

CONNETTORI METALLICI INCLINATI PER IL CONSOLIDAMENTO DI SOLAI

Lorenzo Jurina¹, Andrea Antonio Bassoli², Daniele Rampoldi³

¹ Politecnico di Milano - dip. ABC, lorenzo.jurina@polimi.it

² Ingegnere e Architetto libero professionista, Milano, andrea.bassoli@gmail.com

³ Ingegnere libero professionista, Milano, d_rampo@inwind.it

ABSTRACT

The consolidation of wooden floors and roofs is a frequent topic in the recovery of existing buildings. Adaptation to new functions usually means adaptation to new loads, which are often higher than the ones originally adopted. As a consequence, the residual capacity of the structures could be insufficient.

A widely adopted consolidation technique consists in the realization of mixed sections (wood-concrete, wood-steel, wood-wood), in which the type and distribution of the connectors defines the degree of collaboration between the two materials. A variety of patented systems, materials, geometry and anchoring techniques are available, even if the use of simple steel grouted bars, mainly arranged vertically, remains the most used.

In some recent consolidation projects a change in the use of traditional metal connectors was proposed, adopting metal bars inclined at 45° instead of vertical.

The new timber structure, such consolidated, behaves as a sort of reticular truss beam. The upper current (in the specific case a r.c. thin slab) is subject to compression, while the lower current (the wooden beam) is subjected to traction. The inclined connectors are alternately either in tension or in compression, as in a normal truss. The solution is particularly useful when one has to bypass empty spaces between the upper floor and the main beam, such as the space occupied by the secondary beams.

In the present paper the results of some experiments, based on the comparison between FE models and real load tests, are shown. The proposed cases are Villa della Porta Bozzolo in Casalzuigno (VA) and Scotti's Palace in Laino d'Intelvi (CO), where the consolidation of inclined timber roofs was performed, and the Tower of Cassina de' Pecchi (MI) and Brivio-Crosti-Colombo's Palace in Nova Milanese (MI) where the consolidation of horizontal timber slabs was needed.

All these applications have demonstrated the effectiveness of the inclined bars system and have allowed to reach the standard requirements in terms of resistance and sag, obtaining interesting formal results, at the same time.

Parole chiave/Key-words:

Consolidation, Timber slabs, Truss beam, Inclined connectors

Tecniche tradizionali di consolidamento

Il consolidamento di solai e tetti in legno rappresenta un tema ricorrente nel recupero degli edifici esistenti. L'adeguamento normativo e il cambio delle destinazioni d'uso comportano inevitabilmente l'adeguamento ai nuovi carichi di esercizio e le sollecitazioni che ne derivano spesso richiedono una risposta strutturale superiore rispetto alle capacità resistenti degli elementi esistenti.

Una tecnologia ampiamente adottata per il consolidamento delle strutture lignee di solai o coperture è rappresentata dall'aumento della sezione resistente, così da sfruttare le risorse residue degli elementi esistenti, integrandoli con nuove porzioni aggiuntive e collaboranti, in grado di fornire la quota parte di resistenza mancante. La nuova sezione ottenuta risulta così in grado di resistere alle sollecitazioni indotte e di governare le relative deformazioni.

La realizzazione di queste soluzioni varia, per materiale e scelta progettuale, a seconda delle condizioni al contorno dell'oggetto specifico, ricercando il giusto compromesso tra le esigenze strutturali, architettoniche e conservative.

Ad esempio vi sono condizioni vincolanti in cui l'estradosso del solaio, o il suo intradosso, è di particolare pregio, tanto da non poter essere modificato: si pensi ai pavimenti in seminato o ai controsoffitti con decorazioni pittoriche.

Il materiale utilizzato per l'incremento della sezione può essere di varia natura.

Si può ricorrere all'uso del legno, dell'acciaio e, con grande frequenza, al calcestruzzo, soprattutto per gli interventi estradossali.

Il presente contributo vuole approfondire quest'ultima soluzione, nel tentativo di ottimizzarne la risposta e di ridurre al minimo l'impatto, mediante un utilizzo accorto degli elementi metallici di consolidamento.

