

Report Strutturale Preliminare

SCOTTA – PODENZANO 2



DOCUMENT INFORMATION

FILLED BY:		APPROVED BY:	
NAME:	B. Fotia	NAME:	C. Tarisciotti & M. Guglielmi
DATE:	17/05/2024	DATE:	17/05/2024

REVISIONS

No.	DATE	PAG./SEC.	NOTES
0A	17/05/2024	-	Document issued

INDICE

1. INTRODUZIONE	5
1.1. SCHEMA GEOMETRICO	6
1.1.1. TRJ HT 24 PDP	8
2. NORMATIVE DI RIFERIMENTO	10
2.1. NORME EUROPEE	10
2.2. NORME ITALIANE	10
3. STRATEGIE DI STOWING	11
3.1. VENTO	11
3.2. NEVE	11
3.3. VENTO VS NEVE	11
4. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI IMPIEGATI	12
4.1. BULLONERIA	13
4.2. SALDATURE	13
5. ANALISI DEI CARICHI	14
5.1. CARICHI PERMANENTI PORTATI DEFINITI – G_1	14
5.2. CARICHI PERMANENTI PORTATI PIENAMENTE DEFINITI – G_2	14
5.3. CARICHI ACCIDENTALI – AZIONE DEL VENTO	15
5.3.1. PRESSIONE DEL VENTO	15
5.3.2. COEFFICIENTE DI PRESSIONE	16
5.4. CARICHI ACCIDENTALI – AZIONE DELLA NEVE	22
5.5. CARICO TERMICO	23
5.6. SPETTRO DI RISPOSTA PER L'ANALISI SISMICA	24
6. COMBINAZIONI DEI CARICHI E CRITERI DI VERIFICA	26
6.1. COMBINAZIONI DI CARICO	28
7. ANALISI MODALE	32
8. CLASSIFICAZIONE DELLE SEZIONI	34
9. VERIFICA DI RESISTENZA STRUTTURALE	35
9.1. CRITERI DI VERIFICA	35
9.2. CAPACITÀ ELEMENTI	36
9.3. SOFTWARE DI CALCOLO	37

9.4.	SCHEMATIZZAZIONE STRUTTURALE	38
9.5.	IDENTIFICAZIONE DEI FRAME	38
9.6.	SOLLECITAZIONI DI CALCOLO	39
9.6.1.	STOW POSITION - $\alpha = 0^\circ$	39
9.6.2.	WORKING POSITION $\alpha = 55^\circ$	42
9.7.	VERIFICHE ULS	45
9.7.1.	MODELLO A	46
9.7.2.	MODELLO B	46

1. Introduzione

Informazioni generali	
Nome progetto	PODENZANO 2
Paese	Emilia romagna - Italia
Potenza [Mwp]	5
Coordinates GPS [°]	44.951844°, 9.717166°
Tipologia di tracking system	Sistema di inseguimento orizzontale ad asse singolo con backtracking
Angolo di tracking [°]	55°
Tipo di tracker	TRJ HT 12 & 24 PDP moduli in configurazione verticale
Altitudine [m slm]	111
Leading edge [mm]	600
Modulo fotovoltaico	Dimensioni [mm]: 2465x1134x30 Peso [kg]: 34.6
Interasse longitudinale fissaggio moduli [mm]	400
Suddivisione layout	File Esterne

Il presente fascicolo riguarda il calcolo e la verifica di due inseguitori meccanici mono assiali denominati TRJ 12 & 24 PDP. Ai fini strutturali verrà verificata l'architettura maggiore che risulta costituita dal TRJ 24 PDP. La struttura meccanica è costituita da elementi verticali infissi mediante battitura direttamente nel terreno. Detti elementi rappresentano al contempo sia i montanti verticali fuori terra che le fondazioni profonde. Gli elementi orizzontali principali sono costituiti da profili a sezione tubolare cava, denominati beam. I supporti moduli, sono posizionati sulla trave in maniera ortogonale alla stessa, ed hanno la funzione di sorreggere i pannelli fotovoltaici.

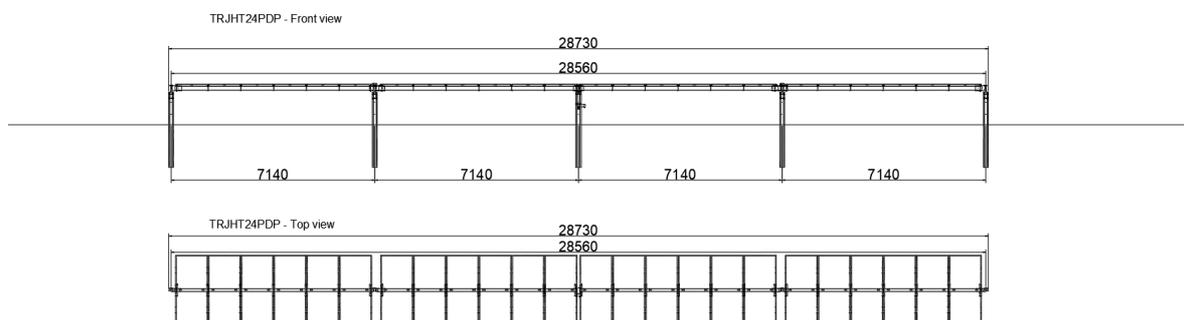
1.1. Schema geometrico

Di seguito vengono riportati gli schemi geometrici della struttura

Per il calcolo strutturale sono state considerate le due configurazioni generanti le massime tensioni:

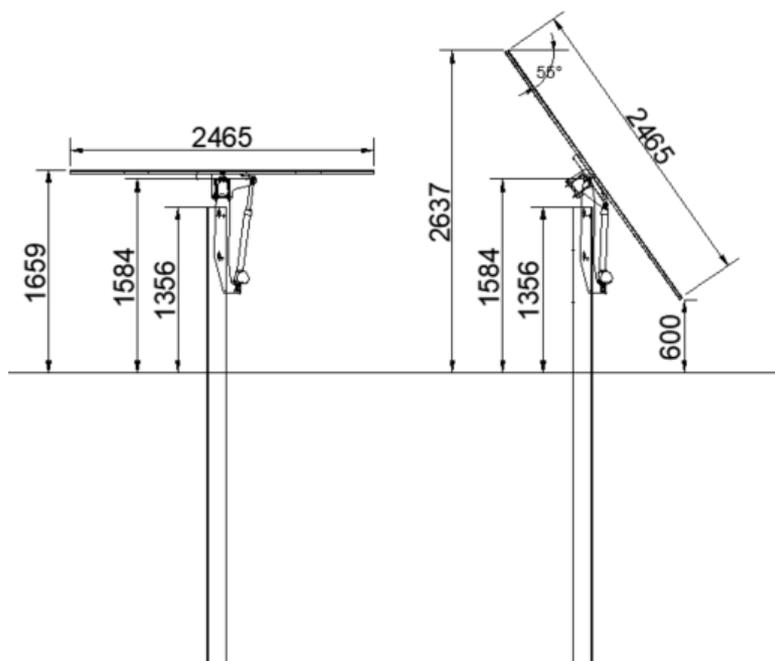
- MODELLO A: $\alpha = 0^\circ$
- MODELLO B: $\alpha = 55^\circ$

Configurazione per TRJ 24 HT - Vista Frontale



I disegni risultano essere esemplificativi e soggetti a modifiche essendo il report strutturale preliminare

Configurazione per TRJ 18 HT - Vista Laterale

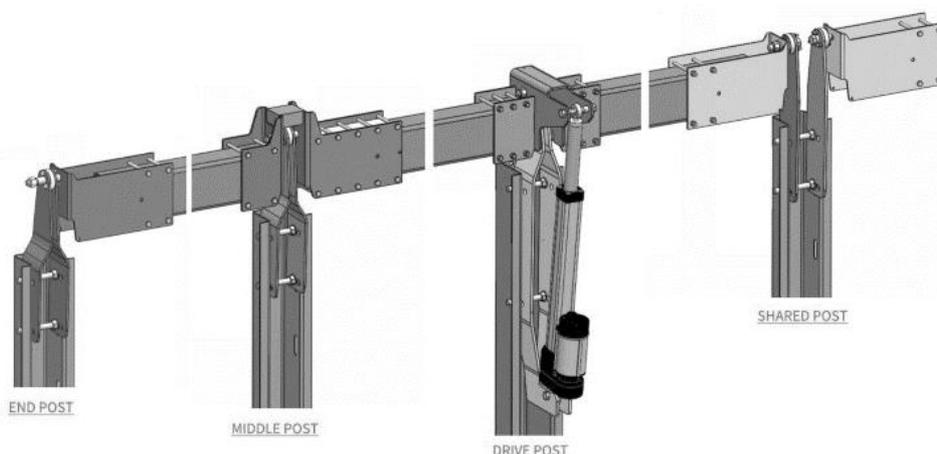


I disegni risultano essere esemplificativi e soggetti a modifiche essendo il report strutturale preliminare

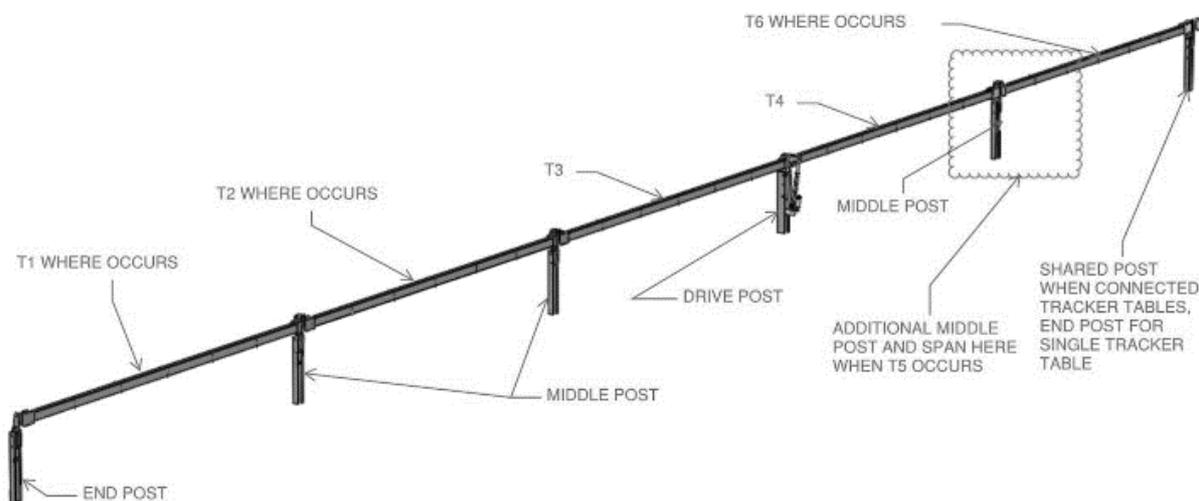
Di seguito si riporta una schematizzazione base per definire i componenti di massima delle strutture, ovvero pali e travi. I pali verranno denominati come:

- **Drive post** → palo dotato di attuatore,
- **Middle post** → palo non dotato di attuatore e disposto nelle campate intermedie,
- **Shared post** → palo intermedio che collega due assi dotati ognuno di attuatore,
- **Lateral post** → palo di estremità, che nel caso in cui vi sia il cantilever, porterà anche il suo carico strutturale.

Ogni palo avrà la sua connessione ad hoc come di seguito.

