

*Università degli Studi di Padova*  
*Facoltà di Ingegneria*



Corso di laurea in Tecniche e Gestione dell'Edilizia e Territorio

Dipartimento di Ingegneria

TESI DI LAUREA

Studio di un modello per colonne calastrellate in acciaio

Relatore: Prof. Daniela Boso

Correlatore: Prof. Loris Luison

Laureando: Mattia Todesco

Anno Accademico 2021-2022

# Indice

1	PREMESSA.....	3
2	DESCRIZIONI ASTE CALASTRELLATE.....	4
2.1	Comportamento statico delle colonne calastrellate a flessione.....	7
2.2	Ambiti di applicazione colonne calastrellate.....	9
3	RIGIDEZZA FLESSIONALE DELLE COLONNE CALASTRELLATE.....	10
3.1	Teorema di Huygens-Steiner.....	10
3.2	Determinazione rigidezza colonne calastrellate mediante NTC 2018.....	11
3.3	Concetto della colonna a rigidezza equivalente.....	12
4	MODELLAZIONE COLONNE.....	13
4.1	Descrizione elementi finiti utilizzati nella modellazione delle colonne.....	13
4.2	Descrizione modellazione colonna calastrellata.....	15
4.3	Descrizione modellazione colonna di tipo unifilare.....	16
4.4	Confronto modellazione colonna calastrellata e unifilare.....	18
5	APPLICAZIONE CASO REALE.....	19
5.1	Descrizione capannone.....	19
5.2	Descrizione colonne calastrellate capannone.....	23
5.3	Materiali utilizzati.....	25
5.4	Modellazione della struttura.....	26
5.4.1	Vincoli.....	31
5.4.2	Modello di calcolo con colonne calastrellate.....	32
5.4.3	Modello di calcolo con colonne equivalenti.....	34
6	ANALISI NUMERICHE.....	35
6.1	Confronto spostamenti colonne calastrellate ed equivalenti nel capannone.....	35
6.2	Confronto spostamenti alla sommità della copertura del capannone.....	37
6.3	Confronto reazioni vincolari alla base delle colonne.....	38
6.4	Conclusioni.....	39
7	BIBLIOGRAFIA.....	40

## 1 PREMESSA

*L'obiettivo di questa tesi è lo studio di un modello a colonne calastrellate in acciaio in particolare quello di dimostrare attraverso modelli di calcolo e teoria, la possibilità di schematizzare la modellazione di una colonna calastrellata ad una unifilare avendo un valore di rigidezza equivalente. Gli strumenti utilizzati saranno un programma di calcolo, e varie nozioni teoriche. L'elaborata avrà una struttura suddivisa in una prima parte di introduzione alle colonne calastrellate e al loro impiego, la rigidezza flessionale di una colonna calastrellata, per poi passare alla fase della modellazione su cui si basa il nocciolo del lavoro, ovvero la ricerca di una rigidezza equivalente prima di schematizzare una colonna calastrellata in una unifilare. Dopo aver mostrato i risultati con grafici e modelli di calcolo, la parte finale sarà formata da delle conclusioni con la discussione di eventuali vantaggi del modello schematizzato.*

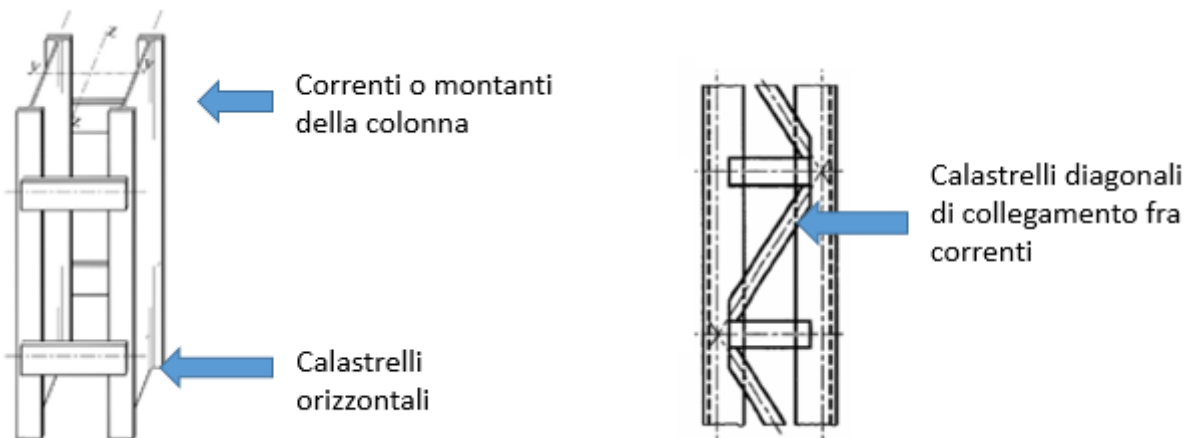
## 2 DESCRIZIONI ASTE CALASTRELLATE

Le aste calastrellate sono formate da profili tradizionali assemblati, appunto, con calastrelli, ovvero elementi di collegamento saldati ai profili stessi. Il comportamento d'insieme è a telaio ed i calastrelli lavorano prevalentemente a flessione ed a taglio.

Gli elementi verticali che compongono le aste calastrellate sono detti correnti e sono realizzati mediante profili tipo IPE, HE o sezioni saldate.

I collegamenti tra i correnti sono invece realizzati mediante piatti o profili angolari. I collegamenti fra i correnti possono essere orizzontali e diagonali.

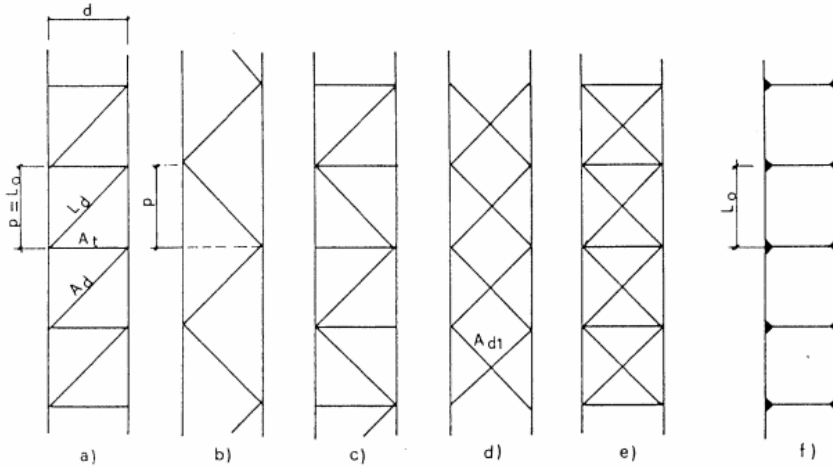
Per una miglior comprensione delle aste calastrellate si riportano le seguenti immagini.



Un aspetto molto importante relativo alle aste composte è quello dei collegamenti. Una loro eccessiva deformabilità penalizza sensibilmente la capacità portante e quindi questi devono essere sempre saldati ovvero bullonati con adeguato grado di serraggio.

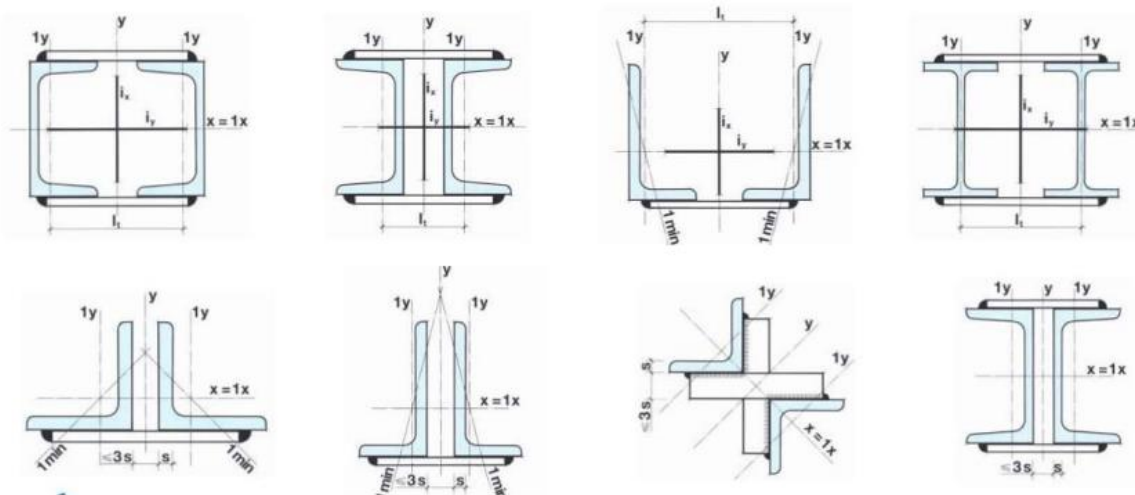
Le colonne calastrellate si differenziano in base alla modalità di collegamento tra i profili che realizzano i correnti della colonna. Nella seguente immagine sono riportate alcuni schemi di aste composte, e possono essere principalmente di tre tipi:

- Aste tralicciate

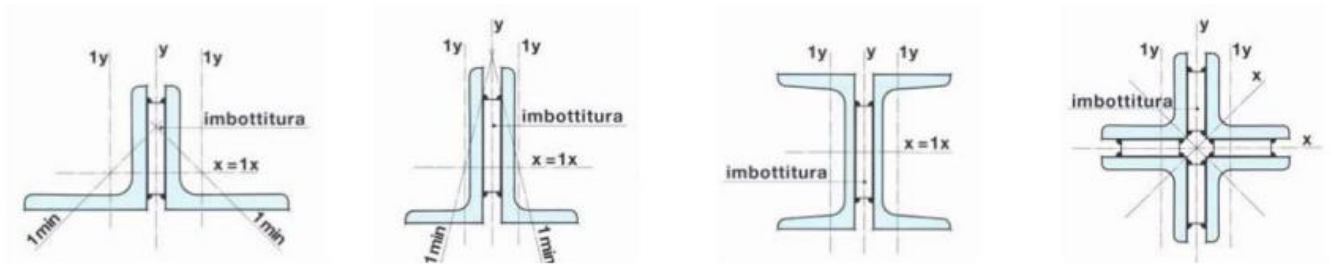


Si può notare come si possano variare in base alle esigenze di progetto, come colonne con solo calastrelli orizzontali, colonne con solo calastrelli diagonali, colonne con calastrelli orizzontali e i diagonali alternati.

- Aste calastrellate



- Aste abbottonate



Il progetto di un'asta composta viene effettuato sulla base delle seguenti ipotesi:

- le sezioni trasversali sono doppiamente simmetriche
- il numero delle campate comprese fra un distanziale e l'altro deve essere almeno uguale a tre, per cui i montanti sono vincolati almeno alle estremità e ai terzi della loro lunghezza  $l$
- distanza tra i montanti:  $a \leq 3 \cdot h$  per aste con imbottiture e  $a \leq 6 \cdot h$  per aste con calastrelli
- disporre almeno quattro chiodi oppure due bulloni con connettori in ogni piano di taglio

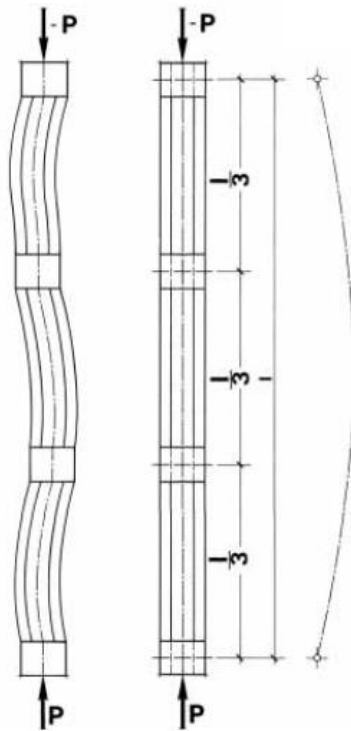
## 2.1 Comportamento statico delle colonne calastrellate a flessione

Queste aste composte sono sollecitate a sforzo normale di compressione  $N_{c,0}$ ,  $d$ , che si considera applicato nel baricentro della sezione composta e di norma devono essere verificate a carico di punta.

Il comportamento della sezione composta risulta differente a seconda che la deformazione dell'asta avvenga in direzione dell'asse  $x_0$  oppure dell'asse  $y_0$ .

Nel primo caso l'asse  $x_0$  è la traccia del piano di flessione, mentre l'asse  $y_0$  rappresenta l'asse neutro, che è baricentrico rispetto alla sezione composta, ma non rispetto alle sezioni delle singole aste.

Si verifica pertanto uno sforzo di scorrimento fra montante e montante che deve essere assorbito dai distanziali di collegamento, i quali però non sono in grado di assicurare una rigidità totale dell'asta composta.



Nel secondo caso il piano di flessione ha per traccia l'asse  $y_0$ , mentre  $x_0$  rappresenta l'asse neutro che è baricentrico rispetto alla sezione composta e a quello delle singole aste.

Per la verifica si considerano quindi due situazioni.

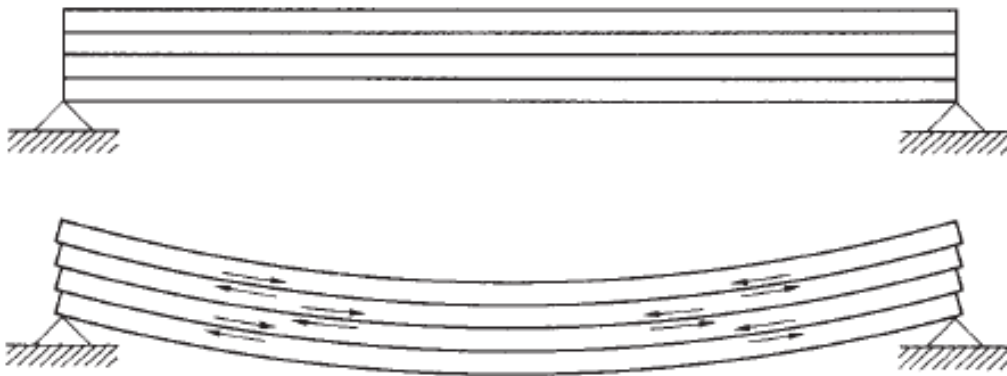
1) Piano di flessione con traccia  $y_0$  : la sezione composta si comporta come se i montanti fossero tutti accostati e i distanziali non devono assorbire alcuno sforzo di scorrimento. La capacità portante dell'asta si ottiene come somma delle capacità portanti dei montanti e la verifica a carico di punta si effettua con riferimento a una sezione di base  $n \cdot h$  e altezza  $b$ .

2) Piano di flessione con traccia  $x_0$  : i montanti tendono a scorrere uno rispetto all'altro, quindi l'asta composta manca di rigidità flessionale, per cui si deve considerare una snellezza ideale efficace  $\lambda_{ef}$ .

L'azione dello sforzo assiale sull'asta composta con imbottiture o calastrelli incernierata alle estremità determina una flessione dell'asta stessa, il cui asse si dispone secondo una curva assimilabile a una semionda sinusoidale; i collegamenti rigidi trasversali, disposti almeno ai terzi della lunghezza dell'asta, hanno la funzione di contrastare tale inflessione, per cui la semionda sinusoidale di flessione rimane contenuta nell'interasse dei collegamenti.

Questo comportamento flessionale determina uno scorrimento di ogni asta semplice rispetto alle altre e l'intensità delle forze di scorrimento risulta massima in corrispondenza dei collegamenti e nulla a metà del loro interasse.

Questa situazione è praticamente uguale a quella che si ha in una trave pensata realizzata da più tavole sovrapposte che, per effetto del momento flettente, tendono a scorrere una rispetto all'altra in corrispondenza dei piani di contatto, in quanto l'intradosso di ogni tavola tende ad allungarsi, mentre l'estradosso della tavola contigua si accorcia. Volendo eliminare questo scorrimento reciproco è possibile a esempio disporre alcuni bulloni, i quali risultano quindi sollecitati a taglio.



La funzione dei calastrelli è assimilabile a quella dei bulloni e pertanto vengono a essere sollecitati a taglio per effetto dei momenti flettenti che tendono a far inflettere lateralmente l'asta.

Lo studio viene limitato ad aste composte con due o tre montanti collegati con distanziatori.

