

## Soluzioni miste legno-acciaio

di Lorenzo Jurina  
 DIS, Politecnico di Milano  
[www.jurina.it](http://www.jurina.it)

*I casi di consolidamento di solai lignei qui di seguito illustrati intendono esemplificare alcuni criteri ed alcune scelte elaborate dall'autore con l'obiettivo di progettare soluzioni mirate alle peculiarità delle situazioni incontrate.*

*Pur consapevole che l'utilizzo del "legno su legno" rappresenti in linea di principio la soluzione migliore, ritengo che un uso prudente dell'acciaio possa fornire soluzioni idonee a risolvere gran parte dei problemi statici di portata dei solai, soprattutto quando si adottino sistemi a barre o a cavo posti in contatto e "forzati" ad agire in parallelo alla struttura esistente.*

*L'acciaio, e in particolare l'acciaio inox, consente interventi in linea con la pratica del restauro "conservativo", come parte di un processo più ampio che coinvolga il manufatto storico. Permette infatti soluzioni che si affiancano all'esistente, senza alcuna sostituzione e sottrazione, come aggiunta riconoscibile, caratterizzante e facilmente rimovibile e quindi reversibile. Il materiale acciaio favorisce inoltre anche la possibilità di uso compositivo delle parti aggiunte, permettendo ingombri minimi in ragione della notevole resistenza.*

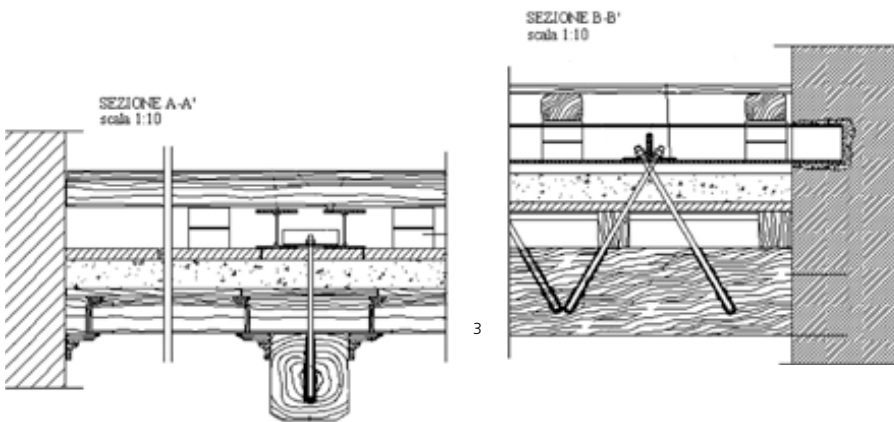
*Vale la pena di riflettere sulla continuità dell'uso dell'acciaio dal passato fino ai nostri giorni. Dal medioevo in poi l'uso di catene, cerchiature, grappe ed elementi metallici di connessione si è diffuso come soluzione privilegiata per assorbire gli sforzi di trazione che si presentavano negli elementi strutturali, o per migliorare collegamenti difettosi o per ripristinare quelli del tutto mancanti. Esempi noti si possono rintracciare in numerosi monumenti del passato dove la scelta di componenti metalliche, sia in lavori di consolidamento a posteriori, sia all'atto stesso della costruzione della fabbrica, ha frequentemente caratterizzato l'edilizia storica, laddove gli elementi metallici venivano spesso chiamati in causa a sopperire l'inefficienza strutturale di componenti lignei, a cui venivano affiancati per "collaborazione" o "sostituzione" funzionale. Ci è sembrato possibile e non contraddittorio continuare sulla stessa linea.*

