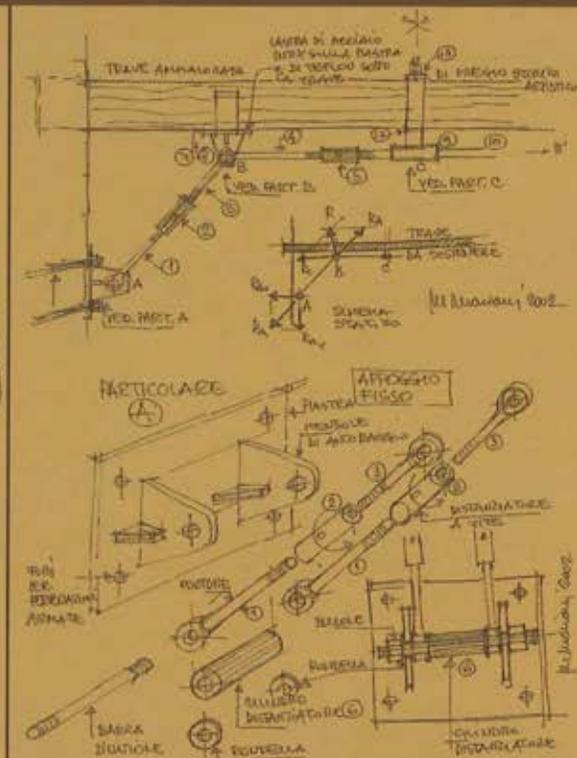
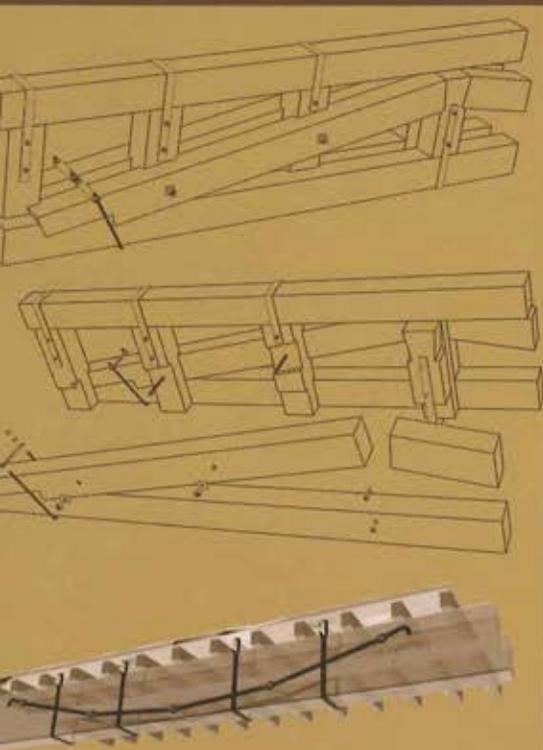


Massimo Mariani

CONSOLIDAMENTO DELLE STRUTTURE LIGNEE CON L'ACCIAIO

Presentazione di **Antonio Borri**



con CD Rom
contenente

una
Banca Dati
di oltre 500
illustrazioni
ricche
di schemi
e particolari
costruttivi

dei
TIPOGRAFIA DEL GENIO CIVILE

Collana Centro Studi

**SISTO
MASTRODICASA**



2. STRUTTURE LEGNO-FERRO

I trattati dell'ottocento riferiscono che le prime rappresentazioni di strutture miste legno-ferro avvennero quando fu necessario sostituire tiranti di legno ammalorati, facenti parte di capriate o ponti, con gli equivalenti di metallo. Questi furono anche i primi esempi di interventi di consolidamento di sistemi in stato di sofferenza strutturale. L'ingegnere Krafft fu uno dei primi ad applicare elementi di ferro quali rinforzi di armatura; in particolare nel 1821 fu lui a consigliare soluzioni miste per incavallature di grandi luci, del genere di quelle della Sala d'Esercizio a Mosca. Le combinazioni legno-ferro consentirono, infatti, di ottenere coperture a minor costo e soprattutto più leggere di quelle costruite interamente di legno.

La struttura della *figura 2.a* apparteneva alle Fonderie di Rosière presso S. Florent, Dipartimento di Cher, progettata e costruita nel 1830 da un ingegnere di nome M.A. Ferry. Si tratta di una doppia capriata composta da pilastri di ghisa, puntoni e sovrastrutture di legno e tiranti di ferro.

Le incavallature erano poste ad interasse di 4 m. La catena di ferro, al posto di quella di legno, permetteva così la "libera circolazione dell'aria e della luce conferendo all'ambiente apparenza di vastità ed eleganza" (Almand Rose Emy¹). La convergenza delle due falde consentiva alle acque meteoriche di defluire e di essere convogliate all'interno dei pilastri tubolari cavi. Il dettaglio del nodo tra la catena e la testa del pilastro è riportato nella *figura 2.b*. È ben visibile anche il tenditore prismatico esagonale che, composto da una doppia filettatura inversa, consentiva la messa in tensione del sistema.

Un esempio particolare proviene dal confronto della *figura 2.c* con la *figura 2.d*. Il sistema della *figura 2.c* era molto articolato e usato dai carpentieri per eliminare la spinta dei puntoni contro i muri, ricorrendo a grandi croci di S. Andrea. In particolare le *figure 2.e*, *2.f* e *2.g* danno l'esatta immagine di una ricerca effettuata in tal senso che riuscì solo in parte nell'intento, trattandosi più di irrigidimenti reticolari che di vere e proprie tirantature alla base. Nella *figura 2.d* l'azione delle croci di S. Andrea è rimpiazzata da quella di due tiranti di ferro, anch'essi inclinati, collegati ad un elemento di legno orizzontale posto tra i puntoni di falda e i due pilastri. Questa capriata fu costruita nei Docks di Li-

¹ Almand Rose Emy (1771-1851), Colonnello del Genio di Francia, Ufficiale dell'Ordine Reale della Legione d'Onore, Professore di Fortificazione nella Scuola Reale Militare di Saint-Cyr, Membro dell'Accademia Reale di Belle Lettere, Scienze ed Arti della Rochelle, della Società Reale d'Agricoltura e delle Arti del Dipartimento di Seine et Oise, dell'Istituto Istorico, etc.

verpool. I tiranti erano formati ognuno da tre barre e attraverso braccia e perni di ferro, erano collegati agli elementi già descritti. Le estremità di ciascun puntone erano ad unione dentata e munite di uno “zoccolo” di ferro battuto.

Interessanti per l'identificazione dei particolari costruttivi dei nodi sono le *figure 2.h e 2.d*.

La *figura 2.i* mostra un'armatura progettata e costruita nel 1837 da M. A. Ferry per coprire la nuova Officina al Laminatoio dei ponti presso le Fonderie Romilly sur Andelle, nella quale grandi tiranti di ferro contrastano le spinte delle falde del tetto. I saettoni (monaci) di supporto dei puntoni di falda erano di legno, sorretti dal sistema di tiranti che, sicuramente presollecitato durante la costruzione della copertura, conferiva loro una forza per contrastare le azioni flettenti e taglianti, finalizzata alla diminuzione della luce delle travi di falda.

Una struttura simile a quella precedente ideata da Emy, destinata ad un edificio di 16 m di larghezza e 25 m di lunghezza, fu frazionata da 7 incavallature distanti tra di loro 3,14 m. La *figura 2.j* è la sua sezione longitudinale che passa lungo la linea del colmo e mostra l'irrigidimento tra le capriate ottenuto mediante tiranti di ferro posti a croci di S. Andrea. Le *figure 2.k e 2.l* contengono i particolari costruttivi degli agganci dei tiranti alle travi posti in corrispondenza dei nodi. Questa struttura fu sottoposta “per più giorni” ad un collaudo statico consistente in un carico di 4500 kg, ripartito nei punti che dovevano sorreggere i monaci. “Questo carico”, come dice lo stesso Emy, “eccedeva di molto quello che ciascuna incavallatura (capriata) doveva sopportare. L'incavallatura si distese di 12 mm e, tolta la carica ritornò alla primiera lunghezza”.

