



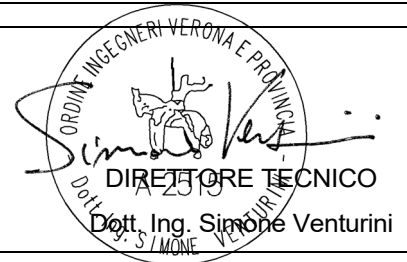
**PROGETTAZIONE DEFINITIVA E STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE  
PER RICHIESTA DI AUTORIZZAZIONE UNICA  
DELL'IMPIANTO AGRIVOLTAICO DA 40 MW  
IN ZONA INDUSTRIALE DI PRATO SARDO NEL COMUNE DI NUORO (NU)**

# PROGETTO DEFINITIVO

**NUORO  
SOLAR**

COMMITTENTE:

PROGETTISTA:



TITOLO ELABORATO:

**RELAZIONE DI CALCOLO DEI SOSTEGNI DEI TRACKER**


ELABORATO n°:  
BI029F-D-NUO-RT-09-r00

NOME FILE:

SCALA: ----


DATA: Giugno 2023

| REVISIONE | N. | DATA | DESCRIZIONE | ELABORATO       | CONTROLLATO | APPROVATO |
|-----------|----|------|-------------|-----------------|-------------|-----------|
|           | 00 |      | Giugno 2023 | Prima Emissione | G. Pezzini  | M. Sandri |
| 01        |    |      |             |                 |             |           |
| 02        |    |      |             |                 |             |           |
| 03        |    |      |             |                 |             |           |
| 04        |    |      |             |                 |             |           |

|   |        |                  |  |        |
|---|--------|------------------|--|--------|
|  | Rev. 0 | Data Giugno 2023 | El: BI029F-D-NUO-RT-09-r00                       | Pag. 1 |
|   |        |                  | RELAZIONE DI CALCOLO DEI SOSTEGNI<br>DEI TRACKER |        |

## SOMMARIO

|   |    |
|---|----|
| 1. PREMESSA .....   | 3  |
| 1.1. <i>Descrizione della struttura di sostegno dei pannelli</i> .....                | 4  |
| 2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO .....   | 8  |
| 3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI .....  | 9  |
| 3.1. <i>Acciaio da carpenteria S275</i> .....   | 9  |
| 4. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEL TERRENO DI FONDAZIONE .....                       | 10 |
| 5. IPOTESI DI CALCOLO .....   | 12 |
| 5.1. <i>Vita nominale e periodo di ritorno per il calcolo delle azioni</i> .....      | 12 |
| 5.2. <i>Parametri per la definizione dell'azione sismica</i> .....                    | 12 |
| 5.2.1. Parametri di pericolosità sismica .....  | 13 |
| 5.2.2. Coefficienti di amplificazione stratigrafica e topografica .....               | 15 |
| 5.3. <i>Parametri e ipotesi per la definizione dell'azione vento</i> .....            | 15 |
| 5.3.1. Condizioni di carico .....   | 15 |
| 5.3.2. Condizione di riposo ( $\alpha = 5^\circ$ ) .....                              | 16 |
| 5.3.3. Condizione di lavoro ( $\alpha = \max 60^\circ$ ) .....                        | 16 |
| 6. ANALISI DEI CARICHI .....  | 20 |
| 6.1. <i>Carichi permanenti (<math>G_2</math>)</i> .....                               | 20 |
| 6.2. <i>Azione del vento (<math>Q_v</math>)</i> .....                                 | 20 |
| 6.2.1. Definizione del sito .....   | 20 |
| 6.2.2. Velocità di riferimento in condizioni di riposo ( $\alpha = 5^\circ$ ) .....   | 22 |
| 6.2.3. Velocità di riferimento in condizioni di lavoro ( $\alpha = 60^\circ$ ) .....  | 23 |
| 6.2.4. Coefficiente di esposizione ( $c_e$ ) .....                                    | 23 |
| 6.2.5. Coefficienti aerodinamici in posizione di riposo ( $\alpha = 5^\circ$ ) .....  | 24 |
| 6.2.6. Coefficienti aerodinamici in posizione di lavoro ( $\alpha = 60^\circ$ ) ..... | 26 |
| 6.2.7. Azioni a metro lineare in condizioni di riposo ( $\alpha = 5^\circ$ ) .....    | 27 |
| 6.2.8. Azioni a metro lineare in condizioni di lavoro ( $\alpha = 60^\circ$ ) .....   | 28 |
| 6.3. <i>Azione della neve (<math>Q_n</math>)</i> .....                                | 29 |
| 6.3.1. Neve in condizioni di riposo ( $\alpha = 5^\circ$ ) .....                      | 30 |
| 6.3.2. Neve in condizioni di lavoro ( $\alpha = 60^\circ$ ) .....                     | 30 |
| 6.4. <i>Azione termiche (<math>Q_t</math>)</i> .....                                  | 31 |
| 7. COMBINAZIONE DI CARICO .....   | 32 |
| 8. CALCOLO DELLE SOLLECITAZIONI ALLA BASE DEI SOSTEGNI .....                          | 34 |
| 8.1. <i>Condizione di riposo (<math>\alpha = 5^\circ</math>)</i> .....                | 34 |
| 8.1. <i>Condizione di lavoro (<math>\alpha = 60^\circ</math>)</i> .....               | 35 |
| 8.1.1. Sollecitazioni a base sostegni Trackers Esterni (TE) .....                     | 35 |
| 8.1.1. Sollecitazioni a base sostegni Trackers Interni (TI) .....                     | 35 |

|   |        |                  |  |        |
|---|--------|------------------|--|--------|
|  | Rev. 0 | Data Giugno 2023 | EI: BI029F-D-NUO-RT-09-r00                       | Pag. 2 |
|   |        |                  | RELAZIONE DI CALCOLO DEI SOSTEGNI<br>DEI TRACKER |        |


|   |    |
|---|----|
| 9. VERIFICHE GEOTECNICHE .....  | 36 |
| 9.1. <i>Carico limite verticale</i> .....   | 36 |
| 9.2. <i>Carichi di progetto per il calcolo della lunghezza minima di infissione</i> ..... | 40 |
| 9.3. <i>Calcolo della lunghezza minima di infissione</i> .....                            | 41 |
| 9.3.1. COMPRESSIONE Ned = +47,0kN .....   | 41 |
| 9.3.2. TRAZIONE Ned = -9,3 kN.....  | 41 |
| 9.4. <i>Riepilogo lunghezze minime di infissione</i> .....                                | 42 |
| 9.5. <i>Carico limite orizzontale (ovvero trasversale)</i> .....                          | 42 |
| 9.5.1. Sostegno HEA140 - Acciaio S275 – L = 3,2m .....                                    | 45 |
| 10. CALCOLO E VERIFICA STRUTTURALE DEI SOSTEGNI .....                                     | 46 |
| 10.1.1. Condizione di riposo (alfa=5°) – Comb. SLU02.....                                 | 47 |
| 10.1.2. Condizione di lavoro (alfa=60°) – Comb. SLU01.....                                | 49 |
| 11. CONCLUSIONI .....   | 51 |

#### INDICE DELLE FIGURE

|   |    |
|---|----|
| Figura 1.1 - Ubicazione impianto fotovoltaico in Comune di Nuoro con relativo cavidotto di collegamento alla SSEU.....                                | 3  |
| Figura 1.2 – <i>Posizione di lavoro - massima rotazione dei pannelli (alfa=60°)</i> .....   | 5  |
| Figura 1.3 – <i>Posizione di riposo (alfa=5°)</i> .....   | 5  |
| Figura 1.4 – <i>Individuazione dei Trackers interni ed esterni in funzione della loro posizione</i> .....   | 6  |
| Figura 1.5 – <i>Prospetto e pianta dei Trackers a 5 supporti</i> .....  | 7  |
| Figura 5.1 – <i>Curva di correlazione ASCE7-10</i> .....  | 17 |
| Figura 6.1 – <i>Andamento del coefficiente Ce in funzione dell'altezza dal suolo</i> .....  | 24 |
| Figura 6.2 – <i>Tettoie a semplice falda: posizione del punto di applicazione della forza risultante</i> ...  | 25 |
| Figura 6.3 – <i>Condizioni di vento CC1 e CC2 in posizione di riposo (alfa = 5°)</i> .....  | 25 |
| Figura 6.4 – <i>Condizioni di vento CC1 e CC2 in posizione di lavoro (alfa = 60°)</i> .....   | 26 |
| Figura 8.1 – <i>Convenzione dei segni per le sollecitazioni agenti alla base dei sostegni</i> .....   | 34 |
| Figura 9.1 – <i>Valori di Nq (secondo vari autori)</i> .....  | 39 |
| Figura 9.2 – <i>Palo corto libero di ruotare in testa, terreni incoerenti</i> .....   | 43 |
| Figura 9.3 – <i>Palo lungo libero di ruotare in testa, terreni incoerenti</i> .....   | 44 |
| Figura 10.1 – <i>Modello agli elementi finiti utilizzato per il calcolo delle sollecitazioni lungo il palo e valori delle costanti di molla</i> ..... | 46 |
| Figura 11.1 – <i>Tracker con 5 supporti HEA140</i> .....  | 52 |

#### INDICE DELLE TABELLE

|  |    |
|--|----|
| Tabella 1 – Modello stratigrafico e geotecnico di riferimento per pannelli e cavidotto ..... | 11 |
| Tabella 2 – Parametri di pericolosità sismica per SLV (TR = 332 anni) .....                  | 15 |
| Tabella 3 - Coefficienti parziali di sicurezza per le combinazioni SLU.....                  | 33 |
| Tabella 4 - Coefficienti $\Psi$ per le azioni variabili .....                                | 33 |
| Tabella 5 – Riepilogo delle lunghezze minime di infissione per i diversi sostegni .....      | 42 |
| Tabella 6 – Riepilogo complessivo delle verifiche .....                                      | 51 |

|   |        |                  |  |        |
|---|--------|------------------|--|--------|
|  | Rev. 0 | Data Giugno 2023 | El: BI029F-D-NUO-RT-09-r00                       | Pag. 3 |
|   |        |                  | RELAZIONE DI CALCOLO DEI SOSTEGNI<br>DEI TRACKER |        |

## 1. PREMESSA

Nell'ambito del progetto definitivo per la realizzazione di un impianto di produzione di energia elettrica da fonte solare da realizzarsi nel territorio comunale di Nuoro, in prossimità della zona industriale di Prato Sardo, il presente documento costituisce la relazione di calcolo dei sostegni dei trackers.

Trattasi di un impianto di produzione di energia elettrica da fonte solare che prevede di installare moduli fotovoltaici bifacciali in silicio monocristallino da 685 Wp montati su strutture ad inseguimento monoassiale in acciaio per una potenza nominale di circa 42 MWp. L'impianto sarà installato in parte in aree di tipo industriale e in parte ad uso agricolo, uniformando la distanza interfilare come se la zona fosse esclusivamente agricola.

Morfologicamente è un contesto collinare con quote comprese tra circa 500-600 m slm che rimane circa 5 Km a NW rispetto all'abitato di Nuoro. In Figura 1.1 l'ubicazione dell'area in studio su una corografia a grande scala.

