



COMUNE DI BOLOGNA
Settore Edilizia e Patrimonio

oggetto intervento:

MUSEO CIVICO ARCHEOLOGICO DI BOLOGNA
Via dell'Archiginnasio n.2

dati catastali:

Inv. Patr.:

Cod. Intervento:

5183

Tipologia Opere:

Edilizia

Elaborato:

descrizione intervento:

Manutenzione straordinaria museo archeologico
Consolidamento delle strutture del coperto

firme soggetti responsabili:

RESPONSABILE DI PROCEDIMENTO:

Arch. Manuela Faustini

PROGETTAZIONE GENERALE E COORDINAMENTO
PROGETTAZIONI SPECIALISTICHE



Finanziaria Bologna Metropolitana s.p.a..

Ing. Marco Santarelli (parte edile)

Ing. Luciano Begani, p.i. Alessandro Landuzzi (impianti)

PROGETTAZIONE ARCHITETTONICA-ARTISTICA:

Arch. Maria Grazia Campisi

PROGETTAZIONE STRUTTURALE:

Ing. Gilberto Dallavalle

Collaboratori:

Ing. Friedrich Drollmann - Ing. Giada Gasperini

COORDINAMENTO DELLA SICUREZZA IN FASE DI
PROGETTAZIONE



Finanziaria Bologna Metropolitana s.p.a.

Ing. Vincenzo Lucci

titolo elaborato:

PROGETTAZIONE ESECUTIVA
RELAZIONE TECNICO ILLUSTRATIVA E DI CALCOLO

n° tavola

R02

Codice Elaborato

Ufficio competente

Codice Edificio/Strada

Tip.Prog.

Tip.Doc.

ID Doc.

Progr.

Rev.

Scala

E

-

ELG

-

-

-

-

Directory di destinazione:

revisione elaborato

0

marzo 2016

Emissione

N. Rev.

Data Rev.

Descrizione Revisione

Visto

Firma

Redazione grafica

COMUNE DI BOLOGNA

MUSEO CIVICO ARCHEOLOGICO DI BOLOGNA PROGETTAZIONE ESECUTIVA STRUTTURALE PER L'ANALISI STATICA E LA PROGETTAZIONE DEGLI INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO DELLE STRUTTURE LIGNEE DEL COPERTO

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA RELAZIONE DI CALCOLO DELLE OPERE STRUTTURALI

Il Committente:

FINANZIARIA BOLOGNA METROPOLITANA S.p.A.
Piazza Costituzione, 5/c - 40128 Bologna

Il tecnico incaricato:

Dott. Ing. Gilberto Dallavalle
Piazza di Porta Maggiore n. 5 - 40137 Bologna

I collaboratori:

Dott. Ing. Friedrich Drollmann
Dott. Ing. Giada Gasparini

Bologna, 22 gennaio 2016

INDICE

1.	PREMESSA.....	2
2.	ESITI DELLE INDAGINI.....	2
3.	CARICHI UTILIZZATI.....	4
4.	CALCOLO DELLE SOLLECITAZIONI E VERIFICHE EFFETTUATE.....	7
4.1	Capriata all'italiana semplice.....	7
4.2	Capriata palladiana semplice	9
4.3	Capriata palladiana modificata	11
4.4	Capriata triangolare semplice	13
4.5	Capriata triangolare modificata in capriata italiana.....	15
4.6	Capriata polanceau.....	17
5.	GLI INTERVENTI PROGETTATI	19
5.1	Osservazioni di carattere generale	19
5.2	Rinforzo di nodi e potenziamento di collegamenti.....	21
5.2.1	Potenziamento dei collegamenti	21
5.2.2	Catena inferiore e nodo catena-puntone (appoggi di estremità).....	21
5.2.3	Rinforzo dei puntoni e dei nodi puntoni-monaco e puntoni-saette	22
5.3	Variazione o ripristino di schemi statici di singole capriate.....	24

1. PREMESSA

Nell' ambito dei lavori di ristrutturazione del Museo Civico Archeologico di Bologna (sito in via dell' Archiginnasio n. 2), lo scrivente dott. ing. Marino Gilberto Dallavalle ha ricevuto incarico dalla società Finanziaria Bologna Metropolitana (società in house del Comune di Bologna) di analizzare la situazione strutturale di una parte delle strutture di copertura.

Nel seguito si riporta l'esito delle indagini eseguite e delle calcolazioni effettuate al fine di progettare i necessari interventi di rinforzo locale.

2. ESITI DELLE INDAGINI

Gli accertamenti, progettati e coordinati dallo scrivente ed effettuati dall' ing. Tiziano Lucca nei mesi di giugno e luglio 2015, sono consistiti in:

- Ispezione visiva e misurazioni igrometriche sulla totalità degli elementi strutturali accessibili;
- In alcune zone certamente sane ed in altre certamente degradate (entrambe individuate sulla base del punto precedente), sono state eseguite prove strumentali (indagine resistografica mediante infissione di ago strumentato) ed indagine morfoanatomica (con identificazione delle essenze legnose e delle tipologie di aggressione);
- Nelle medesime zone sono state eseguite dallo scrivente prove di penetrazione mediante battitura di chiodi e prove di avanzamento a rotazione di idoneo "trivellino" da legno; in tale modo è risultato possibile effettuare un' adeguata estensione delle indagini anche sulle zone non indagate con strumenti specifici.

Gli esiti di tali accertamenti sono ampiamente illustrati nelle apposite relazioni redatte dall'ing. Lucca e da considerarsi integralmente allegate alla presente relazione; le principali informazioni desumibili da tali documenti sono le seguenti:

- le essenze legnose riscontrabili appartengono sia a conifere (abete rosso, abete bianco, larice) sia a latifoglie (quercia, pioppo);
- in alcune zone si riscontrano consistenti attacchi di insetti xilofagi ed in altre sono rilevabili muffe e funghi;

- le principali caratteristiche meccaniche possono essere cautelativamente riassunte nella seguente tabella.

valore	Simbolo	daN/cm ²
tensione limite per flessione (sia trazione che compressione)	σ_f	100,00
tensione limite per trazione pura parallela alle fibre	σ_{Tpar}	40,00
tensione limite per trazione ortogonale alle fibre	σ_{Tort}	0
tensione limite per compressione parallela alle fibre	σ_{Cpar}	80,00
tensione limite per compressione ortogonale alle fibre	σ_{Cort}	20,00
tensione limite per taglio	τ_{lim}	10,00
Modulo elastico	E	100.000
Modulo di taglio	G	50.000

- il manto di copertura risulta attualmente costituito da coppi in laterizio, che in alcune zone risultano sovrastanti un tavolato in non buone condizioni, ed in altre zone appaiono disposti sopra elementi in laterizio di varia lunghezza;
- i travetti lignei hanno quindi dimensioni (esprese in cm) variabili fra 10x5H (con interasse pari a circa 40 cm) e 8x10H (con interasse pari a circa 85 cm);
- i travetti appoggiano su arcarecci (o terzere) di dimensioni comprese fra 10x12 (con interasse pari a 145 cm e luce 250 cm) e 20x20 (con interasse pari a 210 cm e luce 350 cm)
- gli arcarecci appoggiano su capriate poste ad interasse variabile fra 250 cm e 350 cm, con pendenze dell' ordine di 18°; le tipologie di capriate rilevate in sito sono le seguenti:
 - capriata triangolare semplice (due puntoni + monaco centrale+catena);
 - capriata all' italiana (due puntoni + monaco centrale+ saette+catena)
 - capriata palladiana (puntoni inclinati+2 monaci+puntone piano+catena)
 - capriata zoppa (a sostegno falda ad unica inclinazione).