Tutte le tecnologie usualmente adottate devono essere progettate in modo da garantire la massima collaborazione tra la sezione esistente e la nuova sezione aggiunta, compito affidato alla rigidità del collegamento che deve contrastare lo scorrimento tra le due componenti della sezione mista.

Le verifiche condotte in passato per il dimensionamento degli interventi con sezione resistente mista si basavano sull'ipotesi di sezioni piane e di materiali elastici, considerando il modulo di scorrimento tra la parte esistente e la parte aggiunta funzione della rigidità della connessione. Ai connettori veniva affidata la resistenza a taglio necessaria ad impedire lo scorrimento delle parti. Negli anni più recenti, e soprattutto in ottemperanza alle Norme Tecniche per le Costruzioni, NTC2008, le verifiche vengono condotte tenendo in considerazione ipotesi più realistiche.

In particolare vengono introdotti i parametri necessari a verificare gli effetti del rifollamento sul legno e della deformabilità del connettore, soprattutto quando esso attraversi uno spazio vuoto. Un'ulteriore verifica, fondamentale per la conservazione materica dell'esistente, riguarda il rapporto tra sezione del connettore e il passo dello stesso, in modo da evitare il rischio di fessurazione o

addirittura di “spacco” della trave lignea, compromettendone la durabilità, requisito fondamentale per una adeguata conservazione.

La scelta dei connettori è spesso demandata a produttori specializzati, che offrono numerosi tipi di giunti prefabbricati, diversi per materiale, geometria e tecnica di ancoraggio. Per quanto riguarda le sezioni miste legno-clc, ai vari connettori commerciali (a piolo, a piastrina, a tazza, a profilo continuo, ecc.) si affiancano i connettori realizzati con semplici barre d’armatura sagomate, collegate al legno nella parte bassa con perforo e resina, e annegate superiormente nella cappa estradossale [1].

Nella normale prassi questi connettori sono disposti lungo l’asse delle travi, con passo costante o con variazione di passo a 1/3 o 1/4 della luce, inghisati verticalmente nel legno e piegati nella cappa superiore per garantire l’adeguata aderenza al calcestruzzo. In questi interventi, che ormai possiamo definire classici, e che collegano la cappa in clc alla trave principale oltrepassando il vuoto delle travi secondarie, si opta frequentemente per nascondere la presenza dei connettori verticali, che risulterebbero a vista. Nella pratica del cantiere questo si traduce con ulteriori getti in c.a. immediatamente all’estradosso delle travi lignee, mascherati con fodere in legno poste tra travetto e travetto dell’orditura secondaria. L’intervento altera sensibilmente l’aspetto della struttura, riempiendo un volume che originariamente era vuoto [fig.1]. Si ottiene certamente un vantaggio statico in quanto i connettori, annegati nel getto integrativo, non si deformano a taglio, ma si verifica allo stesso tempo una importante modifica formale e una perdita di materia originaria, dovuta alla consuetudine di tagliare l’assito al di sopra delle travi principali assieme ai travetti che vengono accorciati per far posto al nuovo getto.



*fig. 1 Cascina Ronchi a
Sulbiate (MB).
Travi rinforzate con
metodo tradizionale e
occlusione dei vuoti tra i
travetti*

In alcuni recenti cantieri di consolidamento, curati dagli autori, è stata proposta una variazione nella geometria di posa dei connettori, mettendo in opera barre metalliche inclinate a 45° anziché verticali [2].

Questo accorgimento permette, dal punto di vista del calcolo, di passare dalla verifica secondo la teoria delle sezioni piane alla verifica della trave come elemento reticolare, in cui la cappa collaborante si comporta come corrente

superiore compresso, la trave esistente si funge da corrente inferiore teso e le barre metalliche inclinate rappresentano i diagonali di collegamento tra i correnti.

A differenza del comportamento a trave reticolare ideale con bielle incernierate ai nodi, dove le azioni sono esclusivamente assiali, nelle verifiche condotte per questa tipologia di intervento i correnti superiori ed inferiori vanno considerati continui e quindi soggetti anche ad azioni flettenti. Nella soluzione proposta i connettori inclinati sono in grado di trasmettere lo scorrimento a taglio tra estradosso ed intradosso senza la necessità di riempire l'intercapedine a fianco dei travetti.