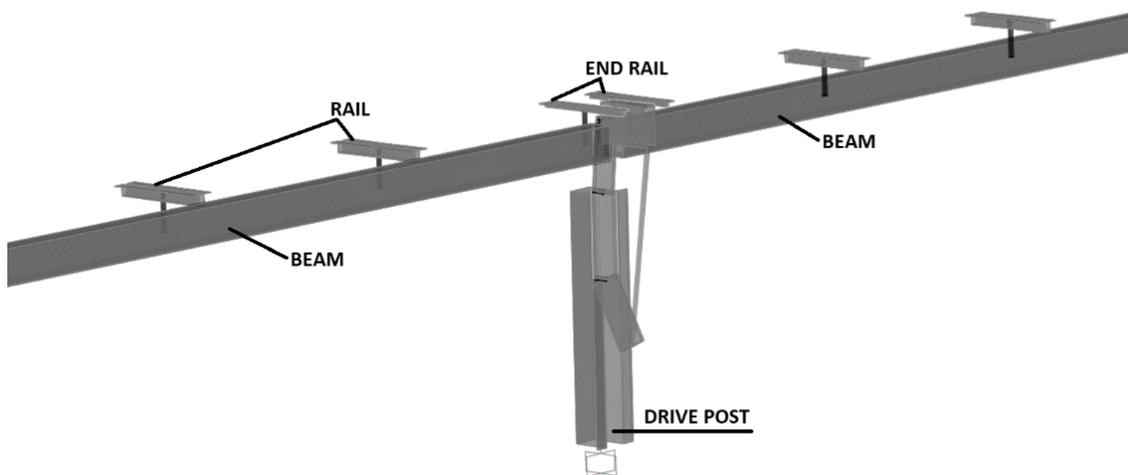
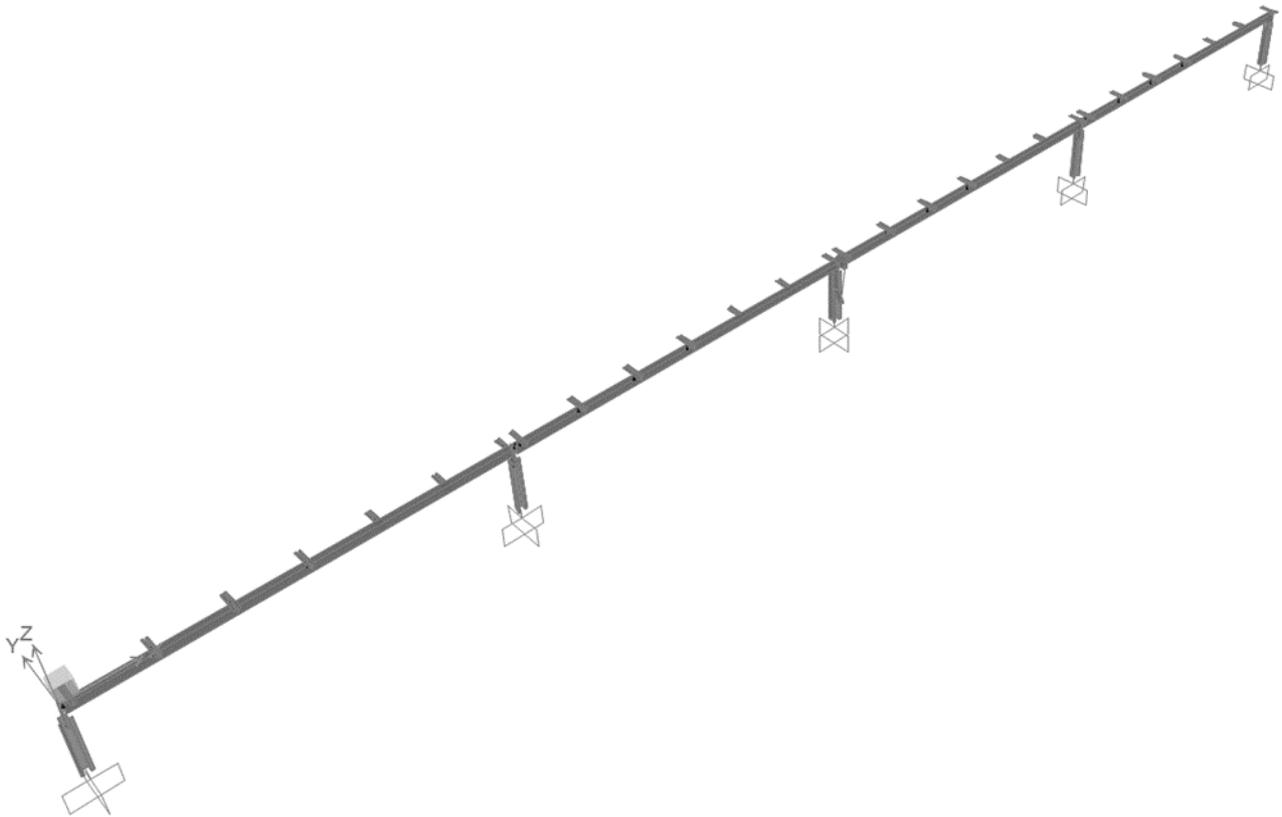


Le travi saranno denominate come beam o Torque Tube (T), La struttura con un solo attuatore potrà avere al massimo sei campate ovvero sei travi, denominate partendo da sinistra come T_n , dove n è il numero di campate. Le campate vicino l'attuatore saranno sempre presenti e denominate come T_3 e T_4 . Nel caso di tre o quattro campate si andranno ad attivare rispettivamente i tubi T_1 e T_6 . Solo nel caso di cinque o sei campate si attiveranno i tubolari T_2 e T_5 .

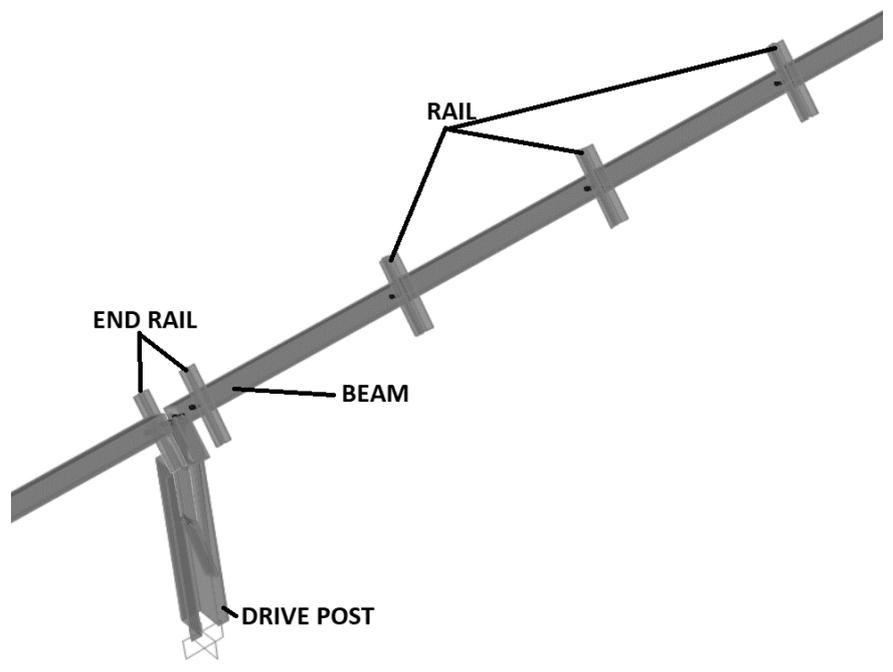
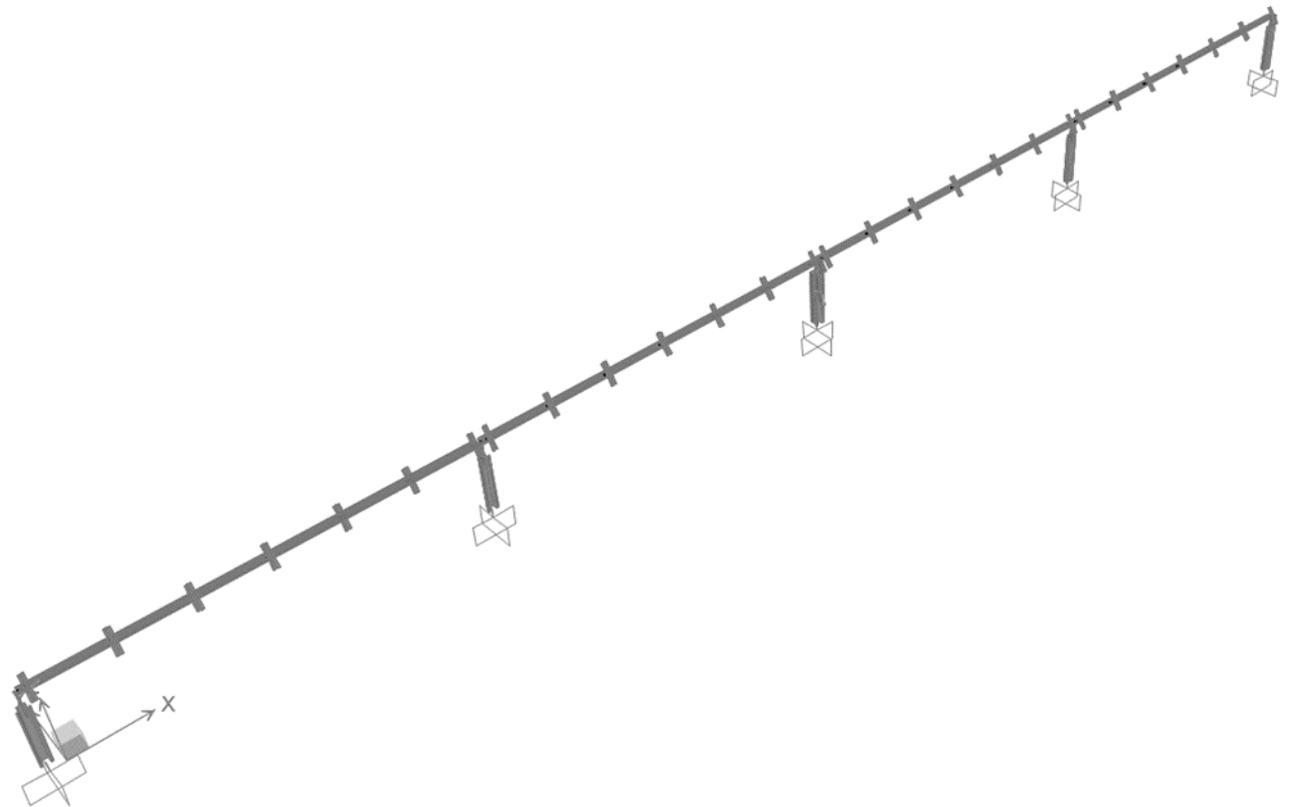


1.1.1. TRJ HT 24 PDP

Modello A - $\alpha = 0^\circ$



Modello B - $\alpha = 55^\circ$



2. Normative di Riferimento

2.1. Norme Europee

- EUROCODICE 1 – Azioni sulle strutture – Parte 1-4: Azioni in generale – azioni del vento (UNI EN 1991-1-4:2005);
- EUROCODICE 3 – Progettazione delle Strutture in acciaio – Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici (UNI EN 1993-1-1:2005);
- EUROCODICE 3 – Progettazione delle Strutture in acciaio – Parte 1-8: Progettazione dei collegamenti (UNI EN 1993-1-8:2005);

2.2. Norme Italiane

- D.M. 17 gennaio 2018 – Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC-18 nel seguito);
- Circolare Esplicativa n°7 del 21 gennaio 2019 – Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni"» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018;
- Legge 2/2/74 n. 64 e DDMM 3/3/1975 – Norme tecniche per la costruzione in zone sismiche.
- Costruzioni in acciaio: Istruzioni per il calcolo, l'esecuzione, il collaudo e la manutenzione. (C.N.R. 10011/85);
- Istruzioni per la valutazione delle Azioni sulle Costruzioni. (C.N.R. 10012/85);

3. Strategie di Stowing

3.1. Vento

La progettazione del tracker si basa sul presupposto che non è mai sottoposto ad una velocità del vento da normativa se non quando è in *STOW POSITION* ($\alpha = 0^\circ$). Pertanto, l'attuatore deve essere in grado di condurre il sistema nella posizione di sicurezza sotto i carichi previsti a seguito del rilevamento di una velocità del vento di innesco chiamata "Go To Stow Wind Speed".

La velocità del vento di innesco è impostata di default a 15,6 m/s, misurata come una raffica di 3 secondi a 5m di altezza. Questo valore deve essere scalato ai valori misurati all'altezza dell'anemometro. Si può supporre che l'anemometro abbia la massima precisione di circa una raffica di 3 secondi, quindi ogni misurazione viene confrontata con il valore di innesco. Per scalare la raffica a 10 m di altezza, all'altezza dell'anemometro (h), ci basiamo sulla relazione derivata dalle equazioni del EN 1991.1.4:

$$V_p(h) = V_p(10m) * \frac{\sqrt{C_e(h)}}{\sqrt{C_e(10m)}}$$

3.2. Neve

La progettazione del tracker si basa sul presupposto che non è mai sottoposto ad una pressione da normativa se non quando è in *STOW POSITION* ($\alpha = 55^\circ$). Pertanto, l'attuatore deve essere in grado di condurre il sistema nella posizione di sicurezza sotto i carichi previsti a seguito del rilevamento di uno spessore della neve di innesco chiamato "Trigger accumulation".

Lo spessore della neve di innesco è impostato di default a 30 mm ed è misurato a terra da un sensore in una zona indisturbata.

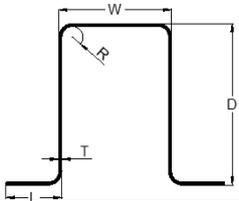
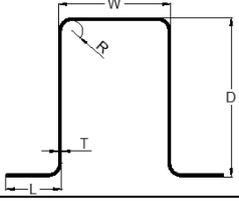
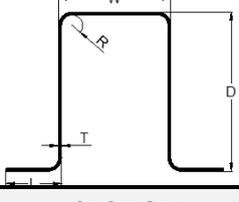
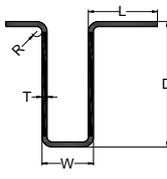
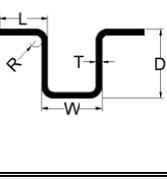
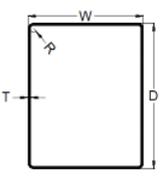
3.3. Vento VS Neve

L'utilizzo contemporaneo delle strategie sopra descritte è reso possibile dal calcolo dello spessore massimo della neve secondo l'equazione 7-7.1 dell' ASCE 7-16:

$$h = \gamma_s \cdot \frac{s_k}{\gamma} = \gamma_s \cdot \frac{s_k}{0.426 \cdot s_k + 2.2}$$

Tale spessore deve essere minore dell'altezza da terra misurata al massimo angolo di inclinazione del tracker, cosicché nel caso in cui si azioni l'allarme vento la struttura sia in grado sempre di tornare nella *STOW POSITION*.