La scelta del sistema strutturale legno-ferro per le capriate era giustificata dalle seguenti motivazioni:

- diminuiva fortemente il peso della copertura e il relativo costo;
- liberava le coperture da tiranti di legno e quindi aumentava l'altezza utile interna degli ambienti;
- rendeva più semplice la costruzione e la posa in opera delle singole parti;
- garantiva la possibilità di sostituzione degli elementi ammalorati con procedimenti non complicati.

Camille Polonceau espose nel 1839 un piccolo modello di armatura legno-ferro da lui fatta costruire lo stesso anno per coprire una tettoia di 8,40 m di ampiezza sulla ferrovia Parigi-Versailles (*fig. 2.m*). Egli usò “filo di ferro” (barre) di 6 mm di diametro e consigliò nelle progettazioni e anche nelle strutture esistenti, allorché fosse giustificato nella spesa, di sostituire i monaci e i saettoni (come si diceva a quel tempo “le razze”) di legno con elementi di ferro che, se fossero stati tubolari, avrebbero avuto pari efficacia con un minor peso e maggiore durabilità (*figure 2.n, 2.o, 2.p e 2.q*).

Purtroppo si è rilevato nel tempo che spesso le parti di legno, all'interno delle cuffie di ferro, sono state alterate da attacchi biotici causati da effetti di condensa locale (*figure 2.r e 2.s*).

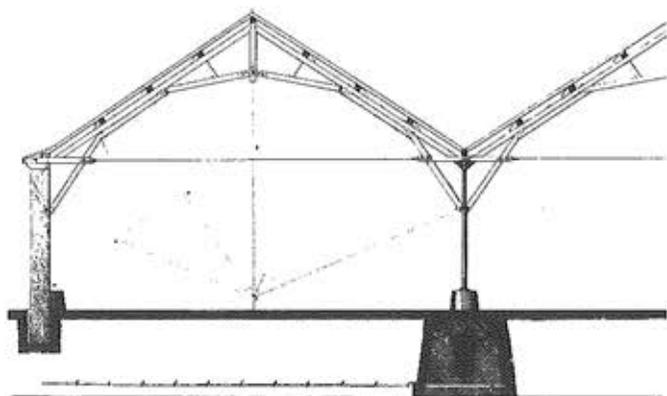


Fig. 2.a – Struttura legno-ferro. Fonderie di Rosière presso S. Florent, Dipartimento di Cher, progettata e costruita nel 1830 dall'ingegnere Ferry.

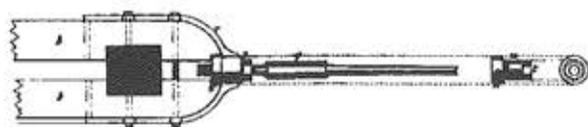


Fig. 2.b – Fonderie di Rosière presso S. Florent, Dipartimento di Cher. Dettaglio del nodo tra la catena e la testa del pilastro.

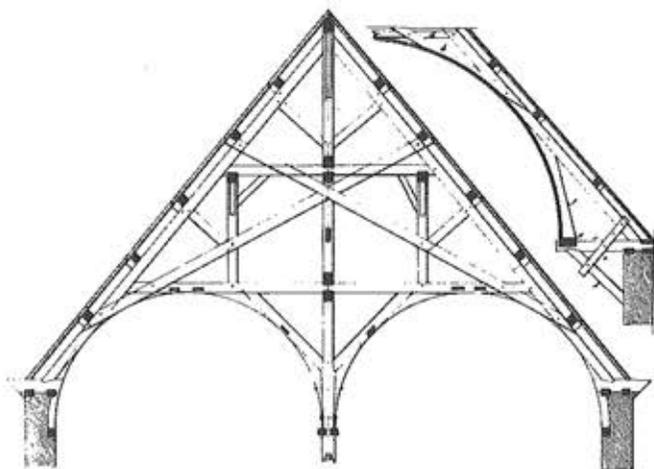


Fig. 2.c – Articolati sistemi di incavallature usati per eliminare le spinte dei puntoni contro i muri portanti.

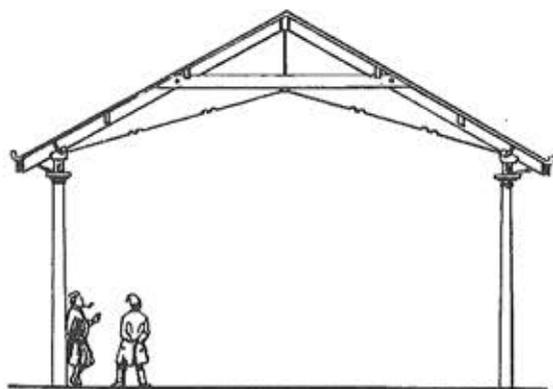


Fig. 2.d – Struttura legno-ferro della prima metà del 1800.

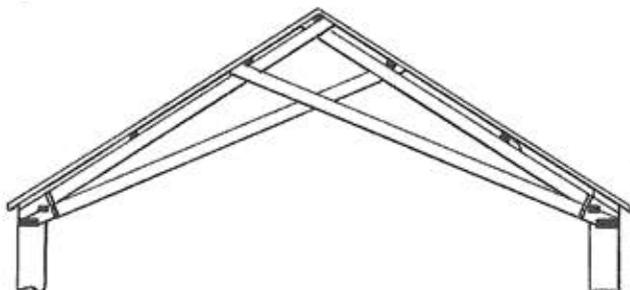


Fig. 2.e – Struttura con irrigidimenti reticolari.

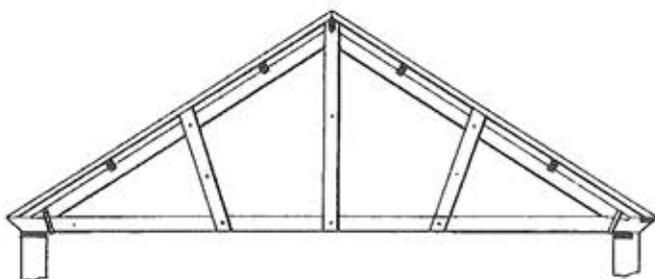


Fig. 2.f – Incavallatura provvista di tirante.

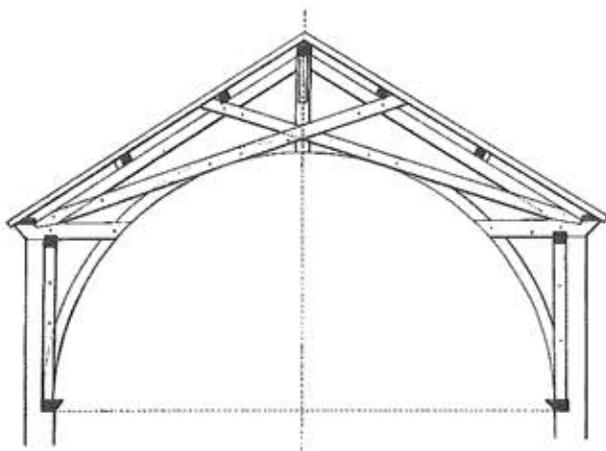


Fig. 2.g – Sistema strutturale con irrigidimenti finalizzati alla riduzione delle spinte laterali.

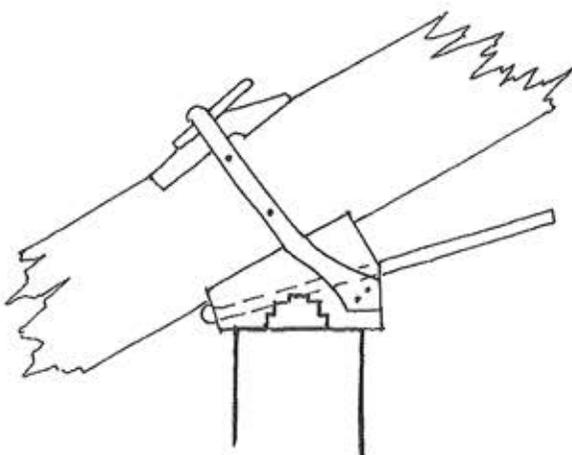


Fig. 2.h – Particolare del nodo di collegamento tra pilastro e puntone con presenza di tirante metallico.

