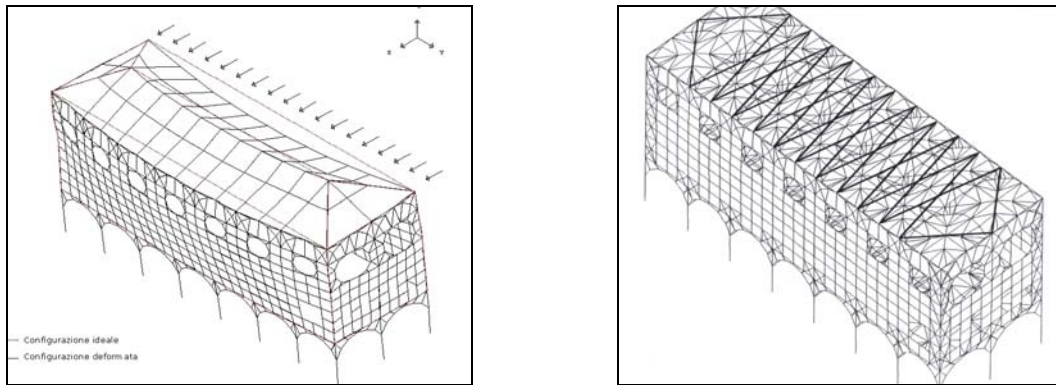
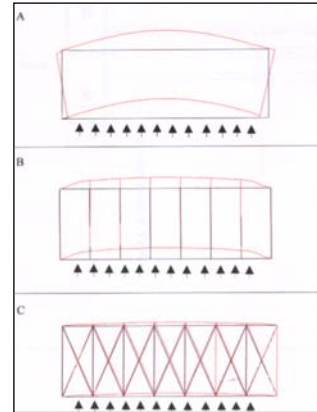


Figura 39. Deformata del modello ad elementi finiti sottoposto a spinte da vento o sisma; b) Il modello con la disposizione dei cavi di rinforzo e del cordolo metallico perimetrale.

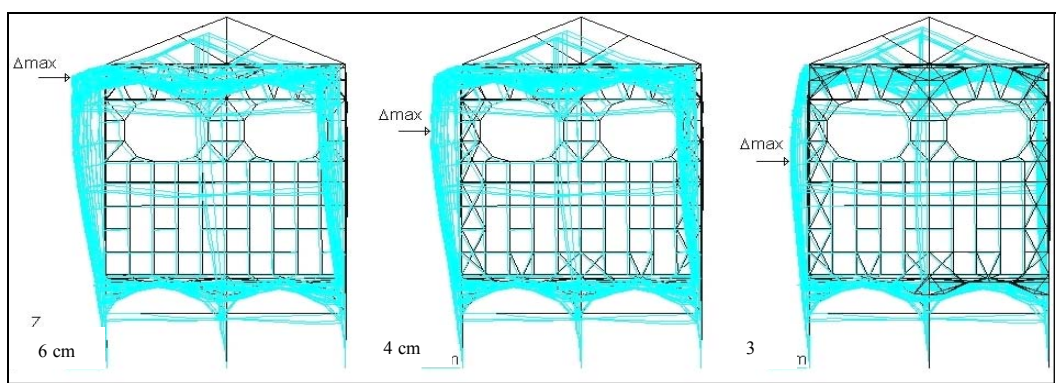


Figura 40. Il modello nelle varie configurazioni di rinforzo; a) situazione senza rinforzi, b) situazione dopo il consolidamento con cavi diagonali tra le capriate e cordolo metallico perimetrale; c) situazione ideale con diaframma sommitale rigido.

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, che desidero qui citare e 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
- Chiesa di San Carpoforo - Milano: Ing. A. Carezzi, ing. L. Jurina
- Villa S. Carlo Borromeo - Senago (Milano): ing. L. Jurina
- Galleria Vittorio Emanuele II - Milano: arch. Massimo Mazzoleni, ing. L. Jurina
- Edificio adiacente alla chiesa di San 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: archh. P. Colombo, C. Feiffer, ing. L. Jurina
- Ex caserma Zanardi Bonfiglio - Voghera: ing. L. Jurina
- Palazzo della Ragione - Milano: archh. M. Dezzi Bardeschi, A. Grimoldi, P. Farina, L. Bensi, ing. L. Jurina
- Ex Filanda Meroni - Soncino (Cremona): Archh. M. Bigozzi, M. Bigozzi, G. Celada, M. Celada, E. Soffientini, M&L, ing. L. Jurina

Bibliografia

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

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

L. Jurina, *Tecniche ed esperienze nel consolidamento "attivo" di edifici monumentali*, Atti del Seminario sul tema: "Evoluzione nella sperimentazione per le costruzioni" Dubrovnik, Croatia, 28 aprile-5 maggio 2001.

Jurina L., Jadiccio 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. 50,2003, 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.

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.