

Regione Sicilia



Comune di Calatafimi Segesta



Provincia di Trapani



Comune di Gibellina



**Progetto di un impianto agrivoltaico avanzato denominato "Làgani", una potenza complessiva pari a 70,365 MWp integrato con un sistema di accumulo della potenza di 10 MW, da realizzarsi nei Comune di Calatafimi Segesta (TP) e Gibellina (TP)**

## PROGETTO DEFINITIVO

DELL'IMPIANTO DELLE OPERE CONNESSE E DELLE INFRASTRUTTURE INDISPENSABILI

CODICE ELABORATO

**GOSO\_CLT\_006\_R\_00**

TITOLO ELABORATO

**RELAZIONE PRELIMINARE SULLE STRUTTURE**

Proponente:

**GO-SOLE**

GO-SOLE S.r.L.

Piazza del Grano 3  
39100 Bolzano (BZ)  
go-sole@legalmail.it

CF/P.IVA 03225430218

Progettazione



Progettista

Dr. Geol. Michele Ognibene



Dr. Ing. Daniele Cavallo

REVISIONI	N.	Data	Descrizione revisione	Redatto	Controllato	Approvato
		00	28.08.2024	DEFINITIVO PER CONSEGNA VIA/AU	R.CAVALLO	D.CAVALLO

<b>1. OGGETTO E SCOPO .....</b>	<b>3</b>
<b>2. NORMATIVA E LEGGI DI RIFERIMENTO .....</b>	<b>3</b>
<b>3. STRUTTURE PORTANTI MODULI FOTOVOLTAICI – TRACKERS MONOASSIALI .....</b>	<b>3</b>
<b>3.1. Descrizione generale delle strutture .....</b>	<b>3</b>
<b>3.2. Considerazioni preliminari sulle modalità di infissione.....</b>	<b>7</b>
<b>3.3. Modellazione della struttura – criteri generali .....</b>	<b>7</b>
<b>3.4. Carichi di progetto .....</b>	<b>11</b>
3.4.1. PESI PROPRI STRUTTURALI .....	11
3.4.2. SOVRACCARICHI PERMANENTI .....	11
3.4.3. VENTO.....	11
<b>4. TRACKER MONOASSIALE 1P A 28 MODULI .....</b>	<b>16</b>
<b>4.1. Generazione del modello .....</b>	<b>16</b>
<b>4.2. Casi di carico .....</b>	<b>17</b>
4.2.1. SPOSTAMENTI .....	21
<b>4.3. Risultati numerici .....</b>	<b>23</b>
4.3.1. SPOSTAMENTI .....	23
4.3.2. SOLLECITAZIONI.....	25
<b>5. TRACKER MONOASSIALE 1P A 14 MODULI .....</b>	<b>28</b>
<b>5.1. Generazione del modello .....</b>	<b>28</b>
<b>5.2. Casi di carico .....</b>	<b>29</b>
<b>5.3. Risultati numerici .....</b>	<b>33</b>
5.3.1. SOLLECITAZIONI.....	33
<b>6. FONDAZIONI CABINE PREFABBRICATE POWER STATION .....</b>	<b>36</b>
<b>6.1. Descrizione generale dell’opera .....</b>	<b>36</b>
<b>6.2. Descrizione del modello .....</b>	<b>37</b>
<b>6.3. Materiali strutturali .....</b>	<b>38</b>
<b>6.4. Azioni di progetto .....</b>	<b>38</b>
<b>6.5. Risultati delle analisi .....</b>	<b>40</b>
<b>7. CONSIDERAZIONE FINALI DI TIPO GEOTECNICO .....</b>	<b>44</b>
<b>7.1. Tracker monoassiali .....</b>	<b>44</b>
<b>7.2. Strutture fondali cabine .....</b>	<b>44</b>

## 1. OGGETTO E SCOPO

Il presente documento descrive i criteri di progetto adottati per il dimensionamento delle strutture di supporto dei moduli fotovoltaici, da realizzarsi all'interno dell'impianto agrivoltaico della potenza nominale di 70,365 MWp che la Società proponente – GO-SOLE srl - intende realizzare in agro dei Comuni di Calatafimi Segesta (TP) e Gibellina (TP).

Le opere strutturali analizzate nel presente documento potrebbero subire alcune modifiche nella fase di progetto successiva all'Autorizzazione (fase di progetto esecutivo); per tal motivo le calcolazioni di seguito esposte sono da considerarsi a carattere preliminare.

## 2. NORMATIVA E LEGGI DI RIFERIMENTO

Ai fini del dimensionamento preliminare sono stati utilizzati i metodi classici della scienza delle costruzioni.

I valori caratteristici dei carichi vento verranno calcolati in accordo al D.M. 17 gennaio 2018 - NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI, Cap. 3 - AZIONI SULLE COSTRUZIONI - Par. 3.3 e 3.4, nonché la Circolare applicativa n. 7 dell'11 febbraio 2019, Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 17 gennaio 2018.

## 3. STRUTTURE PORTANTI MODULI FOTOVOLTAICI – TRACKERS MONOASSIALI

### 3.1. DESCRIZIONE GENERALE DELLE STRUTTURE

Le strutture di supporto delle vele sono costituite da Trackers monoassiali, il cui asse di rotazione è disposto in direzione Nord-Sud, in modo tale da consentire l'esposizione delle vele in direzione est-ovest con inclinazione variabile durante l'arco della giornata tra 0° e 60° rispetto all'orizzontale.

I trackers monoassiali sono strutture metalliche costituite essenzialmente da tre componenti:

1. I pali in acciaio zincato, direttamente infissi nel terreno;
2. La struttura porta moduli girevole, montata sulla testa dei pali, composta da profilati in metallo, sulla quale viene posata una fila di moduli fotovoltaici (in totale massimo 48 moduli per struttura disposti su una fila in verticale, considerando la struttura più grande che verrà impiegata sull'impianto);
3. L'inseguitore solare, necessario per la rotazione della struttura porta moduli, costituito essenzialmente da un motore elettrico (controllato da un software), che tramite un attuatore collegato al profilato centrale della struttura di supporto, permette di ruotare la struttura durante la giornata, posizionando i pannelli nell'angolazione ottimale.

Le strutture devono essere opportunamente dimensionate per sopportare il peso dei moduli fotovoltaici, e soprattutto i carichi vento previsti nella zona di installazione.

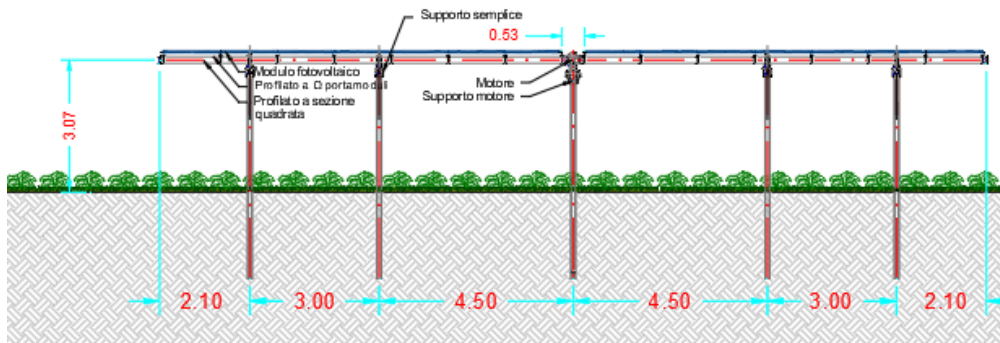
Il layout di progetto prevede l'installazione di due tipologie di vela:

- **Tipo A - 1x28**
- **Tipo B - 1x14**

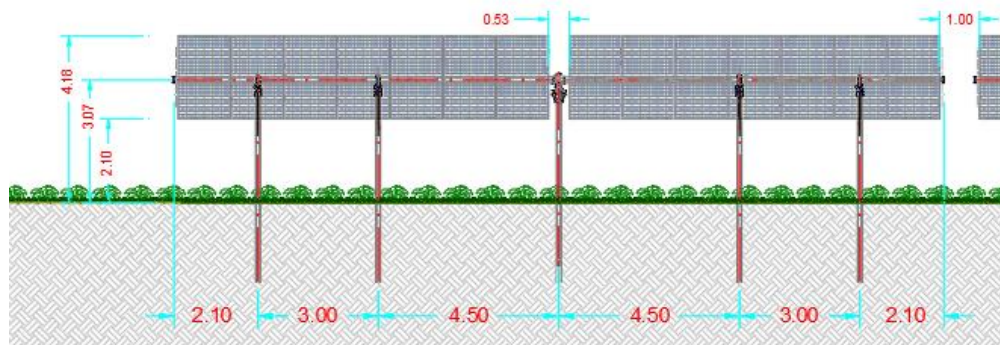
Entrambe in configurazione 1p (rispettivamente 14 e 28 moduli per vela, disposti in verticale su una sola fila);



Dettaglio sezione longitudinale struttura - Scala 1:100



Vista frontale con rotazione 60° - Scala 1:100



Dettaglio sezione trasversale struttura - Scala 1:50

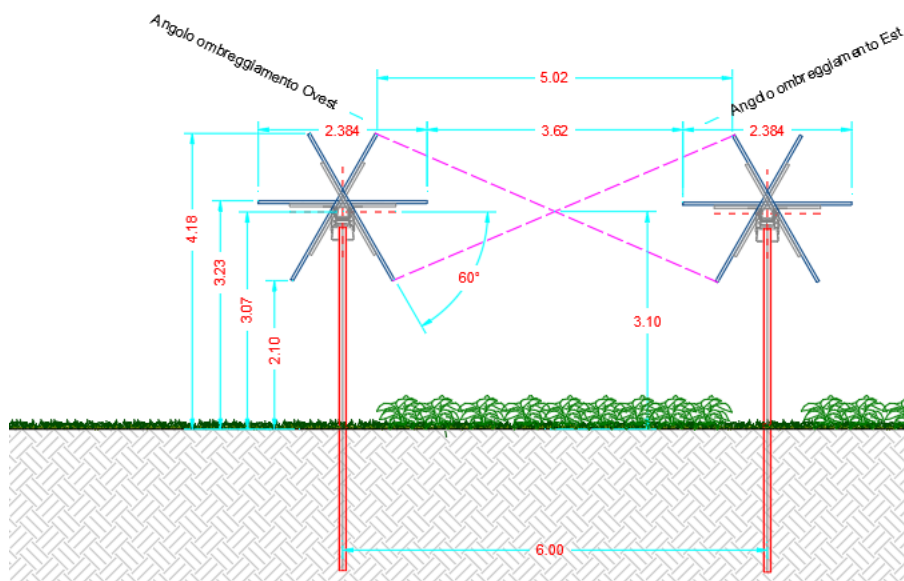


Figura 3.2 - Vela fotovoltaica 14x1 moduli

Il modulo di progetto ha le seguenti dimensioni:

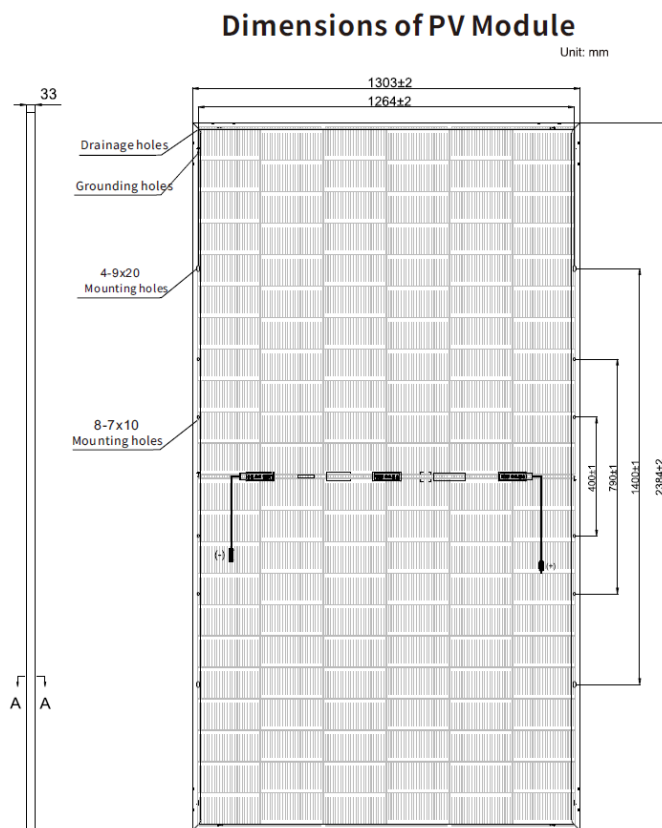


Figura 3.3 – Dimensione modulo di progetto

Le vele fotovoltaiche hanno pertanto superfici esposte pari a:

- Per le strutture 1x28 [37,5 x 2,38] = mq ca
- Per le strutture 1x14 [19 x 2,38] = mq ca

Tutte le tipo strutturali sono caratterizzate da:

- Altezza al mosso pari a 3,07 mt da p.c.
- Altezza massima del punto sommale della vela pari a 4,18 mt da p.c.
- Profondità di infissione pari a 2,90 mt

Gli elementi strutturali che costituiscono il tracker monoassiale sono:

- I pali verticali, infissi nel terreno, a loro volta suddivisi in due categorie:
  - motor support, deputati al supporto del motore (in posizione centrale alla vela);
  - simple support, deputati al semplice sostegno dell'asse di rotazione;
- La trave orizzontale (anche detta torque tube), che funge da asse di rotazione principale, la cui rotazione è comandata da un sistema motorizzato e collegato ad un software;
- Gli arcarecci, sui quali vengono fissati i moduli fotovoltaici;

I moduli, disposti in configurazione 1p, sono fissati su una serie di arcarecci, a loro volta collegati alla trave orizzontale (torque tube) che funge da asse di rotazione principale, e che consente di ruotare la vela fotovoltaica in funzione dei raggi solari incidenti.

L'asse di rotazione è vincolato ad una serie di montanti verticali, infissi nel terreno per battitura fino a profondità idonee a garantire la stabilità del complesso terreno-struttura, come più avanti descritto.

### 3.2. CONSIDERAZIONI PRELIMINARI SULLE MODALITÀ DI INFISSIONE

Sulla base delle prime considerazioni geologiche, l'area di sedime risulta caratterizzata da un sedime limoso-argilloso; è plausibile, pertanto, prevedere una infissione al suolo di tipo diretto, per semplice battitura; si possono escludere, in questa fase, tecniche di infissione diversa tipologia, quali ad esempio infissioni a rotazione, o con precedente realizzazione di perforazione (pre-drilling), infissioni a rotopercolazione, ecc...

Le assunzioni progettuali andranno comunque verificate nella fase di progettazione esecutiva, mediante l'esecuzione di test in situ (nello specifico, ramming test) che consentiranno confermare o smentire le ipotesi preliminari.

La profondità di infissione è prevista in via preliminare fino a profondità di -2,90 mt da p.c.

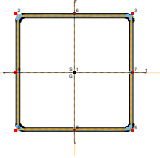
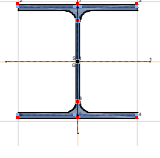
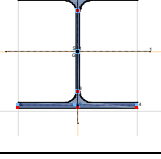
### 3.3. MODELLAZIONE DELLA STRUTTURA – CRITERI GENERALI

Il tracker viene modellato come un telaio 2D, nel quale sia l'asse di rotazione orizzontale che i montanti verticali sono modellati per mezzo di elementi monodimensionali tipo asta.

Il telaio è caricato per mezzo dell'elemento pannello di carico, ed è vincolato mediante un sistema di molle orizzontali, a rigidezza definita dal progettista.

#### Aste

Gli elementi che costituiscono il telaio tipo sono i seguenti:

Id	Tipo	Funzione	Materiale	Sezione
01	Q 120 x 120 x 4.0	Asse di rotazione orizzontale-torque tube	Acciaio S 350 GD	
02	HEA 200	Montante verticale - motor support	Acciaio S 275	
03	HEA 200	Montante verticale- simple support	Acciaio S 275	

### Caratteristiche meccaniche dei materiali

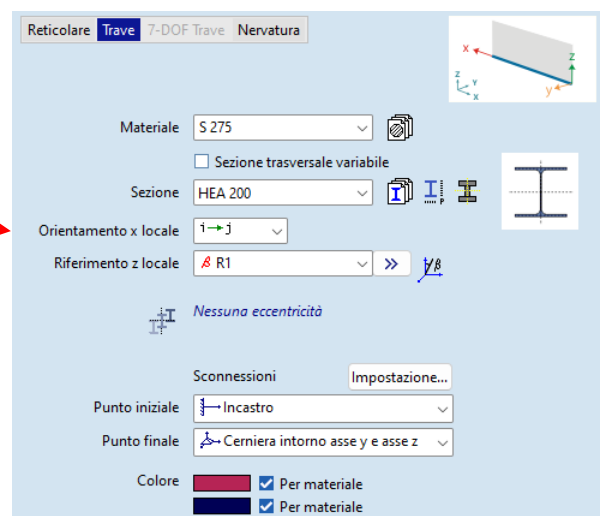
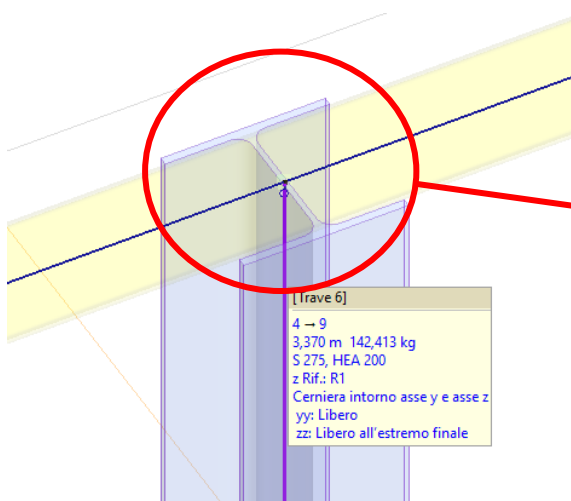
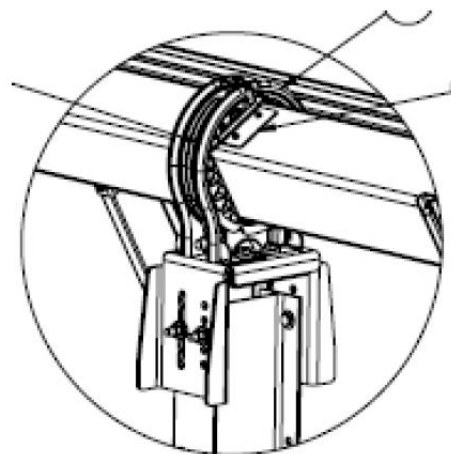
Id	Nome	Tipo	$E_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\nu$	$\alpha_T$ [1/°C]	P [kg/m <sup>3</sup> ]	P <sub>1</sub>
01	S 275	Acciaio	210000	0,30	1,2E-5	7850	$f_y$ [N/mm <sup>2</sup> ] = 275,00
02	S 350 GD	Acciaio	210000	0,30	1,2E-5	7850	$f_y$ [N/mm <sup>2</sup> ] = 350,00

Non sono oggetto della presente relazione gli elementi secondari (arcarecci portamoduli), in quanto la loro trattazione è aspetto peculiare del progetto esecutivo.

### Sconnessione e vincoli

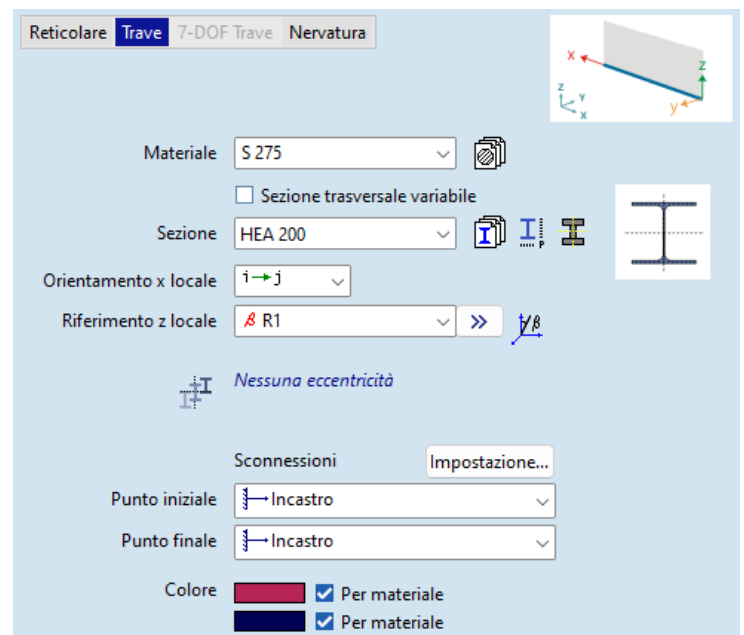
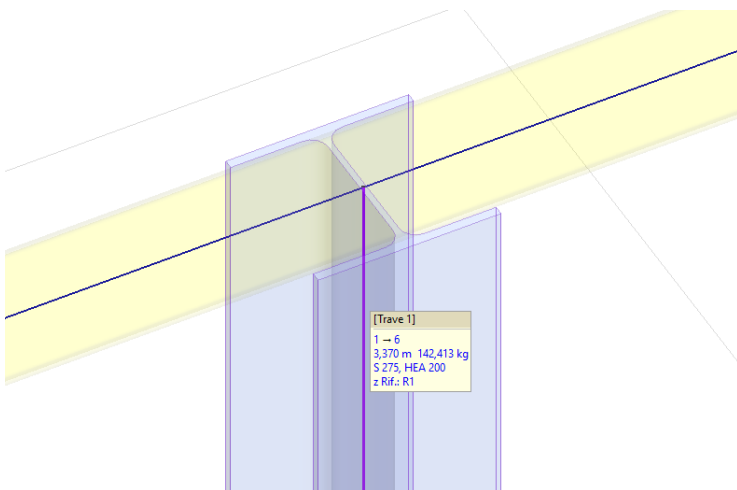
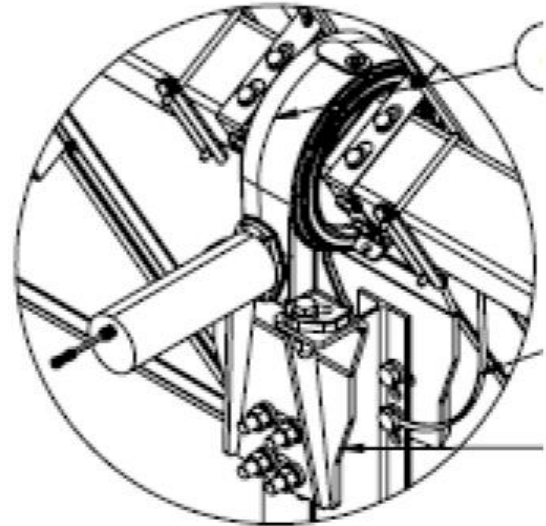
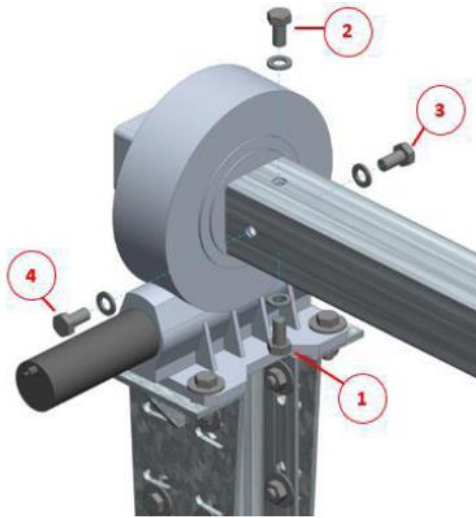
L'asse di rotazione è vincolato ai pali verticali mediante due diversi tipi di vincolo:

Il giunto trave orizzontale – simple support viene modellato per mezzo di sconnessioni applicate alla testa del simple support, con un certo numero di rilasci rotazionali che ne simulano un vincolo tipo cerniera sferica.