**CASA EX-MASCIADRI AD ARCENE (Bergamo)**

Per i solai di casa ex-Masciadri gli interventi proposti hanno riguardato il solaio del sottotetto ed i solai del livello sottostante. Nel sottotetto si è intervenuti raddoppiando lo spessore del tavolato con l'aggiunta di nuove tavole avvitate a quelle esistenti, in direzione ortogonale a queste. L'intento era quello di dotare il solaio di una forte rigidezza nel piano, 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 sbozzati, di diametro 15 cm e di luce superiore a 4 metri, sono stati rinforzati con una modalità molto semplice, ossia con il raddoppio degli elementi dell'orditura. Per impedire, tuttavia, che l'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 2). 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 a L è stato utilizzato anche con la funzione di tirante parallelo alle pareti trasversali, tutte ampiamente fessurate e indebolite da canne fumarie. Alle due estremità si sono infatti saldate barre filettate che attraversano le pareti longitudinali e sono contrastate all'esterno con piastre metalliche. Per ottenere un corretto comportamento d'insieme è stato fondamentale effettuare in fase iniziale il tiro della catena, che risultava libera e quindi teso, e solo successivamente il collegamento bullonato alla parete, per consentirle di sopportare i carichi verticali comunicati dai travetti lignei.

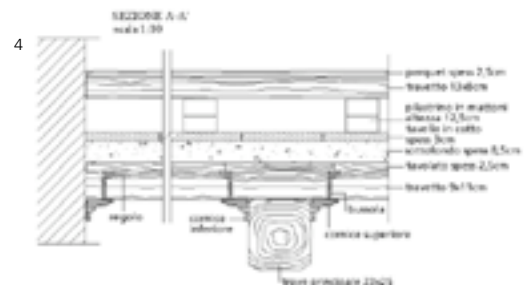


2. Travetti originari e travetti interposti appoggiati ad un profilo ad L collegato alla parete con barre filettate.



**CASA BOSSI (Novara)**

Alcuni solai in legno di Casa Bossi presentano una tipologia ad orditura semplice e sono nascosti da un controsoffitto incannucciato intonacato. E' stato possibile determinarne la configurazione geometrica e strutturale durante la fase preliminare di rilievi e diagnostica, mediante l'impiego di indagini non distruttive georadar. Un caso emblematico è quello di un solaio a piano ammezzato la cui complessa articolazione costruttiva (figura 4) 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. Anche in questo caso si è fatto ricorso ad una trave reticolare. 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, attraverso connettori diagonali (figura 3).



3. Consolidamento delle travi lignee mediante realizzazione di una struttura reticolare mista.  
4. Stato di fatto: sezione trasversale dei solai.

## EDIFICIO PRESSO LA CHIESA DI S. PIETRO ALL'OLMO (Cornaredo, MI)

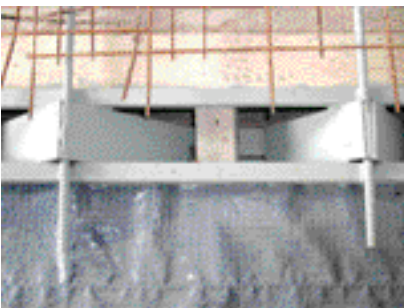
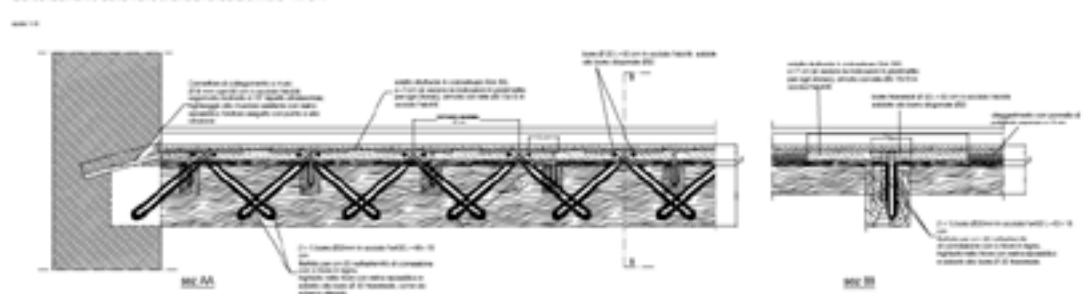
Per il rinforzo dell'orditura minore dei solai è stata adottata la ormai classica tecnica del solaio misto legno-calcestruzzo con connettori verticali. Il consolidamento mediante cappa armata estradossale in calcestruzzo e connettori in acciaio, come noto, porta ad una sezione resistente mista, composta inferiormente dagli elementi lignei esistenti e superiormente dalla nuova soletta in cls armato. Si raggiunge in questo modo un notevole incremento in termini di inerzia flessionale e si determina una sostanziale riduzione sia delle sollecitazioni agenti sugli elementi strutturali, sia delle deformazioni elastiche della struttura.