3. CARICHI UTILIZZATI

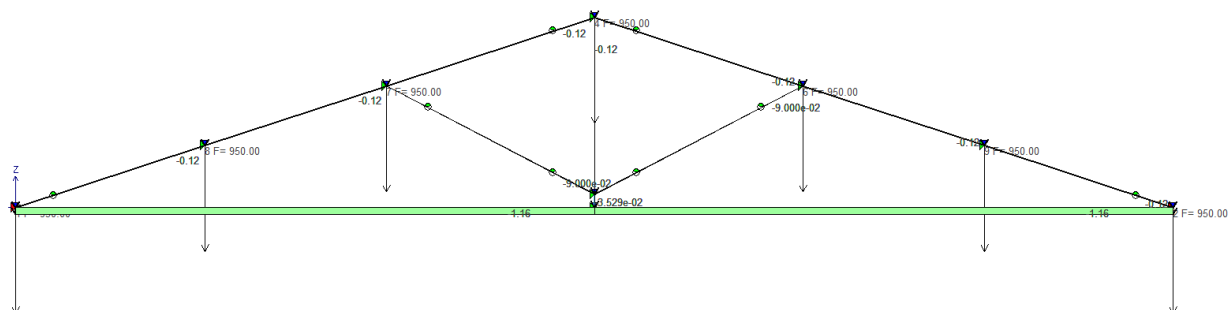
Nonostante la variabilità delle situazioni riscontrabili in sito, le analisi e le conseguenti verifiche possono essere condotte con riferimento alle seguenti valutazioni:

Solaio di copertura e solai di piano - Corpo 1 e Corpo 2

a.	manto di rivestimento in coppi tradizionali	80,00	daN/m ²
b.	eventuale isolamento e sovraccarichi complementari	20,00	daN/m ²
c.	doppio tavolato	20,00	daN/m ²
<u>TOTALE carichi permanenti a) + b) + c)</u>		120,00	daN/m ²
d.	carico variabile (neve)	130,00	daN/m ²
<u>TOTALE a) + b) + c)</u>		250,00	daN/m ²
Carico di servizio sulla catena inferiore		100,00	daN/m

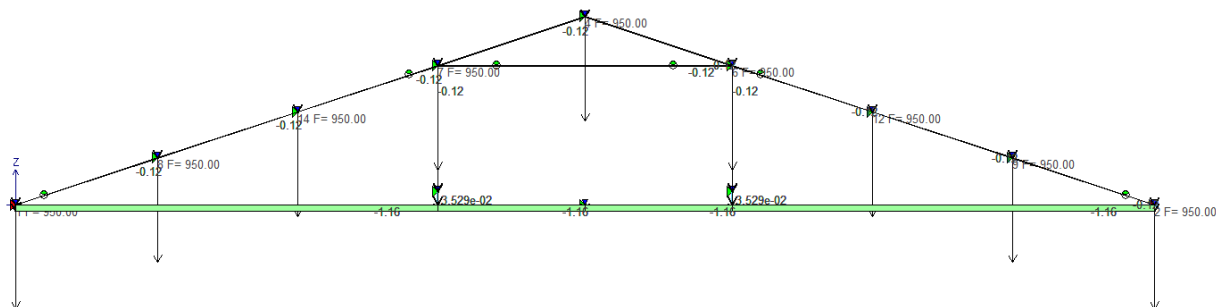
Si riportano le combinazioni di carico utilizzate nei nodi delle varie tipologie di capriata analizzate.

Capriata all'italiana semplice



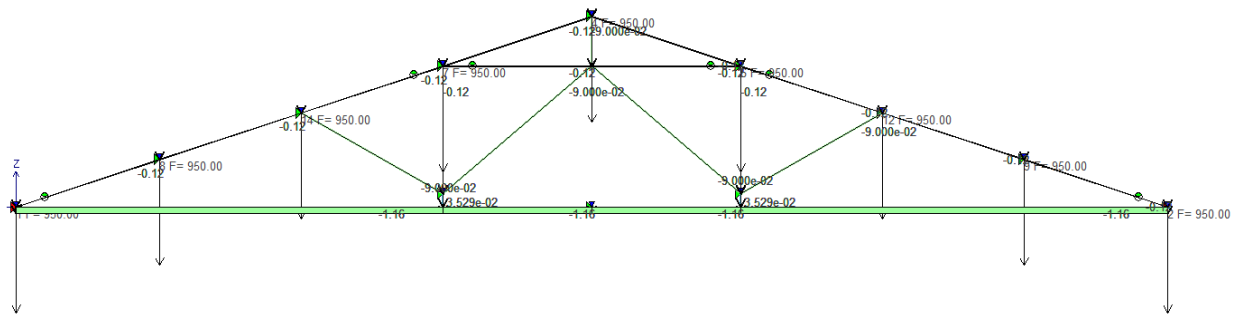
Carico massimo in combinazione di carico totale sui nodi in corrispondenza degli arcarecci pari a 950daN

Capriata palladiana semplice



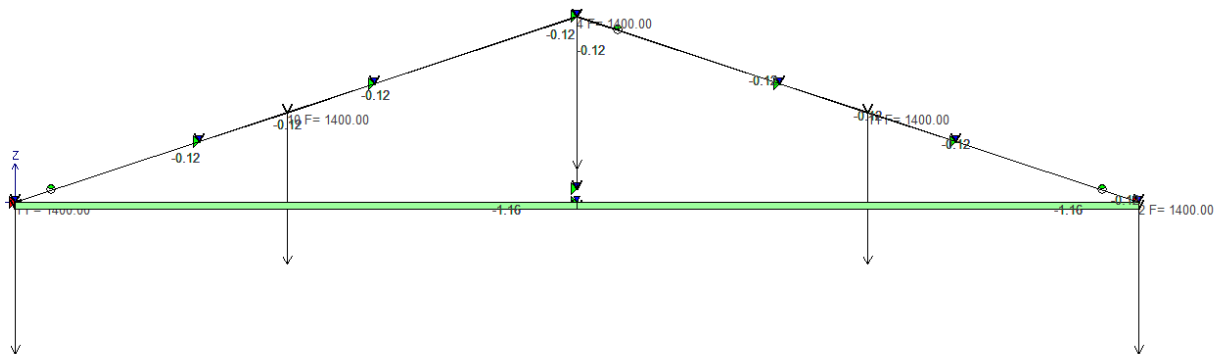
Carico massimo in combinazione di carico totale sui nodi in corrispondenza degli arcarecci pari a 950daN

Capriata palladiana modificata con coppia di saette



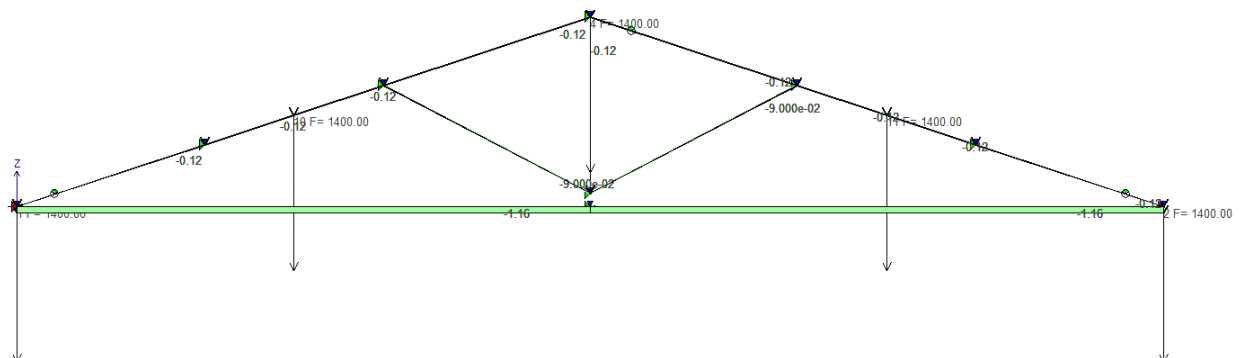
Carico massimo in combinazione di carico totale sui nodi in corrispondenza degli arcarecci pari a 950daN