Il giunto trave orizzontale – motor support viene modellato invece con un incastro rigido, in quanto in grado di bloccare sia le componenti lineari che rotazionali.



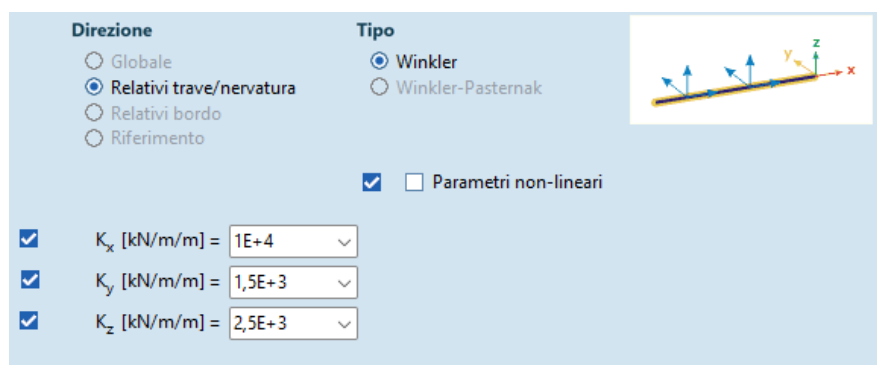
### Vincolo al suolo

La porzione infissa dei pali verticali viene modellata con un letto di molle orizzontali alla winkler, le cui rigidità, come di seguito esplicate, tengono conto delle caratteristiche peculiari della infissione per battitura all'interno di un sedime sabbio-argilloso.

Si assume, a favore di sicurezza, di applicare le molle a partire da una profondità di 50cm dal piano campagna, escludendo di fatto dall'interazione con il terreno la parte superficiale.

Le rigidità assegnate in questa fase progettuale sono pari a:

- $k_x = 10.000 \text{ kN/ml}$  (rigidità elevata nella direzione assiale del montante)
- $K_y = 1.500 \text{ kN/ml}$  (rigidità ipotizzata nella direzione della minore inerzia del montante)
- $k_z = 2.500 \text{ kN/ml}$  (rigidità ipotizzata nella direzione della maggiore inerzia del montante)



I valori di rigidità sopra assegnati sono uno degli aspetti che deve essere approfondito in sede di progettazione esecutiva, mediante prove sperimentali in sito (es. pull out e carico laterale) per mezzo delle quali è possibile verificare in maniera empirica le assunzioni progettuali.

In questa fase vengono assegnati valori di rigidità desunti da altre installazioni possedenti analoghe caratteristiche.

### Pannello carico

La vela fotovoltaica viene assimilata ad un pannello di carico, elemento virtuale che ha come funzione quella di trasferire i carichi esterni di progetto (vento, neve, peso proprio, sovraccarichi, ecc...) sugli elementi strutturali sottostanti (asse di rotazione e pali verticali).

Ai fini del calcolo delle sollecitazioni prevalenti, il pannello di carico viene orientato con inclinazione pari a 45° rispetto all'orizzontale, in modo tale da presentare la massima esposizione ai carichi vento.

### Solutore FEM

La struttura, modellata con le ipotesi sopra descritte, viene risolta, in termini di sollecitazioni e spostamenti, per mezzo del solutore a elementi finiti:

AXIS VM release 7

Licenza n. 9145

rilasciata a SCM Ingegneria srl

rilasciata da STA DATA srl di Torino

### 3.4. CARICHI DI PROGETTO

Le vele fotovoltaiche sono dimensionate nei riguardi delle azioni prevalenti dovute ai venti, che sono di gran lunga più gravosi rispetto ai carichi neve ed a quelli sismici.

Non verranno presi in esame casi sismici, in quanto le azioni sismiche risultano trascurabili rispetto ai carichi vento.

#### 3.4.1. PESI PROPRI STRUTTURALI

Vengono attribuiti in automatico dal software in funzione dei profilati

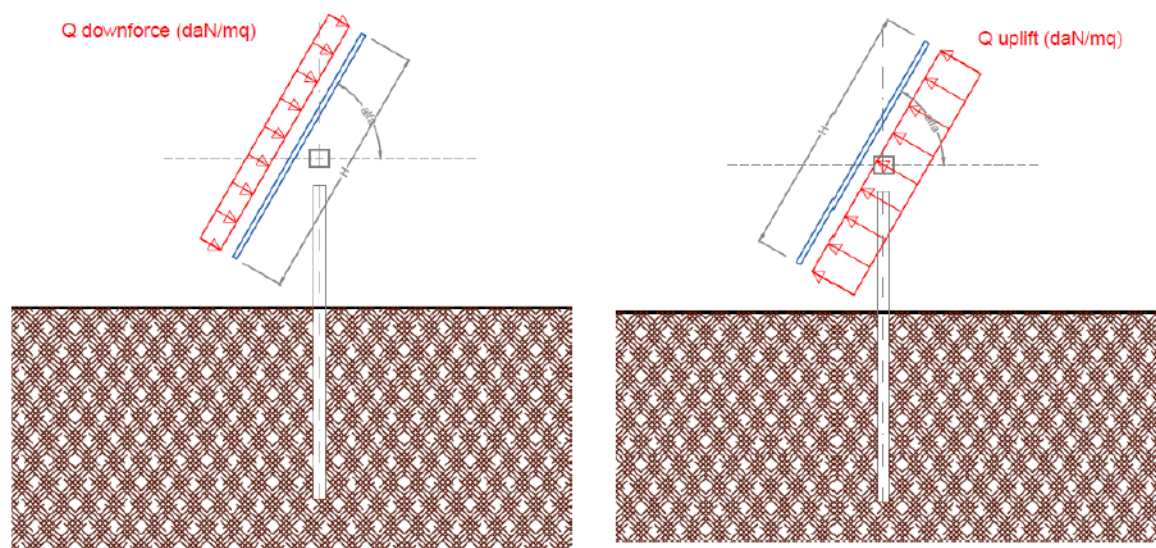
#### 3.4.2. SOVRACCARICHI PERMANENTI

Sono riferiti ai pesi dei moduli fotovoltaici, nell'ordine di 13,00 daN/mq

#### 3.4.3. VENTO

L'azione del vento viene ricondotta ad un'azione statica equivalente, costituita da pressioni e depressioni agenti normalmente alle superfici delle vele.

L'azione del vento viene esplicita sul pannello di carico, sotto forma di carichi distribuiti che possono essere di pressione [Q downforce] o di depressione [Q uplift], variabili in funzione dell'angolo di inclinazione della vela rispetto all'orizzontale



La pressione del vento Q è data dall'espressione (par.3.3.4):

$$Q=q_r*c_e*c_p*c_d$$

dove

- $q_r$  pressione cinetica di riferimento;
- $c_e$  coefficiente di esposizione;
- $c_p$  coefficiente di pressione (ex coefficiente di forma);
- $c_d$  coefficiente dinamico;

I metodi di calcolo dei valori dei coefficienti  $c_e$   $c_p$   $c_d$  sono riportati nella Circolare Applicativa (paragrafi C.3.3.7-C.3.3.9).

### Pressione cinetica di riferimento $q_r$

La pressione cinetica di riferimento si calcola mediante la formula (par. 3.3.6)

$$q_r = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_r^2$$

dove:

$v_r$  è la velocità di riferimento  $V_r = V_{b,0} \cdot c_a$

$\rho$  è la densità dell'aria, espressa convenzionalmente in 1,25 daN7mc

La pressione cinetica di riferimento si calcola a partire dalla zona di vento e dall'altezza del sito slm, secondo la procedura seguente:

Nota la Zona di vento: 2 – Sicilia

Tab. 3.3.I - Valori dei parametri  $v_{b,0}$ ,  $a_0$ ,  $k_s$

Zona	Descrizione	$v_{b,0}$ [m/s]	$a_0$ [m]	$k_s$
1	Valle d'Aosta, Piemonte, Lombardia, Trentino Alto Adige, Veneto, Friuli Venezia Giulia (con l'eccezione della provincia di Trieste)	25	1000	0,40
2	Emilia Romagna	25	750	0,45
3	Toscana, Marche, Umbria, Lazio, Abruzzo, Molise, Puglia, Campania, Basilicata, Calabria (esclusa la provincia di Reggio Calabria)	27	500	0,37
4	Sicilia e provincia di Reggio Calabria	28	500	0,36
5	Sardegna (zona a oriente della retta congiungente Capo Teulada con l'Isola di Maddalena)	28	750	0,40
6	Sardegna (zona a occidente della retta congiungente Capo Teulada con l'Isola di Maddalena)	28	500	0,36
7	Liguria	28	1000	0,54
8	Provincia di Trieste	30	1500	0,50
9	Isole (con l'eccezione di Sicilia e Sardegna) e mare aperto	31	500	0,32

### Coefficiente di esposizione $c_e$

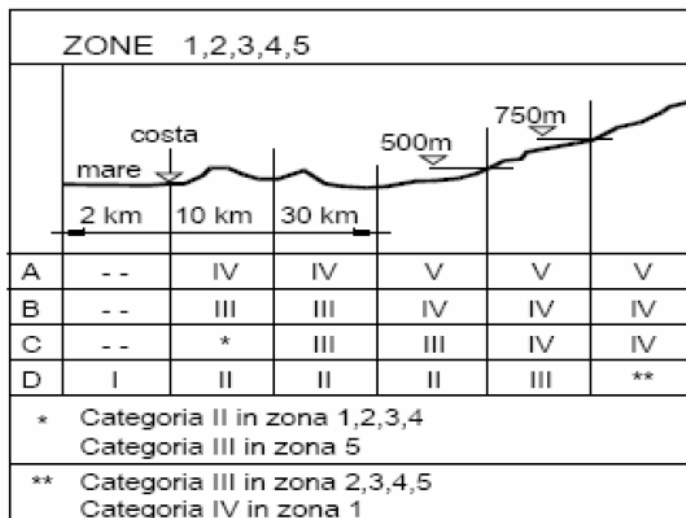
Il coefficiente di esposizione  $c_e$  è tabellato in funzione della quota in cui sorge l'edificio, della topografia del terreno e della categoria di esposizione del sito (3.3.7);

Partendo dalla Classe di rugosità del terreno: D

Tab. 3.3.III - Classi di rugosità del terreno

Classe di rugosità del terreno	Descrizione
A	Aree urbane in cui almeno il 15% della superficie sia coperto da edifici la cui altezza media superi i 15 m
B	Aree urbane (non di classe A), suburbane, industriali e boschive
C	Aree con ostacoli diffusi (alberi, case, muri, recinzioni,...); aree con rugosità non riconducibile alle classi A, B, D
D	a) Mare e relativa fascia costiera (entro 2 km dalla costa); b) Lago (con larghezza massima pari ad almeno 1 km) e relativa fascia costiera (entro 1 km dalla costa) c) Aree prive di ostacoli o con al più rari ostacoli isolati (aperta campagna, aeroporti, aree agricole, pascoli, zone paludose o sabbiose, superfici innevate o ghiacciate, ....)

Distanza dalla costa > 30km



Si ottiene la Categoria esposizione: II

Tab. 3.3.II - Parametri per la definizione del coefficiente di esposizione

Categoria di esposizione del sito	$K_r$	$z_0$ [m]	$z_{min}$ [m]
I	0,17	0,01	2
II	0,19	0,05	4
III	0,20	0,10	5
IV	0,22	0,30	8
V	0,23	0,70	12

Dalla categoria di esposizione ricaviamo i valori:

$$k_r = 0,19;$$

$$z_0 = 0,05 \text{ m};$$

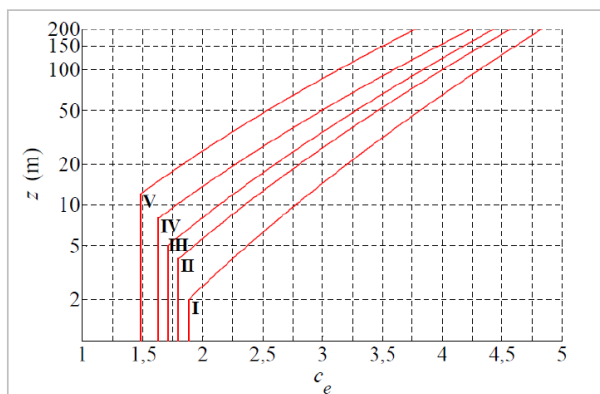
$$z_{min} = 4 \text{ m}$$

Nota l'altezza della costruzione (z) la si confrontata col valore di  $z_{min}$  (4mt), se  $z \geq z_{min}$  il coefficiente di esposizione si calcola mediante la formula:

$z < z_{min}$  il coefficiente di esposizione si calcola con:

$$c_e(z) = c_e(z_{min})$$

e si determina con il grafico seguente:



Nel nostro caso,

$z=2,5 \text{ mt} \leq z_{\min} (4\text{mt})$ , per la categoria di esposizione tipo II,  $c_e=1,7$

### Coefficiente di pressione $c_p$

Ai fini della determinazione del coefficiente di pressione  $c_p$ , si assume l'ipotesi di assimilare le strutture fotovoltaiche a quelle di tettoie a singola falda.

La normativa, al punto C3.3.8.2 della Circolare, introduce, per questo tipo di strutture, il coefficiente di forza  $c_F$ , così definito:

Per valori positivi  $C_{F+}=+0,2+\alpha/30$  [indipendente dal coeff bloccaggio]

Per valori negativi  $C_{F-}=-0,5-1,3*\alpha/30$  per coeff bloccaggio  $\Phi=0$

$C_{F-}=-1,4$  per coeff bloccaggio  $\Phi=1$

I valori di  $c_F$  variano a seconda dell'angolo di inclinazione della vela, nonché dal grado di ostruzione  $\Phi$

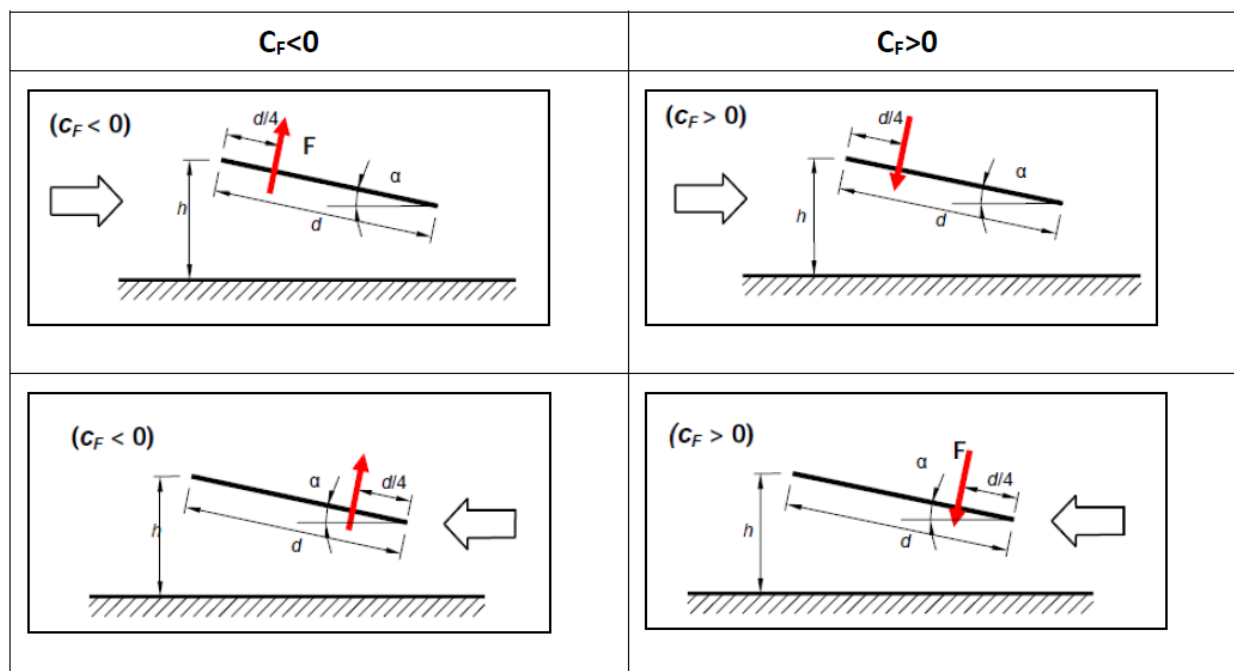
Le assunzioni di progetto consistono nel considerare i  $C_{F+}$  come da normativa, mentre i  $C_{F-}$  da interpolazione tra le situazioni limite:

$\Phi=0$  - per le vele fotovoltaiche perimetrali inclinate da  $0^\circ$  fino a  $30^\circ$ ca, e

$\Phi=0,8$  - per le vele fotovoltaiche perimetrali inclinate da  $40^\circ$  fino a  $55^\circ$ ca.

inclinaz $\alpha$ ( $^\circ$ )	$C_{F+}$	$C_{F-}$ ( $\Phi=0$ )	$C_{F-}$ ( $\Phi=1$ )	$C_{F-}$ interpolato
0	0,200	-0,500	-1,4	-0,500 ( $\Phi=0$ )
5	0,367	-0,717	-1,4	-0,717 ( $\Phi=0$ )
10	0,533	-0,933	-1,4	-0,933 ( $\Phi=0$ )
15	0,700	-1,150	-1,4	-1,150 ( $\Phi=0$ )
20	0,867	-1,367	-1,4	-1,367 ( $\Phi=0$ )
25	1,033	-1,583	-1,4	-1,583 ( $\Phi=0$ )
30	1,200	-1,800	-1,4	-1,800 ( $\Phi=0$ )
35	1,367	-2,017	-1,4	-1,800 ( $\Phi=0,5$ )
40	1,533	-2,233	-1,4	-1,817 ( $\Phi=0,8$ )
45	1,700	-2,450	-1,4	-1,925 ( $\Phi=0,8$ )
50	1,867	-2,667	-1,4	-2,033 ( $\Phi=0,8$ )
55	2,033	-2,883	-1,4	-2,142 ( $\Phi=0,8$ )

Per ogni angolo di inclinazione, le pressioni  $Q_{\text{downforce}}$  e  $Q_{\text{uplift}}$  vengono distribuite in modo automatico dal software in modo tale che gli effetti siano uguali a quelli derivanti dal porre la risultante a  $d/4$ .



Una distinzione importante consiste nel dimensionamento delle vele esterne, perimetrali, sottoposte all'azione diretta del vento; da quelle interne, per le quali si innescano fenomeni di scia, distacco di vortici, ecc...

È facoltà del progettista considerare valori del coefficiente di pressione desunti da prove sperimentali in galleria del vento; in questi casi è di fondamentale importanza che i modelli sui quali sono condotti i test abbiano stesse frequenze di vibrazione di quelli in progetto.

I valori di pressione vento nelle configurazioni  $Q_{downforce}$  e  $Q_{uplift}$  diventano le seguenti:

inclinaz a (°)	Cf+	Cf- (Φ=0)	Cf- (Φ=1)	Cf- interpo	Press downforce Q (daN/mq)	Pressione uplift Q (daN/mq)
0	0,200	-0,500	-1,4	-1,400 (Φ=0)	13,28	-92,97
5	0,367	-0,717	-1,4	-1,400 (Φ=0)	24,35	-92,97
10	0,533	-0,933	-1,4	-1,400 (Φ=0)	35,42	-92,97
15	0,700	-1,150	-1,4	-1,400 (Φ=0)	46,48	-92,97
20	0,867	-1,367	-1,4	-1,400 (Φ=0)	57,55	-92,97
25	1,033	-1,583	-1,4	-1,400 (Φ=0)	68,62	-92,97
30	1,200	-1,800	-1,4	1,600 (Φ=0,5)	79,69	106,25
35	1,367	-2,017	-1,4	1,600 (Φ=0,5)	90,76	106,25
40	1,533	-2,233	-1,4	-1,817 (Φ=0,8)	101,82	-120,64
45	1,700	-2,450	-1,4	-1,925 (Φ=0,8)	112,89	-127,83
50	1,867	-2,667	-1,4	-2,033 (Φ=0,8)	123,96	-135,03
55	2,033	-2,883	-1,4	-2,142 (Φ=0,8)	135,03	-142,22

Per la configurazione di vela inclinata a 45° è plausibile attendersi valori di carico vento pari a circa 120 daN/mq nelle due configurazioni di downforce e uplift.

Questi valori devono essere presi in considerazione per le verifiche di congruità dei carichi generati in automatico dal software.

Gli schemi di carico principali, disposti secondo le indicazioni derivanti dalla Circolare NTC, verranno infatti generati dal software, come illustrato nel seguito.