I distanziatori (imbottiture o calastrelli) hanno la funzione di contrastare lo scorrimento reciproco dei montanti, assicurando la maggiore rigidità possibile all'asta, per cui sono soggetti alla sollecitazione di taglio determinata dal momento che tende a far sbandare lateralmente l'asta nella direzione  $x_0$ .



## 2.2 Ambiti di applicazione colonne calastrellate

Considerando il valore abbastanza elevato della resistenza a compressione del legno e tenendo presente che il carico massimo che può gravare su un elemento strutturale soggetto a sforzo normale di compressione dipende dal momento d'inerzia minimo della sua sezione, risulta spesso conveniente o necessario, a livello strutturale e architettonico, quando si è in presenza di forti carichi assiali, impiegare aste composte, costituite da più elementi in legno fra loro non distanziati, o più comunemente distanziati mediante imbottiture oppure calastrelli in legno disposti a intervalli regolari.

Le aste calastrellate o aste composte, trovano un elevato utilizzo nell'ambito civile ed industriale, ma a volte non sono la soluzione economicamente più conveniente a causa della poca adeguatezza statica. Le aste composte sono formate da due o più correnti distanziate e vincolati tra loro mediante piastre rettangolari (calastrelli) in modo discontinuo, e ogni corrente può essere realizzato con uno o più profili collegati tra loro. I vari elementi vengono quindi fra loro solidarizzati con bulloni, caviglie o mediante incollaggio, in modo da ottenere una struttura rigida.



### 3 RIGIDEZZA FLESSIONALE DELLE COLONNE CALASTRELLATE

Le aste tralicciate sono formate da profili assemblati con elementi trasversali, detti appunto tralici, generalmente uniti attraverso imbullonatura. Il comportamento del sistema è a traliccio, ovvero come una generica trave reticolare.

#### 3.1 Teorema di Huygens-Steiner

Detto  $I$  il momento d'inerzia di una sezione  $A$ , rispetto ad un asse  $a$  passante per il baricentro  $G$ , il momento d'inerzia rispetto ad un asse  $a'$  e distante  $d$  da questo dall'asse baricentrico si determina dalla seguente relazione:

$$I' = I + A \cdot d^2$$

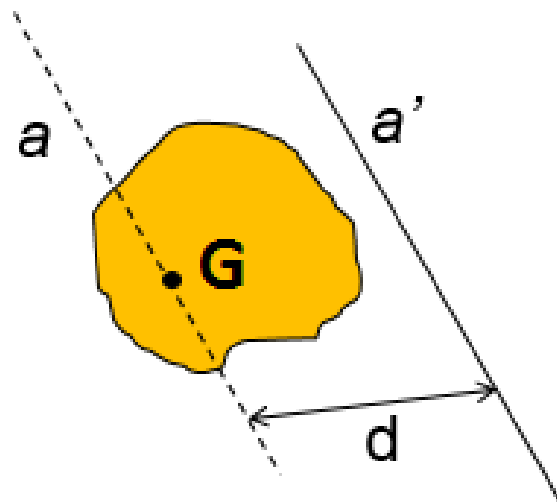
$I'$  = momento di inerzia rispetto ad un asse non baricentrico

$I$  = momento di inerzia rispetto all'asse baricentrico

$A$  = area della sezione

$d$  = distanza tra asse baricentrico e asse non baricentrico

Il teorema quindi stabilisce che se vogliamo calcolare il momento di inerzia rispetto ad un asse qualunque, possiamo dapprima determinare il momento d'inerzia del corpo rispetto all'asse passante per il suo baricentro. Molto importante è però sapere che il teorema si può applicare solamente qualora l'asse passante per il centro della sezione sia parallelo a quello al quale vogliamo calcolare il momento d'inerzia. Per questo motivo il teorema si chiama anche "teorema degli assi paralleli".



### 3.2 Determinazione rigidezza colonne calastrellate mediante NTC 2018

La Circolare esplicativa 11.02.2019 del DM 17.01.2018 – Paragrafo C4.2.4.1.3.1.4. per il calcolo della rigidezza totale dell’asta calastrellata ricorre alla teorema di Huygens-Steiner ma introduce il coefficiente di efficeienza  $\mu$  che considera la deformabilità dei calastrelli.

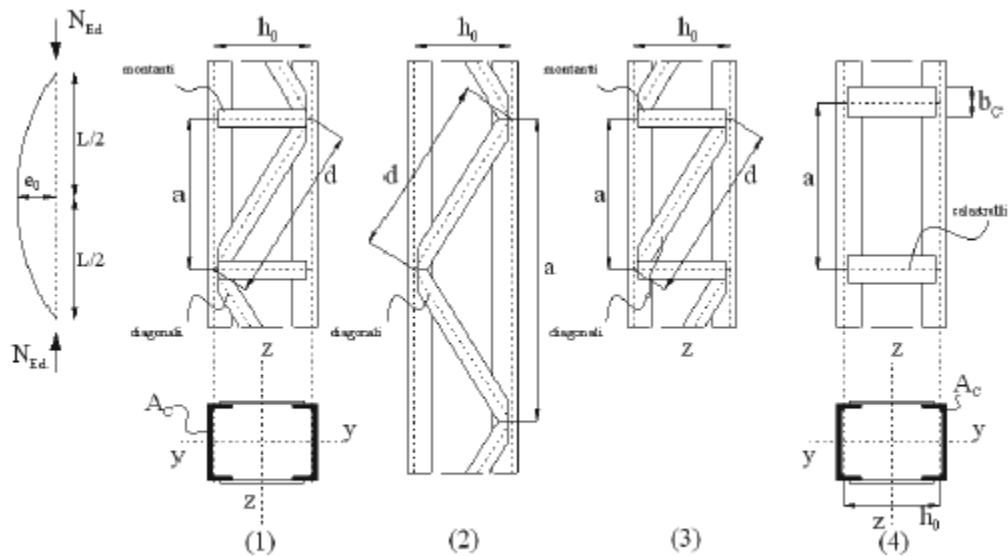


Figura C4.2.7-Aste composte costituite da due correnti uguali

Il momento di inerzia effettivo nelle aste calastrellate è ricavato dalla relazione:

$$J_{\text{eff}} = 0,5 \cdot h_0^2 \cdot A_c + 2 \cdot \mu \cdot J_c$$

Dove:

- $J_{\text{eff}}$  è il momento di inerzia effettivo della sezione composta
- $J_c$  è il momento di inerzia della sezione corrente
- $h_0$  distanza tra i baricentri delle sezioni correnti
- $\mu$  è un coefficiente di efficienza dei collegamenti fra i correnti

$$\mu = \begin{cases} 0 & \text{se } \lambda \geq 150 \\ 1 & \text{se } \lambda \leq 75 \\ 2 - \frac{\lambda}{75} & \text{se } 75 < \lambda < 150 \end{cases}$$

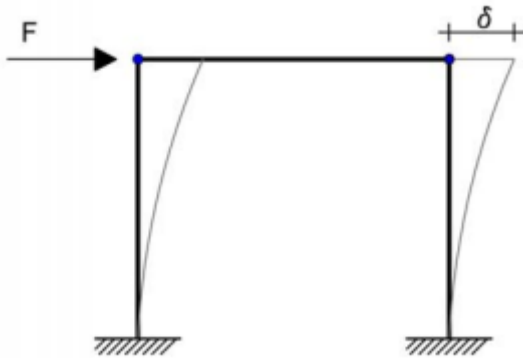
Il termine  $\lambda$  indica la snellezza della colonna e nel nostro caso è calcolato con la formula:

$$\lambda = \frac{L}{i_0} = L \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot A_c}{0,5 \cdot h_0^2 \cdot A_c + 2 \cdot I_c}}$$

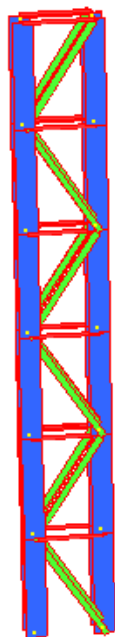
Esso viene quindi ricavato dal rapporto tra la lunghezza di libera inflessione  $L$  e il raggio d'inerzia  $i_0$ .

### 3.3 Concetto della colonna a rigidezza equivalente

Quando una struttura è soggetta ad un carico, questo produce una serie di effetti: spostamenti, tensioni e deformazioni. Cos'è quindi la rigidezza? È la forza necessaria a produrre uno spostamento unitario. Quanto più grande è la rigidezza, tanto maggiore sarà la forza necessaria per produrre un dato spostamento.



La rigidezza equivalente di una colonna può essere calcolata come visto precedentemente con il teorema di Huygens-Steiner e con la formula data dal DM 17.01.2018. Nel nostro caso l'utilità di trovare la rigidezza di una colonna equivalente è quello di avere uno stesso valore di rigidezza, passando dalla modellazione di una calastrellata, molto più onerosa da modellare, ad una colonna unifilare equivalente meno dispendiosa in fatto di lavorazione. Il vantaggio sta proprio nel modello globale quando non si andrà più a modellare colonne calastrellate asta dopo asta spendendo tempo prezioso, ma basterà lavorare una colonna unifilare con una rigidezza equivalente.



*Colonna calastrellata*



*Colonna unifilare equivalente*

## 4 MODELLAZIONE COLONNE

### 4.1 Descrizione elementi finiti utilizzati nella modellazione delle colonne

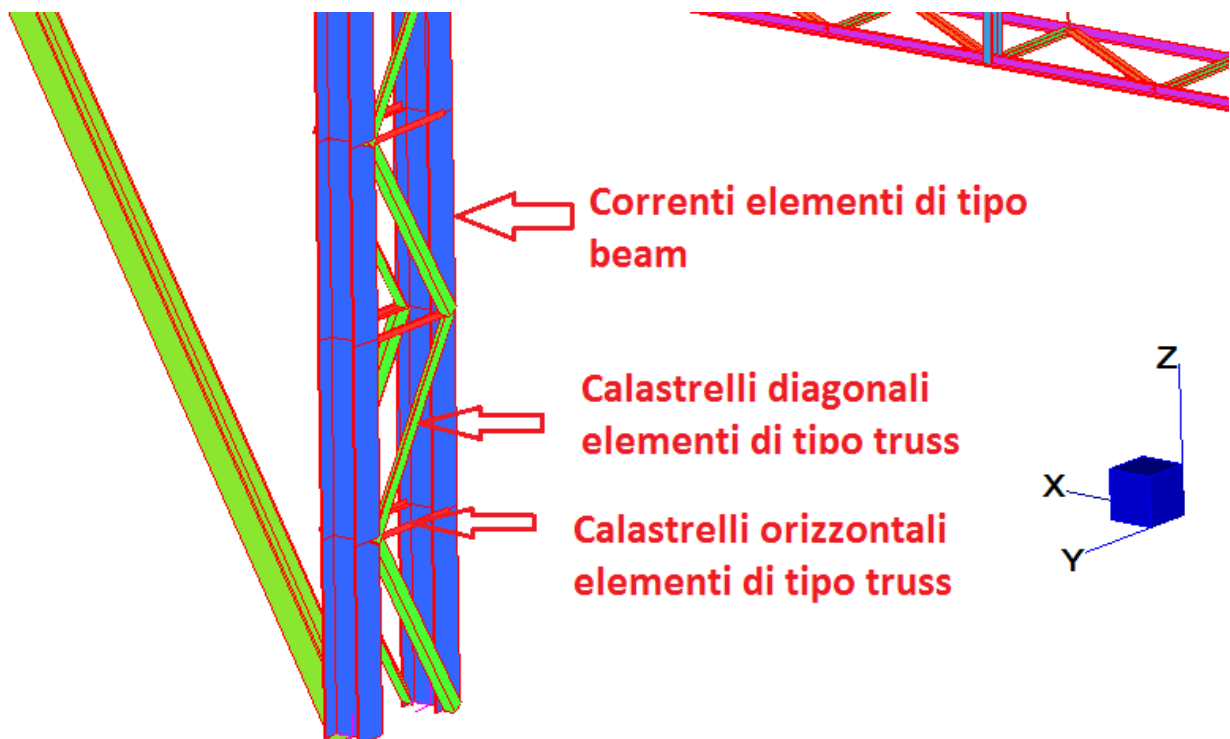
Il codice di calcolo ad elementi finiti utilizzato nella modellazione delle colonne calastrellate è Strausi 2.4.6. Per le analisi statiche generali di tutte le strutture in titolo viene fatto uso di modelli numerici con elaborazione a mezzo di programma di calcolo automatico. In particolare si utilizza il CODICE STRAUS 7 Release 2.4.6, concepito, sviluppato e implementato a cura di G+D Computing Sydney (Australia).

I correnti delle colonne calastrellate sono stati modellati mediante elementi finiti tipo beam mentre i calastrelli mediante elementi di tipo truss.

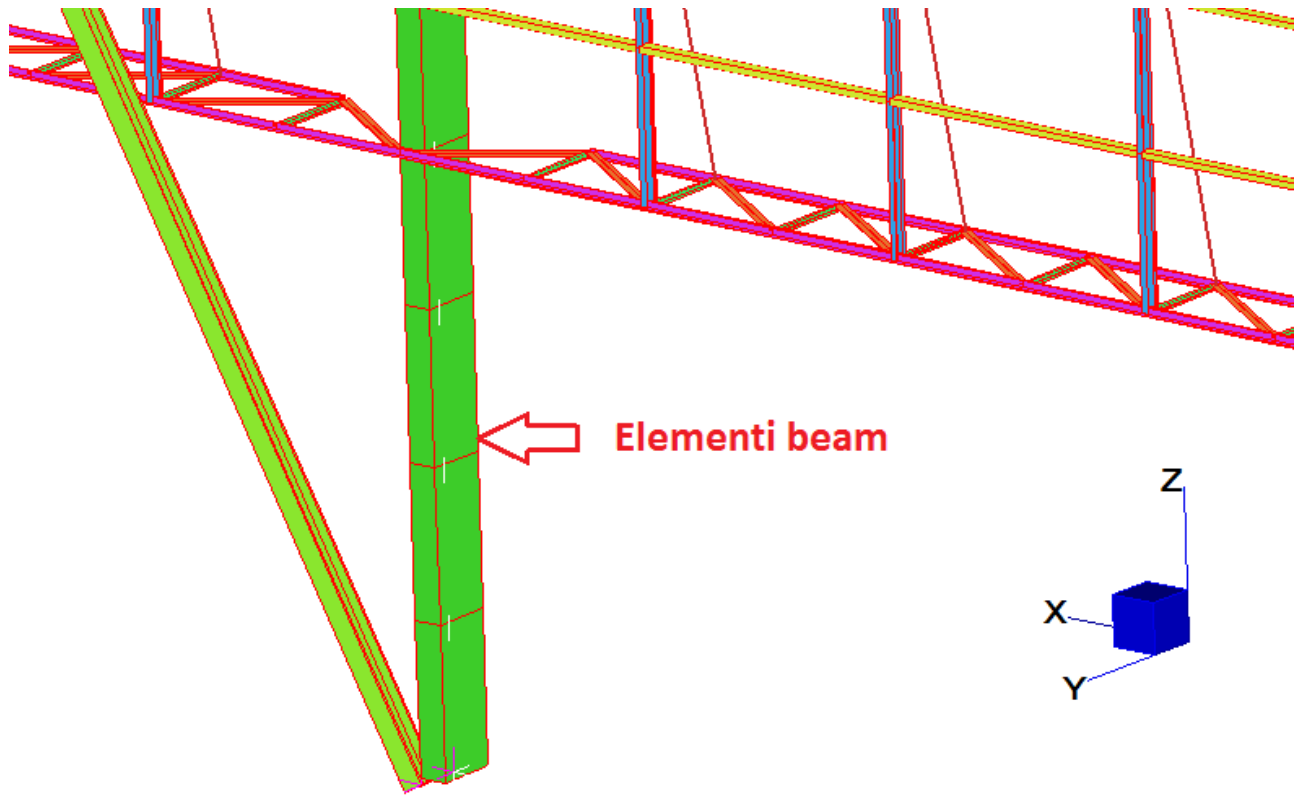
- Truss: In caso di strutture a traliccio, ove possa essere plausibile che i tiranti/puntoni siano soggetti a solo carico assiale, la soluzione più semplice e soprattutto veloce è l'elemento "truss"

- Beam: L'elemento trave generico, soggetto a sollecitazione normale, taglio e momento. Consente soluzioni in tempi brevissimi per tutte le strutture di nostra produzione.

