

**Wood Solare Italia S.r.l.**

**Impianto agro-fotovoltaico da 55.202 kWp (40.000 kW in immissione)**

Comune di Latiano (BR)

Progetto Definitivo Impianto Agro-fotovoltaico  
Allegato AC – Relazione sulle verifiche a ribaltamento condotte sulle strutture  
fotovoltaiche sotto l'azione del vento

Rev. 0  
Gennaio 2021

## INDICE

<b>1. INTRODUZIONE .....</b>	<b>3</b>
<b>2. DESCRIZIONE GENERALE DELLA STRUTTURA FOTOVOLTAICA.....</b>	<b>3</b>
<b>3. MODELLO NUMERICO.....</b>	<b>5</b>
<b>4. GEOMETRIA DI RIFERIMENTO.....</b>	<b>5</b>
<b>5. MATERIALI.....</b>	<b>6</b>
<b>6. CALCOLO DELLE AZIONI SULLA STRUTTURA.....</b>	<b>7</b>
<b>7. CALCOLO DEL CARICO VENTO .....</b>	<b>7</b>
<b>8. RISULTATI DEL CALCOLO NUMERICO.....</b>	<b>11</b>
<b>9. VERIFICHE DI RESISTENZA .....</b>	<b>13</b>
<b>10. VERIFICHE A RIBALTAMENTO DEI MONTANTI.....</b>	<b>13</b>

## 1. INTRODUZIONE

La presente relazione viene redatta ad integrazione della relazione sulle opere strutturali già allegata al Progetto Definitivo dell’Impianto agrofotovoltaico (allegato M – Calcoli preliminari strutture di sostegno ed opere civili), al fine di dettagliare alcuni aspetti relativi alle verifiche a ribaltamento condotte sulle strutture di sostegno dei moduli fotovoltaici, sotto l’azione del vento, e fornire una sintesi dei risultati ottenuti.

## 2. DESCRIZIONE GENERALE DELLA STRUTTURA FOTOVOLTAICA

I moduli fotovoltaici saranno disposti in configurazione verticale su doppia fila (cosiddetta “2V”), suddivisi per strutture indipendenti (vele) tipo trackers monoassiale, con asse di rotazione orizzontale. L’inclinazione della vela è variabile da 0° a 55° in funzione dell’esposizione solare.

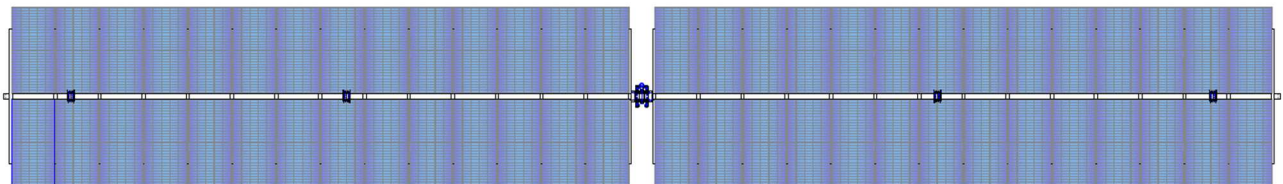


Figura 1 vista in pianta - Tracker

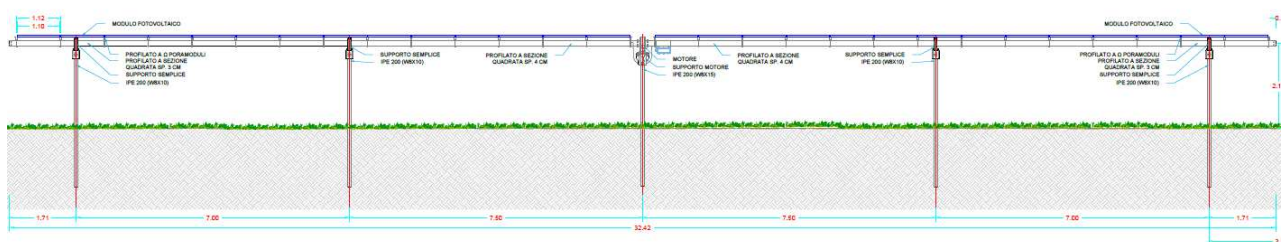


Figura 2: Vista frontale - inclinazione a 0° (orizzontale)

