

## I CONTROVENTI NELLE COPERTURE LIGNEE ANTICHE: EVOLUZIONE STORICA E SVILUPPI RECENTI

Lorenzo Jurina

Politecnico di Milano, DIS, Dip. Ingegneria Strutturale, p.za Leonardo Da Vinci 32, 20133 Milano,

[www.jurina.it](http://www.jurina.it)

### Introduzione

La tecnica di rinforzo di strutture lignee a capriata mediante controventi è un metodo di intervento che interessa la scala globale della copertura.

Il controventamento è applicabile alle diverse scale dal sistema strutturale ligneo di copertura, e nella versione più classica interessa il piano inclinato della copertura, ad esempio con la disposizione di diagonali in metallo ad integrazione dei campi quadrangolari formati da travi ed arcarecci. Ciò non esclude la bontà di alcuni interventi, sviluppati secondo il piano di imposta delle coperture.

Il controventamento delle coperture lignee può essere anche discretizzato e interessare singole unità dei sottosistemi strutturali, ma sono frequenti i casi in cui i tiranti connettono a livello più globale un maggior numero di elementi portanti originari, arrivando se necessario ad "impacchettare" l'intera orditura.

I consolidamenti così realizzati, consentono di ottenere un elemento globale di copertura maggiormente "rigido" attraverso la solidarizzazione di quegli elementi, che singolarmente costituiscono l'intero sistema. Il beneficio in termini statici è evidenziabile nell'incremento di resistenza alle azioni orizzontali e in taluni casi anche per le azioni verticali.

Le tipologie di intervento, possono articolarsi secondo molteplici modalità: dalla più semplice alla più complicata. In alcuni casi cavi, le funi si intrecciano nello spazio delle capriate per disegnare trame di controvento complesse. Nei casi più semplici, si limitano a collegare mutuamente le capriate da solidarizzare.

### Il perché dei controventi

I sistemi di controvento per coperture lignee prevedono l'aggiunta agli elementi strutturali principali di dispositivi metallici di tirantatura regolabili in tensione, con la creazione di opportune sedi di ancoraggio, caratterizzate da efficienza e minima invasività. L'intervento può riguardare come visto alcuni settori selezionati delle sottostrutture lignee, o l'insieme della copertura a livello delle strutture principali e di alcuni piani caratteristici del sistema. I diagonali in acciaio possono disporsi fra travi ed arcarecci nello due dimensioni del piano inclinato di falda, ma anche controventare piani differenti costituiti da elementi della struttura portante principale, come catene, monaci, puntoni, colmi, unità strutturali contigue.

I controventi, sia che vengano applicati al piano delle falde, che orizzontalmente fra le imposte delle incavallature, o nel piano verticale mediano longitudinale piuttosto che in diagonale nello spazio delle campate, tendono a connettere le differenti unità strutturali per promuovere la formazione di un sistema reticolare a travatura mista, resistente alle azioni orizzontali. Legno ed elementi consolidanti collaborano all'equilibrio globale del sistema, agendo alle diverse scale del comparto strutturale, secondo livelli differenziati di azione e reazione.

### Il consolidamento mediante tiranti metallici flessibili

Nelle soluzioni più avanzate i tiranti di controvento sono frequentemente realizzati con elementi flessibili in acciaio e inossidabile di piccolo diametro, come cavetti, funi, trefoli. I cavi, che possono coprire anche notevoli luci ed interessare intere campate del sistema di copertura, possono essere lasciati nudi o, per protezione rivestiti secondo particolari prescrizioni di progetto. I tiranti flessibili resistono unicamente a trazione, e resistono a questo tipo di azione anche per notevoli sforzi applicati. Sono di utile impiego per deformazioni trasversali contenute, ma non sono in grado di assicurare una benché minima resistenza a compressione, che può invece essere assorbita da aste rigide o da opportune funi posizionate in contrapposizione alle precedenti.

Tale tipologia di intervento si distingue totalmente dalla struttura esistente, ed è molto apprezzata negli interventi di controventamento su strutture lignee esistenti per la loro leggerezza, il minimo ingombro visivo e fisico, la facilità esecutiva ed applicativa e la totale reversibilità

### **Controventi nel piano inclinato di falda**

Nel piano inclinato della copertura il controventamento può essere realizzato interponendo fra i campi delle orditure lignee croci di S. Andrea, disposte secondo configurazioni diagonali. I dispositivi di controvento della copertura si rifanno a schemi antichi per soluzioni di stabilizzazione e controvento delle falde, realizzati anticamente legno su legno mediante sapienti incastri in semispessore o collegamenti chiodati.

Le nuove tecnologie del consolidamento prevedono che la solidarizzazione fra gli elementi di controvento e le travi secondarie inclinate avvenga anche mediante dispositivi di connessione metallici. Aste e tavole in legno sono state sostituite a volte efficientemente nel cantiere del restauro con barre, nastri, lastre in acciaio o sapientemente con funi

Come accennato, i diagonali costituiti di elementi leggeri possono stabilizzare alle diverse scale e secondo diverse geometrie i campi rettangolari costituiti dalle aste che organizzano la tessitura delle strutture inclinate del coperto.