Il sostanziale miglioramento che si ottiene è la conservazione dello stato di fatto, senza alterazioni sostanziali dell'intercapedine. Questo spazio rimane inviolato ad eccezione dei connettori veri e propri, lasciati a vista.

Analisi numeriche per la verifica di travi principali

Si riportano i risultati delle verifiche condotte su un caso specifico recentemente analizzato, riguardante il consolidamento strutturale del seicentesco Torrione di Cassina de' Pecchi (MI), ultimato nel 2014. L'intervento ha previsto il consolidamento di due solai lignei a doppia orditura in cui le travi principali sono di sezione 30x30 cm (ridotta per i fenomeni di degrado riscontrati), in legno di classe S2, Abete del Nord, con luce netta pari a 6,70 metri e luce di calcolo pari a 7,00 metri.

La verifica di progetto sotto carichi applicati *propri* (trave, pari a 0,72 kN/m, travetti e assito, pari a 0,33 kN/m²), *permanenti* (stratigrafia di pavimentazione pari a 1,50 kN/m²) e *accidentali* (Cat. B2 Uffici aperti al pubblico 3,00 kN/m²) conduce ad una sollecitazione flessionale nella trave pari a $f_1 = 20,81 \text{ N/mm}^2$, superiore a quella consentita allo stato di fatto, valutata in $f_{m,d} = 12,27 \text{ N/mm}^2$.

Anche la verifica deformativa non risulta soddisfatta: calcolando infatti la freccia in esercizio per la totalità dei carichi si ottiene un abbassamento di 45,79 mm, molto al di sopra del limite da norma, $l/400$, pari a 17,50 mm.

Si consideri ora un intervento classico di aumento della sezione resistente mediante la realizzazione di una trave mista legno-cls, con connettori verticali in cui la sezione in calcestruzzo è a "T", ovvero dove si sfrutta la porzione di cappa estradosale di spessore pari a 50 mm ed anche l'intercapedine di 100 mm tra l'assito e la trave, coincidente con lo spessore dell'orditura secondaria.

Si conduce la verifica di calcolo utilizzando l'ipotesi di sezioni piane e considerando connettori verticali realizzati con barre d'armatura di diametro 10 mm, distribuiti con passo di 150 mm per i terzi vicini agli appoggi e con passo di 300 mm per il terzo centrale.

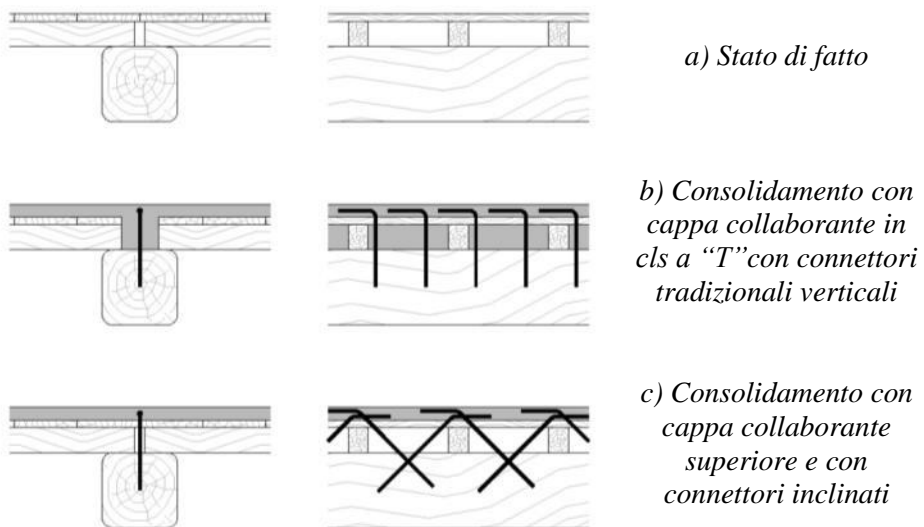
Questa soluzione prevede maggiori carichi propri, rispetto allo stato di fatto, dovuti all'utilizzo del cls, pari a 1,74 kN/m², e conseguentemente un maggiore momento sollecitante. Le sollecitazioni di compressione allo SLU destinate alla porzione di calcestruzzo resistente sono pari a $\sigma_{c,tot} = 6,21 \text{ N/mm}^2$ da confrontare con le resistenze di progetto pari a $f_{c,d,cls} = 14,11 \text{ N/mm}^2$, mentre le sollecitazioni di tenso-