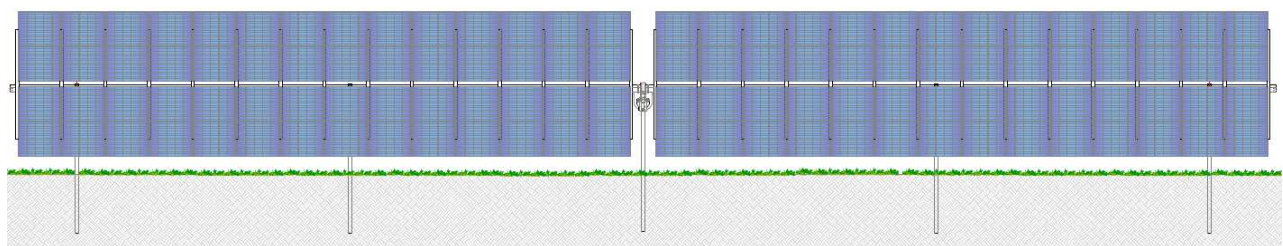


Figura 3: Vista frontale - inclinazione a 55°

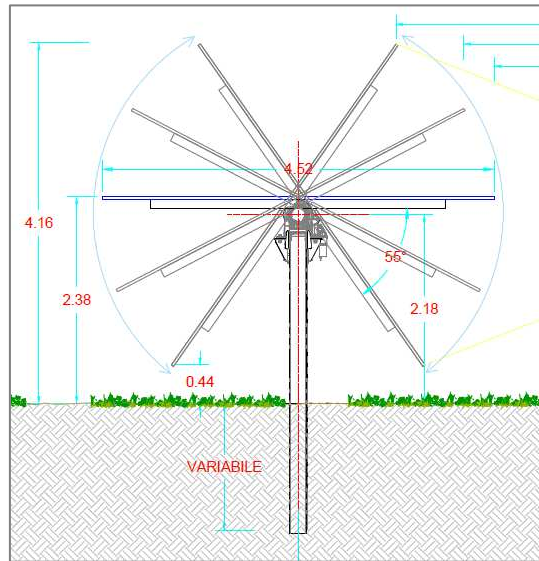


Figura 4: Vista in sezione



Figura 5 - Immagine qualitativa di tracker esistente

La struttura portante è costituita da una trave orizzontale, libera di ruotare intorno al proprio asse, in appoggio semplice sui montanti verticali, posti ad interasse di circa 7mt.

**I montanti verticali verranno infissi per battitura nel terreno, fino ad una profondità variabile tra i 150 e i 250cm; la profondità e la tipologia di infissione sono state progettate in virtù dei risultati dalle indagini geologiche condotte in situ, e parte integrante del progetto definitivo.**

La modalità di infissione per battitura rappresenta una tipologia molto diffusa nel settore delle installazioni fotovoltaiche; tuttavia la fattibilità tecnica deve essere confermata mediante un numero significativo di prove di collaudo (test di pull out e di carico laterale) su pali pilota, che danno un responso empirico della tenuta strutturale.

Le prove di collaudo – pull out test e carico laterale - vengono solitamente effettuate in fase di progettazione esecutiva; nel caso in oggetto, essendo in fase di progetto definitivo, si assumono valide le soluzioni progettuali prima espresse, supportate dalle valutazioni numeriche di seguito esplicitate.

### 3. MODELLO NUMERICO

Attraverso un modello a elementi finiti, è possibile schematizzare la struttura di supporto, assegnandole:

- le geometrie di riferimento
- le proprietà dei materiali,
- i vincoli esterni
- i carichi di esercizio.

La struttura di supporto moduli viene modellata secondo le seguenti ipotesi;

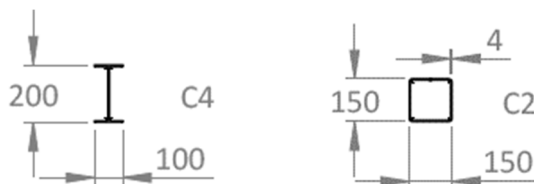
- la trave orizzontale è modellata come elemento *asta* (beam); libera di ruotare intorno al proprio asse, in appoggio semplice sui montanti verticali.
- I montanti verticali sono modellati come elementi *asta* incastrati alla base ad una profondità pari a -100cm dal piano campagna, da dove si esplica l'effetto dovuto all'infissione su substrato rigido.
- La vela fotovoltaica, ad inclinazione variabile, è modellata come *pannello di carico*, elemento virtuale privo di massa e rigidità che trasferisce alla trave principale i carichi esterni (peso proprio, vento, neve, ecc...).

### 4. GEOMETRIA DI RIFERIMENTO

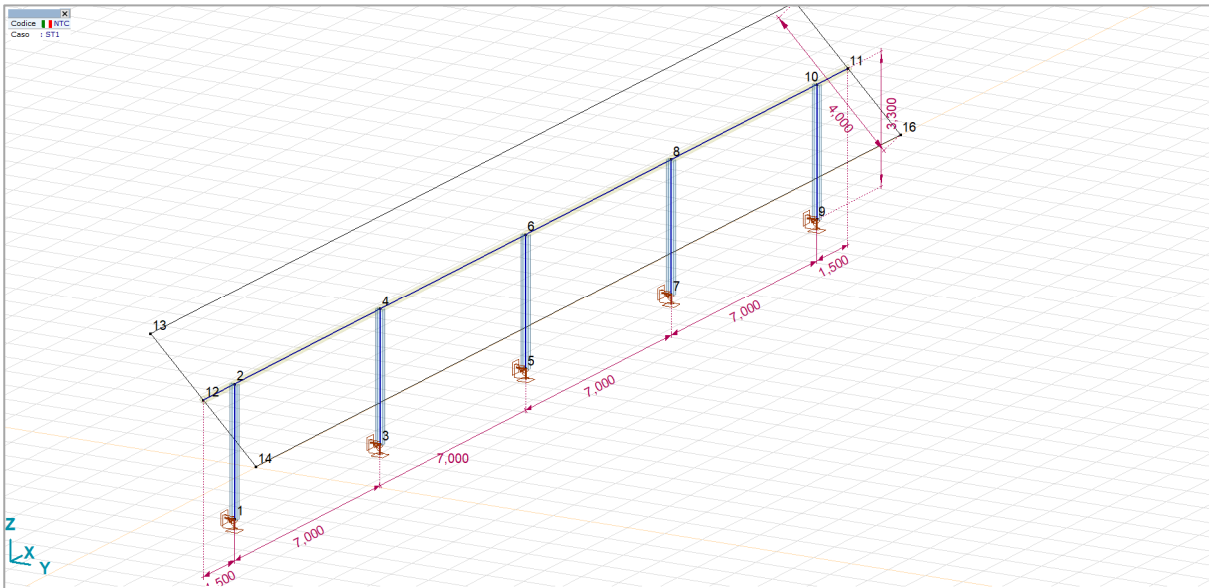
La geometria della vela viene desunta dai disegni architettonici di progetto