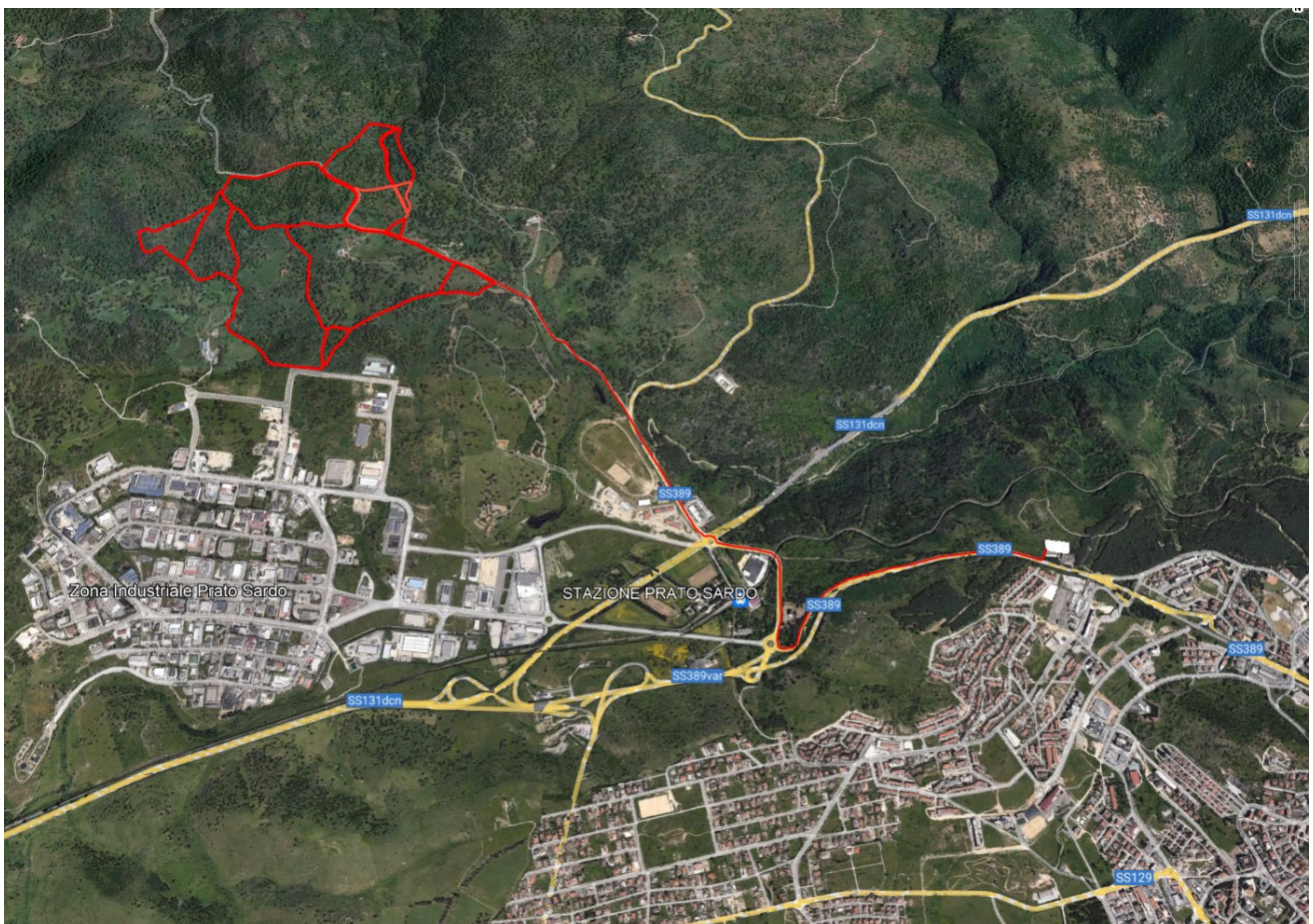



Figura 1.1 - Ubicazione impianto fotovoltaico in Comune di Nuoro con relativo cavidotto di collegamento alla SSEU

|   |        |                  |  |        |
|---|--------|------------------|--|--------|
|  | Rev. 0 | Data Giugno 2023 | EI: BI029F-D-NUO-RT-09-r00                       | Pag. 4 |
|   |        |                  | RELAZIONE DI CALCOLO DEI SOSTEGNI<br>DEI TRACKER |        |

Tutta l'energia prodotta verrà ceduta alla rete; l'impianto sarà inoltre dotato di un sistema di accumulo energetico a batterie. L'energia sarà convogliata all'interno dell'area d'impianto attraverso una rete di cavi interrati a bassa e media tensione collegati ad una serie di cabine MT/BT di campo, e successivamente alla sottostazione elettrica lato utente (SSEU) posta alla periferia di Nuoro ad una distanza di circa 4 Km.

L'impianto è stato studiato considerando le esigenze della pubblica utilità delle opere e dei privati potenzialmente interferiti cercando in particolare di:

- minimizzare l'interferenza con zone di pregio ambientale, naturalistico, paesaggistico e archeologico;
- evitare, per quanto possibile, l'interessamento di aree urbanizzate o di sviluppo urbanistico;
- minimizzare l'interessamento di aree soggette a potenziale dissesto geomorfologico;
- assicurare la continuità del servizio, la sicurezza e l'affidabilità della fornitura di energia;
- favorire il regolare esercizio e la manutenzione dell'impianto.

Tutte le componenti di impianto sono progettate per un periodo di vita nominale di almeno 25anni, durante i quali alcune parti o componenti potranno essere sostituite. A fine vita utile, si prevede lo smantellamento dell'impianto ed il ripristino delle condizioni preesistenti in tutta l'area.

### **1.1. Descrizione della struttura di sostegno dei pannelli**

I sistemi ad inseguimento solare monoassiale saranno del tipo PVH Monoline 2V o equivalenti, con struttura portante in parte infissa nel terreno senza utilizzo di cls, in parte fuori terra su cui verranno montate particolari cerniere attraversate da una trave scato-lare a sezione quadrata che ruota attorno al proprio asse, posizionando i pannelli ad una quota dal terreno pari a circa 3,2m.

La trave soggetta a torsione e le staffe di montaggio dei pannelli non sono oggetto di questa relazione.

I pannelli in condizione di lavoro possono raggiungere una configurazione inclinata allo zenitale massimo di 60°. In questa condizione l'altezza dal lembo più alto del pannello rispetto al terreno sarà di circa 5,15m, mentre il lembo più basso arriverà a 1,0 m.

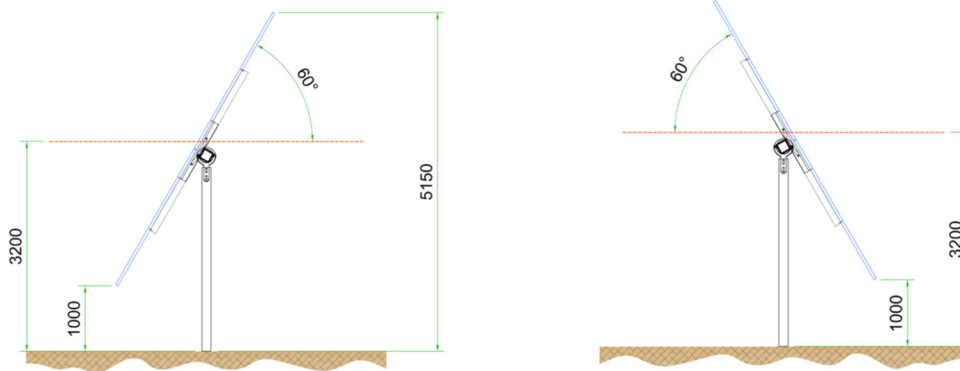


Figura 1.2 – Posizione di lavoro - massima rotazione dei pannelli ( $\alpha=60^\circ$ ).

I trackers sono dotati di un sistema di sicurezza che riporta i pannelli in posizione di riposo in caso di forte vento.

La pendenza di sicurezza (o riposo) per i trackers è di 5 gradi.

In questa condizione l'altezza dal lembo più alto del pannello rispetto al terreno sarà di circa 3,4m.

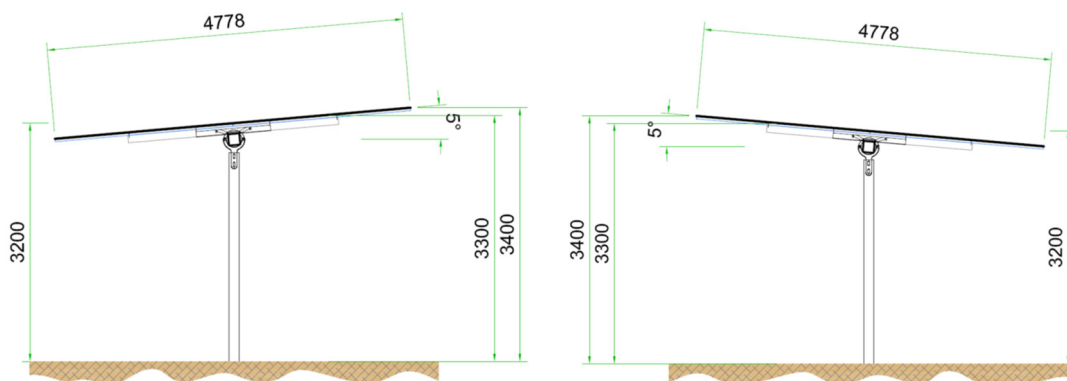


Figura 1.3 – Posizione di riposo ( $\alpha=5^\circ$ ).

Il layout dei moduli fotovoltaici è composto da diverse file, in cui vengono considerate due diverse configurazioni a seconda della loro posizione.

Le **zone esterne** corrispondono ai Trackers situati nella prima e nella seconda fila e sulle righe laterali. I Trackers su queste zone sono soggetti a carichi di vento più elevati in fase di lavoro ( $\alpha=60^\circ$ ).

Il resto dei Trackers, che si trovano internamente, beneficiano in fase di lavoro dell'azione schermante dei Trackers esterni.

In condizione di riposo ( $\alpha=5^\circ$ ) non si considera alcuna azione schermante in quanto i pannelli sono orientati quasi parallelamente alla superficie del suolo e pertanto si considerano come un'unica struttura del tipo tettoia.

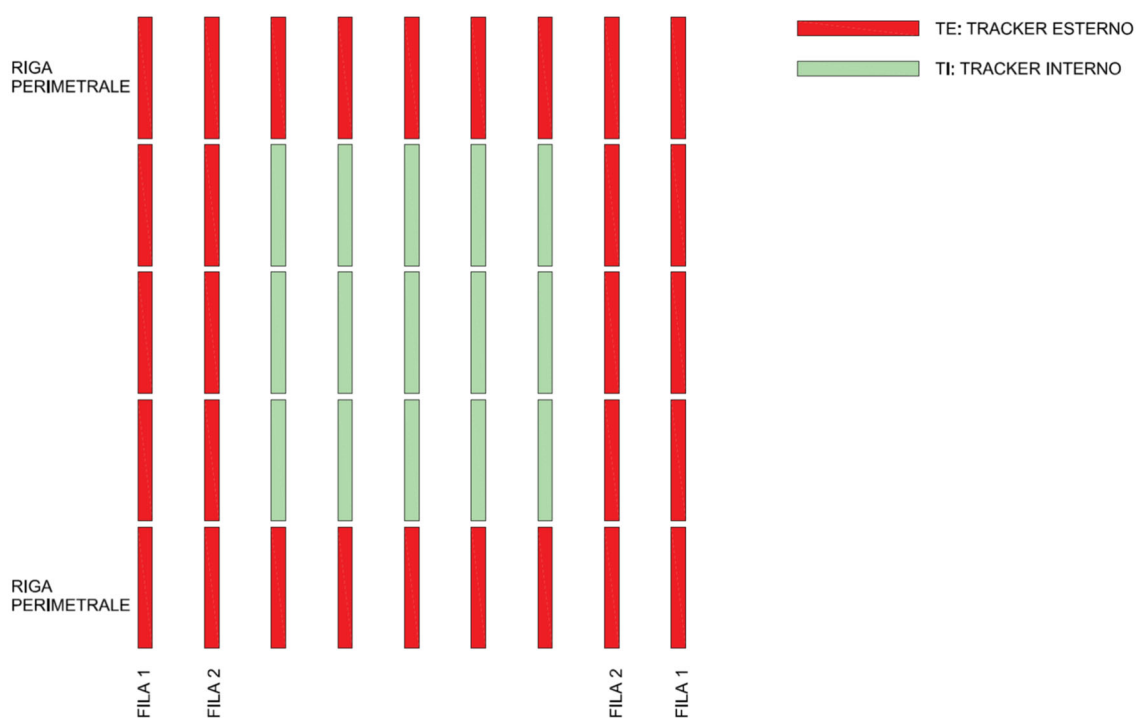


Figura 1.4 – Individuazione dei Trackers interni ed esterni in funzione della loro posizione.

Tutti i Trackers a 28 moduli hanno una lunghezza di circa 18,9m e sono sostenuti da 5 pali metallici la cui altezza fuori terra è di circa 2,8m.

Il baricentro dei 28 pannelli si trova più in alto, all'altezza di circa 3,2m dal piano campagna.

I sostegni laterali (SL) di ciascun tracker, così come quello centrale (SC) si prendono le azioni agenti su 3,9m di struttura, come evidenziato della seguente figura.

