

IL RISPETTO DEL COSTRUITO SALVAGUARDANDO I CINEMATISMI ORIGINARI DI ROTTURA (CODICE GENETICO DI ROTTURA)¹

PAROLE CHIAVE: CODICE GENETICO DI ROTTURA, CAPRIATA, SCHEMA STATICO, NODI, RESTAURO

Prof. Ing. Placido Munafò, ing. Matteo Grilli
Istituto di Architettura e Produzione Edilizia, Facoltà di Ingegneria
Università Politecnica delle Marche
Via Breccie Bianche – ANCONA

SUMMARY

The research into the structural behaviour of the overall or individual structural elements in an historical building is necessary from the viewpoint of the design and realization of interventions. In addition to guaranteeing static security of the building itself, these contribute towards a better protection of its materials and of building tradition and culture that it represents.

In particular, the identification of the possible kinematic breaking points of individual elements or macro-elements makes it possible to understand the ways in which these have been conceived and carried out, both in relation to the materials as well as the building technique used in their realization. In this way we can define the “*Genetic Code of Collapse*” as a kind of DNA of the constructive element, analysed through the identification of the possible kinematic breaking points

Through the identification and study of these kinematic elements it is possible to find a relationship between the original construction technology and the need to preserve the historical materials and constructive and cultural tradition expressed by the historical buildings. These are values to be conserved and passed on rather than dispersed.

This kind of approach to the restoration of elements constructed in wood, considering that wood is sensitive to the “history” of the forces to which it has been subjected, gives rise to a preference for intervention techniques that do not alter the stress regime of the elements, imposing a clear and objective distinction between intervention techniques that respect or do not respect the so-called “*Genetic Code of Collapse*”.

Various results are shown of an experimental research carried out on the joints of wood trusses that make it possible to verify our theories about some common techniques of intervention.

¹ Ricerca diretta e coordinata dal prof. Placido Munafò con la partecipazione del prof. Fabrizio Davì dell’Istituto di Scienza e Tecnica delle Costruzioni, Facoltà di Ingegneria – Università Politecnica delle Marche di Ancona (cfr. bibliografia)

1 PREMESSA

Le linee moderne del restauro pongono particolare attenzione ai contenuti culturali e materiali dei monumenti e quindi al loro portato di informazioni che spesso risultano a prima vista “nascoste”. La conservazione di queste “informazioni”, nella loro accezione più ampia, è uno degli obiettivi primari del restauro, in tal senso si colloca la ricerca di cui si relaziona in questo contributo e che ha per oggetto le capriate lignee storiche. I loro aspetti funzionali, tecnologici e figurativi rappresentano un baglio di informazioni da preservare al fine di tramandare ai posteri queste importanti testimonianze del passato. In quest’ottica è opportuna una attenta riflessione sulle tecniche di intervento, sia esse volte ad una loro rifunzionalizzazione che alla loro conservazione. Tenuto conto del tipo di materiale base utilizzato per la loro costruzione, nonché della tradizione culturale e costruttiva che le ha prodotte, si ritiene opportuno non limitare l’attenzione al semplice mantenimento dei loro veicoli materiali, bensì approfondire la conoscenza sul loro comportamento statico, specie a rottura, al fine di “conservarlo” anche negli interventi che si intende attuare. Infatti, come si vedrà in seguito, l’individuazione dei cinematismi di rottura, consente di penetrare più a fondo sulla concezione originaria di tali strutture rappresentando una sorta di DNA da mantenere inalterato, quello che abbiamo chiamato “*Codice Genetico di Rottura*”. Individuarlo permette di selezionare in maniera più oggettiva quelle tecniche di intervento che sono meno invasive e che consentono di mantenere un funzionamento statico corretto della capriata lignea, mantenendo cioè il suo comportamento originario a rottura.

2 IL CODICE GENETICO DI ROTTURA

La tesi sostenuta e sopra accennata, trae origine dalla considerazione che le capriate storiche erano realizzate in maniera tale da giungere a collasso, all’aumentare dei carichi su di esse agenti, seguendo un determinato “percorso” non casuale, ma determinato da accorgimenti specifici quali il dimensionamento degli elementi costituenti, la realizzazione dei nodi, la scelta delle specie legnose, fattori questi che rappresentano la sintesi delle conoscenze derivanti dalla pratica, dalle “regole dell’arte” del costruire e dalla cultura del passato spesso legati a tradizioni anche locali.

Occorre inoltre considerare che il legno è un materiale che risente della “storia” delle sollecitazioni subite, ed è quindi opportuno in fase di diagnosi e di progetto degli interventi, tenere conto anche di questa peculiarità del materiale legno.

Quanto sopra esposto, porta a ritenere importante il rispetto del regime tensionale agente negli elementi costituenti la struttura e, più in generale, al rispetto del suo “schema statico” originario nonché dei suoi cinematismi di rottura.

Definiamo allora *Codice Genetico di Rottura* i cinematismi originari di rottura dell’elemento costruttivo che sono conseguenza delle modalità e delle scelte applicate all’atto della sua realizzazione. L’individuazione del *Codice Genetico di Rottura* di una struttura permette allora di intervenire sulla struttura stessa mantenendo quanto più possibile intatto il portato culturale e tecnologico dell’elemento, che risiede non solo nei suoi veicoli materiali ma anche nella sua conformazione architettonica e configurazione costruttiva, avvalendosi di metodi e modelli matematici che permettono di quantificare e comparare i risultati degli interventi.

L’approccio storico-critico e tecnico-scientifico trovano, nell’individuazione del *Codice Genetico di Rottura* delle strutture in esame, una sintesi efficace per l’individuazione di metodologie di intervento che, in questo preciso e delimitato ambito di studio (capriate lignee), forniscono in maniera chiara elementi di valutazione degli interventi stessi. Al fine di verificare

la praticabilità dei concetti sopra esposti, si sono studiate alcune capriate lignee² del tipo a catena caricata e a triangolo indeformabile ed i loro possibili cinematismi di rottura.

In particolare si è elaborato, parallelamente alla sperimentazione, un modello matematico di studio che consente di valutare le modalità di collasso mettendo in relazione la forza assiale ultima (N_r) delle aste delle capriate con il carico applicato ai nodi³ ($\lambda * P$, dove λ è il moltiplicatore dei carichi applicati P) ed il momento di plasticizzazione dei nodi stessi (M_p).

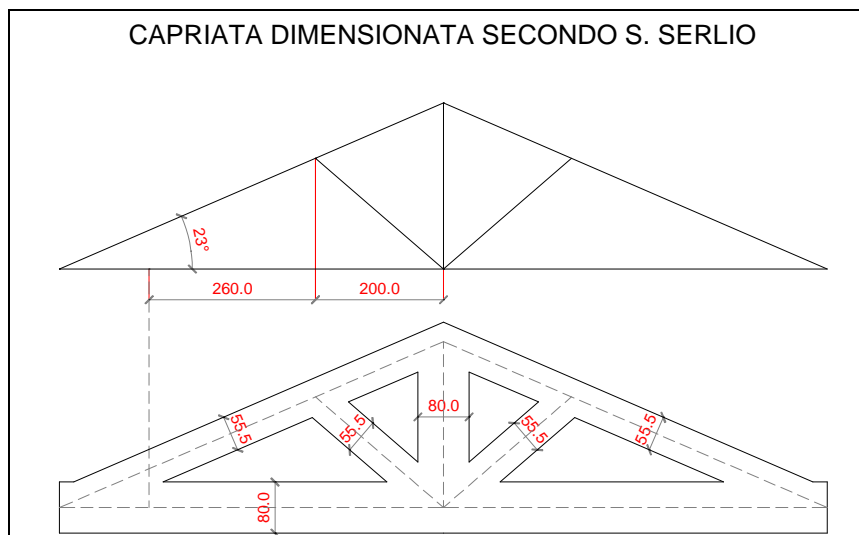


Figura 1: Capriata dimensionata secondo Sebastiano Serlio

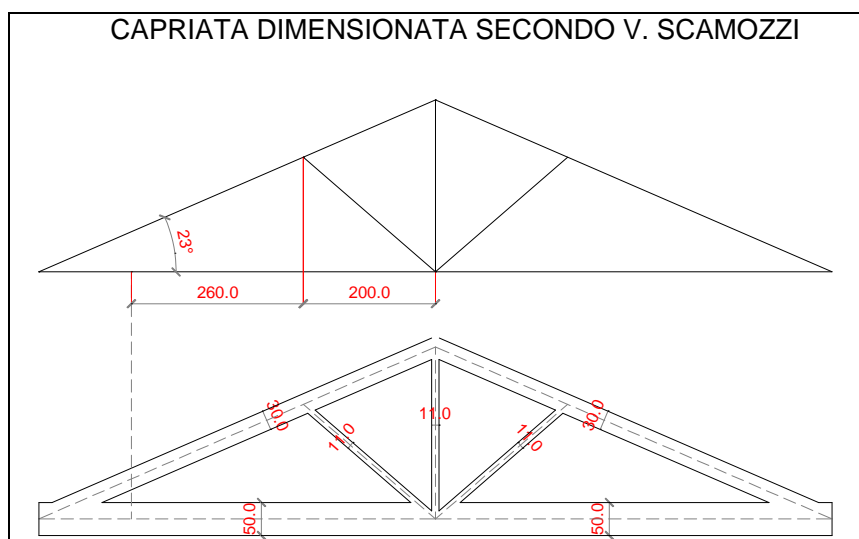


Figura 2: Capriata dimensionata secondo Vincenzo Scamozzi

² Si sono studiate tre capriate disegnate rispettivamente da Sebastiano Serlio, Vincenzo Scamozzi e Jean-Baptiste Rondelet (per le fonti vedi Bibliografia).

³ Come noto, nella realtà, le capriate sono quasi sempre caricate in maniera qualunque, ovvero, non solo sui nodi; inoltre i nodi non si comportano come cerniere perfette; tuttavia si è ritenuto lecito introdurre queste semplificazioni in quanto non inficiano la natura dei risultati dello studio.

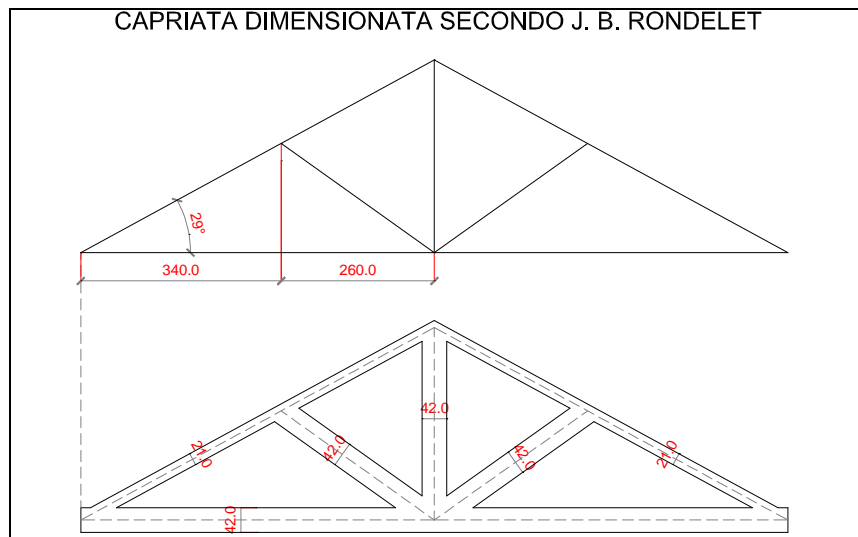


Figura 3: Capriata dimensionata secondo Jean-Baptiste Rondelet

In pratica si sono studiati i cinematismi che insorgono dopo l'applicazione dei carichi λ^*P : in una prima fase si sono studiati i cinematismi che possono insorgere dopo la plasticizzazione di tutti i nodi, ovvero dopo che tutti i nodi si sono trasformati in cerniere plastiche soggette a momento di plasticizzazione; in una seconda fase si sono studiati i cinematismi che invece possono insorgere prima che tutti i nodi siano plasticizzati, ovvero quando si ha rottura delle aste prima della plasticizzazione di tutti i nodi. Per ogni cinematismo della prima e della seconda classe si sono riportate su un piano $\lambda P - N_r$ le rette⁴ rappresentative del cinematismo stesso.