Le sezioni utilizzate, con le loro caratteristiche geometriche, sono riportate nella tabella seguente:

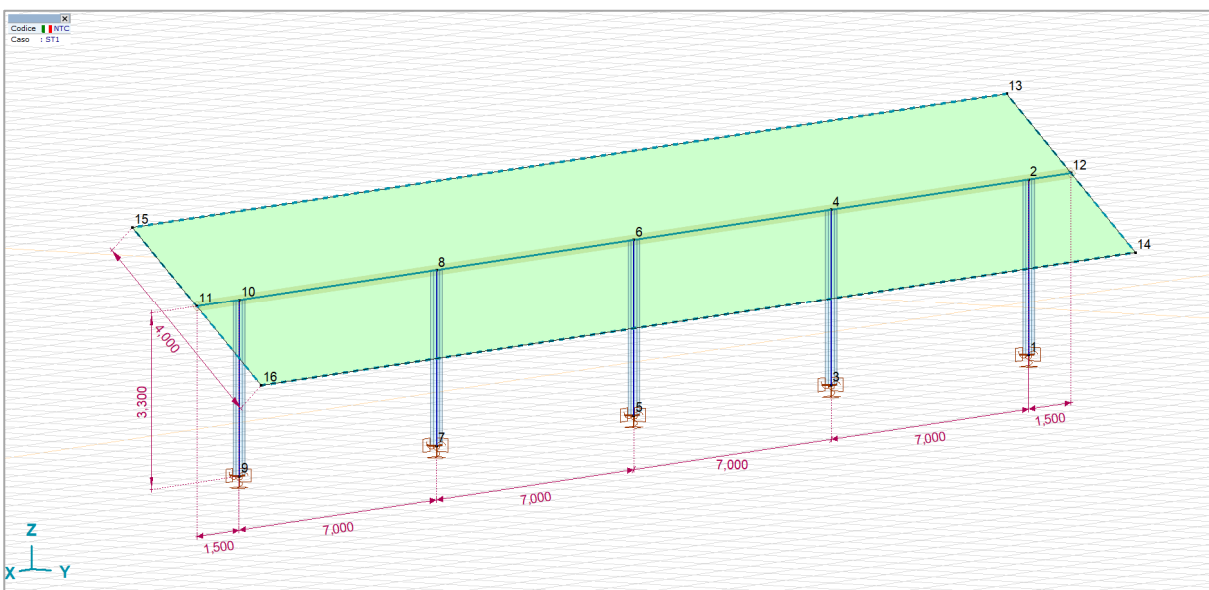
Id	Tipo	Area	A V2	A V3	Jt	J 2-2	J 3-3	W 2-2	W 3-3	Wp 2-2	Wp 3-3
		cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>
1	IPE 200	28.50	0.0	0.0	7.00	142.00	1943.00	28.50	194.30	44.60	220.60
3	profilo Q150x4.0	22.76	0.0	0.0	1267.70	797.32	797.32	106.31	106.31	123.46	123.46



**Figura 6:** Tipologie delle sezioni dei profilati utilizzati



**Figura 7:** Schema tipo struttura



**Figura 8:** schema struttura con pannello di carico

## 5. MATERIALI

Le strutture sono costituite con profili in acciaio, ai quali vengono assegnate le seguenti caratteristiche fisico-meccaniche:

Nome	Tipo	$f_y^*$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_u^*$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$E_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\nu$
1 S 235	Acciaio	$f_y^* [N/mm^2] = 215,00$	$f_u^* [N/mm^2] = 360,00$	7850	210000	0,30
2 S 355	Acciaio	$f_y^* [N/mm^2] = 335,00$	$f_u^* [N/mm^2] = 470,00$	7850	210000	0,30

## 6. CALCOLO DELLE AZIONI SULLA STRUTTURA

Le azioni prevalenti che sollecitano le strutture fotovoltaiche sono quelle dovute ai **venti**.

La pressione esercitata dal vento sulla vela fotovoltaica, induce, sulle strutture di supporto, azioni di downlift (carico laterale) e di uplift (carico verticale), che, in alcuni casi, portano addirittura allo sfilamento del montante.