Capriata triangolare semplice



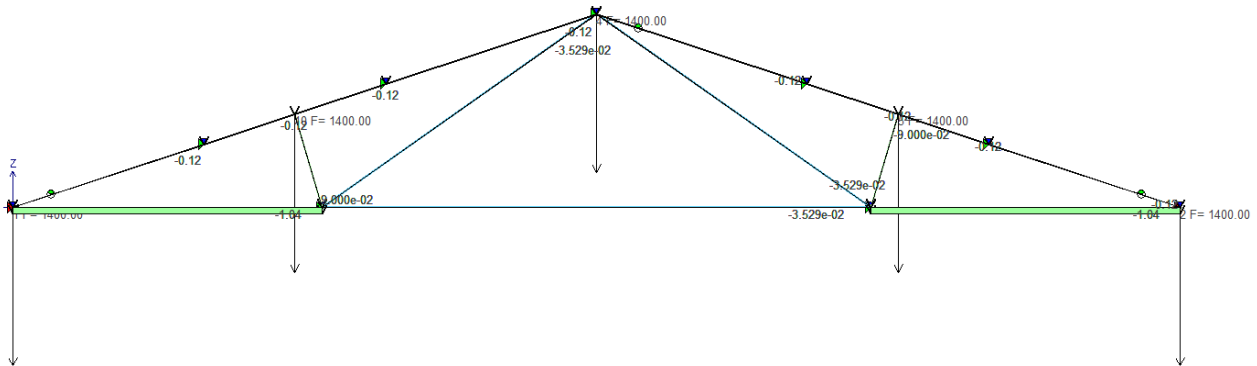
Carico massimo in combinazione di carico totale sui nodi in corrispondenza degli arcarecci pari a 1400daN

Capriata triangolare modificata con coppia di saette



Carico massimo in combinazione di carico totale sui nodi in corrispondenza degli arcarecci pari a 1400daN

Capriata polanceau



Carico massimo in combinazione di carico totale sui nodi in corrispondenza degli arcarecci pari a 1400daN

4. CALCOLO DELLE SOLLECITAZIONI E VERIFICHE EFFETTUATE

Le sollecitazioni sugli elementi del coperto sono state ricavate tramite modelli di calcolo FEM e per via manuale. Si riportano i risultati principali sotto forma di mappe di colore, sulla base delle varie capriate presenti nel coperto.

4.1 Capriata all'italiana semplice

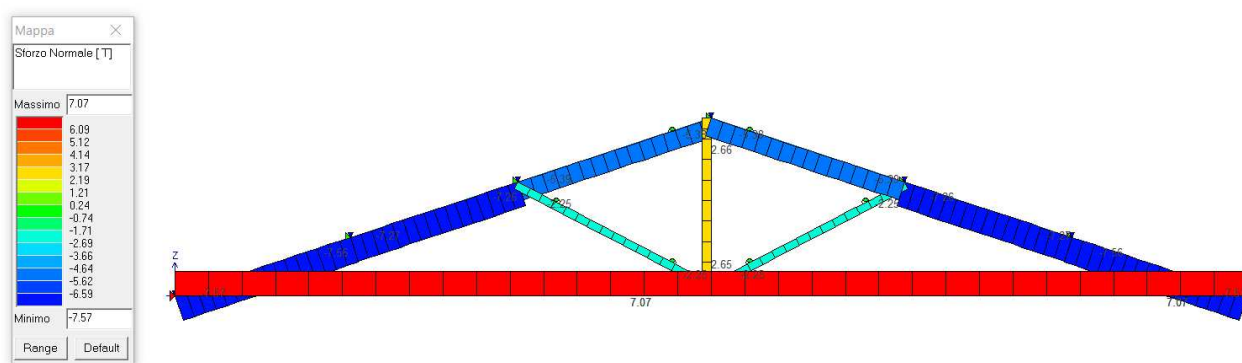


Diagramma dello sforzo normale – sforzo normale max nei puntoni pari a 7,5t

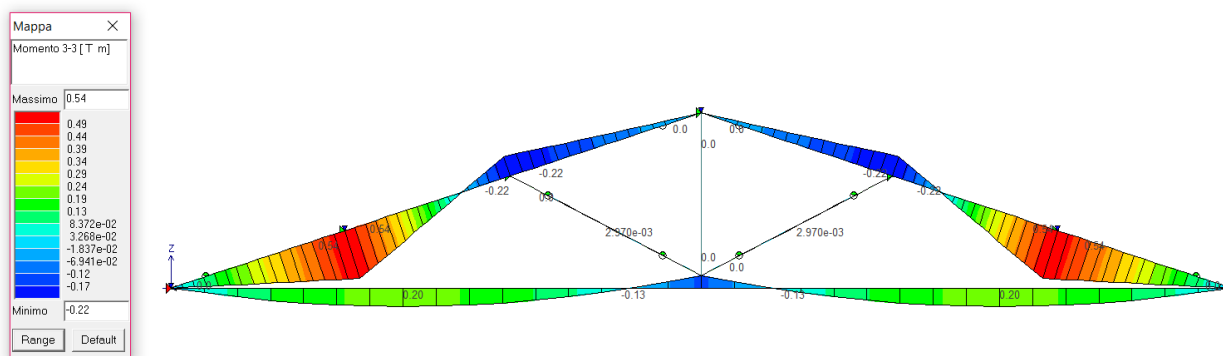


Diagramma del momento flettente – momento max nei puntoni pari a 0,54tm

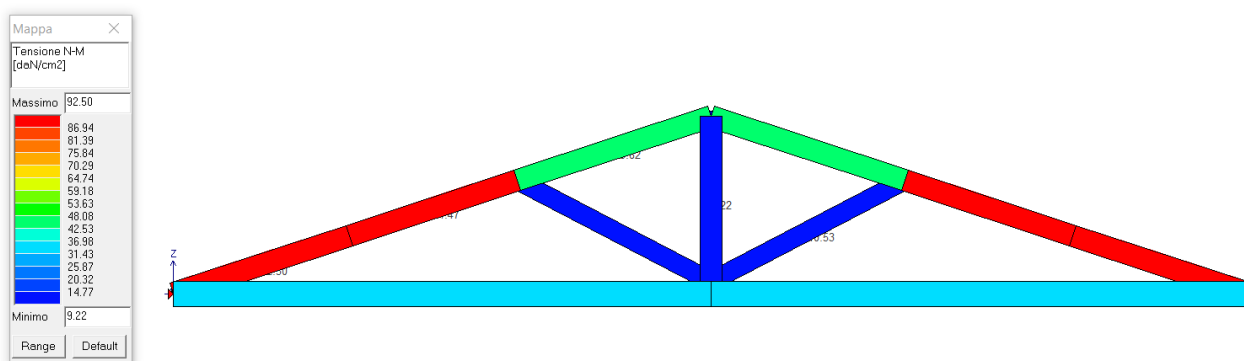


Diagramma delle tensioni M/N – tensione max di compressione nei puntoni pari a 92daN/cm² (max trazione 40daN/cm²)

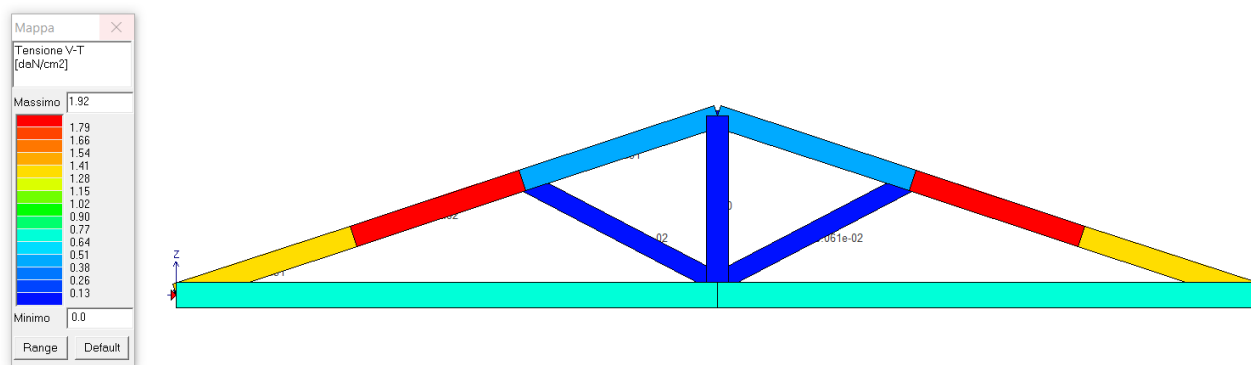


Diagramma delle tensioni V/T – tensione max nei puntoni pari a 2daN/cm²

L'entità delle sollecitazioni e delle conseguenti tensioni sugli elementi lignei ha condotto alla progettazione di uno specifico intervento relativo alla sospensione della catena con elemento in acciaio al monaco centrale.