## 4. TRACKER MONOASSIALE 1P A 28 MODULI

### 4.1. GENERAZIONE DEL MODELLO

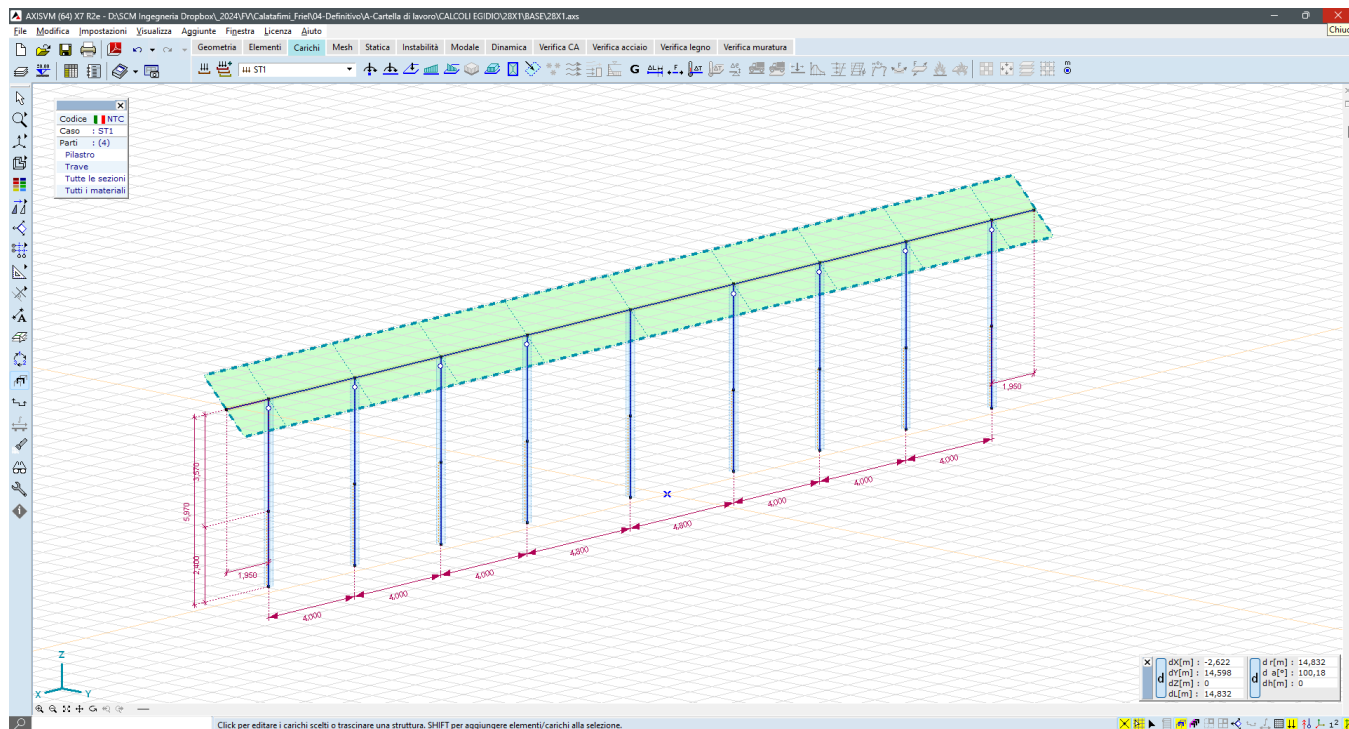


Figura 4.1\_modello a elementi finiti – vista ad aste

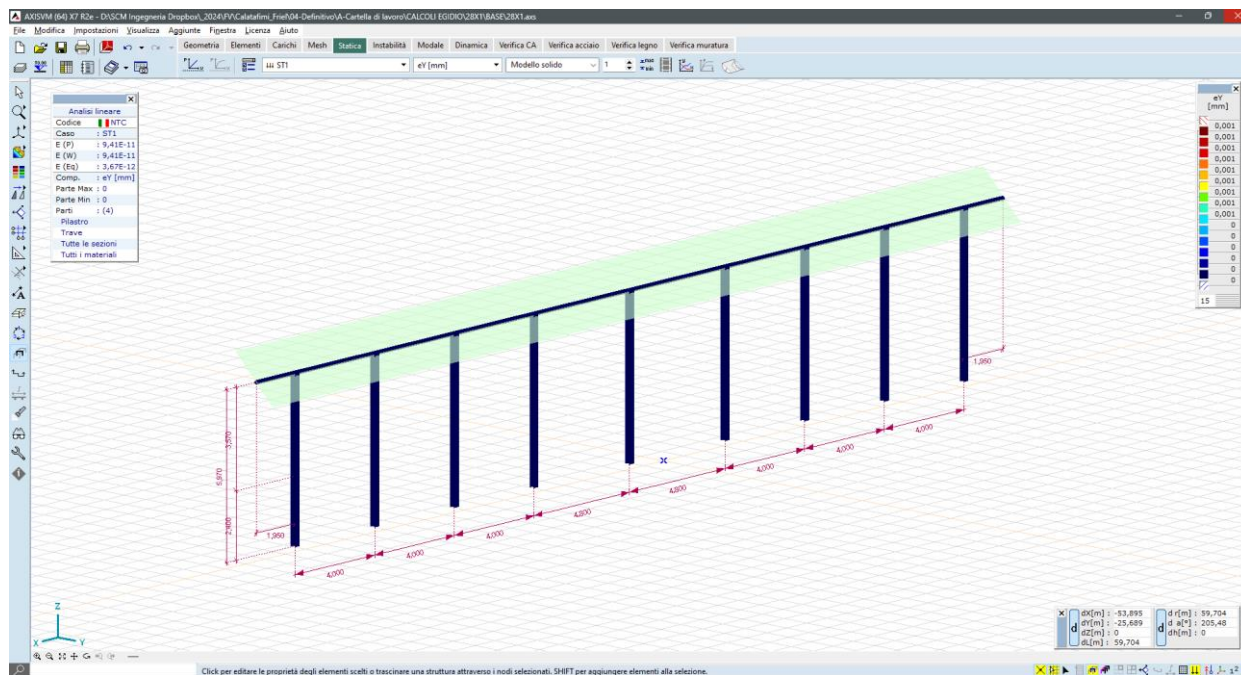


Figura 4.2\_modello a elementi finiti – vista render



**4.2. CASI DI CARICO**

Vengono generati n. 8 casi di carico vento, come di seguito illustrato:

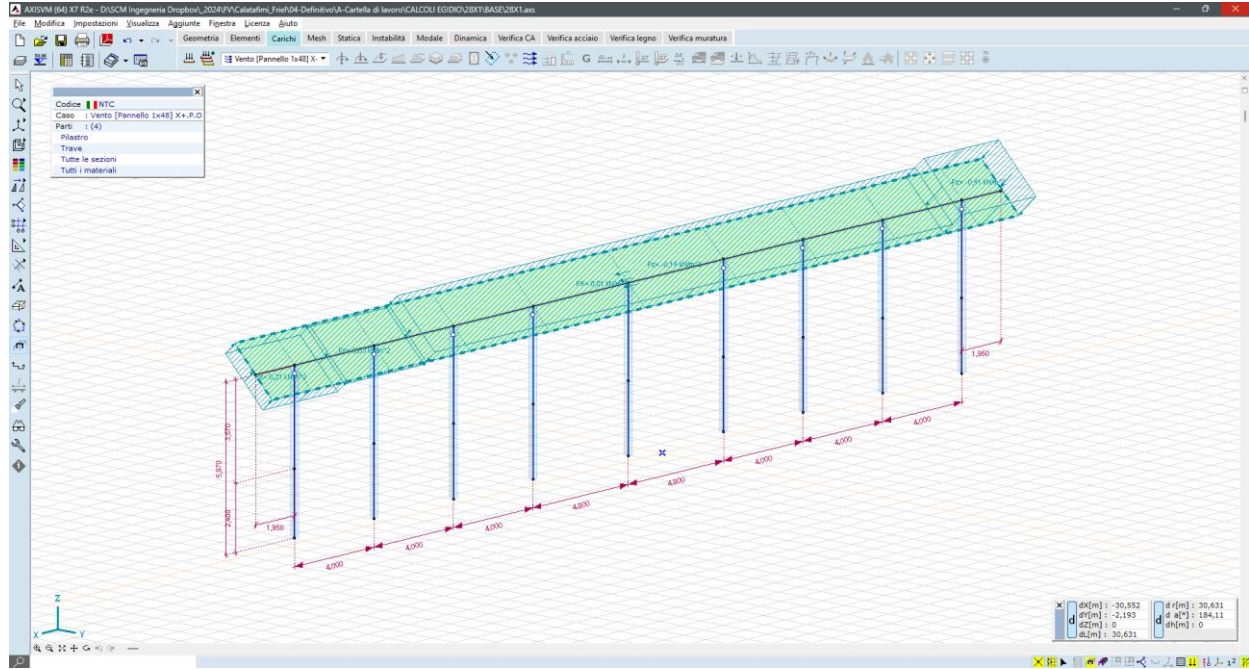


Figura 4.3\_carico vento X+P.O.

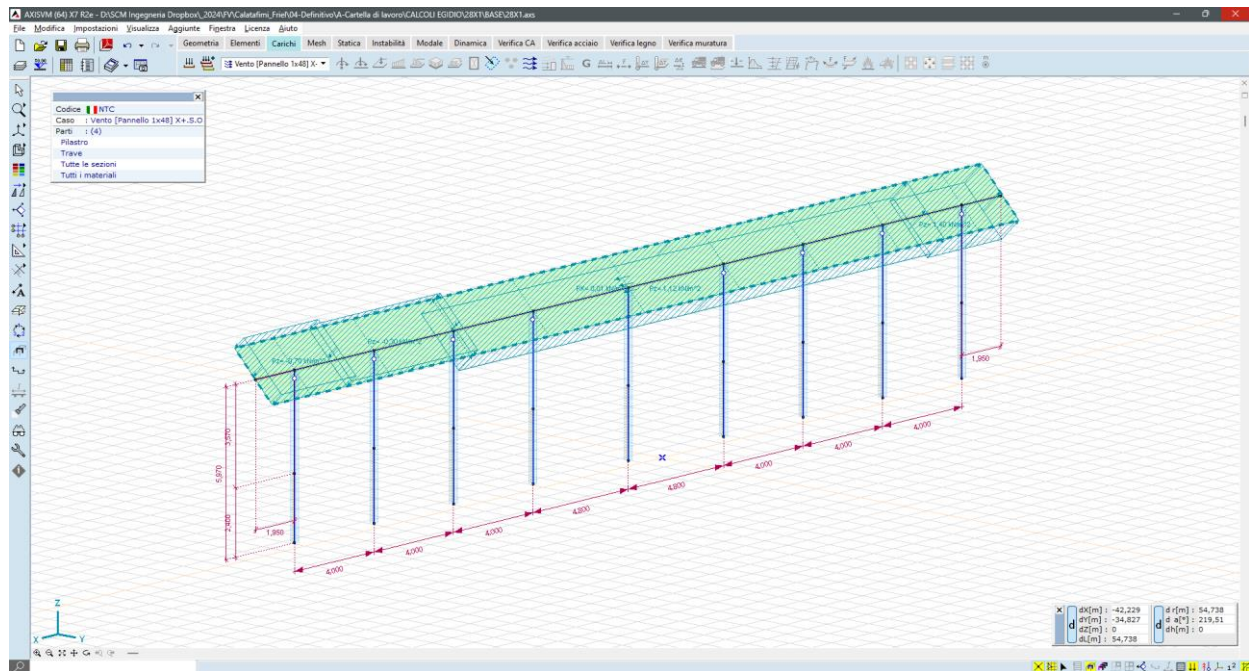


Figura 4.4\_carico vento X+S.O.

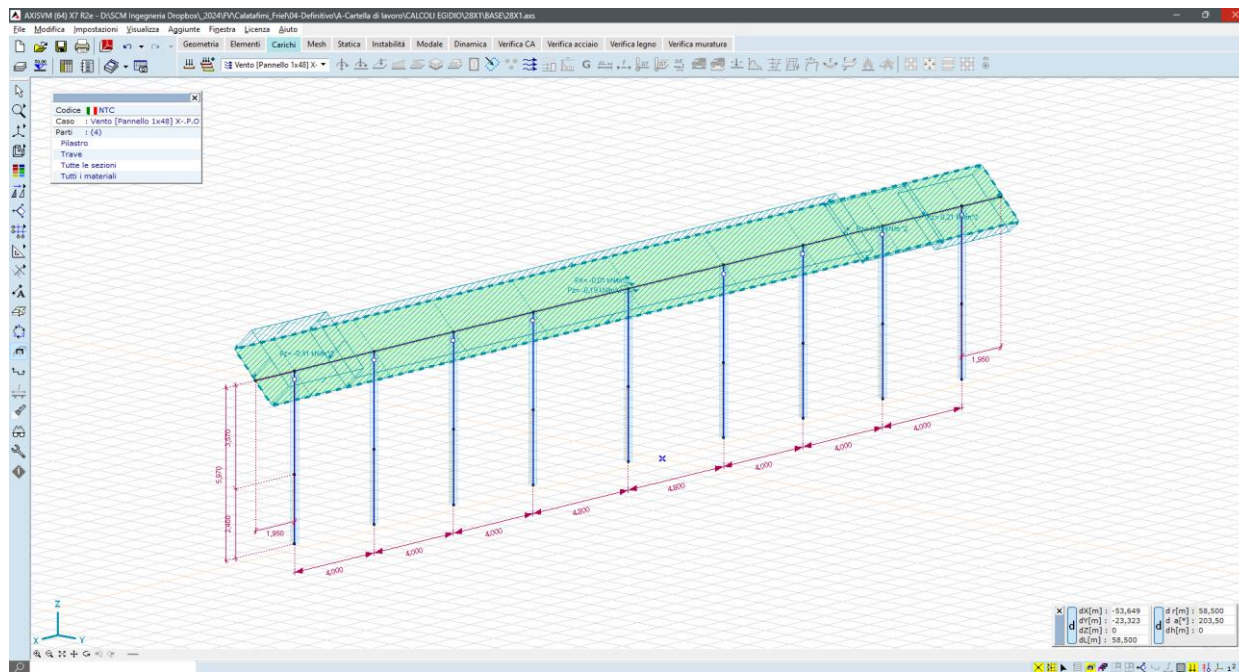


Figura 4.5\_carico vento X+P.O.

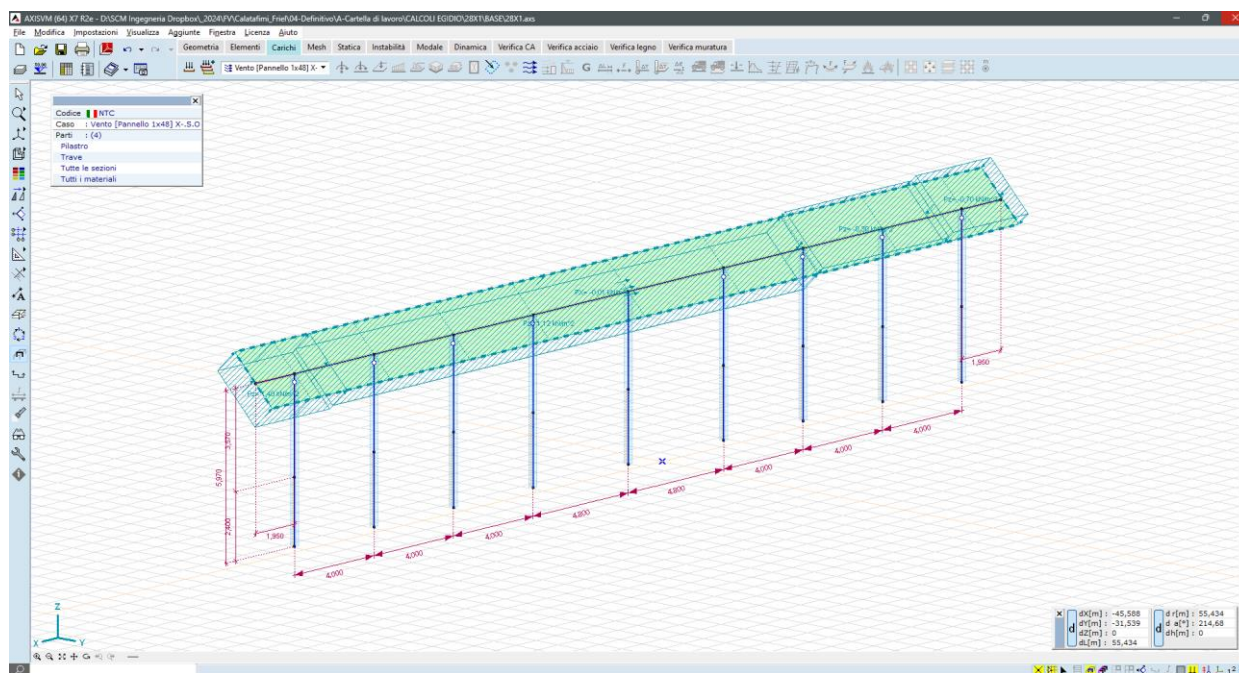


Figura 4.6\_carico vento X+S.O.

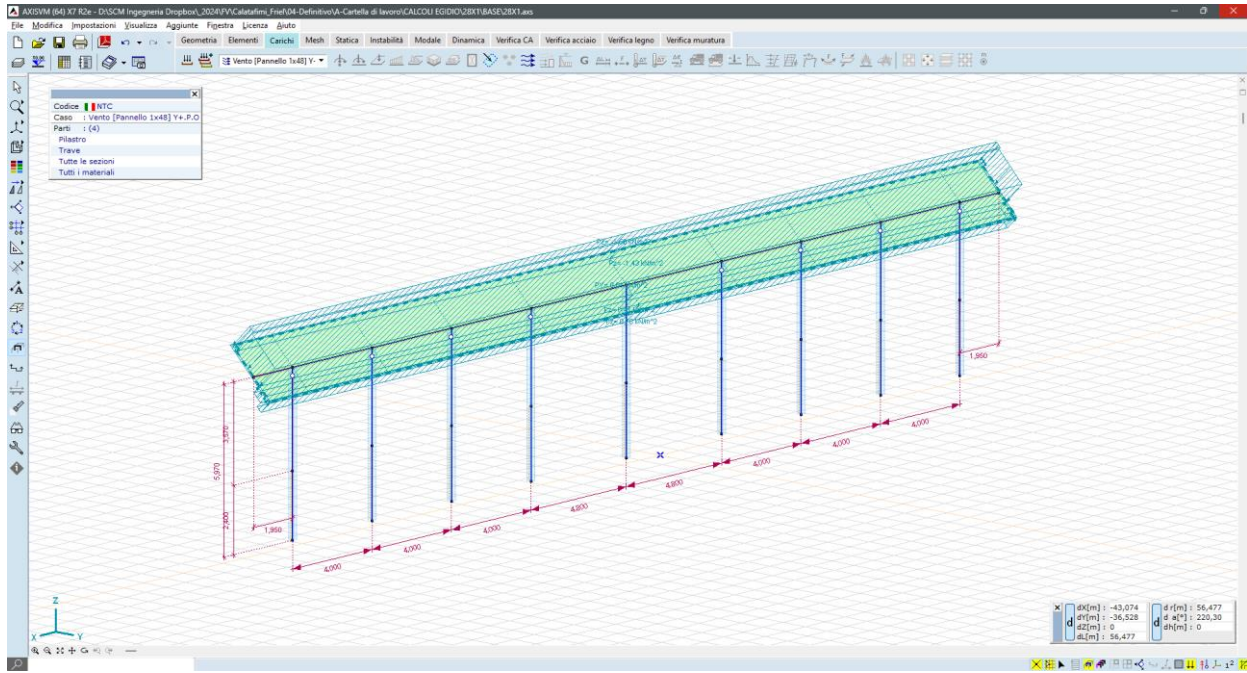


Figura 4.7\_carico vento Y+P.O.

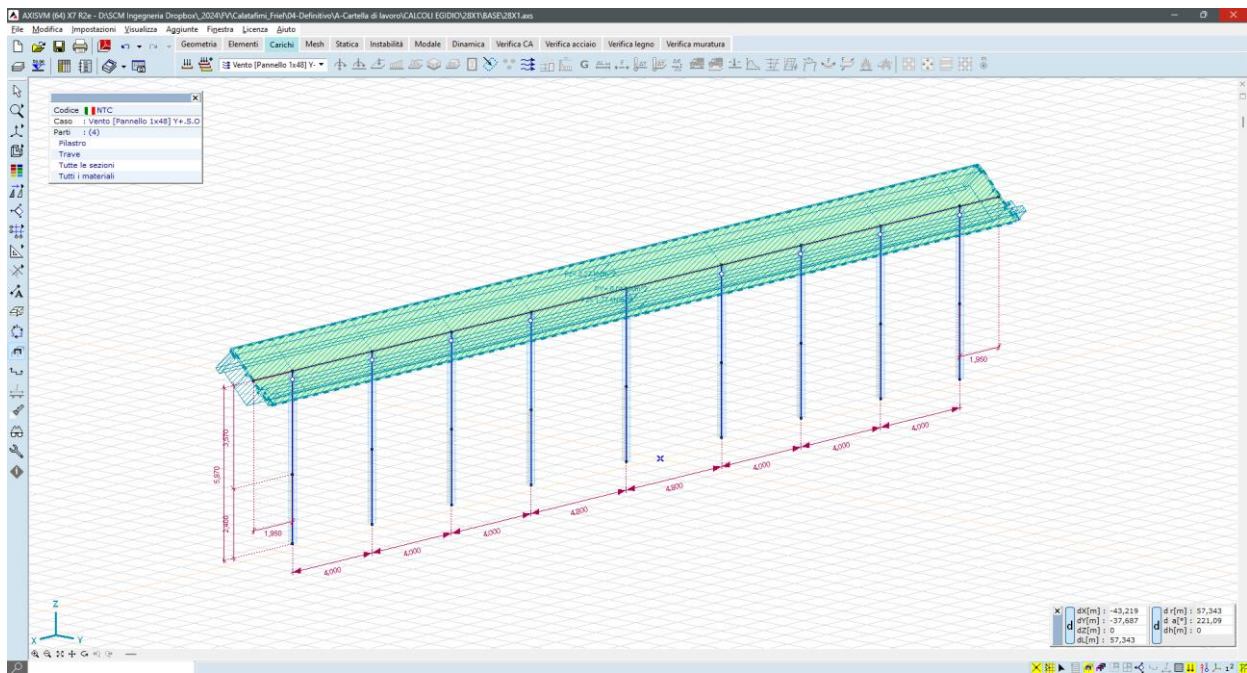


Figura 4.8\_carico vento Y+S.O.