L'obiettivo è irrigidire e stabilizzare geometricamente le strutture dei campi formati dall'intersezione più o meno ortogonale di aste lignee. Si intende evitare che la labilità dei quadrilateri attivi deformazioni crescenti sull'intero sistema per l'azione di sollecitazioni orizzontali. Il meccanismo si oppone all'instabilità locale e globale della struttura, contrastando il rischio di rotazione ed accatastamento delle unità strutturali, agendo anche su altri livelli di potenziale dissesto statico.

I tiranti metallici a doppia diagonale sono in particolare utili a contenere le deformazioni di aste concorrenti, e a contrastare a livello di falda le oscillazioni per instabilizzazione da carico orizzontale, sia in senso ortogonale che parallelo al colmo. Gli sforzi vengono in questi casi riportati alternativamente sulle pareti parallele, evitando pericolosi spostamenti dei timpani e delle pareti esterne (si veda fig. 1)

### **Controventi nel piano orizzontale di imposta**

Il controventamento mediante tiranti metallici può riguardare le strutture principali del sistema ligneo, che possono essere stabilizzate con l'irrigidimento del piano di imposta delle capriate, cioè orizzontalmente, a livello degli appoggi e nello spazio delle campate scandite dalle catene trasversali (si veda fig. 2).

La geometria dei campi nei quali il piano considerato è strutturato può essere stabilizzata mediante l'apposizione di tirantature trasversali, longitudinali o diagonali, incrociate o di altro tipo. Le soluzioni di controventatura del piano possono essere di diverso tipo e natura, e variano in funzione della risposta alle sollecitazioni sul sistema che si intende garantire con l'intervento di miglioramento statico.

Per promuovere la solidarizzazione delle unità strutturali principali le catene possono essere collegate fra di loro nel piano orizzontale mediante funi, con disposizione degli elementi a croce di S. Andrea. I tiranti possono in questo caso essere agganciati alle murature, o molto meglio a cordolature perimetrali di cerchiatura delle murature quando queste siano state realizzate. Oppure, in altri casi, i dispositivi aggiunti possono trovare punti di ancoraggio in prossimità dei nodi delle capriate, attraverso vincoli predisposti presso le murature di testata.

La soluzione di controventamento diagonale del piano orizzontale sul quale giace la struttura lignea di copertura consente di stabilizzarne le campate rispetto alle azioni laterali, agenti orizzontalmente, cioè nella stessa direzione del piano di appartenenza dei controventi.

L'infittimento reticolare del piano di imposta delle capriate risulta utile anche nel collegamento e nella stabilizzazione delle murature in sommità. Con il controventamento del piano orizzontale è possibile rendere solidali anche sistemi portanti discontinui e puntiformi, come nel caso di colonne o pilastri al di sopra dei quali venga impostato il sistema della copertura. Il presidio promuove un sensibile miglioramento del comportamento d'insieme della struttura portante globale.

I tiranti diagonali del piano di imposta, per la portata delle sollecitazioni assorbite, vanno pertanto ancorati ad elementi appositamente studiati per rendere il nuovo sistema e la struttura complessiva di riferimento, globalmente funzionale. Oltre che essere dotati di opportuni meccanismi di regolazione del tiro.

## L'EFFICIENZA DEI SISTEMI ATTRAVERSO LA COMPARAZIONE DELLE MODELLAZIONI NUMERICHE SUI DIVERSI CASI DI CONTROVENTAMENTO

Sono stati elaborati i dati relativi ad alcune sperimentazioni effettuate su casi di consolidamento di capriate lignee antiche mediante tiranti di controvento, disposti ad irrigidimento del piano di falda, del piano orizzontale d'imposta, o spazialmente fra le unità strutturali.

L'analisi rispetto la quale è stata fatta la comparazione dei dati numerici ottenuti, esamina diverse soluzioni di controventamento, relative a casi di strutture di copertura caratterizzate da differenti tipologie strutturali. Pertanto a parità di tipologia strutturale e di carichi applicati, le tipologie studiate sono:

*Caso 1:* a capriate semplici a doppia falda impostate su edificio rettangolare allungato;

*Caso2:* a capriate palladiane, impostate su edificio rettangolare allungato;

Sulla base di modellazioni ad elementi finiti effettuate nei casi sopra elencati, sono state comparate diverse tipologie di controventamento. Per le diverse strutture di copertura si sono dunque analizzate diverse soluzioni di consolidamento.

*Caso 1* e carico costante applicato orizzontalmente ai nodi:

Ipotesi a (si veda fig. 3): con nessun controventamento;

Ipotesi b (si veda fig. 4): angolazione dei tiranti  $\alpha = 30^\circ$ : controventamento semplice a croce di Sant' Andrea nel piano di falda;

Ipotesi c (si veda fig. 5): angolazione dei tiranti  $\alpha = 0^\circ$ : controventamento semplice a croce di Sant' Andrea nel piano orizzontale di imposta.

*Caso 2* e carico costante applicato verticalmente ai nodi della campata mediana:

Ipotesi d (si veda fig. 6): angolazione dei tiranti  $\alpha = 60^\circ$ : controventamento misto, nel piano inclinato passante fra le campate dal monaco laterale al colmo, e longitudinale nel piano orizzontale di imposta e diametro delle funi variabile ( $\phi$  10, 15, 20, 25 mm).