4.2 Capriata palladiana semplice

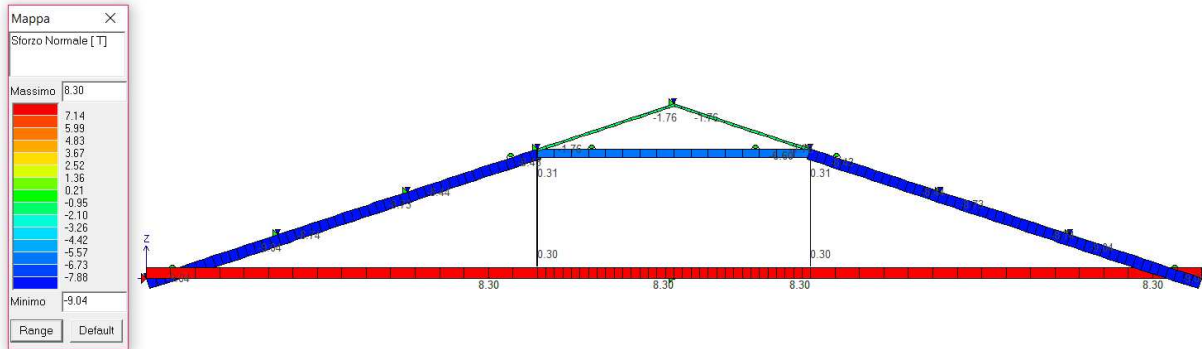


Diagramma dello sforzo normale – sforzo normale max nei puntoni inclinati pari a $9t$

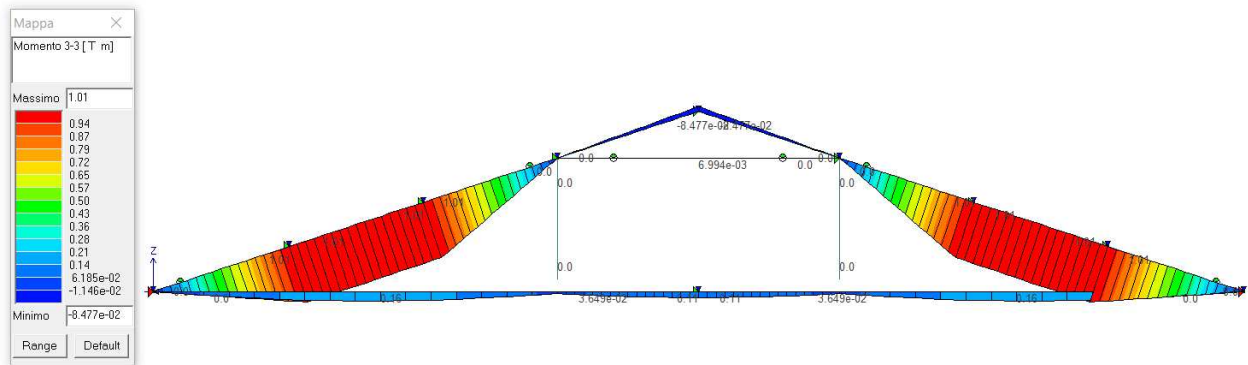


Diagramma del momento flettente – momento max nei puntoni inclinati pari a 1,01tm

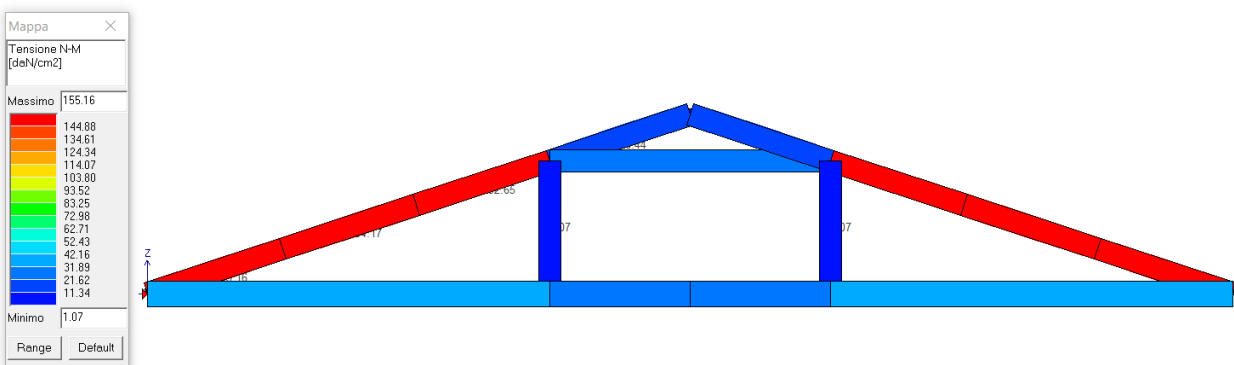


Diagramma delle tensioni M/N – tensione max di compressione nei puntoni inclinati pari a 155daN/cm² (max trazione 92daN/cm²)

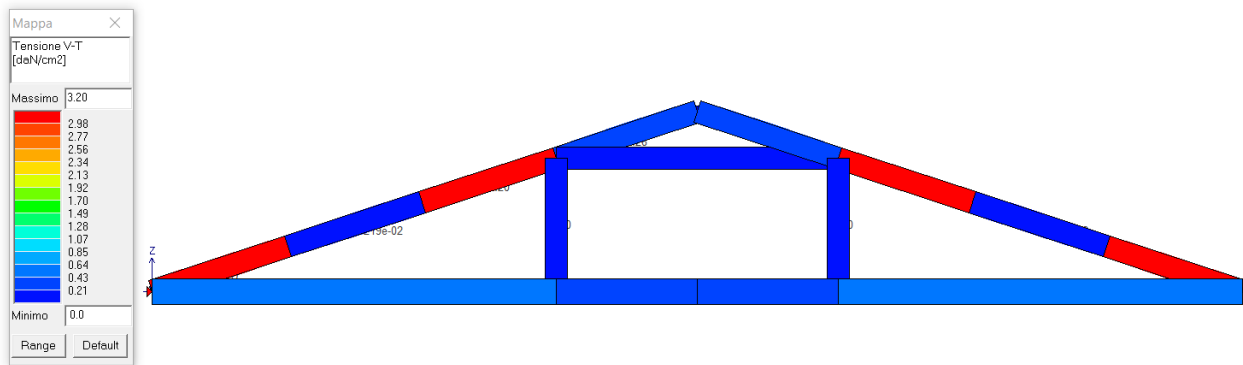


Diagramma delle tensioni V/T – tensione max nei puntoni pari a 3,2daN/cm²

L'entità delle sollecitazioni e delle conseguenti tensioni sugli elementi lignei ha condotto alla progettazione di uno specifico intervento relativo alla sospensione della catena con elementi in acciaio ai due monaci presenti nella capriata.

