

# UNA POSSIBILE MODALITA' DI CONSOLIDAMENTO PER TRAVI IN LEGNO

Stefano Barbò<sup>1</sup>, Claudio Chesi<sup>2</sup>, Lorenzo Jurina<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Scuola Spec. in Beni Architettonici e del Paesaggio, Politecnico di Milano

<sup>2</sup> Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Milano

**ABSTRACT:** Roof and slab structures in the Italian tradition make commonly use of timber elements; the conservation of this typology also in common residential buildings is nowadays perceived as a value, and strengthening of existing structures is preferred, when possible, to substitution with new elements and materials, not belonging to the tradition. In this study the use of steel elements as reinforcement of timber beams is addressed; through a detailed analysis of the literature, it is shown that this technique belongs to tradition, and may provide an effective way to increasing both strength and resistance. Through the experimental testing of a timber beam specimen coming from an old building, a reinforcing technique has been analyzed and the effect of the design parameters is discussed.

**KEY-WORDS:** timber, beam, steel, cable, slab, reinforcing.

## **Introduzione.**

L'impiego del legno per la realizzazione delle strutture resistenti di solai e coperture costituisce un aspetto caratterizzante della tradizione costruttiva italiana. La conservazione di questo carattere anche in opere di edilizia corrente è oggi riconosciuto come un valore da perseguire, anche quando le

mutate condizioni d'uso o il degrado dei materiali suggerirebbero la completa sostituzione delle strutture. In particolare, nelle situazioni in cui la resistenza del materiale non è compromessa, è forte lo stimolo a ricercare opere di rinforzo che consentano di mantenere in vita le vecchie strutture.

Il borgo storico di Laino Castello, in Calabria, abbandonato da oltre due decenni a causa del rischio sismico e recentemente reso oggetto di studio in vista di un possibile recupero, ha offerto un caso studio interessante, sia per l'analisi dei caratteri costruttivi di solai e coperture, sia per l'individuazione di opere di rinforzo che ne consentano il riuso.

In questo lavoro, attraverso un attento studio dei documenti presenti in letteratura, si mostra come le tecniche basate sull'impiego di elementi metallici per il rinforzo di travi in legno fanno parte di una lunga tradizione e costituiscono un valido riferimento operativo. Sfruttando inoltre la disponibilità di un campione di trave proveniente da un solaio di Laino Castello, si sono create condizioni ideali per verificare l'efficacia di un intervento di rinforzo dal punto di vista sperimentale e teorico, mettendo in luce le corrette modalità di realizzazione dell'intervento.

### **Una tecnica di rinforzo di antica tradizione**

Esempi storici di travi accoppiate ad elementi metallici esterni, con funzione resistente ed irrigidente, risalgono a fine Ottocento. La nascita di questa soluzione tecnica è determinata da una serie di circostanze e principalmente dalla diffusione a basso costo dei materiali metallici nell'edilizia. Non è un caso che questa nuova soluzione preveda una netta distinzione di ruoli tra i singoli elementi (trave presso-inflessa, puntone compresso e cavo teso) ognuno dei quali è generalmente realizzato con il materiale più idoneo ad assolvere la sollecitazione a cui è sottoposto, mostrando chiaramente un forte condizionamento da parte della tecnica del calcestruzzo armato che in quegli anni assume una sempre maggiore diffusione.

I manuali dei principali Paesi europei sono i mezzi attraverso i quali questa tecnica viene resa nota e diffusa in un periodo che generalmente va dagli ultimi decenni dell'Ottocento ai primi decenni del Novecento (Fig. 1).