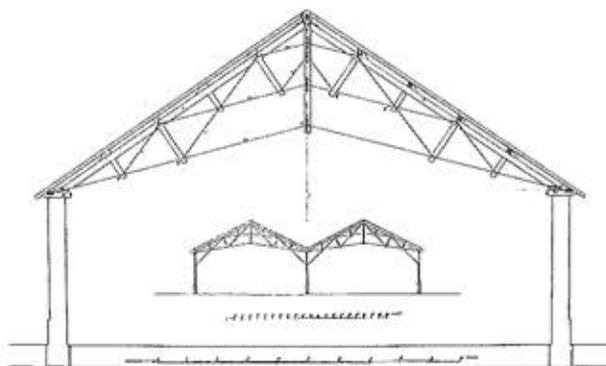


Fig. 2.i – Struttura legno-ferro ideata nel 1873 da M.A. Ferry per coprire la nuova Officina al Laminatoio presso le Fonderie Romilly Sur Andelle.

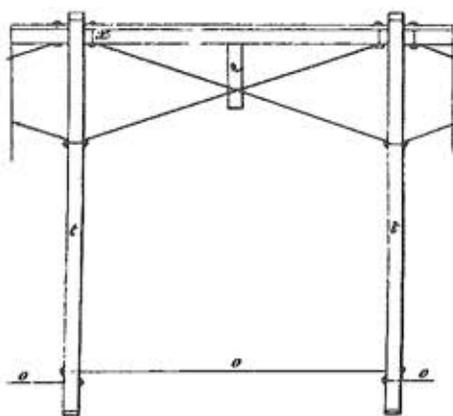


Fig. 2.j – Irrigidimento longitudinale tra le capriate ottenuto mediante tiranti di ferro posti a croce di S. Andrea, ideato da Almand Rose Emy.

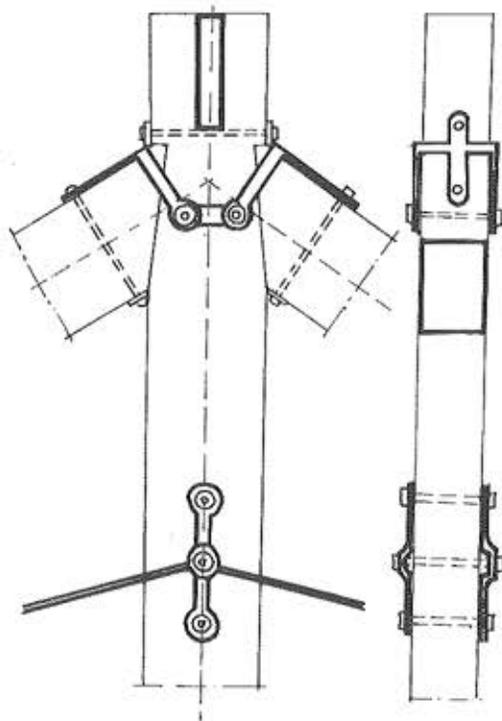


Fig. 2.k – Almand Rose Emy (1830). Particolari costruttivi degli agganci dei tiranti alle travi in corrispondenza dei nodi.

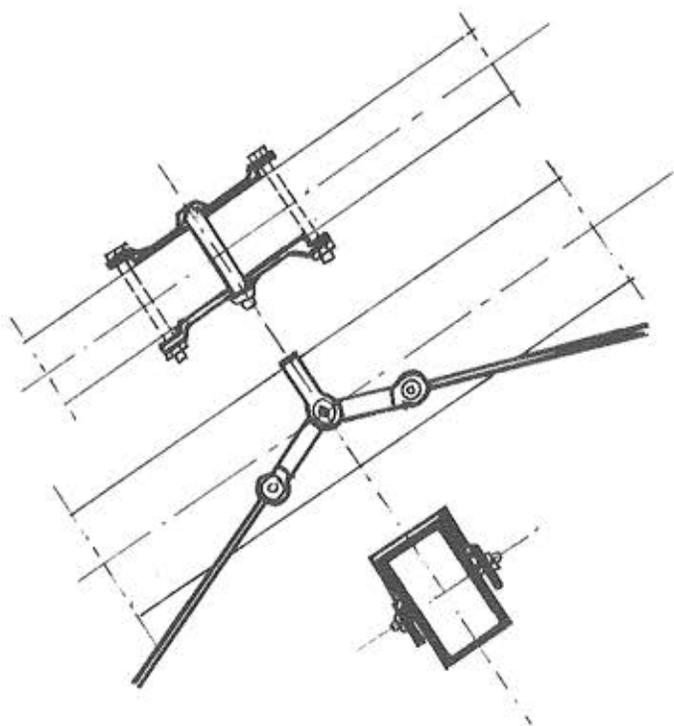


Fig. 2.l – Almand Rose Emy (1830). Particolari costruttivi degli agganci dei tiranti in corrispondenza dei nodi.

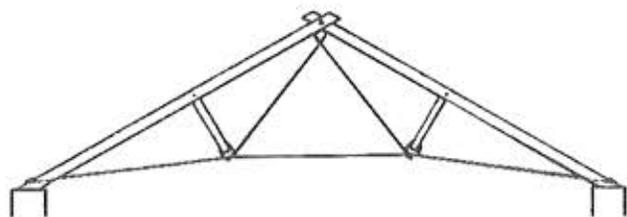


Fig. 2.m – Camille Polonceau, primo modello di armatura legno-ferro del 1839.

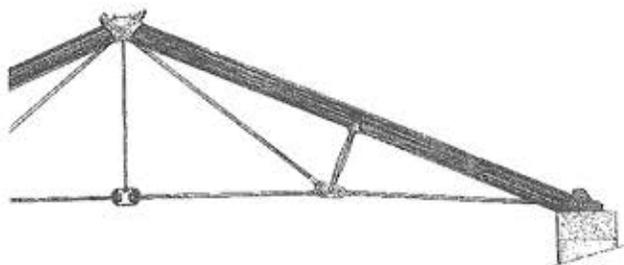


Fig. 2.n – Capriata di tipo Polonceau – Stazione di Pescia della tramvia da Lucca (Prof. F. Gurrieri, Ing. M. De Vita, 1988).