L'aggiunta della cappa in calcestruzzo è in grado di garantire inoltre una migliore ripartizione dei carichi in senso trasversale all'orientamento dei travetti con una conseguente redistribuzione delle azioni su più elementi strutturali.

Nel caso in esame, la prevista connessione della cappa alle murature perimetrali mediante barre metalliche inghisate orizzontalmente alle pareti ha assicurato il collegamento tra tutti gli elementi strutturali, garantendo un efficiente comportamento scatolare della fabbrica (figura 1). Per le travi principali si è prevista l'adozione di una soluzione "a trave reticolare mista" il cui corrente superiore compresso è rappresentato da nuovi profili metallici, ed il cui corrente inferiore teso è costituito dalla trave in legno, che verrà così impegnata prevalentemente a trazione. Si ottiene un elemento strutturale composto legno-acciaio, in cui le sollecitazioni di taglio vengono sopportate da connettori diagonali in acciaio, che sono saldati ai profili metallici superiori e sono inghisati alle travi inferiori con resine epossidiche (figura 5). Il metodo descritto consente di incrementare la capacità flessionale del puntone, modificandone notevolmente l'inerzia. In altri vani dello stesso edificio la presenza di un controsoffitto incannucciato non rimovibile, in quanto affrescato, e l'ingombro costituito dai travetti secondari, vincolati "in spessore" alle travi principali e non appoggiati superiormente a queste, ha obbligato a cercare soluzioni inconsuete.

Un esempio è rappresentato dall'adozione di due nuove travi metalliche reticolari realizzate a fianco della trave lignea principale e con questa collaboranti. La nuova trave reticolare è costituita da un corrente piatto inserito nel ridottissimo spazio sotto ai travetti, il quale viene collegato 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 trasversalmente sulla testa della V consente un migliore collegamento con i connettori infissi nella trave lignea e con la soletta in calcestruzzo di completamento (figura 6).

Consolidamento della travatura reticolare mista - TIPO II



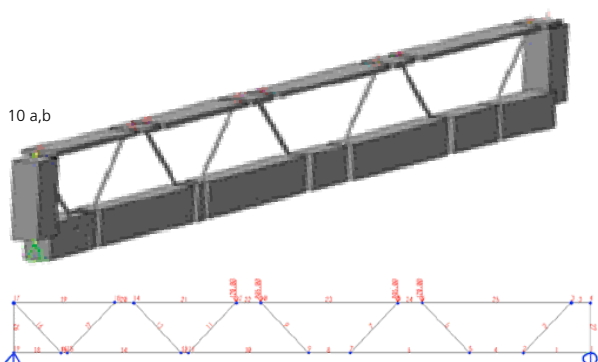
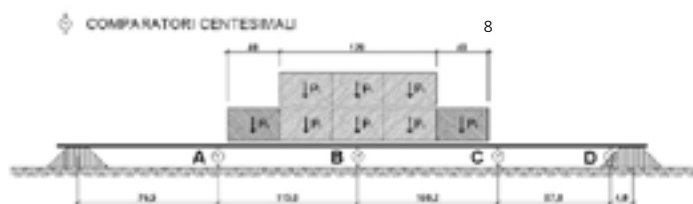
## VILLA DELLA PORTA BOZZOLO (Casalzuigno, VA)