*Caso 2* e carico costante applicato orizzontalmente ai nodi:

Ipotesi b.15 (si veda fig. 7): angolazione dei tiranti  $\alpha = 30^\circ$ : controventamento semplice a croce di Sant' Andrea nel piano di falda e diametro delle funi costante ( $\phi$  15 mm).

Ipotesi c.15 (si veda fig. 8): angolazione dei tiranti  $\alpha = 0^\circ$ : controventamento semplice a croce di Sant' Andrea nel piano orizzontale di imposta e diametro delle funi costante ( $\phi$  15 mm).

Ipotesi d.15.2 (si veda fig. 9): angolazione dei tiranti  $\alpha = 60^\circ$ : controventamento misto, nel piano inclinato passante fra le campate dal monaco laterale al colmo, e longitudinale nel piano orizzontale di imposta e diametro delle funi costante ( $\phi$  15 mm).

Per ogni tipo di soluzione sono stati confrontati:

modelli strutturali; schemi statici e di carico; diagrammi delle azioni interne; deformate qualitative.

Le sperimentazioni sono state effettuate simulando opportuni modelli di carico. Attraverso i dati ricavati in termini di spostamenti massimi e di tensioni massime sulle capriate è stato possibile riconoscere la validità delle diverse opzioni, e verificare le diverse risposte dei sistemi ai differenti tipi di sollecitazione.

## INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI E CONCLUSIONI

La comparazione dei risultati è stata effettuata in termini di spostamenti e di stati tensionali.

Dall'analisi qualitativa dei risultati numerici forniti dalle diverse soluzioni di controventamento proposte, è emersa la concreta possibilità di effettuare efficaci consolidamenti per tutte le tipologie strutturali analizzate.

Nel caso delle palladiane il controvento disposto nel piano  $\alpha = 60^\circ$  (per sollecitazioni orizzontali) si è dimostrato meno efficiente dei due sistemi più semplici. Tuttavia la soluzione risulta vantaggiosa rispetto a quelle che prevedono il consolidamento degli altri piani caratteristici, in quanto consente alle capriate più deboli di resistere ai carichi verticali appoggiandosi a quelle adiacenti, dotate di un margine ulteriore di resistenza da sfruttare per evitare il collasso localizzato di quell'elemento strutturale che nella realtà risulta più debole. Qui di seguito, si espongono i risultati della modellazione effettuata analizzando i singoli casi e le diverse ipotesi di controventamento ed i relativi commenti:

*Analisi caso 1: Edificio a capriate semplici impostate su edificio rettangolare allungato*

Nella soluzione non controventata (caso 1a) si sono ottenuti spostamenti di 3,7 cm. Con controventi posizionati nel piano di falda (caso 1b), gli spostamenti si sono ridotti a 1,25 cm. Nella disposizione di controventi diagonali posti nel piano orizzontale di imposta delle capriate (caso 1c) si sono ottenuti spostamenti massimi di 1,5 cm. Entrambe le soluzioni di controvento hanno ridotto in modo considerevole gli spostamenti, e conseguentemente gli stati tensionali. La scelta ottimale fra le due soluzioni dipenderà in sede di esecuzione del controventamento dalla condizione di accessibilità della falda o del piano di sottotetto.

#### *Analisi caso 2: Edificio a capriate semplici palladiane su edificio rettangolare allungato*

Per il caso 2, con capriate palladiane impostate su edificio rettangolare allungato, sono state confrontate tre modalità di controventamento, identificate da differente inclinazione dei controventi posti rispettivamente su un piano orizzontale ( $\alpha = 0^\circ$ ), su un piano coincidente col piano di falda ( $\alpha = 30^\circ$ ), posti su un piano intermedio passante per il vertice della capriata e l'estremità inferiore dei monaci ( $\alpha = 60^\circ$ ).

In particolare, nei vari casi contrassegnati dall'angolazione del piano di controvento, si sono ottenuti i seguenti spostamenti massimi (carico orizzontale costante = 1000 kg/nodo):

(ipotesi c.15)  $\alpha = 0^\circ$  un valore di 3,4 cm;

(ipotesi b.15)  $\alpha = 30^\circ$  un valore di 1,35 cm;

(ipotesi d.15.2)  $\alpha = 60^\circ$  un valore di 2,45 cm.

Il confronto effettuato indicherebbe come soluzione migliore quella fornita dai controventi disposti sul piano di falda. Tuttavia una analisi più approfondita del caso  $\alpha = 60^\circ$ , se sottoposto a carichi verticali localizzati, rivela che questa particolare configurazione presenta dei considerevoli vantaggi in termini di collaborazione mutua tra capriate adiacenti.

Nel caso in cui una delle capriate risulti particolarmente degradata, mediante i controventi disposti sul piano  $\alpha = 60^\circ$  la capriata debole dimostra la possibilità di "appendersi" a quelle adiacenti, facendo incrementare considerevolmente il carico limite di collasso della copertura.

Si impedisce, in altri termini, il verificarsi di rotture fragili localizzate, favorendo la mutua collaborazione tra tutte le capriate.

Risulta evidente che la collaborazione descritta risulta più efficiente all'aumentare della rigidità dei tiranti, ossia del diametro dei controventi.