4.3 Capriata palladiana modificata

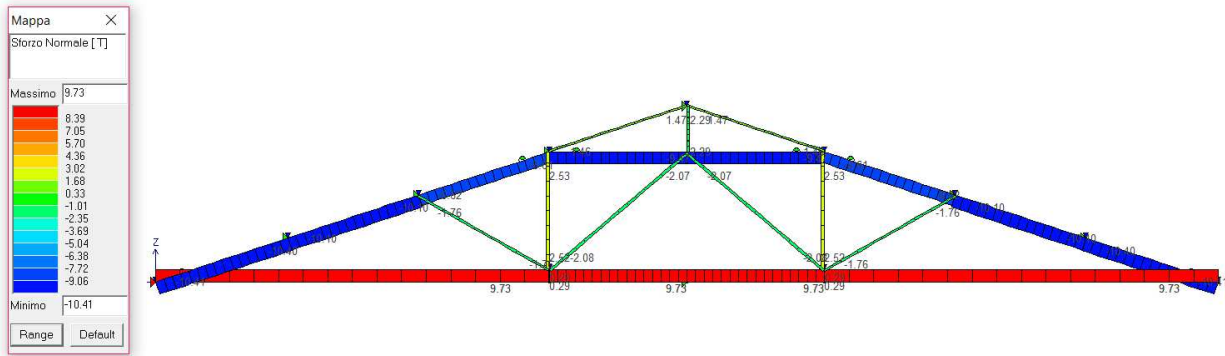


Diagramma dello sforzo normale – sforzo normale max nei puntoni inclinati pari a 10,5t

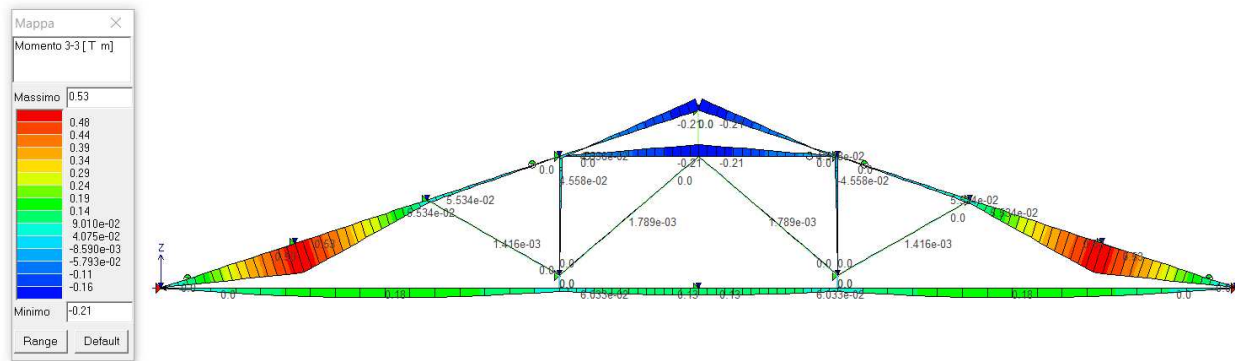


Diagramma del momento flettente – momento max nei puntoni inclinati pari a 0,53tm

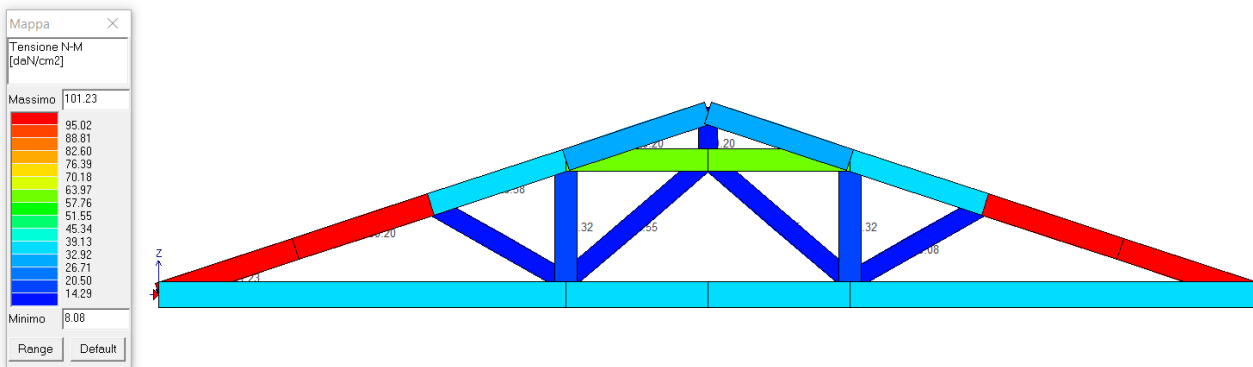


Diagramma delle tensioni M/N – tensione max di compressione nei puntoni inclinati pari a 101daN/cm²

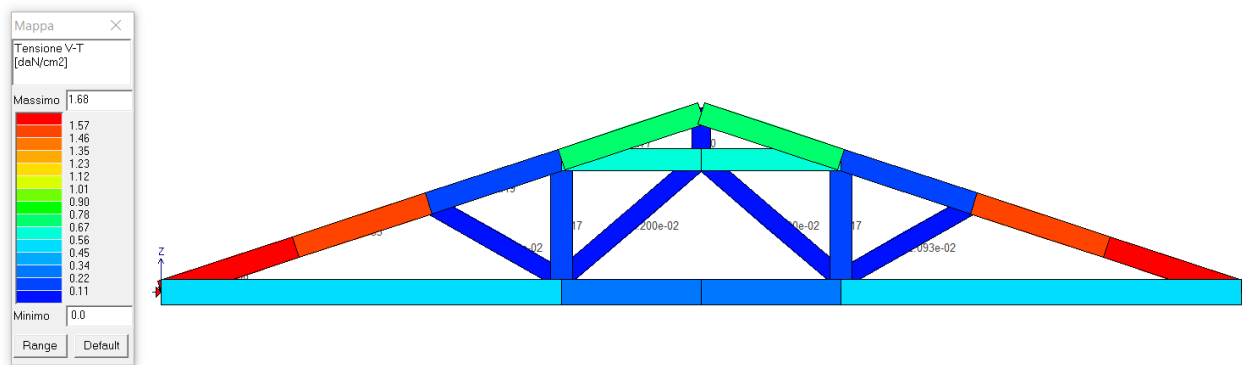


Diagramma delle tensioni V/T – tensione max nei puntoni pari a $1,7 \text{ daN/cm}^2$

L'entità delle sollecitazioni e delle conseguenti tensioni sugli elementi lignei ha condotto alla progettazione di uno specifico intervento relativo alla sospensione della catena con elementi in acciaio ai due monaci presenti nella capriata e alla realizzazione di coppie di saette in acciaio.

4.4 Capriata triangolare semplice

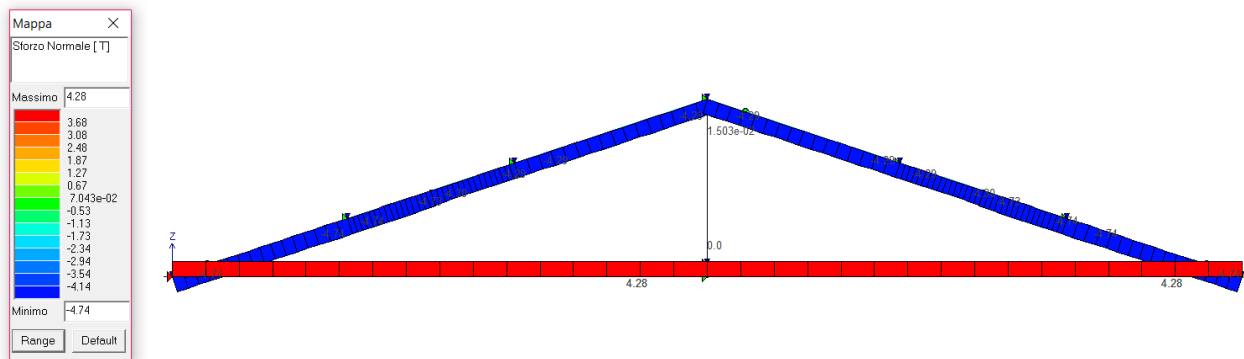


Diagramma dello sforzo normale – sforzo normale max nei puntoni inclinati pari a 4,7t