Una tecnica analoga a quella illustrata al paragrafo precedente è stata adottata nel consolidamento locale dei puntoni di alcune capriate lignee. A verifica dell'efficacia del sistema è stata effettuata una prova di carico su un puntone tipo per la copertura del "Baco da seta" nella villa Della Porta Bozzolo a Casalzuigno (Varese). La trave, di diametro 16 cm circa, è stata caricata applicando una zavorra nella parte centrale, di entità tale da superare le sollecitazioni dello stato di esercizio (figure 7,9). Le prove hanno evidenziato un buon comportamento della trave a "sezione mista" legno-acciaio, che si è comportata in modo lineare, con residui anelatici dovuti più al cedimento delle fondazioni che a danneggiamenti meccanici.

Una modellazione numerica ad elementi finiti in campo lineare, con cui è stata simulata la struttura reticolare il cui corrente inferiore è l'elemento in legno (diametro 16 cm), il corrente superiore è la piastra in acciaio (sezione 300x15 mm) e le diagonali sono barre in acciaio di diametro 20 mm, ha fornito i risultati visibili nelle figure 8, 10 e 11. Dall'analisi numerica si è ottenuto che l'elemento consolidato aumenta notevolmente la propria rigidità e che si raggiungono deformazioni notevolmente inferiori rispetto a quelle della trave non rinforzata: nella configurazione con assenza di rinforzo, il modello subisce sotto carico un abbassamento massimo di 6.2 cm, mentre nella trave rinforzata l'abbassamento massimo è pari a 0.76 cm. Nella configurazione rinforzata anche l'azione flettente sulla trave in legno diminuisce drasticamente, passando dai 1416 daNm della trave originaria ai 530 daNm di quella rinforzata. Tale valore è fortemente influenzato dalle eccentricità fra i nodi "diagonale-corrente", parametro che può essere opportunamente ridotto riducendo le eccentricità.

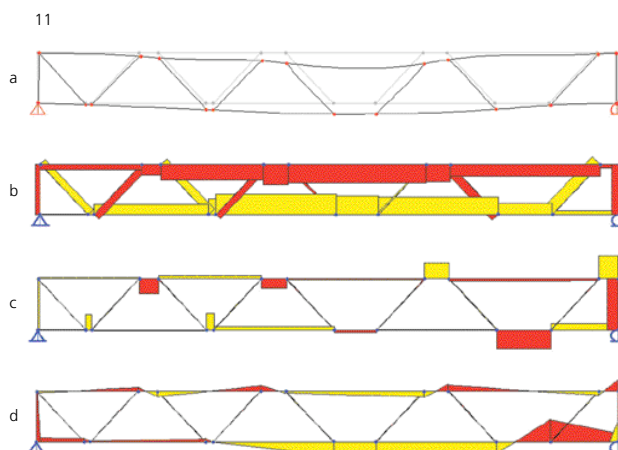
Confrontando i risultati della modellazione numerica con i valori sperimentali ottenuti dalle prove di carico, la freccia massima misurata risulta pari a 0,55 cm al comparatore centrale sotto carico massimo ( $P = 1840$  kg). La struttura reale risulta più rigida di quella simulata, probabilmente a causa del non trascurabile grado d'incastro degli elementi diagonali e della presenza dei travetti secondari.

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



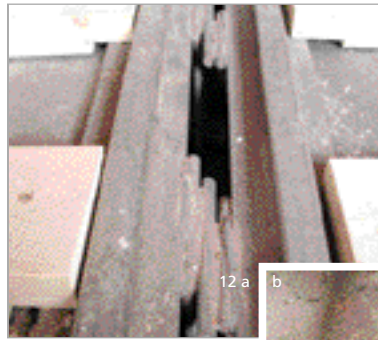
7. Prova di carico della trave reticolare mista. Si osservano le barre diagonali inghisate con resina epossidica. 8. Ubicazione dei comparatori centesimali e posizione. 9. Particolare del fissaggio tra le barre diagonali ed il corrente superiore costituito da un piatto metallico.