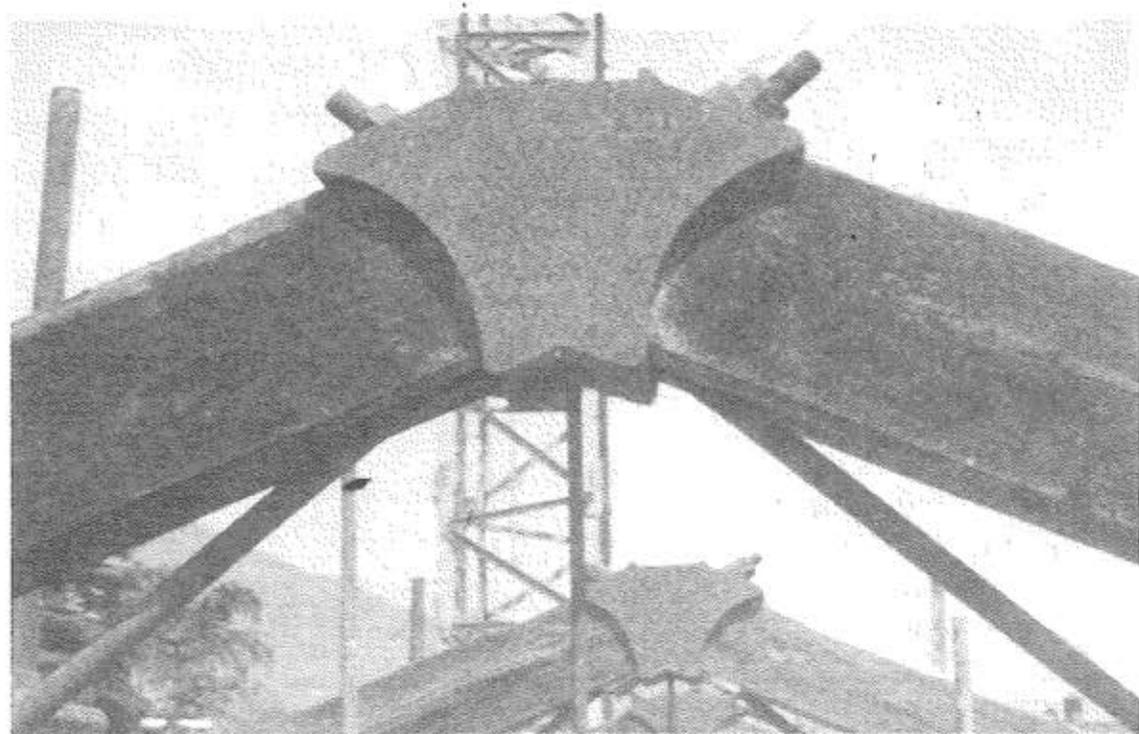


Fig. 2.o – Capriata di tipo Polonceau – Stazione di Pescia della tramvia da Lucca (Prof. F. Gurrieri, Ing. M. De Vita, 1988). Cuffia di ghisa tra i puntoni.

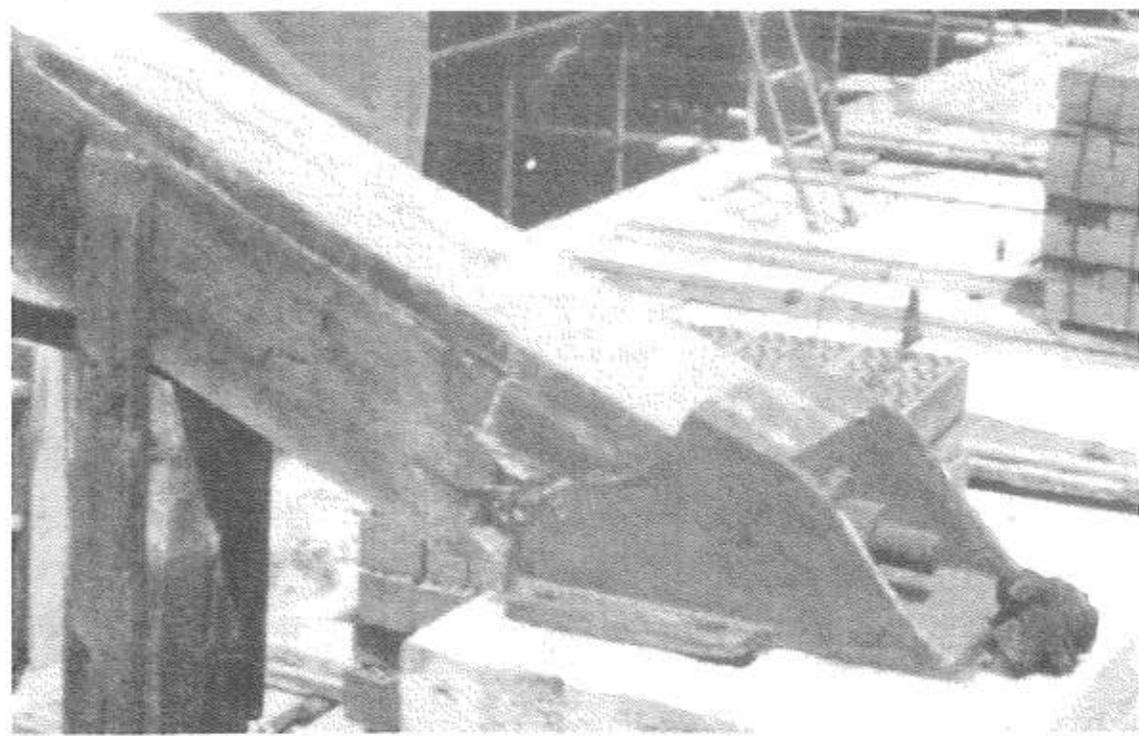


Fig. 2.p – Capriata di tipo Polonceau – Stazione di Pescia della tramvia da Lucca (Prof. F. Gurrieri, Ing. M. De Vita, 1988). Cuffia di ghisa all'appoggio.

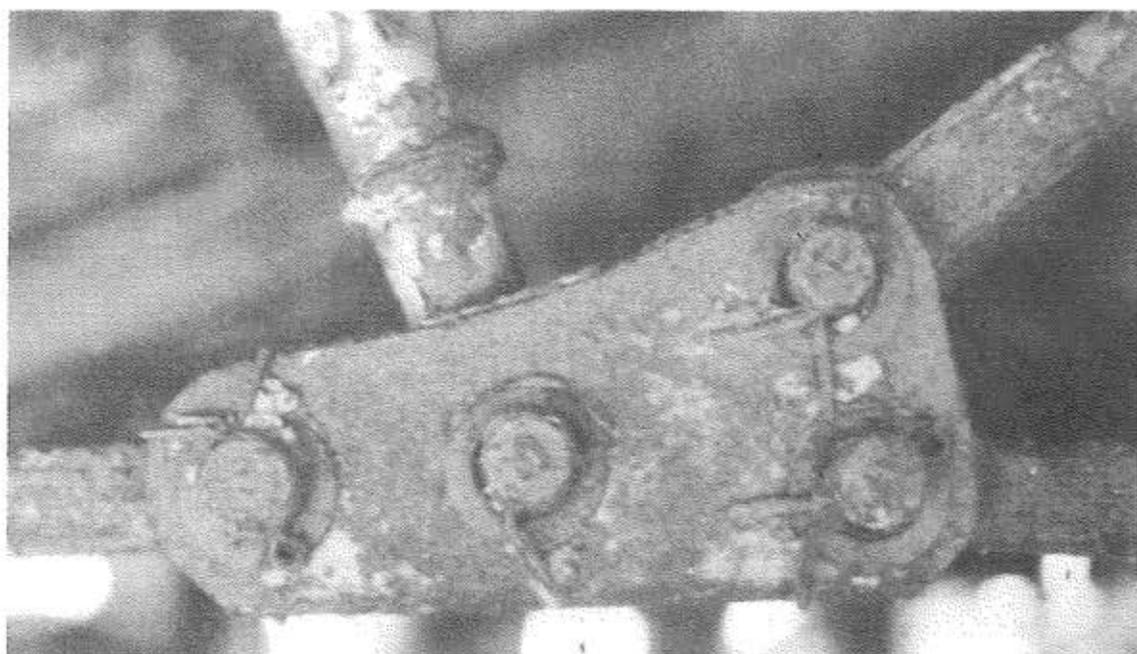


Fig. 2.q – Capriata di tipo Polonceau – Stazione di Pescia della tramvia da Lucca (Prof. F. Gurrieri, Ing. M. De Vita, 1988). Collegamento tra le catene e il puntone intermedio alla trave di falda.