4. Caratteristiche dei materiali impiegati

ELEMENT	SECTION	DIMENSION [mm]	STEEL GRADE		
DRIVE POST		Depth	155	Type	S420
		Width	107	f_y [Mpa] \geq	420
		Leg	50	f_u [Mpa] \geq	480
		Thickness	3	E [Gpa]	210
		Internal Radius	10		
END POST		Depth	105	Type	S420
		Width	107	f_y [Mpa] \geq	420
		Leg	35	f_u [Mpa] \geq	480
		Thickness	3	E [Gpa]	210
		Internal Radius	4		
MIDDLE POST		Depth	105	Type	S420
		Width	107	f_y [Mpa] \geq	420
		Leg	35	f_u [Mpa] \geq	480
		Thickness	3	E [Gpa]	210
		Internal Radius	4		
ELEMENT	SECTION	DIMENSION [mm]	STEEL GRADE		
RAIL		Depth	44	Type	S350
		Width	26	f_y [Mpa] \geq	350
		Leg	35.5	f_u [Mpa] \geq	420
		Thickness	1.8	E [Gpa]	210
		Internal Radius	3		
END RAIL		Depth	19	Type	S420
		Width	50	f_y [Mpa] \geq	420
		Leg	27.25	f_u [Mpa] \geq	480
		Thickness	2.25	E [Gpa]	210
		Internal Radius	3		
ELEMENT	SECTION	DIMENSION [mm]	STEEL GRADE		
MAIN BEAM 1		Depth	140	Type	S420
		Width	100	f_y [Mpa] \geq	420
		Thickness	2.25	f_u [Mpa] \geq	480
		Internal Radius	3.75	E [Gpa]	210

Dove:

f_y = limite di snervamento, f_u = limite di rottura, E =Modulo elastico.

Le normative di riferimento per le caratteristiche meccaniche dei materiali impiegati risultano essere:

- S420 → EN 10149:2013;
- S355 → EN 10025:2004;
- S350 → EN 10346:2009.

4.1. Bulloneria

I bulloni - conformi per le caratteristiche dimensionali alle norme UNI EN ISO 4016:2002 e UNI 5592:1968 devono appartenere alle sotto indicate classi della norma UNI EN ISO 898-1:2001.

Vite 8.8 – Dado 8	
Limite di Snervamento	$f_{yb} \geq 649 \text{ N/mm}^2$
Limite di rottura	$f_{tb} \geq 800 \text{ N/mm}^2$

4.2. Saldature

Eventuali saldature dell'acciaio dovranno avvenire con uno dei procedimenti all'arco elettrico codificati secondo la norma UNI EN ISO 4063:2001. È ammesso l'uso di procedimenti diversi purché sostenuti da adeguata documentazione teorica e sperimentale.

5. Analisi dei Carichi

5.1. Carichi permanenti portati definiti – G₁

I pesi propri strutturali vengono generati in automatico dal software di calcolo.

5.2. Carichi permanenti portati pienamente definiti – G₂

Sezione [mm]	Peso [N]	Peso [N/m ²]
2465mmx1134mm	339	121

Nel modello di calcolo i carichi sono stati applicati con carichi distribuiti linearmente coerentemente con il modello reale:

- cond.2 → G2 - pannelli fotovoltaici – elemento interno Ω $P_z = \text{Peso}/2$ [N]
- cond.2 → G2 - pannelli fotovoltaici – elemento esterno Ω $P_z = \text{Peso}/4$ [N]

5.3. Carichi accidentali – Azione del Vento

L'azione del vento viene determinata in accordo con il D.M. 17 gennaio 2018 – Norme Tecniche per le Costruzioni.

5.3.1. Pressione del vento

La pressione del vento, in riferimento al §3.3.4 delle NTC-18, è data dall'espressione:

$$P = q_r C_e C_p C_d$$

Dove:

- q_r è la pressione cinetica di riferimento di cui al §3.3.6 delle NTC-18;
- C_e è il coefficiente di esposizione di cui al §3.3.7 delle NTC-18;
- C_p è il coefficiente di pressione di cui al §3.3.8 delle NTC-18;
- C_d è il coefficiente dinamico di cui al §3.3.9 delle NTC-18.

Pressione del vento

Categoria di esposizione	III	-	Tab. 3.3.II	
Stow Wind Position				
Angolo tracking di riferimento	α	0	°	
Altezza Asse di Rotazione		1596	mm	
Velocità base di riferimento	$v_{b,0}$	25	m/s	Tab 3.3.1
Coefficiente di ritorno	C_r	1.001	-	Eq. 3.3.3
Coefficiente di altitudine	C_a	1.0	-	Eq. 3.3.1.b
Velocità di base del vento	v_b	25.0	m/s	Tab 3.3.1
Velocità di riferimento	v_r	25.0	m/s	Eq. 3.3.2
Densità dell'aria	ρ	1.213	kg·m ⁻³	ISO 2533:1975
Pressione cinetica di riferimento	q_r	0.380	kN/m ²	Eq. 3.3.6
Coefficiente di esposizione	$C_e(z)$	1.708	-	Eq. 3.3.7
Pressione del vento	$q_{p,z}$	0.648	kN/m²	Eq. 3.3.5
Working Wind Position				
"Go To Stow Wind Speed" [3 sec]	V_{stow}	17.2	m/s	
"Go To Stow Wind Speed" [10 min]	V_{stow}	11.6	m/s	ISO 4354:2009
Coefficiente di ritorno	C_r	1	-	*
Coefficiente di altitudine	C_a	1	-	*
Velocità di base del vento	v_b	11.6	m/s	Tab 3.3.1
Velocità di riferimento	v_r	11.6	m/s	Eq. 3.3.2
Densità dell'aria	ρ	1.213	kg·m ⁻³	ISO 2533:1975
Pressione cinetica di riferimento	q_r	0.081	kN/m ²	Eq. 3.3.6
Coefficiente di esposizione	$C_e(z)$	1.708	-	Eq. 3.3.7
Pressione del vento	$q_{p,z}$	0.138	kN/m²	Eq. 3.3.5

*uguali ad 1 perché la "Go To Stow Windspeed" è misurata

5.3.2. Coefficiente di pressione

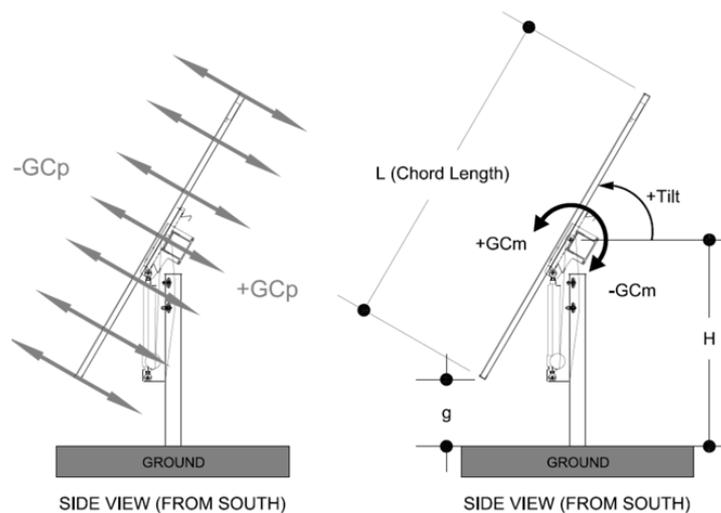
I coefficienti di pressione GCn sono stati ottenuti da studi in galleria del vento condotti da Rowan Williams Davies & Irwin Inc, meglio noto con il nome di RWDI. Valmont ha commissionato questo studio per determinare i carichi caratteristici del vento sul sistema 1P Ground Mounted Single-Axis Tracker System.

È stato realizzato un modello in scala, contenente nove file di moduli con un'inclinazione regolabile per i test a 0°, 5°, 10°, 20°, 30°, 45° e 60° per il sistema di inseguimento generico. Il modello della galleria del vento con lunghezza della corda di 1,96* m e lunghezza delle file di 30 m è stato riprodotto in scala 1:30.

*Ulteriori studi hanno consentito l'estensione dell'utilizzo dei coefficienti con gli opportuni coefficienti applicativi fino a corde di lunghezza pari a 2.8 m

L'immagine seguente rappresenta lo schema geometrico relativo a due dimensioni:

- L (Lunghezza della corda)
- H (altezza del centro di rotazione del tracker).



I dati della galleria del vento vengono presentati come coefficienti di pressioni o momento, come riportato nella formulazione seguente:

$$GC_p = \frac{P_{net}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2} , \quad GC_M = \frac{M_{torque} \text{ or } M_{overturning}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A \cdot L}$$

where

P_{net} , M_{torque} and $M_{overturning}$ are net pressure (normal to top surface of PV modules), moment about torque tube, and overturning moment at grade (bottom of post);

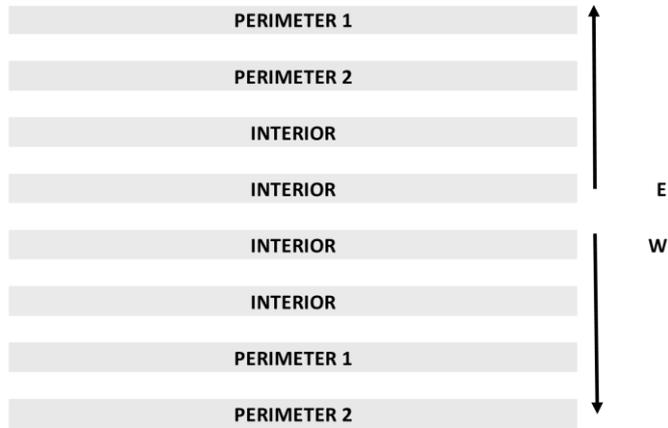
ρ is the air density;

V is the 3-second gust wind speed at mean tracker height (H) in open terrain;

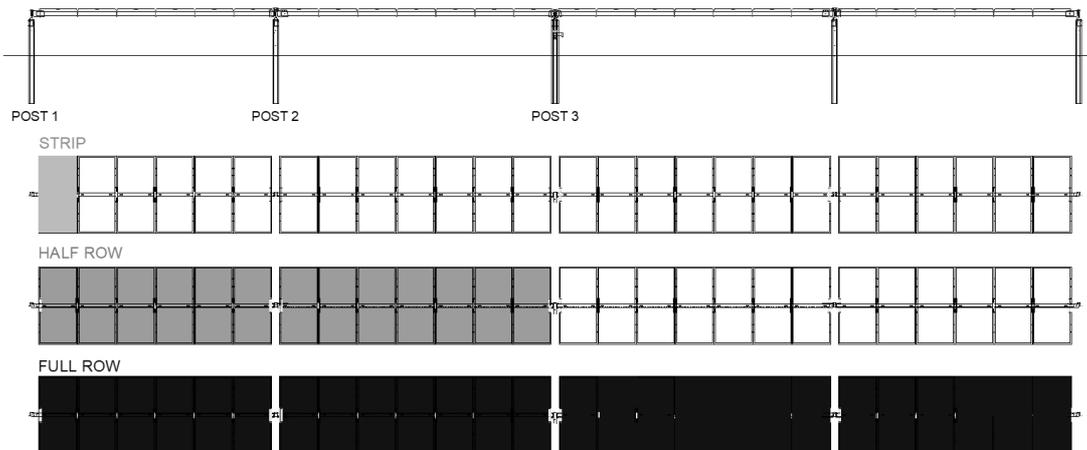
A is the area of a Strip, Post, Quarter of a Row, Half of a Row, or Full Row (see Figure 2);

L is the chord length (1.96 m).

Di seguito si riporta una schematizzazione delle aree del vento. Secondo RWDI, le prime due file (**perimeter 1&2**) sono sempre file esterne mentre le restanti sono da considerarsi file interne (**interior**) con un carico ridotto.



La seguente mappa delle zone indica le regioni in cui i carichi sono simili, e le corrispondenti distribuzioni di forza normali sui pannelli per i casi di carico di progetto.