10 a,b. Modellazione FEM della struttura reticolare. Schema geometrico e carichi di progetto. 11. Modellazione FEM della struttura reticolare: a) deformata, b) azione assiale c) taglio, d) momento flettente.



**MONASTERO DI S. MICHELE LONATE POZZOLO (Varese)**

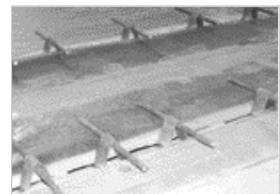
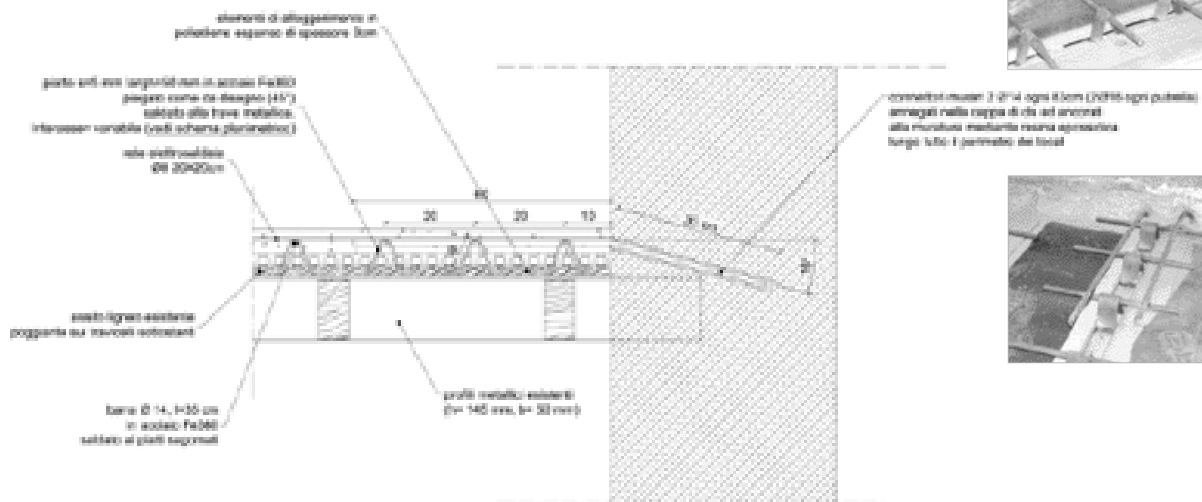
Nel monastero di S. Michele a Lonate Pozzolo si è modificata parzialmente la tecnica sopra illustrata. Il corrente superiore infatti è stato realizzato con due piatti affiancati, al posto di un solo piatto forato, lasciando un'intercapedine continua tra i due che ha grandemente facilitato la posa in opera e la saldatura delle barre diagonali. La scelta architettonica è stata di lasciare a vista i connettori della trave reticolare mista (figure 12, 13).



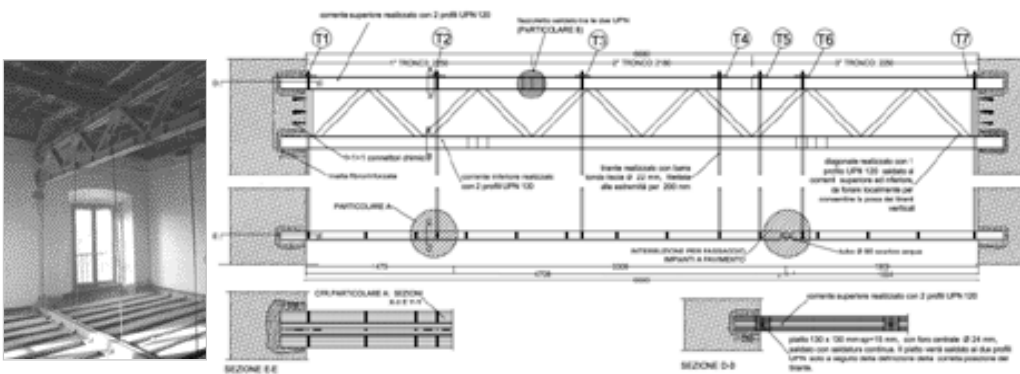
**APPARTAMENTO IN GALLERIA VITTORIO EMANUELE II (Milano)**