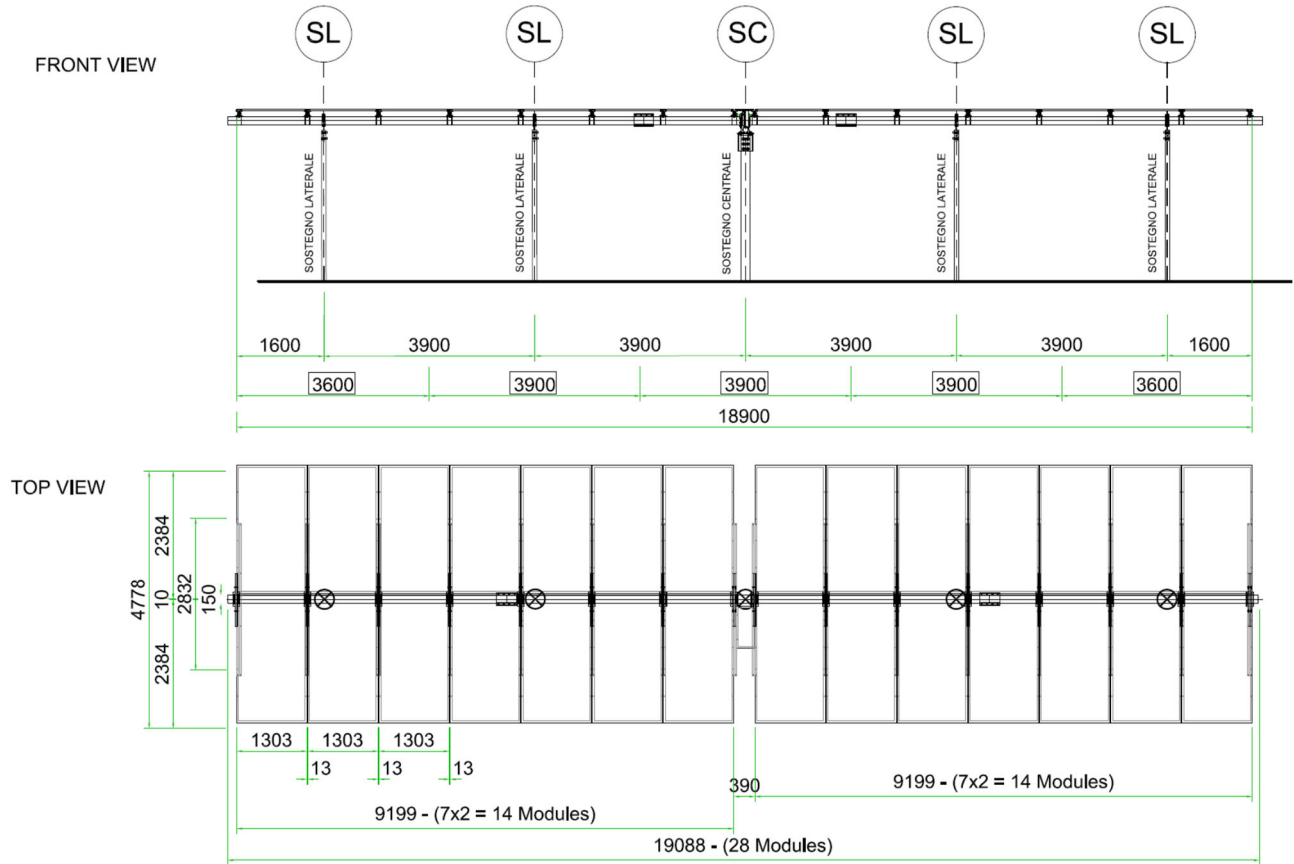



Figura 1.5 – Prospetto e pianta dei Trackers a 5 supporti




|   |        |                  |  |        |
|---|--------|------------------|--|--------|
|  | Rev. 0 | Data Giugno 2023 | El: BI029F-D-NUO-RT-09-r00                       | Pag. 8 |
|   |        |                  | RELAZIONE DI CALCOLO DEI SOSTEGNI<br>DEI TRACKER |        |

## 2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Di seguito sono riportati i principali riferimenti normativi applicati nella progettazione delle strutture o comunque di supporto:

- DM 17/01/2018: “Norme tecniche per le costruzioni”, abbreviate nel seguito con l’acronimo “NTC 2018”;
- Circ. 21/01/2019, n. 7 C.S.LL.PP.: “Istruzioni per l’applicazione delle Nuove norme tecniche per le costruzioni”;
- CNR-DT 207 R1/2018: “Istruzioni per la valutazione delle azioni e degli effetti del vento sulle costruzioni”;
- Eurocodice 1 “Actions on structures”;
- Eurocodice 3 “Design of steel structures” - EN 1993-1-1;
- Eurocodice 7 “Geotechnical design”;
- Raccomandazioni sui pali di fondazione – Associazione Geotecnica Italiana – dicembre 1984.

|   |        |                  |  |        |
|---|--------|------------------|--|--------|
|  | Rev. 0 | Data Giugno 2023 | EI: BI029F-D-NUO-RT-09-r00                       | Pag. 9 |
|   |        |                  | RELAZIONE DI CALCOLO DEI SOSTEGNI<br>DEI TRACKER |        |

### 3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

Per i sostegni dei Trackers si prescrive l'impiego del seguente acciaio da carpenteria:


#### 3.1. Acciaio da carpenteria S275

Tensione caratteristica di snervamento:  $f_{yk} = 275 \text{ N/mm}^2$

Tensione caratteristica di rottura:  $f_{tk} = 430 \text{ N/mm}^2$

Modulo elastico:  $E_s = 210000 \text{ N/mm}^2$

Peso per unità di volume  $\gamma = 78,5 \text{ KN/m}^3$

|   |        |                  |  |         |
|---|--------|------------------|--|---------|
|  | Rev. 0 | Data Giugno 2023 | El: BI029F-D-NUO-RT-09-r00                       | Pag. 10 |
|   |        |                  | RELAZIONE DI CALCOLO DEI SOSTEGNI<br>DEI TRACKER |         |

#### 4. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEL TERRENO DI FONDAZIONE

Le indagini eseguite in buona coerenza con la documentazione bibliografica hanno evidenziato la presenza delle seguenti unità stratigrafico geotecniche:

- AR: granito arenizzato composto da sabbia e ghiaia da molto addensata a debolmente cementata. Può comprendere una sottile ed irregolare coltre superficiale di natura colluviale. Spessore variabile fra 1 e 6,5 m, con valore medio di 3,5 m circa;
- MZG. Monzograniti francamente lapidee da fratturate a poco fratturate.

Le tabelle seguenti riepilogano, al di sotto di una coltre di terreno vegetale a matrice sabbiosa potente circa 0,4-0,5 m, la caratterizzazione dei terreni attesi in corrispondenza delle aree d'installazione dei pannelli e del cavidotto come risulta dall'insieme delle informazioni disponibili.

La cartografia geologica, gli esiti delle indagini e dei rilievi in sito hanno restituito, nell'ambito dell'intervento, una situazione di sostanziale omogeneità per effetto della quale è stato possibile proporre una caratterizzazione unica.

La simbologia cui si è fatto riferimento è la seguente:

|  |                      |
|--|----------------------|
| $\gamma$ = peso di volume naturale del terreno               | [kN/m <sup>3</sup> ] |
| $I_p$ = Indice di plasticità                                 | [%]                  |
| OCR = Over Consolidation Ratio                               | [-]                  |
| $D_r$ = densità relativa                                     | [%]                  |
| $\varphi'$ = angolo di attrito in termini di sforzi efficaci | [°]                  |
| $c'$ = resistenza al taglio in condizioni drenate            | [Mpa]                |
| $C_u$ = resistenza al taglio in condizioni non drenate       | [Mpa]                |
| $E$ = modulo elastico del terreno                            | [Mpa]                |
| $\nu$ = coefficiente di Poisson                              | [-]                  |
| $K$ = permeabilità   | [m/s]                |

**Tabella 1 – Modello stratigrafico e geotecnico di riferimento per pannelli e cavidotto**

| Pannelli e cavidotto  |                  |   |                               |    |     |        |          |             |          |         |          |                     |
|---|------------------|---|-------------------------------|----|-----|--------|----------|-------------|----------|---------|----------|---------------------|
| Sigla   | Prof (m da p.c.) | Descrizione   | $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | IP | OCR | Dr (%) | c' (kPa) | $\phi'$ (°) | Cu (kPa) | E (Mpa) | K (m/s)  | Suolo di fondazione |
| AR  | 3,5              | Materiale detritico colluviale o granito arenetizzato | 20,5                          | -  | -   | 95     | 0        | 38          | -        | 50      | 1,00E-04 | B                   |
| MZG   | >1               | Monzograniti da fratturate a molto fratturate         | 26                            | -  | -   | -      | 100      | 40          | -        | 1000    | 1,00E-08 |                     |
| Falda: Modesta profondità stagionale, circa 1-3 m da p.c., localmente anche inferiore |                  |   |                               |    |     |        |          |             |          |         |          |                     |

La falda, come indicato in tabella e come risulta dalle misure sui piezometri installati, almeno stagionalmente ha una soggiacenza modesta che può essere valutata fra circa 1-3 m da p.c.; localmente laddove la superficie topografica è più depressa, e/o a seguito di eventi meteorici intensi, tale soggiacenza potrebbe risultare localmente minore. E' anche possibile che a seguito di periodi siccitosi tale falda si deprima sensibilmente sino ad annullarsi, o limitarsi a sacche più o meno isolate.

Essendo lo spessore del primo strato AR fortemente variabile, nel calcolo che segue si ipotizza che i sostegni interessino unicamente tale spessore.

Tuttavia la natura dello strato più profondo di origine litoide, suggerisce di eseguire prima dell'infissione dei sostegni una perforazione con martello fondo-foro di piccolo diametro e il riempimento del foro con materiale granulare proveniente dallo scavo o da cava.

## 5. IPOTESI DI CALCOLO

### 5.1. Vita nominale e periodo di ritorno per il calcolo delle azioni

La vita nominale di progetto della struttura è assunta pari a:

$$V_N = 25 \text{anni.}$$

Il periodo di ritorno per il calcolo delle azioni ambientali (Vento e Neve) sono assunti pari a:

$$T_R = 50 \text{anni.}$$

Il periodo di ritorno dei sovraccarichi e delle azioni climatiche agenti sulla costruzione non è infatti correlato alla vita nominale di progetto delle opere.

Per le azioni ambientali il periodo di riferimento è da assumersi sempre pari a 50anni tranne per le verifiche nelle fasi costruttive, per le quali si può considerare un periodo di ritorno diverso (rif. C2.4.1 della Circolare 21/01/2019 n.7).

### 5.2. Parametri per la definizione dell'azione sismica

Come definito al punto 2.4.3 delle Norme Tecniche 20018, le azioni sismiche sulla costruzione vengono valutate in relazione ad un periodo di riferimento  $V_R$  che si ricava, per ciascun tipo di costruzione, moltiplicandone la vita nominale  $V_N$  per il coefficiente d'uso  $C_U$ :

$$V_R = V_N \times C_U$$

La vita nominale è assunta pari a  $V_N = 25$  anni, mentre il valore del coefficiente d'uso è definito, al variare della classe d'uso, dalla tabella 2.4.II delle Norme Tecniche:

Tab. 2.4.II – Valori del coefficiente d'uso  $C_U$

| CLASSE D'USO       | I   | II  | III | IV  |
|--------------------|-----|-----|-----|-----|
| COEFFICIENTE $C_U$ | 0,7 | 1,0 | 1,5 | 2,0 |

Nel caso in esame, essendo la classe d'uso = I (*Costruzioni con presenza solo occasionale di persone, edifici agricoli*), tale coefficiente vale  $C_U = 0,7$  e quindi il periodo di riferimento per il calcolo dell'azione sismica è:

$$V_R = \max (35 \text{anni}; V_N \times C_U = 25 \times 0,7 = 17,5 \text{anni}) = \mathbf{35 \text{anni}}$$

### 5.2.1. Parametri di pericolosità sismica

In generale l'azione sismica è definita sul sito di riferimento rigido orizzontale, in funzione di tre parametri:

- $a_g$ : accelerazione orizzontale massima al sito;
- $F_0$ : valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- $T_C^*$ : periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Tali valori sono calcolati per il territorio italiano peninsulare come media pesata dei valori assunti nei quattro vertici della maglia elementare del reticolo di riferimento che contiene il punto caratterizzante la posizione dell'opera, utilizzando come pesi gli inversi delle distanze tra il punto in questione ed i quattro vertici.

Per le isole si fa invece riferimento alla Tabella 2 dell'Allegato B alle norme tecniche per le costruzioni.

In particolare nella Tabella 2, per tutte le isole, con l'esclusione della Sicilia, Ischia, Procida, Capri, vengono forniti i valori di  $a_g$ ,  $F_0$ ,  $T_C^*$  (costanti su tutto il territorio di ciascuna isola) per diversi tempi di ritorno dell'azione sismica.


L'accelerazione al sito  $a_g$  è espressa in g/10;  $F_0$  è adimensionale,  $T_C^*$  è espresso in secondi.