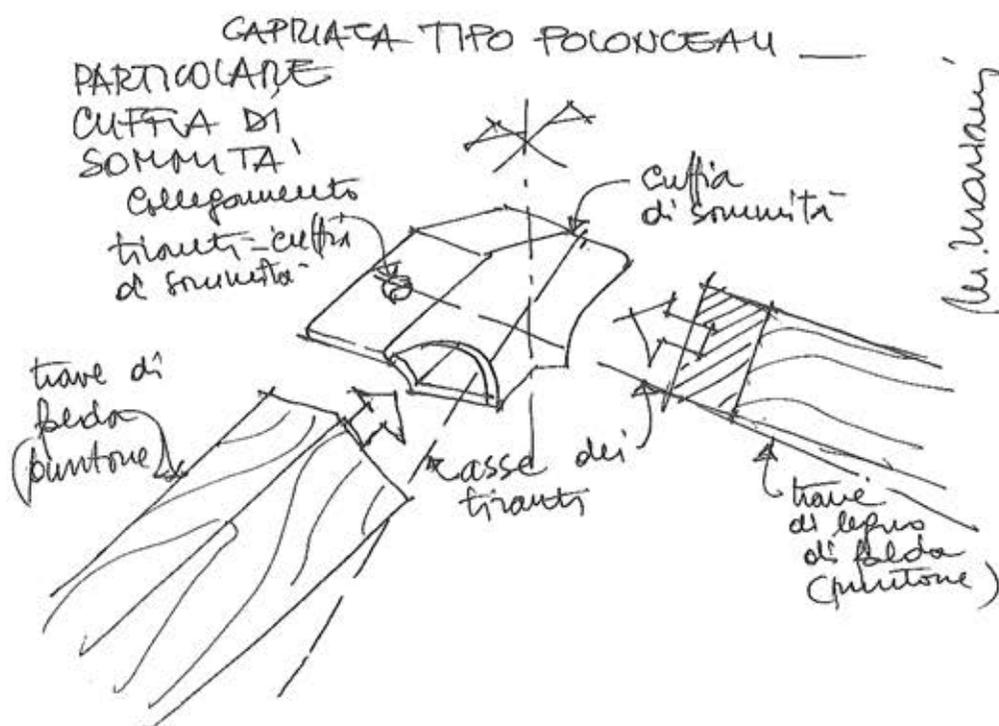


Fig. 2.r – Capriata di tipo Polonceau – Particolari costruttivi dell'Autore (M. Mariani, 2002) – Costruzione del nodo di sommità.

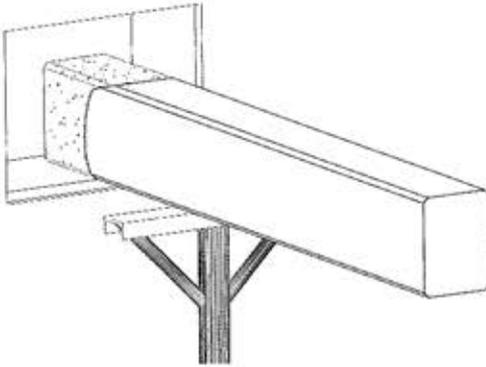


Fig. 3.1.3.a – Ricostruzione dell'appoggio della trave con barre e protesi di malta epossidica.

3.2. RICOSTRUZIONE DELL'APPOGGIO DELLA TRAVE MEDIANTE PROTESI DI ACCIAIO

Anche in questo caso la rigenerazione della parte ammalorata può avvenire in sito, con lo smontaggio del solaio limitato alla sola zona di intervento.

Si possono seguire due modi di ricostruzione, per i quali si fa ricorso ad elementi d'acciaio:

- con protesi interamente d'acciaio;
- con protesi d'acciaio all'intradosso e con la ricostruzione in legno della parte di trave asportata;
- con protesi costituite da profilati piatti d'acciaio.

3.2.1. Ricostruzione dell'appoggio della trave con una scatola di acciaio

La *figura 3.2.1.a* mostra un intervento sull'appoggio ottenuto con la posa in opera di una cuffia d'acciaio resa solidale alla trave per mezzo di barre filettate e bulloni d'acciaio, serrati con dadi e rondelle. Il suo interno può rimanere vuoto od essere riempito con malta epossidica.

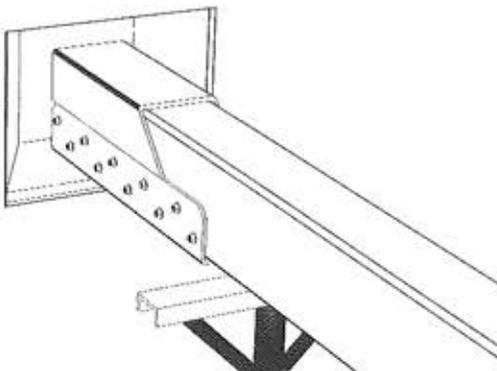


Fig. 3.2.1.a – Ricostruzione dell'appoggio della trave con protesi interamente d'acciaio.

3.2.2. Ricostruzione dell'appoggio della trave con profilati di acciaio all'intradosso e rigenerazione con legno della parte di trave rimossa

In questo caso si fa ricorso a due profilati d'acciaio a "L", oppure ad un piatto d'acciaio sagomato in officina (*fig. 3.2.2.a*).

La parte di trave rimossa è sostituita dalla sua esatta copia - possibilmente di essenza simile - e unita con resine o collanti, anche facendo ricorso ad una dentatura scolpita su entrambe le facce. Il sagomato d'acciaio, prodotto in officina, deve giungere in cantiere già forato solo su una faccia per consentire di eseguire una perforazione "libera" da vincoli che una foratura su entrambe le facce invece imporrebbe.

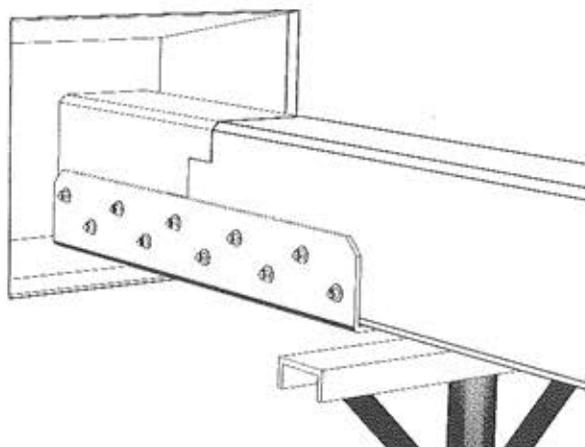


Fig. 3.2.2.a - Ricostruzione dell'appoggio della trave con protesi d'acciaio all'intradosso e rigenerazione con legno della parte di trave rimossa.

3.2.3. Ricostruzione dell'appoggio della trave con profilati piatti di acciaio

L'intervento proposto consiste nell'eseguire, dopo aver effettuato l'asportazione della parte ammalorata della testa della trave, tagli paralleli all'asse (*fig. 3.2.3.a*) nei quali inserire profilati piatti d'acciaio di adeguato spessore, precedentemente preparati fuori opera (*fig. 3.2.3.b*).

Le "lame" possono essere saldate ad un altro elemento d'acciaio che costituirebbe nuovo appoggio.

Queste operazioni di rigenerazione delle testate possono essere eseguite senza lo smontaggio della trave e dell'impalcato ad essa sovrastante.

Barre filettate o bulloni e dadi "a scomparsa" completano il collegamento; i tagli potrebbero anche essere saturati con resine epossidiche (*fig. 3.2.3.c*). L'intervento termina con la ricostruzione della parte di trave asportata con protesi di legno o di malta epossidica (*figure 3.2.3.d e 3.2.3.e*).

La prima comporta la costruzione dell'esatta parte mancante con un elemento di legno (*fig. 3.2.3.d*); la seconda il rifacimento con una malta epossidica gettata all'interno di una cassaforma (*fig. 3.2.3.e*).