## 7. CALCOLO DEL CARICO VENTO

I valori caratteristici vengono calcolati come da Normativa di riferimento D.M. 17 gennaio 2018 - NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI, di cui al Cap. 3 - AZIONI SULLE COSTRUZIONI - Par. 3.3 e 3.4

Pressione del vento sulla vela  **$p = qb C_e C_p C_d$**

Zona vento = 3

( $V_{b,0} = 27$  m/s;  $A_0 = 500$  m;  $K_s = 0,37$ )

Altezza dell'edificio = 3,00 m

Classe di rugosità del terreno: D (Aree prive di ostacoli o con al di più rari ostacoli isolati (aperta campagna, aeroporti, aree agricole, zone paludose o sabbiose, superfici innevate o ghiacciate, mare, laghi,...))

Categoria esposizione: tipo II

( $K_r = 0,19$ ;  $Z_0 = 0,05$  m;  $Z_{min} = 4$  m)

Velocità di riferimento = 27,00 m/s

Pressione cinetica di riferimento ( $q_b$ ) = 45,56 daN/mq

Coefficiente di esposizione ( $C_e$ ) = 1,80

Coefficiente dinamico ( $C_d$ ) = 1,00

Coefficiente di pressione  $C_p$

Le strutture fotovoltaiche sono trattate come tettoie a singola falda, con assenza di ostruzioni al di sotto di esse (coefficiente di bloccaggio  $\Phi=0$ ); il punto C3.3.8.2 della Circolare fornisce i criteri per la valutazione dell'azione del vento sulle strutture tipo tettoia, introducendo il coefficiente di forza  $C_p$ , così definito:

Per valori positivi  $C_p = +0,2 + \alpha/30$

Per valori negativi  $C_p = -0,5 + 1,3 * \alpha/30$

Il valore del  $C_p$  dunque è variabile in funzione dell'inclinazione della vela fotovoltaica; di conseguenza, anche il valore della pressione del vento  $p$  varia in funzione dell'angolo di inclinazione.

I valori di  $C_p$  variano a seconda dell'angolo di inclinazione della vela, come di seguito:

inclinaz	$C_p +$	$C_p -$
0	0,20	0,50
15	0,70	1,15
20	0,87	1,37
25	1,03	1,58
30	1,20	1,80
35	1,37	2,02
40	1,53	2,23
45	1,70	2,45
50	1,87	2,67
55	2,03	2,88





I valori della pressione del vento  $p$  variano con l'angolo di inclinazione delle vela, come di seguito:

<b>inclinaz</b>	<b>q+ (daN/mq) sopravvento</b>	<b>q- (daN/mq) sottovento</b>
0	16,40	41,01
15	57,41	94,31
20	71,08	112,08
25	84,75	129,85
30	98,42	147,62
35	112,08	165,39
40	125,75	183,16
45	139,42	200,93
50	153,09	218,70
55	166,76	236,47

La vela fotovoltaica, complesso definito da moduli + arcarecci, trasmette alla trave orizzontale - asse di rotazione dei trackers - un carico lineare, pari a:

$$Q=q*4,0$$

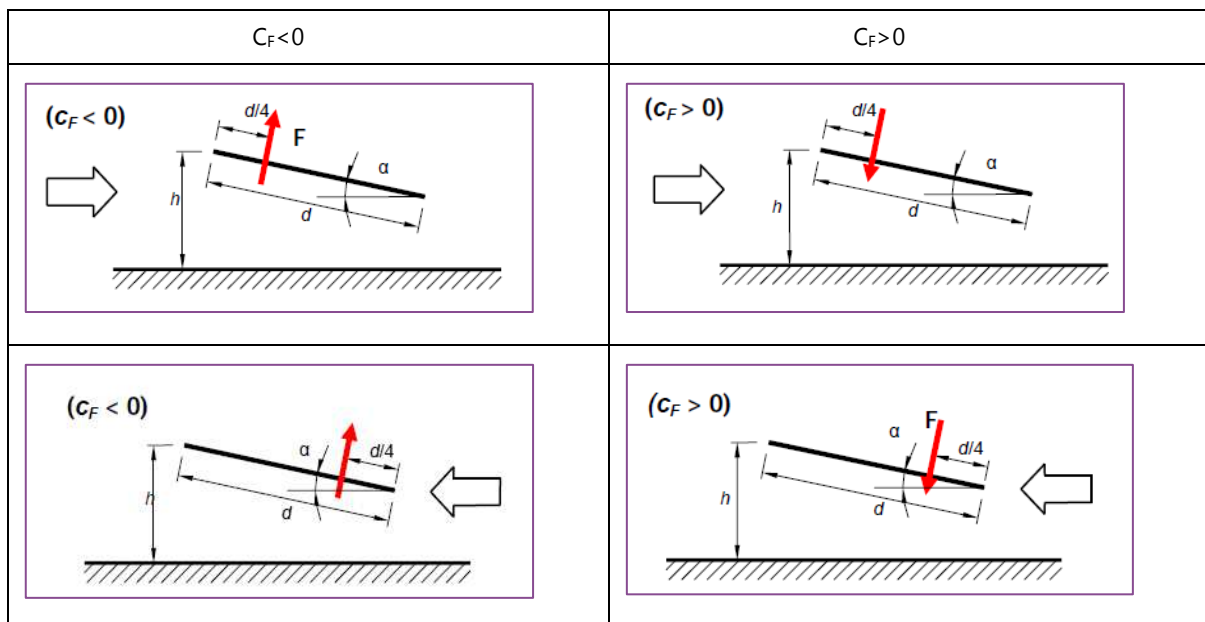
anch'esso funzione dell'angolo di inclinazione.