E' da evidenziare che si definiscono cinematismi "leciti" quelli che avvengono a seguito della plasticizzazione di tutti i nodi; "illeciti" quelli che avvengono prima che tutti i nodi siano plasticizzati.

Questa distinzione nasce dalla considerazione che, all'aumentare del carico λ^*P la sollecitazione N_r nelle aste delle capriate si sposta verso destra, innescando cinematismi leciti in quanto i punti a destra del valore indicato con N_r intercettano per primi la retta più bassa che prevede appunto la plasticizzazione di tutti i nodi.

Infatti il primo cinematismo che si verifica all'aumentare dei carichi, nelle capriate della tradizione costruttiva storica, risulta essere proprio quello derivante dalla plasticizzazione dei nodi e non quello derivante dalla rottura delle aste. Per questo motivo abbiamo chiamato la prima classe di cinematismi "leciti" e la seconda "illeciti". E' da sottolineare che questo comportamento è stato verificato per tre tipi di capriata realizzati secondo le "regole del costruire" tramandatici dai trattatisti storici, ed in particolare, dal Serlio (capriata a catena caricata), dallo Scamozzi (capriata a catena caricata) e dal Rondelet (capriata a triangolo indeformabile).

⁴ Le equazioni delle rette si ottengono applicando il Principio dei Lavori Virtuali alla capriata, dove gli spostamenti si ottengono imponendo di volta in volta i vari cinematismi possibili.

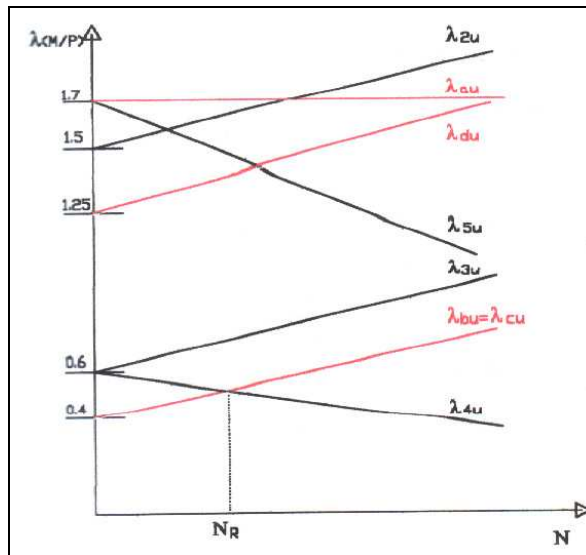


Figura 4: Grafici $\lambda(M/P) - N$ per la capriata disegnata da S. Serlio. In nero sono segnati i cinematici leciti; in rosso quelli non leciti.

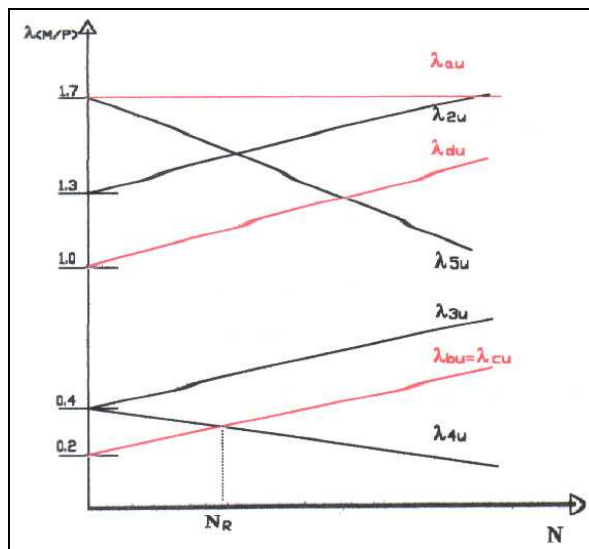


Figura 5: Grafici $\lambda(M/P) - N$ per la capriata disegnata da V. Scamozzi. In nero sono segnati i cinematici leciti; in rosso quelli non leciti.

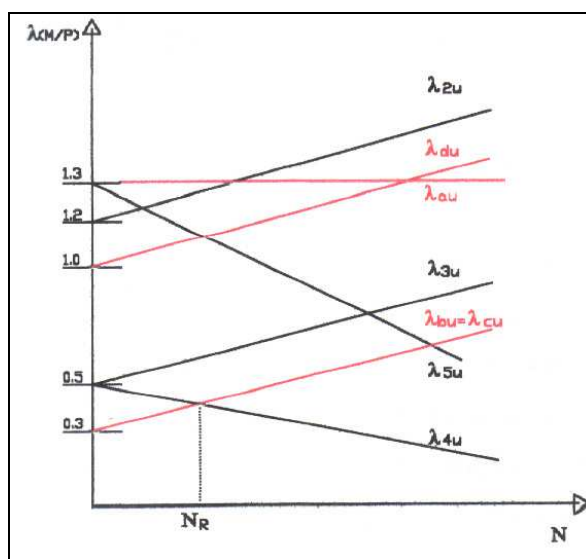


Figura 6: Grafici $\lambda(M/P) - N$ per la capriata disegnata da J. B. Rondelet. In nero sono segnati i cinematici leciti; in rosso quelli non leciti.

Dunque, alla luce delle considerazioni precedenti circa la conoscenza ed il rispetto degli “schemi statici” originari e del regime tensionale delle aste, nel rispetto del *Codice Genetico di Rottura*, si ritengono idonee quelle tecniche di intervento che mantengono inalterato tale cinematismo di rottura e quindi tale regime tensionale.

Prendendo in considerazione alcuni interventi abbastanza diffusi sui nodi di giunzione puntone-catena (solitamente più soggetti di altri ad agenti di degrado), si ritengono adeguati quegli quelli che preservano il funzionamento statico originario del nodo stesso come, ad esempio, la realizzazione di un’efficace staffatura metallica o, in casi estremi, l’applicazione di protesi che riproducano il suo funzionamento a cerniera.

Viceversa, la trasformazione del nodo puntone-catena in incastro (si prenda ad esempio l’intervento realizzato con un getto di betoncino epossidico armato con barre di vetroresina) non si ritiene rispettoso del *Codice Genetico di Rottura* perché innesca cinematismi di rottura tali da prevedere, all’incrementare del carico $\lambda \cdot P$, la rottura delle aste prima della plasticizzazione del nodo.

Nel caso delle capriate, se le aste hanno sezioni di dimensioni idonee, non è solitamente necessario aumentare le prestazioni meccaniche né delle aste né delle giunzioni; è sufficiente invece ripristinare l’eventuale perdita funzionalità delle giunzioni, rispettandone la natura statico-costruttiva originaria.

In tale maniera si garantisce il mantenimento e la trasmissione sia dei veicoli materiali della capriata, sia del portato di informazioni che risiede nella configurazione costruttiva degli elementi.

3 LA SPERIMENTAZIONE: IL CASO DI STUDIO DEL NODO PUNTONE-CATENA

Per verificare l’applicabilità dei concetti sopra espressi alla realtà del costruito, si è proceduto alla modellazione in laboratorio di nodi puntone-catena, realizzati secondo la tradizione costruttiva così come c’è stata trasmessa dai trattatisti⁵ del passato.

Obiettivo della sperimentazione è stato la valutazione del momento di plasticizzazione di un nodo a semplice dente cuneiforme, comunemente utilizzato per la connessione puntone-catena di una capriata lignea di luce corrente, sul quale si sono applicate diverse tecniche di intervento.

Le condizioni di prova sono state scelte non per simulare rigorosamente l’effettivo comportamento del collegamento in condizioni di esercizio, bensì per stabilire se il problema della valutazione dell’efficienza e dell’adeguatezza di un intervento possa essere risolto con il calcolo a rottura, in modo da giustificare ed indirizzare eventuali successive ricerche orientate all’individuazione di un criterio specifico di giudizio. L’incertezza dei dati relativi alle strutture storiche o semplicemente esistenti, per quanto concerne il continuo, è molto più rilevante rispetto a quella delle nuove strutture: essa deriva dall’intrinseca eterogeneità dei materiali, dalle mutazioni subite dall’apparecchio, dai fenomeni di fatica, dalla naturale obsolescenza dei materiali, dalla riduzione di efficienza dei vincoli. Inoltre le strutture lignee non possono essere sottoposte a smontaggi per prove di laboratorio perché queste operazioni equivalgono alla distruzione certa non solo dell’orditura originaria, ma anche delle connessioni e del materiale stesso⁶.

I nodi sono stati realizzati in scala reale utilizzando, quando possibile, legno antico proveniente da cantieri di restauro. Dal medesimo materiale sono stati preventivamente estratti provini

⁵ Si è scelto di rifarsi ai modelli descritti da A. R. EMY in “*Trattato dell’arte del carpentiere*”, Venezia, 1856, a cura di Gustavo Bucchia, trad. di Antonio Romano, Edizioni G. Antonelli

⁶ GENNARO TAMPONE, “*Il restauro del legno*”, da Atti del II Convegno Nazionale Restauro del Legno, Cardini Editore, vol II, pag. 171

utilizzati per determinare le caratteristiche meccaniche del materiale secondo le norme UNI ISO⁷.

Le prove sono state condotte sottoponendo la struttura in esame ad incrementi di carico P fino al raggiungimento del campo plastico; a questo punto si è potuto dedurre il momento plastico M_p ⁸. Quindi, nelle equazioni che individuano i possibili meccanismi di rottura della capriata, si è “entrati” con il valore del momento di plasticizzazione dedotto dai diversi casi di sperimentazione e si è ricavato il valore dello sforzo assiale ultimo delle aste N_r , utilizzando i valori della tensione σ_R : $N_r = \sigma_R * A$ (dove A è l’area della sezione delle aste e σ_R è la tensione normale ultima misurata nella sezione dell’asta stessa). In tal modo è stato possibile ricavare le rette del piano carico-forza assiale ultima e definire un cinematismo lecito quando il valore di N_r delle aste era maggiore del valore N_r^* , valore per cui le aste collassano prima dei nodi.

Occorre infine sottolineare come il momento ultimo, calcolato come $M_u = P * L$, dove P è il carico applicato ed L il braccio, risulta molto inferiore al valore calcolato tramite le formule di Navier ($M_u = \sigma_R * W$); la differenza tra il valore teorico e dato sperimentale é da ricondurre al fatto che il legno non soddisfa le ipotesi di D.S.V., non essendo un materiale omogeneo isotropo e simmetrico. Inoltre occorre considerare come il suo comportamento sia influenzato anche dalla specie legnosa oggetto di studio.

Alla luce di queste considerazioni è possibile allora definire il modulo di rigidezza $W = bh^2/6$ con un esponente di h inferiore a 2⁹.

3.1 RINFORZO DEL NODO TRAMITE STAFFATURA METALLICA

Si sono condotte due prove su modelli uguali di nodi puntone-catena per dimensioni e caratteristiche meccaniche del materiale, ma con staffature a diversa rigidezza. Come specie legnosa si è utilizzato l’Abete Bianco. La sperimentazione è stata condotta imponendo delle deformazioni controllate fino a raggiungere uno stato di crisi.