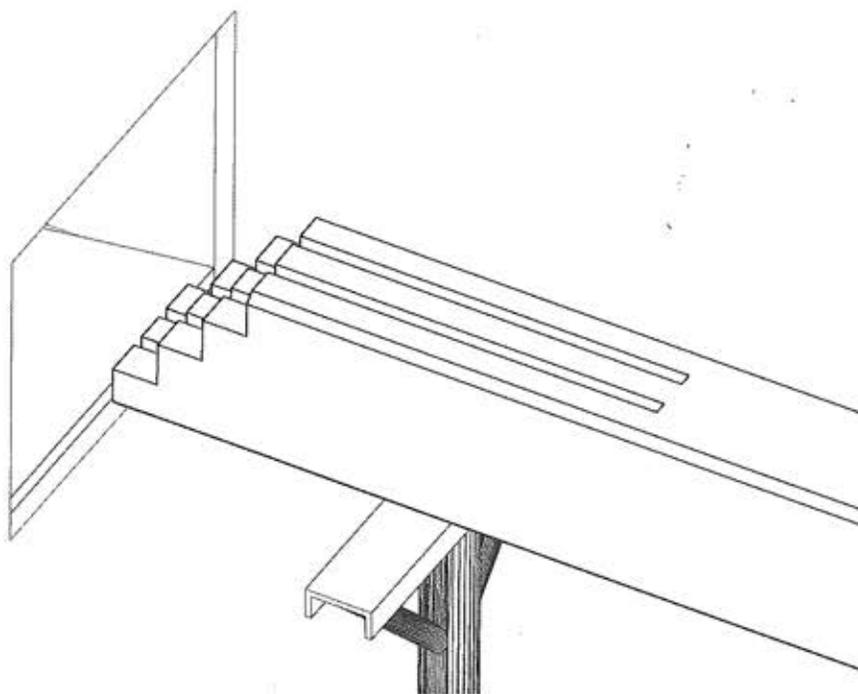


Fig. 3.2.3.a – Ricostruzione dell'appoggio della trave con protesi costituita da profilati piatti d'acciaio. Fase 1: rimozione della parte ammalorata; esecuzione della sagomatura della parte da rigenerare e dei tagli per l'alloggiamento dei profilati piatti.

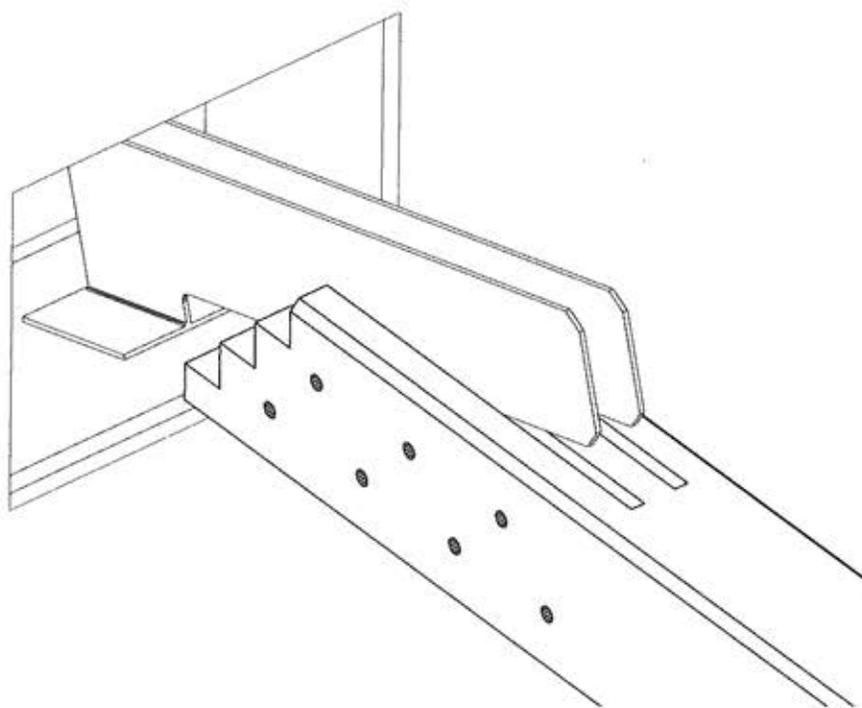


Fig. 3.2.3.b – Ricostruzione dell'appoggio della trave con protesi costituita da profilati piatti d'acciaio. Fase 2: inserimento dei profilati piatti d'acciaio all'interno dei tagli (M. Mariani).

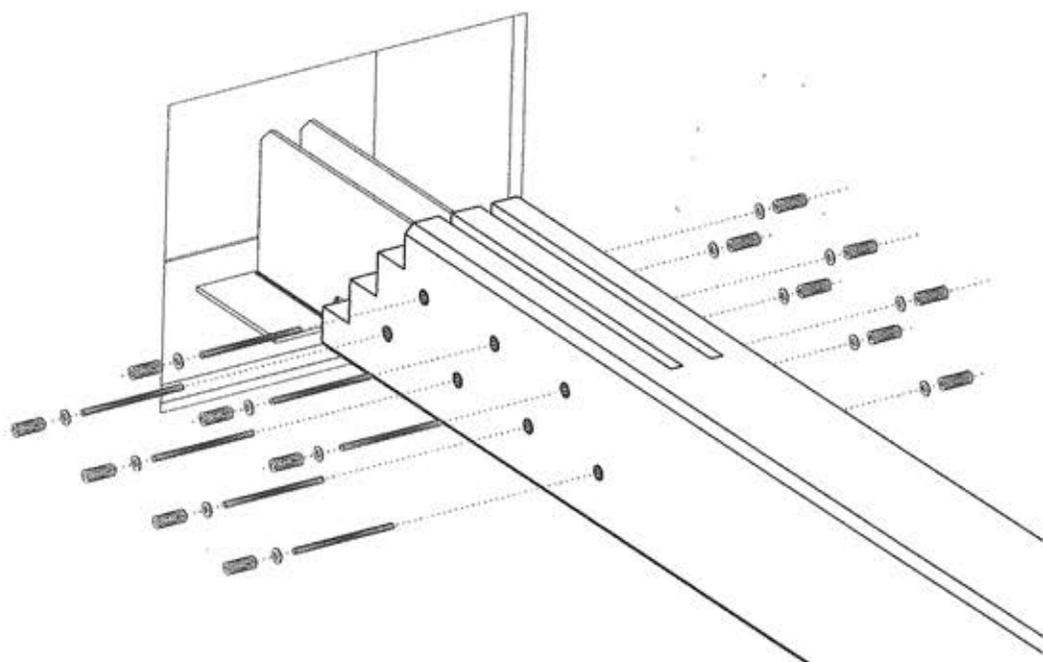


Fig. 3.2.3.c – Ricostruzione dell'appoggio della trave con protesi costituita da profilati piatti d'acciaio. Fase 3: perforazione dell'insieme legno-acciaio e inserimento di barre filettate o bulloni collegati con dadi "a scomparsa" e delle resine epossidiche.

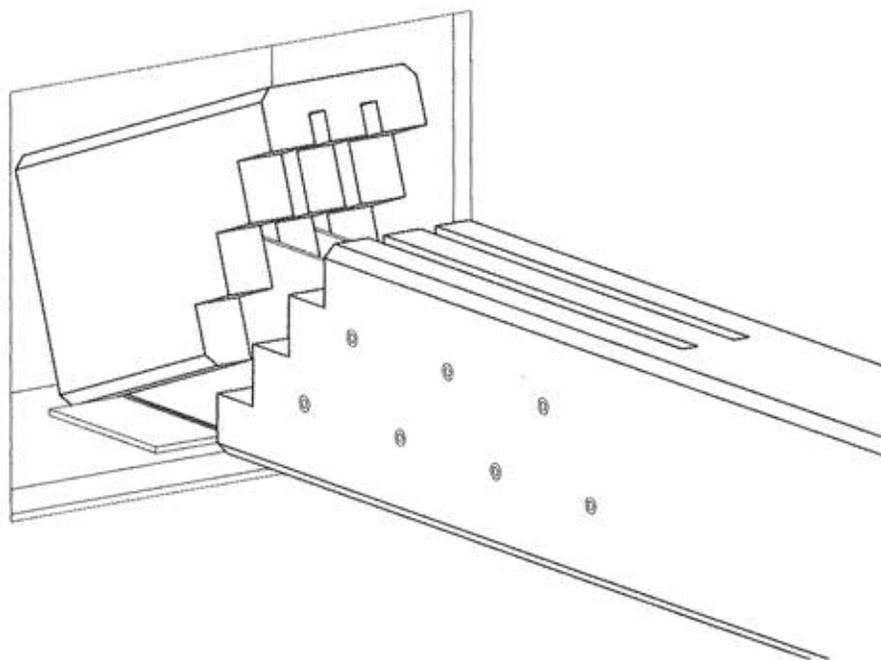


Fig. 3.2.3.d – Ricostruzione dell'appoggio della trave con protesi costituita da profilati piatti d'acciaio. Fase 4: posa in opera della protesi di legno.