Nelle seguente figura sono visibili gli elementi finiti utilizzati nella colonna calastrellata:

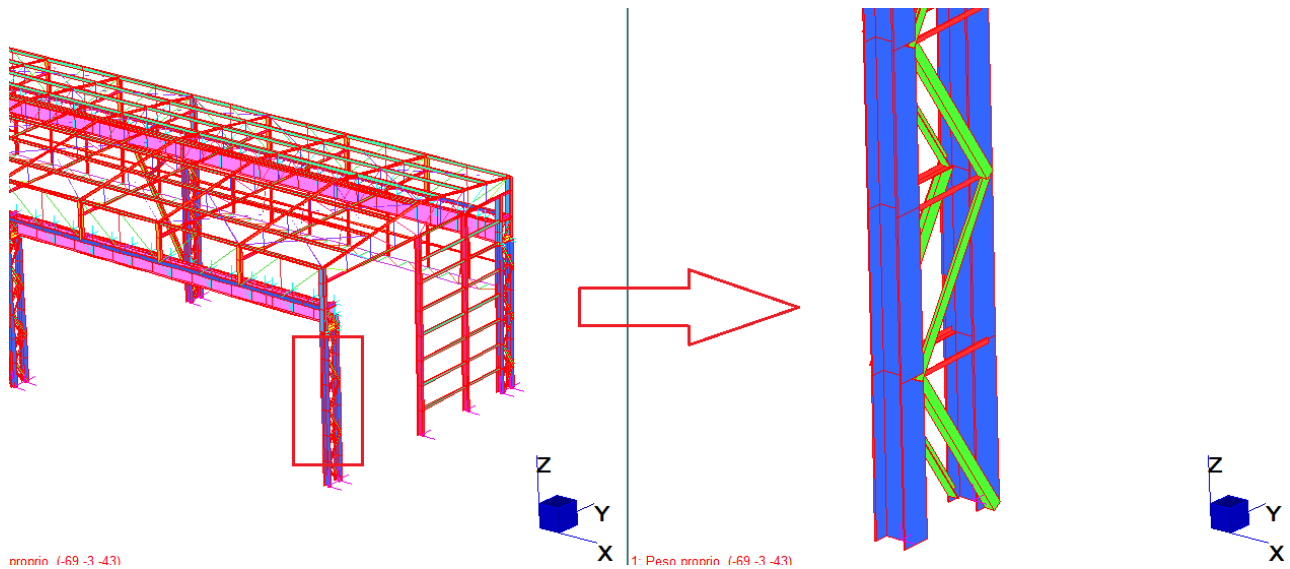


Nelle seguente figura sono visibili gli elementi finiti utilizzati nella colonna equivalente:

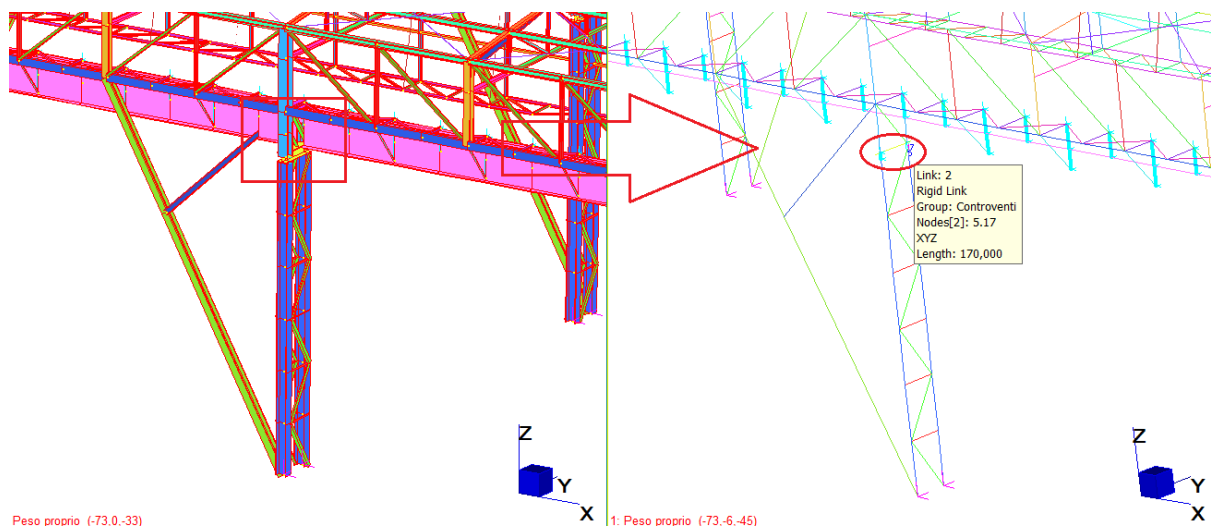


## 4.2 Descrizione modellazione colonna calastrellata

I correnti della colonna calastrellata sono stati modellati mediante elementi di tipo beam mentre i calastrelli sono stati modellati mediante elementi finiti di tipo truss. Nella seguente immagine di riporta la modellazione della colonna calastrellata eseguita nel caso oggetto di studio.



Per una rappresentazione più realistica del modello di calcolo sono stati introdotti elementi di tipo rigid link che consentono di posizionare nodi ed aste in posizione reale. Elementi rigid link collegano aste creando un collegamento infinitamente rigido. Questi collegamenti sono stati utilizzati nei controventi delle vie di corsa dei carroponti e alla sommità delle colonne



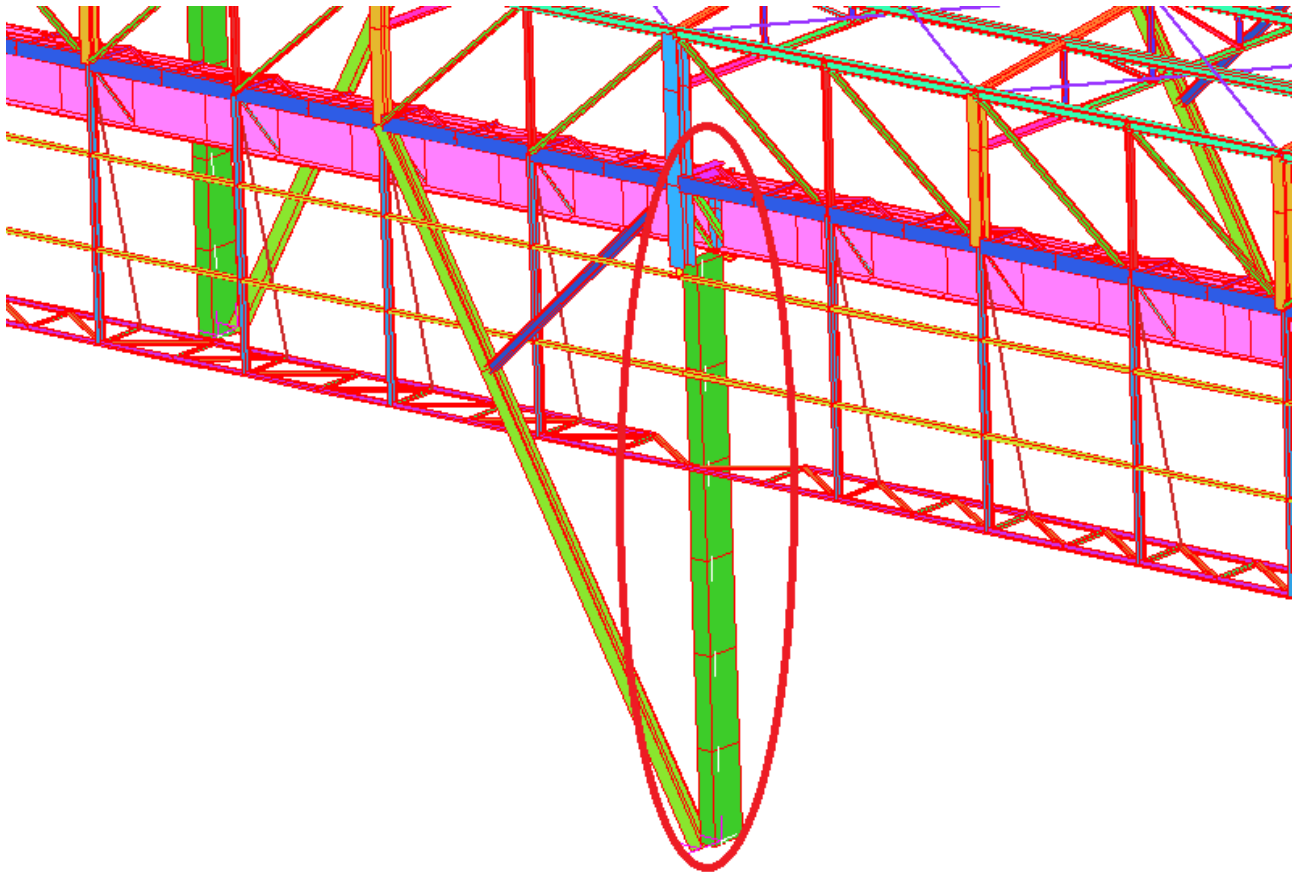
*Rigid link applicati alla sommità delle colonne*

### 4.3 Descrizione modellazione colonna di tipo unifilare

La modellazione della colonna unifilare equivalente a quella calastrellata si basa sull'utilizzo di una sezione generica da modello di calcolo ma con opportuni valori di sezione resistente e inerzia (inerzia asse xx e inerzia asse yy)

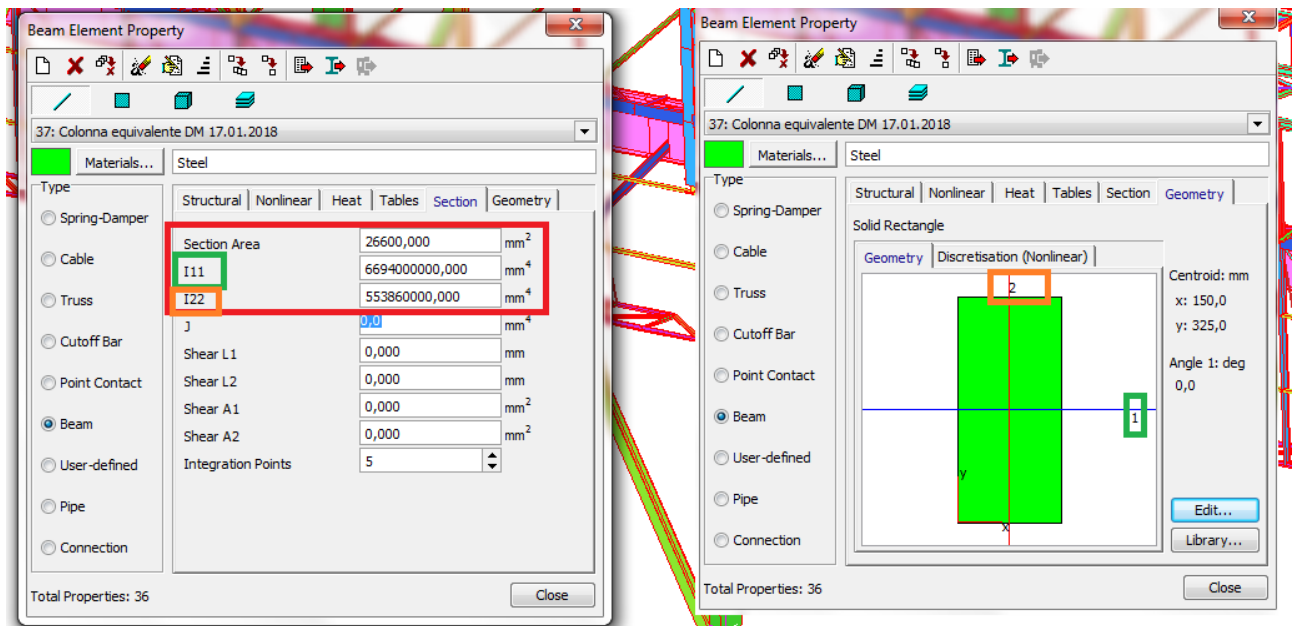
I valori dell'area e delle inerzie sono valutati mediante indicazioni del DM 17.01.2018 e relativa circolare esplicativa. Il procedimento da normativa per il calcolo della rigidezza della colonna equivalente è descritto al paragrafo 3.2.

Nella seguente immagine si riporta, a titolo di esempio, la rappresentazione di una colonna equivalente mediante codice di calcolo. Il codice di calcolo utilizzato per le analisi numeriche della tesi è Straus 2.4.6. La colonna equivalente è composta dalle aste presenti all'interno della cerchiatura di colore rosso.





Nella seguente immagine è invece possibile vedere dove sono stati inseriti gli opportuni valori di area e rigidezza della colonna equivalente.



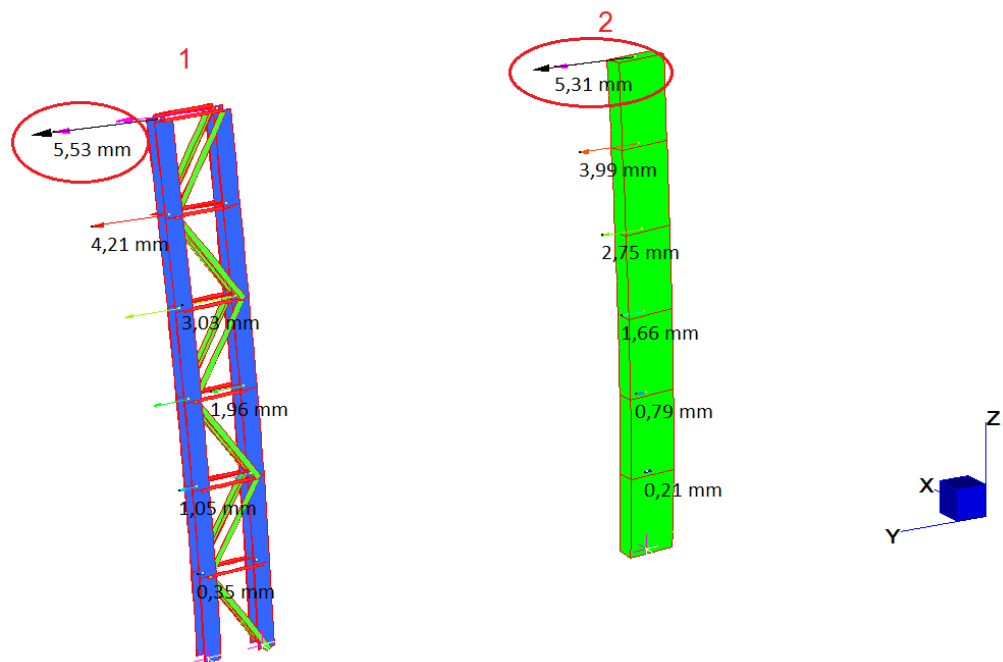
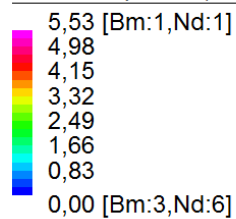
#### 4.4 Confronto modellazione colonna calastrellata e unifilare

Nel seguente paragrafo si riporta lo studio di un confronto di caso elementare tra una colonna calastrellata e la medesima colonna di tipo equivalente. Il confronto viene eseguito considerando colonne aventi la stessa altezza e con medesimo carico concentrato applicato alla loro sommità. Dall'analisi degli spostamenti ottenuta da modello di calcolo si nota come questi siano i medesimi in entrambi modelli quindi la modellazione semplificata sembra rappresentare correttamente la colonna reale.

Modello 1: Colonna calastrellata

Modello 2: Colonna equivalente con rigidezza valutata secondo NTC2018

Beam Disp: DY (mm)

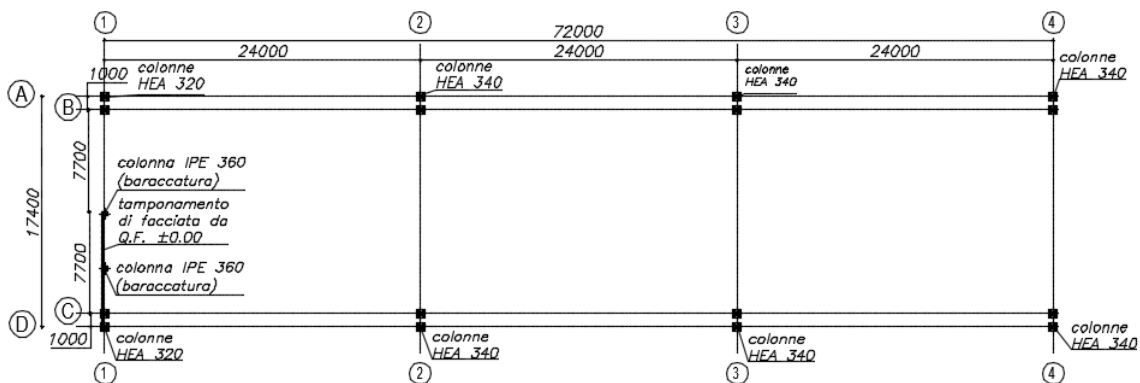


Per stabilire infine la correttezza del modello di calcolo a colonna equivalente nei prossimi capitoli /paragrafi si riporterà un esempio di applicazione di colonna equivalente ad un caso reale che risulta molto più articolato di quello presentato nel presente paragrafo.