Secondo quanto stabilito da RWDI è necessario sommare i coefficienti statici con quelli dinamici, come riportato nelle formulazioni seguenti:

$$F_N = q_z \cdot (GC_{P_{Static}} \pm GC_{P_{Dynamic}}) \cdot A$$

$$M_{torque} \text{ or } M_{overturning} = q_z \cdot (GC_{M_{Static}} \pm GC_{M_{Dynamic}}) \cdot A \cdot L$$

where

F_N , M_{torque} and $M_{overturning}$ are normal force, moment about the torque tube, and overturning moment at grade;
 q_z is velocity pressure evaluated at height z at the centroid of the area, A , for selected exposure

I coefficienti di pressione vengono raggruppati in quattro schemi diversi per ogni tipo di elemento (vedasi immagine precedente):

- **WL0:** Schema di carico per POST 1; → **END POST**
- **WL1:** Schema di carico per POST 2 – POST 3 → **MIDDLE & DRIVE POST**
- **WL2:** Schema di carico per TUBES → **TUBES**
- **WL3:** Schema di carico per per MODULE SUPPORT → **RAILS.**

La tabella di seguito mostra la corrispondenza tra aree tributarie e singoli elementi:

Scheme Load	Component	TRIBUTARY AREA	
		Cp	Cm
WL0	End Post	Post 1	-
WL1	Middle Post	Post 2-3	-
	Drive post	Post 2-3	Full Row
WL2	Tube 1-2	Average (Post 1 - Post 2-3)	Half Row
	Tube2-3	Postb 2-3	Half Row
WL3	Rail	Strip	Strip

I coefficienti statici e dinamici sopravento e sottovento devono essere combinati secondo le seguenti percentuali considerando 4 diverse condizioni (wind cases):

WIND CASES	Downforce		Uplift		POS/NEG Torque	
	Static (NEG)	Dynamic (NEG)	Static (POS)	Dynamic (POS)	Static	Dynamic
CASE 1	100%	90%	--	--	85%	50%
	--	--	100%	90%	85%	50%
CASE 2	85%	50%	--	--	100%	80%
	--	--	85%	50%	100%	80%
CASE 3	100%	--	--	--	85%	--
	--	--	100%	--	85%	--
CASE 4	85%	--	--	--	100%	--
	--	--	85%	--	100%	--

Dovendo tenere in considerazione le combinate in percentuale statico + dinamico per i vari componenti e le condizioni di carico dettate dalla norma, per la progettazione degli elementi saranno utilizzati i seguenti **CASI DI CARICO**:

Wind case \ Element	WL0: END POST	WL1: POSTS	WL2: TUBES	WL3: RAILS
Case 1_downpush	WL0_C1_down	WL1_C1_down	WL2_C1_down	***
Case 1_uplift	WL0_C1_uplfit	WL1_C1_uplfit	WL2_C1_uplfit	***
Case 2_downpush	**	WL1_C2_down	WL2_C2_down	***
Case 2_uplift	**	WL1_C2_uplfit	WL2_C2_uplfit	***
Case 3_downpush	WL0_C3_down	WL1_C3_down	WL2_C3_down	WL3_C3_down
Case 3_uplift	*	*	*	WL3_C3_uplift
Case 4_downpush	**	WL1_C4_down	WL2_C4_down	WL3_C4_down
Case 4_uplift	**	*	*	WL3_C4_uplift

*il caso neve è superiore rispetto al caso vento uplift, quindi viene trascurato per questo caso di carico,

** questi casi massimizzano i coefficienti di coppia POS/NEG che non sono il caso peggiore nella progettazione di questi elementi.

*** I coefficienti dinamici non devono essere presi in considerazione per la progettazione di questi elementi.

Nelle tabelle seguenti sono riportati tutti i coefficienti di pressione che vengono utilizzati per i calcoli delle strutture secondo quanto spiegato di sopra.

			CASE 1				CASE 2			
Stow Wind Position			G _{CP}		G _{CM}		G _{CP}		G _{CM}	
Tilt angle	Wind Zone	Element	Uplift	Downforce	Uplift	Downforce	Uplift	Downforce	Uplift	Downforce
0	EW1	WL0	-1.145	0.832	0.000	0.000	-0.767	0.538	0.000	0.000
0	EW1	WL1	-1.145	0.803	0.074	0.075	-0.767	0.513	0.088	0.090
0	EW1	WL2	-1.145	0.818	0.092	0.093	-0.767	0.525	0.111	0.113
0	EW1	WL3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Working Wind Position			G _{CP}		G _{CM}		G _{CP}		G _{CM}	
Tilt angle	Wind Zone	Element	Uplift	Downforce	Uplift	Downforce	Uplift	Downforce	Uplift	Downforce
55	EW1	WL0	-2.398	2.201	0.000	0.000	-1.783	1.621	0.000	0.000
55	EW1	WL1	-2.084	2.029	0.053	0.034	-1.516	1.475	0.065	0.060
55	EW1	WL2	-2.241	2.115	0.067	0.062	-1.649	1.548	0.085	0.076
55	EW1	WL3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Stow Wind Position			CASE 3				CASE 4			
			G_{CP}		G_{CM}		G_{CP}		G_{CM}	
Tilt angle	Wind Zone	Element	Uplift	Downforce	Uplift	Downforce	Uplift	Downforce	Uplift	Downforce
0	EW1	WL0	0.000	0.255	0.000	0.000	0.000	0.217	0.000	0.000
0	EW1	WL1	0.000	0.226	0.000	0.069	0.000	0.192	0.000	0.081
0	EW1	WL2	0.000	0.241	0.000	0.085	0.000	0.204	0.000	0.100
0	EW1	WL3	-0.561	0.406	0.130	0.131	-0.477	0.345	0.153	0.154
Working Wind Position			G_{CP}		G_{CM}		G_{CP}		G_{CM}	
Tilt angle	Wind Zone	Element	Uplift	Downforce	Uplift	Downforce	Uplift	Downforce	Uplift	Downforce
55	EW1	WL0	0.000	1.351	0.000	0.000	0.000	1.148	0.000	0.000
55	EW1	WL1	0.000	1.179	0.000	0.044	0.000	1.002	0.000	0.052
55	EW1	WL2	0.000	1.265	0.000	0.054	0.000	1.075	0.000	0.063
55	EW1	WL3	-2.415	2.068	0.192	0.149	-2.053	1.758	0.226	0.176

5.4. Carichi accidentali – Azione della Neve

Il carico da neve viene determinato in accordo con il paragrafo §3.4.1 del D.M. 17 gennaio 2018 – Norme Tecniche per le Costruzioni. Il carico provocato dalla neve sulle coperture sarà valutato mediante la seguente espressione:

Dove:

q_{sk} è il valore di riferimento del carico della neve al suolo, di cui al §3.4.3 delle NTC-18;

u_i è il coefficiente di forma di cui al §3.4.3 delle NTC-18;

C_e è il coefficiente di esposizione di cui al §3.4.4 delle NTC-18;

C_t è il coefficiente termico di cui al §3.4.5 delle NTC-18.

AZIONE DELLA NEVE

Stow Snow Position

Angolo tracking di riferimento	α	55	°	
Altitudine	a_s	113	m	
Valore di riferimento della neve	q_{sk}	1500.0	N/m ²	§3.4.2
Coefficiente di esposizione	C_e	1	-	Tab. 3.4.1
Coefficiente termico	C_t	1	-	§3.4.5
Coefficiente di forma	μ_i	0.13	-	Tab. 3.4.II
Carico neve	q_s	200	N/m ²	Eq. 3.4.1
Carico neve sul torque tube	q_s	493	N/m	
Working Snow Position				
Spessore accumulo neve di innesco		30	mm	
Carico neve	q_s	67	N/m ²	Eq. 7-7.1 [ASCE 7-16]
Carico neve sul torque tube	q_s	165	N/m	
Carico neve max*	q_s	493	N/m	

*da utilizzare in modo conservativo su tutti gli angoli di tracking

5.5. Carico Termico

Il carico termico viene calcolato in modo automatico dal software strutturale attraverso la seguente espressione lineare:

$$\Delta L = \alpha \cdot \Delta T \cdot L = 12 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta T \cdot L$$

Nel modello strutturale gli spostamenti vengono generati in relazione alle forze. A favore della sicurezza i carichi termici considerati nel calcolo sono i seguenti:

$$+\Delta T = +30^{\circ}C$$

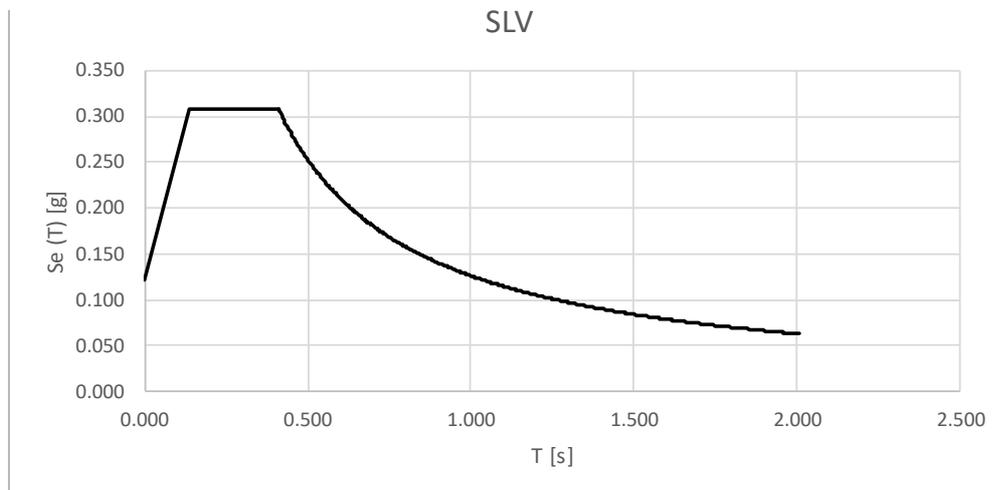
$$-\Delta T = -30^{\circ}C$$

5.6. Spettro di risposta per l'analisi sismica

Spettro in accordo con TU 2018

Regione	Emilia Romagna	-	
Latitudine	44.9518	°	
Longitudine	9.7172	°	
V_N	50	anni	Vita nominale
Classe d'uso	II		Classe d'uso
C_u	1.0	-	Coefficiente d'uso
V_r	50		Tempo di riferimento
Categ	B	-	Tipo di Terreno
q	1	-	Fattore di comportamento (classe di duttilità impostata bassa)
α_u/α_1	1		Fattore di duttilità per sisma orizzontale
K_r	1		Fattore riduttivo regolarità in altezza
K_w	1		Fattore riduttivo per la presenza di setti
T	T1	-	Categoria Topografica
ζ	5	%	Smorzamento viscoso
η	1	-	

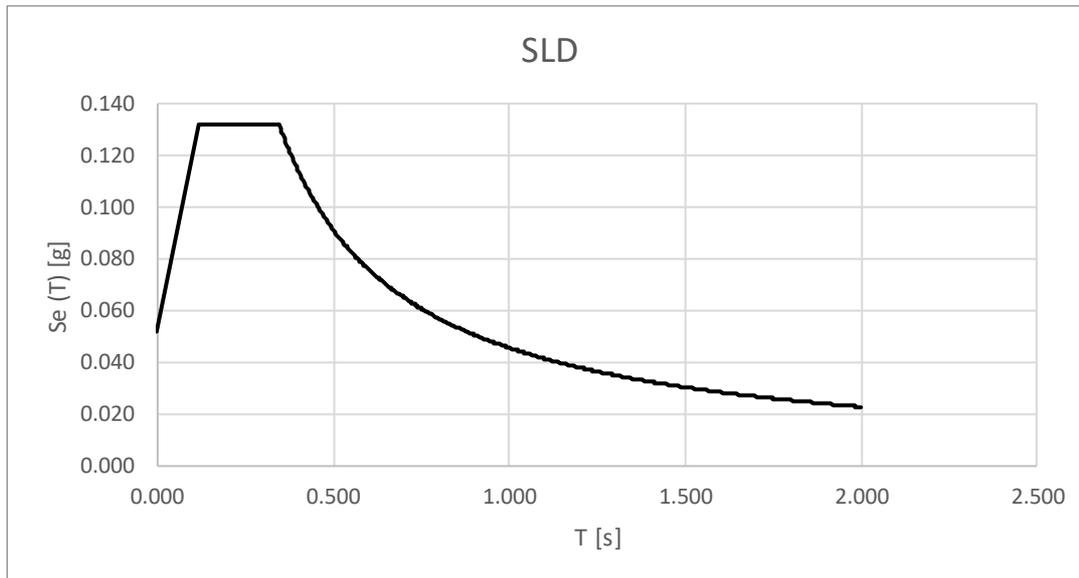
TU 2018 SLV H



a_g/g	0.101	m/s^2
F_0	2.538	-
T_c^*	0.291	s
P_{vr}	0.100	%
T_r	475.000	anni
S_T	1.000	-
S_S	1.200	-
S	1.200	-

T_0	0.000
T_B	0.137
T_C	0.410
T_D	2.006
$Se(0 < T < T_b)$	0.122
$Se(T_b \leq T < T_c)$	0.309
$Se(T_c \leq T < T_d)$	0.309
$Se(T_d \leq T)$	0.063
$Se(T4s)$	0.063

TU 2018 SLD H



a_g/g	0.043	m/s^2
F_0	2.543	-
Tc^*	0.235	s
Pvr	0.630	%
Tr	50.000	anni
S_T	1.000	-
S_S	1.200	-
S	1.200	-

T_0	0.000
T_B	0.115
T_C	0.345
T_D	1.773
$Se (0 < T < T_b)$	0.052
$Se (T_b \leq T < T_c)$	0.132
$Se (T_c \leq T < T_d)$	0.132
$Se (T_d \leq T)$	0.026
$Se (T4s)$	0.023

6. Combinazioni dei carichi e criteri di verifica

La combinazione dei carichi agenti sulla struttura e la conseguente verifica strutturale viene fatta in accordo con quanto prescritto dal DM 17/01/18. La relazione fondamentale per la verifica è data dalla seguente espressione

$$E_d \leq R_d = R_k / \gamma_{m0}$$

In accordo con il DM 17/01/18 per le verifiche è stato considerato:

- $R_k \rightarrow$ Valore caratteristico di Resistenza;
- $\gamma_{m0} = 1,05 \rightarrow$ Coefficiente parziale di resistenza di Resistenza per acciaio;

In accordo al cap. 02 del DM 17/01/18, ed in merito alle verifiche strutturali vengono utilizzati i coefficienti parziali riportati in Tabella 2.6.I colonna A1 STR.