In Italia se ne trova traccia nel volume di Luigi Cattaneo [1] dove l'autore ne illustra le particolari caratteristiche nel seguente modo: *“Per rinforzare e rendere rigide le lunghe travi si fanno armature in ferro il quale oppone grande resistenza agli sforzi di tensione. Il rinforzo o armatura consiste in un tirante che attraversa agli estremi il legno e una piastra di ferro o in ghisa contro la quale è trattenuto con bulloni a vite, e si accavalla ad un contraffisso al di sotto e nel mezzo della trave. Il contraffisso è in ghisa e di*

*sezione piccola perciò rafforzato da nervature a croce [...] invece di un sol tirante mediano se ne possono porre due laterali, appoggiati a uno o a due contrafissi. Si propongono due contrafissi se la trave è molto lunga e molto sovraccaricata, disponendoli equidistanti da ciascun estremo...*”

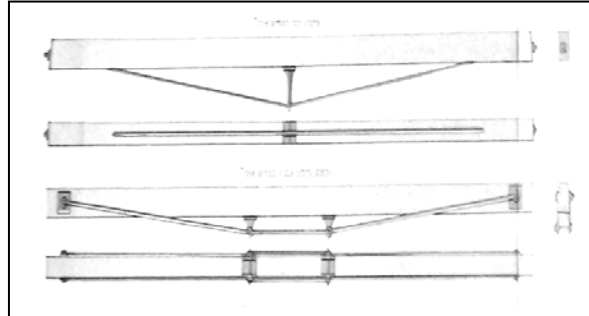


Figura 1 – Dettagli di costruzioni da “L’arte muratoria” di L. Cattaneo (1889)

Nel noto volume di Giuseppe Valadier [2], risalente al 1831, non c’è traccia di questa tecnica; incrementi di portanza delle travi vengono ottenuti con l’accoppiamento di due elementi lignei collegati mediante elementi metallici; lo stesso si può dire per l’opera di Rondelet [3]. Carlo Formenti nel 1893 [4] raffigura una soluzione in cui due putrelle sono irrigidite da un tirante metallico che corre parallelo nel loro interasse e fornisce un’azione verticale verso l’alto in corrispondenza della mezzera. In Europa la tecnica è resa nota da un buon numero di pubblicazioni che mostrano anche una certa diffusione delle conoscenze spesso espressa dalle traduzioni integrali di alcuni volumi. In Spagna la tecnica è ripresa e diffusa da molti autori in volumi di fine Ottocento. Barré [5] (nella traduzione dal francese di D. Antonio Aguirre) parla delle *vigas armadas* osservando che può essere realizzata in molti modi tra cui “*Se puede también formar la viga armada con dos hierros en I acoplados, sostenidos en su punto medio por un tirante de hierro redondo unido por sus extremos á la parte superior de estas piezas y que tiende á levantar una barra atravesada en el centro por debajo de las dos piezas en I*” (Fig. 2).

Gaztelu [6] nello stesso anno rappresenta una soluzione analoga raffigurata con singolo e doppio puntone, oltre ad una *armatura económicas Baudrit* per luci fino a 15m. Sempre lo stesso anno Lobez [7] mostrando la struttura di rinforzo si sofferma sulla possibilità di una pretensione del cavo metallico evidenziandone i benefici: “*La viga torna con este esfuerzo una ligera*

*curvatura que la levanta por su centro, lo cual es muy conveniente para su resistencia” [8]. Nell’opera di Valdes [9] si ritrova una soluzione molto simile che estenda la propria funzione in quanto si tratta di una “Armaduras para reforzar, prolongar y unir las piezas de madera”.*

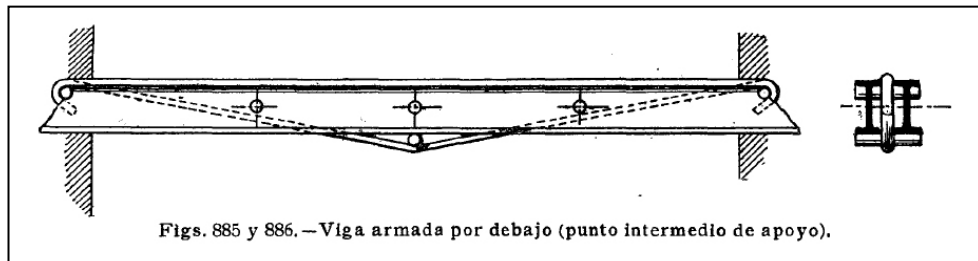


Figura 2 —Costruzioni metalliche (L.A. Barrè , 1899)