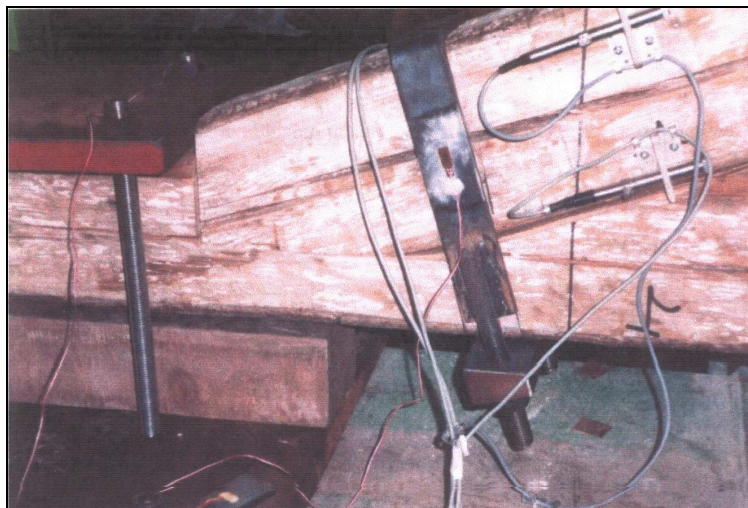


Figura 7: Modello utilizzato in laboratorio

⁷UNI ISO 3130: Legno. *Determinazione dell’umidità per le prove fisiche e meccaniche;*

UNI ISO 3131: Legno. *Determinazione della massa volumica per le prove fisiche e meccaniche;*

UNI ISO 3787: Legno. *Metodi di prova. Determinazione della resistenza a compressione parallela alla fibratura;*

UNI ISO 3345: Legno. *Determinazione della resistenza a trazione parallela alla fibratura;*

UNI EN 408: Strutture di legno. *Legno massiccio e legno lamellare incollato. Determinazione di alcune proprietà fisiche e meccaniche;*

⁸ $M_p = 3/2 M_u$; $M_u = P * L$

⁹ GUGLIELMO GIORDANO, “*La moderna tecnica delle costruzioni in legno*”, Hoepli Editore, Milano, 1964

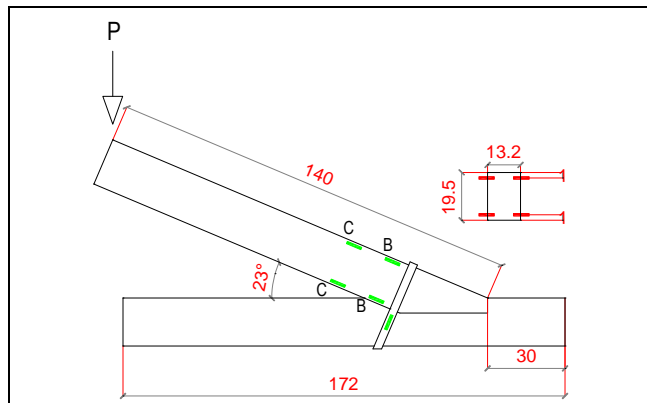
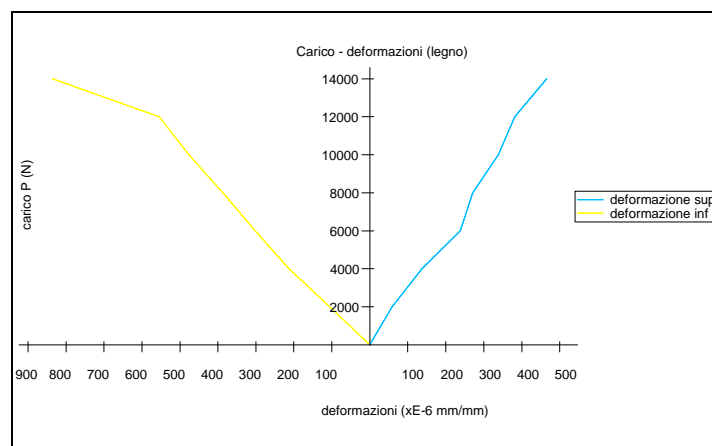
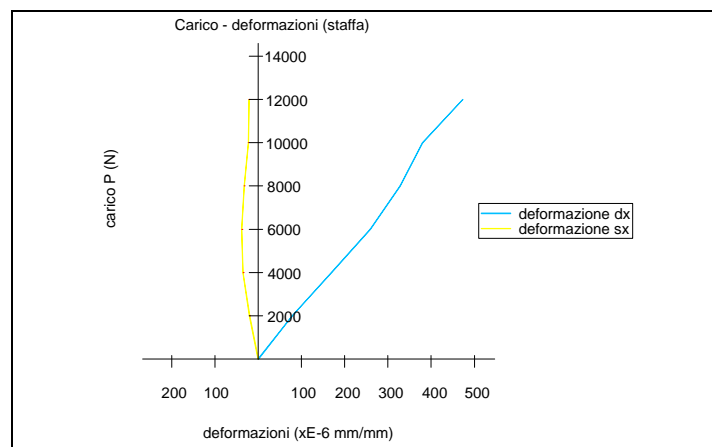


Figura 8: Geometria del modello utilizzato e posizione degli estensometri.

Per la determinazione delle deformazioni si sono utilizzati 8 estensometri con precisione pari a 1×10^{-6} mm, applicati nelle pareti laterali del puntone, e due estensimetri elettrici con errore di lettura dell'1%, per misurare le deformazioni della staffa metallica.

I risultati della prova effettuata con staffatura "debole" hanno evidenziato come in questo tipo di intervento la staffa (spessore 5,0mm) lavori prevalentemente a flessione e sia causa del collasso della struttura prima ancora che il nodo possa plasticizzarsi; vale a dire che il nodo subisce rotazioni dovute al cedimento della staffa anziché alla formazione della cerniera plastica.

La seconda prova è stata effettuata con una staffatura decisamente più rigida (spessore 10.0mm), in modo da garantire il collegamento tra le aste fino alla rottura. Si è in tal modo raggiunta la plasticizzazione del nodo puntone-catena e determinato il valore del momento di plasticizzazione del nodo M_p .



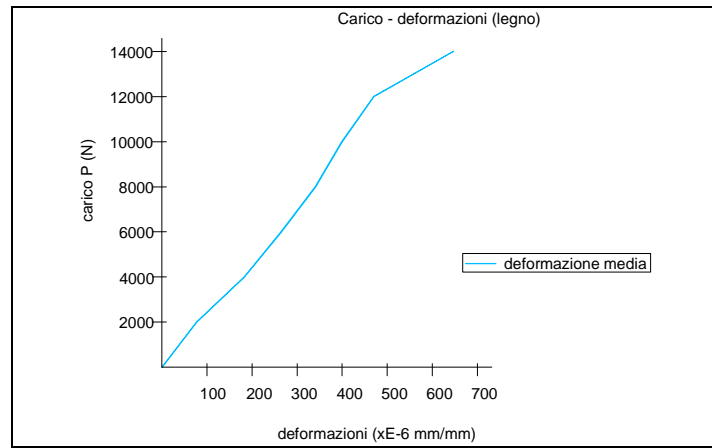


Figura 9: Grafici P-ε nelle sezioni monitorate.

Per ricavare il momento M_p di plasticizzazione si è ricavato il momento limite M_0 corrispondente al carico P limite elastico e da questo appunto il momento di plasticizzazione:

$$M_0 = \sigma_R \times \frac{bh^2}{6} \quad (1)$$

$$M_p = \sigma_R \times \frac{bh^2}{4} \quad (2)$$

quindi, mettendo in relazione la (1) e la (2):

$$M_p = \frac{3}{2} M_0 \quad (3)$$

Applicando i valori sperimentali ricavati ad una capriata come quella riportata in figura 9 siamo in grado di tracciare nel piano $\lambda P - N$ le rette che individuano i possibili cinematismi di rottura. In particolare si possono evidenziare i cinematismi cosiddetti leciti ed illeciti attraverso le considerazioni più sopra riportate.

Senza trascrivere i passaggi matematici relativi all'impostazione delle equazioni che individuano le rette, riportiamo i risultati finali dell'applicazione dei dati sperimentali al modello di capriata. In particolare applichiamo alla capriata i momenti agenti ai nodi, aventi il valore del momento di plasticizzazione ricavato dalla sperimentazione¹⁰.

¹⁰ Si "entra" nella struttura con il valore del momento dedotto dal secondo esperimento, ovvero quello con la staffatura più rigida.

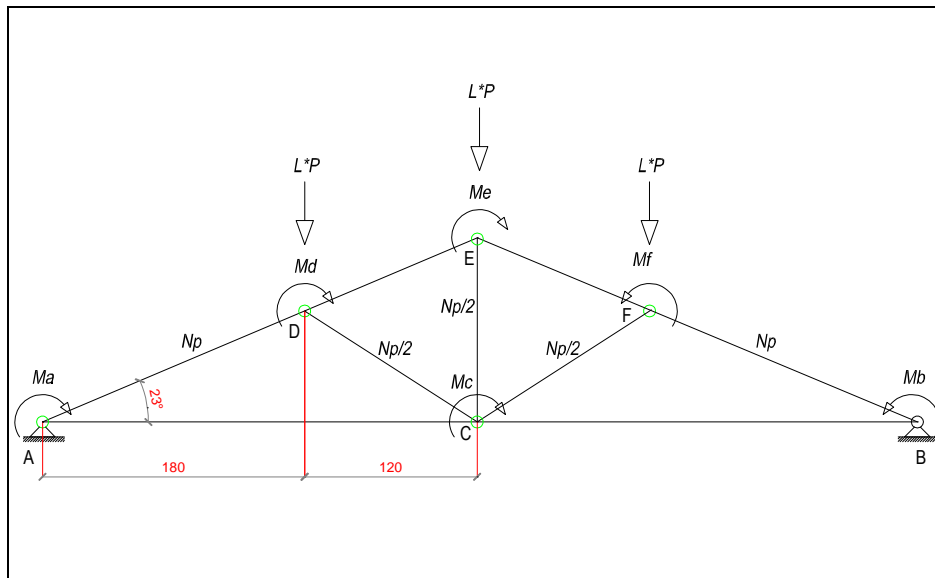


Figura 10: Schematizzazione della capriata

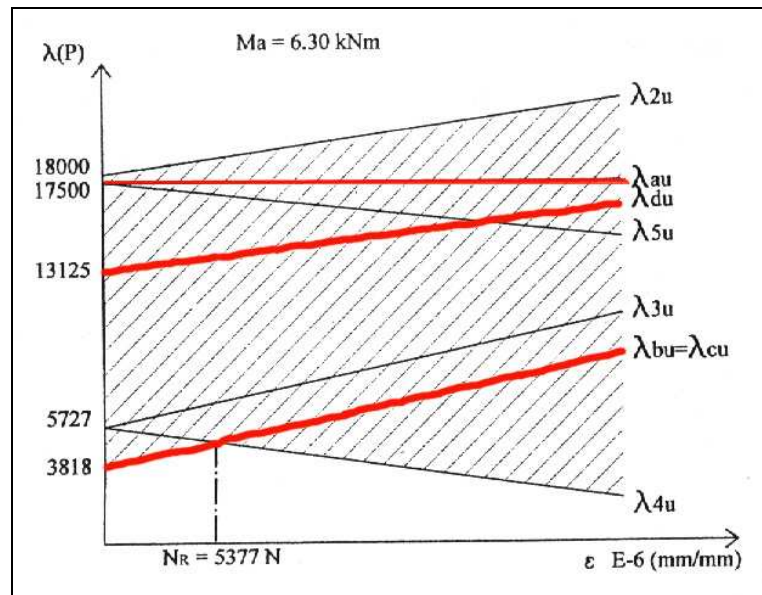


Figura 11: Grafico rappresentante le rette che descrivono i possibili cinematismi della capriata oggetto di studio. In rosso sono i cinematismi non leciti, in nero quelli leciti.