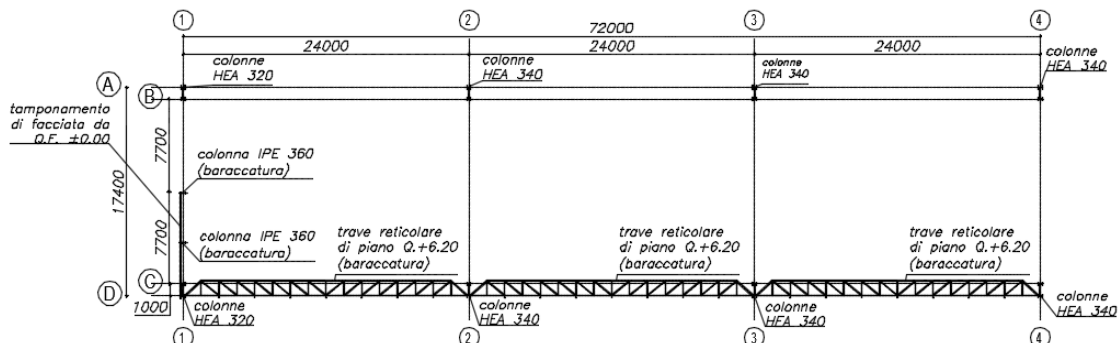
## 5 APPLICAZIONE CASO REALE

### 5.1 Descrizione capannone

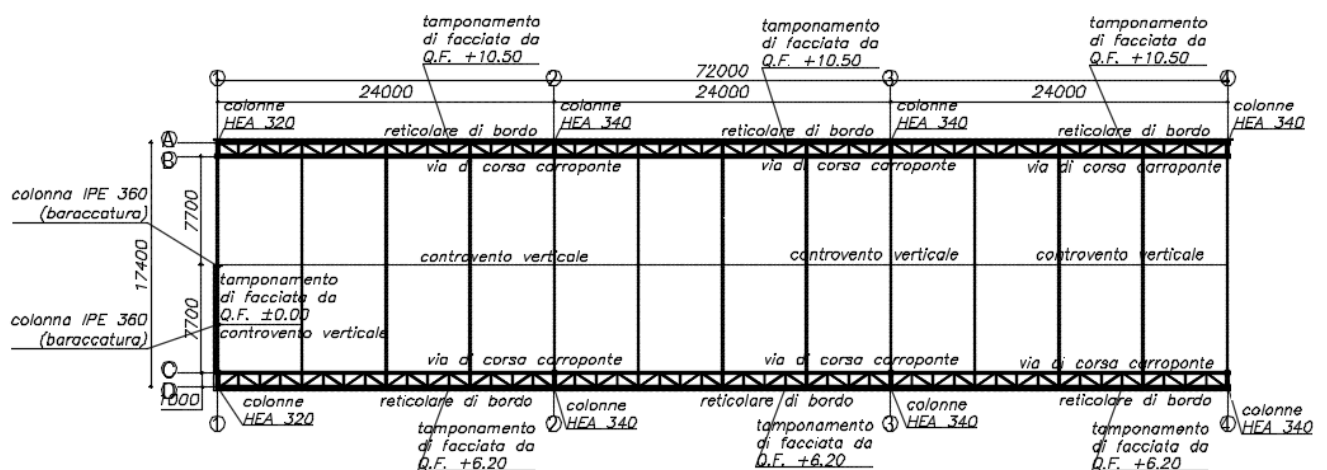
L'applicazione del modello di calcolo semplificato per colonne calastrellate è applicato ad un capannone in acciaio per la prefabbricazione di travi, in località Latisana in provincia di Udine. Il capannone oggetto di verifica è una struttura di tipo provvisorio con vita utile inferiore ai 5 anni. La funzione della struttura è quella di realizzare delle travi per poi essere trasportate in cantiere. Come riportato nello schema in basso la struttura ha una pianta rettangolare, ovvero ha una lunghezza di 72 m totali suddivisi in 3 campi d'interasse 24 m, una larghezza pari a 17,4 m, ed un'altezza di 14 m. Il capannone è dotato di un carroponete la cui portata è di 10 ton



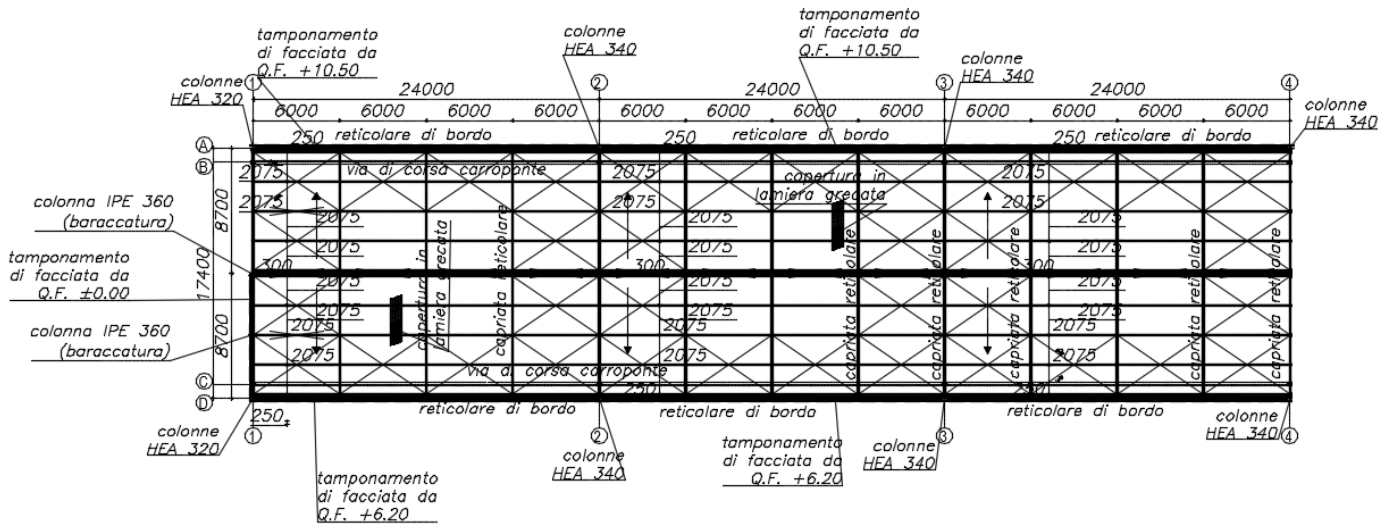
Pianta capannone livello fondazioni (Quota  $\pm 0$  mm)



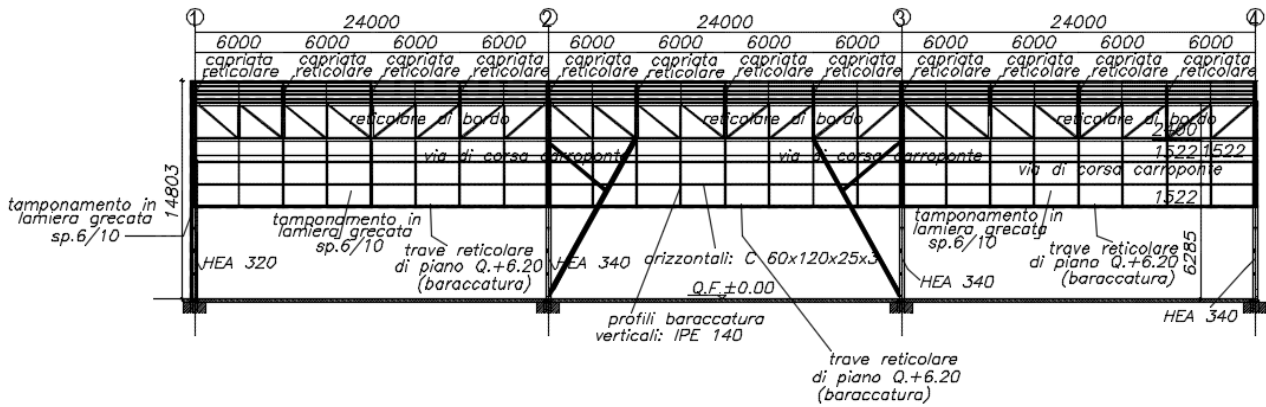
Pianta capannone livello vie di corsa carroponete (Quota  $\pm 6200$  mm)



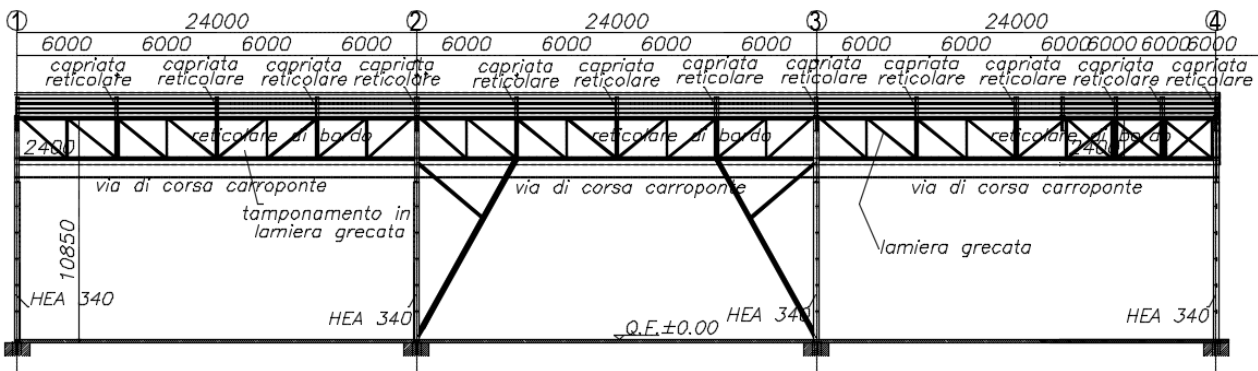
Pianta capannone livello corrente inferiore capannone (Quota  $\pm 10852$ mm)



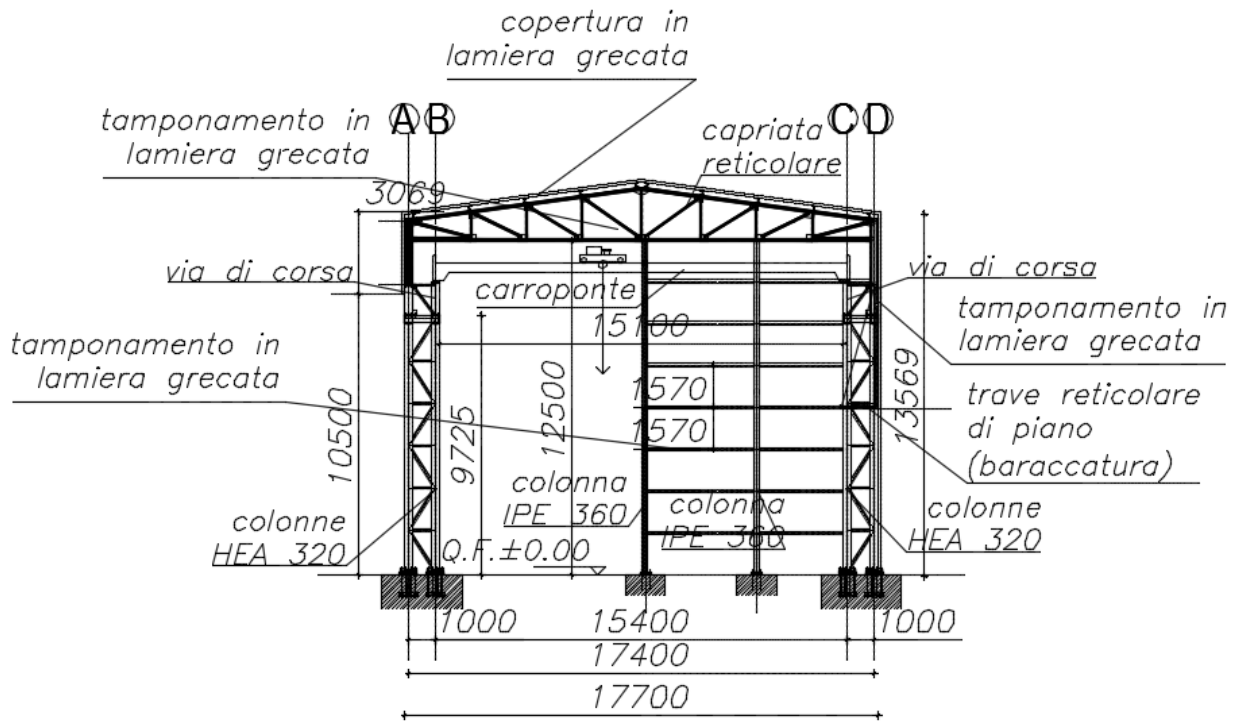
Pianta capannone livello copertura



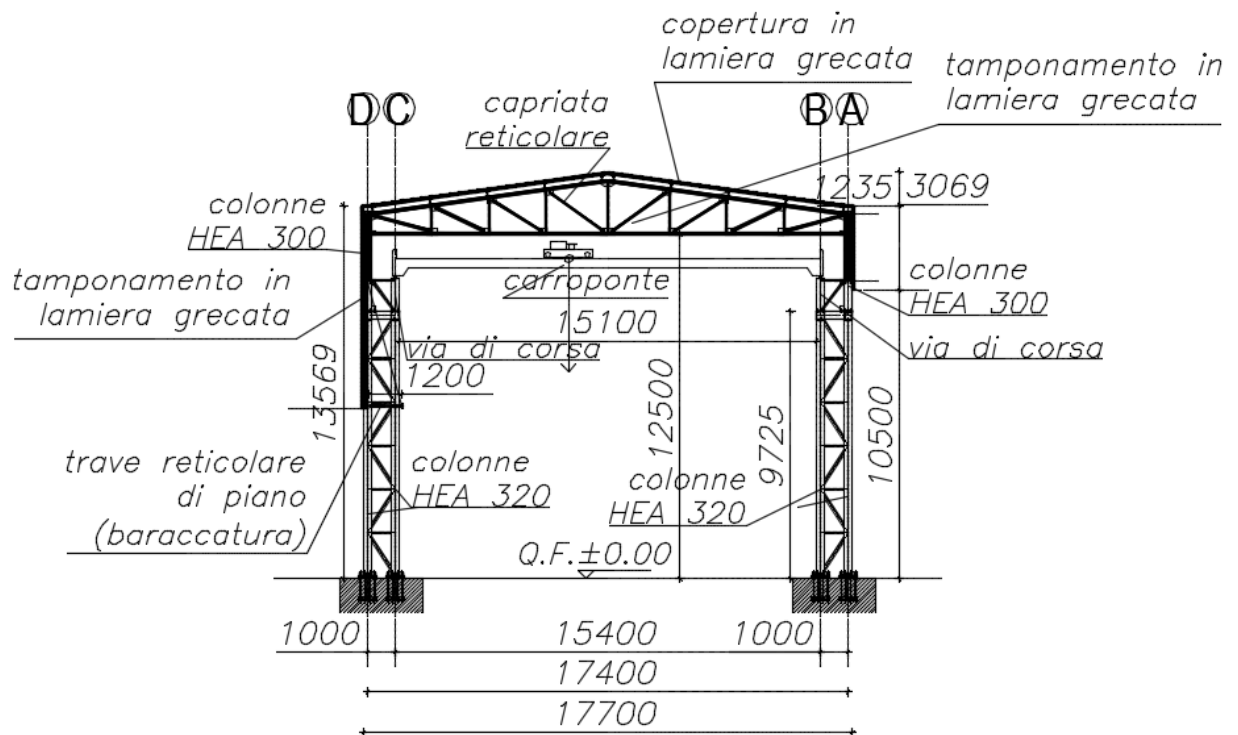
Prospetto fili (A1-A4)