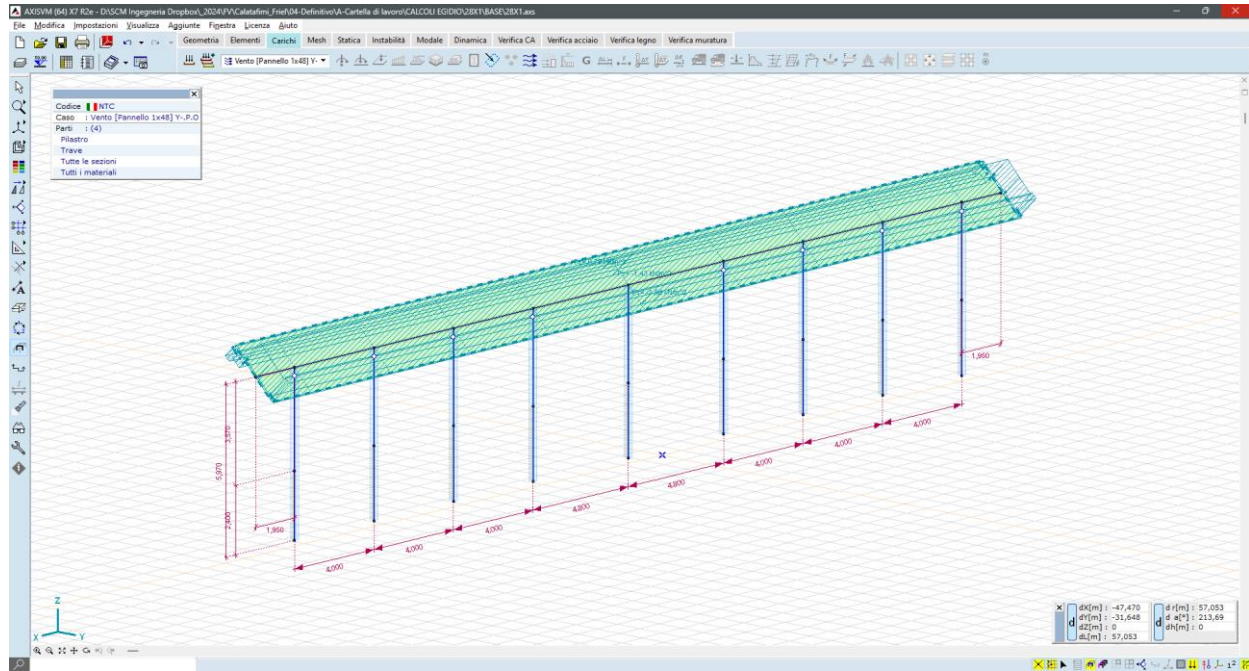


Figura 4.9\_carico vento Y+P.O.

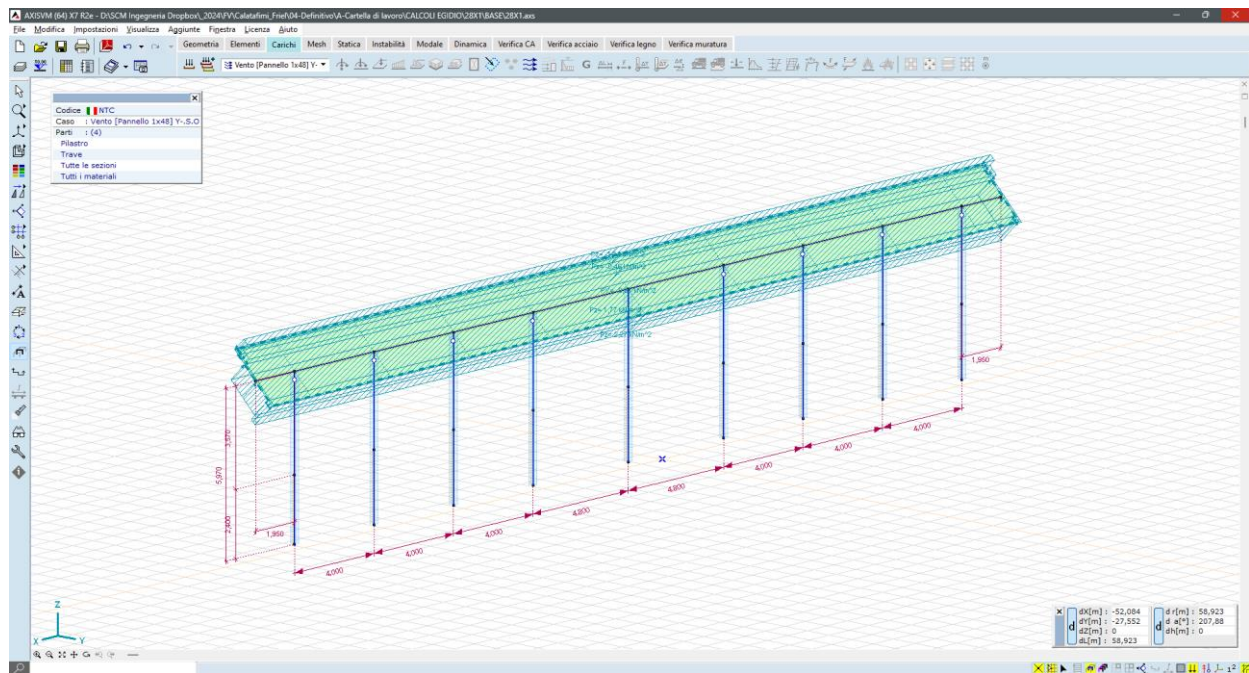


Figura 4.10\_carico vento Y+S.O.

**4.2.1. SPOSTAMENTI**

Le deformate nelle condizioni di carico più significative sono di seguito illustrate:

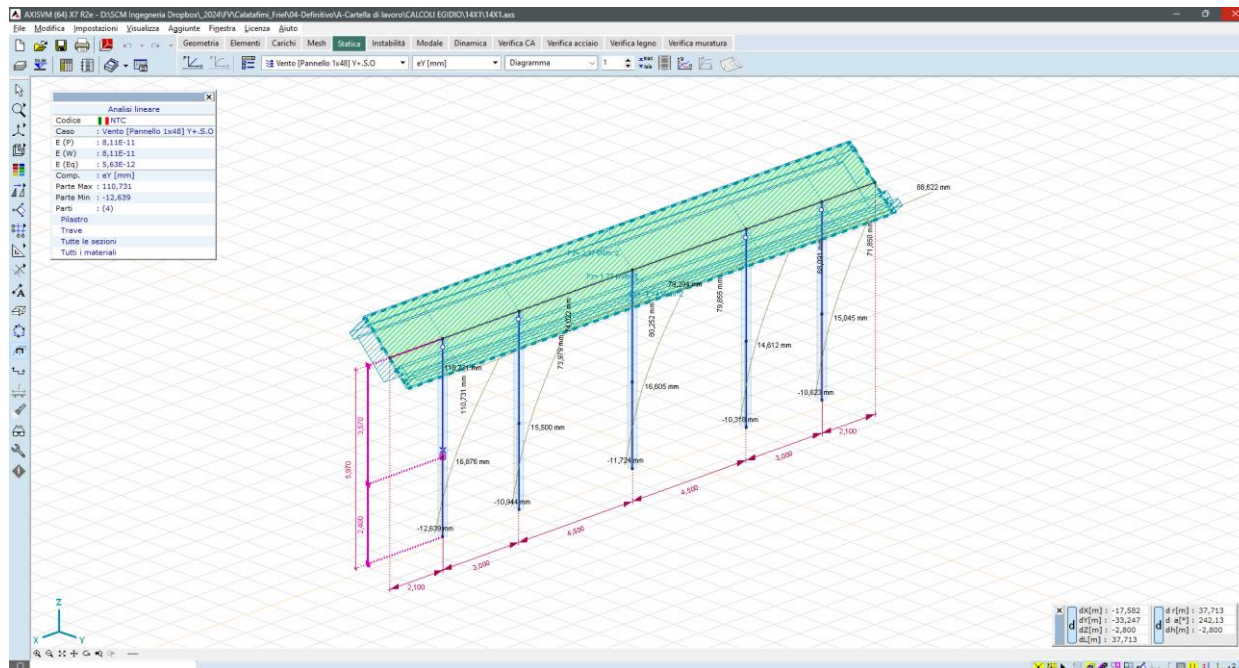


Figura 5.11\_Spostamenti attesi sotto carico vento – condizione Y+S.O. – 110,7 mm in testa e 12,6 mm al piano campagna

Analisi lineare	
Codice	NTC
Caso	Vento [Pannello 1x48] Y+S.O
E (P)	8,11E-11
E (W)	8,11E-11
E (Eq)	5,63E-12
Comp.	eY [mm]
Parte Max	110,731
Parte Min	-12,639
Parti	(4)
Pilastro	
Trave	
Tutte le sezioni	
Tutti i materiali	



### 4.3. RISULTATI NUMERICI

Vengono di seguito forniti i risultati del calcolo delle sollecitazioni e degli spostamenti, con particolare attenzione a quelli che sono gli spostamenti dei montanti verticali attesi sotto l'azione dei carichi vento.

#### 4.3.1. SPOSTAMENTI

Le deformate nelle condizioni di carico più significative sono di seguito illustrate:

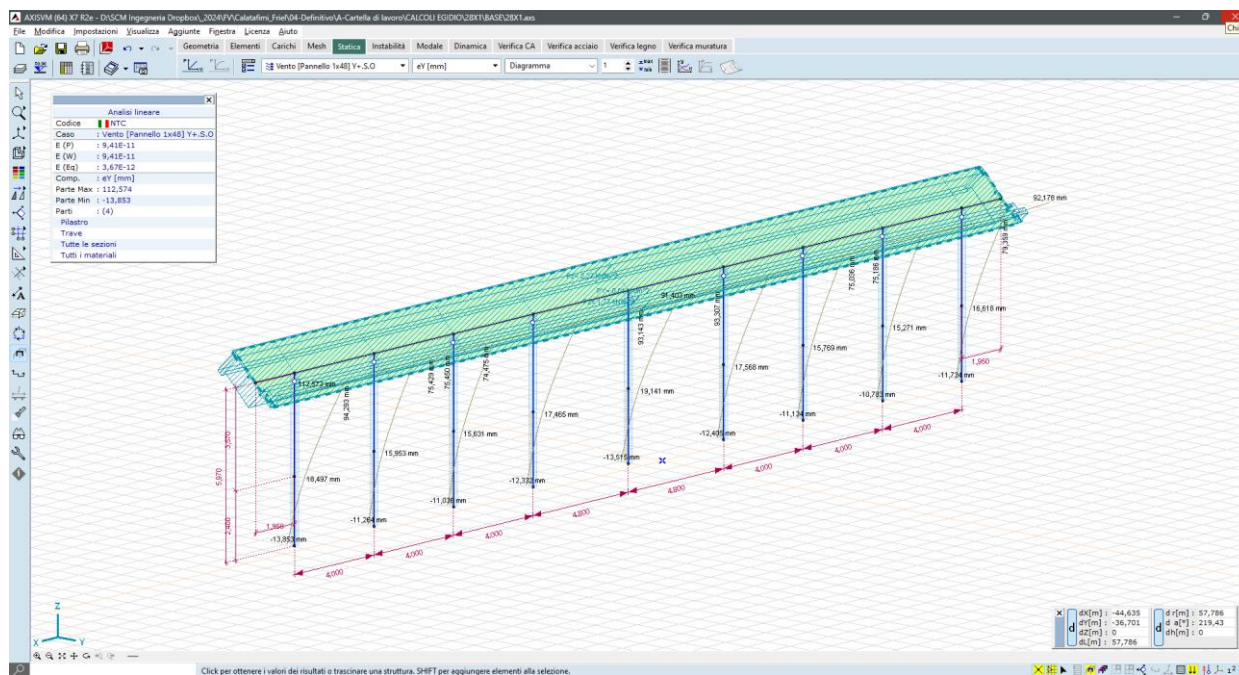


Figura 4.11\_Spostamenti attesi sotto carico vento – condizione Y+S.O. – 112,5 mm in testa e 13,85 mm al piano campagna

Analisi lineare	
Codice	NTC
Caso	Vento [Pannello 1x48] Y+S.O
E (P)	9,41E-11
E (W)	9,41E-11
E (Eq)	3,67E-12
Comp.	eY [mm]
Parte Max	112,574
Parte Min	-13,853
Parti	(4)
Pilastro	
Trave	
Tutte le sezioni	
Tutti i materiali	

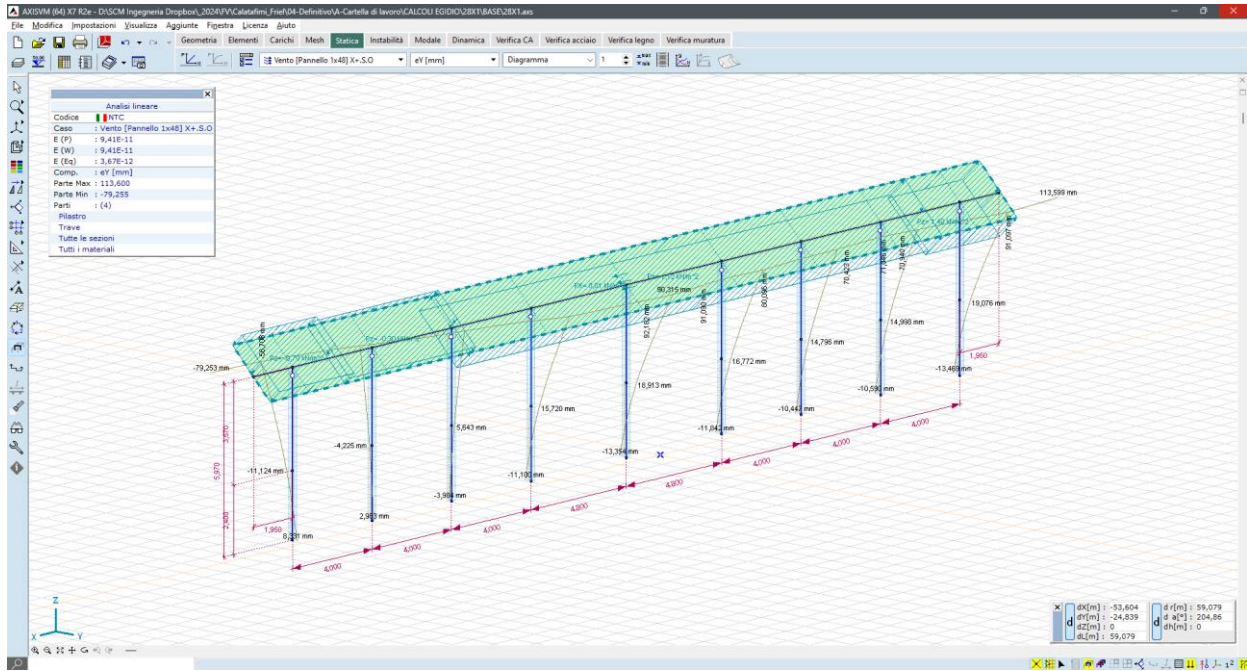


Figura 4.12\_Spostamenti attesi sotto carico vento – condizione X+S.O. – 113,6 mm in testa e 79,2 mm al piano campagna

Analisi lineare	
Codice	NTC
Caso	Vento [Pannello 1x48] X+S.O
E (P)	9,41E-11
E (W)	9,41E-11
E (Eq)	3,67E-12
Comp.	eY [mm]
Parte Max	113,600
Parte Min	-79,255
Parti	(4)
Pilastro	
Trave	
Tutte le sezioni	
Tutti i materiali	

Gli spostamenti orizzontali al mozzo, nella condizione di carico più gravosa, sono dell'ordine dei 113,6 mm, mentre quelli al piano campagna sono dell'ordine dei 79,2 mm; tali valori vengono ritenuti accettabili se paragonati a quelli delle installazioni osservabili sul territorio nazionale.

È raccomandato, nella fase di progettazione esecutiva, mettere in atto una campagna di test in sito – pull out test e test per carico laterale – in modo tale da confrontare le stime numeriche con i valori misurabili in campo.



**4.3.2. SOLLECITAZIONI**

Per quel riguarda i montanti verticali, le massime sollecitazioni sono:

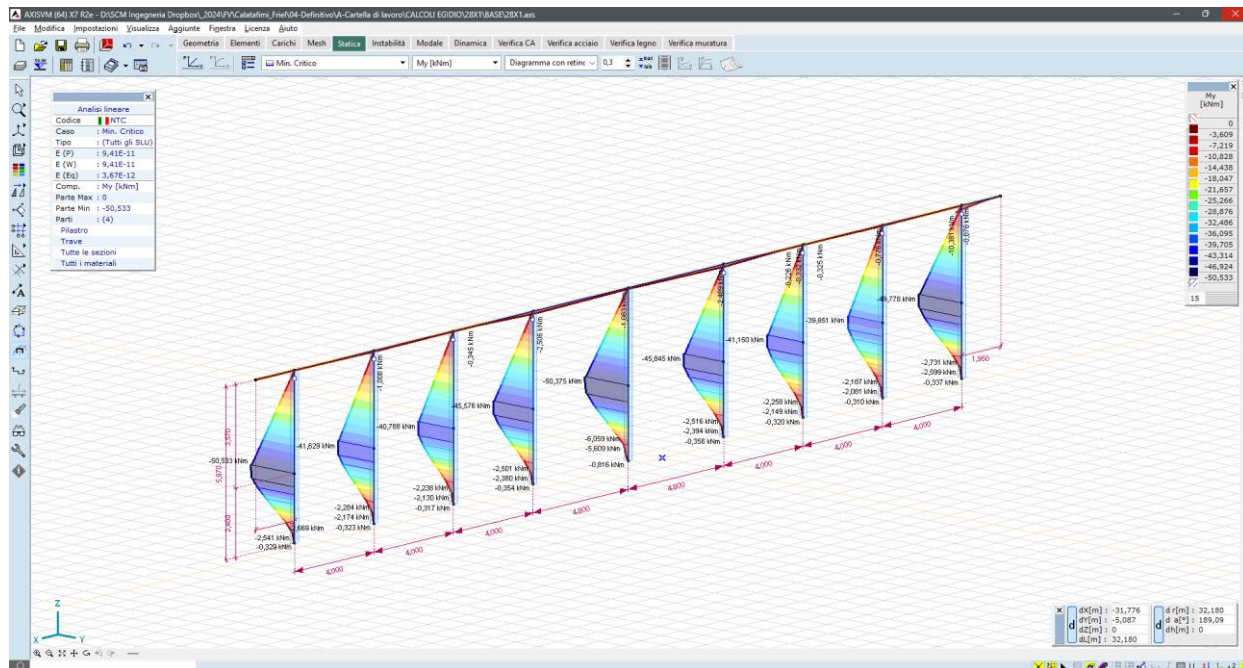


Figura 4.13\_Momento flettente My – montanti – valori massimi dell’ordine dei 50 kN\*m – combinazione min, Critico

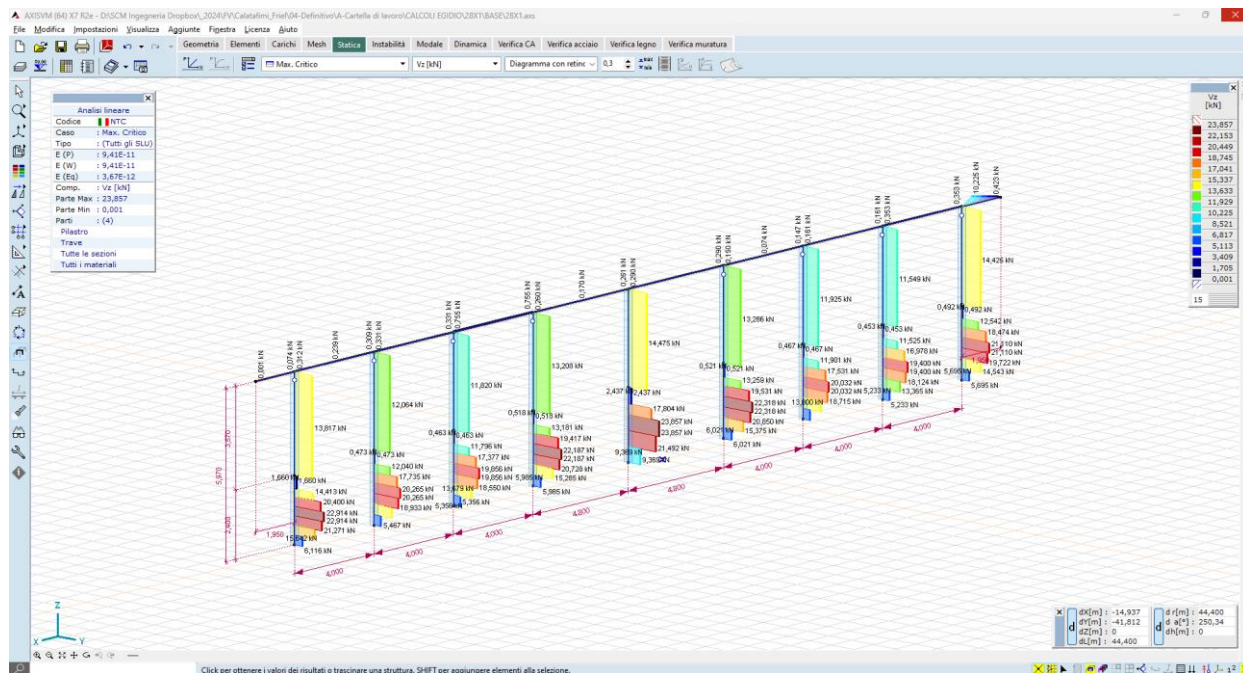


Figura 4.14\_Taglio Vz – montanti – valori massimi dell’ordine dei 24 kN\*m – combinazione max, Critico