Dal grafico sopra riportato si evince che il meccanismo di rottura avviene per attivazione del cinematismo “illecito” λ_{bu} per valori di $N_R < N^*R$, e per il cinematismo “lecito” λ_{4u} quando $N_R > N^*R$.

Il valore di N^*R si ricava dall'equazione

$$\lambda_{bu} = \lambda_{4u}$$

e, omettendo il dato numerico, si evidenzia come tale valore di N^*R sia assai inferiore alla forza assiale ultima delle aste.

Ciò significa che la rottura avviene per plasticizzazione delle aste solo dopo che tutti i nodi si sono plasticizzati.

Il significato di questo dato è che il nodo puntone-catena a semplice dente cuneiforme rinforzato con staffatura metallica rigida consente di rispettare il funzionamento originario della capriata. Come controprova infatti possiamo ricavare i possibili cinematismi di rottura per la medesima capriata ipotizzando però di sostituire il nodo puntone catena con una protesi di materiale composito ad alta rigidezza, collegato al legno con barre di vetroresina.

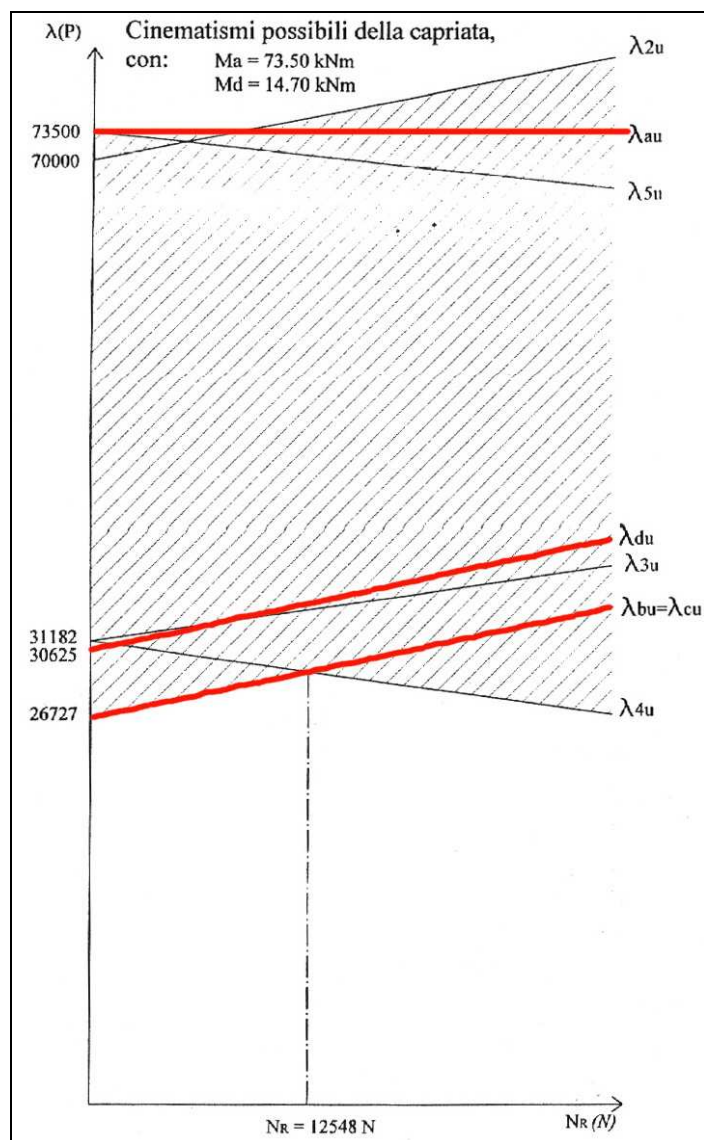


Figura 12: Grafico rappresentante le rette che descrivono i possibili cinematismi della capriata. Il momento di plasticizzazione dei nodi puntone-catena è stato aumentato per simulare un intervento che renda i nodi in oggetto molto rigidi.

Come si evince dal grafico di figura 11, il valore di N^*R è ora più alto della forza assiale ultima delle saette e del monaco: in questo caso quindi la rottura avviene per plasticizzazione del monaco prima che nei nodi puntone-catena si formino le cerniere plastiche.

Ciò significa che un intervento che irrigidisca in maniera eccessiva il nodo puntone-catena, trasforma il comportamento globale della capriata rendendo più probabili i cinematismi “illeciti”.

3.2 RINFORZO DEL NODO TRAMITE PROTESI ARMATA IN CONGLOMERATO EPOSSIDICO

Per questa sperimentazione sono state realizzate due tipi di protesi armata in conglomerato epossidico su nodi puntone-catena realizzate in legno di abete bianco.

Nel primo caso il nodo catena-puntone è stato ricostruito con un getto unico di resina a comprendere entrambe le aste, come avviene comunemente nella pratica (prova A); nel secondo caso il nodo è stato realizzato con due getti separati di resina epossidica per il puntone e per la catena, interponendo tra i getti un foglio di nylon, in modo da impedire un eccessivo irrigidimento flessionale del nodo e la conseguente trasformazione da cerniera ad incastro (prova B).

Prova A – Getto unico di formulato epossidico

Come struttura di prova è stato utilizzato un telaio metallico nel quale è stato inserito il prototipo. In testa al puntone è stato applicato il carico di prova P tramite un martinetto idraulico azionato manualmente, a cui è stato collegato un trasduttore di pressione opportunamente tarato per letture in daN.



Figura 13: Il modello in fase di getto della resina

La prova è stata condotta applicando un carico crescente fino al raggiungimento dello stato di crisi.

Per la determinazione delle deformazioni si sono utilizzati 6 estensometri di cui 4 con base di misura pari a 45mm (posizionati sulla parte ricostruita con formulato epossidico) e 2 con base di misura pari a 70mm (posizionati sulla parte lignea del puntone) e precisione pari a 1×10^{-6} mm, posizionati come da figura seguente

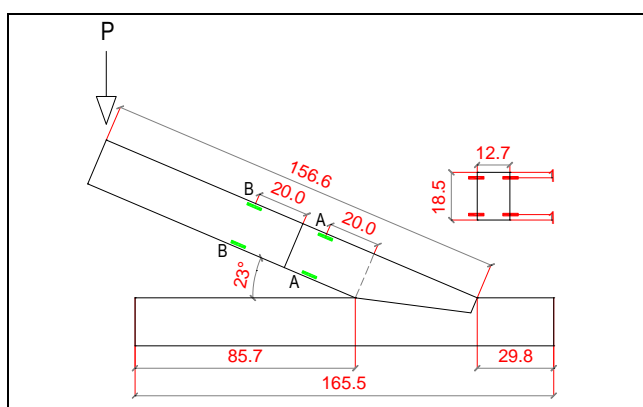


Figura 14: Geometria del modello utilizzato e posizione degli estensometri

Le letture dei carichi e delle deformazioni sono state effettuate circa ogni 500N. Di seguito si riportano i grafici carico-deformazioni nelle sezioni A-A e B-B del puntone in corrispondenza delle fibre superiori e inferiori sul lato destro, sinistro e mediano.

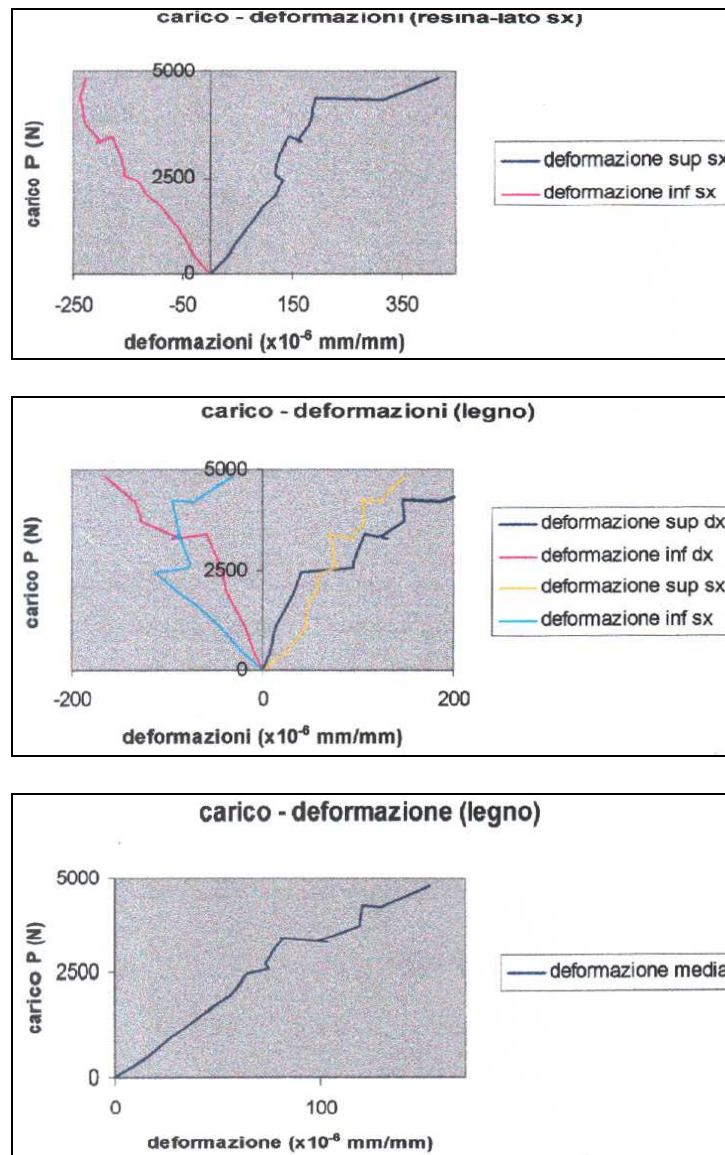


Figura 15: Grafici P-ε nelle sezioni monitorate

Le irregolarità presenti nel grafico P-ε relativo al legno sono da ricondurre ad un assestamento sotto carico della struttura costituita da due materiali molto diversi ed ai difetti presenti sul puntone ligneo, quali nodi e fessure da ritiro.

Dai dati rilevati, che si omettono per sintesi, risulta che il carico P_u al limite elastico vale:

- $P_u = 4820.49 \text{ N}$

da cui, il momento al limite elastico nelle sezioni A-A e B-B:

- $M_A = P_u \cdot L_A \text{ medio} = 3615367.5 \text{ N} \cdot \text{mm}$
- $M_B = P_u \cdot L_B \text{ medio} = 2106554.13 \text{ N} \cdot \text{mm}$

Si sottolinea un dato molto importante: nella prova si è giunti alla rottura dell'asta prima della plasticizzazione del nodo; la parte lignea si è infatti distaccata dalla parte ricostruita in formulato epossidico.

Prova B – Getto separato di formulato epossidico

Le modalità di esecuzione della prova sono le medesime della prova A.

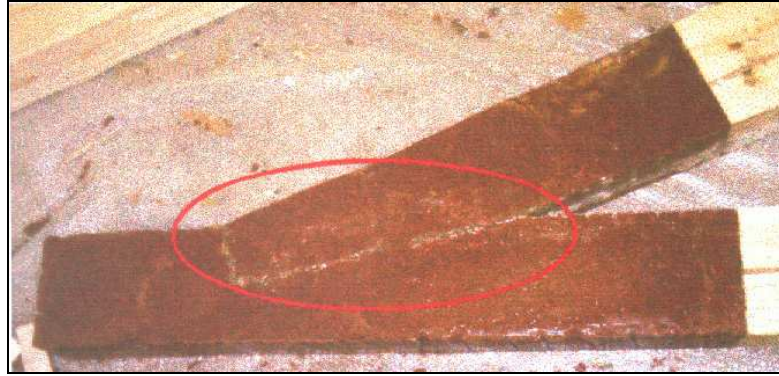


Figura 16: Il modello utilizzato per la prova dopo lo scassero. E' evidenziata l'interfaccia tra puntone e catena realizzata con un foglio di nylon.