Barberot più recentemente, tra le *vigas armadas* definisce la *viga atirantada* la più vantaggiosa in quel periodo storico “*es la más racional, en estos tiempos en que el hierro es de fácil adquisición*” [10]. Successivamente ripropone alcune strutture metalliche con tirantatura (riferimento evidente L.A. Barrè [5]) sottolineandone i vantaggi determinati dal differente stato di sforzo: “*El peso P se descompone en dos empujes sobre los puntos de apoyo, y la pieza, que sin el tirante trabajaría por flexión, trabaja después casi completamente por compresión*” (Fig. 3). Lo stesso autore aggiunge alcune interessanti soluzioni per travi in legno, tra cui quella con tirante e 5 puntoni di lunghezze differenti e in un altro volume [11] propone l’ancoraggio dei cavi metallici non più alla trave ma alla muratura con conseguenti differenti distribuzioni delle azioni e dimensioni d’ingombro della struttura. Il rinforzo con tirantatura intradossale lo si ritrova in una singolare proposta di Saavedra [12] per la realizzazione di un ponte. In Germania la *armierte Balkenbrücken* raffigurata nel volume di Landsberg [13] e presentata nella duplice soluzione di *balkenbrücken mit einfach armierten Balken* e *balkenbrücken mit einfach armierten Balken* viene studiata in maniera analitica fornendo indicazioni per il dimensionamento (Fig. 4).

Ma è in Francia che questa tecnica si riscontra abbastanza precocemente in un volume del 1857 [14] dove, in una descrizione molto dettagliata del funzionamento della struttura, viene messo in evidenza un requisito fondamentale del sovraccarico per il buon funzionamento del sistema: “*Mais ces poutres ne sont applicables qu’à de petites ouvertures, et surtout pour des surcharges invariables de position*”.

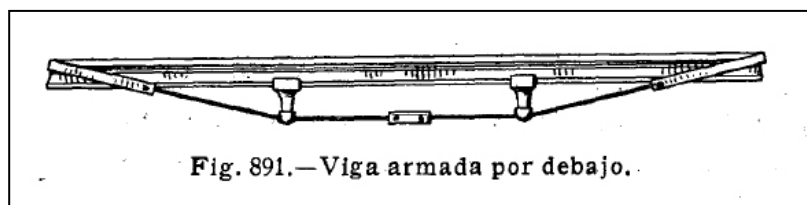


Figura 3 – Barberot: la trave tirantata (1927)

L'autore prosegue con la descrizione del funzionamento del sistema ed illustra una struttura analoga realizzata in Inghilterra con l'impiego della ghisa ed un cavo metallico, senza risparmiare importanti critiche a questa soluzione "*nous ne pensons donc pas qu'on doive employer ces poutres, car, pour des constructions importantes, les inconvénients que nous venons de signaler peuvent acquérir beaucoup de gravité, et, pour de petites constructions, l'économie qu'on en peut espérer est de peu d'importance, et, d'ailleurs, largement compensée par les difficultés d'exécution*". Di particolare interesse il volume di Wanderley [15] che entra nel merito del calcolo del sistema di rinforzo.

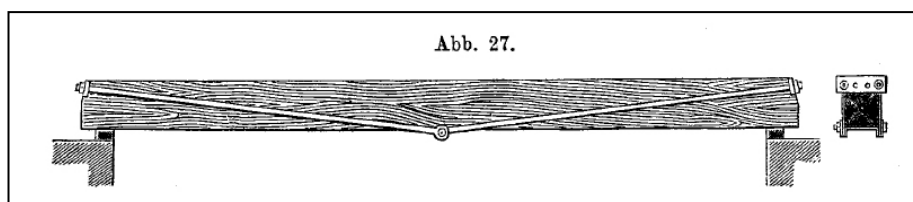


Figura 4 – Landsberg: la trave in legno rinforzata (1904)