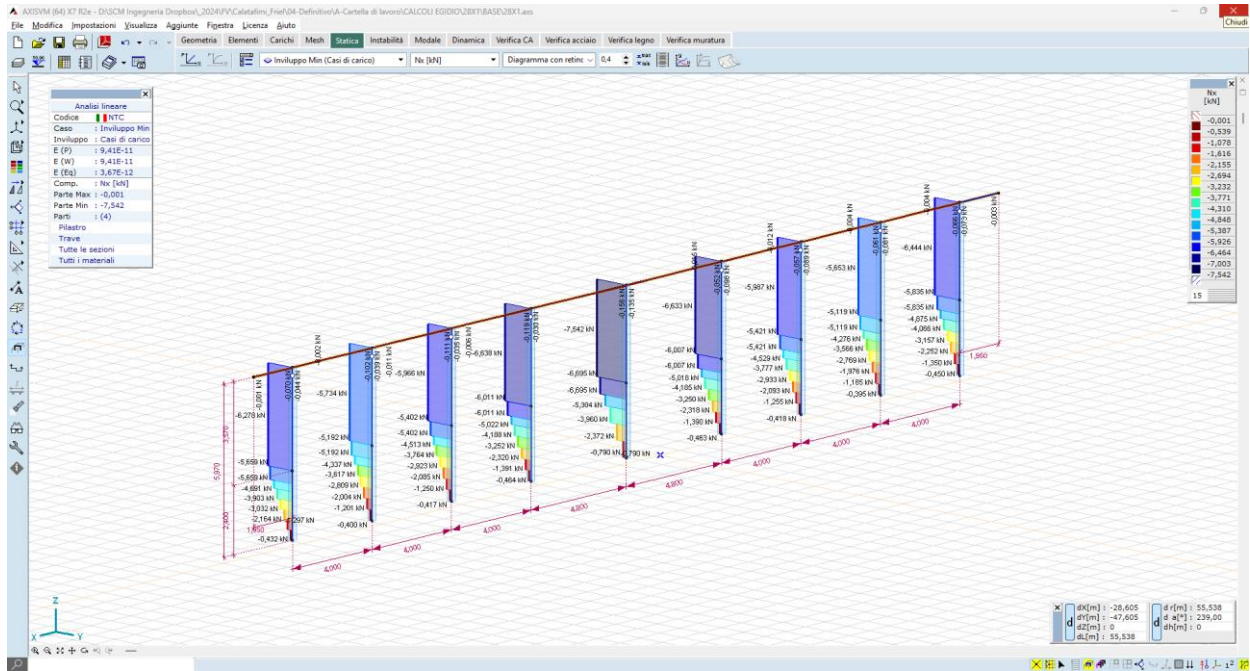


Figura 4.15\_Carico uplift Nx – montanti – valori massimi dell'ordine dei 7,5 kN\*m –Inviluppo Min (casi di carico)

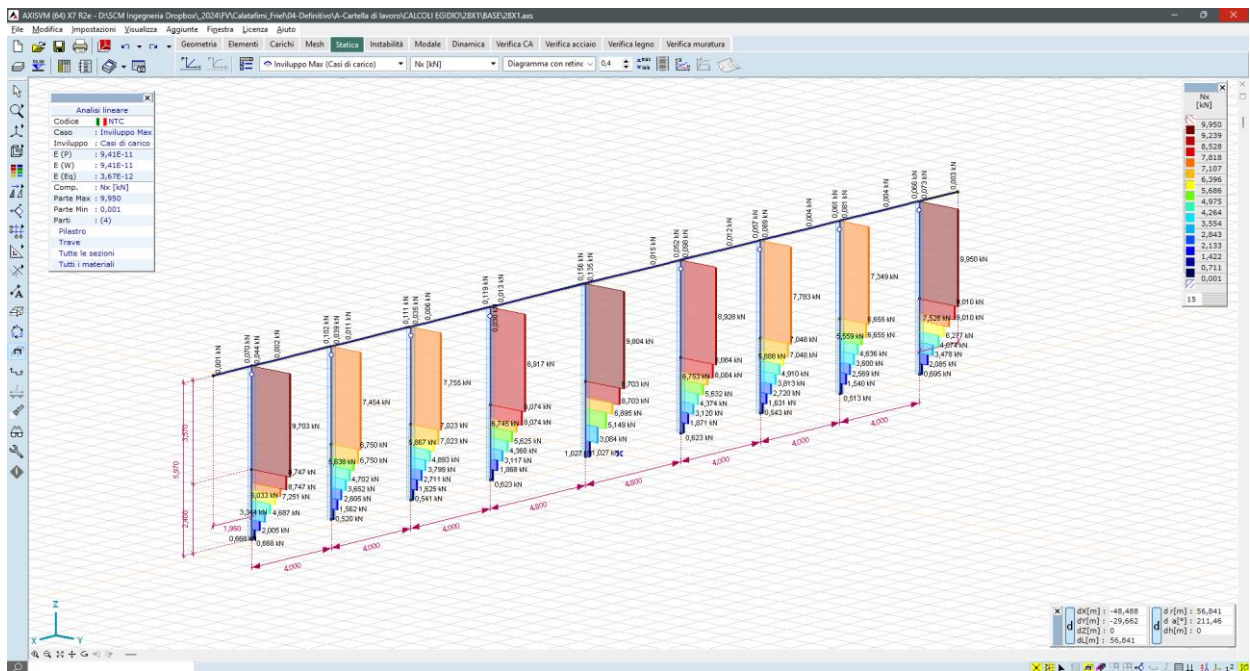


Figura 4.16\_Carico downforce Nx – montanti – valori massimi dell'ordine dei 9,95 kN\*m –Inviluppo Max (casi di carico)

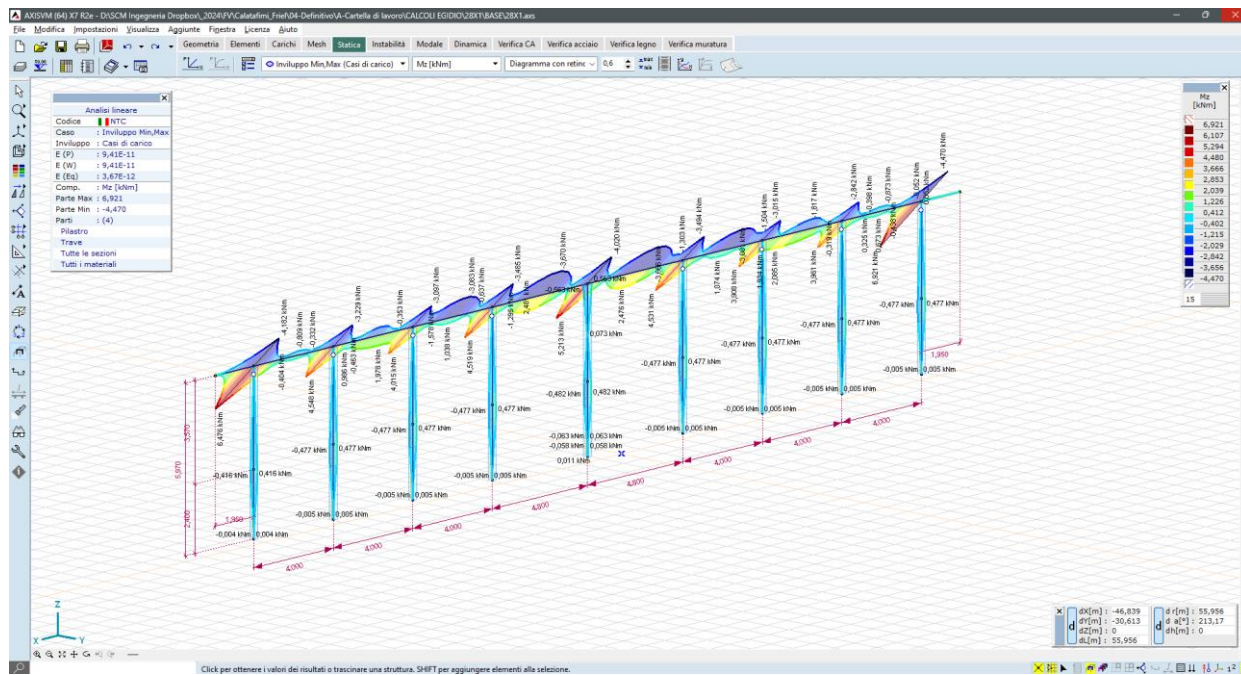


Figura 4.17\_Momento flettente Mz – asse di rotazione – valori massimi dell’ordine dei 6,92 kN\*m –Involuppo Min,Max (casi di carico)

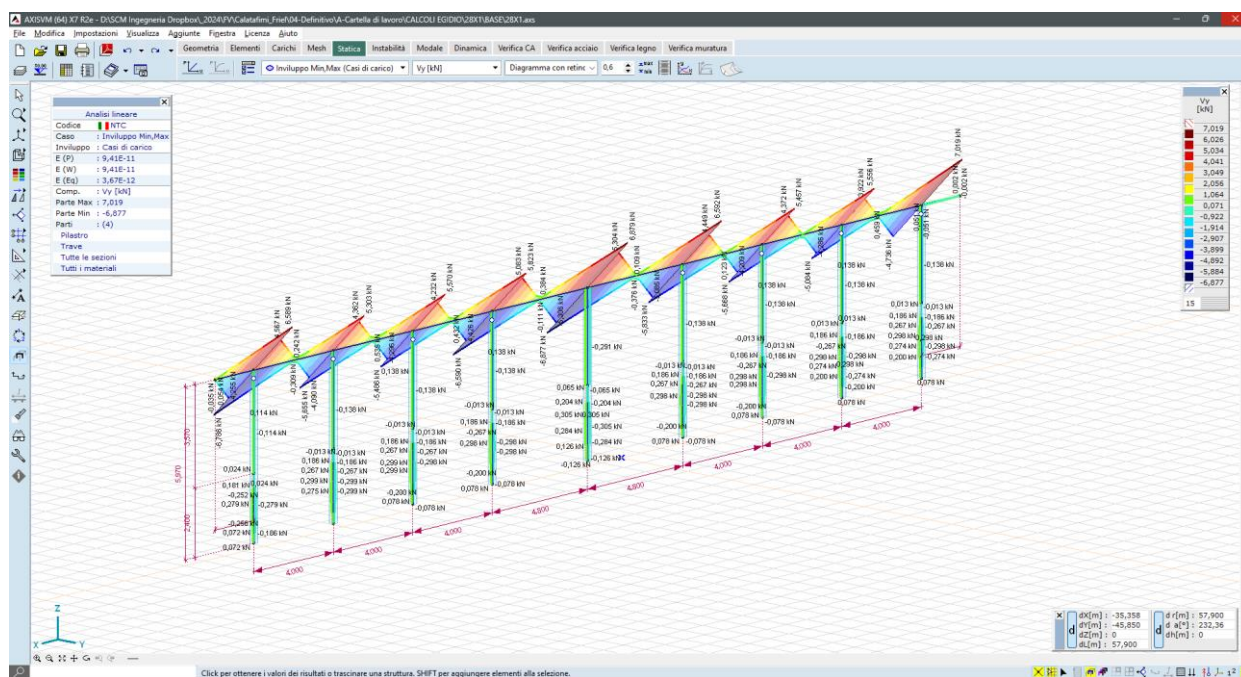


Figura 4.18\_Azione tagliante Vy – asse di rotazione – valori massimi dell’ordine dei 7 kN\*m – Involuppo Min,Max (casi di carico)

## 5. TRACKER MONOASSIALE 1P A 14 MODULI

### 5.1. GENERAZIONE DEL MODELLO

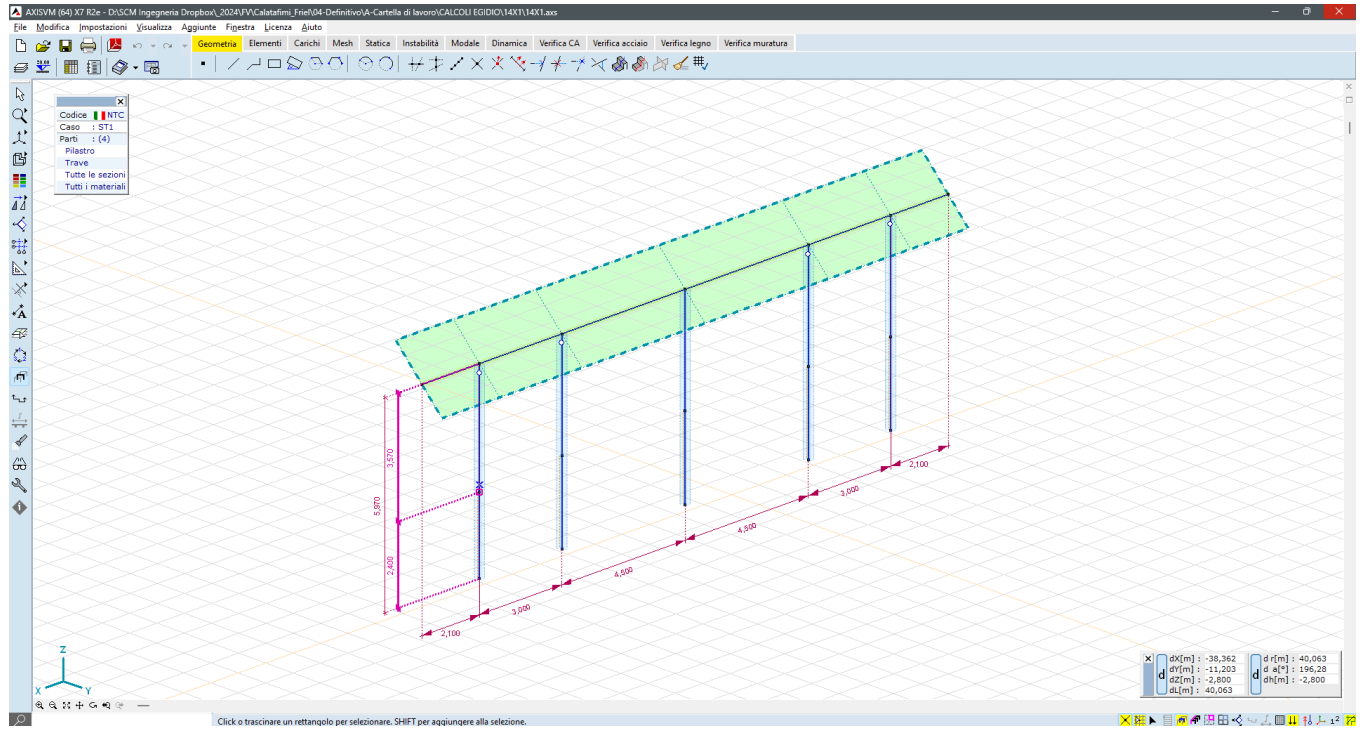


Figura 5.1\_modello a elementi finiti – vista ad aste

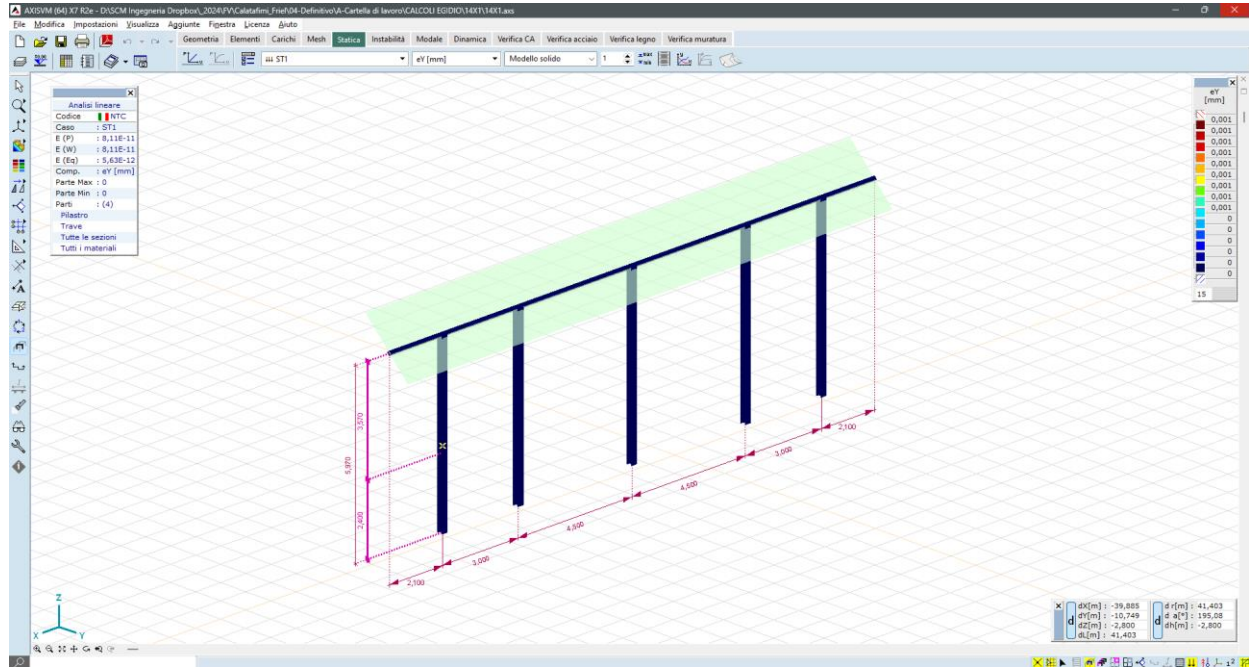


Figura 5.2\_modello a elementi finiti – vista render

**5.2. CASI DI CARICO**

Vengono generati n. 8 casi di carico vento, come di seguito illustrato:

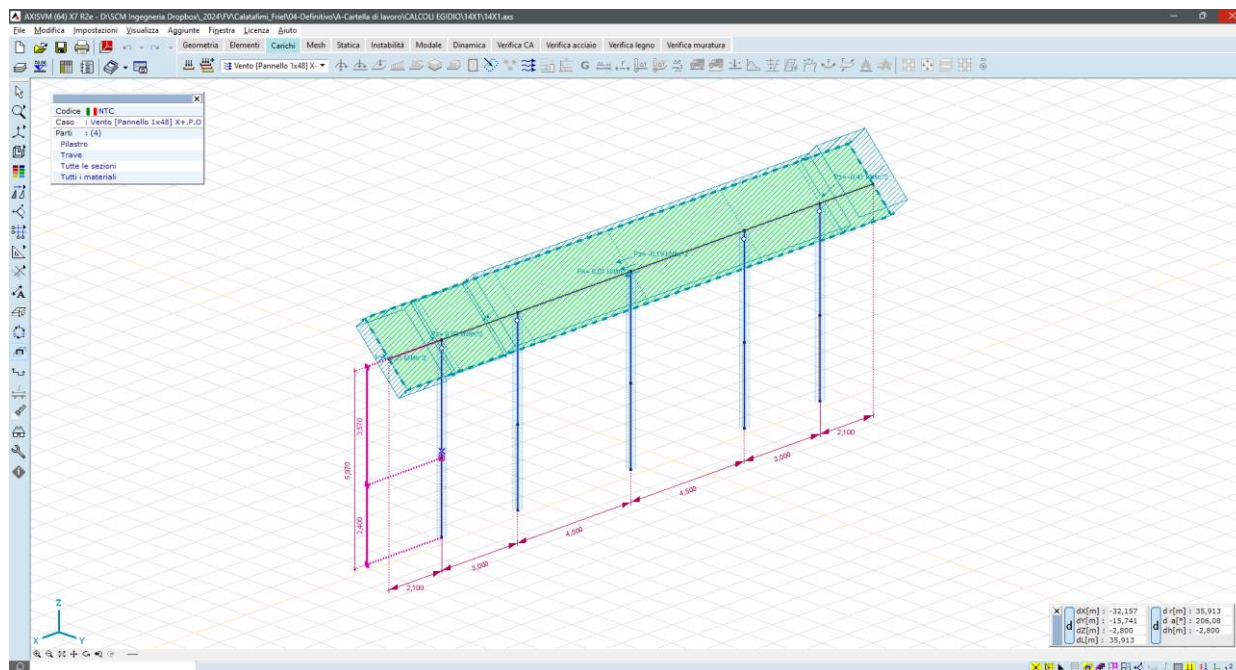


Figura 5.3\_carico vento X+P.O.

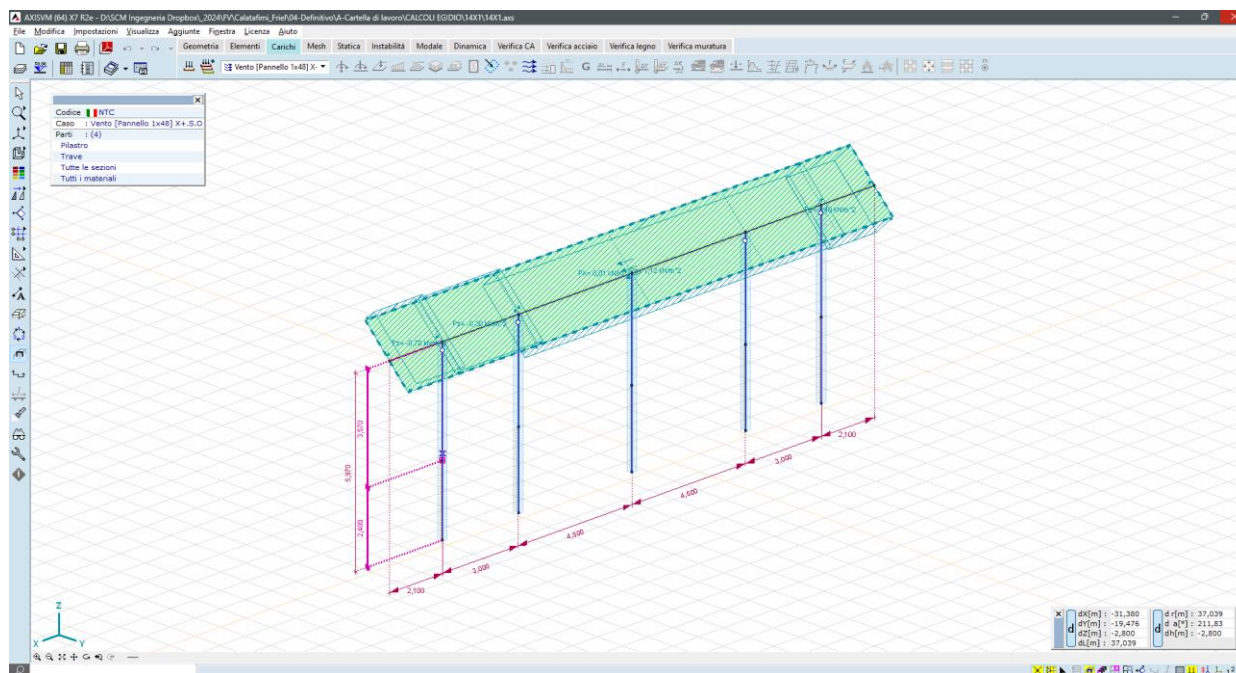


Figura 5.4\_carico vento X+S.O.