La prova è stata condotta applicando un carico crescente fino al raggiungimento dello stato di crisi.

Per la determinazione delle deformazioni si sono utilizzati 6 estensometri di cui 4 con base di misura pari a 45mm (posizionati sulla parte ricostruita con formulato epossidico) e 2 con base di misura pari a 70mm (posizionati sulla parte lignea del puntone) e precisione pari a 1×10^{-6} mm, posizionati come da figura seguente

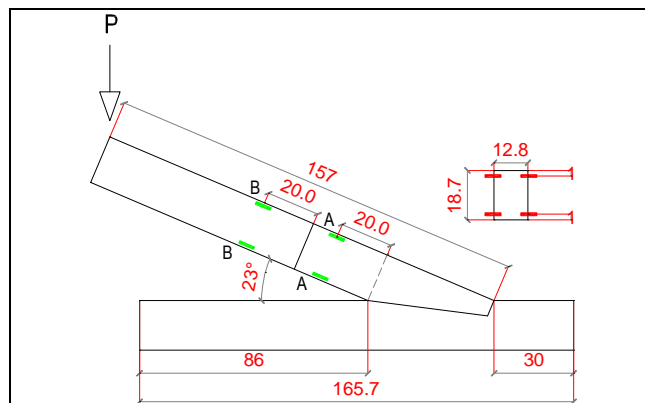
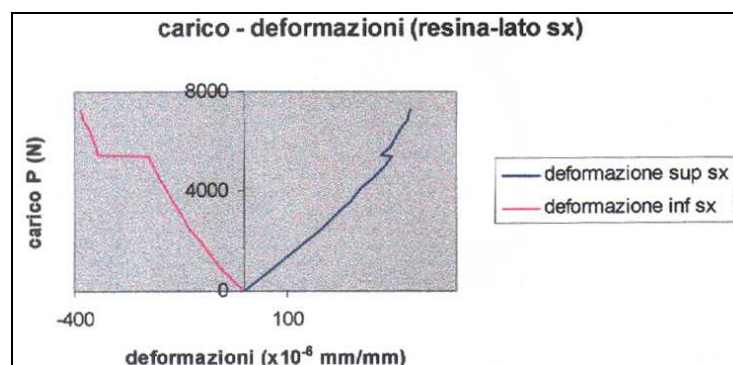


Figura 17: Geometria del modello utilizzato e posizione degli estensometri

Le letture dei carichi e delle deformazioni sono state effettuate circa ogni 500N. Di seguito si riportano i grafici carico-deformazioni nelle sezioni A-A e B-B del puntone in corrispondenza delle fibre superiori e inferiori sul lato destro, sinistro e mediano.



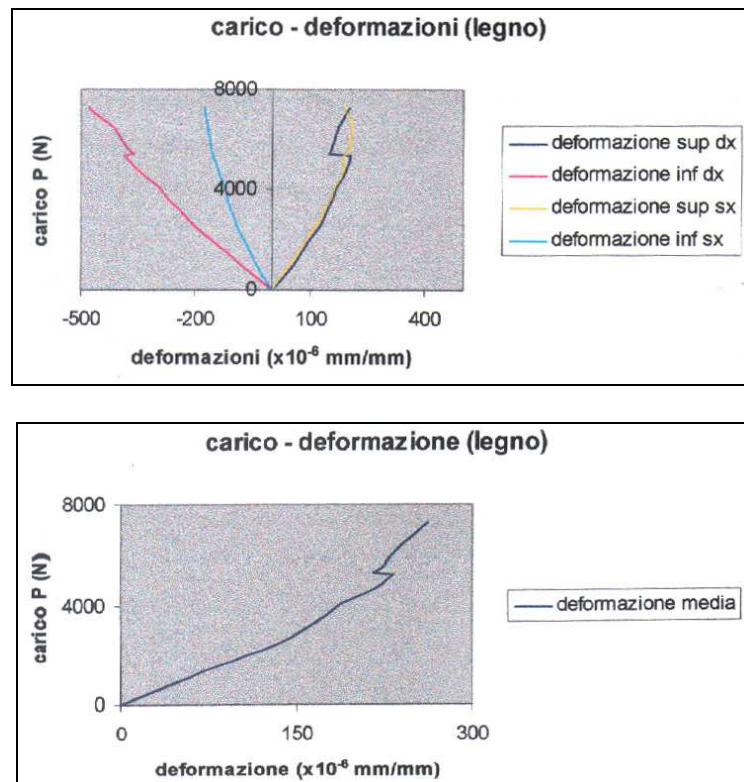


Figura 18: Grafici P-ε nelle sezioni monitorate

La concentrazione degli sforzi in zona compressa, con conseguente plasticizzazione delle fibre, è ben riscontrabile dalla presenza di deformazioni maggiori in zona compressa rispetto alla zona tesa.

Anche in questo caso le irregolarità presenti nel grafico P-ε relativo al legno sono da ricondurre ad un assetamento sotto carico della struttura costituita da due materiali molto diversi ed ai difetti presenti sul puntone ligneo, quali nodi e fessure da ritiro.

Occorre notare che con un getto separato di formulato epossidico si realizza una maggiore collaborazione tra la parte lignea e la parte ricostruita del puntone.

Dai dati rilevati, che si omettono per sintesi, risulta che il carico P_u al limite elastico vale:

- $P_u = 7281.48 \text{ N}$

da cui, il momento al limite elastico nelle sezioni A-A e B-B:

- $MA = P_u \cdot LA_{\text{medio}} = 5482954.44 \text{ N} \cdot \text{mm}$
- $MB = P_u \cdot LB_{\text{medio}} = 3211132.68 \text{ N} \cdot \text{mm}$

Anche in questa prova si è giunti alla rottura dell'asta prima della plasticizzazione del nodo; la parte lignea si è infatti distaccata dalla parte ricostruita in formulato epossidico.

Conclusioni

Per quanto riguarda la prova A, come detto la rottura è avvenuta per distacco della parte lignea da quella in formulato epossidico, con parziale sfilamento delle barre in vetroresina dal legno e rotazione relativa delle due parti. La rottura avviene nell'asta per flessione, senza che prima si verifichi la plasticizzazione del nodo. Si può pertanto concludere che la protesi armata in conglomerato epossidico a getto unico non rispetta il cinematismo originario di rottura proprio della capriata, in quanto non permette ai nodi di plasticizzarsi prima della rottura delle aste.

Analoga considerazione può essere svolta anche per la prova B, notando però che tale tipo di intervento (getto separato) permette di raggiungere un valore di carico maggiore rispetto a quello della prova A, in quanto il puntone può ruotare in minima parte prima della rottura dell'asta.

In conclusione si sottolinea come non sia possibile applicare i dati ricavati dalla sperimentazione al modello matematico del Codice Genetico di Rottura in quanto ci si trova di fronte ad una situazione anomala: nel considerare i cinematismi illeciti in cui tutti i nodi sono plasticizzati tranne uno, il modello studiato considera solo la plasticizzazione delle saette, della catena, del monaco e dei puntoni, ma non del puntone a ridosso del nodo catena-puntone. Qualora infatti il nodo non plasticizzato sia proprio questo, la struttura, nel suo complesso, non risulta labile. La non applicabilità del caso studiato al modello matematico tuttavia, come si evince anche dalle conclusioni sopra riportate, non toglie validità alla teoria, ma ne avvalorata le implicazioni teoriche pur senza un riscontro prettamente matematico.

3.3 RINFORZO DEL NODO TRAMITE CHIODATURA

La prova consiste nel rinforzare il nodo tramite la solidarizzazione delle parti (puntone-catena) con chiodatura.

Si sono utilizzati 8 chiodi di diametro pari a 6.5mm e lunghezza pari a 20cm. Le tensioni ammissibili per l'acciaio dei chiodi sono:

$$\tau_{b \text{ amm}} = 120\text{MPa}$$

$$\sigma_{b \text{ amm}} = 50\text{MPa}$$

4 chiodi sono stati inseriti dalla parte estradossale del puntone e altri 4 dall'intradosso della catena.



Figura 19: Immagine del nodo rinforzato con 4 chiodi

Per la determinazione delle deformazioni si sono utilizzati 4 estensometri con base di misura pari a 70mm e precisione pari a 1×10^{-6} mm, posizionati sui entrambi i lati del puntone. La prova è stata condotta applicando un carico crescente fino al raggiungimento dello stato di crisi che si è verificato in questo caso per il raggiungimento della tensione di snervamento delle fibre compresse.

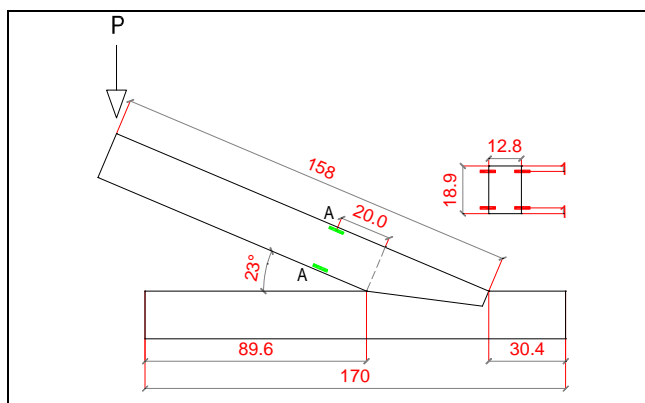


Figura 20: Geometria del modello utilizzato e posizione degli estensometri

Le misurazioni sono state effettuate ad ogni aumento di carico di circa 250 N. Di seguito si riportano i grafici carico-deformazioni nella sezione A-A del puntone in corrispondenza delle fibre superiori e inferiori sul lato destro, sinistro e mediano.

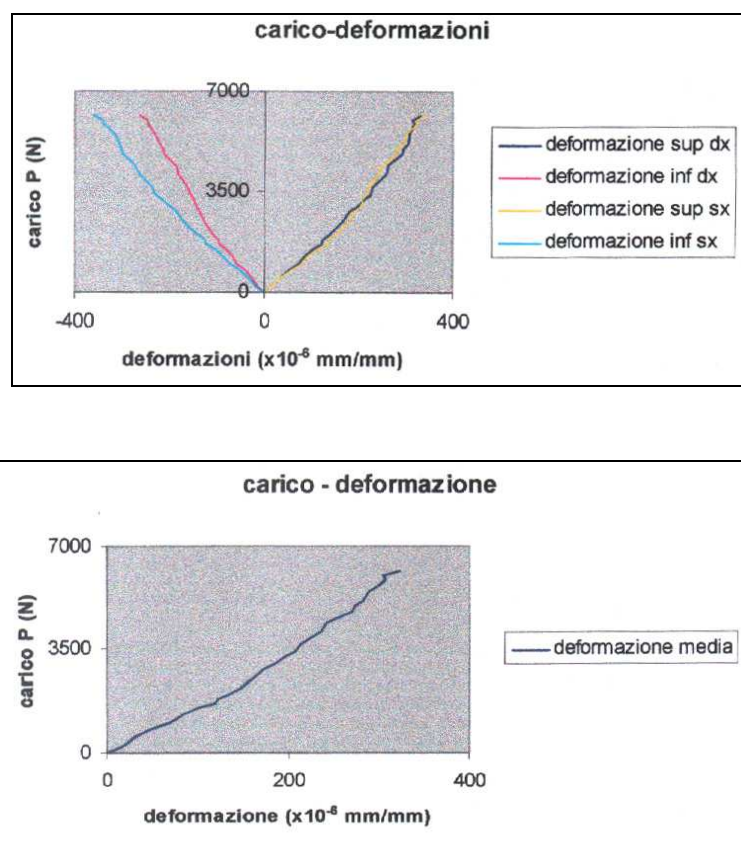


Figura 21: Grafici P-ε nella sezione monitorata

Il materiale presenta un comportamento elastico-lineare con plasticizzazione delle fibre in zona compressa.