In questo edificio 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 (figure 15 a,b).

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 nella figura 14. Al fine di ridurre i carichi permanenti si è inserito in estradosso uno strato di alleggerimento in polistirene espanso dello spessore di 3 cm, con opportune nervature. 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 14).



**SEZIONE LONGITUDINALE DELL'INTERVENTO**



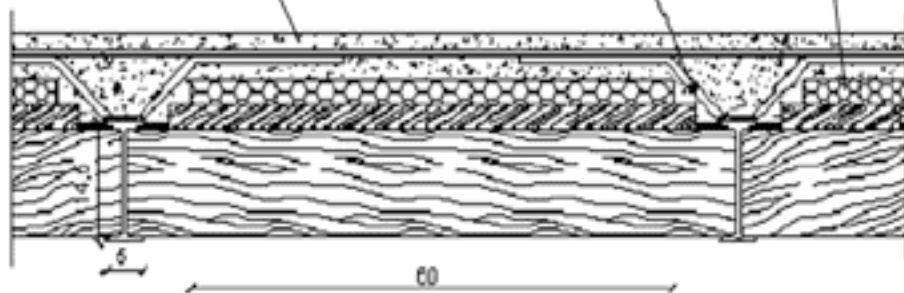
SEZIONE E-E



connettori sagomati Ø 10 in acciaio tipo FeB44K, uno ogni 20 cm saldati all'ala superiore dei profili esistenti mediante saldature continue a cordoncino d'angolo

elementi di alleggerimento in polietilene espanso di spessore

Nuova soletta in calcestruzzo Rck 350 sp.5cm





## PALAZZO PALLAVICINO (Cremona)

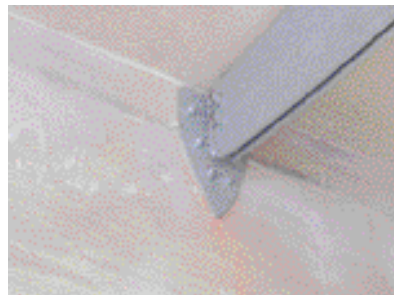
Gran parte delle strutture lignee costituenti i solai dell'edificio erano interessate da fenomeni più o meno accentuati di marcescenza o di degrado biotico che hanno portato ad una drastica riduzione delle sezioni resistenti degli stessi. A questa circostanza deve essere poi aggiunta la necessità di 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 (figure 19 a,b,c).

Tra le tecniche più inusuali di consolidamento adottate, è stata prevista la realizzazione di una tensostruttura d'acciaio inox all'intradosso dei solai, come sistema di sostegno di un solaio ligneo particolarmente sollecitato, adibito ad aula conferenze. La struttura è realizzata con cavi metallici e puntoni telescopici, capace di offrire appoggi intermedi alle travi lignee principali e garantire un notevole sgravio 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. La figura 20 illustra un semplice modello fisico predisposto per l'approvazione di questa tecnica da parte della Sovrintendenza competente.

19 a,b,c. Dettagli del graticcio costituito da nuove travi metalliche.  
20. Modello ligneo.