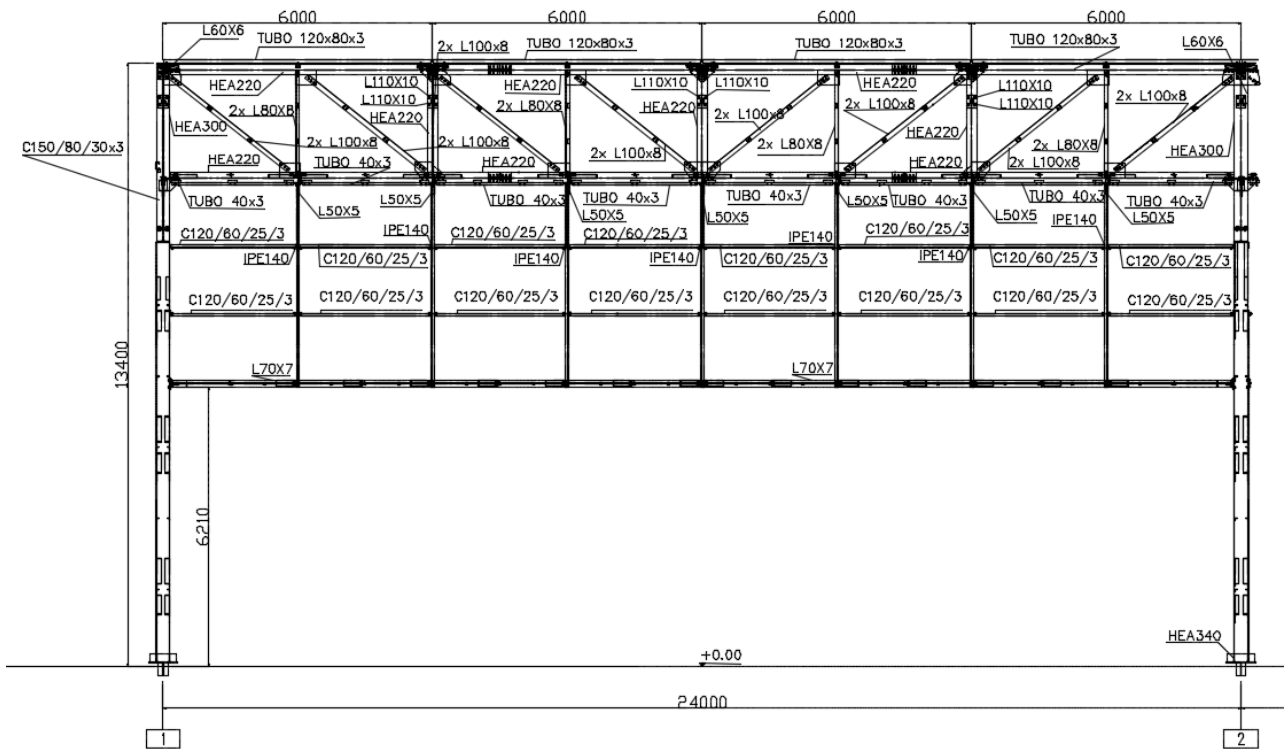
Prospetto fili (A1-A4)



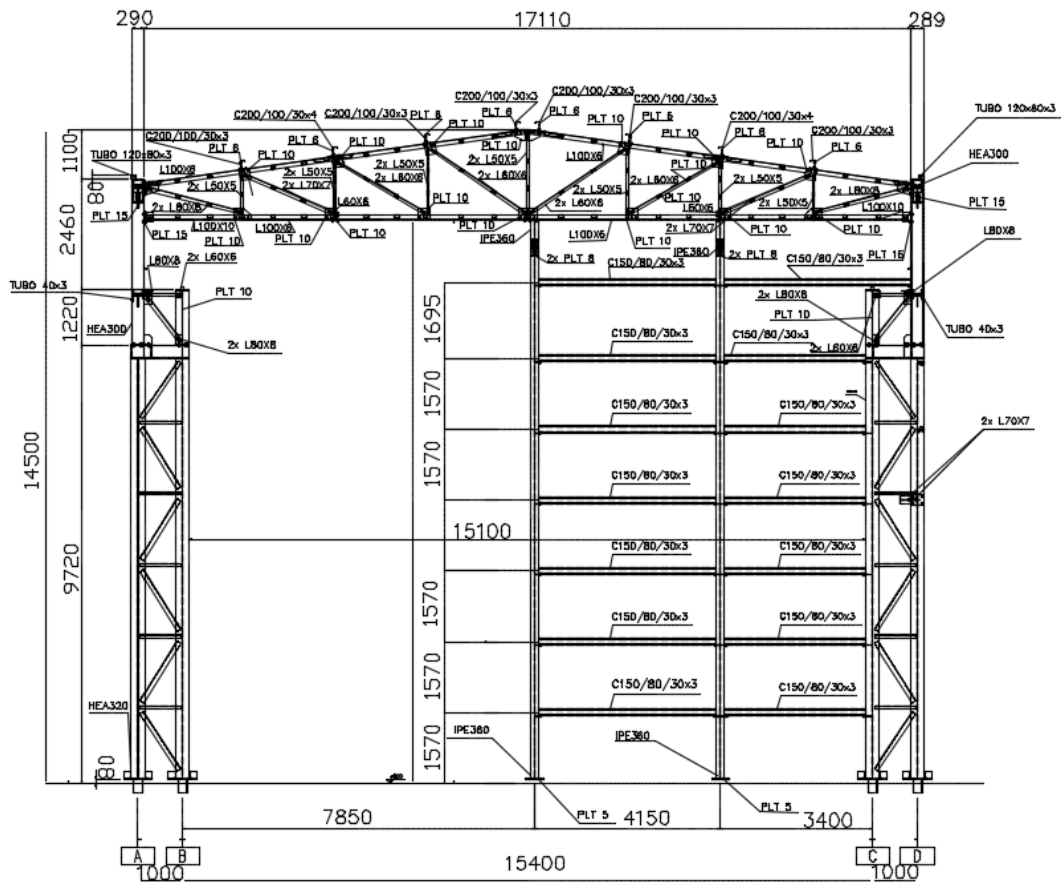
Prospetto fili (A-B-C-D)



Prospetto fili (D-C-B-A)



Telaio sostegno pannelli di rivestimento laterale



rivestimento laterale

## 5.2 Descrizione colonne calastrellate capannone

Le colonne calastrellate del capannone sono stati realizzate con profili HEA 340 per i correnti o montanti, mentre con profili 2 L50x50x5 e 2 L100x100x6 rispettivamente gli elementi orizzontali ed elementi diagonali.

- Correnti colonna: HEA 340

$A_c$  = Area HEA340: 13300 mm<sup>2</sup>

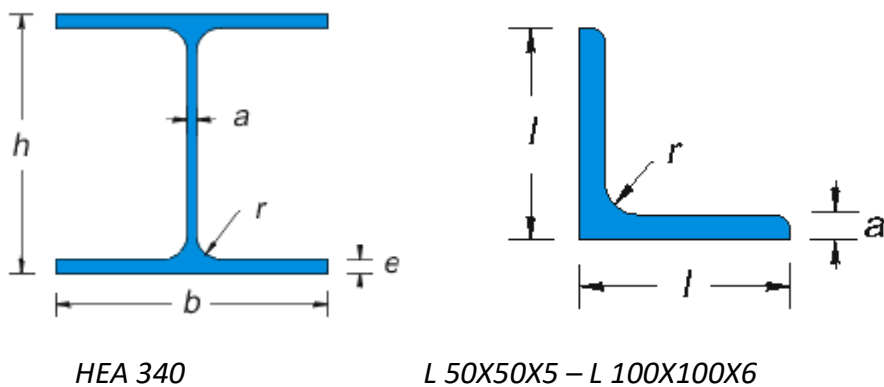
$J_c$  =  $J_{yy}$  HEA340: 74360000 mm<sup>4</sup> (momento di inerzia asse debole)

$h_0$  = distanza tra i baricentri dei correnti: 1000 mm

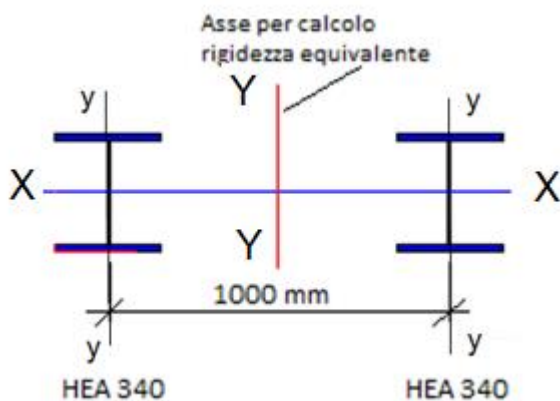
$h$  = Altezza colonna: 9520 mm

- Calastrelli: 2 L50x50x5 (elementi orizzontali)

2 L100x100x6 (elementi diagonali)



- Colonna calastrellata



Rigidità effettiva con Circolare esplicativa Paragrafo C4.2.4.1.3.1.4. del D.M. 17/01/2018 e usata nel modello di calcolo con colonne equivalenti

$$J_{eff,YY} = 0,5 \cdot h_0^2 \cdot A_c + 2 \cdot \mu \cdot J_{c,yy} = 6,694 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$$

Snellezza dell'asta  $\lambda$  :

$$L_0 = h = 9520 \text{ mm}$$

$$\lambda = \frac{L_0}{i_0} = L_0 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot A_c}{0,5 \cdot h_0^2 \cdot A_c + 2 \cdot I_c}} = 127,6$$

$$\mu = 2 - \frac{\lambda}{75} = 0,299 \quad \text{se } 75 < \lambda < 150$$

$$J_{eff,XX} = 2 \cdot J_{c,xx} = 5,538 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

$$A = 2 \cdot A_c = 26600 \text{ mm}^2$$



### 5.3 Materiali utilizzati

#### Acciaio per strutture metalliche

*Tipo acciaio:*

*S275JR*

*$f_{yk} = 275 \text{ Mpa}$*

*$f_{uk} = 430 \text{ Mpa}$*

*$E = 206000 \text{ Mpa}$*

*Tipo acciaio:*

*S355JR*

*$f_{yk} = 355 \text{ Mpa}$*

*$f_{uk} = 510 \text{ Mpa}$*

*$E = 206000 \text{ Mpa}$*

#### Bulloni per giunzioni

*Classe bulloni: 8.8*

*$f_{yb} = 649 \text{ Mpa}$*

*$f_{ub} = 800 \text{ Mpa}$*

*Classe bulloni: 10.9*

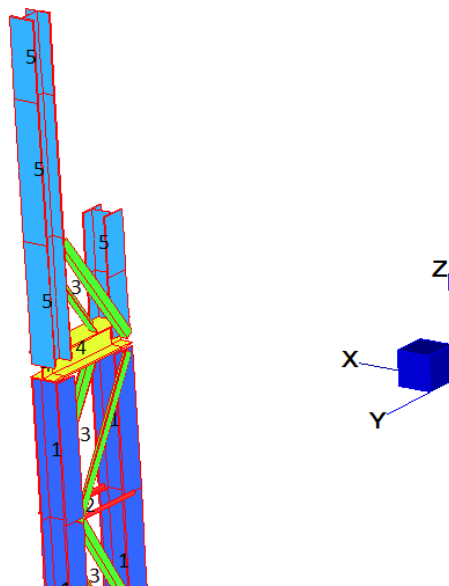
*$f_{yb} = 900 \text{ Mpa}$*

*$f_{ub} = 1000 \text{ Mpa}$*

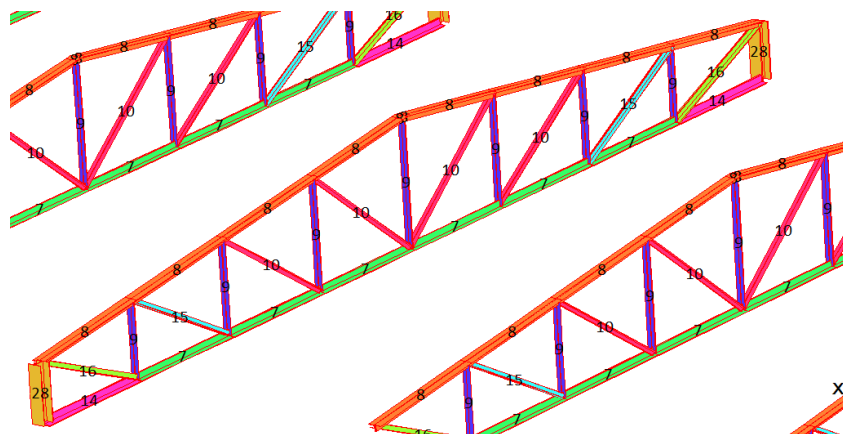
## 5.4 Modellazione della struttura

La struttura del capannone è stata modellata come telaio spaziale (3D) rappresentando le sezioni della struttura oggetto di verifica con elementi monodimensionali di tipo Beam (trave) oppure asta (Truss) per la verifica della struttura di lunghezza complessiva di 144 m e composta da telai posti ad interasse di 24 m. Data la ripetitività dei telai ad interasse costante per semplificare la modellazione si è considerato il modello di calcolo di una porzione di capannone di lunghezza 72 m.

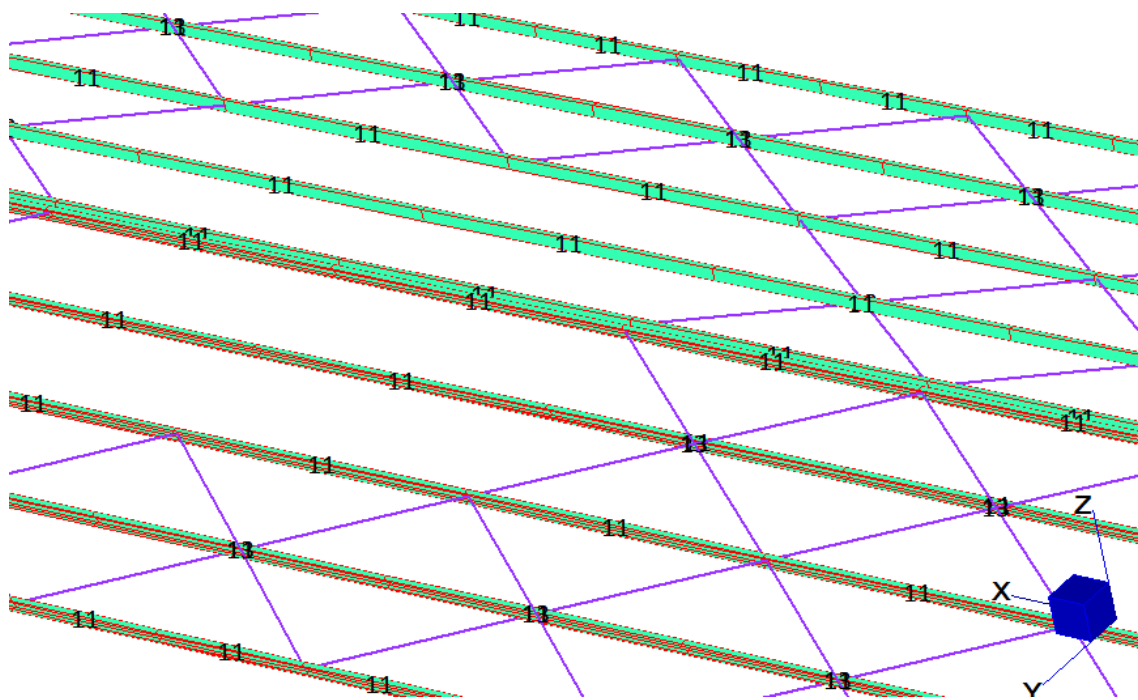
Nel seguente paragrafo si riportano le principali caratteristiche geometriche e inerziali dei profili utilizzati nei modelli di calcolo globale e in quelli locali. Nelle immagini/tabelle sotto riportate è invece possibile individuare la posizione delle aste e il tipo di elemento finito impiegato nella modellazione (beam/truss).