Combinazione per le verifiche allo SLU di resistenza

$$E_d = \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_Q \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

Combinazione per le verifiche per azioni dovute da SISMA (SLV e SLD)

$$E_d = \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + E + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

Combinazione per le verifiche allo SLS - rare

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{1,i} \cdot Q_{k,i}$$

Combinazione per le verifiche allo SLS - frequenti

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{1,i} \cdot Q_{k,i} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

Combinazione per le verifiche allo SLS – quasi perm.

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

In cui i parametri sono indicati nelle tabelle sottostanti:

Tab. 2.6.I – Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni nelle verifiche SLU

		Coefficiente	EQU	A1	A2
		γ_F			
Carichi permanenti G_1	Favorevoli	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevoli		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti non strutturali $G_2^{(1)}$	Favorevoli	γ_{G2}	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevoli		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevoli	γ_{Qi}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevoli		1,5	1,5	1,3

⁽¹⁾ Nel caso in cui l'intensità dei carichi permanenti non strutturali o di una parte di essi (ad es. carichi permanenti portati) sia ben definita in fase di progetto, per detti carichi o per la parte di essi nota si potranno adottare gli stessi coefficienti parziali validi per le azioni permanenti.

Tab. 2.5.I – Valori dei coefficienti di combinazione

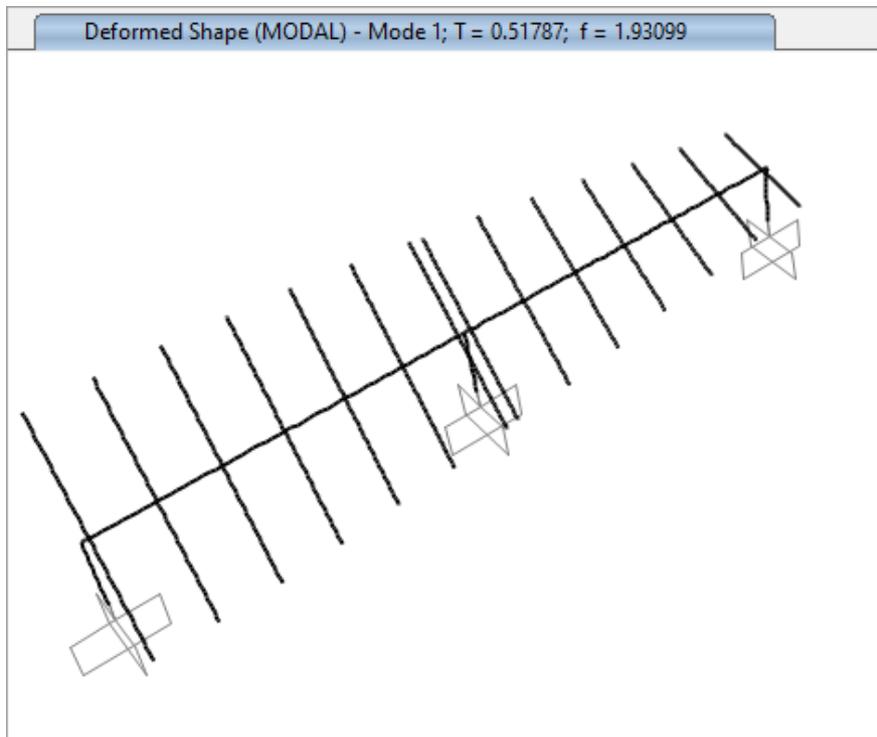
Categoria/Azione variabile	Ψ_{0j}	Ψ_{1j}	Ψ_{2j}
Categoria G – Rimesse, parcheggi ed aree per il traffico di veicoli (per autoveicoli di peso > 30 kN)	0,7	0,5	0,3
Categoria H - Coperture accessibili per sola manutenzione	0,0	0,0	0,0
Categoria I – Coperture praticabili	da valutarsi caso per caso		
Categoria K – Coperture per usi speciali (impianti, eliporti, ...)			
Vento	0,6	0,2	0,0
Neve (a quota ≤ 1000 m s.l.m.)	0,5	0,2	0,0
Neve (a quota > 1000 m s.l.m.)	0,7	0,5	0,2
Variazioni termiche	0,6	0,5	0,0

7. Analisi Modale

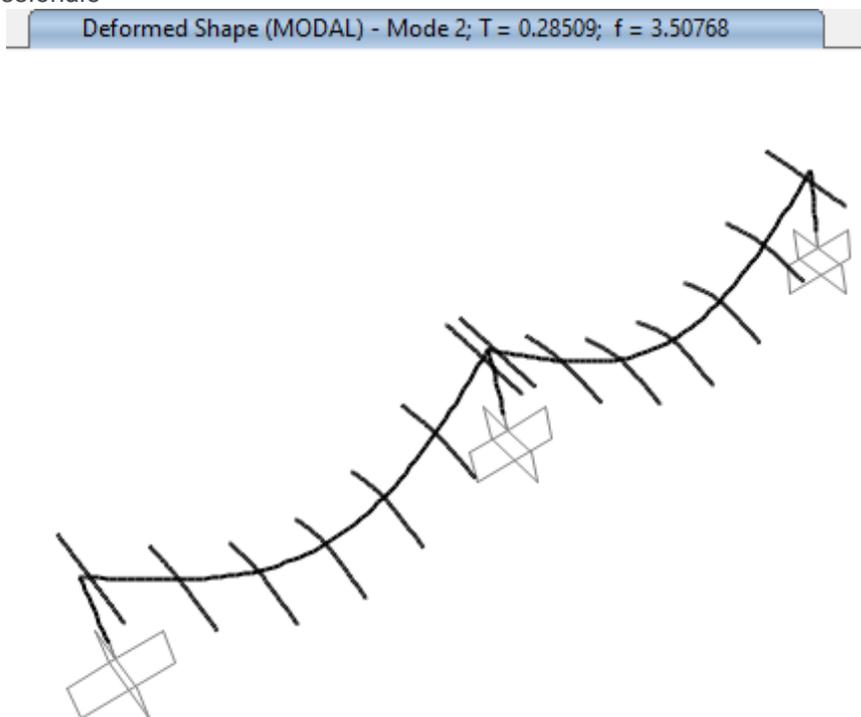
Con lo scopo di definire al meglio i coefficienti dinamici, viene riportata la modale effettuata su un modello semplificato.

OutputCase	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ
Text	-	Sec	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MODAL	1	0.52	0%	1%	0%	0%	1%	0%	86%	0%	0%	86%	0%	0%
MODAL	2	0.29	0%	0%	76%	0%	1%	76%	0%	0%	0%	86%	0%	0%
MODAL	3	0.29	0%	0%	0%	0%	1%	76%	0%	55%	0%	86%	55%	0%
MODAL	4	0.20	0%	27%	0%	0%	27%	76%	7%	0%	3%	93%	55%	3%
MODAL	5	0.17	0%	67%	0%	0%	94%	76%	1%	0%	5%	94%	55%	8%
MODAL	6	0.15	98%	0%	0%	98%	94%	76%	0%	0%	1%	94%	55%	8%
MODAL	7	0.14	1%	1%	0%	99%	95%	76%	0%	0%	35%	94%	55%	44%
MODAL	8	0.12	0%	1%	0%	99%	96%	76%	0%	0%	27%	94%	55%	71%
MODAL	9	0.11	0%	1%	0%	99%	97%	76%	1%	0%	13%	96%	55%	84%
MODAL	10	0.11	0%	0%	0%	99%	97%	76%	0%	0%	0%	96%	55%	84%
MODAL	11	0.11	0%	0%	0%	99%	97%	76%	0%	9%	0%	96%	64%	84%
MODAL	12	0.10	0%	0%	0%	99%	97%	76%	0%	0%	3%	96%	64%	87%
MODAL	13	0.10	0%	1%	0%	99%	98%	76%	1%	0%	4%	97%	64%	91%
MODAL	14	0.10	0%	0%	0%	99%	98%	76%	0%	0%	0%	97%	64%	92%
MODAL	15	0.10	0%	0%	0%	99%	98%	76%	0%	0%	1%	97%	64%	93%
MODAL	16	0.10	0%	0%	0%	99%	98%	76%	0%	0%	0%	97%	64%	93%
MODAL	17	0.09	0%	0%	0%	99%	98%	76%	0%	0%	0%	97%	64%	93%
MODAL	18	0.06	1%	0%	0%	100%	98%	76%	0%	0%	0%	97%	64%	93%
MODAL	19	0.07	0%	2%	0%	100%	100%	76%	3%	0%	6%	100%	64%	100%
MODAL	20	0.08	0%	0%	10%	100%	100%	86%	0%	0%	0%	100%	64%	100%

- Modo Torsionale



- Modo Flessionale



8. Classificazione delle sezioni

Di seguito si riassumono le classificazioni delle sezioni effettuate in accordo alle prescrizioni riportate in tabella 4.2.1 e 4.2.2 delle NTC-18.

Classification Summary

	DATABASE	e [-]	$c_{bending}$ [mm]	Bending Class[-]	$c_{int,c}$ [mm]	Int compr Class [-]	$c_{ext,c11}$ [mm]	Ext compr,1 Class [-]	$c_{ext,c12}$ [mm]	Ext compr,2 Class [-]	Classification [-]
END POST	105x107x35x35x3mmx420Mpa	0.75	91	1	93	3	28	3	28	3	C3
MIDDLE POST	105x107x35x35x3mmx420Mpa	0.75	91	1	93	3	28	3	28	3	C3
DRIVE POST	155x107x50x50x3mmx420Mpa	0.75	129	1	81	2	37	4	37	4	C4
MAIN BEAM 1	140x100x2.25mmx420Mpa	0.75	128	2	88	4	-	-	-	-	C4
RAIL	44x26x35.5x21x1.8mmx350Mpa	0.82	34.4	1	16.4	1	30.7	4	16.2	3	C4
END RAIL	19x50x27.25x27.25x2.25mmx420	0.75	8.5	1	39.5	1	22	3	22	3	C3

9. Verifica di resistenza strutturale

9.1. Criteri di verifica

Tutte le verifiche a presso-flessione vengono condotte in accordo all'Euro Codice EN 1993-1-1:2005.

Nei seguenti paragrafi le equazione saranno così nominate:

- **EQ. 1:**
$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{yEd}}{\chi_{LT} \frac{M_{yRk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{zEd}}{\gamma_{M1}} \leq 1$$
 [Eq. 6.61]

- **EQ. 2:**
$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{yEd}}{\chi_{LT} \frac{M_{yRk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{zEd}}{\gamma_{M1}} \leq 1$$
 [Eq. 6.62]

- **EQ. 3:**
$$\frac{T_{1-2}}{V_{bx,Rd}}$$

- **EQ. 4:**
$$\frac{T_{1-3}}{V_{by,Rd}}$$

- **EQ. 5:**
$$\sqrt{\sigma_{M_{yEd}}^2 + \sigma_{M_{zEd}}^2 - \sigma_{M_{yEd}} * \sigma_{M_{zEd}} + 3 * \tau^2} \leq \sigma_y$$

9.2. Capacità Elementi

Le capacità degli elementi sono state valutate in accordo al EN1993-1-3. Si riportano di seguito, tutte le capacità per i profili in esame:

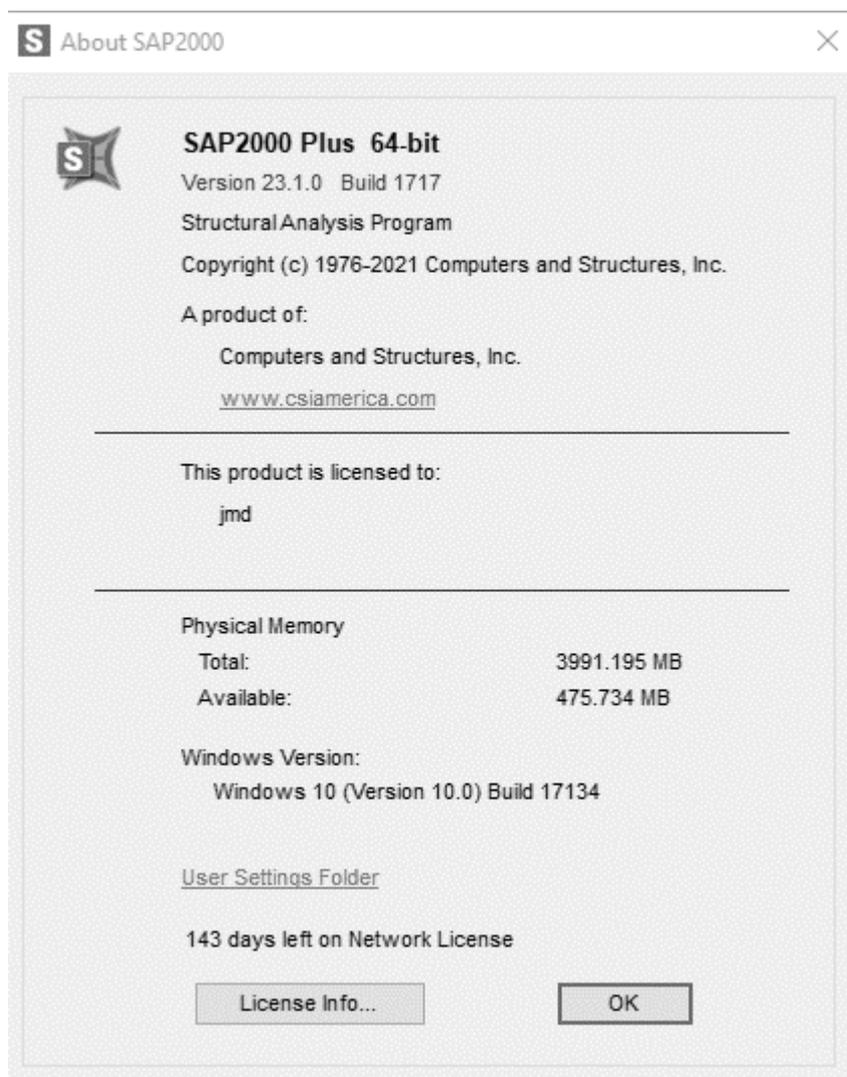
- **EP** = End Post
- **MP** = Middle Post
- **DP** = Drive Post
- **MB1** = Main Beam (central)
- **MB2** = Main Beam (lateral)
- **RL** = Rail
- **ERL** = End Rail
- **LRL** = Long Rail
- **CL** = Cantilever (module support beam)

Capacities Summary 1V

	EP	MP	DP	MB1	RL	ERL
$N_{c,Rd} = \chi_{LT} \times N_{c,R} / \gamma_{M1}$ [N]	56203	56203	102100	50100	86746	102732
$V_{bx,Rd} = V_{b,R} / \gamma_{M1}$ [N]	137499	137499	202207	131700	27781	14964
$V_{by,Rd} = V_{b,R} / \gamma_{M1}$ [N]	114531	114531	130519	103548	30913	49677
$M_{x,Rd} = \chi_{LT} \times M_{x,R} / \gamma_{M1}$ [N m]	7263	7263	18819	17006	800	716
$M_{y,Rd} = M_{y,R} / \gamma_{M1}$ [N m]	13668	13668	17689	14281	821	1897
$T_{Rd} = N_{c,R} / \gamma_{M1}$ [N m]	0	0	0	15051	0	0

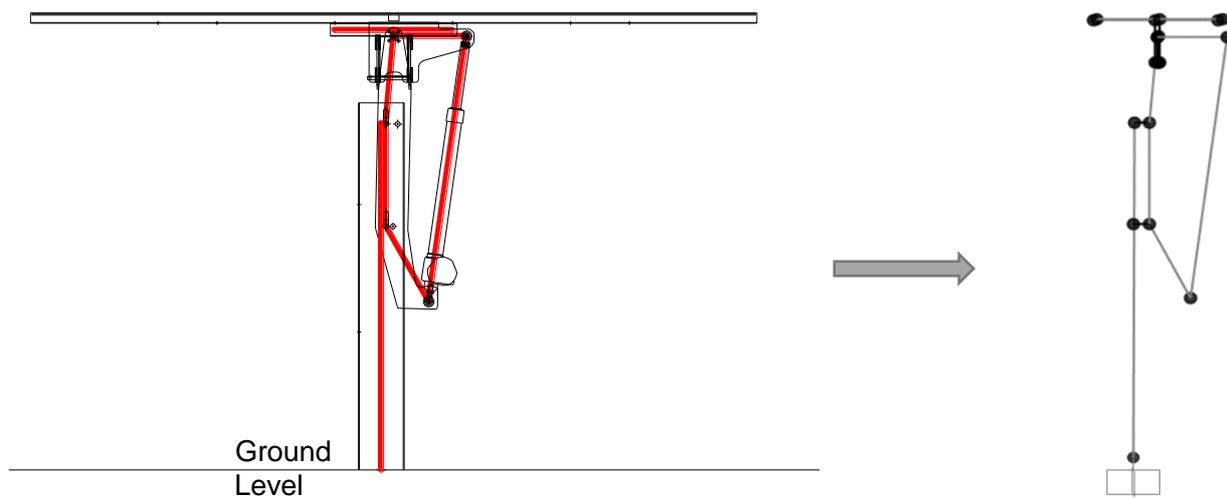
9.3. Software di Calcolo

Tutti i calcoli di seguito riportati sono basati sui risultati ottenuti dal modello FEM effettuato con la licenza software di seguito riportata.



9.4. Schematizzazione strutturale

La struttura è composta da n telai mono-direzionali composti da pali e travi. Sulle travi sono posizionati dei rail che sostengono i moduli fotovoltaici. I telai sono incastrati alla base e si sviluppano lungo la direzione x.. Di seguito uno schema della vista laterale della struttura. In rosso è riportato lo schema utilizzato per realizzare la geometria del modello FEM.



9.5. Identificazione dei frame

La nomenclatura dei principali elementi, partendo da sinistra verso destra, è stata assegnata come di seguito:

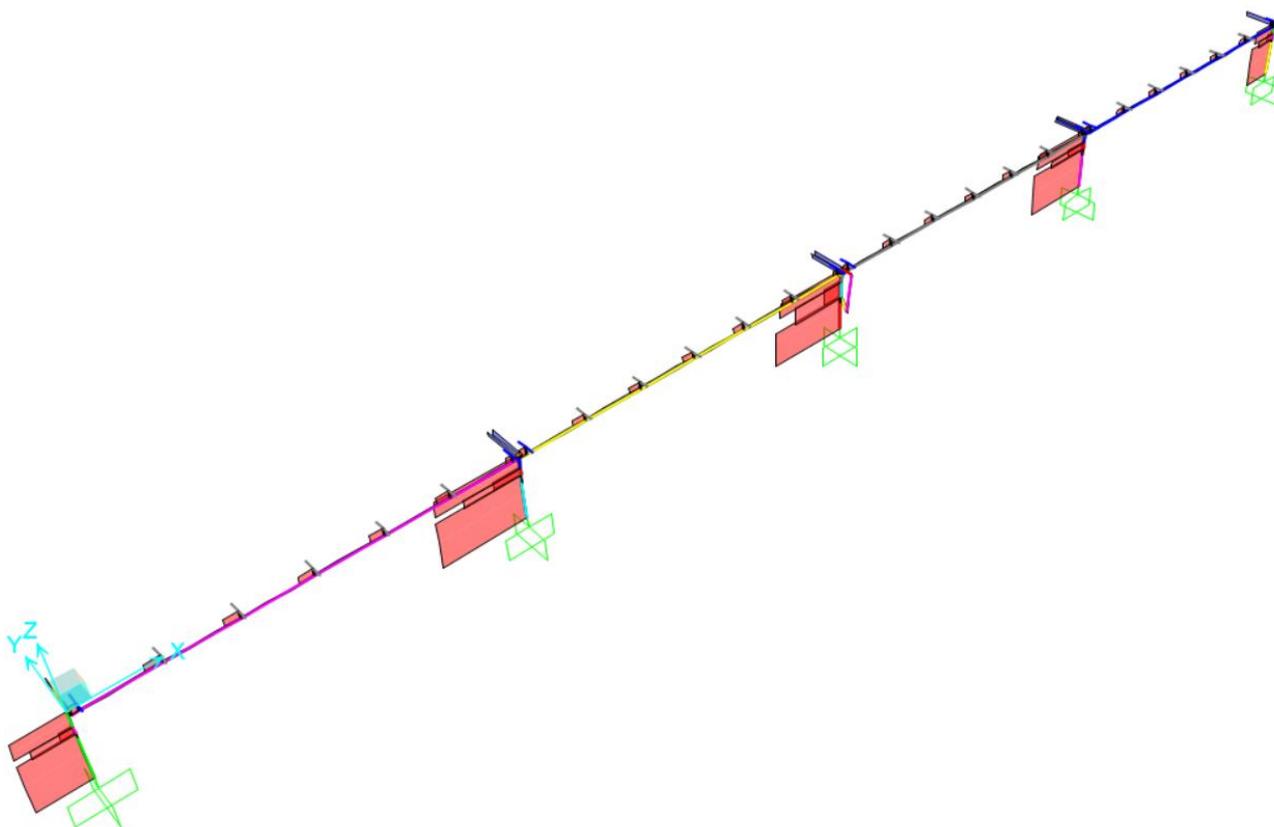
- **Posts:** "DP-LP_X_EXT/EXTB/INTA/INTB" dove "X" va da "1" a "1+numero di campate" con incremento unitario;
- **Main Beam:** "MB_X_EXT/EXTB/INTA/INTB" dove "X" va da "1" a "numero di campate" con incremento unitario;
- **Rail:** Ogni frame si compone di due elementi con denominazione "RL-ERL_X_EXT/EXTB/INTA/INTB" dove "X" va da "1" a "(numero di pannelli +1) x (numero campate) x (2)" con incremento unitario.
- **Support Beam:** Ogni frame si compone di due elementi con denominazione "CL_X_EXT/EXTB/INTA/INTB" dove "X" va da "1" a "8" con incremento unitario.

9.6. Sollecitazioni di Calcolo

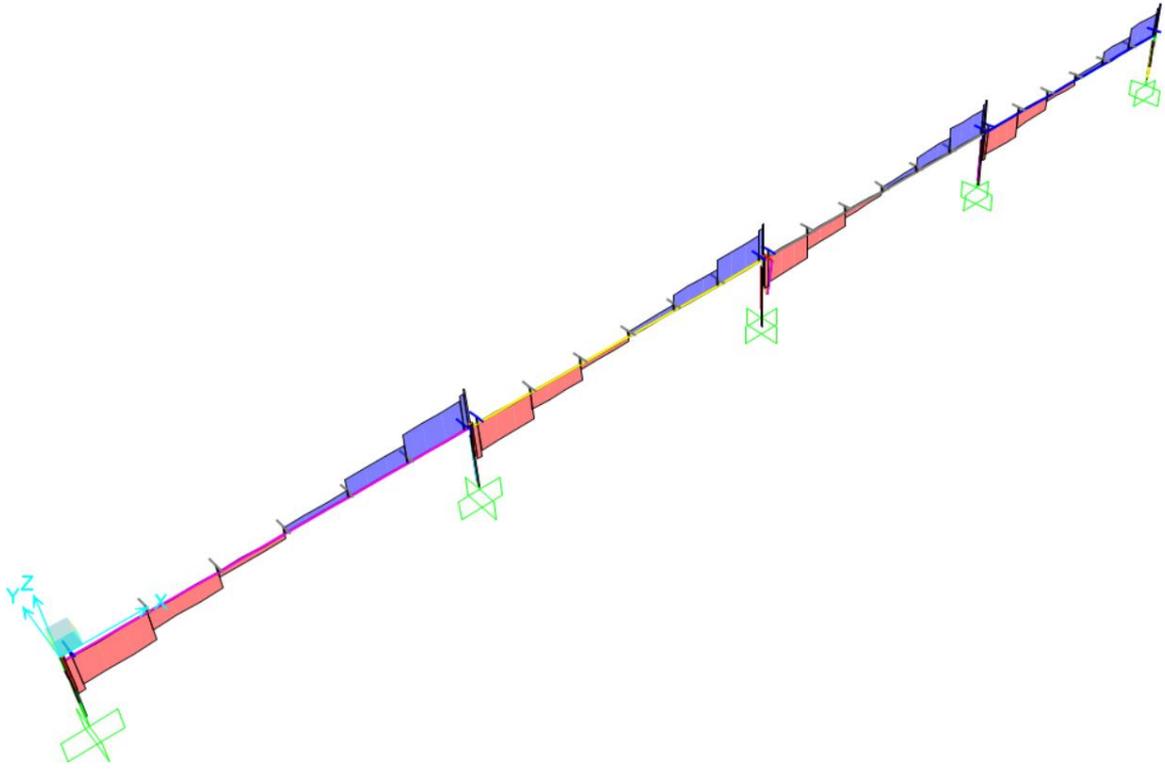
Nel seguito si riportano gli andamenti delle principali sollecitazioni (vedasi §6.1 della presente) ed per le seguenti configurazioni:

9.6.1. Stow position - $\alpha = 0^\circ$

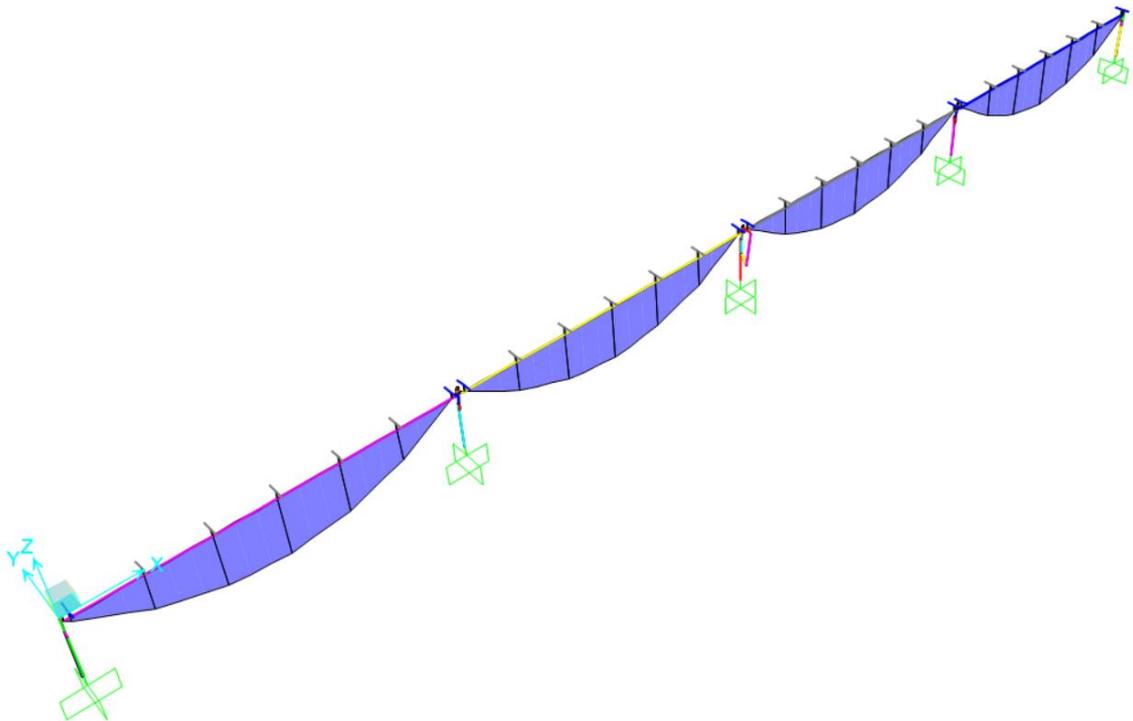
Axial Force Diagram (ULS_08)



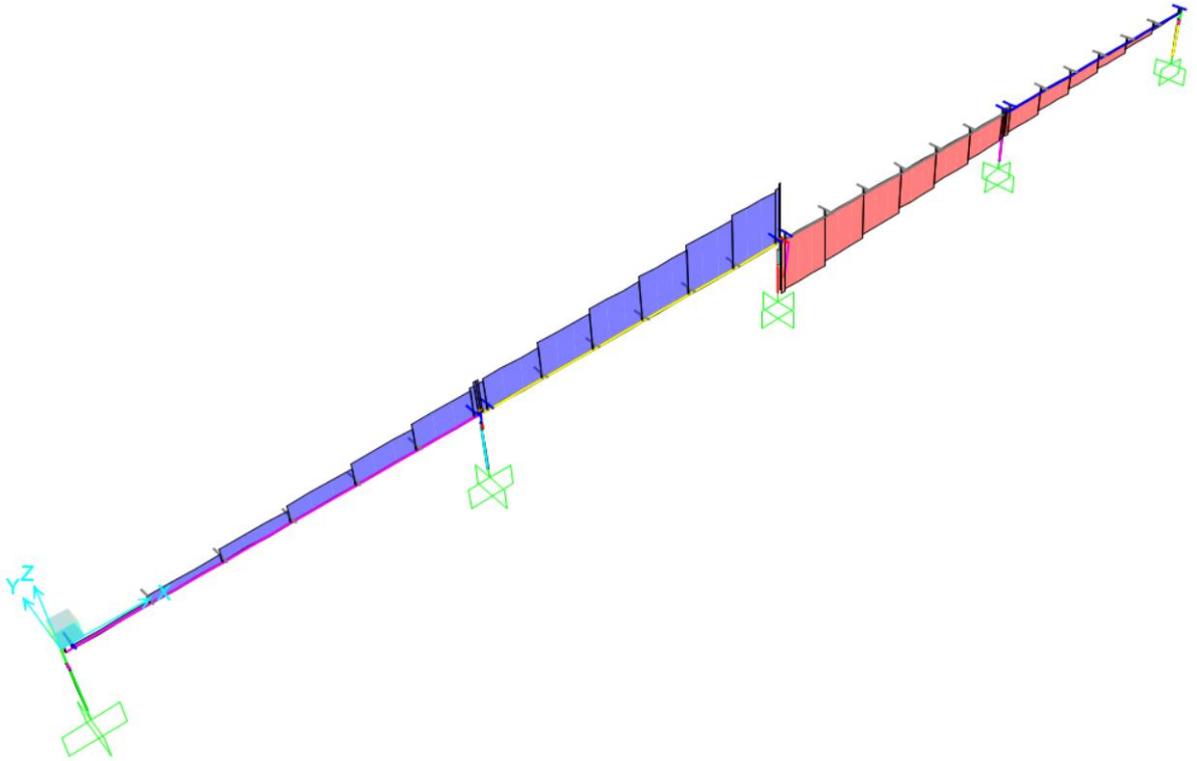
Shear Force 2-2 Diagram (ULS_08)



Moment 3-3 Diagram (ULS_08)

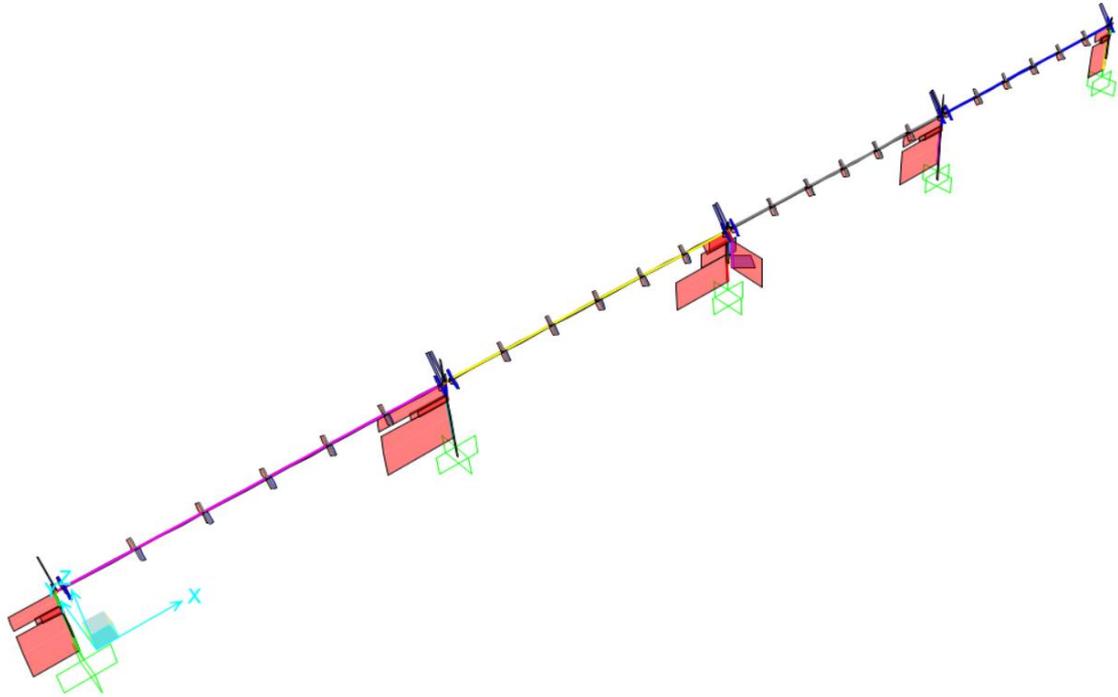


Torsion Diagram (ULS_19)

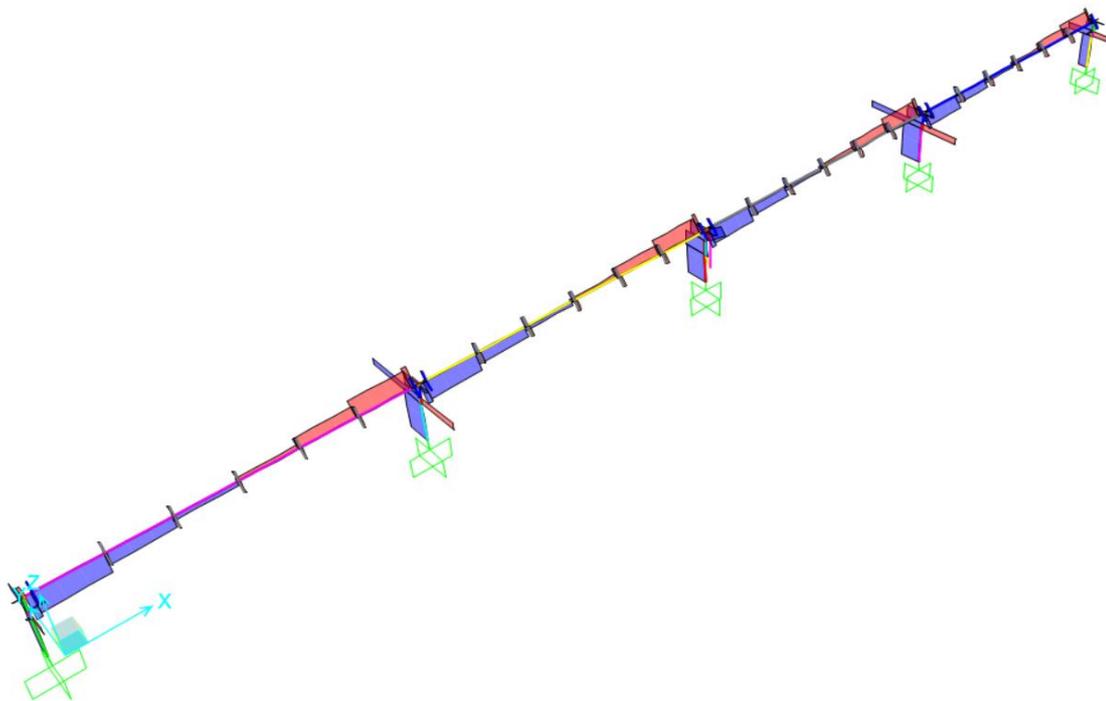


9.6.2. Working position $\alpha = 55^\circ$

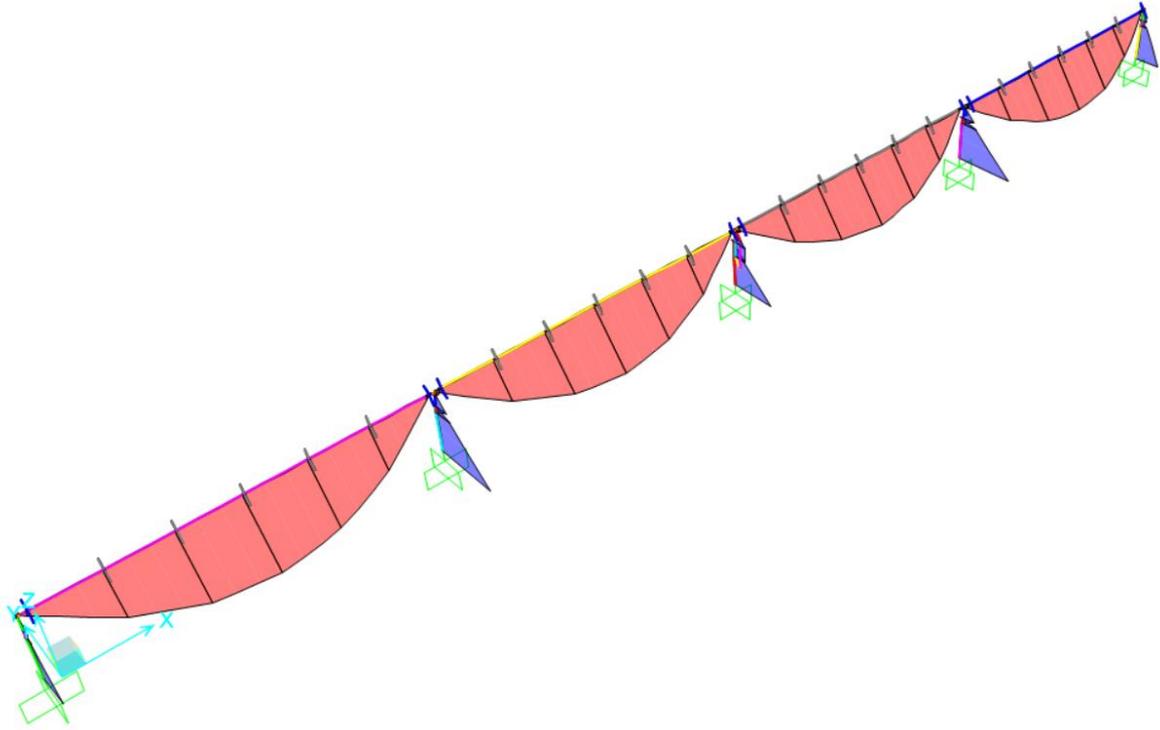
Axial Force Diagram (ULS_08)