Nella fattispecie è stata effettuata una ulteriore analisi parametrica, nella quale tenendo come riferimento il caso  $\alpha = 60^\circ$ , si sono esaminati quattro casi, facendo variare il diametro del tirante di controvento, da 10 mm a 25 mm (si veda caso 2, ipotesi d). Si osserva dai modelli di calcolo, che imponendo un carico concentrato su una delle capriate, all'aumentare della rigidità dei tiranti si incrementa il numero delle capriate adiacenti chiamate ad aiutare la capriata più caricata.

Interessante è notare che in questo caso, all'aumentare del diametro dei controventi, si ottiene un netto miglioramento della collaborazione tra le capriate adiacenti e quella appunto debole. In particolare, passando da diametri 10 mm, a 15, a 20, a 25 mm, gli spostamenti massimi della capriata caricata si riducono rispettivamente da 0,42 cm a 0,40, a 0,35, a 0,30 cm. Ciò significa che il carico concentrato si è distribuito, in parte, sulle capriate adiacenti. Il fenomeno, in sintesi, è osservabile dalle tabelle descritte in seguito, che evidenziano l'incremento degli spostamenti delle capriate adiacenti al crescere del diametro delle funi. (si vedano tabelle di fig. 10).

Pertanto sistemi di consolidamento mediante l'ausilio di funi sapientemente configurate all'interno della struttura esistente, consentono di ottenere validi incrementi della resistenza globale del sistema. Unitamente, donano un gradevole effetto estetico, oltre che offrire "leggerezza di intervento" e completa "reversibilità".

## **BIBLIOGRAFIA**

1. AA.VV., I materiali metallici negli interventi di restauro e recupero edilizio, a cura di M. Gimma, Atti del Convegno e Mostra (Roma 18-19-20 maggio 1989), Associazione Nazionale Ingegneri Architetti Specialisti per lo Studio ed il Restauro dei Monumenti, Betagamma, Roma, 1989.
2. AA.VV., Il manuale del legno strutturale: progettazione e dettagli delle strutture, coordinatore generale L. Uzielli, vol. IV, Mancosu; Roma, 2004

3. AA.VV., *Il recupero delle coperture in legno*, Maggioli Editore, Repubblica di S. Marino, 2000
4. Buccino G.P., *L'acciaio, elementi strutturali e particolari costruttivi*, prefazione di G. Vita, Dedalo, 2001
5. Jurina L., *Consolidacion estatica de edificios monumentales por medio de tirantes metalicos*, III Congr. Int. Rehabilitacion, Granada, 1996.
6. L. Jurina, *Tecniche ed esperienze nel consolidamento "attivo" di edifici monumentali*, Atti del Seminario sul tema: "Evoluzione nella sperimentazione per le costruzioni" Dubrovnik, Croatia, 28 aprile-5 maggio 2001.
7. Jurina L., *La possibilità dell'approccio reversibile negli intervento di consolidamento strutturale*, Atti del XIX Convegno Scienza e Beni Culturali *La reversibilità nel restauro. Riflessioni, Esperienze, percorsi di ricerche*, Bressanone, 1-4 luglio 2003.
8. Jurina L., *Strutture in legno: Soluzioni leggere per il consolidamento in Recupero e conservazione*, n. 50,2003, pp. 65-68.
9. Tampone G. (a cura di), *Legno nel restauro e restauro del legno*, atti del Congresso nazionale, Firenze, 30 novembre-3 dicembre 1983.
10. Tampone G. *Il restauro delle strutture di legno : il legname da costruzione, le strutture lignee e il loro studio, restauro, tecniche di esecuzione del restauro*, Milano, Hoepli, 1996.
11. Tampone G., Mannucci M., Macchioni N., *Strutture in legno. Cultura, conservazione, restauro*, de Lettera Editore, Milano 2002

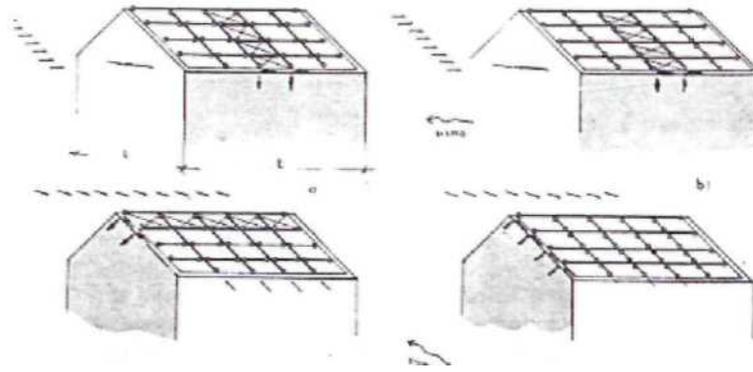


Figura 1

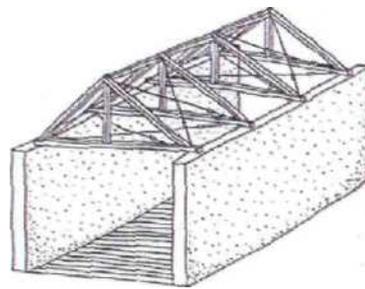
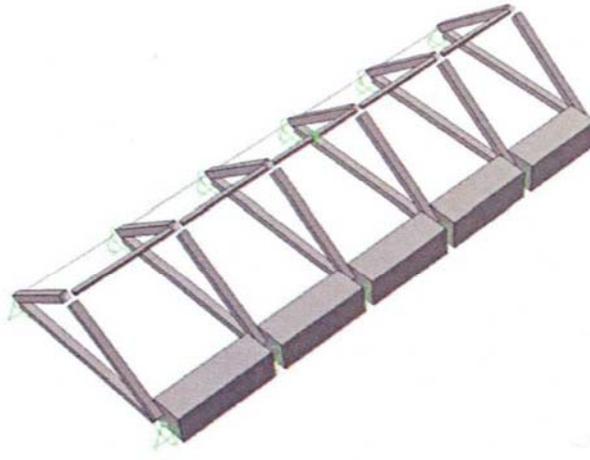