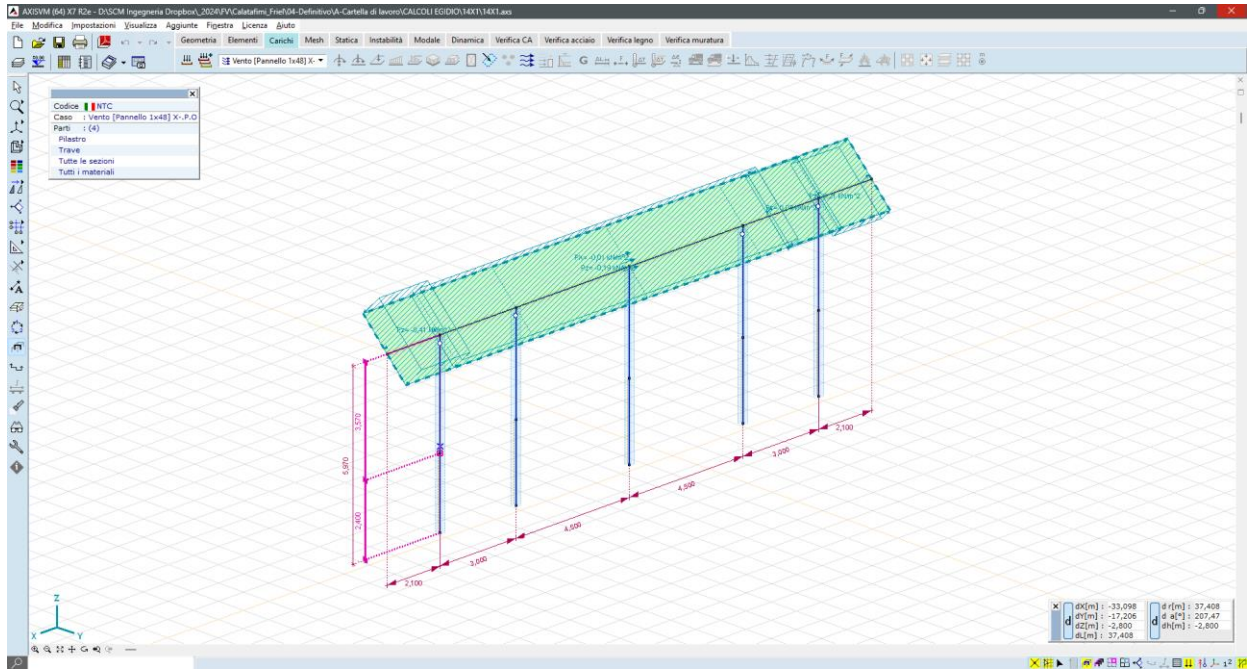


Figura 5.5\_carico vento X+P.O.

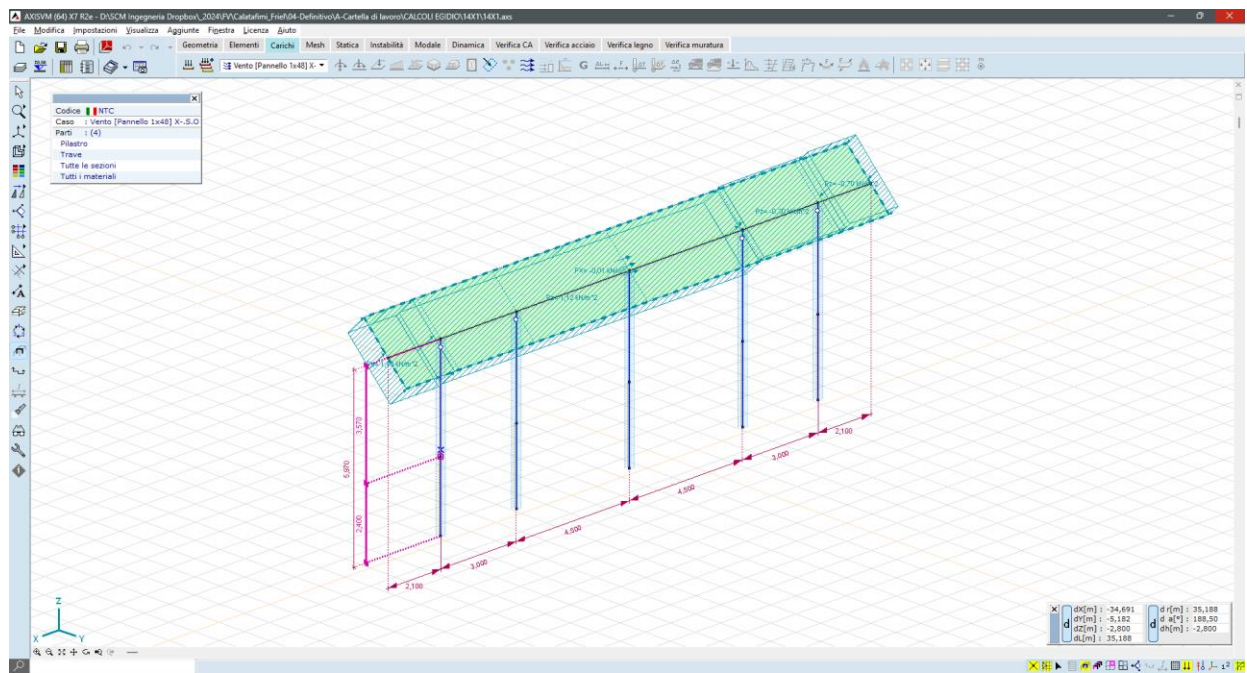


Figura 5.6\_carico vento X+S.O.

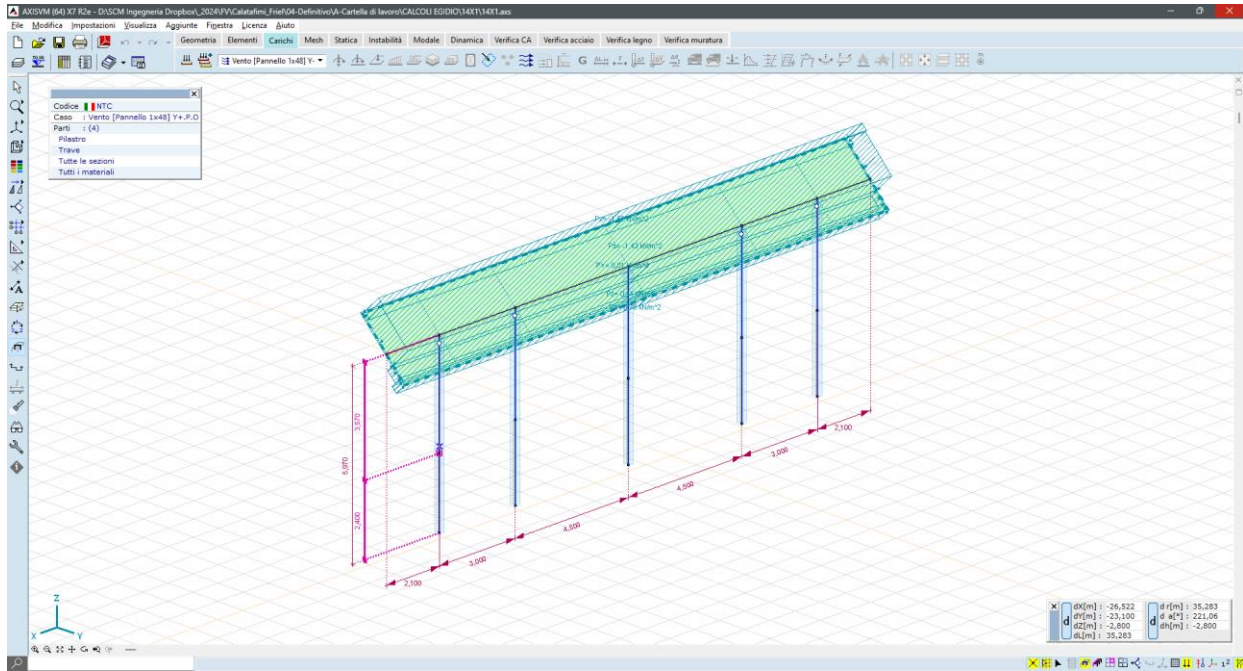


Figura 5.7\_carico vento Y+P.O.

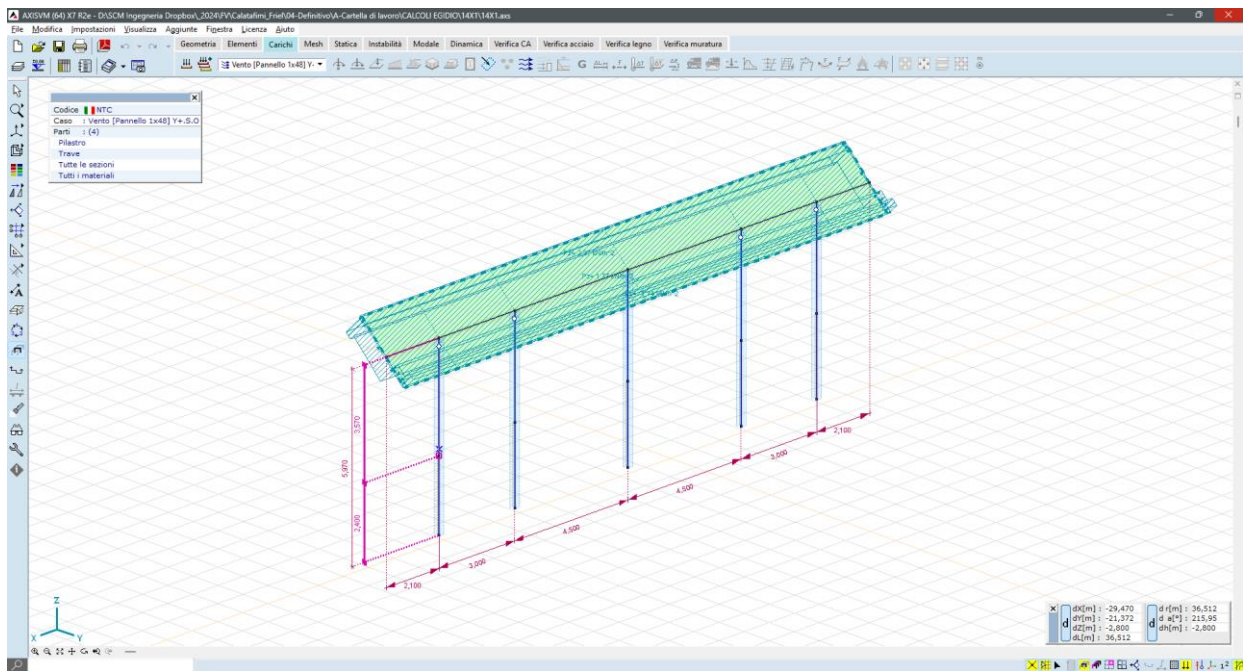


Figura 5.8\_carico vento Y+S.O.

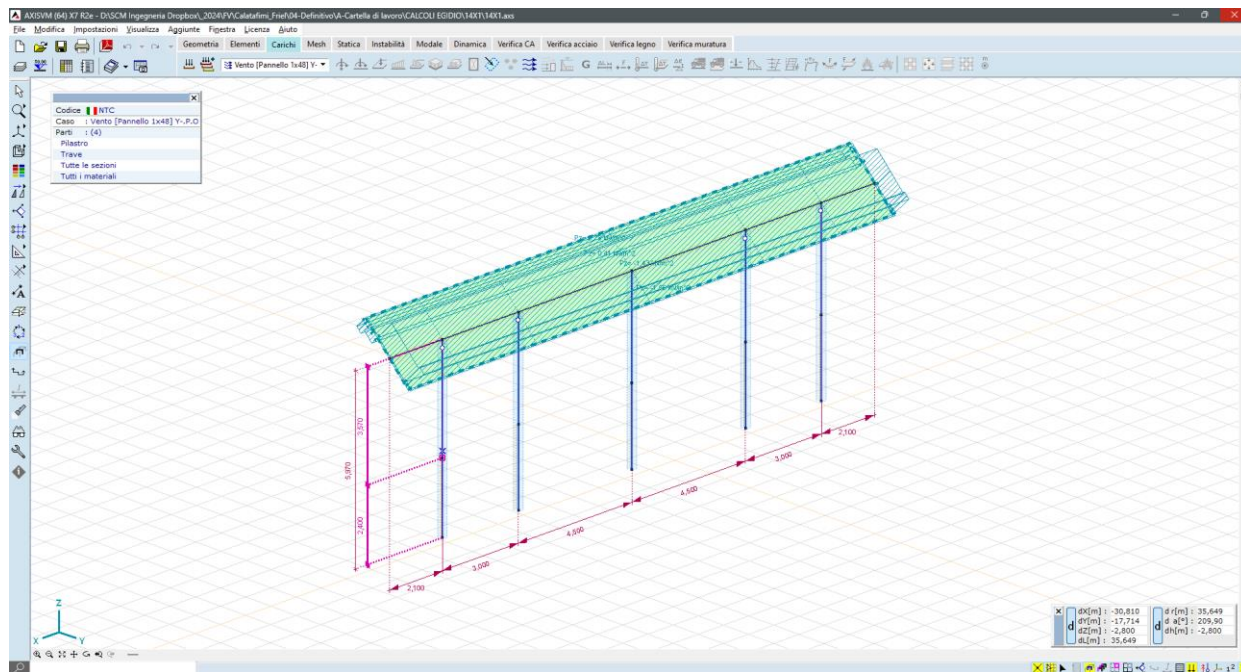


Figura 5.9\_carico vento Y+P.O.

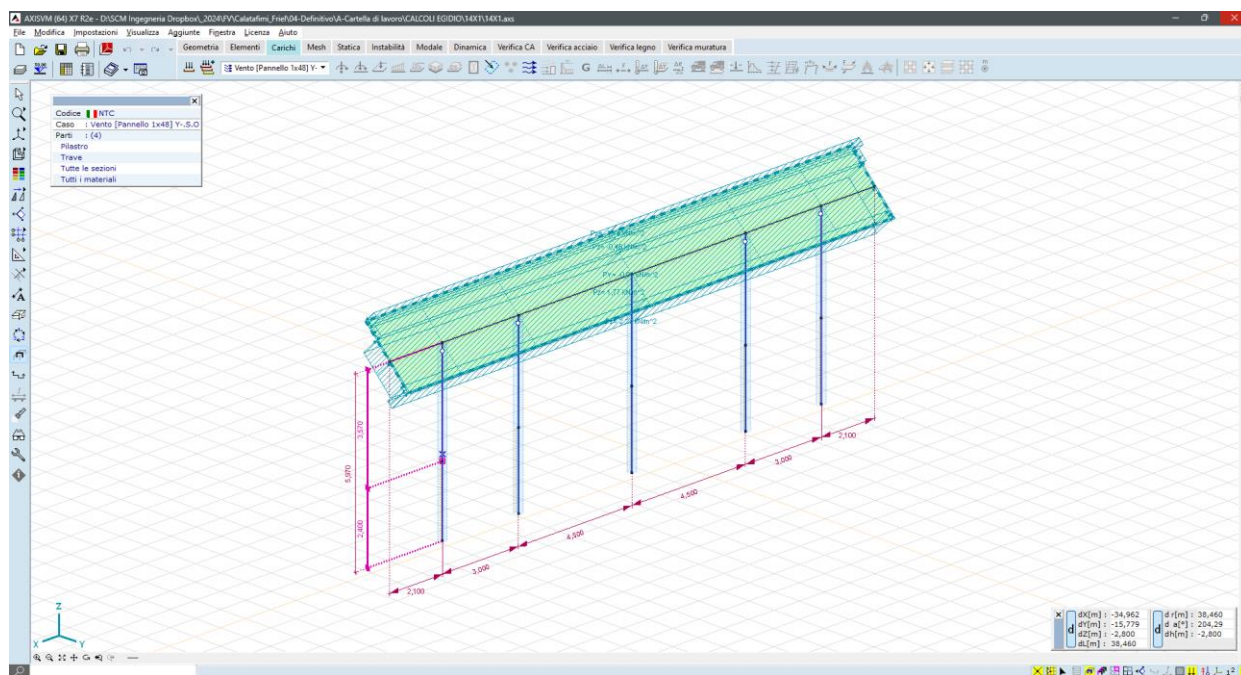


Figura 5.10\_carico vento Y+S.O.



### 5.3. RISULTATI NUMERICI

Vengono di seguito forniti i risultati del calcolo delle sollecitazioni e degli spostamenti, con particolare attenzione a quelli che sono gli spostamenti dei montanti verticali attesi sotto l'azione dei carichi vento.

#### 5.3.1. SOLLECITAZIONI

Per quel riguarda i montanti verticali, le massime sollecitazioni sono:

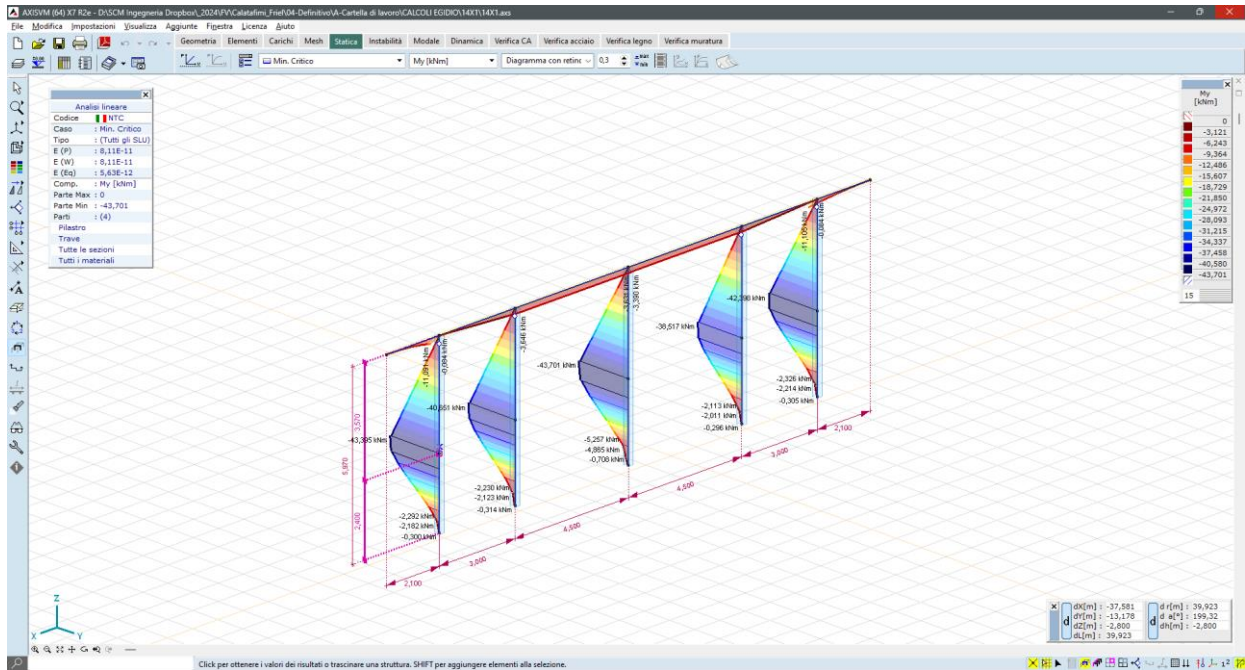


Figura 5.13\_Momento flettente My – montanti – valori massimi dell'ordine dei 43 kN\*m – combinazione min, Critico

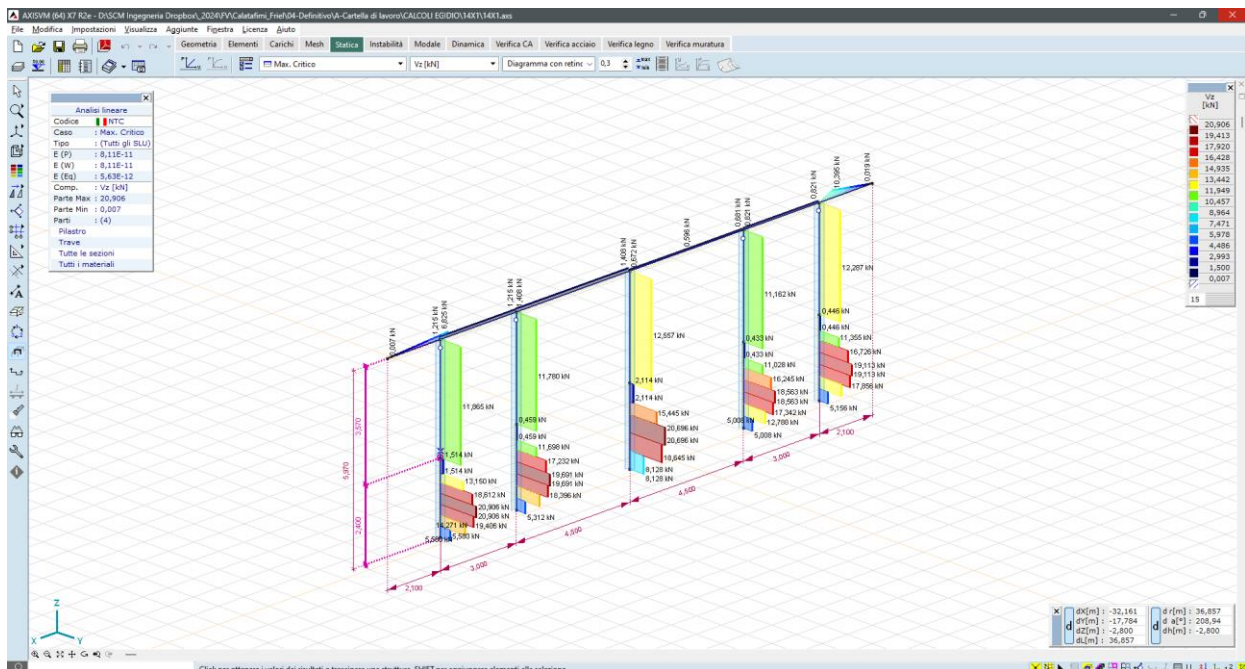


Figura 5.14\_Ttaglio Vz – montanti – valori massimi dell'ordine dei 20,9 kN\*m – combinazione max, Critico