I valori dei suddetti carichi agenti sulla trave - asse di rotazione sono dunque:

<b>inclinaz</b>	<b>Q+ (daN/m)</b>	<b>Q- /daN/m)</b>
0	65,6	164,0
15	229,6	377,3
20	284,3	448,3
25	339,0	519,4
30	393,7	590,5
35	448,3	661,6
40	503,0	732,6
45	557,7	803,7
50	612,4	874,8
55	667,0	945,9

L'azione del vento è schematizzata attraverso 4 schemi di carico in cui le forze  $F$ , risultanti dal campo di pressioni sulla superficie della falda della tettoia, sono dirette ortogonalmente ad essa:





Ognuna di queste forze, scomposta sugli assi principali x e z, genera sui montanti dei carichi sia orizzontali (direz +x e -x) che verticali (direz +z e -z), come segue:

ang	Cf>0	Cf<0	Fx+ (daN/m)	Fx- (daN/m)	Fy+ (daN/m)	Fy- (daN/m)
0	0,20	0,50	0,0	0,0	65,6	-164,0
15	0,70	1,15	59,4	-97,6	221,8	-364,4
20	0,87	1,37	97,2	-153,3	267,2	-421,3
25	1,03	1,58	143,3	-219,5	307,2	-470,7
30	1,20	1,80	196,8	-295,2	340,9	-511,4
35	1,37	2,02	257,2	-379,5	367,3	-541,9
40	1,53	2,23	323,3	-470,9	385,3	-561,2
45	1,70	2,45	394,3	<b>-568,3</b>	394,3	<b>-568,3</b>
50	1,87	2,67	469,1	-670,1	393,6	-562,3
55	2,03	2,88	546,4	-774,8	382,6	-542,5

Le configurazioni più dei carichi vento più sollecitanti si hanno per:

$$F_{\text{orizz}} = 774,8 \text{ daN/m quando la vela è inclinata a } 55^\circ \text{ (pressione vento } 236,27 \text{ daN/mq)}$$

$$F_{\text{uplift}} = 568,3 \text{ daN/m quando la vela è inclinata a } 45^\circ \text{ (pressione vento } -200,93 \text{ daN/mq)}$$

In condizioni di esercizio, i trackers sono dotati di un sistema di controllo remoto che è in grado di mettere le vele in "protezione", ossia in configurazione sub orizzontale, quando l'intensità del vento raggiunge valori prossimi a quelli critici; per tal motivo la configurazione a 55° a carico vento massimo non è realizzabile in fase operativa; per tale regione, anche per i carichi laterali, si considera come valore massimo quello corrispondente ad una inclinazione a 45°, ossia:

$$F_{\text{orizz}} = 568,3 \text{ daN/m quando la vela è inclinata a } 45^\circ \text{ (pressione vento } 200,93 \text{ daN/mq)}$$