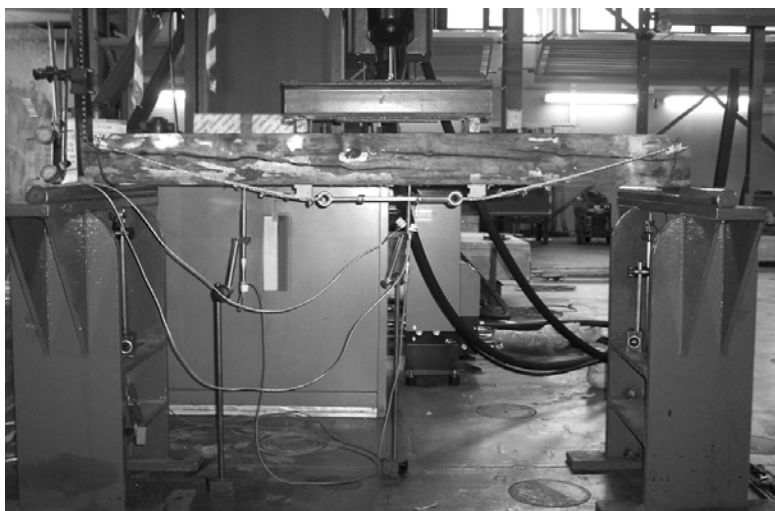
Da circa una decina d'anni numerosi autori propongono l'adozione di funi metalliche per il consolidamento, riprendendo il principio espresso nei manuali di fine Ottocento. Barbisan e Laner [16] illustrano la soluzione di rinforzo con tirante metallico e puntoni proposta da Kidder e Nolan [17] e Tampone [18] cita la soluzione ideata da Emy [19] proponendone una versione contemporanea e mostrando progetti risalenti al 1977 ed interventi realizzati nel 1986 mediante *centinatura*. Anche Mariani, in un suo recente volume [20], dopo aver citato il riferimento storico, riprende questa tecnica illustrandola nelle sue molteplici varianti, proseguendo con la divulgazione di alcune sue proposte e concludendo con le indicazioni per il calcolo dell'intervento di rinforzo.

Oggi l'intervento sull'esistente è sempre più orientato alla conservazione delle strutture lignee (piuttosto che alla sostituzione) e questo ha determinato una spinta verso la progettazione ed ideazione di soluzioni leggere e rispettose delle preesistenze [21] e ad una ricerca estetica che mostri, senza indugio, il contributo contemporaneo [22].

### **Il prototipo studiato**

Il campione usato per la sperimentazione proviene da un solaio di Laino Castello. Precisamente, costituisce una delle due metà di una trave collassata per ammaloramento della sola zona centrale; ha una lunghezza di due metri circa ed è in buon stato di conservazione. La sezione trasversale ha la forma di un rettangolo con il lato inferiore arrotondato e misura 13 x 15 cm.

Lo schema statico adottato per la prova sperimentale (Fig. 5) prevede due carichi concentrati ai terzi della luce (pari a 170 cm), con un valore di riferimento calcolato in modo che il momento massimo abbia lo stesso valore di quello stimabile per la trave originaria, lunga 4 m, quando soggetta ai carichi tipici gravanti su un solaio di normale abitazione (3,6 kN/m<sup>2</sup>).



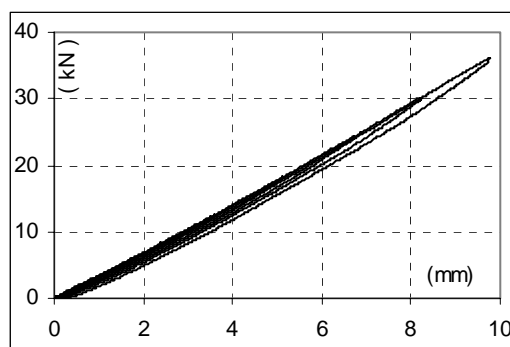
*Figura 5 – Il campione e l'apparato sperimentale*