TABELLA 2: Valori di  $a_g$ ,  $F_0$ ,  $T_C^*$  per le isole, con l'esclusione della Sicilia, Ischia, Procida e Capri.

| Isole  | $T_R=30$ |       |         | $T_R=50$ |       |         | $T_R=72$ |       |         | $T_R=101$ |       |         | $T_R=140$ |       |         | $T_R=201$ |       |         | $T_R=475$ |       |         | $T_R=975$ |       |         | $T_R=2475$ |       |         |
|--|----------|-------|---------|----------|-------|---------|----------|-------|---------|-----------|-------|---------|-----------|-------|---------|-----------|-------|---------|-----------|-------|---------|-----------|-------|---------|------------|-------|---------|
|  | $a_g$    | $F_0$ | $T_C^*$ | $a_g$    | $F_0$ | $T_C^*$ | $a_g$    | $F_0$ | $T_C^*$ | $a_g$     | $F_0$ | $T_C^*$ | $a_g$     | $F_0$ | $T_C^*$ | $a_g$     | $F_0$ | $T_C^*$ | $a_g$     | $F_0$ | $T_C^*$ | $a_g$     | $F_0$ | $T_C^*$ | $a_g$      | $F_0$ | $T_C^*$ |
| Arcipelago Toscano, Isole Egadi, Pantelleria, Sardegna, Lampedusa, Linosa, Ponza, Palmarola, Zannone | 0,186    | 2,61  | 0,273   | 0,235    | 2,67  | 0,296   | 0,274    | 2,70  | 0,303   | 0,314     | 2,73  | 0,307   | 0,351     | 2,78  | 0,313   | 0,393     | 2,82  | 0,322   | 0,500     | 2,88  | 0,340   | 0,603     | 2,98  | 0,372   | 0,747      | 3,09  | 0,401   |
| Ventotene, Santo Stefano   | 0,239    | 2,61  | 0,245   | 0,303    | 2,61  | 0,272   | 0,347    | 2,61  | 0,298   | 0,389     | 2,66  | 0,326   | 0,430     | 2,69  | 0,366   | 0,481     | 2,71  | 0,401   | 0,600     | 2,92  | 0,476   | 0,707     | 3,07  | 0,517   | 0,852      | 3,27  | 0,564   |
| Ustica, Tremiti  | 0,429    | 2,50  | 0,400   | 0,554    | 2,50  | 0,400   | 0,661    | 2,50  | 0,400   | 0,776     | 2,50  | 0,400   | 0,901     | 2,50  | 0,400   | 1,056     | 2,50  | 0,400   | 1,500     | 2,50  | 0,400   | 1,967     | 2,50  | 0,400   | 2,725      | 2,50  | 0,400   |
| Alicudi, Filicudi,   | 0,350    | 2,70  | 0,400   | 0,558    | 2,70  | 0,400   | 0,807    | 2,70  | 0,400   | 1,020     | 2,70  | 0,400   | 1,214     | 2,70  | 0,400   | 1,460     | 2,70  | 0,400   | 2,471     | 2,70  | 0,400   | 3,212     | 2,70  | 0,400   | 4,077      | 2,70  | 0,400   |
| Panarea, Stromboli, Lipari, Vulcano, Salina  | 0,618    | 2,45  | 0,287   | 0,817    | 2,48  | 0,290   | 0,983    | 2,51  | 0,294   | 1,166     | 2,52  | 0,290   | 1,354     | 2,56  | 0,290   | 1,580     | 2,56  | 0,292   | 2,200     | 2,58  | 0,306   | 2,823     | 2,65  | 0,316   | 3,746      | 2,76  | 0,324   |

Le forme spettrali previste dalle NTC sono caratterizzate da prescelte probabilità di superamento e vite di riferimento. A tal fine occorre fissare:

- la vita di riferimento  $V_R$  della costruzione;

|   |        |                  |  |         |
|---|--------|------------------|--|---------|
|  | Rev. 0 | Data Giugno 2023 | El: BI029F-D-NUO-RT-09-r00                       | Pag. 14 |
|   |        |                  | RELAZIONE DI CALCOLO DEI SOSTEGNI<br>DEI TRACKER |         |

- le probabilità di superamento nella vita di riferimento  $P_{VR}$  associate a ciascuno degli stati limite considerati, per individuare infine, a partire dai dati di pericolosità sismica disponibili, le corrispondenti azioni sismiche.

Tale operazione deve essere possibile per tutte le vite di riferimento e tutti gli stati limite considerati dalle NTC; a tal fine è conveniente utilizzare, come parametro caratterizzante la pericolosità sismica, il periodo di ritorno dell'azione sismica  $T_R$ , espresso in anni. Fissata la vita di riferimento  $V_R$ , i due parametri  $T_R$  e  $P_{VR}$  sono immediatamente esprimibili, l'uno in funzione dell'altro, mediante l'espressione:

$$T_R = -\frac{V_R}{\ln(1 - P_{VR})}$$

Considerando lo **Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV)**, la probabilità di superamento nel periodo di riferimento  $V_R$  vale:

$$P_{VR} = 10\% \text{ per SLV}$$

Quindi per  $T_R = 35$  anni si ottiene:

$$\mathbf{TR = 332 \text{ anni}}$$

Qualora la attuale pericolosità sismica su reticolo di riferimento non contempli il periodo di ritorno  $T_R$  corrispondente alla  $V_R$  e alla  $P_{VR}$  fissate, il valore del generico parametro  $p(a_g, F_0, T^*c)$  ad esso corrispondente potrà essere ricavato per interpolazione, a partire dai dati relativi ai  $TR$  previsti nella pericolosità sismica, utilizzando l'espressione seguente:

$$\log(p) = \log(p_1) + \log\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \times \log\left(\frac{T_R}{T_{R1}}\right) \times \left[ \log\left(\frac{T_{R2}}{T_{R1}}\right) \right]^{-1}$$

nella quale:

- $p$  è il valore del parametro di interesse corrispondente al periodo di ritorno  $TR$  desiderato;
- $T_{R1}$ ,  $T_{R2}$  sono i periodi di ritorno più prossimi a  $T_R$  per i quali si dispone dei valori  $p_1$  e  $p_2$  del generico parametro  $p$ .

Eseguendo l'interpolazione fra  $T_{R1}=201$ anni e  $T_{R2}=475$ anni si ottengono i seguenti parametri di pericolosità sismica per lo SLV -  $T_R=332$ anni:

**Tabella 2 – Parametri di pericolosità sismica per SLV (TR = 332 anni)**

| Isola    | T <sub>R</sub> | ag/g         | F <sub>o</sub> | T <sub>c</sub> * |
|----------|----------------|--------------|----------------|------------------|
| Sardegna | 332            | <b>0,045</b> | 2,85           | 0,332            |

### 5.2.2. Coefficienti di amplificazione stratigrafica e topografica

Per la definizione dell'azione sismica di progetto occorre determinare anche il coefficiente S che tiene conto della categoria di sottosuolo e delle condizioni topografiche mediante la seguente relazione:

$$S = S_S \times S_T$$

Il coefficiente di amplificazione stratigrafica  $S_S$  ed il coefficiente di amplificazione topografica  $S_T$  si ottengono con riferimento alla categoria del sottosuolo e alle condizioni topografiche, secondo le tabelle 3.2.IV e 3.2.V delle Norme Tecniche.

Considerando la categoria di suolo B e la categoria topografica = T2 (*Pendii con inclinazione media  $i > 15^\circ$* ) si ottiene:

$$S_S = 1,20; S_T = 1,20 \quad \text{da cui: } S = 1,20 \times 1,20 = 1,44$$

### 5.3. Parametri e ipotesi per la definizione dell'azione vento

Per il calcolo dell'azione del vento si fa riferimento ai seguenti dati:

**Zona = 5** (Sardegna parte orientale).

**Classe di rugosità del terreno = D** (*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 dal mare > 30km e altitudine compresa tra 500 e 750m s.l.m., da cui:


**Categoria di esposizione = III**

#### 5.3.1. Condizioni di carico

Si considerano le seguenti condizioni di carico per il calcolo dell'azione del vento sulla struttura di sostegno:

- Condizione di riposo: inclinazione minima dei pannelli, quasi orizzontale (alfa = 5°);
- Condizione di lavoro: inclinazione massima dei pannelli (alfa = 60°).



|   |        |                  |  |         |
|---|--------|------------------|--|---------|
|  | Rev. 0 | Data Giugno 2023 | EI: BI029F-D-NUO-RT-09-r00                       | Pag. 16 |
|   |        |                  | RELAZIONE DI CALCOLO DEI SOSTEGNI<br>DEI TRACKER |         |

### 5.3.2. Condizione di riposo ( $\alpha = 5^\circ$ )

La forza del vento è calcolata con la velocità di riferimento:

**$V_r = 28 \text{ m/s}$**  (pari a 100,8 km/h)       **$T_R = 50 \text{ anni}$**

La corrispondente pressione cinetica di riferimento vale:

**$q_r = 490 \text{ N/m}^2$**

Per la definizione delle azioni globali generate dal vento sui Trackers in condizione di riposo si fa riferimento alla trattazione valida per tettoie a singola falda (par. C3.3.8.2.1 della Circolare 21/01/2019 n.7 e Appendice G.6.1 delle CNR DT207/2018 ).

Non si considera alcuna azione di schermatura dei pannelli di bordo su quelli interni (il vento circola indisturbato sopra e sotto i pannelli che sono quasi orizzontali).

### 5.3.3. Condizione di lavoro ( $\alpha = \max 60^\circ$ )

In condizioni di lavoro i pannelli possono raggiungere una inclinazione massima rispetto all'orizzontale di  $60^\circ$ .

La massima velocità del vento in condizioni di lavoro viene assunta pari a  **$17 \text{ m/s}$  (raffica di 3sec a 10m di altezza dal suolo)**.

Raggiunta questa velocità di raffica, il sistema dei Trackers passa dalla condizione di lavoro a quella di riposo –  $\alpha = 5^\circ$  (l'impianto prevede l'installazione di un sistema di sicurezza con anemometri ultrasonici che misurano direzione e velocità del vento).

La forza del vento è calcolata con la seguente velocità di riferimento (**valore medio su 10min a 10m di altezza**):

**$V_r = 17 / 1,43 \cong 12 \text{ m/s}$**  (pari a 43,2 km/h), dove 1,43 è il coefficiente che consente la conversione del vento con raffica di 3 secondi a quello medio su 10 minuti, dedotto dalla curva ASCE7-10:

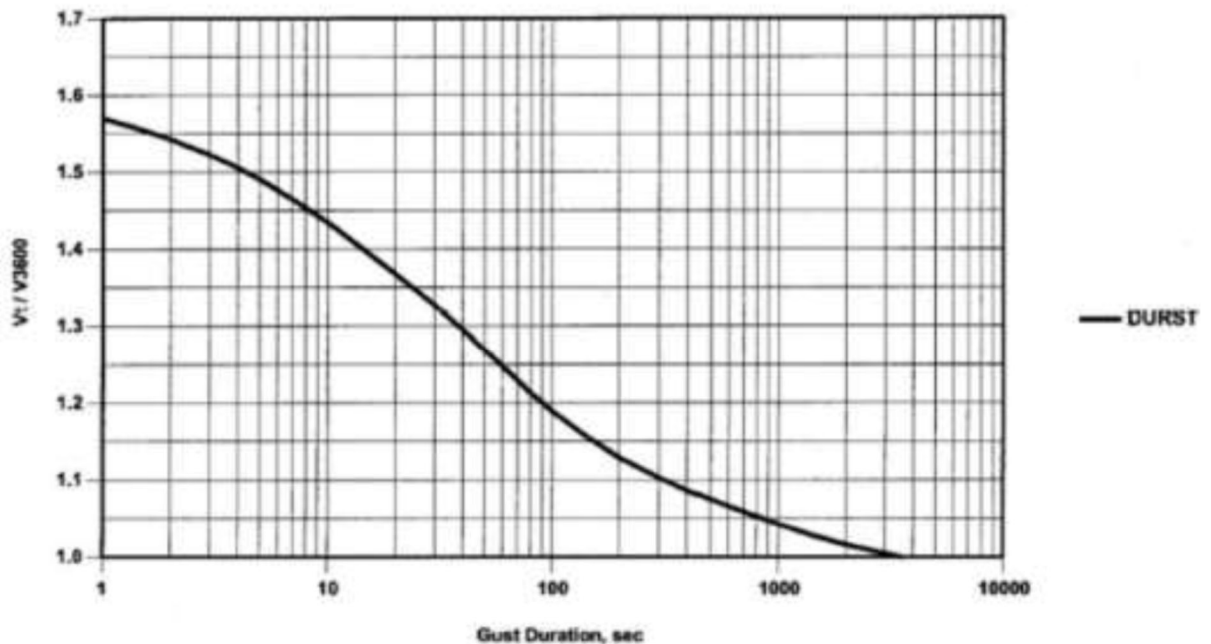

 FIGURE C26.5-1 Maximum Speed Averaged over  $t$  s to Hourly Mean Speed.

Figura 5.1 – Curva di correlazione ASCE7-10

La corrispondente pressione cinetica di riferimento vale:

$$q_r = 90 \text{ N/m}^2$$

In questa configurazione i coefficienti aerodinamici utilizzati per le coperture a singola falda (applicabili nel campo  $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ ) non possono essere utilizzati.