19

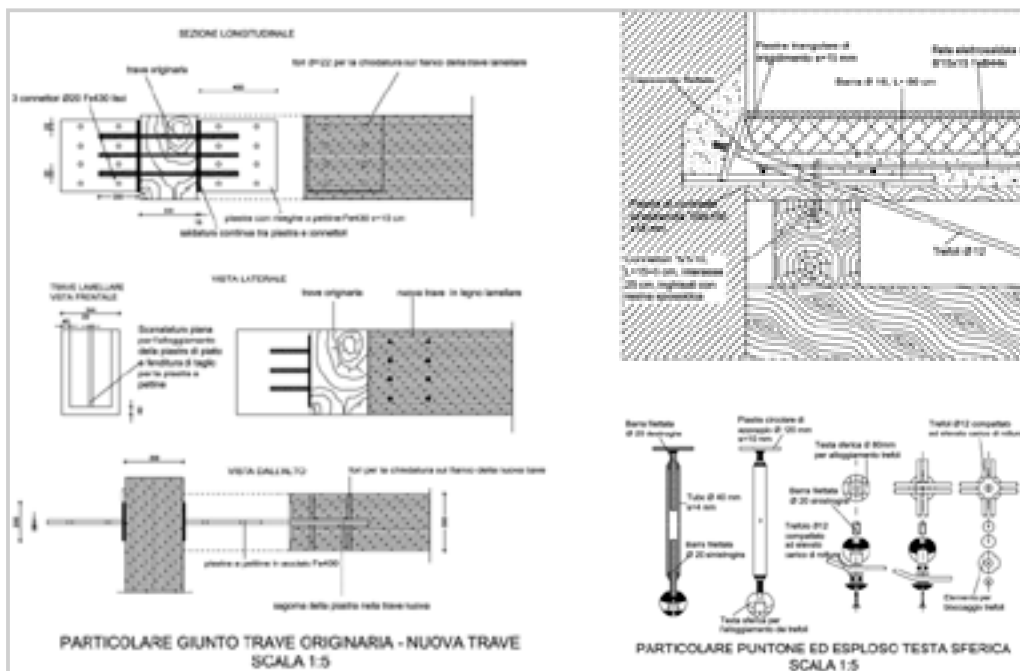


20



## BIBLIOGRAFIA

- [1] Bonamini G. et al. *Il manuale del legno strutturale: Ispezione e diagnosi in opera*, Mancosu, Roma, 2001
- [2] 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.
- [3] Jurina L., *La possibilità dell'approccio reversibile negli interventi di consolidamento strutturale*, XIX Conv. Scienza e Beni Culturali, Bressanone, 2003.
- [4] Jurina L., *Strutture in legno: Soluzioni leggere per il consolidamento in Recupero e Conservazione*, n. 50, 2003, pp. 65-68.
- [5] Tampone G., Mannucci M., Macchioni N., *Strutture in legno. Cultura, conservazione, restauro*, De Lettera Editore, Milano, 2002.



## CONCLUSIONI

Gli esempi descritti, pur sinteticamente, mostrano le possibilità e la grande flessibilità di uso degli elementi leggeri in acciaio 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.

Le soluzioni tra cui scegliere, rese possibili dall'apporto di materiali ed elementi strutturali leggeri, sono molte e fortunatamente diverse tra loro, e va osservato che anche l'uso di un materiale tradizionale come l'acciaio può inserirsi in modalità di progettazione innovative, soprattutto quelle in cui si preveda una forzatura "attiva" tra gli elementi nuovi e quelli preesistenti, in cui i primi si accollino fin dall'inizio una quota parte dei pesi propri. Va sottolineato tuttavia che la soluzione migliore, tra tutte le possibili, va ricercata tra quelle che si propongono di rispettare la singolarità e le peculiarità dell'opera su cui si deve intervenire. Questo deve spingere i progettisti a scelte intese a sfruttare in modo ottimale le risorse tecnologiche, gli strumenti di calcolo e di controllo ed i materiali disponibili, nello sforzo di consegnare al futuro, con il rispetto dovuto, le opere loro affidate.