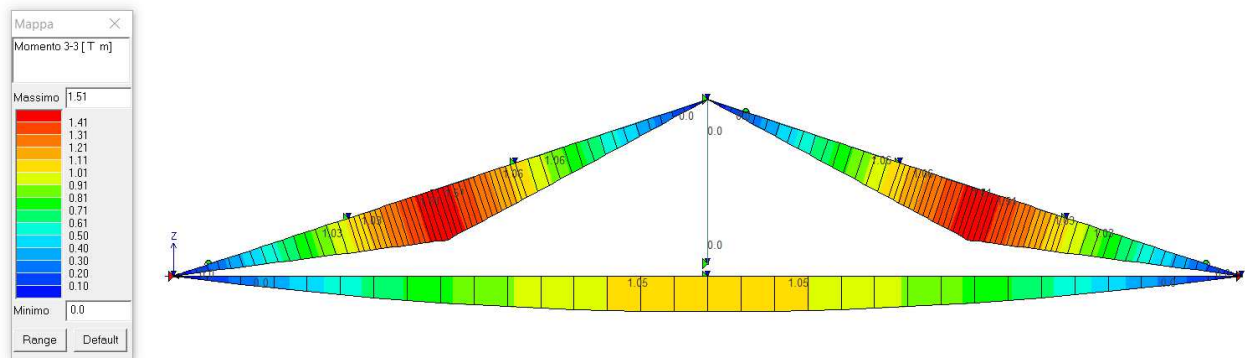


Diagramma del momento flettente – momento max nei puntoni inclinati pari a 1,53tm

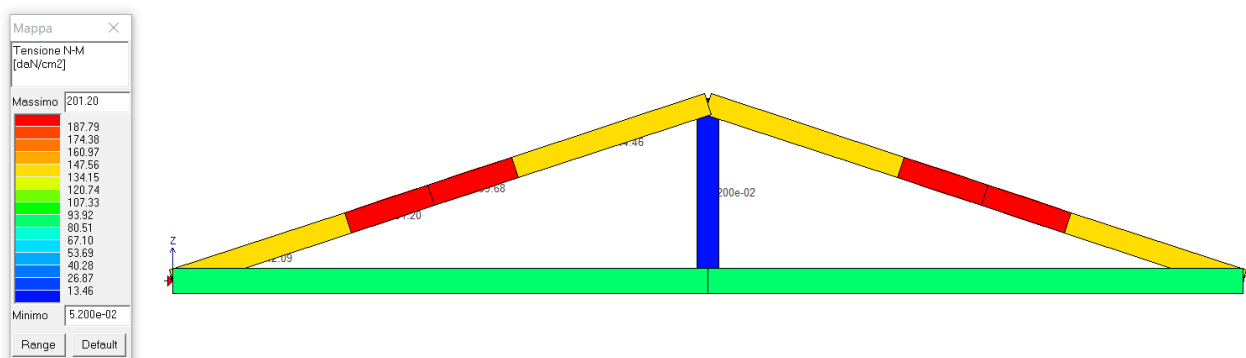


Diagramma delle tensioni M/N – tensione max di compressione nei puntoni inclinati pari a 201daN/cm²

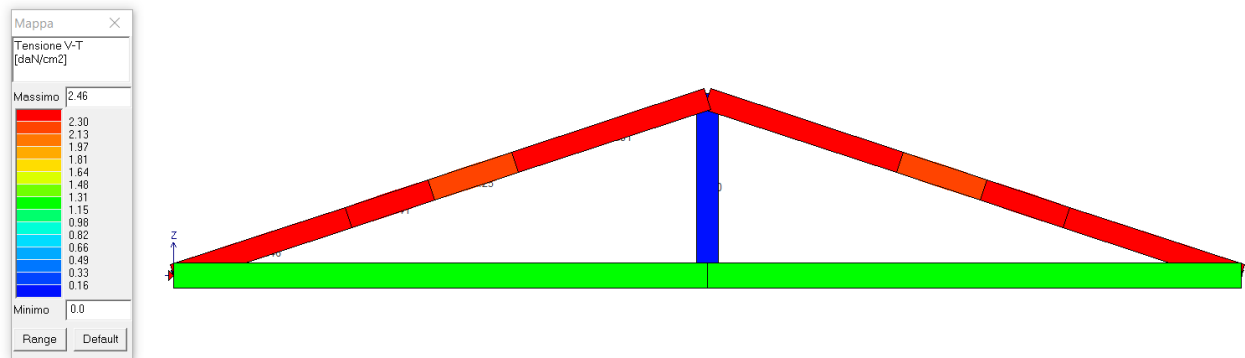


Diagramma delle tensioni V/T – tensione max nei puntoni pari a 2,5daN/cm²

L'entità delle sollecitazioni e delle conseguenti tensioni sugli elementi lignei ha condotto alla progettazione di uno specifico intervento relativo alla sospensione della catena con elemento in acciaio al monaco centrale ed all' inserimento di due saette (ric conducendola a capriata italiana).

4.5 Capriata triangolare modificata in capriata italiana

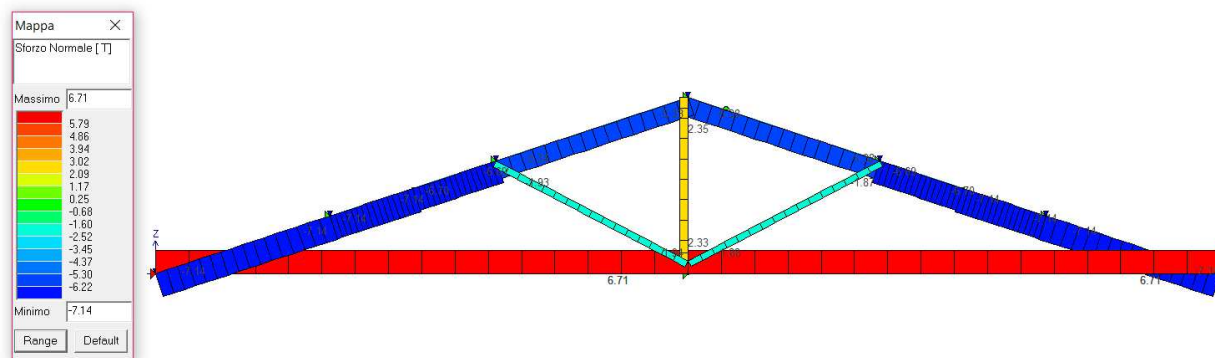


Diagramma dello sforzo normale – sforzo normale max nei puntoni inclinati pari a 7,2t

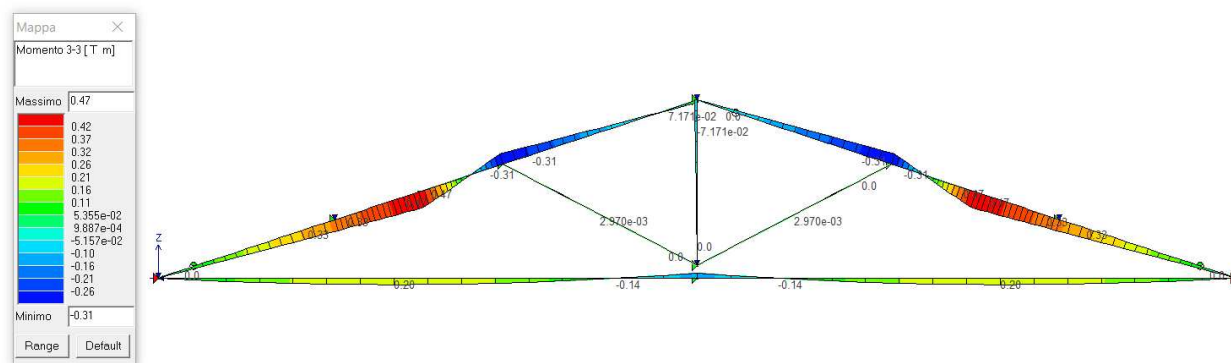


Diagramma del momento flettente – momento max nei puntoni inclinati pari a 0,47tm