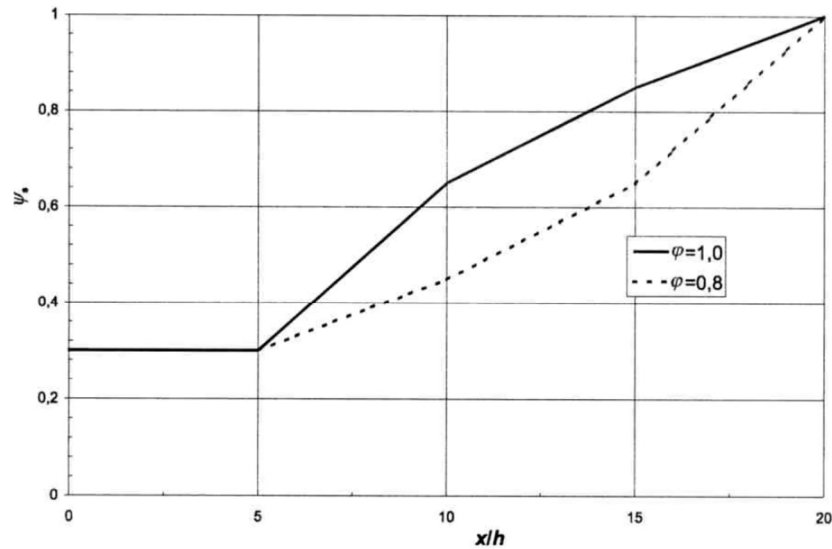
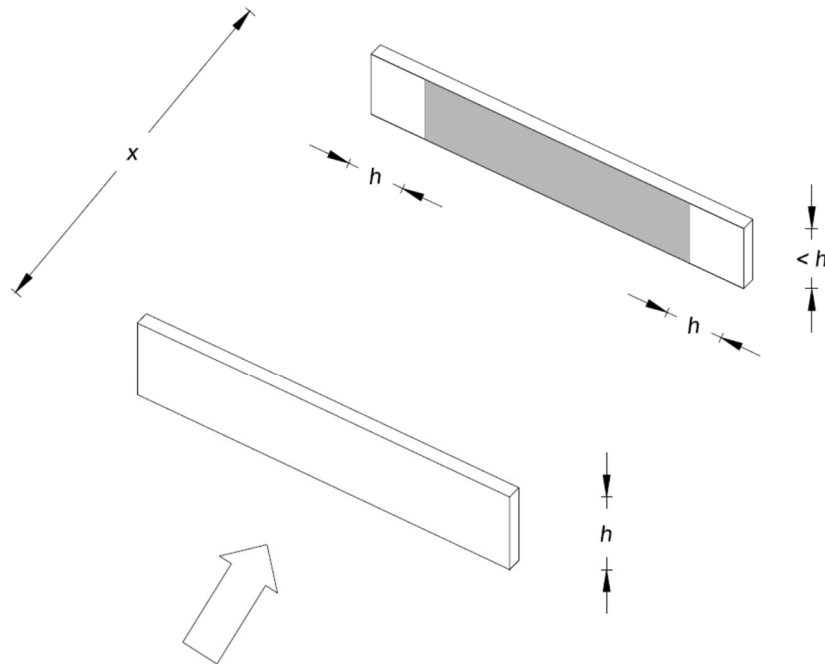
Si fa pertanto riferimento alla trattazione relativa a insegne e tabelloni (Appendice G.7 della CNR DT207/2018) e alla trattazione relativa a Muri e parapetti (Appendice G.5 della CNR DT207/2018).


#### Effetto schermatura in condizione di lavoro

Per le file interne (vedi *Figura 1.4*) si considera l'effetto schermante offerto dalle file di bordo moltiplicando i coefficienti di pressione complessiva per il fattore riduttivo  $\psi_s$  fornito dalla Tabella G.XI e dalla Figura G.23 in funzione del rapporto tra la distanza  $x \cong 10m$  tra gli elementi e l'altezza  $h \cong 5m$  dell'elemento oggetto del calcolo, e della densità  $\varphi$  dell'elemento schermante. Tale riduzione può essere applicata solo qualora l'elemento schermante sia alto almeno quanto quello schermato, e comunque va applicata solo nelle zone che distano più di  $h$  dai lati dell'elemento oggetto del calcolo (*Figura G.24*).

**Tabella G.XI – Fattore di schermatura per muri e parapetti.**

| Rapporto di spaziatura $x/h$ | $\varphi = 1,0$                    | $\varphi = 0,8$                    |
|------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| $0 \leq x/h \leq 5$          | $\psi_s = 0,3$                     |                                    |
| $5 \leq x/h \leq 10$         | $\psi_s = 0,07 \cdot (x/h) - 0,05$ | $\psi_s = 0,03 \cdot (x/h) + 0,15$ |
| $10 \leq x/h \leq 15$        | $\psi_s = 0,04 \cdot (x/h) + 0,25$ | $\psi_s = 0,04 \cdot (x/h) + 0,05$ |
| $15 \leq x/h \leq 20$        | $\psi_s = 0,03 \cdot (x/h) + 0,40$ | $\psi_s = 0,07 \cdot (x/h) - 0,40$ |



**Figura G.23 – Coefficiente di schermatura  $\psi_s$ .**

**Figura G.24 – Effetto di schermatura.**

|   |        |                  |  |         |
|---|--------|------------------|--|---------|
|  | Rev. 0 | Data Giugno 2023 | EI: BI029F-D-NUO-RT-09-r00                       | Pag. 19 |
|   |        |                  | RELAZIONE DI CALCOLO DEI SOSTEGNI<br>DEI TRACKER |         |

Nel caso specifico nella sola condizione di lavoro si considera sui Trackers interni l'effetto della schermatura offerto dai Trackers esterni moltiplicando la forza vento per il coefficiente riduttivo:

$$\psi_s = 0,3$$

Valore dedotto dalla tabella G.XI delle CNR DT207/2018 per  $x/h = 2$ .

|   |        |                  |  |         |
|---|--------|------------------|--|---------|
|  | Rev. 0 | Data Giugno 2023 | EI: BI029F-D-NUO-RT-09-r00                       | Pag. 20 |
|   |        |                  | RELAZIONE DI CALCOLO DEI SOSTEGNI<br>DEI TRACKER |         |

## 6. ANALISI DEI CARICHI

### 6.1. Carichi permanenti (G2)

Si considerano i carichi permanenti dovuti al peso dei pannelli fotovoltaici e al peso dei telai di sostegno.

Nell'analisi si considerano entrambi i carichi come non strutturali (G2).

Il carico, diretto verso il basso, è uniformemente distribuito sulla superficie dei pannelli e vale:

$$g2k = 0,50 \text{ kN/m}^2$$

A metro lineare di struttura il carico dovuto al peso dei pannelli e al telaio di sostegno vale:

$$g2k = 2,39 \text{ kN/m}$$

Considerando l'interasse dei sostegni pari a 3,9m, su ciascun montante l'azione verticale corrispondente è:

$$G2 = 9,32 \text{ kN}$$

### 6.2. Azione del vento (Qv)

L'azione del vento è valutata con riferimento al par. 3.3 del D.M. 17 gennaio 2018, alla relativa circolare applicativa e alle CNR-DT 207/2018 - *Istruzioni per la valutazione delle azioni e degli effetti del vento sulle costruzioni*.

#### 6.2.1. Definizione del sito

Il sito di intervento si trova in comune di Nuoro, nella parte orientale della Sardegna ricompresa nella **ZONA 5** (Figura 3.3.1 delle NTC2018).

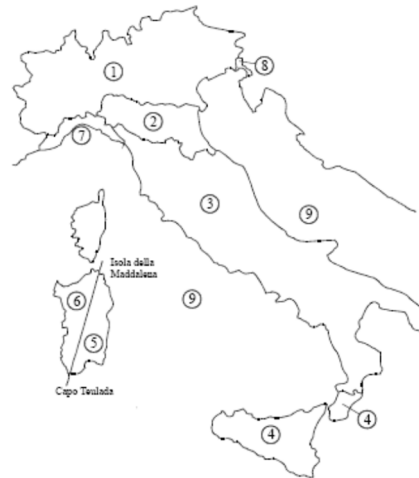


Figura 3.3.1 – Mappa delle zone in cui è suddiviso il territorio italiano

L'altitudine massima del sito è  $as = 570 \text{ m s.l.m.}$

La classe di rugosità del terreno è **D** (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, ...))

La categoria di esposizione è la **III** (vedi figura riportata qui di seguito).

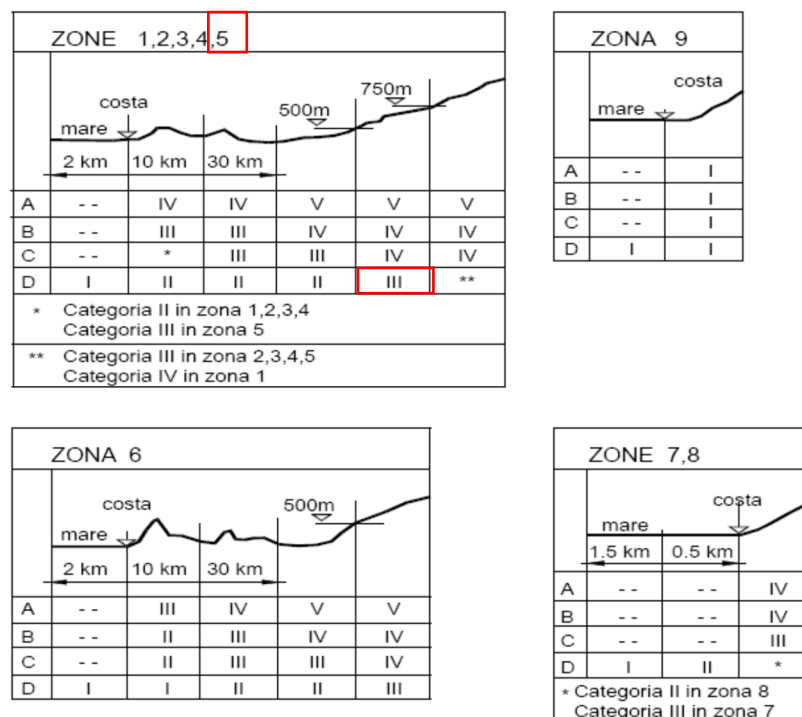



Figura 3.3.2 - Definizione delle categorie di esposizione

|   |        |                  |  |         |
|---|--------|------------------|--|---------|
|  | Rev. 0 | Data Giugno 2023 | El: BI029F-D-NUO-RT-09-r00                       | Pag. 22 |
|   |        |                  | RELAZIONE DI CALCOLO DEI SOSTEGNI<br>DEI TRACKER |         |

### 6.2.2. Velocità di riferimento in condizioni di riposo ( $\alpha = 5^\circ$ )

La velocità di riferimento  $V_r$  è il valore medio su 10 minuti, a 10m di altezza dal suolo su un terreno pianeggiante e omogeneo di categoria di esposizione, riferito al periodo di ritorno di progetto  $T_R$ .

Per le opere in progetto il periodo di ritorno si assume pari a  $T_R = 50$ anni.

$$V_r = V_b \times C_r$$

Con  $C_r$  coefficiente di ritorno, funzione del periodo di ritorno di progetto  $T_R$ :

$$c_r = 0.75 \sqrt{1 - 0.2 \times \ln \left[ -\ln \left( 1 - \frac{1}{T_R} \right) \right]}$$

Assunto  $T_R$  pari a 50 anni, si ottiene:

$$C_r = 1,0$$

$V_b$  è la velocità base di riferimento:

$$V_b = V_{b,0} \times C_a$$

Con  $V_{b,0} = 28$  m/s per la zona 5 è la velocità base di riferimento al livello del mare assegnata in funzione della zona in cui sorge la costruzione.

$C_a$  è il coefficiente di altitudine pari a:

$$c_a = 1 \quad \text{per } a_s \leq a_0$$

$$c_a = 1 + k_s \left( \frac{a_s}{a_0} - 1 \right) \quad \text{per } a_0 < a_s \leq 1500 \text{ m}$$

Nel caso in esame, per altitudine  $a_s = 570$  m s.l.m.m.  $< a_0 = 750$  m s.l.m.m., si ottiene:

$$C_a = 1,00$$


Da cui:

$$V_r = 28 \text{ m/s} \quad \text{Velocità di riferimento per } T_R = 50 \text{ anni}$$

La pressione cinetica di riferimento è data dalla seguente espressione:

$$q_r = \frac{1}{2} \rho v_r^2 = 490,0 \text{ N/m}^2$$

con  $\rho$  = densità dell'aria assunta convenzionalmente costante e pari a  $1,25 \text{ kg/m}^3$

|   |        |                  |  |         |
|---|--------|------------------|--|---------|
|  | Rev. 0 | Data Giugno 2023 | El: BI029F-D-NUO-RT-09-r00                       | Pag. 23 |
|   |        |                  | RELAZIONE DI CALCOLO DEI SOSTEGNI<br>DEI TRACKER |         |

### 6.2.3. Velocità di riferimento in condizioni di lavoro ( $\alpha = 60^\circ$ )

In condizioni di lavoro, come detto al precedente par. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, si assume la velocità massima della raffica del vento pari a 17m/s a cui corrisponde la velocità di riferimento di:

$$V_r = 12 \text{ m/s}$$

La pressione cinetica di riferimento è data dalla seguente espressione:

$$q_r = \frac{1}{2} \rho v_r^2 = 90,0 \text{ N/m}^2$$

con  $\rho$  = densità dell'aria assunta convenzionalmente costante e pari a 1,25 kg/m<sup>3</sup>.