L'intervento di consolidamento adottato consiste nell'inserimento di un cavo di acciaio INOX ( $\varnothing$  6 mm) che dal lembo superiore, in corrispondenza degli appoggi, scende inclinato fino al lembo inferiore della trave, ad un terzo della luce, per correre poi orizzontalmente nella zona della mezzeria e

infine risalire con un percorso simmetrico (Fig. 5). In corrispondenza della mezzeria della trave è inserito un tenditore equipaggiato con estensimetri elettrici che consente il monitoraggio continuo dell'azione assiale del cavo. In corrispondenza degli appoggi sono stati realizzati due intagli al lembo superiore, con lo scopo di guidare il percorso del cavo. In prossimità di questi intagli la trave è stata rinforzata per mezzo di viti verticali. Il cavo viene mantenuto a circa 4 cm dal lembo inferiore della trave per mezzo di due cunei distanziatori di legno disposti ai terzi della luce.

### **Le fasi della sperimentazione svolta.**

La sperimentazione si è articolata in tre fasi successive. Nella prima fase è stato analizzato il comportamento del campione non rinforzato, allo scopo di determinarne le caratteristiche di deformabilità. E' stata eseguita una serie di cicli di carico successivi di valore progressivamente crescente, fino a produrre un valore di momento flettente superiore del 50 % a quello stimabile per la trave originaria in condizioni di normale esercizio. I cicli carico-spostamento effettuati sono mostrati in Fig. 6; risulta evidente la regolarità di tutti i cicli, con un buon ritorno elastico fino al penultimo ciclo.



*Figura 6 – Cicli carico-spostamento per il campione non rinforzato*

La prova è stata interrotta prima del collasso del campione, per consentire una successiva fase sperimentale. Eguagliando l'espressione teorica della freccia in mezzeria con i valori rilevati, si può stimare per il modulo elastico  $E$  un valore di  $885 \text{ kN/cm}^2$ ; il risultato si colloca nel campo dei valori indicati in letteratura per il legno di castagno sollecitato a flessione (da  $845 \text{ kN/cm}^2$  a  $1440 \text{ kN/cm}^2$ ).

Nella seconda fase della sperimentazione il campione è stato rinforzato secondo la modalità prevista. Prima di iniziare le prove, è stato imposto un valore di tiro del cavo metallico di poco inferiore a 8 kN, producendo una contro-freccia del campione. E' stata quindi iniziata una serie di cicli di carico e scarico, realizzati in controllo di spostamento. Sono stati svolti 9 cicli completi, con ampiezza del carico crescente di 6 kN ad ogni ciclo. Al decimo ciclo la prova si è interrotta poco prima del raggiungimento del carico massimo; a causa infatti di un difetto del sistema di appoggio, si è verificato l'improvviso ribaltamento del campione.

Il diagramma di Fig. 7 (parte sinistra), che descrive l'andamento della prova in termini di cicli carico-spostamento, mostra che nell'ultima fase ha inizio una debole deviazione dalla linearità; il carico massimo applicato è prossimo a 60 kN (due volte e mezzo il carico di progetto).

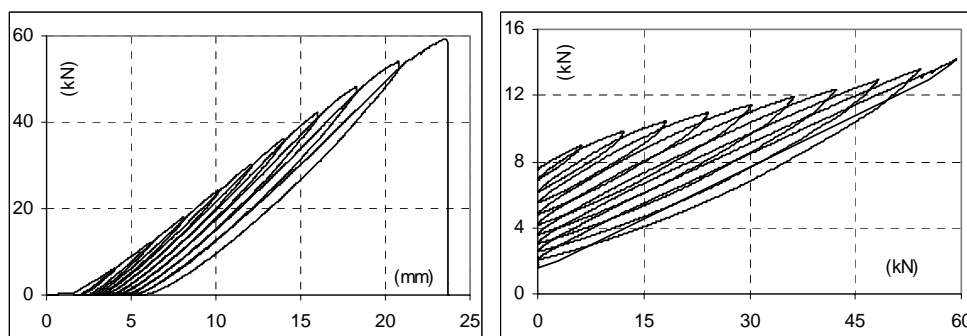


Figura 7 – Cicli carico-spostamento per il campione rinforzato e valore del tiro nel cavo.