flessione applicate alla trave in legno sono pari a $\sigma_{\text{tot}} = 9,06 \text{ N/mm}^2$ da confrontare con le caratteristiche di progetto $f_{m,d,lg} = 12,27 \text{ N/mm}^2$ e $f_{t,d,lg} = 7,47 \text{ N/mm}^2$.

In conclusione si ha uno sfruttamento di sezione pari 89%.

Le verifiche di deformazione istantanea restituiscono una freccia di 12,61 mm, pari a 1/555, e quindi inferiore al limite di 1/400.

Le verifiche condotte risultano pertanto nei limiti imposti dalla normativa vigente, sia in termini di resistenza, sia in termini deformativi. Dal punto di vista formale tuttavia la soluzione prevede la completa occlusione dell'intercapedine d'aria tra i travetti, assieme al taglio dell'assito in corrispondenza delle travi e alla rettifica delle teste dei travetti.



figg. 2a; 2b; 2c - Sezioni trasversali e longitudinali del solaio: a) allo stato di fatto, b) consolidamento della trave principale con connettori tradizionali c) consolidamento della trave principale con connettori inclinati

L'approccio alternativo proposto in questa memoria sostituisce i connettori verticali con connettori inclinati e conserva il vuoto esistente tra i travetti.

Le verifiche sono state condotte con una modellazione ad elementi finiti, nella quale i correnti superiore ed inferiore della trave reticolare sono continui.

L'intervento eseguito nel 2014 sul Torrione di Cassina de' Pecchi ha adottato la soluzione alternativa qui descritta, in cui i connettori sono disposti a 45° e collegano la cappa estradossale di spessore pari a 50 mm alla sottostante trave lignea esistente, attraversando il vuoto tra i travetti secondari.

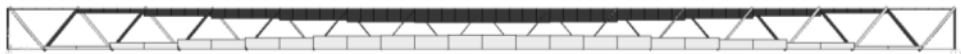
Questa soluzione prevede un carico proprio inferiore rispetto al precedente approccio, ovvero $1,25 \text{ kN/m}^2$, in quanto non è presente il calcestruzzo compreso tra l'assito e la trave. Le sollecitazioni allo SLU di compressione destinate alla

porzione di calcestruzzo resistente sono pari a $\sigma_{c,tot} = 7,73 \text{ N/mm}^2$ da confrontare con le resistenze di progetto pari a $f_{c,d,cls} = 14,11 \text{ N/mm}^2$, mentre le sollecitazioni di tenso-flessione riconducibili alla trave in legno sono pari a $\sigma_{tot} = 7,48 \text{ N/mm}^2$ da rapportare con le caratteristiche di progetto $f_{m,d,lg} = 12,27 \text{ N/mm}^2$ e $f_{t,d,lg} = 7,47 \text{ N/mm}^2$.

Lo sfruttamento della sezione con connettori inclinati risulta pertanto pari a 79%, che è migliore del valore 89%, determinato per la soluzione a connettori verticali. Anche le verifiche di deformazione istantanea restituiscono una freccia di 9,56 mm, pari a 1/1576, inferiore al limite di 1/400.

I valori ottenuti risultano nei limiti imposti dalla normativa vigente, sia in termini di resistenza, sia in termini deformativi, con un maggior margine di sicurezza. Dal punto di vista di rispetto formale delle preesistenze, questa seconda soluzione ha un ingombro ridotto, oltre a conservare l'assito e i travetti nelle condizioni originarie.

figg. 3a; 3b; 3c - Modellazione ad elementi finiti della trave consolidata con connettori inclinati



*Azione assiale massima trazione $N_{max} = 313 \text{ kN}$
Azione assiale massima compressione $N_{max} = 309 \text{ kN}$*