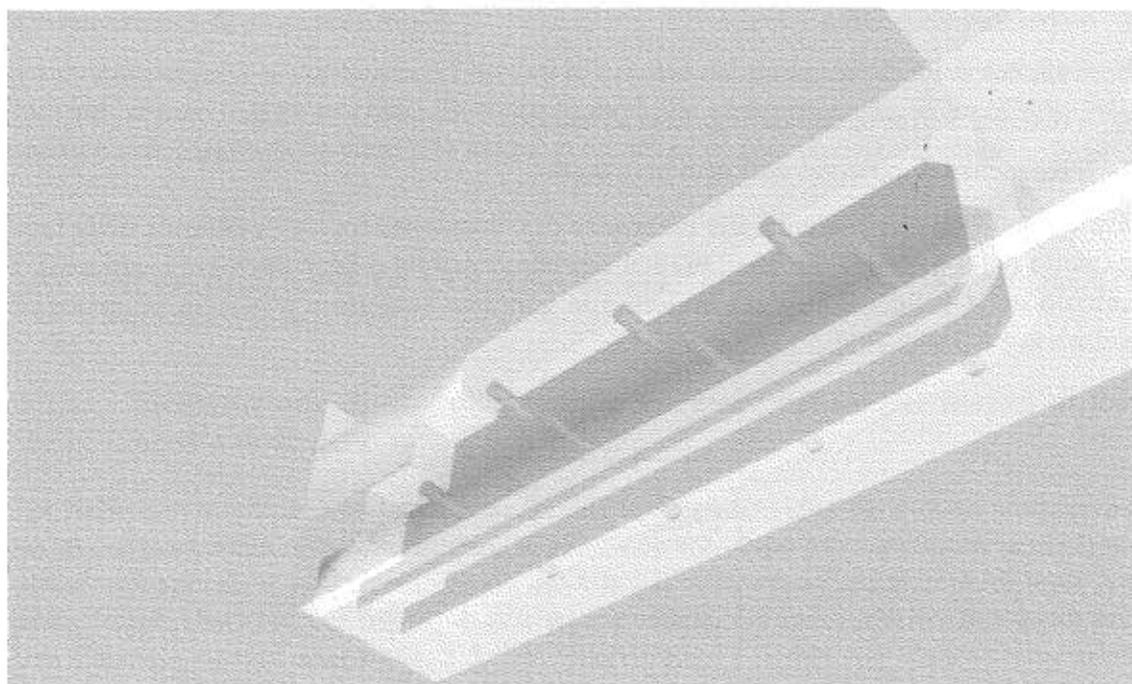


Fig. 3.2.3.e – Ricostruzione dell'appoggio della trave con protesi costituita da profilati piatti d'acciaio. Fase 5: protesi con malta epossidica e chiusura dell'apertura sul muro con "aria" al contorno.

3.2.3.1. Dimensionamento del sistema di rinforzo

Facendo riferimento agli schemi e al carico di progetto di cui al punto 3.1.1. precedente, nella sezione da risanare le sollecitazioni agenti sono:

Schema a trave semplicemente appoggiata agli estremi

$$M_x = \frac{F_d \cdot x}{2} (L - x) \quad T_x = F_d \left(\frac{L}{2} - x \right)$$

Schema a trave incastrata agli estremi

$$M_x = \frac{F_d}{12} (L^2 - 6Lx + 6x^2) \quad T_x = \frac{F_d}{2} (L - 2x)$$

Si dovrà in primo luogo adottare una piastra (o più piastre) di sezione tale da sopportare le seguenti sollecitazioni:

$$\sigma_{max} = \frac{M}{W_x} = \frac{6M_x}{t \cdot h^2} < f_d \quad \text{per la flessione}$$

$$\tau_{max} = \frac{T_x}{t \cdot h} < f_{d,v} \quad \text{per il taglio}$$

nelle quali:

6. RISANAMENTO DELLE CAPRIATE CON FUNI O BARRE DI ACCIAIO

6.1. INTERVENTO DIRETTO SULLA TRAVE DI FALDA

Quando la trave di falda (puntone) manifesta una deformazione dovuta a flessione, si può intervenire sostenendo la struttura con due funi d'acciaio munite di tenditori e di morsetti ad attrito. Questo sistema si avvale di piastre, anch'esse d'acciaio, che costituiscono gli ancoraggi di testa delle funi e i bracci di trasferimento delle sollecitazioni (*fig. 6.1.a*) resi solidali alla trave attraverso dadi, rondelle e barre filettate o bulloni fissati (se si vuole) alla trave per mezzo di resine epossidiche iniettate nei fori (*fig. 6.1.b*).

Le funi, in corrispondenza degli ancoraggi e dei bracci, scorrono su pulegge che ne consentono il movimento sia in fase di presollecitazione generata dai tenditori, sia in fase di ripristino del carico dopo la rimozione dei puntelli, che a seguito del sopraggiungere di sovraccarichi accidentali (*fig. 6.1.c*). Ogni puleggia è chiusa da una "sicura" ottenuta con un anello di lamiera che confina la fune evitandone lo scavallamento.

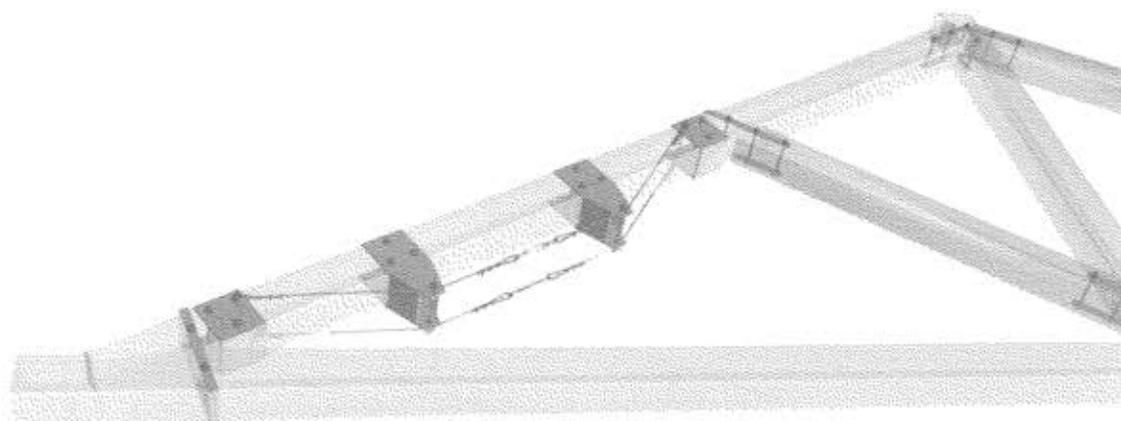


Fig. 6.1.a – Intervento sulla trave di falda con due puntoni (M. Mariani).