Di particolare interesse è il diagramma riportato nella parte destra di Fig. 7, che mostra la variazione dell'azione assiale nel tenditore in funzione del carico imposto dall'attuatore. Appare chiaramente come, al termine di ogni ciclo, il valore del tiro nel cavo si riduce: mentre il valore iniziale al primo ciclo vale 8 kN, durante l'ultimo ciclo il valore è sceso a circa 2 kN, con una perdita dell'80% circa. Si ritiene che sia in atto un fenomeno di adattamento del cavo al percorso imposto, attraverso l'accumulo di deformazioni permanenti nelle piegature.

La terza fase della sperimentazione è stata finalizzata al raggiungimento del collasso della trave; a questo scopo, sono stati preliminarmente eseguiti alcuni cicli di carico con l'intento di ripristinare, dopo ogni ciclo, il valore iniziale del tiro nel cavo d'acciaio (8 kN); si riteneva infatti che quest'ultimo potesse, in questo modo, stabilizzarsi. Successivamente, è stato eseguito un



unico ciclo fino alla rottura del campione. I diagrammi di Fig. 8, che riportano rispettivamente il ciclo a rottura (parte sinistra) e la corrispondente variazione del tiro nel cavo (parte destra), mostrano che il carico massimo varia di poco rispetto a quello raggiunto nella seconda fase e che il tiro nel cavo continua ad attenuarsi ad ogni ciclo.

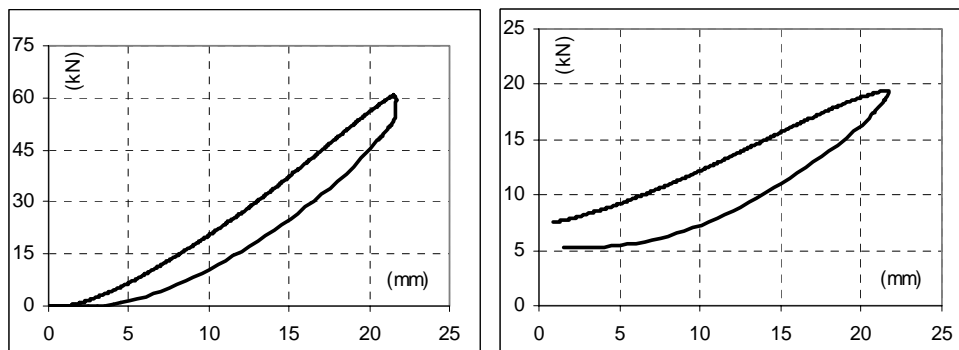


Figura 7 – Cicli carico-spostamento per il campione rinforzato e valore del tiro nel cavo.

L'interpretazione di questo comportamento risulta evidente sulla base di un semplice studio analitico del problema. Il modello teorico di comportamento, tarato in base ai risultati sperimentali, mostra che l'efficacia del cavo dipende dal rapporto fra la rigidezza assiale del cavo stesso e la rigidezza flessionale della trave. Nel caso del prototipo studiato, il vantaggio dovuto al cavo, in termini di riduzione del momento flettente nella trave, è del tutto trascurabile. Per valorizzare la presenza del rinforzo, occorrerebbe aumentare la distanza del cavo dal lembo inferiore della trave.