Dai dati rilevati, che si omettono per sintesi, risulta che il carico P_u al limite elastico vale:

- $P_u = 6139.78 \text{ N}$

da cui, il momento al limite elastico:

- $MA = P_u \cdot L = 4678512.36 \text{ N} \cdot \text{mm}$

Da questi dati siamo in grado di definire anche il momento di plasticizzazione, che vale:

- $M_p = 3/2 MA = 7017768.54 \text{ N} \cdot \text{mm}$

Si nota che il carico ultimo registrato non ha un valore molto elevato in quanto i chiodi tendono a sfilarsi: data la loro lunghezza non è stato possibile ribatterli.

Applichiamo ora i dati ottenuti dalla sperimentazione al modello matematico.

Attraverso le prove di caratterizzazione del materiale si è determinato il valore della tensione di rottura, pari a $\sigma_R = 57.35 \text{ MPa}$.

Da questo, insieme all'area delle sezioni delle aste della capriata, è possibile determinare i valori degli sforzi assiali nelle aste della capriata, così come descritta al paragrafo 2. Da questi valori allora si è in grado di definire le equazioni delle rette del piano $\lambda(P)$ -N, di seguito riportato:

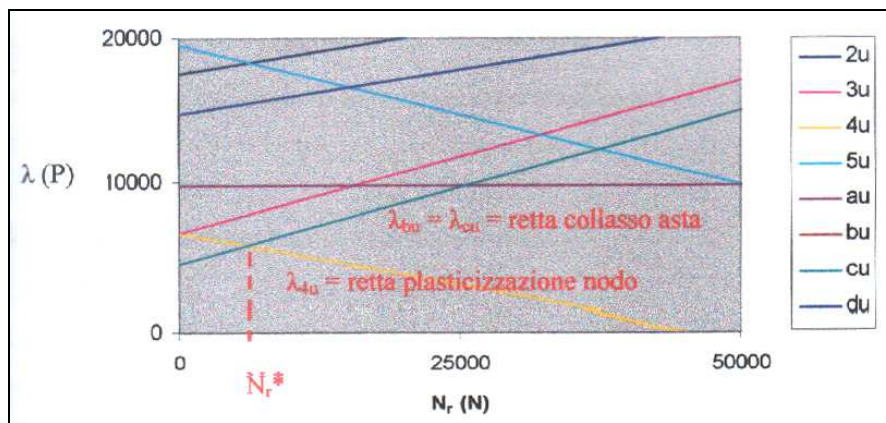


Figura 22: Grafico che descrive le rette dei meccanismi leciti ed illeciti per i diversi cinematismi di collasso della capriata.

Dal grafico si nota come il meccanismo di rottura avvenga per attivazione del cinematismo illecito $\lambda_{bu} = \lambda_{cu}$ per valori di $N_r < N_r^*$, e per attivazione del cinematismo lecito λ_{4u} per i valori di $N_r > N_r^*$.

Il valore di N_r^* si ricava dall'equazione $\lambda_{bu} = \lambda_{4u}$, da cui si ottiene

$$N_r^* = 5990 \text{ N}$$

Tale valore è molto più basso della forza assiale ultima registrata nelle aste; infatti N_r vale 1387411.2 N per puntone e catena e 693705.5 N per saette e monaco.

Si può pertanto concludere che la chiodatura rispetta il cinematismo originario di rottura proprio della capriata, in quanto permette ai nodi di plasticizzarsi prima della rottura delle aste: aumentando il carico, per valori di $N_r > N_r^*$ la prima retta che si incontra infatti è quella che definisce la plasticizzazione del nodo.

3.4 RINFORZO DEL NODO TRAMITE BULLONATURA

La prova consiste nel rinforzare il nodo tramite la solidarizzazione delle parti (puntone-catena) con bullonatura.

Si sono utilizzati 2 bulloni di classe 6.8, di diametro pari a 12mm.

Le tensioni ammissibili per l'acciaio dei bulloni sono:

$$\tau_{b \text{ amm}} = 170 \text{MPa}$$

$$\sigma_{b \text{ amm}} = 124 \text{MPa}$$

Tensione di rottura $f_t = 600 \text{MPa}$

Tensione di snervamento $f_y = 480 \text{MPa}$

Resistenza caratteristica a trazione del bullone $f_{kn} = 360 \text{MPa}$

Il nodo è stato rinforzato con bulloni a testa larga, previa perforazione di diametro 13mm, bulloni aventi lunghezza pari a 30cm e 26cm; il serraggio è avvenuto con l'ausilio di dadi e rondelle.

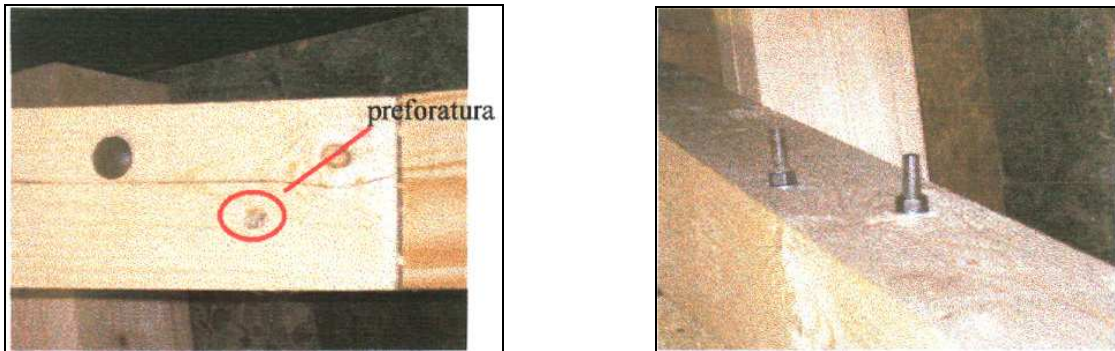


Figura 23: Immagini del nodo rinforzato con 2 bulloni, previo perforo delle parti lignee

Per la determinazione delle deformazioni si sono utilizzati 4 estensometri con base di misura pari a 70mm e precisione pari a 1×10^{-6} mm, posizionati sui entrambi i lati del puntone. La prova è stata condotta applicando un carico crescente fino al raggiungimento dello stato di crisi.

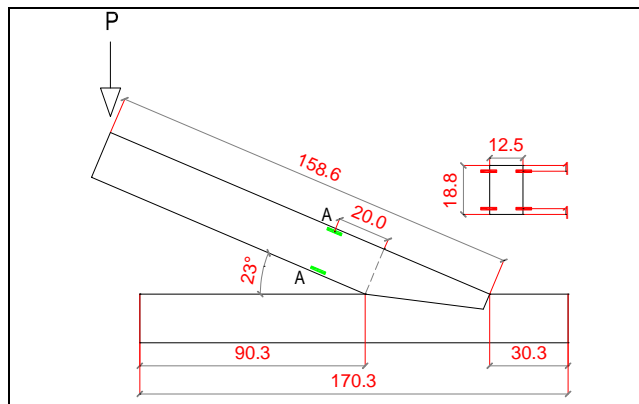


Figura 24: Geometria del modello utilizzato e posizione degli estensometri

Le misurazioni sono state effettuate ad ogni aumento di carico di circa 500 N. Di seguito si riportano i grafici carico-deformazioni nella sezione A-A del puntone in corrispondenza delle fibre superiori e inferiori sul lato destro, sinistro e mediano. Si noti come in questo caso le deformazioni dovute alle tensioni di trazione superino quelle dovute alle tensioni di compressione.

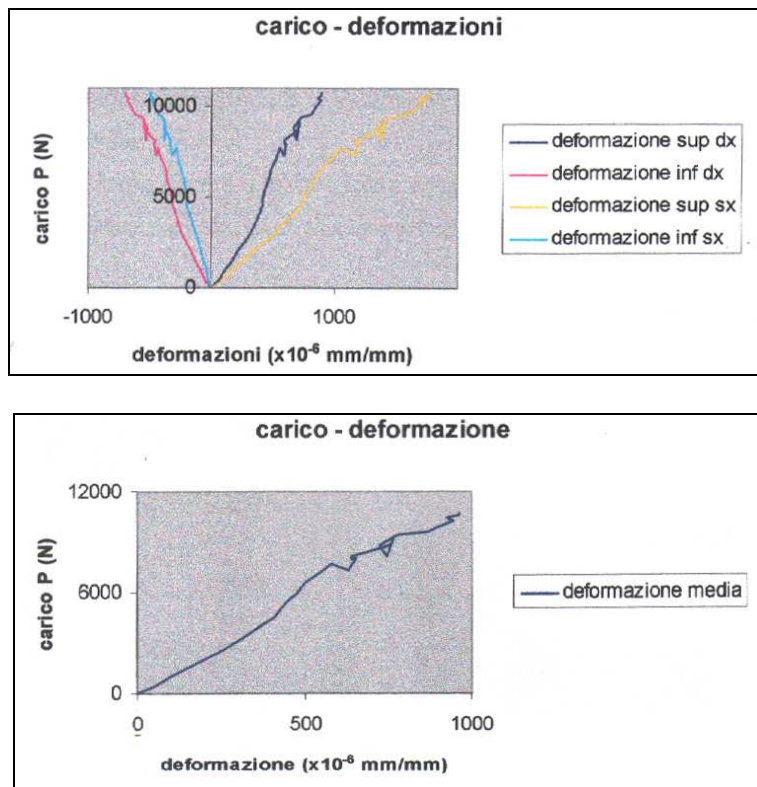


Figura 25: Grafici P-ε nella sezione monitorata

La presenza di una fessura orizzontale da ritiro e di nodi nel puntone ha determinato i “salti” nel diagramma P-ε, dovuti ad un assestamento del legno sotto carico. Si rileva inoltre che le rondelle e i dadi non sono stati in grado di distribuire adeguatamente gli sforzi, conficcandosi nel legno, come si nota dall’immagine seguente:

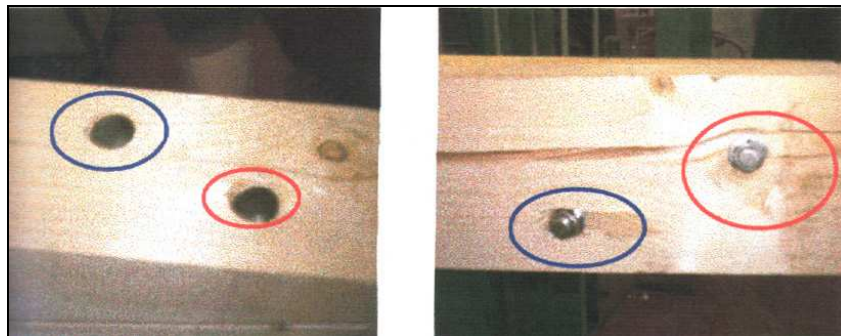


Figura 26: Le teste dei bulloni (nel puntone) ed e dadi (nella catena) sono parzialmente conficcati nel legno

Il legname ha avuto un comportamento elastico fino al raggiungimento del carico limite. Dai dati rilevati, che si omettono per sintesi, risulta che il carico P_u al limite elastico vale:

- $P_u = 10731.93 \text{ N}$

da cui, il momento al limite elastico:

- $MA = P_u \cdot L = 8381637.33 \text{ N} \cdot \text{mm}$

Da questi dati siamo in grado di definire anche il momento di plasticizzazione, che vale:

- $M_p = 3/2 MA = 12572456 \text{ N}\cdot\text{mm}$

Applichiamo ora i dati ottenuti dalla sperimentazione al modello matematico.