Figura 2

SCHEMI STATICI, DEFORMAZIONI E AZIONE ASSIALE  
CASO 1A

Caso 1. A  
Estruso del modello strutturale



Caso 1. A  
Diagramma dell' azione assiale



Caso 1. A  
Deformata qualitativa del modello

$$\delta_{\max} = 3,7 \text{ cm}$$

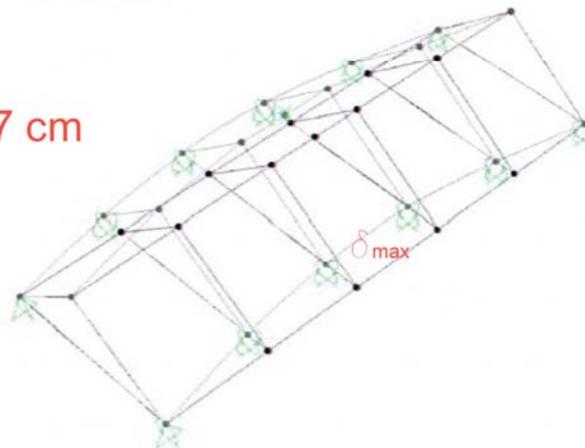


Figura 3

SCHEMI STATICI, DEFORMAZIONI E AZIONE ASSIALE  
CASO 1B

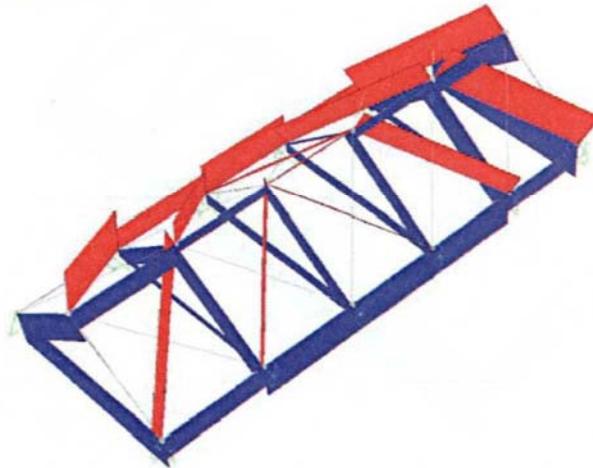
Caso 1.B

Estruso del modello strutturale



Caso 1.B

Diagramma dell' azione assiale



Caso 1.B

Deformata qualitativa del modello

$$\delta_{\max} = 1,25 \text{ cm}$$



Figura 4

SCHEMI STATICI, DEFORMAZIONI E AZIONE ASSIALE  
CASO 1C

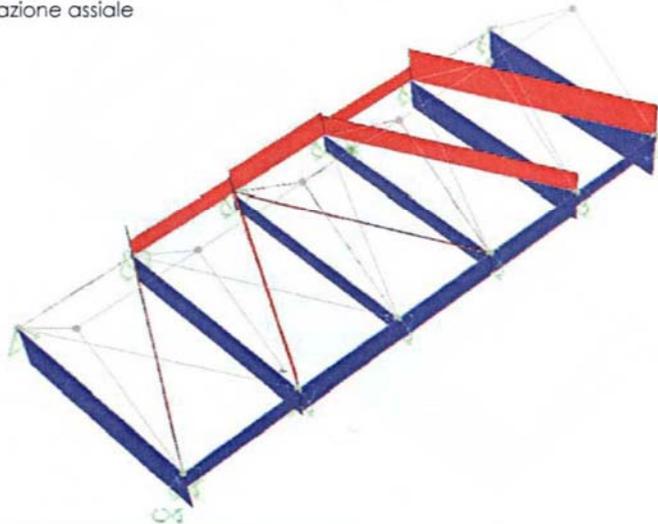
Caso 1.C

Estruso del modello strutturale



Caso 1.C

Diagramma dell' azione assiale



Caso 1.C

Deformata qualitativa del modello