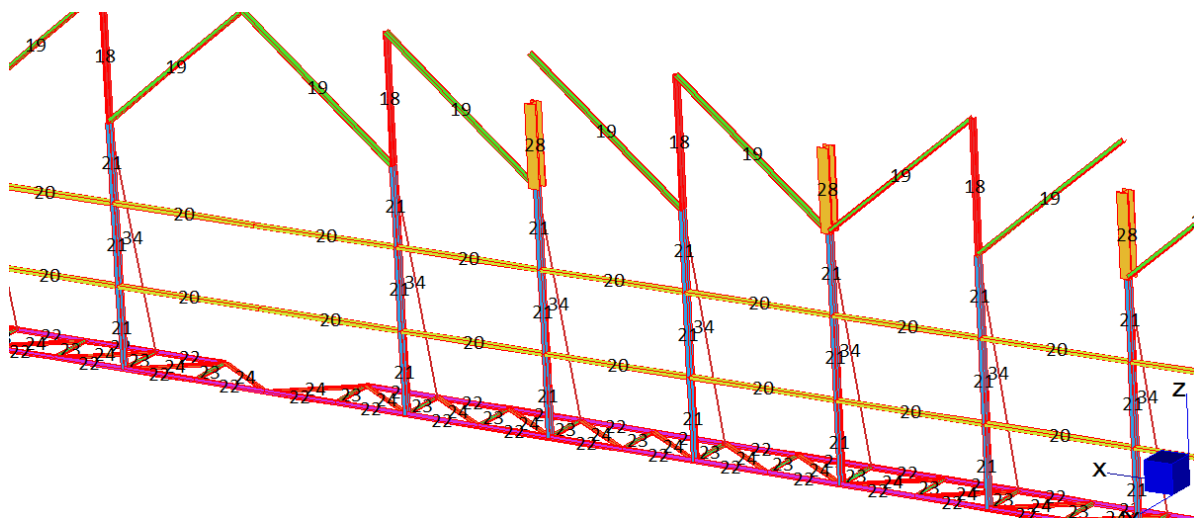
*Property beam aste delle colonne*



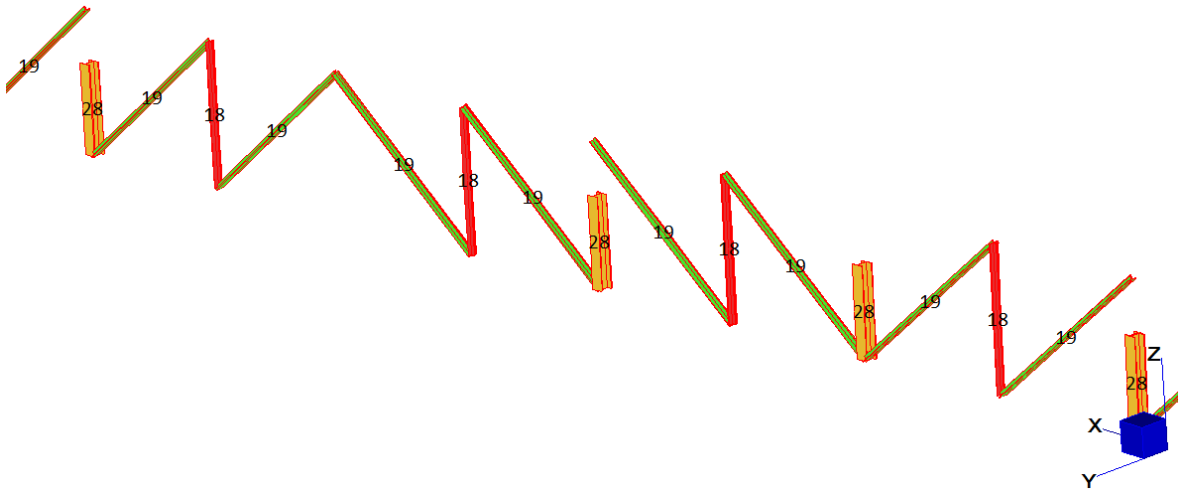
*Property beam/truss delle capriate*



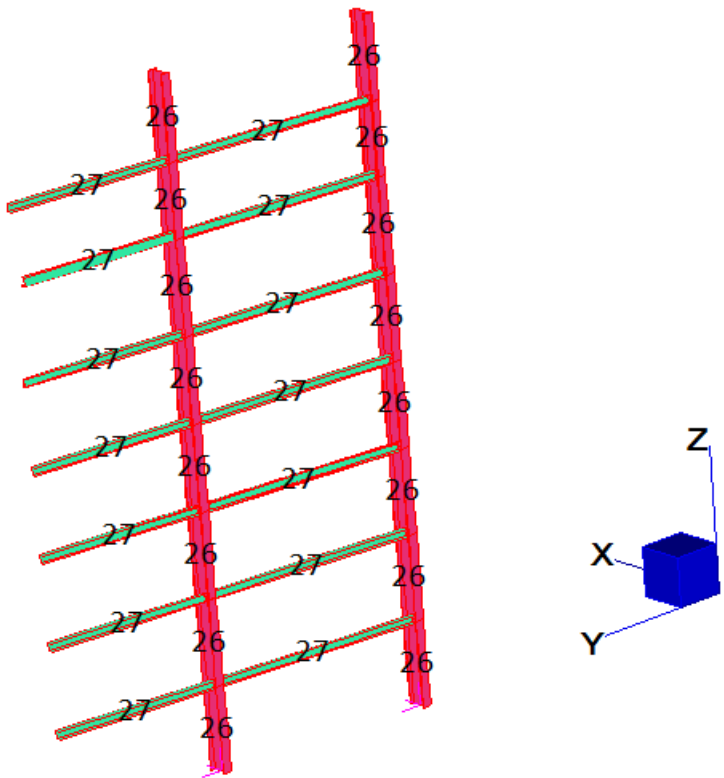
*Property beam/truss della copertura*



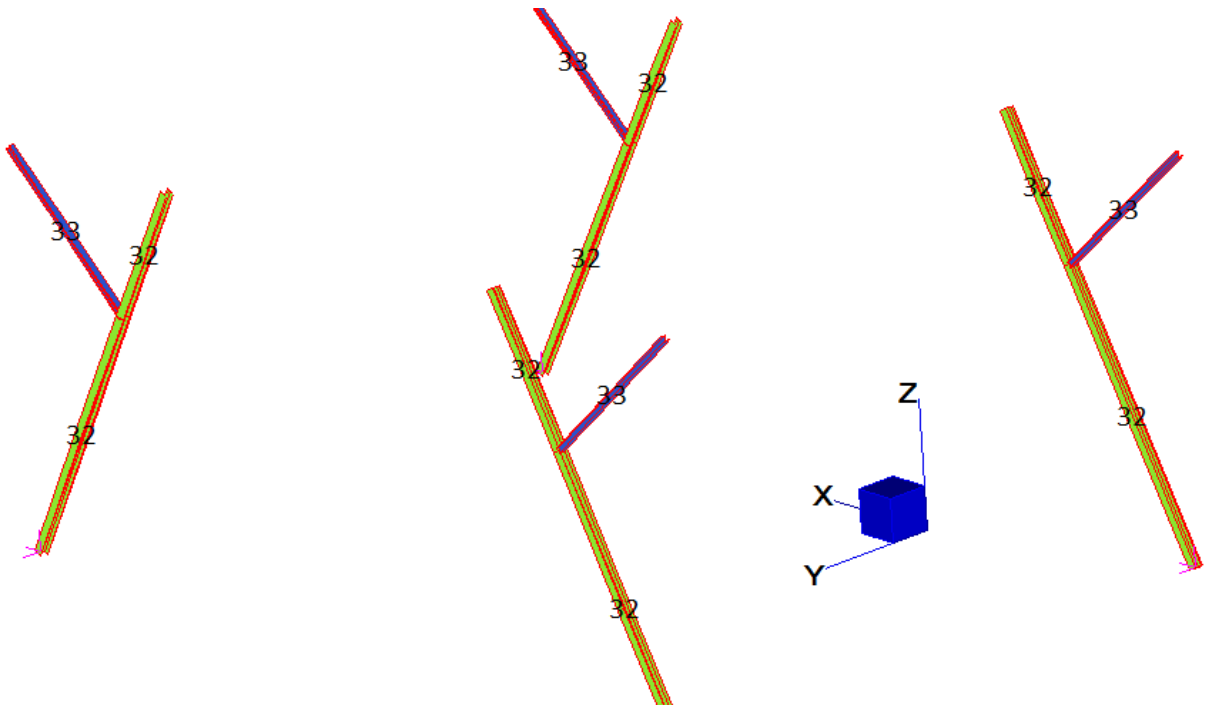
*Property beam/truss della tamponatura laterale lato destro*



*Property beam/truss della tamponatura laterale lato sinistro*

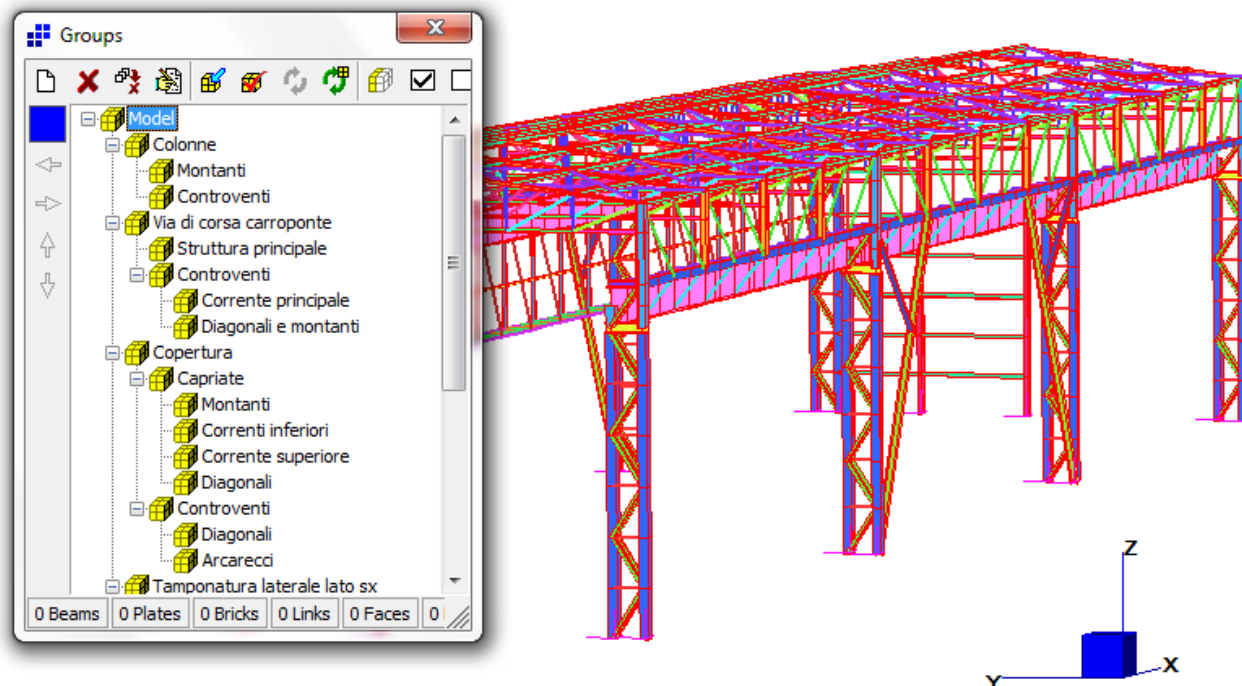


*Property beam/truss delle tamponature trasversali*

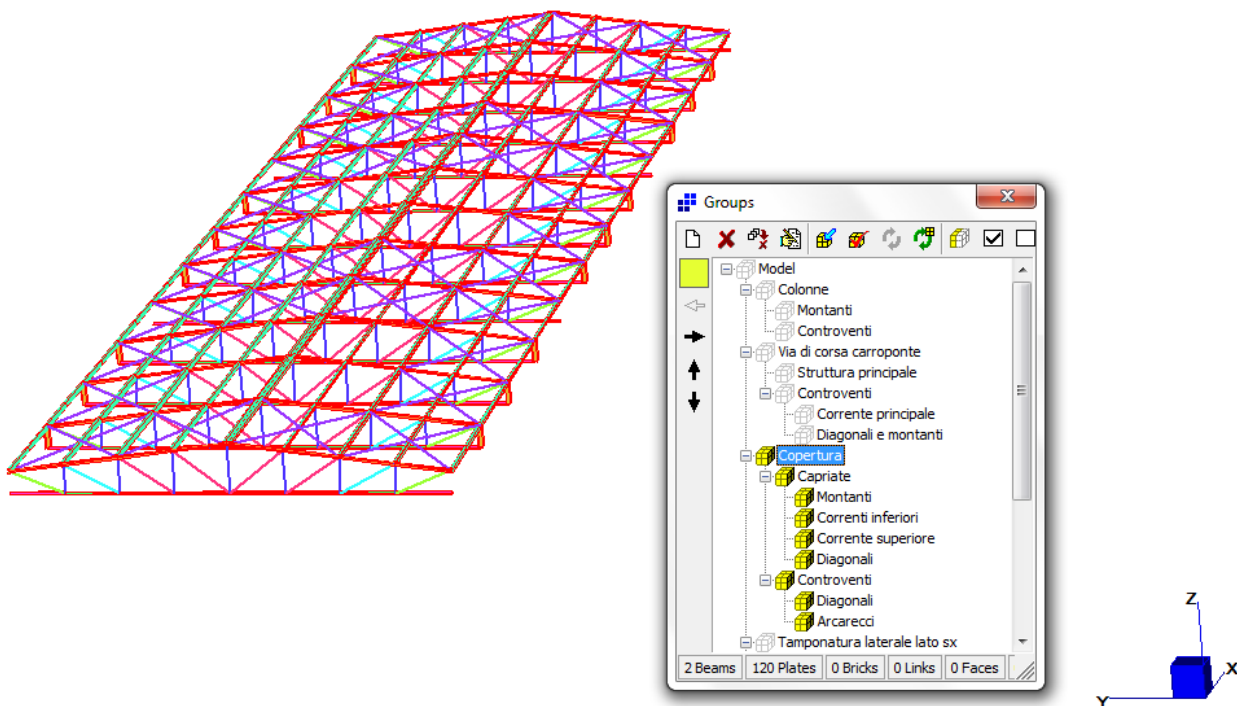


*Controventi direzione longitudinale tra le colonne del capannone*

Per una migliore organizzazione del modello di calcolo si è fatto ricorso alla suddivisione in gruppi di elementi tipologici che consente una più rapida individuazione degli elementi strutturali e facilita le operazioni delle verifiche di resistenza. Nella seguente immagine è riportata la suddivisione in gruppi del modello di calcolo

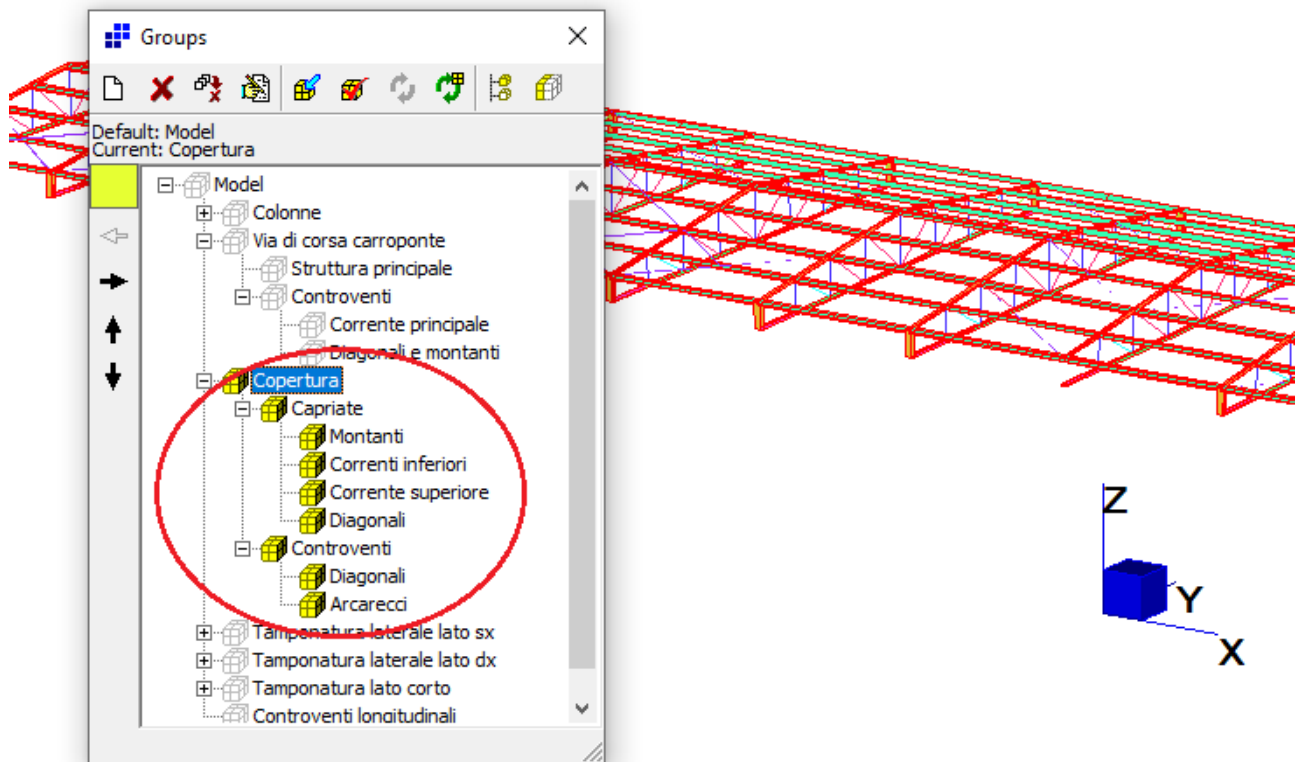


Nelle successive immagini sono riportate le suddivisioni in gruppi con attivi solo i macro elementi oggetti di interesse. Gli elementi non attivi non sono visualizzati. Nella seguente immagine sono considerati attivi solo gli elementi di copertura.