Attraverso le prove di caratterizzazione del materiale si è determinato il valore della tensione di rottura, pari a $\sigma_R = 57.35 \text{ MPa}$.

Da questo, insieme all'area delle sezioni delle aste della capriata, è possibile determinare i valori degli sforzi assiali nelle aste della capriata, così come descritta al paragrafo 2. Da questi valori allora si è in grado di definire le equazioni delle rette del piano $\lambda(P)$ -N, di seguito riportato:

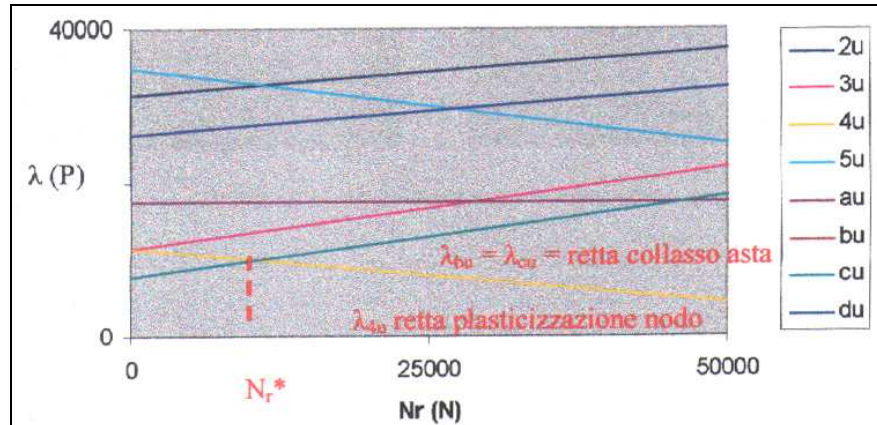


Figura 27: Grafico che descrive le rette dei meccanismi leciti ed illeciti per i diversi cinematismi di collasso della capriata.

Dal grafico si nota come il meccanismo di rottura avvenga per attivazione del cinematismo illecito $\lambda_{bu} = \lambda_{cu}$ per valori di $N_r < N_r^*$, e per attivazione del cinematismo lecito λ_{4u} per i valori di $N_r > N_r^*$.

Il valore di N_r^* si ricava dall'equazione $\lambda_{bu} = \lambda_{4u}$, da cui si ottiene

$$N_r^* = 10732 \text{ N}$$

Tale valore è molto più basso della forza assiale ultima registrata nelle aste; infatti N_r vale 1347725 N per puntoni e catena e 673862.5 N per saette e monaco.

Si può pertanto concludere che la bullonatura rispetta il cinematismo originario di rottura proprio della capriata, in quanto permette ai nodi di plasticizzarsi prima della rottura delle aste: infatti aumentando il carico, per valori di $N_r > N_r^*$ la prima retta che si incontra è quella che definisce la plasticizzazione del nodo.

3.5 RINFORZO DEL NODO TRAMITE APPLICAZIONE DI PIASTRA METALLICA

Per il dimensionamento della piastra si è fatto riferimento all'EC5, appendice D; si è utilizzata in particolare una piastra di dimensioni di 450x150mm e spessore pari a 3mm, collegata agli elementi lignei per mezzo di 18 viti autofilettanti del diametro di 4.5mm e lunghezza pari a 50mm.

Per evitare fenomeni di "condensa" tra acciaio e legno è stato interposto tra i due materiali un foglio di materiale isolante.

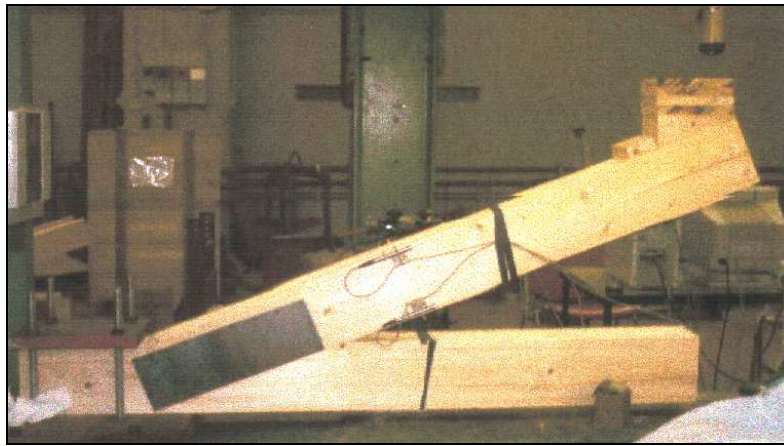


Figura 28: Il prototipo posizionato in laboratorio. Sono visibili gli estensometri applicati al puntone.

Per la determinazione delle deformazioni si sono utilizzati 6 estensometri di cui 4 con base di misura pari a 70mm (posizionati nel legno) e 2 con base di misura 45mm (posizionati sulla piastra metallica) e precisione pari a 1×10^{-6} mm. La prova è stata condotta applicando un carico crescente fino al raggiungimento dello stato di crisi che si è verificato per il raggiungimento della tensione di snervamento delle fibre compresse.

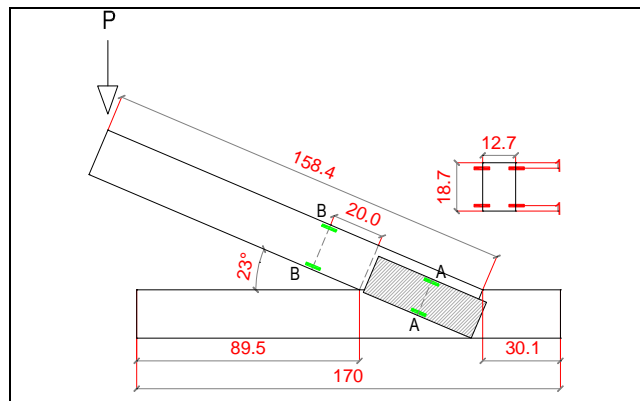
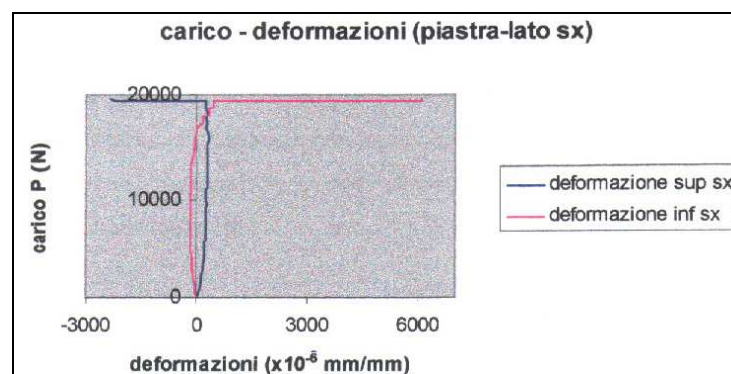


Figura 29: Geometria del modello utilizzato e posizione degli estensometri

Le misurazioni sono state effettuate ad ogni aumento di carico di circa 500 N. Di seguito si riportano i grafici carico-deformazioni nella sezione A-A (piastra) e B-B (legno) del puntone in corrispondenza delle fibre superiori e inferiori sul lato destro, sinistro e mediano.



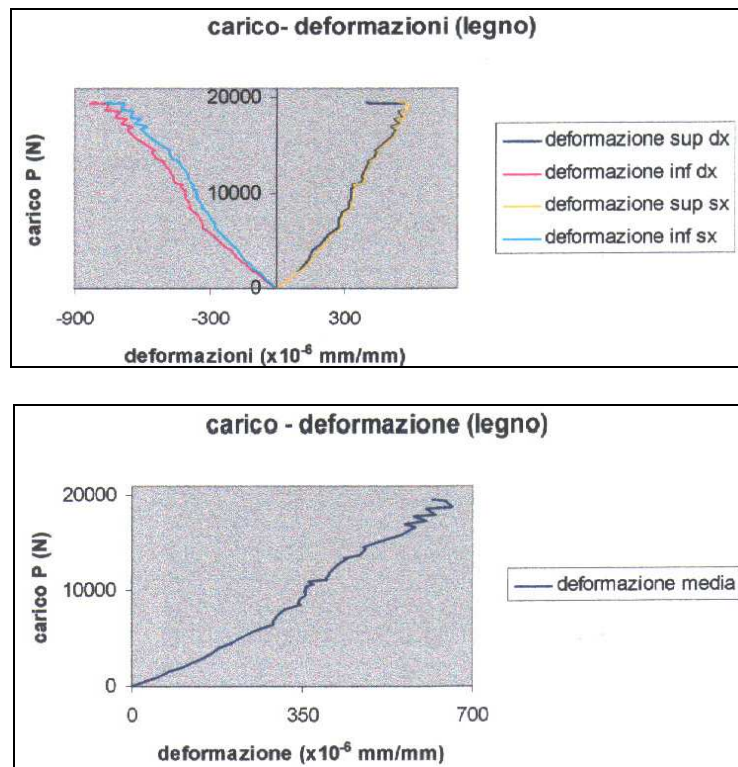


Figura 30: Grafici P-ε nelle sezioni monitorate

Si nota che la piastra risulta estremamente rigida: il diagramma P-ε relativo alla piastra stessa presenta deformazioni minime fino al raggiungimento del carico ultimo. Per quanto riguarda il legno, si nota che il diagramma presenta un andamento piuttosto lineare con deformazioni maggiori in zona compressa.

Dai dati rilevati, che si omettono per sintesi, risulta che il carico P_u al limite elastico vale:

- $P_u = 19594.87 \text{ N}$

da cui, il momento al limite elastico:

- $M_B = P_u \cdot L = 15009670 \text{ N} \cdot \text{mm}$

Da questi dati siamo in grado di definire anche il momento di plasticizzazione, che vale:

- $M_p = 3/2 M_A = 22514505.63 \text{ N} \cdot \text{mm}$

Applichiamo ora i dati ottenuti dalla sperimentazione al modello matematico.

Attraverso le prove di caratterizzazione del materiale si è determinato il valore della tensione di rottura, pari a $\sigma_R = 57.35 \text{ MPa}$.

Da questo, insieme all'area delle sezioni delle aste della capriata, è possibile determinare i valori degli sforzi assiali nelle aste della capriata, così come descritta al paragrafo 2. Da questi valori allora si è in grado di definire le equazioni delle rette del piano $\lambda(P)$ -N, di seguito riportato:

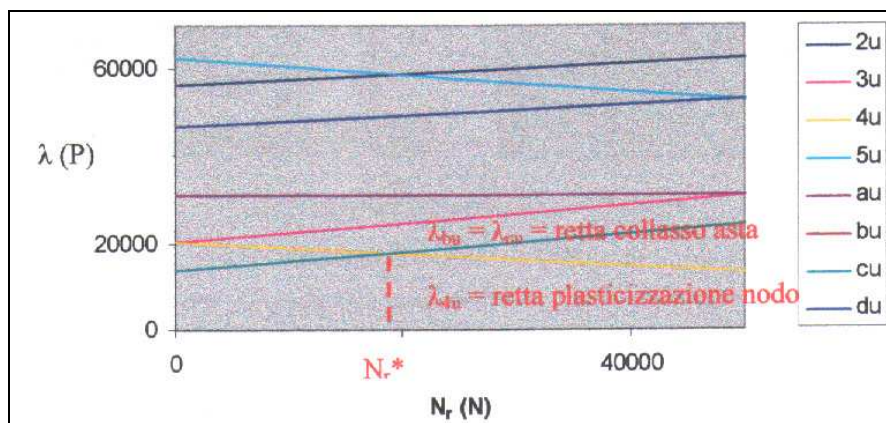


Figura 31: Grafico che descrive le rette dei meccanismi leciti ed illeciti per i diversi cinematici di collasso della capriata.