Momento massimo $M_{max} = 18 \text{ kNm}$

| Spostamenti Nodali | | | |
|--------------------|---------|----------|----------|
| Obiettivo | 125 | Elemento | 125 |
| Trans | 0,52567 | 2 | -0,55885 |
| Rotz | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |



Spostamento massimo $f_{tot} = 9,56 \text{ mm}$

Verifiche sperimentali

Al fine di collaudare la struttura e verificare la buona riuscita dell'intervento, due delle 10 travi consolidate del Torrione di Cassina de' Pecchi sono state sottoposte ad una prova di carico strumentata, in situ, impiegando martinetti idraulici, a tiro, applicati su catene di contrasto vincolate alla fondazione. Il carico risultante assegnato è stato di 53 kN per ognuna delle travi sollecitate, corrispondente al carico d'esercizio incrementato del 20%. La risposta deformativa della struttura è stata misurata mediante 7 trasduttori e la freccia massima è risultata di 5,89 mm.

Confrontando la misura sperimentale con la freccia di calcolo, pari a 7,62 mm nelle stesse condizioni di carico, emerge che il solaio in condizioni reali presenta maggiori risorse e che la sua rigidità è più elevata rispetto alle ipotesi progettuali. Durante la prova sono stati strumentati anche alcuni connettori inclinati mediante strain-gauges [fig. 4c]. I risultati sperimentali sono coerenti con quelli numerici.



figg. 4a; 4b; 4c - Torrione di Cassina de' Pecchi

a) travi principali consolidate con connettori inclinati

b) e c) strumenti di misura degli spostamenti durante la prova di carico

La maggior rigidità riscontrata si può ricondurre in parte al miglioramento dei vincoli di appoggio (in quanto l'armatura della cappa in cls è stata collegata alle pareti d'ambito) e alla mutua collaborazione tra travi e travetti attraverso la comune cappa collaborante.

I risultati sperimentali evidenziano come la soluzione con connettori diagonali fornisca notevoli benefici: meno calcestruzzo, meno fori nel legno e la conservazione dell'intercapedine d'aria tra travetto e travetto.

Dal punto di vista del calcolo della resistenza ultima, si è ottenuta una riduzione dello sfruttamento della sezione esistente, che passa dall'89% al 79%, circostanza

che si traduce in un incremento di risorse residue e quindi in una maggior capacità portante, dove, tuttavia, una ovvia attenzione va attribuita alla verifica a “carico di punta” dei connettori compressi e allo sfilamento dal legno dei connettori tesi.

Analisi numeriche per la verifica di travi secondarie

La soluzione con connettori inclinati è dunque particolarmente indicata quanto si debbano realizzare sezioni miste in cui si voglia conservare un'intercapedine vuota, ma la stessa tecnica risulta vantaggiosa anche quando le due sezioni da rendere collaboranti siano a contatto, ossia senza intercapedine d'aria, come nel caso dei travetti secondari.

Esempi interessanti di connessioni a secco legno-legno, con l'uso di viti da legno inclinate, si possono trovare in letteratura [3].

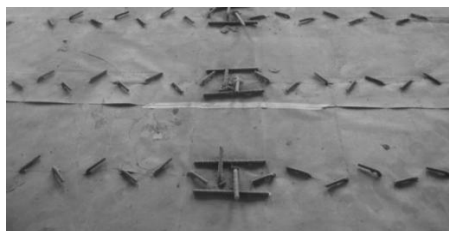
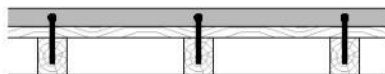
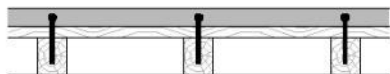


fig. 5 - Maglia di connettori per il consolidamento di travetti e delle travi principali prima del getto della cappa collaborante estradossale

La soluzione con connettori inclinati, infatti, è adatta a ridurre diametro ed interasse delle perforazioni necessarie alla posa dei connettori. Diminuendo i fori diminuisce infatti l'invasività dell'intervento, che, malgrado la sua indiscussa efficacia, rappresenta comunque una “ferita” inferta ai travetti.