$$\delta_{\max} = 1,5 \text{ cm}$$

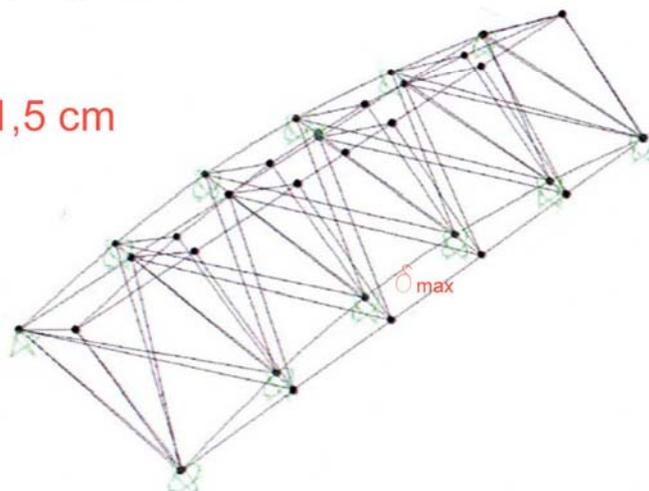


Figura 5

SCHEMA STATICO E DI CARICO  
CASO 2 D

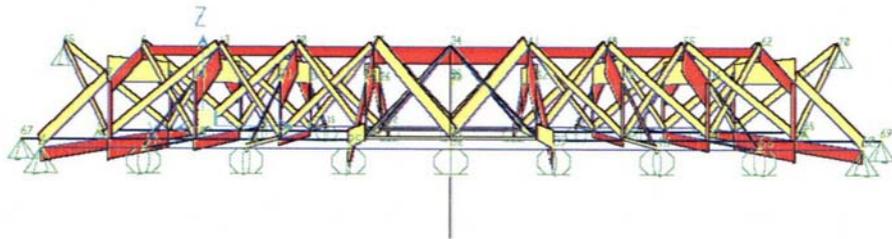
Caso 2. D

Estruso del modello strutturale e schema di carico



Caso 2. D

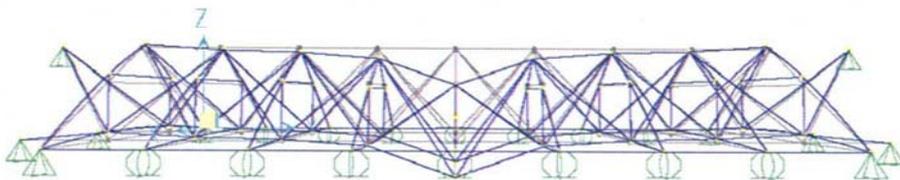
Diagramma dell' azione assiale



AZIONE ASSIALE

Caso 2. D

Deformata qualitativa del modello



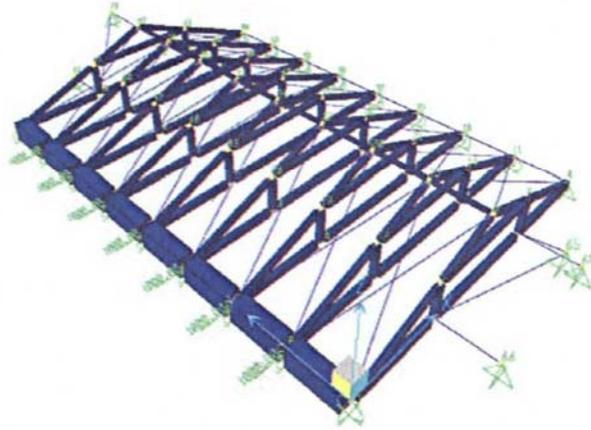
DEFORMAZIONI

Figura 6

SCHEMA STATICO E DI CARICO  
C A S O 2 . B . 1 5

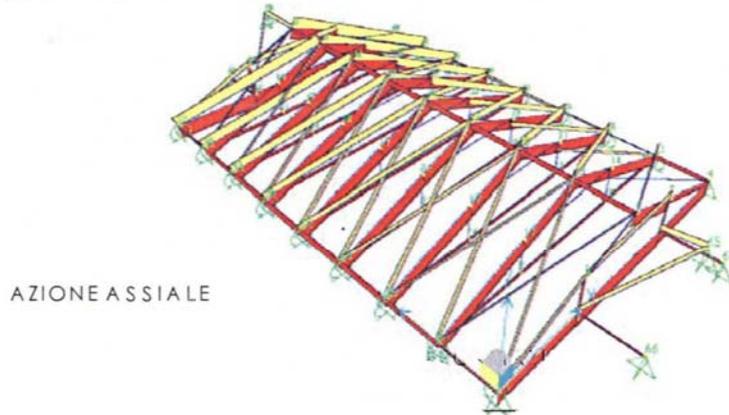
Caso 2. B.15

Estruso del modello strutturale e schema di carico



Caso 2. B.15

Diagramma dell' azione assiale



Caso 2. B.15

Deformata qualitativa del modello

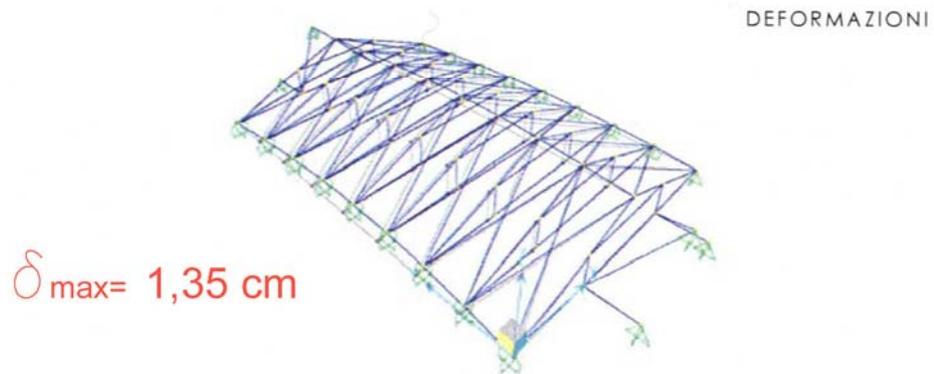
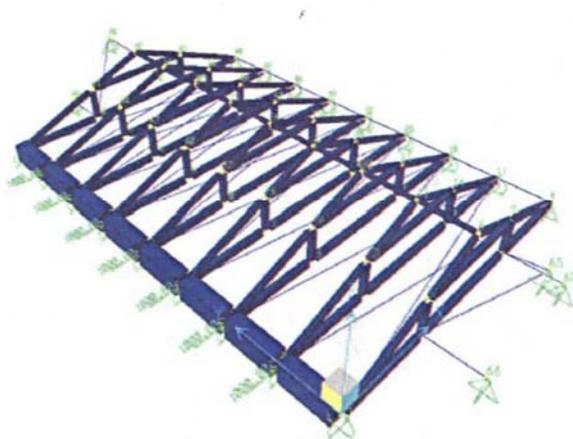