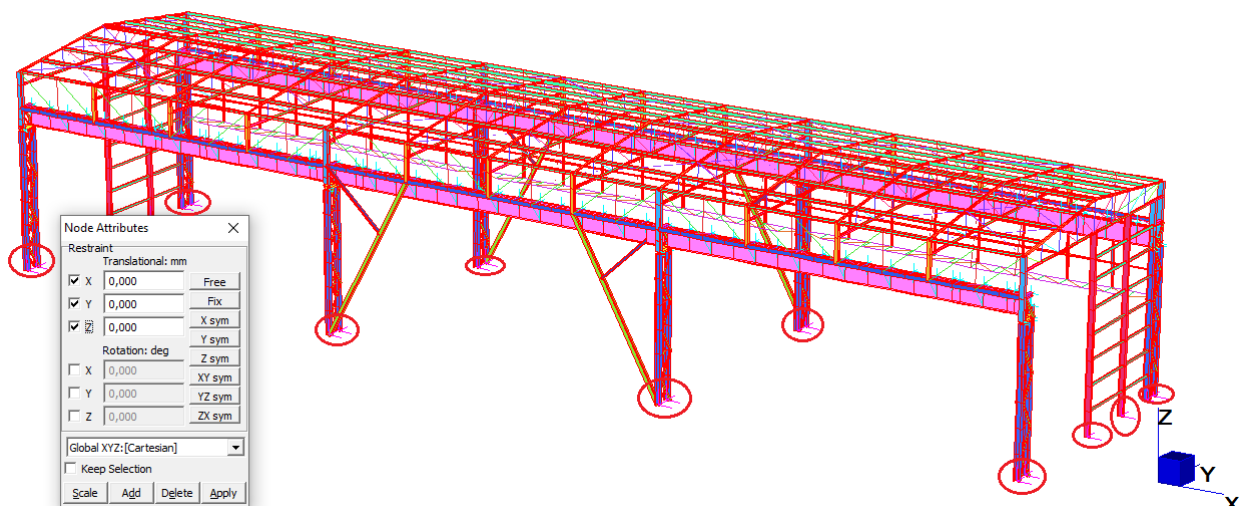
*Esempio di suddivisione in gruppi del modello di calcolo*

L'utilizzo della suddivisione in gruppi è stato eseguito anche per creare dei gruppi all'interno dei macro gruppi, come ad esempio la struttura di copertura che al cui interno contiene altri sottogruppi.

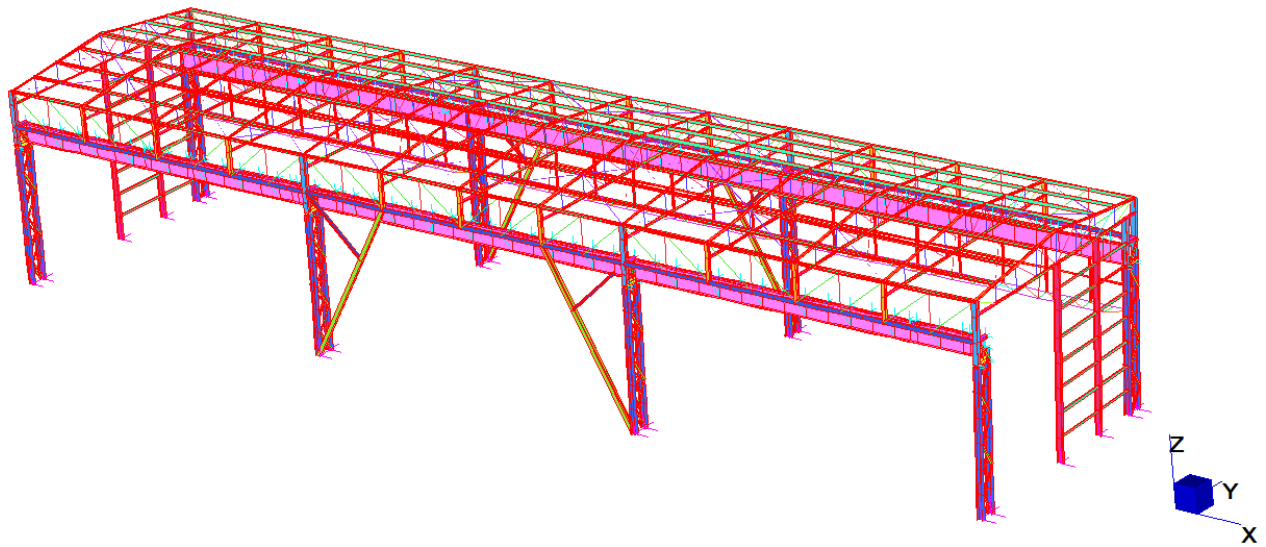


### 5.4.1 Vincoli

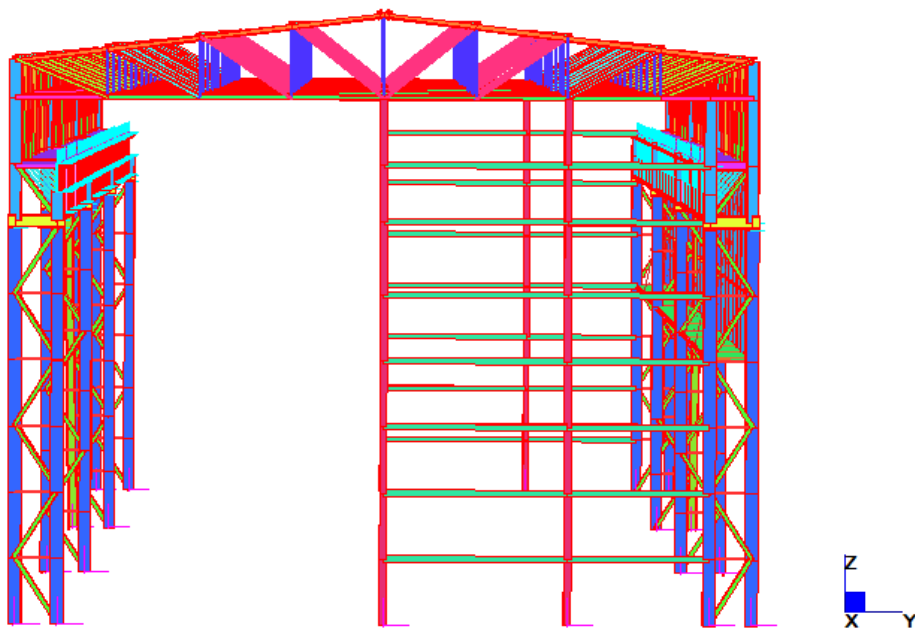
La struttura metallica oggetto di verifica, come evidenziato in figura è vincolata alla base delle colonne. I vincoli applicati bloccano gli spostamenti nelle direzioni x-y-z.



### 5.4.2 Modello di calcolo con colonne calastrellate

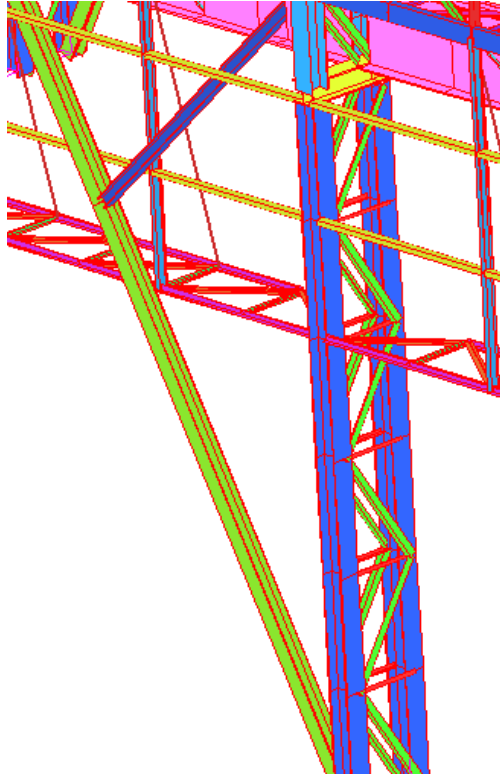


*Vista 3D – Modello di calcolo*



*Vista frontale del capannone mediante modello di calcolo Straus*

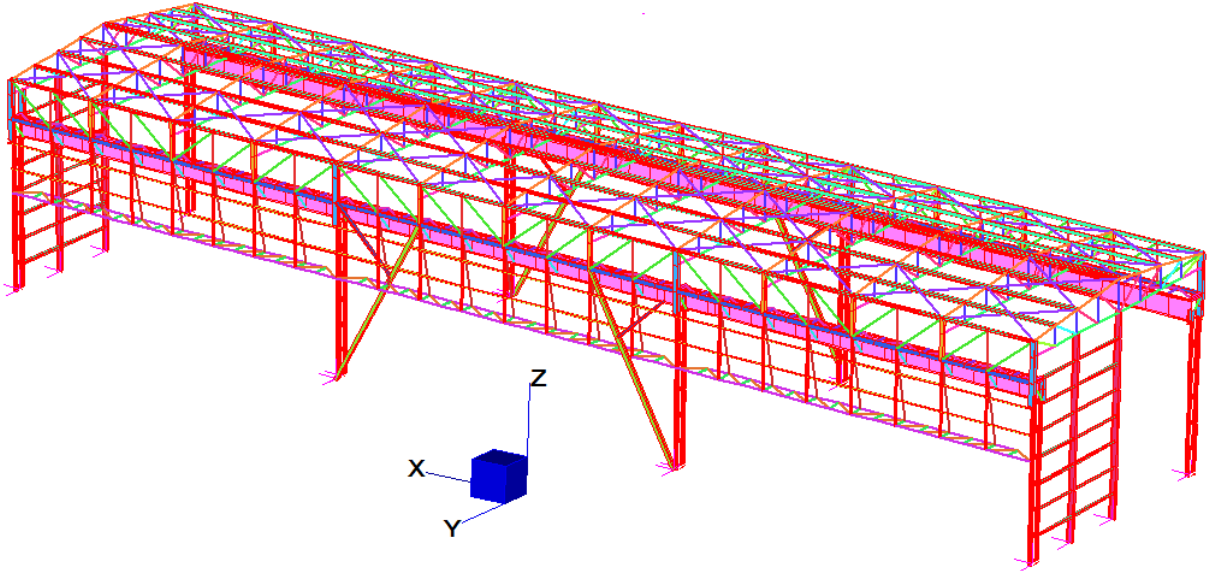




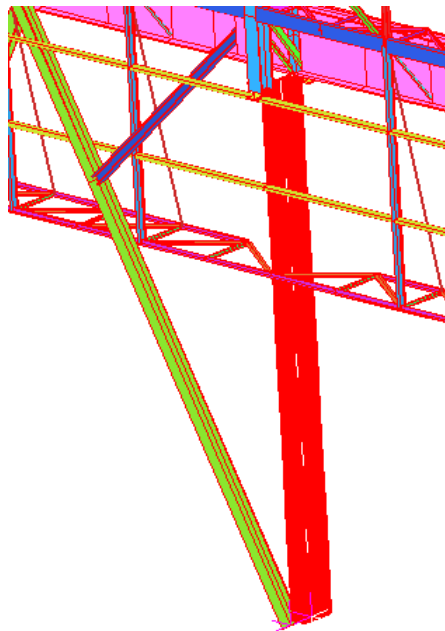
*Elementi beam come correnti e truss come calastrelli*

### 5.4.3 Modello di calcolo con colonne equivalenti

Per sviluppare il modello globale sono state eliminate tutte le aste calastrellate per poi essere sostituite da colonne unifilari equivalenti, modellate come elementi beam.



Da questa immagine si può notare ancora meglio come in un modello globale le colonne unifilari siano meno onerose in fatto di modellazione rispetto a quelle calastrellate.



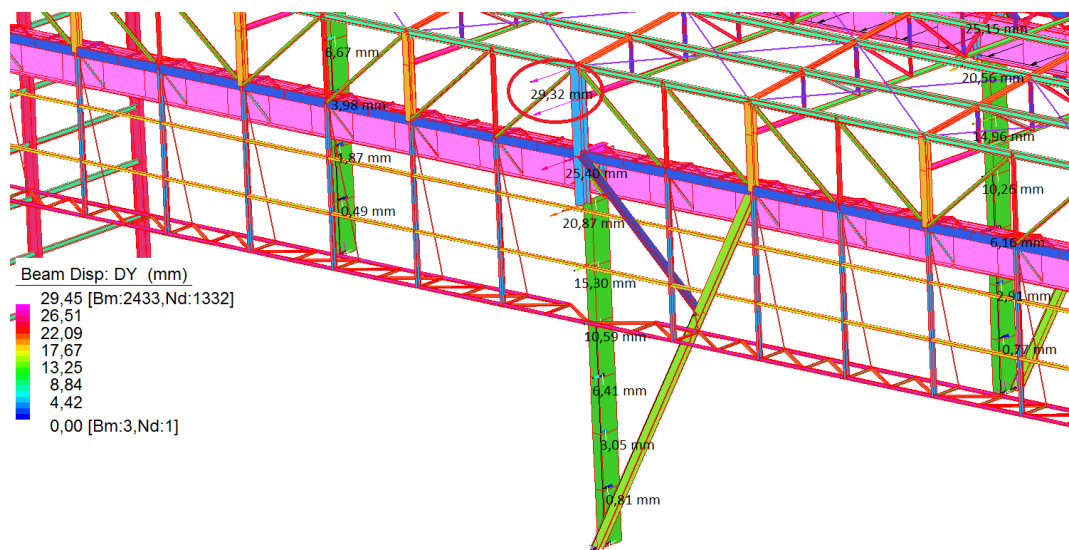
*Colonna unifilare equivalente*

## 6 ANALISI NUMERICHE

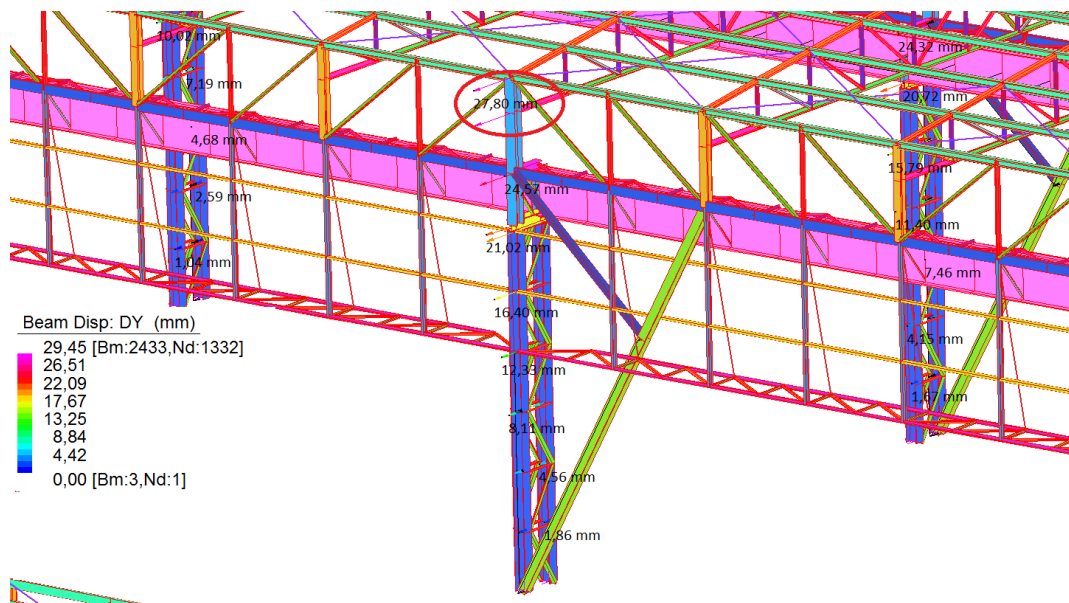
Nel presente paragrafo si riportano le analisi numeriche dedotte dai modelli del capannone. In particolare verranno eseguiti dei confronti tra soluzioni ottenute da capannone a colonne calastrellate e capannone a colonne equivalenti. Il confronto consente di valutare la validità del modello semplificato delle colonne calastrellate.