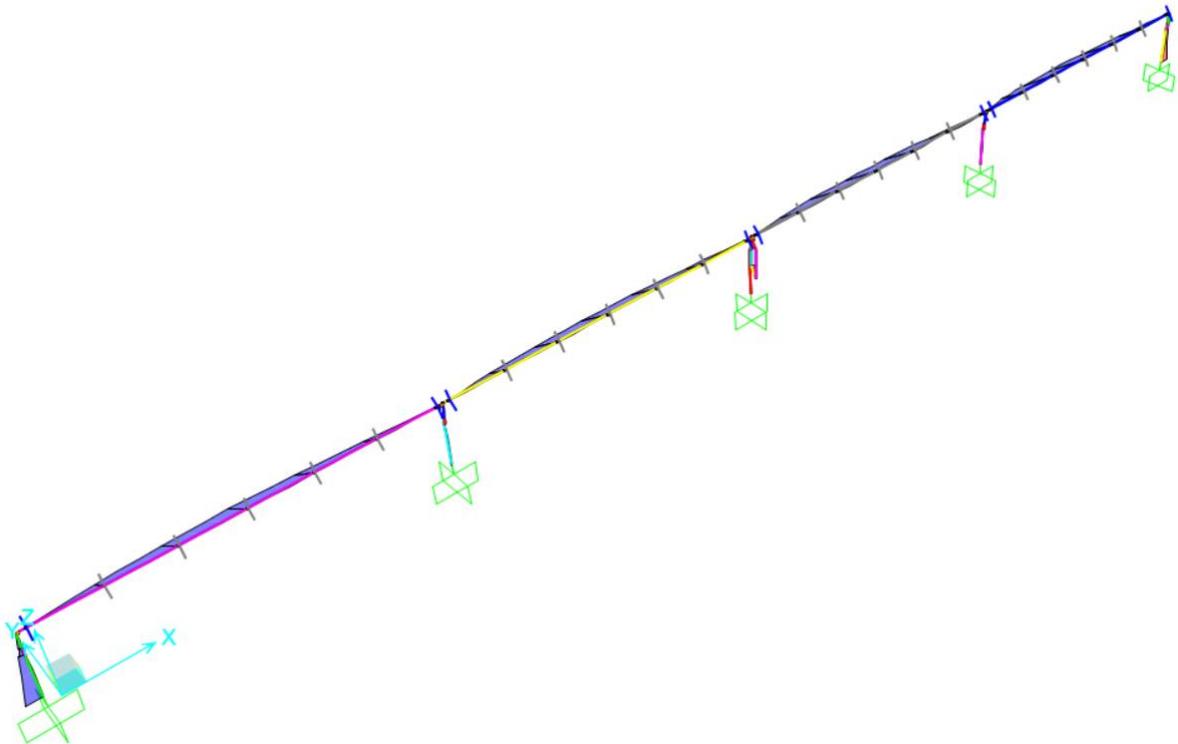
Shear Force 3-3 Diagram (ULS_08)



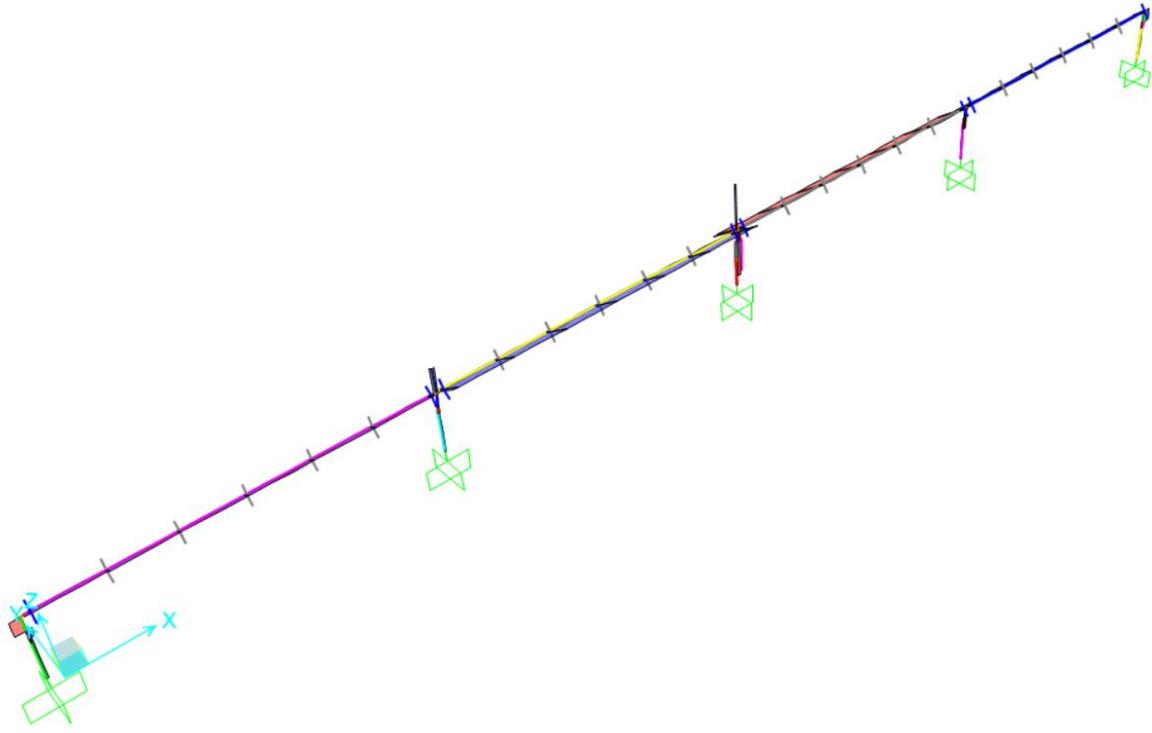
Moment 2-2 Diagram (ULS_08)



Moment 3-3 Diagram (ULS_08)



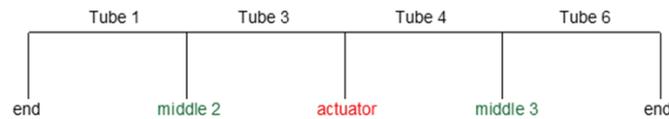
Torsion Diagram (ULS₁₉)



9.7. Verifiche ULS

Le capacità con le quali sono state effettuate le verifiche riportate di seguito sono indicate al §9.2.

Di seguito vengono riportati i tassi di sfruttamento massimi per ogni elemento, vedasi immagine che segue, in riferimento alle equazioni riportate al §9.1 della presente.



Tubes

Component	Design Section	f_y (MPa)	DCR
East-West Edge 1, Tube 1	140x100x2.25mmx420Mpa	420	0.98
East-West Edge 1, Tube 2	N/A		
East-West Edge 1, Tube 3	140x100x2.25mmx420Mpa	420	0.99
East-West Edge 1, Tube 4	140x100x2.25mmx420Mpa	420	0.99
East-West Edge 1, Tube 5	N/A		
East-West Edge 1, Tube 6	140x100x2.25mmx420Mpa	420	0.98

Posts

Component	Design Section	f_y (MPa)	DCR
East-West, Edge 1, Post 1 (End)	105x107x35x35x3mmx420Mpa	420	0.80
East-West, Edge 1, Post 2 (Middle 1)	N/A		
East-West, Edge 1, Post 3 (Middle 2)	105x107x35x35x3mmx420Mpa	420	0.97
East-West, Edge 1, Post 4 (Drive)	155x107x50x50x3mmx420Mpa	420	0.79
East-West, Edge 1, Post 5 (Middle 3)	105x107x35x35x3mmx420Mpa	420	0.97
East-West, Edge 1, Post 6 (Middle 4)	N/A		
East-West, Edge 1, Post 7 (End)	105x107x35x35x3mmx420Mpa	420	0.80

Rail - End Rail

Component	Design Section	f_y (MPa)	DCR
Rail	44x26x35.5x21x1.8mmx350Mpa	350	0.87
End Rail	19x50x27.25x27.25x2.25mmx420Mpa	420	0.49

9.7.1. Modello A

TUBES

Model A	FRAME	COMBO	EQUATION	N _{Ed} [N]	V _{Ed2} [N]	V _{Ed3} [N]	T _{Ed} [Nm]	M _{Ed2} [Nm]	M _{Ed3} [Nm]	DCR _{MAX} [-]
East-West Edge 1, Tube 1	MB_1	ULS_57	EQ_5	191	-1386	0	1556	0	16580	0.98
East-West Edge 1, Tube 3	MB_2	ULS_57	EQ_5	281	1644	0	5913	0	15240	0.99
East-West Edge 1, Tube 4	MB_3	ULS_57	EQ_5	281	-1603	0	-5913	0	15271	0.99
East-West Edge 1, Tube 6	MB_4	ULS_57	EQ_5	191	1427	0	-1556	0	16567	0.98
										0.00
										0.00

POSTS

Model A	FRAME	COMBO	EQUATION	N _{Ed} [N]	V _{Ed2} [N]	V _{Ed3} [N]	T _{Ed} [Nm]	M _{Ed2} [Nm]	M _{Ed3} [Nm]	DCR _{MAX} [-]
East-West, Edge 1, Post 1 (End)	DP-LP_1	ULS_04	EQ_1	-9792	292	0	40	-429	496	0.24
East-West, Edge 1, Post 2 (Middle 1)										
East-West, Edge 1, Post 3 (Middle 2)	DP-LP_2	ULS_22	EQ_1	-19454	137	0	19	-860	232	0.41
East-West, Edge 1, Post 4 (Drive)	DP-LP_3	ULS_42	EQ_1	9507	0	0	0	14949	0	0.79
East-West, Edge 1, Post 5 (Middle 3)	DP-LP_4	ULS_22	EQ_1	-19454	-137	0	-19	-860	-232	0.41
East-West, Edge 1, Post 6 (Middle 4)										
East-West, Edge 1, Post 7 (End)	DP-LP_5	ULS_04	EQ_1	-9831	-292	0	-40	-431	-496	0.24

RAILS

Model A	FRAME	COMBO	EQUATION	N _{Ed} [N]	V _{Ed2} [N]	V _{Ed3} [N]	T _{Ed} [Nm]	M _{Ed2} [Nm]	M _{Ed3} [Nm]	DCR _{MAX} [-]
Rail	RL-ERL_38	ULS_111	EQ_1	0	0	3480	0	696	0	0.87
End Rail	RL-ERL_2	ULS_112	EQ_1	0	0	1743	0	348	0	0.49

9.7.2. Modello B

TUBES

Model B	FRAME	COMBO	EQUATION	N _{Ed} [N]	V _{Ed2} [N]	V _{Ed3} [N]	T _{Ed} [Nm]	M _{Ed2} [Nm]	M _{Ed3} [Nm]	DCR _{MAX} [-]
East-West Edge 1, Tube 1	MB_1_EXTB	ULS_58	EQ_1	1211	987	-362	169	-4392	9535	0.89
East-West Edge 1, Tube 3	MB_2_EXTB	ULS_58	EQ_1	1296	881	-362	521	-4392	9107	0.87
East-West Edge 1, Tube 4	MB_3_EXTB	ULS_58	EQ_1	1296	869	-362	-536	-4392	9107	0.87
East-West Edge 1, Tube 6	MB_4_EXTB	ULS_58	EQ_1	1209	763	-362	-184	-4392	9537	0.89
										0.00
										0.00

POSTS

Model B	FRAME	COMBO	EQUATION	N _{Ed} [N]	V _{Ed2} [N]	V _{Ed3} [N]	T _{Ed} [Nm]	M _{Ed2} [Nm]	M _{Ed3} [Nm]	DCR _{MAX} [-]
East-West, Edge 1, Post 1 (End)	DP-LP_1_EXTB	ULS_04	EQ_1	-5328	1214	3041	19	4926	2066	0.80
East-West, Edge 1, Post 2 (Middle 1)										
East-West, Edge 1, Post 3 (Middle 2)	DP-LP_2_EXTB	ULS_19	EQ_1	-7759	52	5859	7	7678	89	0.97
East-West, Edge 1, Post 4 (Drive)	DP-LP_3_EXTB	ULS_19	EQ_1	-7965	0	5802	0	10145	0	0.56
East-West, Edge 1, Post 5 (Middle 3)	DP-LP_4_EXTB	ULS_19	EQ_1	-7759	-53	5859	-7	7678	-90	0.97
East-West, Edge 1, Post 6 (Middle 4)										
East-West, Edge 1, Post 7 (End)	DP-LP_5_EXTB	ULS_04	EQ_1	-5349	-1212	3054	-18	4948	-2063	0.80

RAILS

Model B	FRAME	COMBO	EQUATION	N _{Ed} [N]	V _{Ed2} [N]	V _{Ed3} [N]	T _{Ed} [Nm]	M _{Ed2} [Nm]	M _{Ed3} [Nm]	DCR _{MAX} [-]
Rail	L-ERL_52_EXT	ULS_112	EQ_1	-357	0	1389	0	278	0	0.35
End Rail	L-ERL_44_EXT	ULS_111	EQ_1	-180	0	696	0	139	0	0.20

© COPYRIGHT Convert Italia S.p.A.

All rights reserved

In accordance with the law, this document is the property of CONVERT ITALIA S.p.A. The reproduction or transfer of this document to third parties without our written authorisation is prohibited