Figura 7

SCHEMA STATICO E DI CARICO  
CASO 2.C.15

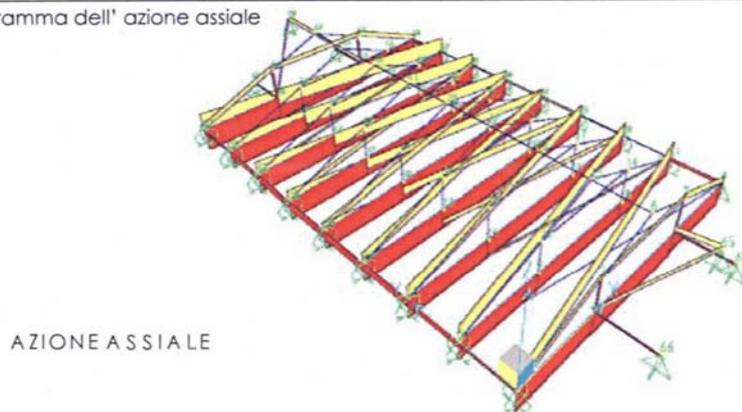
Caso 2.C.15

Estruso del modello strutturale e schema di carico



Caso 2.C.15

Diagramma dell' azione assiale



Caso 2.C.15

Deformata qualitativa del modello

DEFORMAZIONI

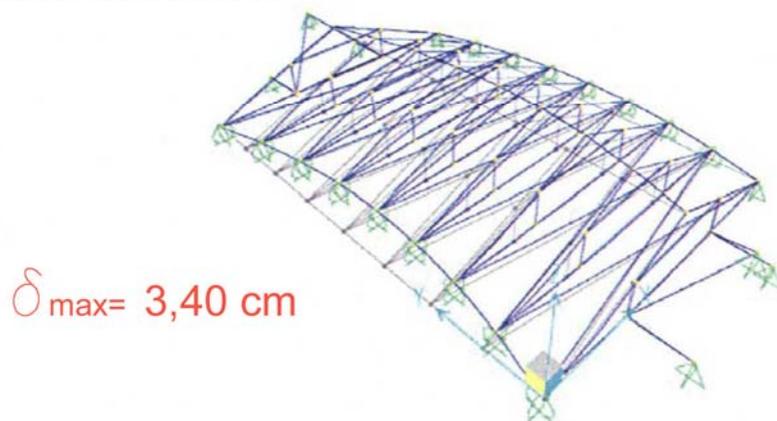
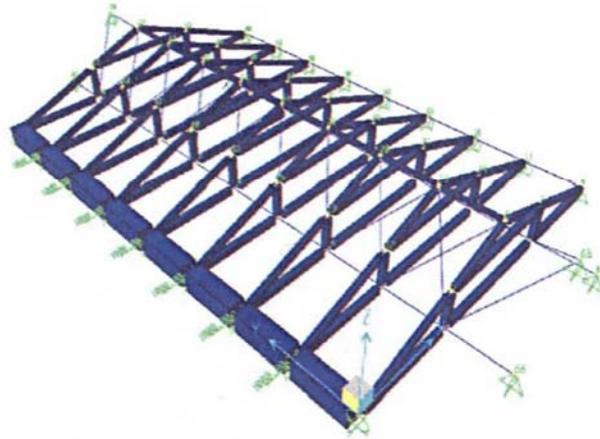


Figura 8

SCHEMA STATICO E DI CARICO  
CASO 2.D.15.2

Caso 2.D.15.2

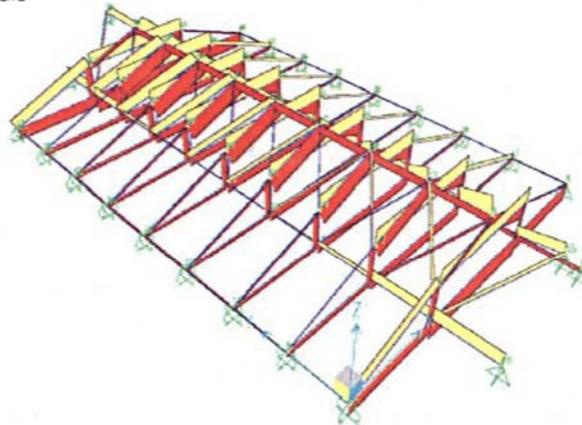
Estruso del modello strutturale e schema di carico