### 6.2.4. Coefficiente di esposizione ( $c_e$ )

Il coefficiente di esposizione  $c_e$  dipende dall'altezza  $z$  sul suolo del punto considerato, dalla topografia del terreno e dalla categoria di esposizione del sito ove sorge la costruzione. In assenza di analisi specifiche che tengano in conto la direzione di provenienza del vento e l'effettiva scabrezza e topografia del terreno che circonda la costruzione, per altezze sul suolo non maggiori di  $z = 200$  m, esso è dato dalla formula:

$$c_e(z) = k_r^2 c_t \ln(z/z_0) [7 + c_t \ln(z/z_0)] \quad \text{per } z \geq z_{\min}$$

$$c_e(z) = c_e(z_{\min}) \quad \text{per } z < z_{\min}$$

Per categoria di esposizione III si ha:

$k_r = 0,20$       fattore di terreno;

$z_0 = 0,01$  m    lunghezza di rugosità;

$z_{\min} = 5$  m     altezza minima.

Inoltre per il coefficiente di topografia, in mancanza di più approfondite valutazioni, il coefficiente di topografia è posto di regola pari a 1 sia per le zone pianeggianti sia per quelle ondulate, collinose e montane:

$$c_t = 1.00 \quad \text{Coefficiente di topografia}$$

Da cui il coefficiente di esposizione  $c_e(z)$  assume i seguenti valori al variare dell'altezza  $z$  di riferimento:



| z [m] | Ce (z) |
|-------|--------|
| 0     | 1,708  |
| 5,0   | 1,708  |
| 5,5   | 1,764  |
| 6,0   | 1,817  |
| 6,5   | 1,866  |
| 7,0   | 1,912  |
| 7,5   | 1,955  |
| 8,0   | 1,995  |
| 8,5   | 2,033  |
| 9,0   | 2,070  |
| 9,5   | 2,105  |
| 10,0  | 2,138  |
| 10,5  | 2,169  |
| 11,0  | 2,200  |
| 11,5  | 2,229  |
| 12,0  | 2,257  |
| 12,5  | 2,284  |
| 13,0  | 2,311  |
| 13,5  | 2,336  |
| 14,0  | 2,360  |
| 14,5  | 2,384  |

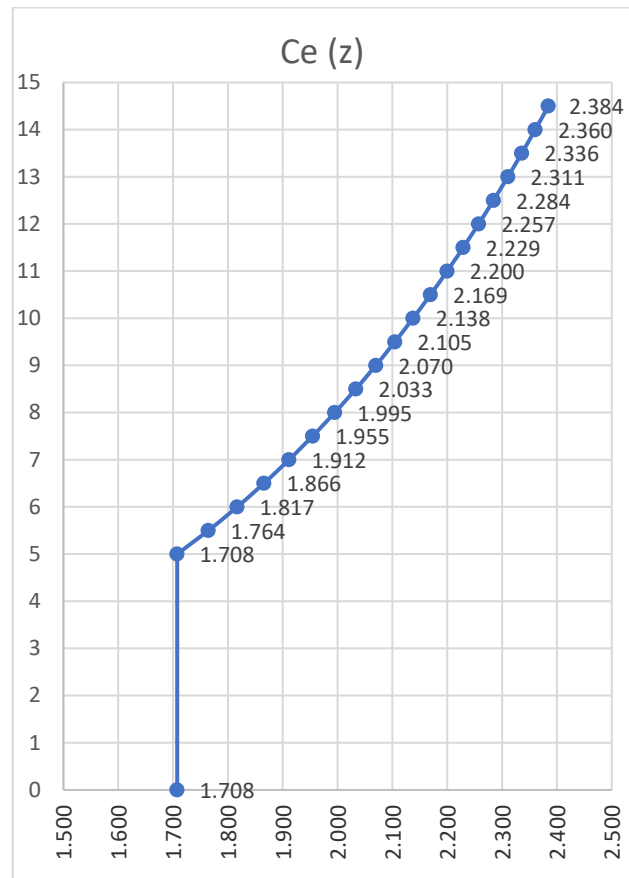


Figura 6.1 – Andamento del coefficiente  $C_e$  in funzione dell'altezza dal suolo.

#### 6.2.5. Coefficienti aerodinamici in posizione di riposo ( $\alpha = 5^\circ$ )

In posizione di riposo ( $\alpha = 5^\circ$ ) si fa riferimento a quanto indicato nella Circolare n. 7 per le tettoie a falda singola (par. C3.3.8.2.1).

Si calcola la forza risultante del vento sul piano della copertura attraverso l'impiego di coefficienti di forza  $C_f$  positivi e negativi. Le forze risultanti saranno applicate secondo le condizioni di carico più gravose fra quelle riportate qui di seguito.

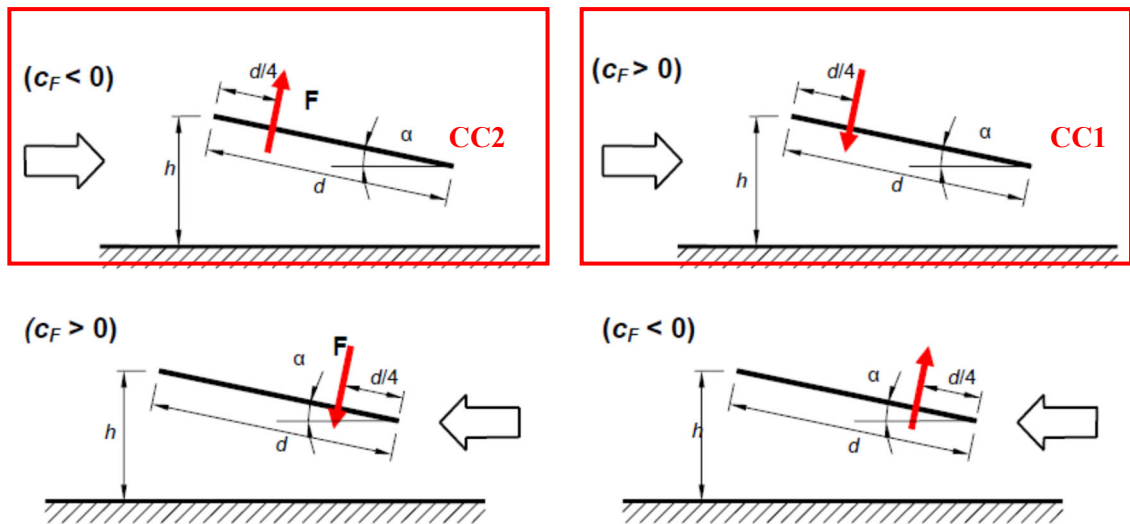


Figura 6.2 – Tettoie a semplice falda: posizione del punto di applicazione della forza risultante.

Per il dimensionamento della struttura di sostegno le condizioni di vento più gravose sono:

CC1: pressione verso il basso;

CC2: pressione verso l'alto (sollevamento).

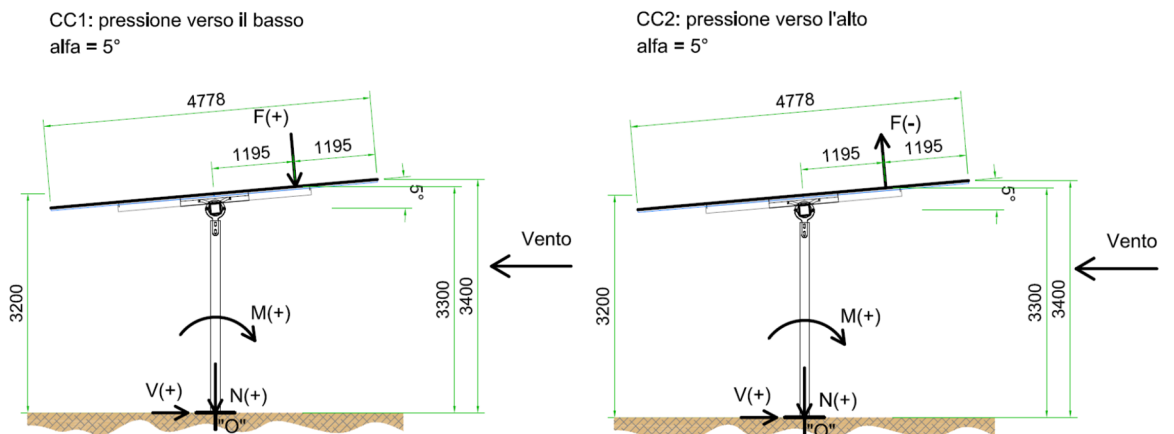


Figura 6.3 – Condizioni di vento CC1 e CC2 in posizione di riposo (alfa = 5°).

Per inclinazione della falda  $\alpha=5^\circ$ , i coefficienti di forza  $C_f$  assumono i seguenti valori:

$$C_{f+} = 0,2 + 5/30 = + 0,367 \quad \text{schacciamento}$$

$$C_{f-} = -0,5 - 1,3 \times 5/30 = - 0,717 \quad \text{sollevamento}$$

In questa configurazione di riposo, i pannelli quasi orizzontali lasciano circolare il vento in maniera pressoché indisturbata sopra e sotto di essi. Non si tiene pertanto conto di alcun effetto di schermatura offerto dai pannelli di bordo su quelli interni.

#### 6.2.6. Coefficienti aerodinamici in posizione di lavoro (alfa = 60°)

In posizione di lavoro i pannelli possono raggiungere un'inclinazione massima rispetto all'orizzontale pari ad  $\alpha = 60^\circ$ .

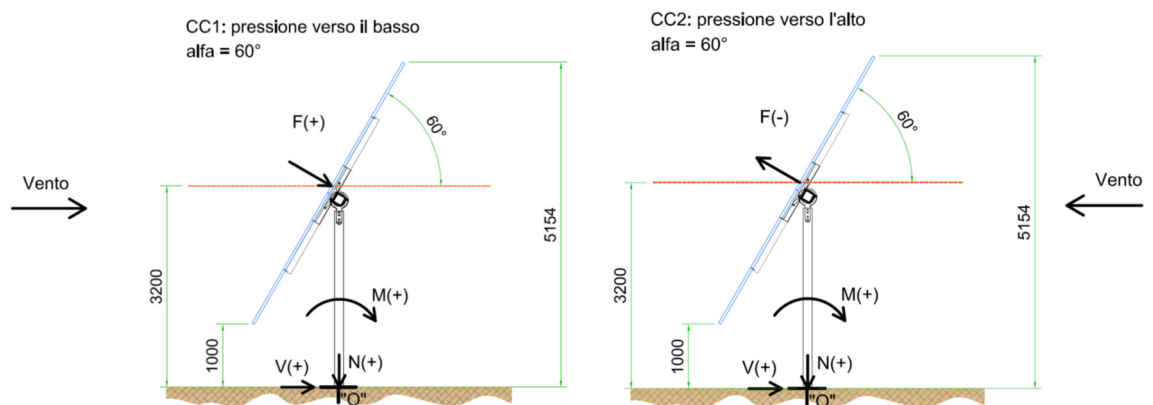


Figura 6.4 – Condizioni di vento CC1 e CC2 in posizione di lavoro (alfa = 60°).

In questa configurazione i coefficienti aerodinamici utilizzati per le coperture a singola falda (applicabili nel campo  $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ ) non possono essere utilizzati.

Si fa pertanto riferimento alla trattazione relativa a insegne e tabelloni (Appendice G.7 della CNR DT207/2018) e alla trattazione relativa a Muri e parapetti (Appendice G.5 della CNR DT207/2018).