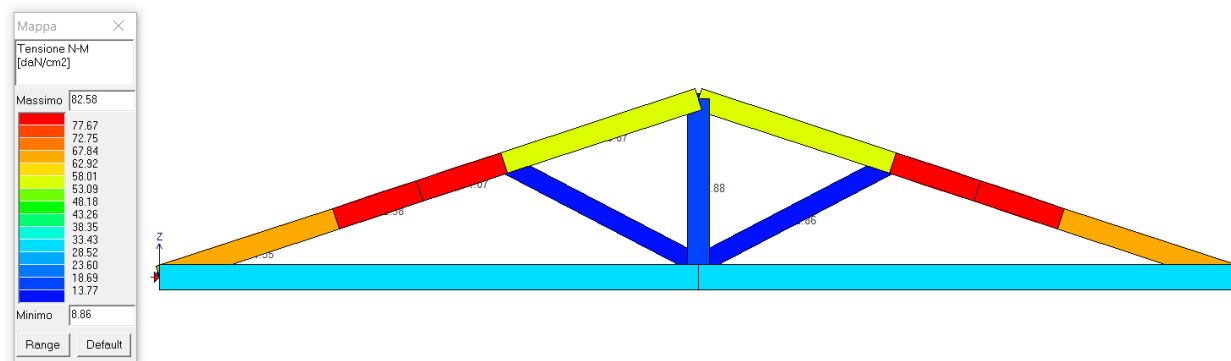


Diagramma delle tensioni M/N – tensione max di compressione nei puntoni inclinati pari a 82,5daN/cm²

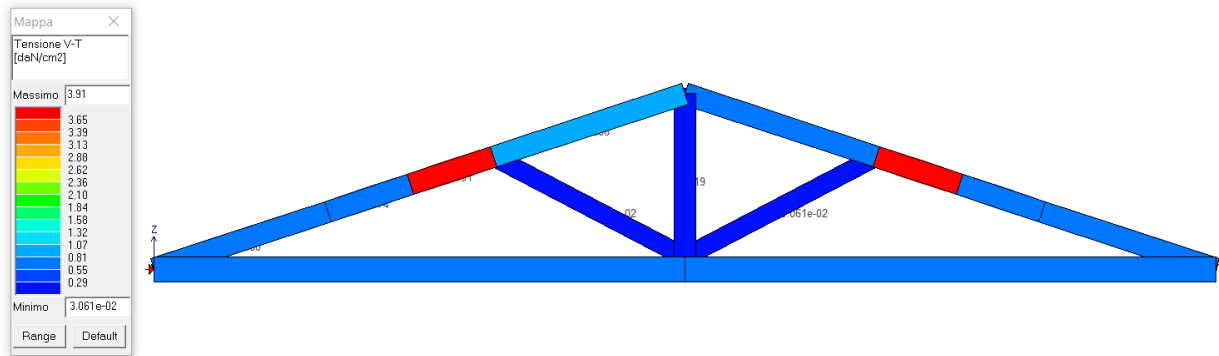


Diagramma delle tensioni V/T – tensione max nei puntoni pari a 3,9daN/cm²

L'entità delle sollecitazioni e delle conseguenti tensioni sugli elementi lignei ha condotto alla progettazione di uno specifico intervento relativo alla sospensione della catena con elemento in acciaio al monaco centrale e alla realizzazione di coppie di saette in acciaio.

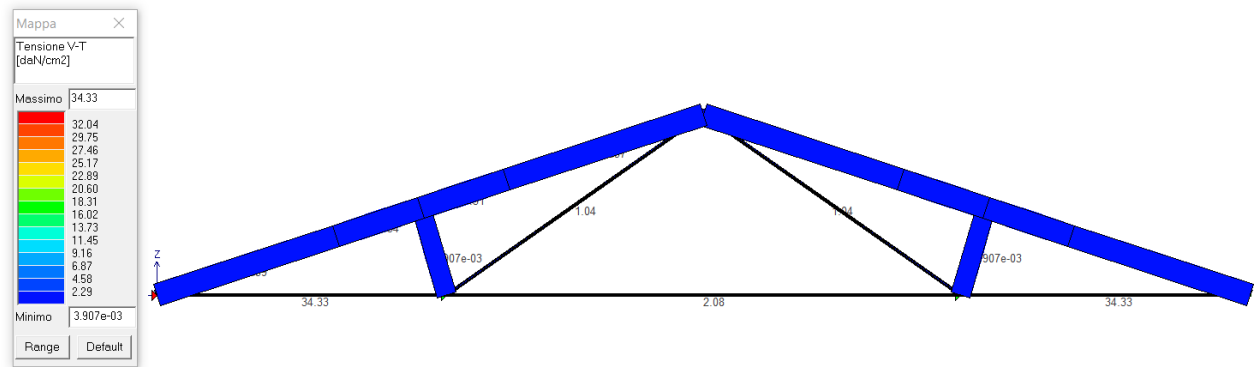


Diagramma delle tensioni V/T – tensione max nei puntoni inclinati (elementi lignei) pari a 0,1daN/cm²

5. GLI INTERVENTI PROGETTATI

5.1 Osservazioni di carattere generale

Sulla base delle indagini precedentemente descritte appare evidente come si renda necessario un diffuso trattamento di bonifica mediante interventi volti ad opporsi all'attacco di insetti xilofagi (capricorno) ed a funghi e muffe determinati dalle consistenti percolazioni.

Nel corso di tali attività potrà emergere la necessità della totale sostituzione di un numero limitato di elementi lignei, o dell'eliminazione di porzioni specifiche di alcuni di essi; in tale ultimo caso, apposite protesi realizzate in legno-acciaio (e connesse mediante tecniche classiche quali "incalmo" e "fettonatura") potranno surrogarne le funzioni.

Gli interventi si possono riassumere come di seguito elencato (si veda quanto riportato negli elaborati di progetto):

- 1) Sostituzione del tavolato ove necessario (se degradato o con spessore < 20 mm o con luce > 75 cm), disposizione di tavolato integrativo ($s = 24$ mm) e rinforzo mediante nastri in lamiera di spessore non superiore a 2 mm, disposti in modo da assorbire le azioni di trazione nel piano dell'impalcato; le lamiere saranno fissate sull'impalcato ligneo mediante chiodi e/o viti opportunamente disposte in funzione della tecnologia individuata dall'impresa escuttrice e dalla D.L.. Alcune connessioni saranno prolungate fino a determinare il collegamento doppio tavolato-travetto così come indicato nei particolari costruttivi.
- 2) Trattamenti contro l'attacco di insetti xilofagi e trattamenti anti funghi ed antimuffe, da estendere a tutta la copertura ove risulti necessario a discrezione della D.L.
- 3) Rinforzo di tutti i collegamenti travetti-arcarecci mediante integrazione delle chiodature esistenti, così come indicato nei particolari costruttivi.
- 4) Consolidamento di tutti i collegamenti arcarecci-capriate e tutti i nodi delle capriate.
- 5) Eventuale ricostruzione di parte degli elementi lignei (ad esempio la testata delle travi deteriorata da insetti, muffe, funghi) mediante protesi in legno-acciaio connesse all'esistente con le tecniche di "incalmo" e "fettonatura".
- 6) Eventuale rinforzo delle lesioni considerate risanabili, mediante intasamento e/o iniezioni con malte specifiche e successiva tesatura di barre filettate che attraversano ortogonalmente la fessura e si ancorano con rosette e dado sulle superfici esterne contrapposte.
- 7) Controllo sistematico di tutte le parti non visibili ed ispezione anche delle strutture in muratura sottostanti o adiacenti agli elementi lignei (muri di appoggio, tamponamenti, elementi stabilizzanti etc...).