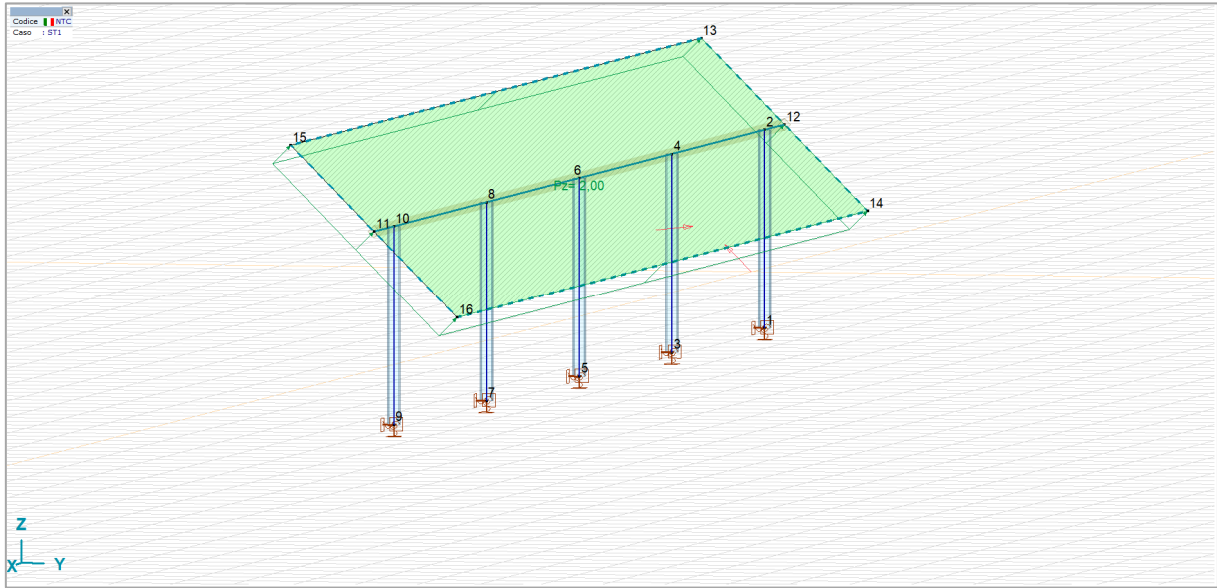


Figura 9\_vista 3D del carico uplift 200daN/mq

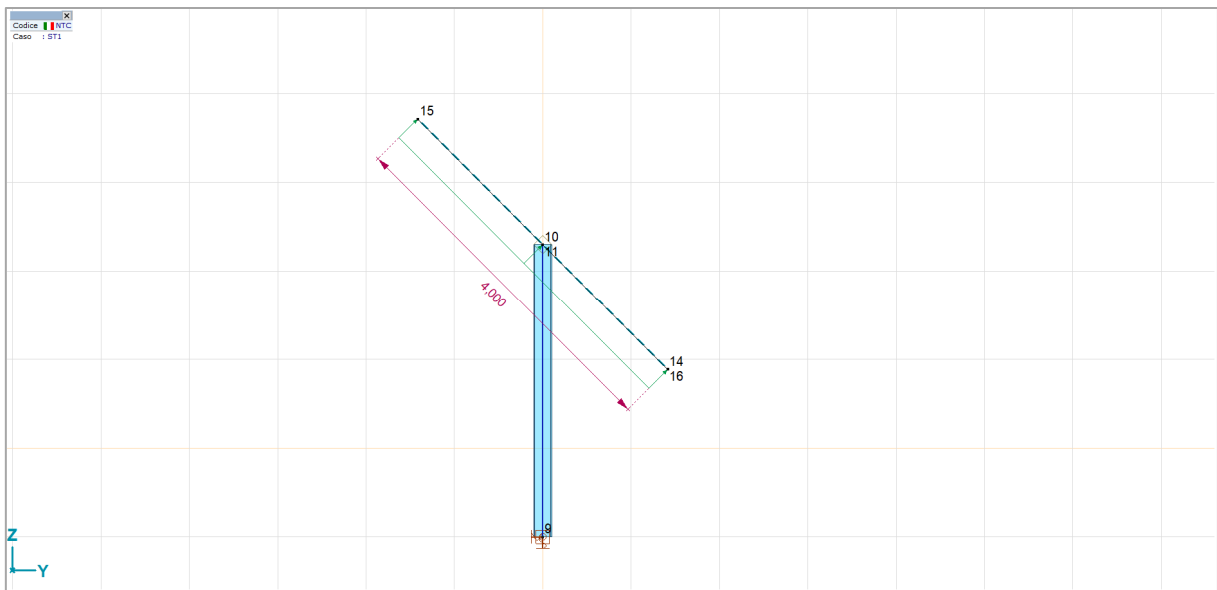


Figura 10\_vista laterale del carico uplift 200daN/mq

## 8. RISULTATI DEL CALCOLO NUMERICO

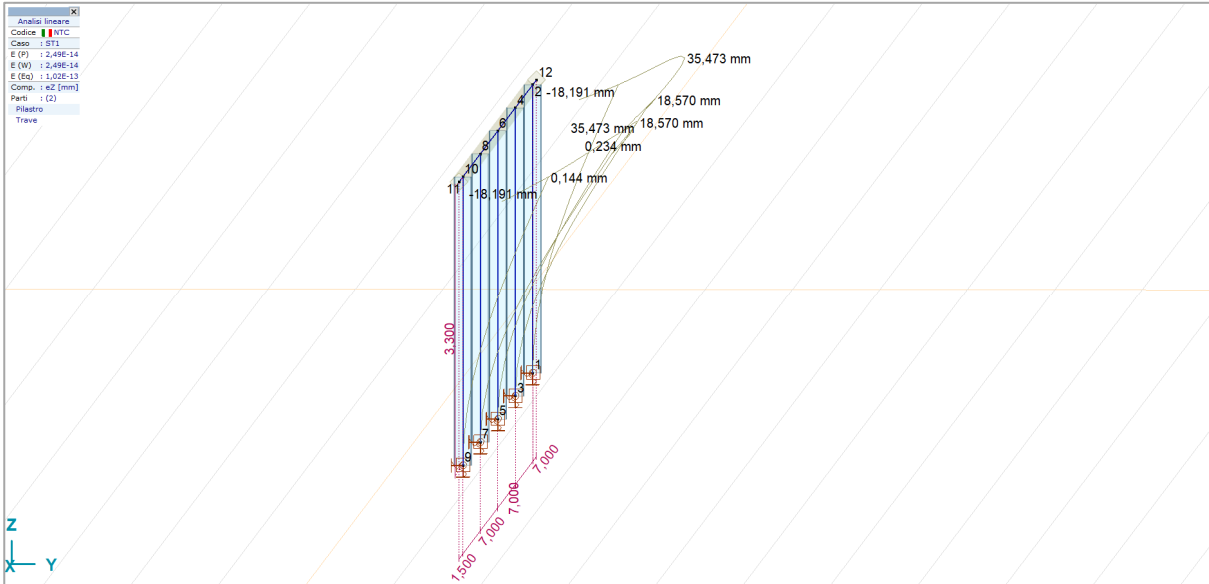


Figura 11\_deformazioni/spostamenti della struttura

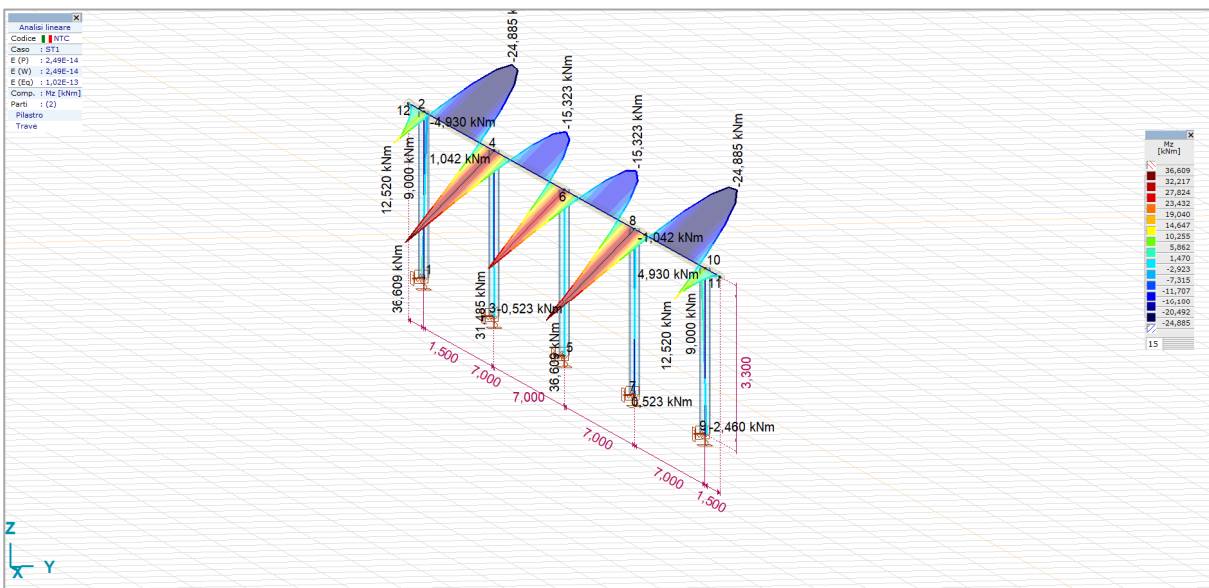


Figura 12\_Momenti flettenti agenti sulla trave principale



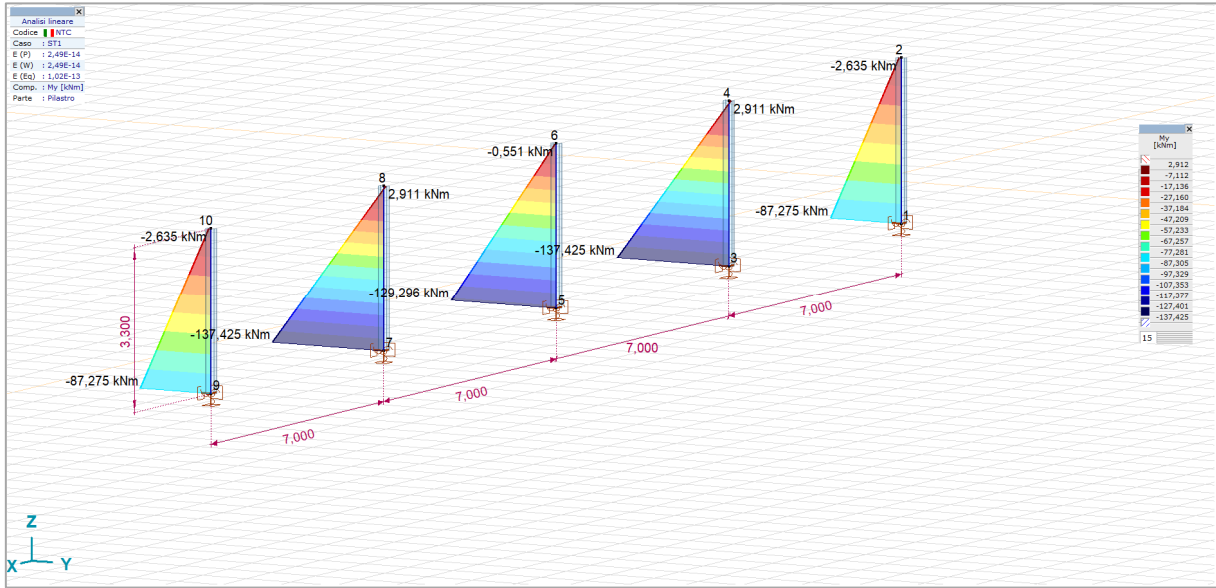


Figura 13\_momenti flettenti agenti sui montanti

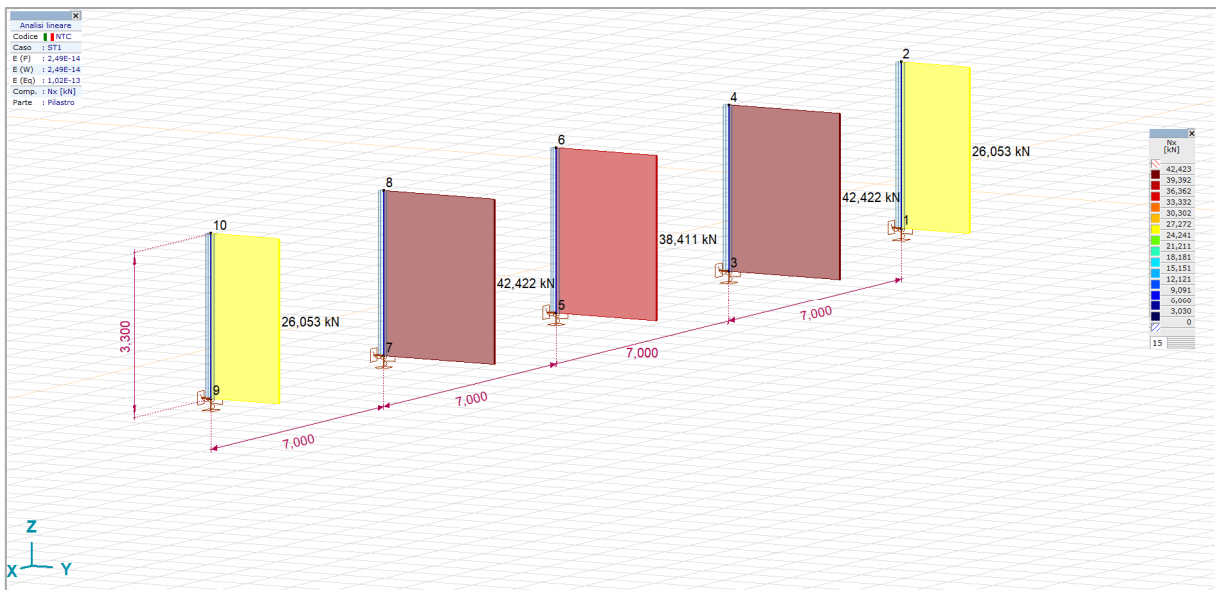


Figura 14\_sforzi assiali agenti sui montanti



## 9. VERIFICHE DI RESISTENZA

Le verifiche di resistenza sono state condotte con le formule classiche della scienza delle costruzioni; sono state eseguite la:

- verifica a pressoflessione dei montanti verticali
- verifica a flessione della trave orizzontale

Per quel che riguarda i montanti verticali, il valore del momento sollecitante massimo, è pari a:

$$M_{\max} = 13,74 \text{ kN*m}$$

Il valore del momento di snervamento è pari a:

$$M_y = W_x * \sigma_y = 194,3 \text{ cm}^3 * 3550 \text{ daN/cm}^2 = 68,97 \text{ kN*m}$$

dal rapporto tra momento di snervamento e momento sollecitante si ottiene:

$$M_y/M_{\max} = 5.02$$

il quale può essere considerato un coeff di sicurezza **accettabile**

Per quel che riguarda la trave principale, il valore del momento sollecitante massimo, è pari a:

$$M_{\max} = 24,88 \text{ kN*m}$$

Il valore del momento di snervamento è pari a

$$M_y = W_x * \sigma_y = 621,4 \text{ cm}^3 * 2335 \text{ daN/cm}^2 = 145,97 \text{ kN*m}$$

dal rapporto tra momento di snervamento momento sollecitante si ottiene:

$$M_y/M_{\max} = 5.8$$

il quale può essere considerato un coeff di sicurezza **accettabile**

## 10. VERIFICHE A RIBALTAMENTO DEI MONTANTI

Le verifiche di resistenza pocanzi illustrate trovano validità solo se viene meno la condizione di rottura locale del terreno nell'intorno del montante.

Tuttavia, per le strutture fotovoltaiche, l'interazione palo-terreno non può essere soggetta alle classiche leggi della geotecnica, in quanto non sono applicabili i teoremi che descrivono i meccanismi di rottura, né il calcolo dei cedimenti.

Tutte le valutazioni numeriche dunque potrebbero non trovare riscontro nel modello reale.

È pertanto indispensabile la verifica di tipo empirico della reale interazione terreno-palo, che può essere effettuata mediante un certo numero di prove di carico – pull out test e carico laterale.

I test consistono nell'inghiottire 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).

Nel nostro caso, come visto in precedenza, i carichi massimi cui è soggetto il montante (nella configurazione della vela a 45° in condizioni di ventosità massima) sono pari a:

$$F_{\text{orizz}} = 42,00 \text{ kN}$$

$$F_{\text{uplift}} = 42,00 \text{ kN}$$

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 correggere le soluzioni progettuali di partenza, ad esempio potrebbe essere necessario:

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

In conclusione, si può asseverare che l'esito delle verifiche è **positivo** in termini di tensioni di lavoro

**Si raccomanda ad ogni modo, per questi tipi di strutture, 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).**



Esecuzione di pull out test