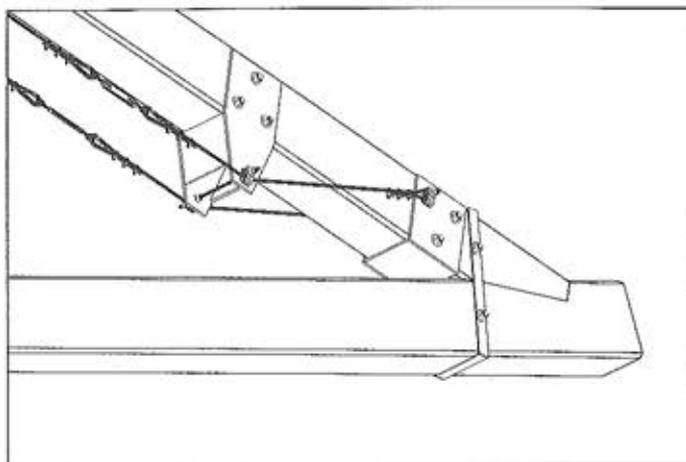


Fig. 6.1.b – Particolare dell'ancoraggio e del puntone vicino al tirante (M. Mariani).

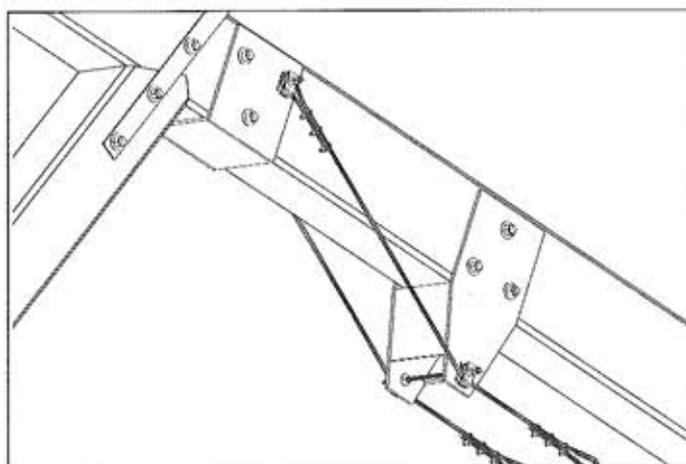
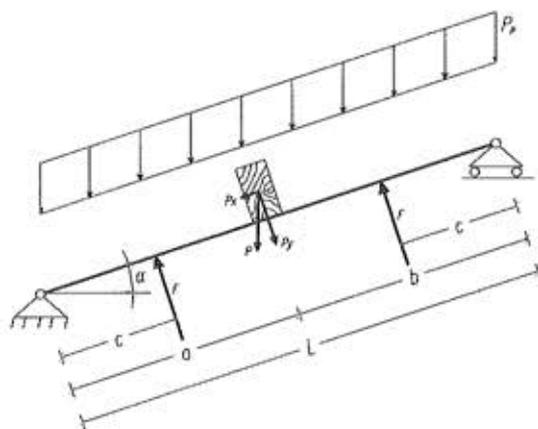


Fig. 6.1.c – Particolare del puntone e dell'ancoraggio vicino al contraffisso (M. Mariani).

6.1.1. Dimensionamento del sistema di rinforzo

6.1.1.1. Schema statico

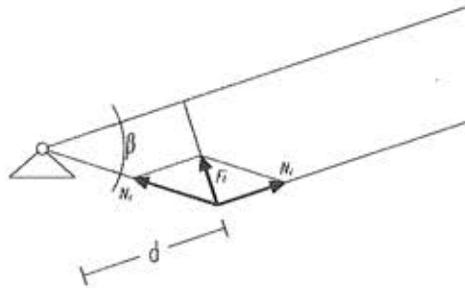


L'intento è quello di annullare nel punto di momento massimo il momento derivante dal carico dell'arcareccio (o degli arcarecci) e dal peso proprio della trave. L'equivalenza vale:

$$\frac{1}{8} p_p \cdot L^2 \cos \alpha + \frac{\cos \alpha}{L} \sum_i P_i a_i b_i = F \cdot c$$

È necessaria una forza su ogni singola fune pari a:

$$F_i = \frac{F}{2} = \frac{1}{16c} p_p L^2 \cos \alpha + \frac{\cos \alpha}{2Lc} \sum_i P_i a_i b_i$$



Tale forza può essere ottenuta tramite trazione su ciascuna fune d'acciaio pari a:

$$N_i = \frac{F_i}{\sin \beta}$$

che svilupperà una tensione $\tau = \frac{N_i}{A}$ che dovrà risultare inferiore alla resistenza di progetto f_d

6.1.1.2 Verifica al taglio del bullone di ancoraggio delle funi

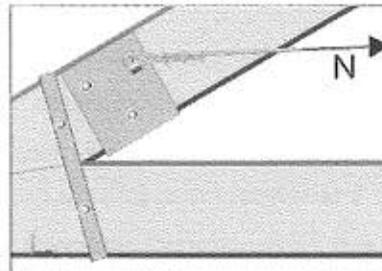
L'ancoraggio delle funi è assicurato da un bullone passante per il quale:

$$\tau_b = \frac{N_i}{A_b} = \frac{4 \cdot N_i}{\pi \cdot d^2} \leq f_{d,v}$$

dove:

d = diametro del bullone

$f_{d,v}$ = resistenza di progetto a taglio



6.1.1.3 Dimensionamento dello spessore della lamiera

Per il dimensionamento delle lamiere è necessaria la verifica al rifollamento.

A tal fine, ammettendo l'uniforme distribuzione delle pressioni di contatto tra bullone e

- ▶ **Manuale per la riabilitazione e la ricostruzione post sismica degli edifici, con CD Rom**
Regione dell'Umbria
- ▶ **Ricerche per la ricostruzione Regione dell'Umbria**
di A. Avorio, A. Borri e M. Corradi
- ▶ **Manuale Operativo per il Restauro Architettonico, con CD Rom**
di S. Franceschi, L. Germani
- ▶ **Diagnosi dei dissesti e consolidamento delle costruzioni**
di L. Baruchello, G. Assenza
- ▶ **Consolidamento e manutenzione delle strutture in cemento armato, con CD Rom**
di C. Scialò
- ▶ **Manuale del consolidamento**
di P. Rocchi
- ▶ **Interventi di restauro**
di G.F. Guidi
- ▶ **Prezzi Informativi dell'Edilizia: Restauro dei Beni Artistici, con CD Rom**
in collaborazione con ARI
Associazione Restauratori Italiani
- ▶ **Prezzi Informativi dell'Edilizia: Recupero Ristrutturazione Manutenzione, con CD Rom**

per informazioni tel. 064416371
www.build.it dei@build.it

- ▶ **Il Manuale** raccoglie un'ampia casistica di soluzioni tecniche per il consolidamento ed il rinforzo delle strutture dissestare utilizzando materiali antichi, quanto fondamentali, come il legno e il ferro. L'analisi e la descrizione delle attuali tecniche di intervento è supportata, oltre che dalla varietà dei casi proposti, da indirizzi di modellazione e di calcolo. Il risultato finale si traduce in uno strumento operativo e, allo stesso tempo, conoscitivo utile al Progettista per individuare la soluzione più idonea in rapporto al valore dell'opera e nel rispetto della struttura di legno da consolidare.

I Contenuti

- Le Tecniche di costruzione:
 - il legno e i metalli nell'antichità
 - le strutture legno - ferro
- Le Tecniche di consolidamento:
 - risanamento degli appoggi delle travi e dei collegamenti delle membrature
 - intervento locale su travi soggette prevalentemente a trazione
 - intervento locale su travi soggette prevalentemente a flessione e taglio
 - risanamento di capriate
 - travi rinforzate con funi di acciaio presollecitate
 - rinforzo di volte in camera canna
 - connettori di acciaio per il rinforzo dei solai
 - puntellatura sospesa per il sostegno e per il sollevamento delle strutture da consolidare
 - appoggi.

Il CD Rom allegato al volume raccoglie un'ampia casistica di particolari costruttivi, in formato .jpg e .tif, e di soluzioni tecnologiche da consultare ed utilizzare come supporto alla didattica e/o alla progettazione.

REQUISITI TECNICI

Spazio minimo su disco: 120 Mb
 Risoluzione video consigliata: 1024x768 pixel
 Windows 9x/Windows ME/Windows NT/Windows 2000
 Windows XP
 oltre al pacchetto Office 97/Office 2000/Office XP