### Conclusioni

La sperimentazione svolta, affiancata da valutazioni analitiche, mostra in primo luogo che il sistema in studio richiede che le previsioni teoriche della risposta siano affiancate da analisi sperimentali che ne consentano la taratura; diversamente, i giochi del sistema rendono difficile la previsione della rigidezza effettiva del cavo. La sperimentazione mostra, quale aspetto caratteristico del sistema, che la pretensione del cavo tende a ridursi sensibilmente; a lungo termine, si dovrebbe prevedere che sia assente. Infine, le valutazioni teoriche mostrano che la geometria del sistema va accuratamente valutata e che l'eccentricità del cavo, in particolare, deve avere un adeguato valore.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] – CATTANEO L. (1889), L'arte muratoria: dettagli di costruzioni, Stab. Tip. Antonio Vallardi Edit.
- [2] – VALADIER G.(1831), L'architettura pratica, Tomo 2, (Ed. Anastatica Sapere, Editorgrafica s.r.l., Roma, 1992).
- [3] – RONDELET J., Trattato teorico e pratico dell'arte di edificare, (prima traduzione italiana sulla 6<sup>a</sup> ed. originale, per cura di Basilio Soresina, Mantova 1831-1835).
- [4] – FORMENTI C.(1893), La pratica del fabbricare, Ed. Hoepli, Milano.
- [5] – BARRÉ, L. A. (1899), Construcciones Metálicas, (traducidos por D. Antonio Aguirre, Pequeña Enciclopedia de Construcción, 6), Editorial Bailly-Bailliere e Hijosm, Madrid.
- [6] – GAZTELU, L. (1899), Pequeña Enciclopedia Práctica de Construcción publicada bajo la dirección de L.-A. Barrè. N°4 Carpinteria de Armar, (traducido y anotado por D. Luis Gaztelu, segunda tirada), Librería editorial de Bailly- Bailliere e hijos, Madrid.
- [7] – GER Y LÓBEZ, F. (1898), Tratado de Construcción Civil por Florencio Ger y Lóbez. Atlas de 68 láminas con 2.079 figuras. Badajoz: Est. Tip. La Minerva Extremeña.
- [8] – GER Y LÓBEZ, F. (1898), Tratado de Construcción Civil por Florencio Ger y Lóbez. Texto. Badajoz: Est. Tip. La Minerva Extremeña.
- [9] – VALDÉS, N. (1870), Manual del Ingeniero y Arquitecto, Texto y Atlas de 133 láminas, segunda edición, Imprenta de Gabriel Alhambra, Madrid.
- [10] – BARBEROT, E. (1927), Tratado Práctico de Edificación por E. Barberot, (traducido de la 5<sup>a</sup> edición francesa por Lino Álvarez Valdés), segunda edición, Gustavo Gili Editor, Barcelona.
- [11] – BARBEROT, E. (1932), Tratado Práctico de Cerrajería, (versión de la 4<sup>a</sup> edición francesa por Manuel Company), Gustavo Gili, Barcelona.
- [12] – SAAVEDRA, E. (1864), Teoría de los puentes colgados, por don Eduardo Saavedra, Ingeniero Jefe de Caminos, Canales y Puertos, Imprenta Nacional, Madrid.
- [13] – LANDSBERG, Th. (1904), Der Bruckenbau. Verlag von Wilhelm Engelmann, Leipzig.
- [14] – MOLINOS, M. y C. PRONNIER (1857), Traité théorique et pratique de la construction des ponts métalliques, Texte, A. Morel et Ce. libraires-éditeurs, Paris.
- [15] – WANDERLEY, G. (1885), Traité Pratique de Constructions Civiles, (édition Française par A. Bieber), Troisième Volume, Le Bois Dans La Construction, E. Bernard & Cie Imprimeurs-Éditeurs, Paris.
- [16] – BARBISAN U., LANER F. (1995), I solai in legno, Franco Angeli, Milano.
- [17] – KIDDER F.E., NOLAN T. (1884), The Architects' and Builders' Handbook, New York.
- [18] – TAMPONE G. (1996), Il restauro delle strutture lignee, Hoepli, Milano.
- [19] – EMY A.R. (1853), Trattato dell'arte del carpentiere, (trad. Romano), Antonelli Ed., Venezia.
- [20] – MARIANI M. (2004), Consolidamento delle strutture lignee con l'acciaio, DEI, Roma.
- [21] – JURINA L. (2002), Consolidamento strutturale e reversibilità, *Atti del Convegno su "Reversibilità, Concezione e interpretazione nel restauro"*, Torino.
- [22] – JURINA L. (2004), Consolidamento dei solai: soluzioni miste legno-acciaio, *L'edilizia*, n. 134, pp.44-51.