### 6.1 Confronto spostamenti colonne calastrellate ed equivalenti nel capannone

Nel seguente paragrafo si riportano gli spostamenti delle colonne nei modelli di calcolo del capannone a colonne calastrellate e in quello con colonna a rigidezza equivalente. Gli spostamenti sono valutati nella direzione trasversale alla via di corsa del carroponete.



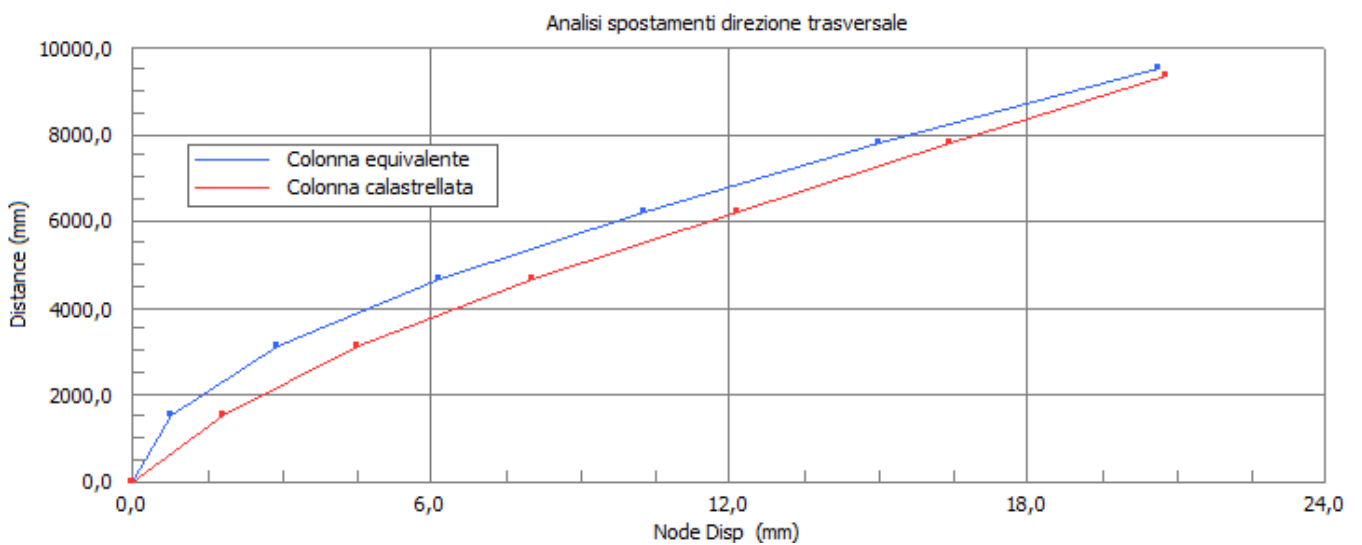
*Modello globale colonne unifilari equivalenti*



*Modello globale colonne calastrellate*

Come si può notare dai risultati del programma di calcolo, nel modello globale a colonne calastrellate abbiamo uno spostamento DY max = 29,45 mm, mentre nel modello globale a colonne unifilari equivalenti abbiamo uno spostamento DY max = 29,32 mm, cioè una differenza nell'ordine del decimo di millimetro. Perciò l'entità massima degli spostamenti nei due modelli è simile e di conseguenza la rigidezza della colonna equivalente approssima in modo corretto quella della colonna reale (calastrellata).

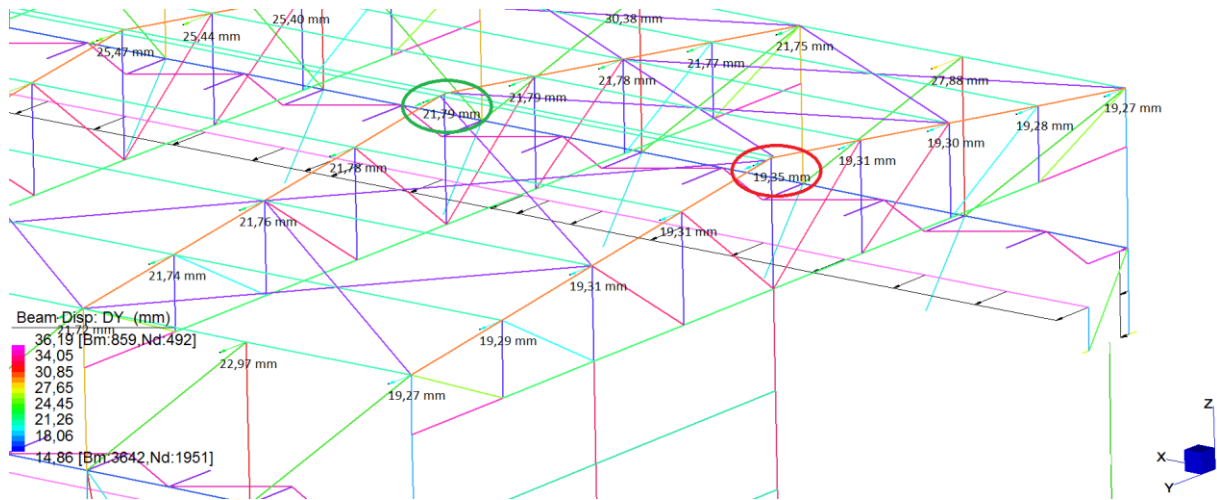
In questo diagramma si mette a confronto gli spostamenti dei due modelli globali, in cui nell'ordinata si ha la lunghezza dei nodi che sono uguali per entrambi, mentre nell'ordinata abbiamo gli spostamenti in direzione trasversale in mm.



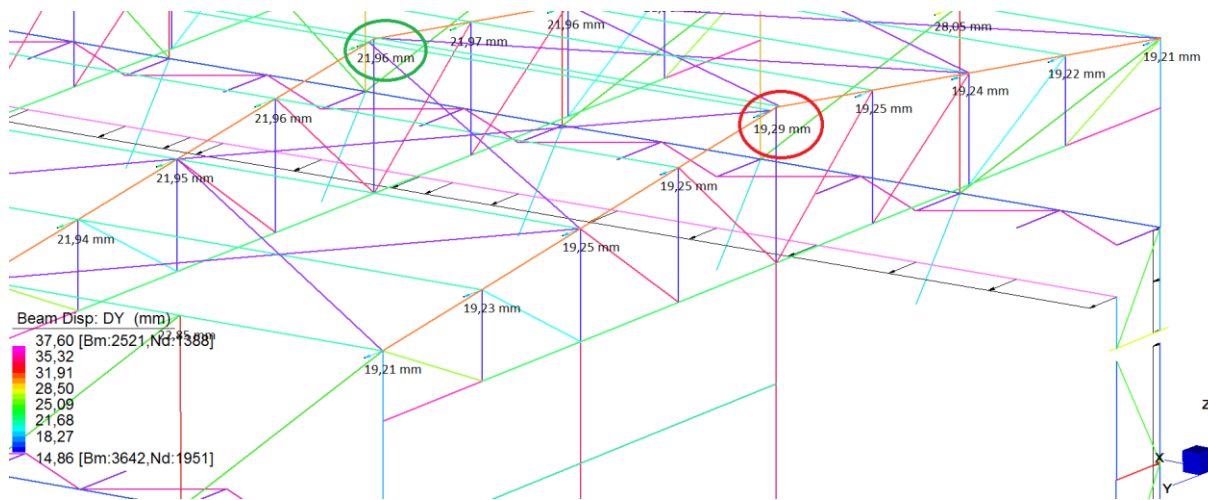
Si può facilmente constatare che gli spostamenti delle colonne dei due modelli globali avviene in egual modo con qualche differenza nell'ordine del decimo di millimetro, di conseguenza il modello globale formato da colonne unifilari equivalenti schematizza in modo corretto quello reale.

## 6.2 Confronto spostamenti alla sommità della copertura del capannone

Un secondo controllo della bontà del modello semplificato viene eseguito studiando gli spostamenti alla sommità del capannone (linea di colmo). Anche in questa condizione si registrano spostamenti analoghi o con differenze minime tali da ritenere il modello delle colonne equivalente corretto. Nelle seguenti immagini si riportano gli output del modello di calcolo con annessi spostamenti.



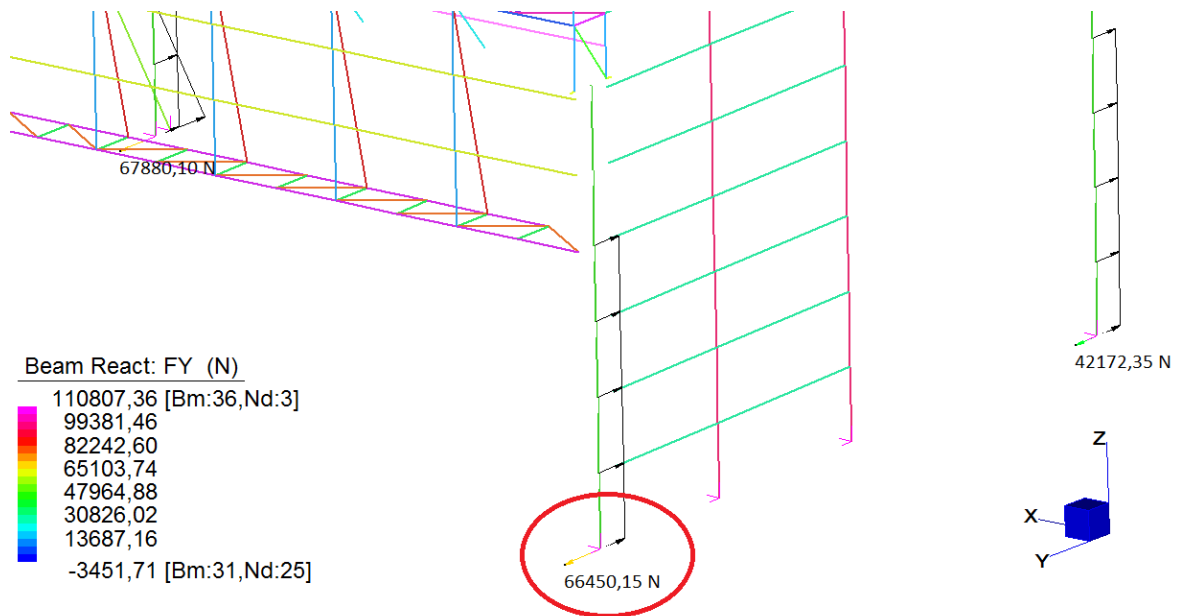
*Modello globale colonne unifilari equivalenti*



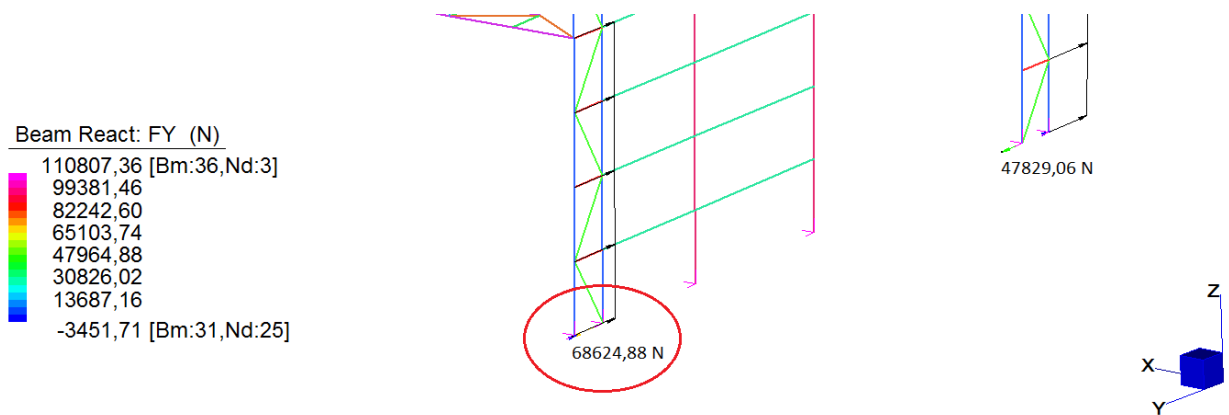
*Modello globale colonne calastrellate*

### 6.3 Confronto reazioni vincolari alla base delle colonne

Un ultimo controllo della correttezza del modello delle colonne equivalenti è dato dalla analisi delle reazioni vincolari alla base delle colonne del capannone. Le seguenti immagini riportano le reazioni vincolari nella direzione Y del modello di calcolo a colonne a calastrellate ed equivalenti. Le reazioni sono simili e pertanto il modello equivalente rappresenta in modo corretto la colonna calastrellata anche in termini di reazioni vincolari.



*Modello globale colonne unifilari equivalenti*



*Modello globale colonne calastrellate*

## **6.4 Conclusioni**

Dopo aver osservato i risultati dei modelli di calcolo e dalle formule per il calcolo della rigidezza equivalente, si può evincere che una colonna calastrellata può facilmente essere schematizzata in una colonna unifilare equivalente. Il vantaggio di questa semplificazione, oltre al fatto di risparmiare materiale in fase di esecuzione, permette di semplificare la modellazione soprattutto nella fase di pre dimensionamento, dove spesso accade di dover eseguire delle modifiche in fase progettuale.

## 7 BIBLIOGRAFIA

Riferimenti bibliografici essenziali:

- “Progettare costruzioni in acciaio” – G. Ballio e C. Bernuzzi – Hoepli
- “Strutture in acciaio” – G. Ballio, F.M. Mazzolani – Hoepli 1979
- “Progetto di strutture in acciaio” – N. Scibilia – Flaccovio 2005
- D.M. 17/01/2018 “Norme Tecniche per le Costruzioni – NTC2018”
- Circolare esplicativa del DM 17.01.2018 del 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP.

Elaborati grafici:

- 16650M001E01\_M001AE00 “Schemi strutturali”
- 16650M004E00\_005E00 “Pianta dime”
- 16650M004E01\_005E00 “Pianta dime”
- 16650M018E00\_019E00 “Pianta piastre di base”
- 16650M020E00 “Sezione filo 1”
- 16650M021E00 “Sezione tipo su reticolare”
- 16650M022E00 “Sezione tipo su colonna”
- 16650M023E00 “Sezione tipo su colonna”
- 16650M024E00\_025E00\_026E00\_027E00\_028E00\_029E00\_030E00 “Sezione filo D”
- 16650M031E00\_032E00\_033E00\_034E00\_035E00\_036E00\_037E00 “Sezione filo C”
- 16650M038E00\_039E00\_040E00\_041E00\_042E00\_043E00\_044E00 “Sezione filo B”
- 16650M045E00\_046E00\_047E00\_048E00\_049E00\_050E00\_051E00 “Sezione filo A”
- 16650M052E00\_053E00\_054E00\_055E00\_056E00\_057E00\_058E00 “Reticolare di piano”
- 16650M059E00\_060E00\_061E00\_062E00\_063E00\_064E00\_065E00 “Reticolare via di corsa”
- 16650M066E00\_067E00\_068E00\_069E00\_070E00\_071E00 “Pianta copertura”