Il coefficiente di forza  $C_f$  assume i seguenti valori per i pannelli esterni (non schermati):


$$C_{f+} = + 1,80 \quad \text{schacciamento}$$

$$C_{f-} = - 1,80 \quad \text{sollevamento}$$

Per i Trackers interni si considera l'effetto di schermatura applicando il coefficiente riduttivo  $\psi_s = 0,3$  al coefficiente di forza:

$$\psi * C_{f+} = + 0,54 \quad \text{schacciamento}$$

$$\psi * C_{f-} = - 0,54 \quad \text{sollevamento}$$

|   |        |                  |  |         |
|---|--------|------------------|--|---------|
|  | Rev. 0 | Data Giugno 2023 | EI: BI029F-D-NUO-RT-09-r00                       | Pag. 27 |
|   |        |                  | RELAZIONE DI CALCOLO DEI SOSTEGNI<br>DEI TRACKER |         |

### 6.2.7. Azioni a metro lineare in condizioni di riposo ( $\alpha = 5^\circ$ )

Per le notazioni si fa riferimento alla **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata..**

La dimensione trasversale della copertura di pannelli è:

$$B = 4,778 \text{ m}$$

Considerando i sostegni di altezza 3,2m e l'inclinazione dei pannelli di  $5^\circ$  si calcola l'altezza massima della struttura in condizione di riposo:

$$h = 3,4\text{m}$$

Si calcola quindi il coefficiente  $C_e(z)$  per  $z = h$ :

$$C_e = 1,708$$

Da cui la pressione del vento al netto del coefficiente di forza vale:

$$p = 0,490 \times 1,708 = 0,837 \text{ kN/m}^2$$

Le forze esercitate dal vento verso il basso e verso l'alto valgono:

$$F(+) = p \cdot B \cdot C_{f+} = 1,47 \text{ kN/m} \quad (\text{Condizione CC1})$$

$$F(-) = p \cdot B \cdot C_{f-} = -2,87 \text{ kN/m} \quad (\text{Condizione CC2})$$

A metro lineare di struttura le sollecitazioni al piede dei Trackers, valutati in asse ai sostegni alla quota del terreno sono:

#### Condizione CC1: pressione verso il basso

$$N = 1,46 \text{ kN/m} \quad (\text{compressione})$$

$$H = 0,13 \text{ kN/m} \quad \text{Azione orizzontale}$$


$$M = 2,16 \text{ kNm/m} \quad \text{Momento flettente}$$

#### Condizione CC2: pressione verso l'alto (sollevamento)

$$N = -2,86 \text{ kN/m} \quad (\text{trazione})$$

$$H = -0,25 \text{ kN/m} \quad \text{Azione orizzontale}$$

$$M = -4,22 \text{ kNm/m} \quad \text{Momento flettente}$$

|   |        |                  |  |         |
|---|--------|------------------|--|---------|
|  | Rev. 0 | Data Giugno 2023 | EI: BI029F-D-NUO-RT-09-r00                       | Pag. 28 |
|   |        |                  | RELAZIONE DI CALCOLO DEI SOSTEGNI<br>DEI TRACKER |         |

### 6.2.8. Azioni a metro lineare in condizioni di lavoro ( $\alpha = 60^\circ$ )

Per le notazioni si fa riferimento alla **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata..**

L'altezza  $z$  di riferimento per il calcolo del coefficiente  $C_e$  è pari all'altezza dei sostegni:

$$z = h_s = 3,2\text{m}$$

Si calcola quindi il coefficiente  $C_e(z)$ :

$$C_e = 1,708 \quad \text{per } z = h_s$$

Da cui la pressione del vento al netto del coefficiente di forza vale:

$$p = 0,090 \times 1,708 = 0,154 \text{ kN/m}^2$$

Le forze esercitate dal vento verso il basso e verso l'alto valgono:

Per i Trackers esterni:

$$F(+) = p \cdot B \cdot C_{f+} = 1,32 \text{ kN/m} \quad (\text{Condizione CC1})$$

$$F(-) = p \cdot B \cdot C_{f-} = -1,32 \text{ kN/m} \quad (\text{Condizione CC2})$$

Per i Trackers interni schermati:

$$F(+) = p \cdot B \cdot \psi \cdot C_{f+} = 0,40 \text{ kN/m} \quad (\text{Condizione CC1})$$

$$F(-) = p \cdot B \cdot \psi \cdot C_{f-} = -0,40 \text{ kN/m} \quad (\text{Condizione CC2})$$

A metro lineare di struttura le sollecitazioni al piede dei Trackers, valutati in asse ai sostegni alla quota del terreno sono:


### **TRACKERS ESTERNI**

Condizione CC1: pressione verso il basso

$$N = 0,66 \text{ kN/m} \quad (\text{compressione})$$

$$H = 1,15 \text{ kN/m} \quad \text{Azione orizzontale}$$

$$M = 3,67 \text{ kNm/m} \quad \text{Momento flettente}$$

|   |        |                  |  |         |
|---|--------|------------------|--|---------|
|  | Rev. 0 | Data Giugno 2023 | EI: BI029F-D-NUO-RT-09-r00                       | Pag. 29 |
|   |        |                  | RELAZIONE DI CALCOLO DEI SOSTEGNI<br>DEI TRACKER |         |

Condizione CC2: pressione verso l'alto (sollevamento)

N = - 0,66 kN/m (trazione)  
H = - 1,15 kN/m Azione orizzontale  
M = - 3,67 kNm/m Momento flettente

**TRACKERS INTERNI SCHERMATI**

Condizione CC1: pressione verso il basso

N = 0,20 kN/m (compressione)  
H = 0,34 kN/m Azione orizzontale  
M = 1,10 kNm/m Momento flettente

Condizione CC2: pressione verso l'alto (sollevamento)

N = - 0,20 kN/m (trazione)  
H = - 0,34 kN/m Azione orizzontale  
M = - 1,10 kNm/m Momento flettente

**6.3. Azione della neve (Qn)**

Secondo il par. 3.4 del DM 17.01.2018 (NTC) il carico neve va valutato con la seguente espressione:

Il carico provocato dalla neve sulle coperture sarà valutato mediante la seguente espressione:

$$q_s = q_{sk} \cdot \mu_i \cdot C_E \cdot C_t \quad [3.4.1]$$

dove:

$q_{sk}$  è il valore di riferimento del carico della neve al suolo, di cui al § 3.4.2;

$\mu_i$  è il coefficiente di forma della copertura, di cui al § 3.4.3;

$C_E$  è il coefficiente di esposizione di cui al § 3.4.4;

$C_t$  è il coefficiente termico di cui al § 3.4.5.

Si assume che il carico della neve agisca in direzione verticale e lo si riferisce alla proiezione orizzontale della superficie della copertura.

$$q_s = q_{sk} \mu_i C_E C_t$$

dove:

$q_s$  è il carico neve sulla copertura;

$q_{sk}$  è il valore di riferimento del carico neve al suolo [kN/m<sup>2</sup>], fornito al § 3.4.2 delle NTC per un periodo di ritorno di 50anni;

$\mu_i$  è il coefficiente di forma della copertura, fornito al par. 3.4.3 delle NTC;

$C_E$  è il coefficiente di esposizione di cui al § 3.4.4 delle NTC.  $C_E = 1,0$  per classe di topografia normale;

$C_t$  è il coefficiente termico di cui al § 3.4.5 delle NTC. Si assume  $C_t = 1,0$ .

Si ipotizza che il carico agisca in direzione verticale e lo si riferisce alla proiezione orizzontale della superficie della copertura.

Per la zona III a quota  $a_s = 570$  m s.l.m. (superiore a 200 m s.l.m.) il valore di riferimento risulta:

$$q_{sk} = 0,51 [1+(a_s/481)^2] = 1,23 \text{ kN/m}^2$$

Per coperture ad una o due falde il valore del coefficiente di forma dipende dall'angolo  $\alpha$ , espresso in gradi sessagesimali, formato dalla falda con l'orizzontale (vedi Tabella 3.4.II delle NTC).

Tab. 3.4.II – Valori del coefficiente di forma

| Coefficiente di forma | $0^\circ \leq \alpha < 30^\circ$ | $30^\circ < \alpha < 60^\circ$       | $\alpha \geq 60^\circ$ |
|-----------------------|----------------------------------|--------------------------------------|------------------------|
| $\mu_1$               | 0,8                              | $0,8 \cdot \frac{(60 - \alpha)}{30}$ | 0,0                    |

### 6.3.1. Neve in condizioni di riposo ( $\alpha = 5^\circ$ )

Per  $\alpha = 5^\circ \leq 30^\circ$  il coefficiente di forma vale  $\mu_1 = 0,8$ , per cui si ottiene:

$$q_s = 0,8 \times 1,23 \times 1,0 \times 1,0 \cong 1,00 \text{ kN/m}^2$$

Tale carico è applicato sulla proiezione orizzontale della copertura.


A metro lineare il carico agente sulla struttura vale:

$$Q_n = 1,00 \text{ kN/m}^2 \times 4,78 \times \cos \alpha = 4,76 \text{ kN/m}$$

### 6.3.2. Neve in condizioni di lavoro ( $\alpha = 60^\circ$ )

Per  $\alpha = 60^\circ$  il coefficiente di forma vale  $\mu_1 = 0,0$ , per cui si ottiene:

$$q_s = 0,00 \text{ kN/m}^2$$


|   |        |                  |  |         |
|---|--------|------------------|--|---------|
|  | Rev. 0 | Data Giugno 2023 | El: BI029F-D-NUO-RT-09-r00                       | Pag. 31 |
|   |        |                  | RELAZIONE DI CALCOLO DEI SOSTEGNI<br>DEI TRACKER |         |

Nella condizione di lavoro dei pannelli, non si considera il carico neve.

#### **6.4. Azione termiche (Qt)**

Le azioni dovute alle variazioni termiche non inducono sollecitazioni sulle strutture di sostegno e pertanto vengono trascurate.



|   |        |                  |  |         |
|---|--------|------------------|--|---------|
|  | Rev. 0 | Data Giugno 2023 | El: BI029F-D-NUO-RT-09-r00                       | Pag. 32 |
|   |        |                  | RELAZIONE DI CALCOLO DEI SOSTEGNI<br>DEI TRACKER |         |

## 7. COMBINAZIONE DI CARICO

Le combinazioni di carico SLU statiche sono ottenute mediante diverse combinazioni dei carichi permanenti ed accidentali, in modo da considerare tutte le situazioni più sfavorevoli agenti sulla struttura.

I carichi vengono applicati mediante opportuni coefficienti parziali di sicurezza, considerando l'eventualità più gravosa per la struttura.

### Combinazioni per verifiche agli stati limite ultimi (SLU)

Ai fini delle verifiche SLU si definiscono le seguenti combinazioni delle azioni.

$$\gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \gamma_{Q3} \cdot \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots \quad \text{Comb. fondamentali (SLU)}$$

$$E + G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots \quad \text{Comb. sismiche (SLV)}$$

$$G_1 + G_2 + P + A_d + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots \quad \text{Comb. eccezionali (ECC)}$$

### Combinazioni per verifiche agli stati limite di esercizio (SLE)

Ai fini delle verifiche SLE si definiscono le seguenti combinazioni delle azioni.

$$G_1 + G_2 + P + Q_{k1} + \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots \quad \text{Combinazioni caratteristiche (RARE)}$$

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{11} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots \quad \text{Combinazioni frequenti (FREQ)}$$

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots \quad \text{Comb. quasi permanenti (QP)}$$

Per la struttura in oggetto, considerato che si tratta di struttura molto leggera ubicata in zona a bassa sismicità, le combinazioni sismiche non sono rilevanti e quindi non vengono considerate.

Anche le combinazioni eccezionali non sono significative e non vengono analizzate.

Infine tra le combinazioni SLE si considerano solo quelle caratteristiche (RARE).

I valori dei coefficienti di combinazione  $\gamma$  e  $\Psi$  sono riportati nelle seguenti tabelle desunte dalla NTC2018 cap. 2.