- 8) Eventuale consolidamento delle murature, secondo le indicazioni della D.L., utilizzando le seguenti lavorazioni:
- a. scarifica dei giunti di malta per almeno 8 cm di profondità ed eliminazione di tutte le parti degradate o inconsistenti fino a raggiungere la muratura integra;
 - b. rigenerazione della muratura mediante sostituzione e/o integrazione dei mattoni, iniezioni di miscele a base di malta compatibili con la muratura storica;
 - c. ricostituzione dei giunti di malta con materiali di adeguata resistenza e durabilità.

A prescindere da quanto appena menzionato, i necessari interventi sono raggruppabili in due principali macro categorie:

- a. rinforzi di nodi e potenziamento di collegamenti;
- b. variazione o ripristino di schemi statici di singole capriate.

Nel seguito si descrivono nel dettaglio le varie lavorazioni ritenute necessarie, ampiamente illustrate negli elaborati di progetto.

5.2 Rinforzo di nodi e potenziamento di collegamenti

5.2.1 Potenziamento dei collegamenti

Come precedentemente accennato, il manto di copertura risulta attualmente costituito da coppi in laterizio, che in alcune zone risultano sovrastanti un tavolato in non buone condizioni, ed in altre zone appaiono disposti sopra elementi in laterizio di varia lunghezza; tale caotica situazione richiede la disposizione di un secondo tavolato che potrà essere adeguatamente inchiodato non solo alle precedenti tavole, ma anche ai travetti esistenti. Il collegamento mediante chiodatura consente l'automatico rinforzo dei travetti, con particolare riferimento a quelli di luce maggiore.

Il collegamento travetti-arcarecci avviene mediante 1 barra $\phi 10mm$ in corrispondenza dell'appoggio (inserita in foro $\phi 14mm$ intasato con idonea miscela a base di resine); ove l'arcareccio si appoggia sulla capriata il collegamento summenzionato viene raddoppiato (si utilizzano 2 barre $\phi 10mm$ incrociate) e proseguito fino a penetrare nel puntone.

5.2.2 Catena inferiore e nodo catena-puntone (appoggi di estremità)

Tale elemento strutturale risulta sottoposto ad uno sforzo di trazione che può raggiungere 8000 daN; inoltre, la necessità di disporre percorsi di passaggio per l'attività manutentiva (come citato in precedenza, i conseguenti carichi sono stati stimati pari a 100 daN/m) ne determina un considerevole stato di flessione. Nasce quindi naturale il provvedimento di sospendere la catena inferiore alla sommità della capriata (mediante opportune staffe), dimezzandone quindi la luce di inflessione.

Certamente l'appoggio della capriata sulla muratura perimetrale è sempre risultato il più delicato dei particolari; lo sforzo di compressione che sollecita il puntone inclinato (nel caso specifico dell'ordine di 9000 daN) si trasferisce alla catena a prezzo di notevoli sforzi concentrati nel tallone di estremità di tale elemento. Tali stati tensionali non sono più compatibili con le caratteristiche e le condizioni degli elementi lignei in oggetto. Appare quindi necessario trattenere reciprocamente gli estremi opposti della catena, confinandoli con piastre metalliche collegate da 2 barre $\phi 18mm$ che integrano quindi le risorse della preesistente catena lignea.

Completano il nodo due staffe (costituite da coppie di lastre in acciaio 40mmx6mm, poste in trazione mediante barre $\phi 14mm$ ad esse connesse mediante saldatura) progettate “ad hoc” al fine di aumentare la capacità di trasferimento delle azioni dal puntone alla catena; infatti, come è noto, la compressione della superficie di contatto fra i due elementi, diminuendo il rapporto τ / σ , incrementa la possibilità di tollerare azioni tangenziali.

5.2.3 Rinforzo dei puntoni e dei nodi puntoni-monaco e puntoni-saette

Relativamente al nodo nel quale confluiscono due puntoni fra i quali è interposta l'estremità del monaco, nel capitolo precedente è stata svolta la verifica di limitazione dello stato tensionale nella direzione ortogonale alle fibre lignee; occorre comunque cautelarsi sia nei confronti di un distacco fra i vari elementi strutturali sia riguardo allo scorrimento verso l'alto dell'estremità del puntone (l'unico freno a tale meccanismo appare l'estremo superiore del monaco).

Tali meccanismi di rottura vengono fronteggiati con due provvedimenti specifici:

- cucitura mediante 2 barre $\phi 10mm$ inserite in fori $\phi 14mm$ intasati con idonee miscele a base di resine; tali barre attraversano il puntone e si ancorano nel fusto del monaco al di sotto della superficie di separazione;
- la medesima staffa utilizzata per sospendere la catena inferiore ed i sovraccarichi su di essa (costituita da lamine 50mmx4mm disposte sia davanti che dietro il monaco), si divarica in corrispondenza dell'intradosso dei puntoni per giungere ad abbracciare l'estremità degli stessi e comprimerla verso la potenziale superficie di scorrimento;

Per quanto concerne il nodo saetta-puntone, il provvedimento minimo consiste nel disporre lamine sagomate (di sezione pari a 50mm x 4 mm) che stringano mediante bulloni ($\phi 10$ inseriti in fori $\phi 14$ intasati con idonee miscele a base di resine) gli elementi che confluiscono nel nodo; nelle situazioni maggiormente compromesse potrà rendersi necessaria la cucitura tramite 2 barre $\phi 10$ inserite in fori $\phi 14$ (in analogia al nodo puntoni-monaco), eventualmente ancorate in un'idonea bietta in legno duro disposta all'interno della capriata.

Il nodo saette-monaco si giova del sistema di sospensione della catena; infatti il monaco viene portato a contatto con la catena stessa opponendosi in questo modo al meccanismo di crisi dell'estremità inferiore del monaco e di scorrimento delle saette verso il basso. Per tale nodo risulta quindi sufficiente disporre lamine sagomate (di sezione pari a 50mm x 4 mm) che colleghino le due saette e siano saldate alla staffa di sospensione summenzionata.

Occorre precisare che, ove i puntoni risultino particolarmente degradati e non più completamente idonei per tollerare i notevoli sforzi di compressione (uniti alla flessione indotta dall'appoggio degli arcarecci lontani dai nodi), si potrà integrarne la sezione tramite ulteriori elementi lignei sovrapposti all'estradosso di esso (ovviamente collegati tramite idonei connettori metallici); in tale modo si risolve contemporaneamente il problema della stabilità degli arcarecci.

5.3 Variazione o ripristino di schemi statici di singole capriate

La caotica distribuzione di capriate, travi, aste di vario genere e le eterogenee conseguenze di percolazioni ed insetti xilofagi ha probabilmente condotto in passato a soluzioni d'emergenza, non integrate con l'impianto strutturale originale e non sufficientemente studiate; la necessità di creare varchi per le reti impiantistiche ha infine determinato inopportune scelte, quali quelle di rimuovere elementi strutturali non sostituendoli adeguatamente e rinforzare nodi in modo rozzo.

In tale occasione risulta quindi indispensabile ripristinare schemi statici preesistenti o, in alcuni casi, creare nuovi percorsi di carico; sostanzialmente si individuano le seguenti situazioni (per maggiori dettagli e l'identificazione delle zone 1, 2, 3, 4, e 6 si vedano le tavole di progetto):

- rinforzare alcune capriate palladiane mediante l' inserimento sia di puntoni probabilmente rimossi, sia di nuove saette (ad esempio in alcune capriate delle zone 1 e 5);
- ripristinare le capriate zoppe della zona 6;
- rinforzare alcune travi singole della zona 6, in modo da potere rimuovere alcune saette del sottostante cavalletto (infatti attualmente le saette inducono una consistente azioni fuori piano nella muratura esterna);
- ricreare capriate ove nel tempo la rimozione di vari elementi strutturali e l' inserimento casuale di altri ha determinato un meccanismo resistente a travi semplici (zone 1,3,4,6).