Dal punto di vista formale non esistono apprezzabili differenze tra connettori verticali ed inclinati, che, nel rinforzo dei travetti, rimangono nascosti.



a) Consolidamento con cappa collaborante e connettori tradizionali

b) Consolidamento con cappa collaborante e connettori inclinati

figg. 6a; 6b - Sezioni trasversali e longitudinali del solaio,

Si valuta l'efficacia dei connettori inclinati prendendo ancora in considerazione i travetti di Cassina de' Pecchi, di sezione 7x 10 cm, con luce pari a 2,00 m ed interasse di 60 cm. La verifica condotta allo stato di fatto, sotto i carichi da norma, conduce a valori non accettabili.

Procedendo alla verifica della sezione consolidata mediante cappa collaborante e connettori verticali, si ottiene che le resistenze e le deformazioni risultano

verificate utilizzando connettori di diametro 10 mm, distribuiti con passo 100 mm per i terzi vicini agli appoggi e con passo 200 mm per il terzo centrale.

I connettori verticali utilizzati sono **18 per ogni travetto** e la freccia è di 1,30 mm. Procedendo alla verifica della medesima sezione con connettori inclinati, si ottiene che l'impiego di soli **8 connettori per travetto**, sempre di diametro 10 mm, permette di soddisfare le esigenze di normativa, anche se, da calcolo, si ottiene una freccia un po' superiore, pari a 1,57 mm, che comunque è verificata.

Il numero dei connettori, e quindi il numero di fori da praticare sui travetti esistenti, si riduce meno della metà, con vantaggi economici e di minore impatto materico.

La tecnica dei connettori inclinati è stata applicata in vari restauri, tra cui il Torrione di Cassina de' Pecchi (MI), Villa Brivio-Crosti-Colombo a Nova Milanese (MI), Palazzo Scotti a Laino d'Intelvi (CO), Villa della Porta Bozzolo a Casalzuigno (VA), Monastero di S.Michele a Lonate Pozzolo (VA).

Le barre di collegamento, in parecchi dei casi citati, sono state lasciate a vista, così da denunciare l'intervento e da conservare un'immagine finale simile all'originaria. E' doveroso ricordare che, a conoscenza degli autori, la prima applicazione dei connettori inclinati a vista è stata condotta, nel 2001, sulle strutture di Villa della Porta Bozzolo a Casalzuigno (VA), in un progetto di consolidamento delle coperture, la cui parte architettonica era stata affidata dal FAI all'arch. Paola Bassani. In quel caso si è utilizzata, come sezione integrativa a compressione, un piatto in acciaio posto all'estradosso, invece che una cappa in cls.



*figg. 7a; 7b; 7c - Villa della Porta Bozzolo a Casalzuigno
a) e b) consolidamento delle travi di copertura
c) prova di carico su un elemento ricostruito a piè d'opera*



*figg. 8a; 8b; 8c - Villa della Porta Bozzolo a Casalzuigno
fasi dell'intervento all'estradosso*



*figg. 9a; 9b - Palazzo Scotti a Laino
Consolidamento delle travi di copertura*

L'utilizzo di piatti in acciaio, a cui erano saldati i connettori inclinati, ha permesso di limitare i carichi applicati, rispetto alla soletta in calcestruzzo, ed ha consentito una messa in opera più veloce e una immediata entrata in servizio del sistema.

In definitiva, l'efficacia del sistema illustrato permette di raggiungere le prescrizioni dettate dalle normative, assieme ad una maggior salvaguardia dell'esistente, intervenendo in modo meno invasivo, riducendo l'utilizzo di calcestruzzo, limitando le perforazioni sugli elementi lignei esistenti e garantendo un aspetto formale più rispettoso dell'originario.

Riferimenti bibliografici:

- [1] M. Piazza, R. Tomasi, R. Modena; *Strutture in legno*; Hoepli, Milano 2005.
- [2] L. Jurina; *Manuale del Legno Strutturale: cap. 9, Uso dell'acciaio nel consolidamento delle capriate e dei solai in legno*; Mancosu Ed., Roma 2004.
- [3] M. Piazza, M. Ballerini; *Solai composti in legno e calcestruzzo*; Atti del Convegno "Tecnologie avanzate nell'impiego del legno", CNR, Bolzano 1999.