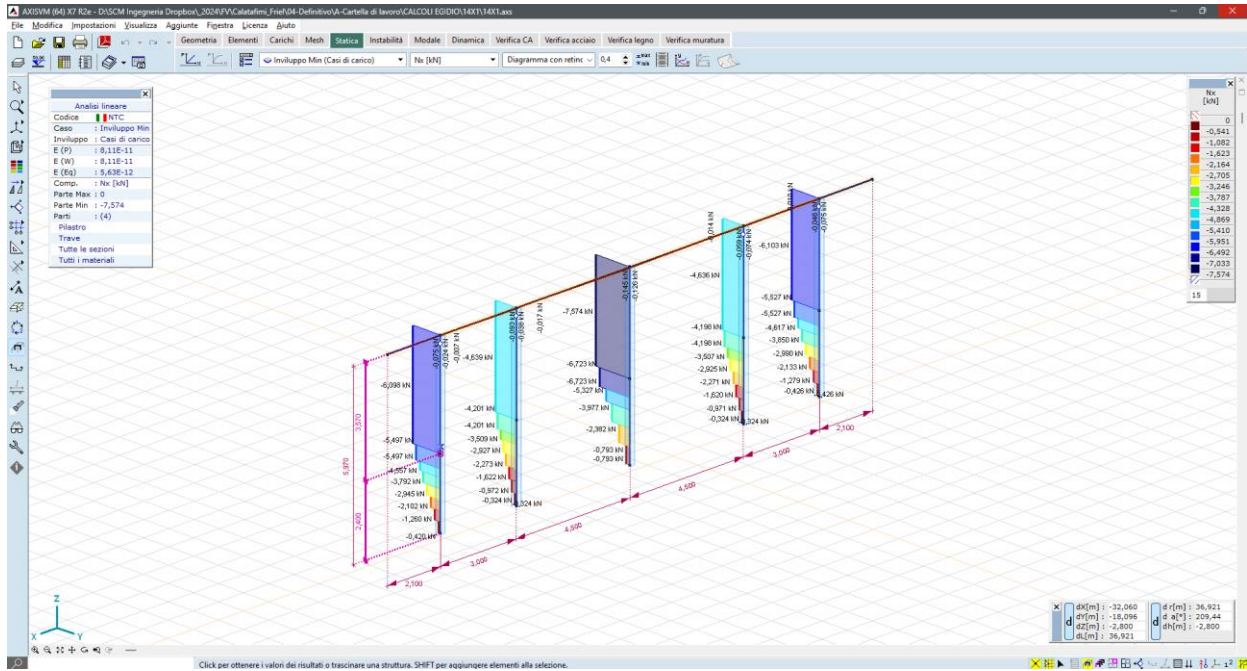


Figura 5.15\_Carico uplift Nx – montanti – valori massimi dell’ordine dei 7,5 kN\*m –Inviluppo Min (casi di carico)

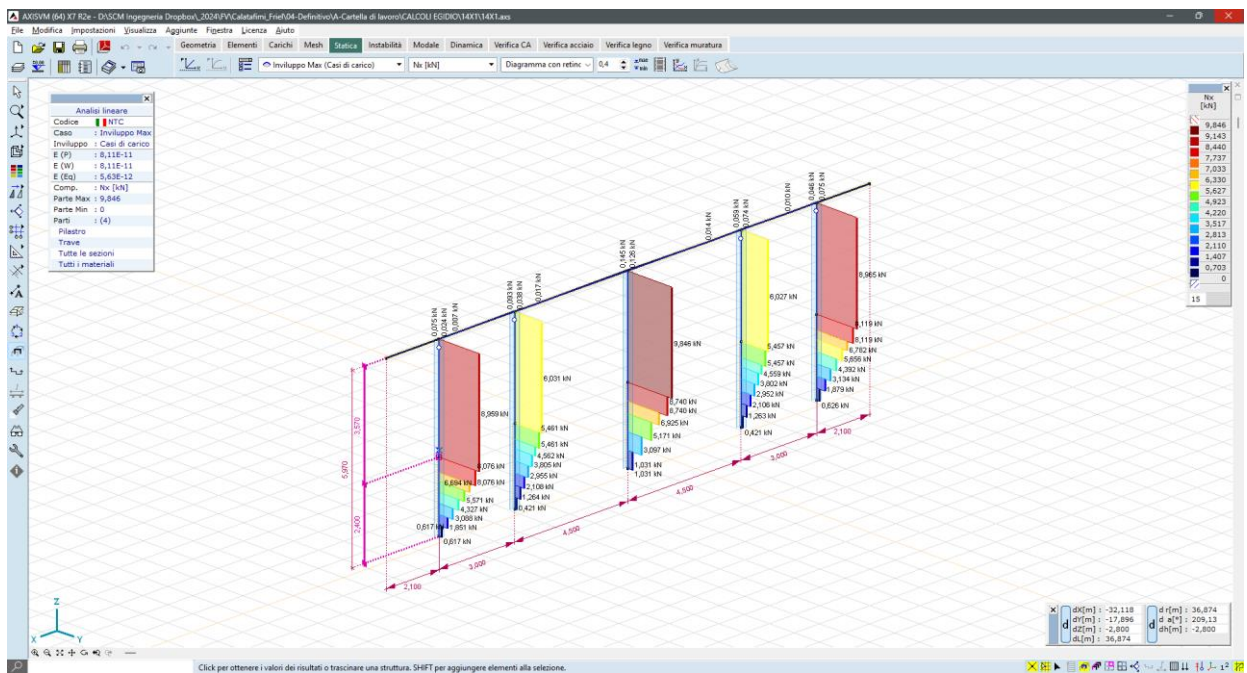


Figura 5.16\_Carico downforce Nx – montanti – valori massimi dell’ordine dei 9,8 kN\*m –Inviluppo Max (casi di carico)

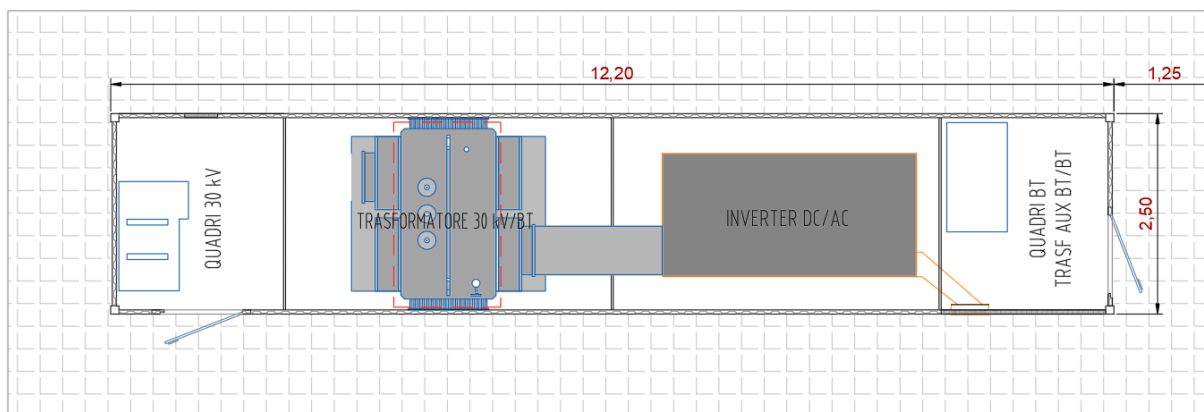


## 6. FONDAZIONI CABINE PREFABBRICATE POWER STATION

### 6.1. DESCRIZIONE GENERALE DELL'OPERA

Le cabine di conversione Inverter (Power Station) proposte sono della tipologia modulare, cabine preassemblate all'interno delle quali vengono alloggiati un inverter e un trasformatore elevatore, inclusivi di compartimenti MT e BT.

Saranno installate 22 cabine Inverter di conversione DC/AC, Power Station, dalle dimensioni in pianta di circa 12,2x2,5mt.



Nel caso in oggetto, si vuole tenere la quota del piano finito del container al di sopra del p.c. circostante, per tal motivo l'ipotesi di progetto è una fondazione del tipo platea nervata in c.a. il cui piano di imposta coincide con il p.c. stesso.

Al fine di raggiungere un substrato geologico idoneo, tuttavia, si dovrà prevedere la bonifica di un volume di terreno fino alla profondità di circa -0,80 cm da p.c., in modo tale da attestare i carichi al suolo al di sotto della coltre di terreno vegetale.

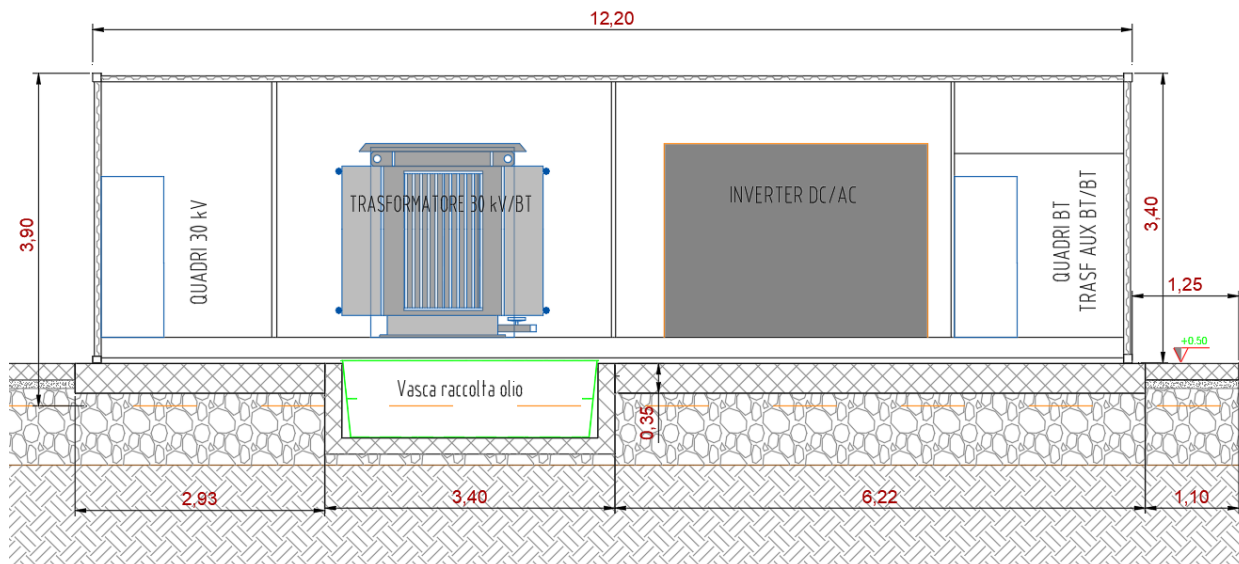


Figura 6.1 – Layout tipico Cabina di Conversione

## 6.2. DESCRIZIONE DEL MODELLO

Le strutture fondali sono modellate per mezzo di una platea nervata, dello spessore di 25 cm, con nervature di sezione 50x96. L'ingombro in pianta è di 12 x 2,5 mt.

Il modello utilizzato per l'analisi ad elementi finiti è del tipo a platea 2D su suolo elastico alla Winkler, con nervature estradossate rispetto al piano di imposta.

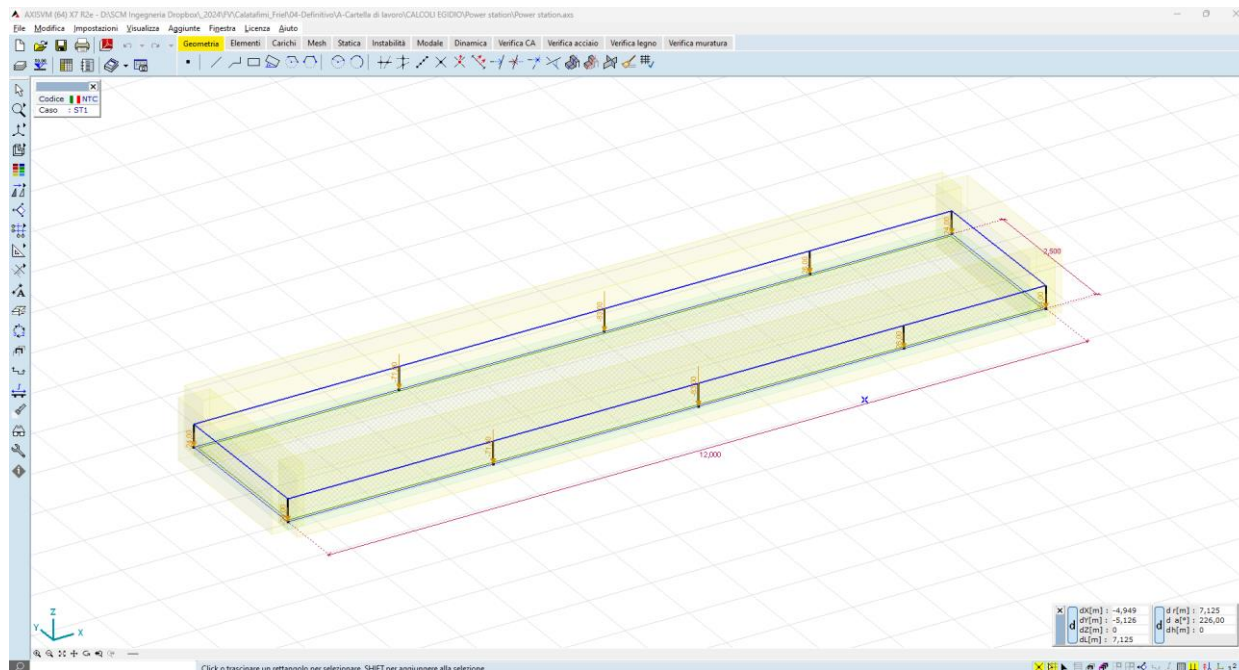


Figura 6.2 – Fondazione Power station – Vista 3D

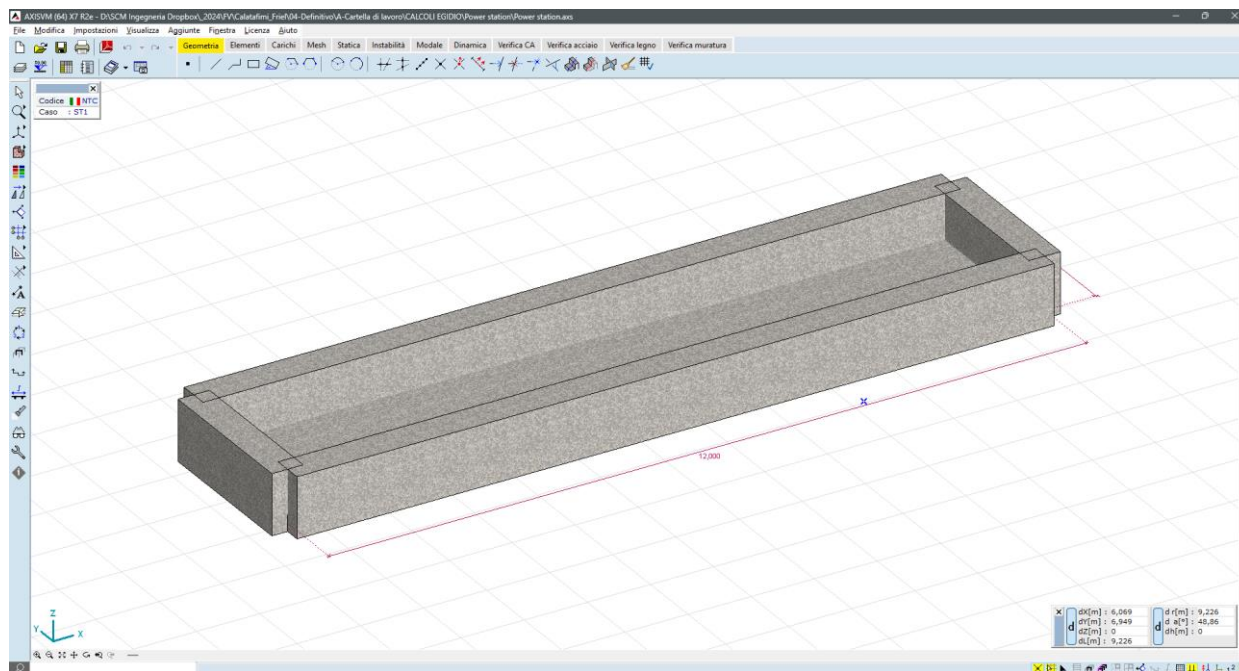


Figura 6.2 – Fondazione Power station – Vista render

Il vincolo al suolo è costituito da un letto di molle alla Winkler, avente:

- $K_{\text{orizz}} = 2500 \text{ kN/m}^2$  (valore basso, in assenza di ammortamento laterale);
- $K_{\text{vert}} = 10000 \text{ kN/m}^2$  (valore tipico di un sottofondo in materiale inerte rullato e compattato);

I carichi provenienti dal container vengono modellati come carichi nodali applicati nei punti di scarico.

### 6.3. MATERIALI STRUTTURALI

La platea di fondazione è in c.a. gettato in opera; le caratteristiche dei materiali sono le seguenti:

#### CALCESTRUZZO

Classe di resistenza	C25/30
Resistenza caratteristica $f_{ck}$	25 N/mm <sup>2</sup>
Modulo elastico	31.475 N/mm <sup>2</sup>
Coeff Poisson	0,2
Diam max inerti	32 mm
Slump	S4

#### ACCIAI DA ARMATURA

Acciaio tipo	B450C
Resistenza elastica $f_{yd}$	391 N/mm <sup>2</sup>
Modulo elastico	206.000 N/mm <sup>2</sup>
Limite di deformazione elast	0.198%
Limite di deformazione ultima $\epsilon_{su}$	6.750%

### 6.4. AZIONI DI PROGETTO

I carichi sulle strutture fondali sono determinati dal peso proprio del container, comprensivo delle apparecchiature elettromeccaniche in esso installate.

I pesi delle apparecchiature e dei manufatti metallici vengono fornite dal produttore; in questa fase di progetto vengono riportati alcuni valori di pesi standard\_

Trasformatore	15,0 tonn
Inverter	3,0 tonn
Quadri BT + interruttori	1.2 tonn
Quadri 30 kV	1.2 tonn
Peso proprio container	10,0 tonn

Per un totale lordo di 30,4 tonn. Il peso lordo del manufatto ITS viene amplificato, a vantaggio di sicurezza, di un fattore di 1.5, pertanto vale:  $P = 30,4 \times 1,5 = 45,6 \text{ tonn}$  [456 kN].

Il peso come sopra calcolato, viene ripartito sui n.10 appoggi, come di seguito:

Nodo	Direzione	$F_x$ [kN]	$F_y$ [kN]	$F_z$ [kN]	$M_x$ [kNm]	$M_y$ [kNm]	$M_z$ [kNm]
1	Globale	0	0	-24,00	0	0	0
2	Globale	0	0	-24,00	0	0	0
3	Globale	0	0	-24,00	0	0	0
4	Globale	0	0	-24,00	0	0	0
5	Globale	0	0	-83,00	0	0	0
6	Globale	0	0	-83,00	0	0	0
7	Globale	0	0	-71,00	0	0	0
8	Globale	0	0	-71,00	0	0	0
9	Globale	0	0	-26,00	0	0	0
10	Globale	0	0	-26,00	0	0	0

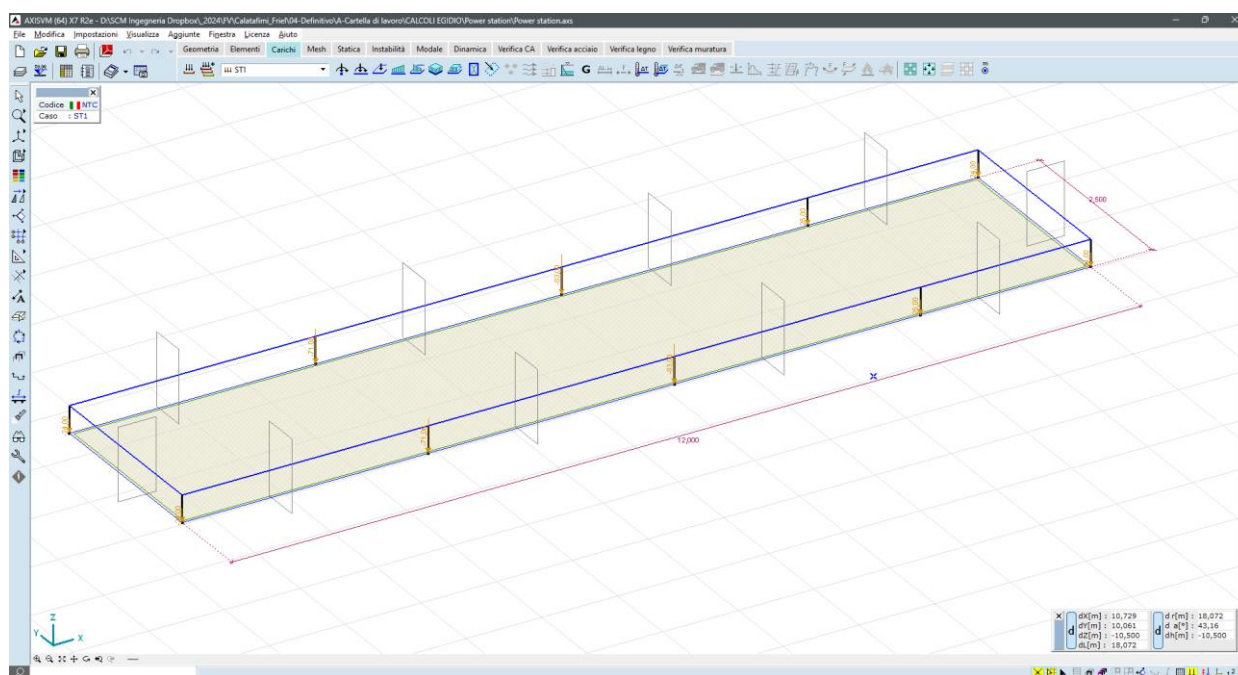


Figura 6.3 – Carichi concentrati nodali – scarichi al piede

### 6.5. RISULTATI DELLE ANALISI

La struttura, modellata con le ipotesi sopra descritte, viene risolta, in termini di sollecitazioni e spostamenti, per mezzo del risolutore ad elementi finiti:

AXIS VM release 7

Licenza n. 9145

Rilasciata a SCM Ingegneria srl

Rilasciata da STA DATA srl di Torino

I risultati finali delle analisi, termini di sollecitazioni e deformazioni, sono illustrati nelle immagini seguenti:

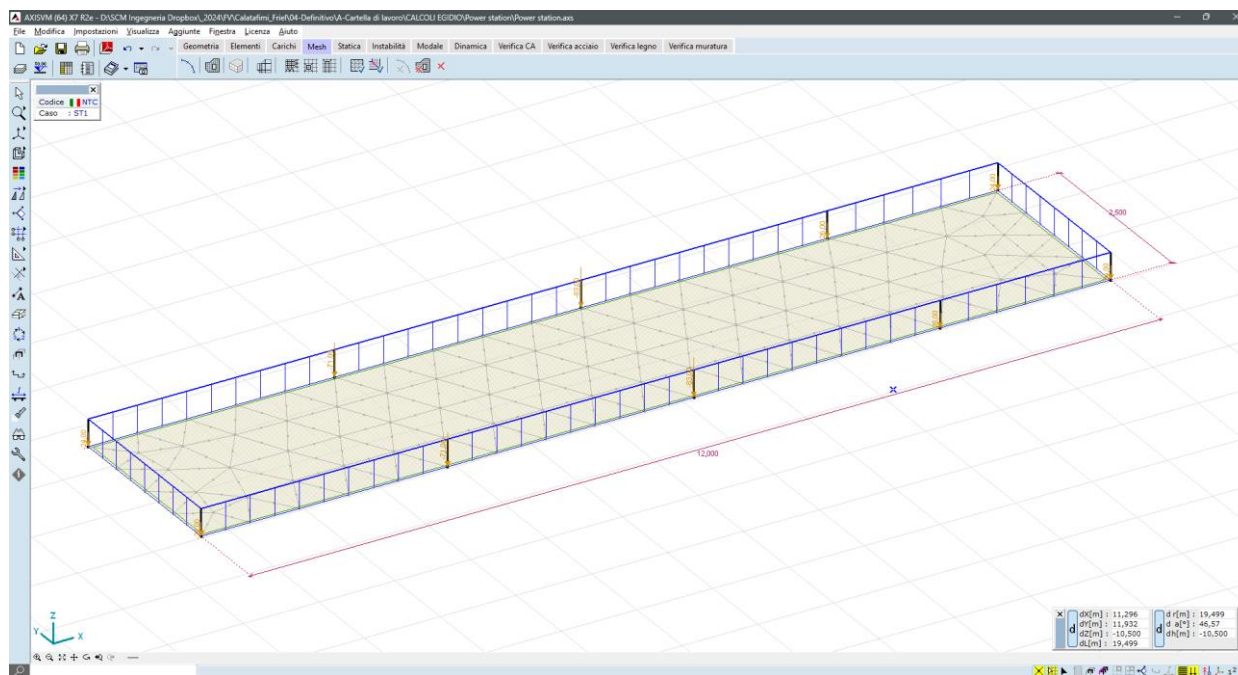


Figura 6.4 – Generazione della mesh



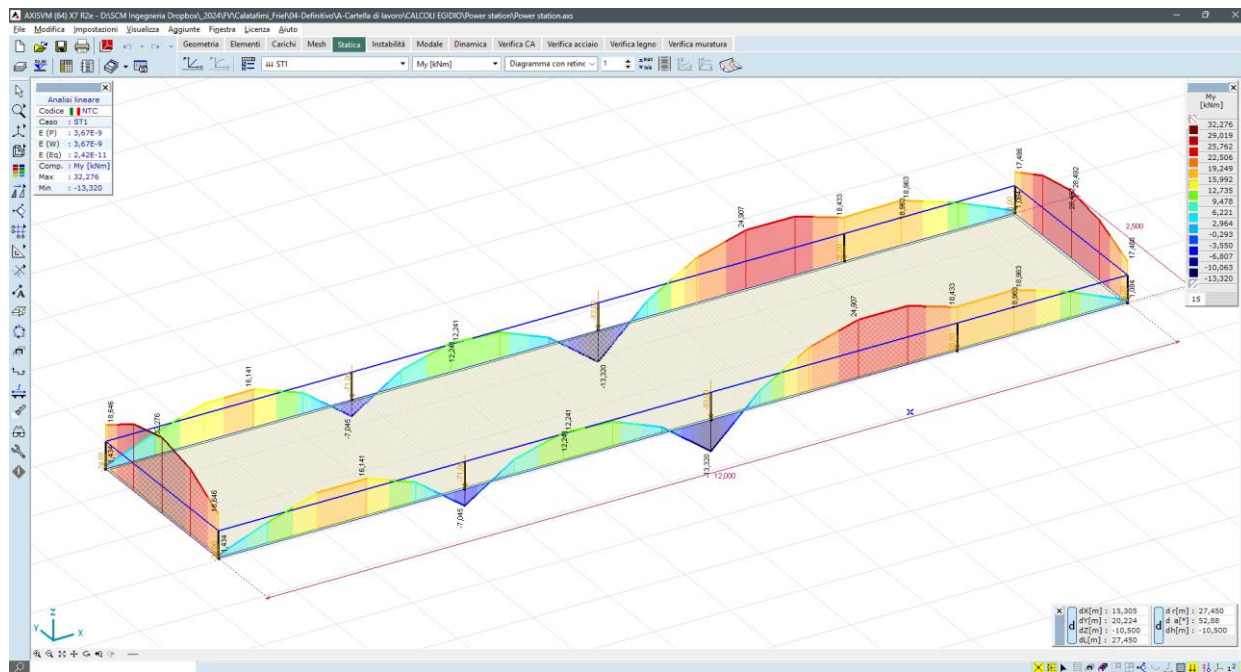


Figura 6.5 – Sollecitazioni Nervature – My – valori max 32,7 kN\*m

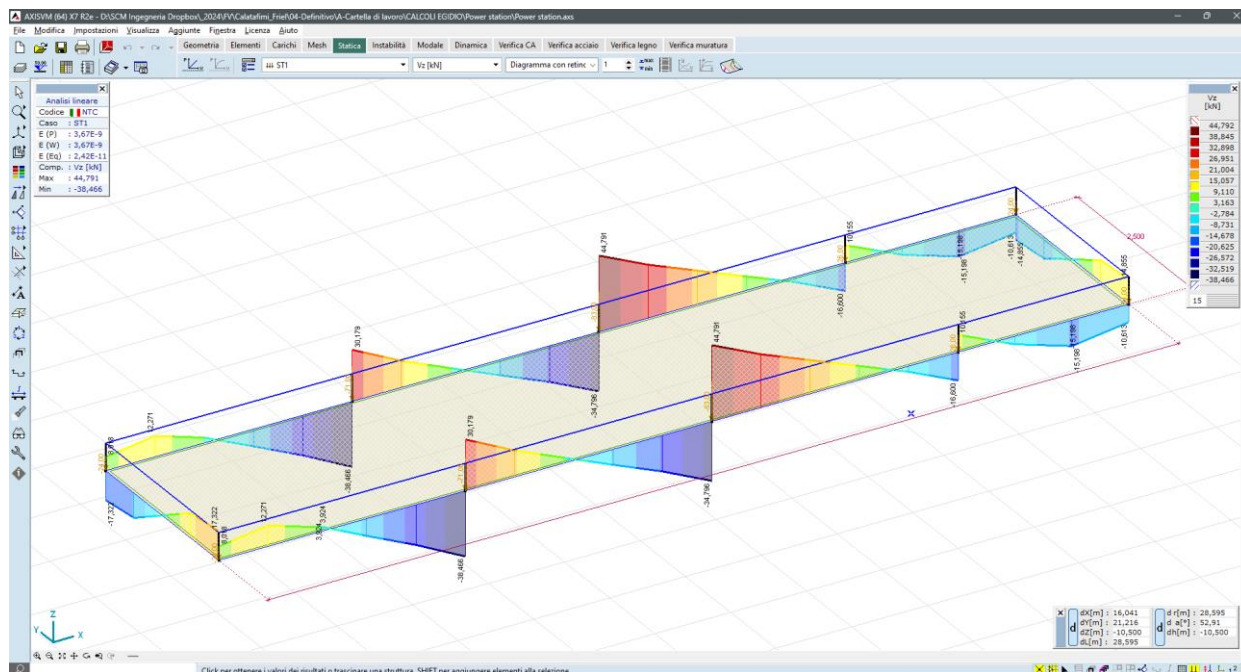


Figura 6.6 – Sollecitazioni Nervature – Vz – valori max 44,79 kN\*m

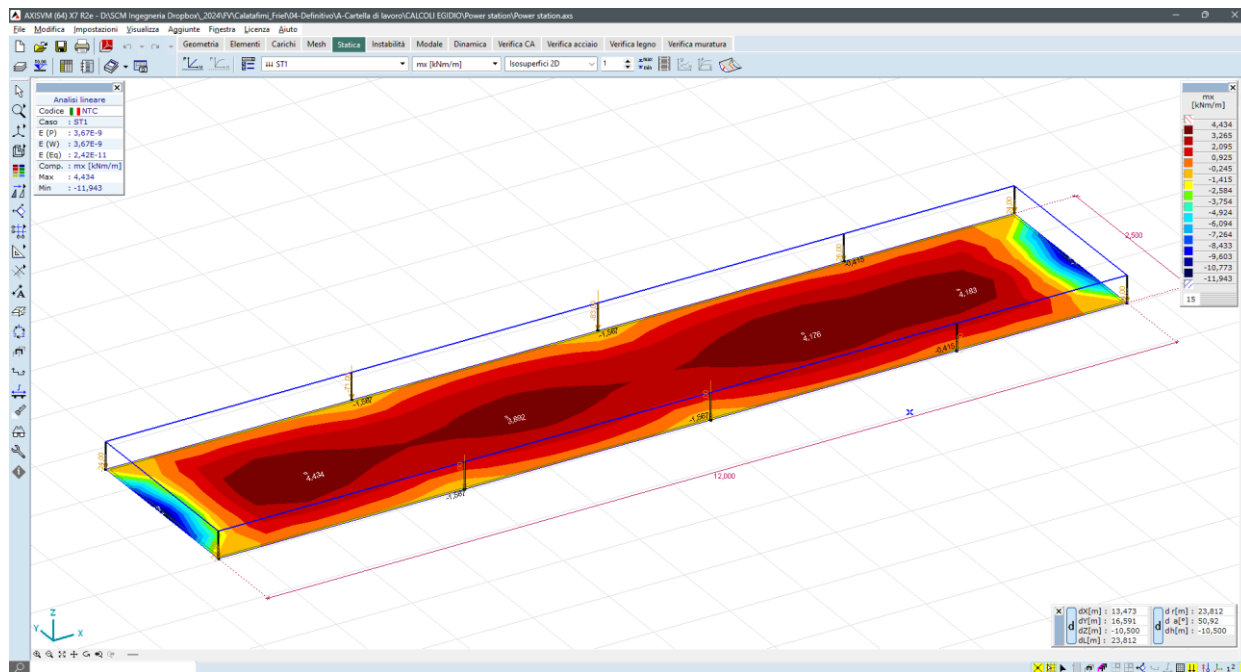


Figura 6.7 – Sollecitazioni elemento platea – mx – valori max 4,34 kNm/m

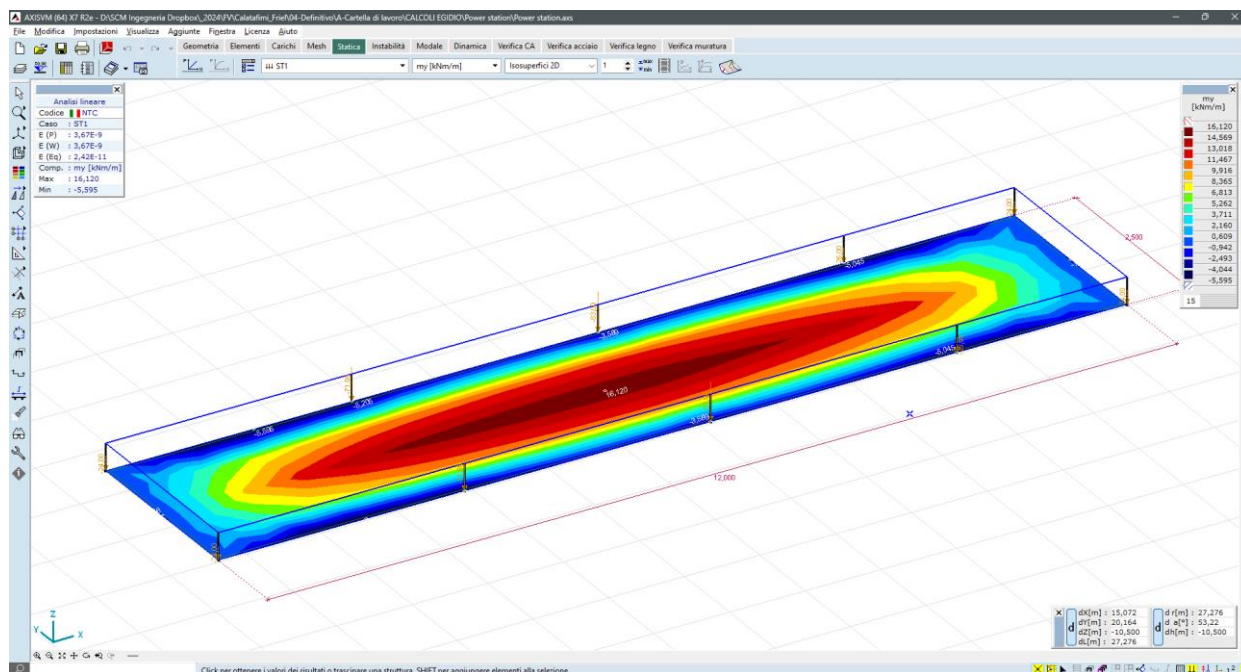


Figura 6.8 – Sollecitazioni elemento platea – my – valori max 16,12 kNm/m

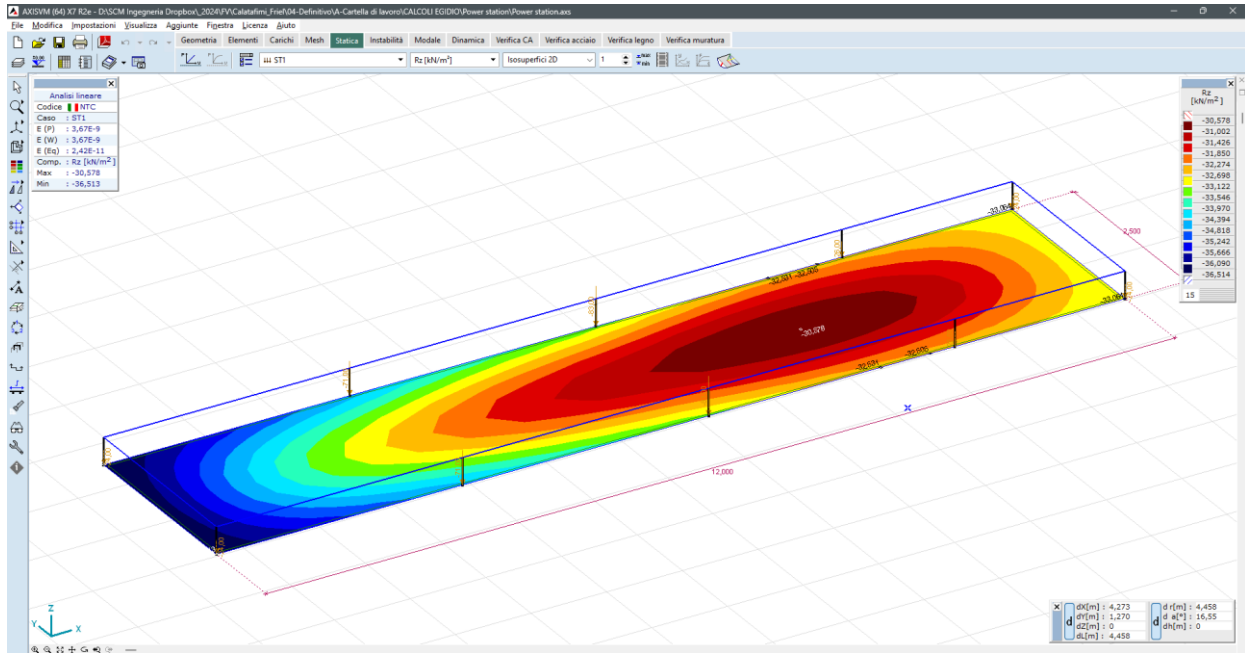


Figura 6.9 – Valori delle reazioni al suolo – Rz – valori max 30,57 kN/mq

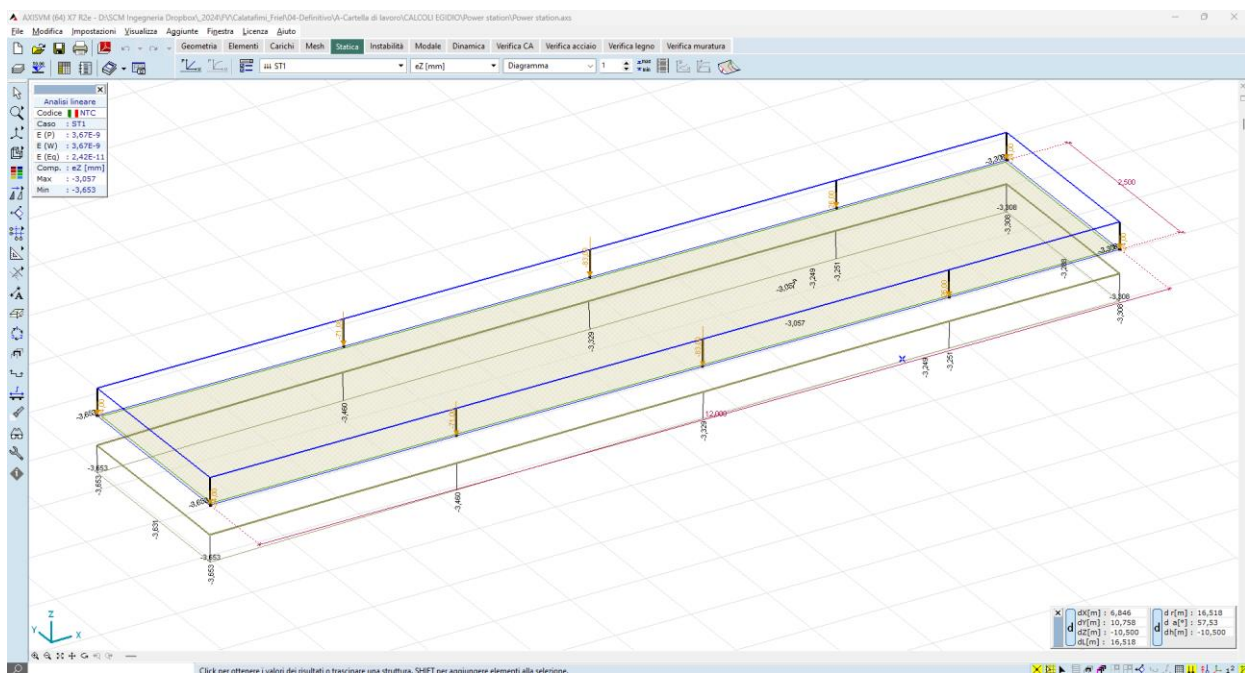


Figura 6.10 – Valori degli spostamenti verticali - ez – valori medi 3,35 mm

## 7. CONSIDERAZIONE FINALI DI TIPO GEOTECNICO

### 7.1. TRACKER MONOASSIALI

Relativamente alle strutture fotovoltaiche infisse al suolo, l'interazione palo-terreno non è descrivibile con le classiche leggi della geotecnica, in quanto non trovano applicazione i teoremi che descrivono i meccanismi di rottura, né il calcolo dei cedimenti.

Siccome le valutazioni di tipo numerico potrebbero non trovare riscontro nel modello reale, risulta indispensabile, a valle della progettazione esecutiva, una verifica di tipo empirico della reale interazione palo-terreno, mediante prove strumentali in sito, del tipo:

- pull out test,
- test a carico laterale
- test a compressione

I test consistono nell'infingere alcuni pali pilota alla profondità di infissione di progetto, nell'applicare alla testa dei pali i carichi di esercizio, e misurare in campo gli spostamenti (e/o le eventuali rotture).

Le prove, da eseguirsi in numero adeguato all'estensione dell'area del parco, daranno un responso circa la rispondenza del comportamento reale alle ipotesi progettuali adottate.

Nel caso in cui i risultati delle prove si discostino da quelli attesi, sarà necessario modificare le soluzioni progettuali di partenza, quali ad esempio:

- aumentare la profondità di infissione
- incrementare l'inerzia dei montanti
- ridurre il passo dei montanti
- modificare la tipologia di infissione

In questa fase progettuale si è ipotizzata una profondità di infissione pari a 2,9mt, da raggiungersi per semplice battitura con battipalo.

Nelle installazioni fotovoltaiche è di rilevante importanza valutare il reale meccanismo di interazione palo – terreno; le condizioni di funzionamento dei trackers, infatti, possono essere garantite solo dalla verticalità dei montanti, e quindi solo se si scongiura la condizione di rottura locale del terreno nell'intorno del montante.

Si raccomanda, pertanto, nella fase di progetto esecutivo, una attenta valutazione delle prestazioni attese, confrontando le massime sollecitazioni teoriche con quelle determinate da prove di carico in situ (pull out tests e carico laterale).

### 7.2. STRUTTURE FONDALI CABINE

Il piano di posa delle strutture fondali delle cabine dovrà essere posto al di fuori della fascia di terreno che potrebbe risentire dalle oscillazioni del contenuto di acqua (anche dal fenomeno del gelo, che per le latitudini ed il clima in questione può determinare i propri effetti sino alla profondità di 60 cm circa dal p.c.).

Le strutture fondali inducono sul terreno di sedime uno stato di sollecitazione dell'ordine dei 30,57 kN/mq;

Il substrato di riempimento, posto un grado di compattazione tale da conferire un peso specifico dell'ordine dei 17 kN/mc, induce sul terreno di sedime uno stato di sollecitazione dell'ordine dei  $17\text{kN/mc} \cdot 0,8\text{m} = 13,6 \text{ kN/mq}$ .

Sul piano geologico di riferimento è atteso dunque un carico di progetto pari a 44,17 daN/mq; se si decurta il carico geostatico attuale, cautelativamente pari a  $15\text{kN/mc} \cdot 0,8\text{m} = 12 \text{ kN/mq}$ , allora il sovraccarico dovuto alla costruzione delle opere sarà pari a:  $44,17 - 12,0 = 32,17\text{kN/mq}$  [0,30 daN/cm<sup>2</sup>] che risulta ampiamente inferiore ai valori di capacità portante dei terreni argilloso-sabbiosi.

Anche i valori delle deformazioni attese, dell'ordine medio dei 3.35 mm, sono modesti, e dunque compatibili con le condizioni di esercizio in sicurezza delle opere in progetto.

In merito alle cabine di raccolta, in questa prima fase progettuale si è ritenuto non necessario procedere con un'analisi strutturale specifica. Tale decisione è giustificata dal fatto che queste unità condividono una configurazione di fondazione identica a quella delle power station. Considerando che le cabine di raccolta sono sottoposte a carichi notevolmente inferiori, essendoci un minor numero di componenti, rispetto alle loro controparti delle power station, e che le fondazioni di queste ultime sono state già sottoposte a verifica, si può dedurre con ragionevole certezza che le fondazioni delle cabine di raccolta siano parimenti adeguate e conformi ai requisiti strutturali, senza la necessità di ulteriori verifiche analitiche.