Caso 2.D.15.2

Diagramma dell' azione assiale

AZIONE ASSIALE



Caso 2.D.15.2

Deformata qualitativa del modello

DEFORMAZIONI

$\delta_{\max} = 2,45 \text{ cm}$

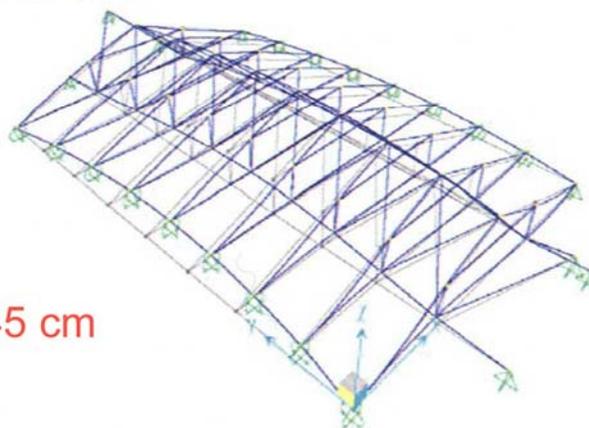
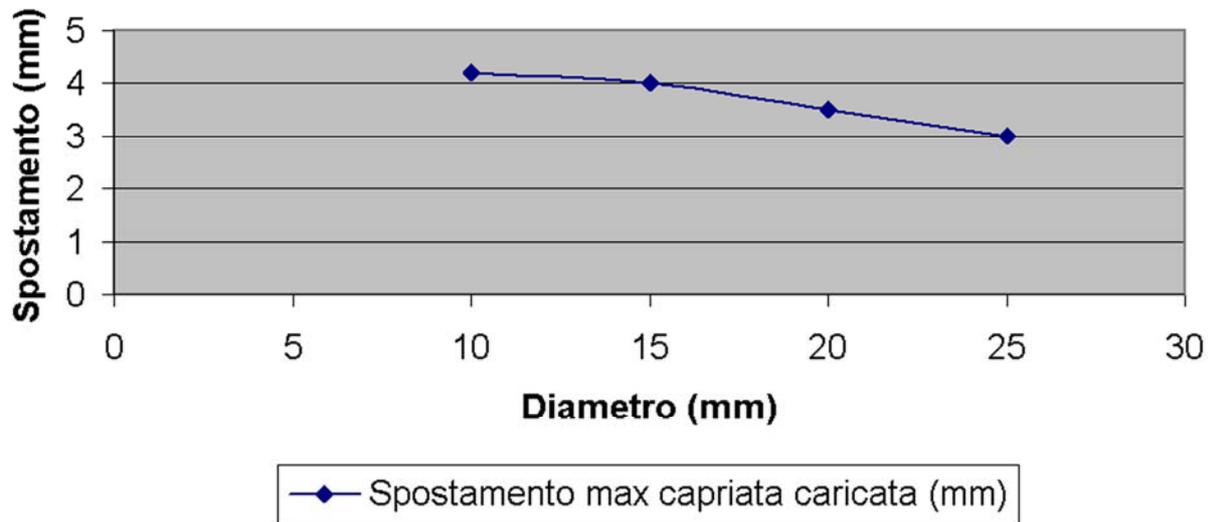


Figura 9

### Rapporto diametro/spostamento



### Rapporto diametro/spostamento

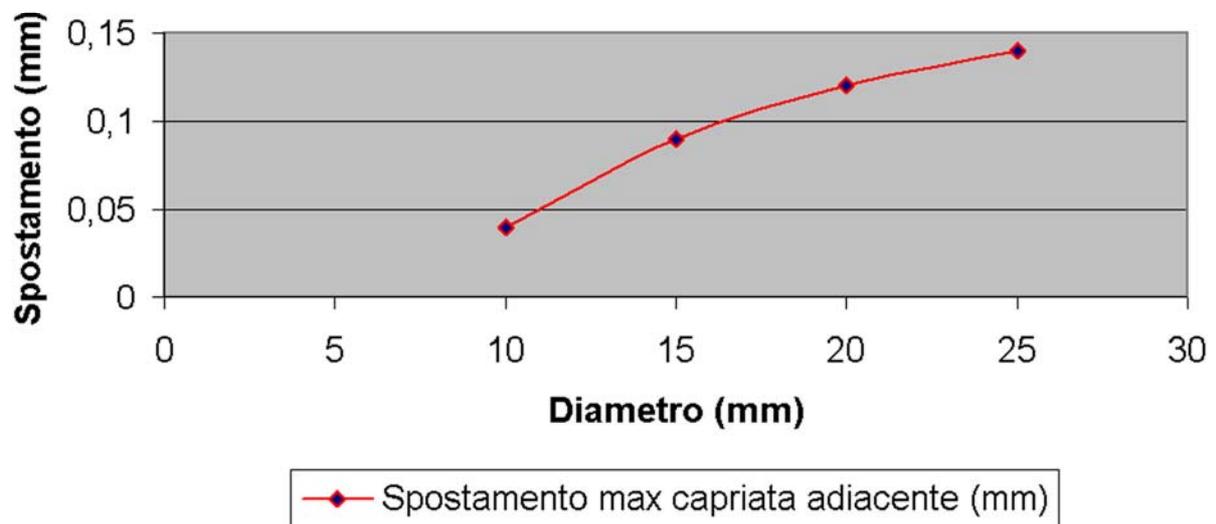


Figura 10