Dal grafico si nota come il meccanismo di rottura avvenga per attivazione del cinematico illecito $\lambda_{bu} = \lambda_{cu}$ per valori di $N_r < N_r^*$, e per attivazione del cinematico lecito λ_{4u} per i valori di $N_r > N_r^*$.

Il valore di N_r^* si ricava dall'equazione $\lambda_{bu} = \lambda_{4u}$, da cui si ottiene

$$N_r^* = 19218 \text{ N}$$

Tale valore è molto più basso della forza assiale ultima registrata nelle aste; infatti N_r vale 1362005.15 N per puntoni e catena e 681002.57 N per saette e monaco.

Si può pertanto concludere che l'applicazione di una piastra metallica rispetta il cinematico originario di rottura proprio della capriata, in quanto permette ai nodi di plasticizzarsi prima della rottura delle aste: infatti aumentando il carico, per valori di $N_r > N_r^*$ la prima retta che si incontra è quella che definisce la plasticizzazione del nodo.

La piastra infatti fornisce essenzialmente una compressione laterale, non andando ad incidere sul comportamento cinematico del nodo, il quale può continuare a lavorare come cerniera e non come incastro. Tale tecnica permette di raggiungere un carico P molto elevato rispetto alle precedenti sperimentazioni. E' da evidenziare in ultimo che le viti permettono una buona resistenza a taglio, aumentando il carico ammissibile su ciascun elemento di collegamento.

4 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

La sintesi dei risultati ottenuti con le diverse sperimentazioni esaminate in precedenza conduce alle seguenti considerazioni.

I rinforzi del nodo catena-puntone tramite elementi metallici, con staffe, chiodi, bulloni e piastre, permettono la conservazione del materiale originario consentendo anche una buona reversibilità dell'intervento stesso.

Considerando inoltre in maniera sintetica le indicazioni presenti nelle Carte del Restauro¹¹ si nota che gli interventi realizzati con elementi metallici risultano essere in armonia con le indicazioni stesse, a differenza degli interventi con protesi in resina.

Il grafico sotto riportato schematizza, in una scala arbitraria, le prime considerazioni sopra riportate:

¹¹ Per una sintesi delle Carte del Restauro, vedi Bibliografia

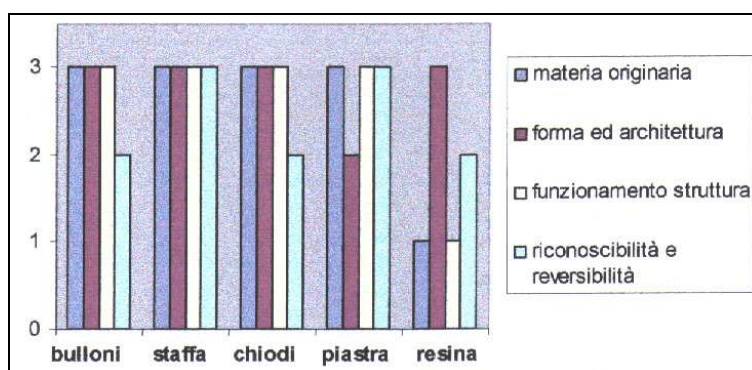


Figura 32: Valutazione quantitativa della rispondenza degli interventi analizzati ai parametri riportati a fianco

Occorre considerare inoltre che le giunzioni metalliche hanno costi, comprensivi di manodopera e di eventuali noli e trasporti, tra loro paragonabili ed assai ridotti rispetto alle protesi armate con conglomerato epossidico, le quali implicano, oltre ad un maggior costo del materiale, anche una maggiore difficoltà relativamente a ponteggi, cassature in quota e reperimento di manodopera specializzata.

D'altronde occorre considerare come le protesi in conglomerato epossidico presentino alcuni vantaggi in merito all'aumento delle prestazioni meccaniche locali, ma non complessive della capriata (come abbiamo visto in precedenza, la rottura avviene nell'interfaccia conglomerato legno molto prima che il nodo puntone-catena si plasticizzi); altri vantaggi sono riconducibili all'assenza di ritiro al momento del getto, alla inattaccabilità da parte di funghi e insetti, alla non infiammabilità e all'assenza di manutenzione (almeno per quanto sinora noto).

Per quanto riguarda lo studio dei cinematismi di rottura, si riportano i valori del carico ultimo P_u e del Momento di plasticizzazione M_p relativi alle prove effettuate:

	P_u (N)	M_p (N*mm)
CHIODATURA	6140	7017769
BULLONATURA	10732	12572456
STAFFATURA	14000	14700000
PIASTRA METALLICA	19595	22514506

Per quanto riguarda le prove con protesi in resina, come è stato già evidenziato, si è giunti a rottura del prototipo non per plasticizzazione del nodo, ma per distacco (rotazione relativa) del puntone ligneo dalla protesi in resina, per cui i valori di P_u e M_u (che comunque per completezza si riportano di seguito) in realtà non sono paragonabili con quelli riportati nella tabella sopra in quanto, appunto, derivanti da modalità di rottura diverse; occorre notare infine che il momento ultimo (che si ha nel momento di rottura del provino e corrispondente al carico ultimo P_u) in questi due casi non fornisce ovviamente il valore del momento di plasticizzazione del nodo, perché come detto, in realtà il nodo non si è plasticizzato:

	P_u (N)	M_{uA} (N*mm)	M_{uB} (N*mm)
PROTESI CON GETTO UNICO	4820.49	3615367.5	2106554.13
PROTESI CON GETTO SEPARATO	7281.48	5482954.44	3211132.68

Si riporta di seguito il grafico che mette in relazione le forze assiali ultime N_r con i moltiplicatori di carico λ (P):

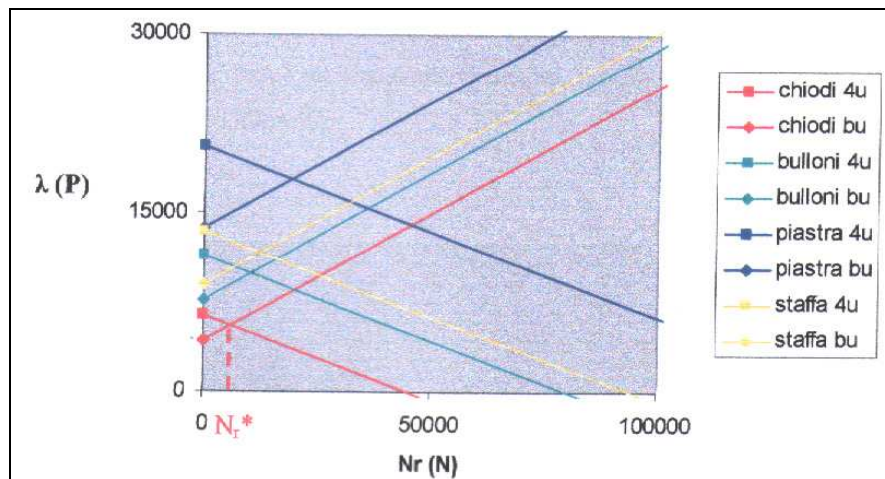


Figura 33: Diagramma comparativo delle rette dei meccanismi leciti ed illeciti corrispondenti ai diversi interventi analizzati. Sono riportate per ogni intervento solo le rette che definiscono la rottura.

Per ciascuna tipologia di intervento sono riportate solo le rette dei meccanismi leciti ed illeciti che definiscono la rottura e quindi il valore della forza assiale N_r^* (in particolare la retta $\lambda_{bu} = \lambda_{cu}$ di collasso dell'asta e la retta λ_{4u} di plasticizzazione del nodo). Si nota come la tecnica che permette di raggiungere il valore di P più alto è quella che prevede l'inserimento della piastra metallica. In questa logica occorre tuttavia porre attenzione a che la tecnica eseguita non irrigidisca troppo il nodo facendo slittare la retta λ_{bu} sopra la retta λ_{4u} : in questo caso infatti il collasso della struttura sarebbe determinato da un valore di N_r^* maggiore della forza N_r registrata nelle aste ed il collasso avverrebbe per rottura delle aste prima della plasticizzazione di tutti i nodi.

Alla luce dei risultati parziali sino ad oggi ottenuti, sembrerebbe che la metodologia proposta per la valutazione delle tecniche di intervento sia praticabile e consenta di approfondire la conoscenza dei dati materiali e culturali che l'architettura storica ci ha trasmesso.

Attualmente la ricerca in questo campo sta procedendo anche attraverso la rilettura di interventi eseguiti o in fase di esecuzione alla luce delle considerazioni su esposte. Si sta infatti concludendo una campagna di rilevamento degli interventi effettuati in cantieri considerati rappresentativi, sia per la tipologia di capriate presenti, sia per l'importanza storico-estetica delle stesse e degli edifici di ubicazione, sia per le tecniche di intervento messe in opera.

Un primo dato parziale derivante da tale analisi consiste nella constatazione che, in molti cantieri oggetto di studio, le tecniche di intervento sui nodi delle capriate tendono a rispettarne il *Codice Genetico di Rottura*, mettendo in atto operazioni progettuali ed esecutive attente alla conservazione del portato storico e culturale dell'elemento costruttivo.

Si è altresì rilevata la tendenza ad attribuire agli interventi invece più invasivi (ad esempio sostituzione delle teste delle capriate con materiali compositi) una convenienza dal punto di vista economico e di velocità di messa in opera tale da renderli appetibili dagli operatori del processo progettuale.

5 BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE

- EMY R., *Trattato dell'arte del carpentiere*, G. Antonelli Edizioni, Venezia, 1856, a cura di Gustavo Bucchia, trad. di Antonio Romano
- GIORDANO G., *La moderna tecnica delle costruzioni in legno*, Hoepli, Milano, 1964
- MUNAFO' P., *Le capriate lignee antiche per i tetti a bassa pendenza*, Alinea Ed., Firenze, 2002
- MUNAFO' P., DAVI' F., BARCAGLIONI V., *Il restauro della materia del costruito nel rispetto del funzionamento meccanico originario: il caso della capriate lignee*, in Building an Construction for Engineers L'Edilizia, n. 126/2003, pp. 44/47
- MUNAFO' P., DAVI' F., MUGGIANESI E., *Il rispetto negli interventi di restauro*, in Building an Construction for Engineers L'Edilizia, n.128/2003 pp. 60/63
- MUNAFO' P., *Criteria to be adopter for the restoration of structures in compliance with their Genetic Code of Collapse*, in Atti del 2nd International Symposium on Building Pathology, Durability and Rehabilitation, Lisbon 2003, pp. 231/239
- RONDELET J. B., *Trattato teorico e pratico dell'arte di edificare*, trad. it., Mantova, 1831
- ROTOLETTI L. A., *Prestazioni meccaniche delle capriate lignee antiche: modello a catena caricata. Valutazione delle tecniche di intervento*, Tesi di Laurea A.A. 1997/1998, relatori F. Davi e P. Munafò
- SCAMOZZI V., *Dell'idea dell'architettura universale*, ristampa, Arnaldo Forni Editore, 1982
- SERLIO S., *I sette libri dell'architettura*, ristampa, Arnaldo Forni Editore, 1987
- TAMPONE G., *Il restauro del legno*, in Atti del II Convegno Nazionale Restauro del Legno, Cardini Editore, vol II, pag. 171
- UZIELLI L., *La classificazione del legname strutturale*, in "L'edilizia", n°4/2002
- CARTA DI ATENE, 1931
- CARTA ITALIANA DEL RESTAURO, 1931
- CARTA DI VENEZIA, 1964
- CARTA ITALIANA DEL RESTAURO, 1972
- CARTA ITALIANA DEL RESTAURO, 1987
- DOCUMENTO ICOMOS 1990
- DICHIARAZIONE DI ASSISI, 1998
- CARTA DI CRACOVIA, 2000