Tabella 3 - Coefficienti parziali di sicurezza per le combinazioni SLU

|                  |  |               |                  |
|------------------|--|---------------|------------------|
| G1               | Carichi permanenti (peso proprio)                          | $\gamma_{G1}$ | 1,30 sfavorevole |
|                  |  |               | 1,00 favorevole  |
| G2               | Sovraccarichi permanenti (permanent non strutturali)       | $\gamma_{G2}$ | 1,50 sfavorevole |
|                  |  |               | 0,80 favorevole  |
| Qv,<br>Qn,<br>Qt | Sovraccarichi variabili (Vento, Neve, Variazioni termiche) | $\gamma_{Q1}$ | 1,50 sfavorevole |
|                  |  | $\gamma_{Q2}$ | 0,00 favorevole  |
|                  |  | $\gamma_{Q3}$ |                  |

Tabella 4 - Coefficienti  $\Psi$  per le azioni variabili

| Azione |                     | Coefficiente $\Psi_0$ | Coefficiente $\Psi_1$<br>(frequente) | Coefficiente $\Psi_2$<br>(quasi permanente) |
|--------|---------------------|-----------------------|--------------------------------------|---|
| Qv     | Vento               | 0,6                   | 0,2                                  | 0,0   |
| Qn     | Neve                | 0,5                   | 0,2                                  | 0,0   |
| Qt     | Variazioni termiche | 0,6                   | 0,5                                  | 0,0   |

Le combinazioni di progetto sono:

#### Combinazioni fondamentali (SLU)

|                                       |  |
|---------------------------------------|--|
| SLU01: 1,50 G2 + 1,50 Qv(+) + 0,75 Qn | vento principale verso il basso + neve |
| SLU02: 0,80 G2 + 1,50 Qv(-)           | vento verso l'alto                     |
| SLU03: 1,50 G2 + 0,90 Qv(+) + 1,50 Qn | neve principale + vento verso il basso |

#### Combinazioni caratteristiche RARE (SLE)

|                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| RARA01: G2 + Qv(+) + 0,5 Qn       | vento principale verso il basso + neve |
| RARA02: G2 + 1,00 Qv(-)           | vento verso l'alto                     |
| RARA03: G2 + 0,60 Qv(+) + 1,00 Qn | neve principale + vento verso il basso |

## 8. CALCOLO DELLE SOLLECITAZIONI ALLA BASE DEI SOSTEGNI

Si riportano le sollecitazioni “calcolate a mano” agenti in asse dei sostegni dei Trackers a livello del terreno (punto “O” della **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

Per tutti i sostegni, laterali e centrali, si considera una lunghezza di influenza di **3,9m**.

Le convenzioni sui segni delle sollecitazioni N, V, M sono riportate nella seguente figura:

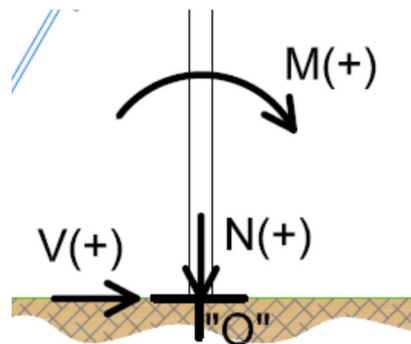


Figura 8.1 – Convenzione dei segni per le sollecitazioni agenti alla base dei sostegni

### 8.1. Condizione di riposo (alfa = 5°)

Per tutte le file, indipendentemente dalla loro posizione (esterna o interna) le sollecitazioni alla base dei sostegni è riportata nella seguente tabella:

| Combinaz. | Sollecitazioni sostegno laterale e centrale |           |            |
|-----------|---|-----------|------------|
|           | Llat = Lcen = 3,9 m                         |           |            |
|           | N<br>[kN]                                   | V<br>[kN] | M<br>[kNm] |
| SLU01     | 36,44                                       | 0,75      | 12,64      |
| SLU02     | -9,25                                       | -1,46     | -24,70     |
| SLU03     | 46,95                                       | 0,45      | 7,58       |
| RARA01    | 24,30                                       | 0,50      | 8,43       |
| RARA02    | -1,82                                       | -0,97     | -16,47     |
| RARA03    | 31,30                                       | 0,30      | 5,06       |

## 8.1. Condizione di lavoro (alfa = 60°)

Le sollecitazioni alla base dei sostegni sono riportate nelle seguenti tabelle per i Trackers esterni e per quelli interni:

### 8.1.1. Sollecitazioni a base sostegni Trackers Esterni (TE)

| Combinaz. | Sollecitazioni sostegno laterale e centrale |           |            |
|-----------|---|-----------|------------|
|           | Llat = Lcen = 3,9 m                         |           |            |
|           | N<br>[kN]                                   | V<br>[kN] | M<br>[kNm] |
| SLU01     | 17,85                                       | 6,71      | 21,47      |
| SLU02     | 3,58  | -6,71     | -21,47     |
| SLU03     | 16,30                                       | 4,03      | 12,88      |
| RARA01    | 11,90                                       | 4,47      | 14,31      |
| RARA02    | 6,73  | -4,47     | -14,31     |
| RARA03    | 10,87                                       | 2,68      | 8,59       |

### 8.1.1. Sollecitazioni a base sostegni Trackers Interni (TI)

| Combinaz. | Sollecitazioni sostegno laterale e centrale |           |            |
|-----------|---|-----------|------------|
|           | Llat = Lcen = 3,9 m                         |           |            |
|           | N<br>[kN]                                   | V<br>[kN] | M<br>[kNm] |
| SLU01     | 15,14                                       | 2,01      | 6,44       |
| SLU02     | 6,29  | -2,01     | -6,44      |
| SLU03     | 14,67                                       | 1,21      | 3,86       |
| RARA01    | 10,09                                       | 1,34      | 4,29       |
| RARA02    | 8,54  | -1,34     | -4,29      |
| RARA03    | 9,78  | 0,81      | 2,58       |

## 9. VERIFICHE GEOTECNICHE

Le verifiche geotecniche dei pali di fondazione sono state eseguite, ai sensi delle NTC 2018 (par.6.4.3), nei confronti dei carichi limite verticale ed orizzontale.

### 9.1. Carico limite verticale

Il valore di progetto  $R_d$  della resistenza nei confronti del carico verticale si ottiene a partire dal valore caratteristico  $R_k$  applicando i coefficienti parziali  $\gamma_R$  della Tab. 6.4.II per i pali infissi.

Tab. 6.4.II – Coefficienti parziali  $\gamma_R$  da applicare alle resistenze caratteristiche a carico verticale dei pali

| Resistenza               | Simbolo       | Pali infissi | Pali trivellati | Pali ad elica continua |
|--------------------------|---------------|--------------|-----------------|------------------------|
|                          | $\gamma_R$    | (R3)         | (R3)            | (R3)                   |
| Base                     | $\gamma_b$    | 1,15         | 1,35            | 1,3                    |
| Laterale in compressione | $\gamma_s$    | 1,15         | 1,15            | 1,15                   |
| Totale (*)               | $\gamma$      | 1,15         | 1,30            | 1,25                   |
| Laterale in trazione     | $\gamma_{st}$ | 1,25         | 1,25            | 1,25                   |

(\*) da applicare alle resistenze caratteristiche dedotte dai risultati di prove di carico di progetto.

La resistenza caratteristica  $R_k$  del palo singolo può essere dedotta con riferimento alle procedure analitiche che prevedano l'utilizzo dei parametri geotecnici o dei risultati di prove in sito, il valore caratteristico della resistenza  $R_{c,k}$  (o  $R_{t,k}$ ) è dato dal minore dei valori ottenuti applicando al valore medio e al valore minimo delle resistenze calcolate  $R_{c,cal}$  (o  $R_{t,cal}$ ) i fattori di correlazione  $\xi$  riportati nella Tab. 6.4.IV, in funzione del numero  $n$  di verticali di indagine:

$$R_{c,k} = \min \left\{ \frac{(R_{c,cal})_{media}}{\xi_3}; \frac{(R_{c,cal})_{min}}{\xi_4} \right\} \qquad R_{t,k} = \min \left\{ \frac{(R_{t,cal})_{media}}{\xi_3}; \frac{(R_{t,cal})_{min}}{\xi_4} \right\}$$

Tab. 6.4.IV - Fattori di correlazione  $\xi$  per la determinazione della resistenza caratteristica in funzione del numero di verticali indagate

| Numero di verticali indagate | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 7    | $\geq 10$ |
|------------------------------|------|------|------|------|------|------|-----------|
| $\xi_3$                      | 1,70 | 1,65 | 1,60 | 1,55 | 1,50 | 1,45 | 1,40      |
| $\xi_4$                      | 1,70 | 1,55 | 1,48 | 1,42 | 1,34 | 1,28 | 1,21      |

Fatta salva la necessità di almeno una verticale di indagine per ciascun sistema di fondazione, nell'ambito dello stesso sistema di fondazione, ai fini del conteggio delle verticali di indagine per la scelta dei coefficienti  $\xi$  in Tab. 6.4.IV si devono prendere solo le verticali lungo le quali la singola indagine (sondaggio con prelievo di campioni indisturbati, prove penetrometriche, ecc.) sia stata spinta ad una profondità superiore alla lunghezza dei pali, in grado di consentire una completa identificazione del modello geotecnico di sottosuolo. Nel caso in oggetto, il numero di verticali indagate è **7**.

L'espressione generica utilizzata per il calcolo della portanza di un palo con la punta in terreno granulare soggetto ad un carico verticale è la seguente:

$$Q_{lim} + W_p = Q_s + Q_p$$

Dove:

$Q_p$  = portata di punta (valore medio di calcolo)

$Q_s$  = portata laterale (valore medio di calcolo)

$W_p$  = peso proprio del palo, che nel caso specifico può essere trascurato.

Nel caso specifico, trascurando il peso del palo, il valore di progetto della resistenza a compressione,  $R_{cd}$  si ottiene con la seguente formulazione:

$$R_{cd} = Q_s / (\xi_3 * 1,15) + (Q_p / (\xi_3 * 1,15))$$

La resistenza di progetto a trazione del palo, ovvero allo sfilamento sotto azioni assiali di sollevamento, si calcola trascurando il contributo della punta e utilizzando un coefficiente parziale di sicurezza più cautelativo per la portata laterale (1,25 anziché 1,15):

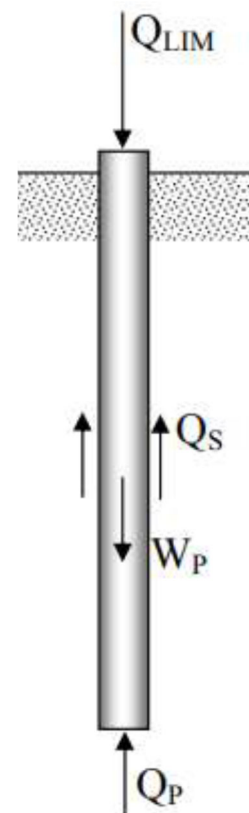
$$R_{cd} = Q_s / (\xi_3 * 1,25)$$

La portata laterale di calcolo ( $Q_s$ ) sarà valutata come sommatoria dei contributi dei differenti strati nel caso in cui il palo attraversi strati di diversa natura.

Per la stima di  $Q_s$ , si fa ricorso all'espressione:

$$Q_s = A_s \cdot \int_0^L \tau_s \cdot dz$$

Dove:



As è la superficie laterale per metro lineare di palo.

Nel caso di profili HE si può definire la dimensione  $d = B = H$  quale dimensione del palo, pari alla base B e all'altezza H del profilo. Con questa assunzione si ha  **$A_s = 6*d$** .

Nel caso di profili IPE si può definire la dimensione  $d = H = 2B$  quale dimensione del palo, pari all'altezza H e 2 volte la base B del profilo. Con questa assunzione si ha  **$A_s = 4*d$** .

$\tau_s = k \mu \sigma'_v$  è la resistenza laterale alla generica profondità z, che dipende dal coefficiente di attrito terreno-palo ( $\mu$ ), e dal rapporto fra la tensione normale che agisce alla profondità z sulla superficie laterale del palo e la tensione verticale  $\sigma'_v$  alla stessa profondità.

Considerando le modalità operative di infissione dei pali in acciaio si assume:

$$k = 0,75$$

$$\mu = \tan 20^\circ = 0,36$$

Per la scelta dei valori k e  $\mu$  si è fatto riferimento alle raccomandazioni AGI 1984:

Tab. 5.1 - Valori indicativi di k e  $\mu$  dell'eq. |4| per terreni incoerenti

| Tipo di palo |                               | Valori di k   | Valori di $\mu$      |
|--------------|-------------------------------|---------------|----------------------|
| BATTUTO      | Acciaio                       | 0.5 + 1       | tg 20°               |
|              | Calcestruzzo prefabbricato    | 1 ÷ 2         | tg (3/4 $\varphi'$ ) |
|              | Calcestruzzo gettato in opera | 1 ÷ 3         | tg $\varphi'$        |
| TRIVELLATO   |                               | 0.4 + 0.7 (*) | tg $\varphi'$        |

(\*) Decrescente con la profondità.

La resistenza di calcolo della portata di punta,  $Q_p$ , in terreni incoerenti è stimata con l'equazione:

$$Q_p = A_p * q_p = A_p * (N_q * \sigma_{v0,P'} + N_c * c')$$

In cui:

$A_p$  è l'area di base del palo pari a:  $d^2$  per profili HE;  $d^2/2$  per profili IPE;

$q_p$  è la capacità portante unitaria;

$\sigma_{v0,P'}$  è la tensione verticale efficace alla punta;

$N_q$  è un fattore di capacità portante.

Il valore  $N_q$  dipende a parità di angolo di resistenza al taglio, dai meccanismi di rottura proposti da vari autori.

Si assumerà, caso per caso, i valori più cautelativi proposti dal Terzaghi riportati nella seguente figura 4 delle raccomandazioni AGI - 1984.

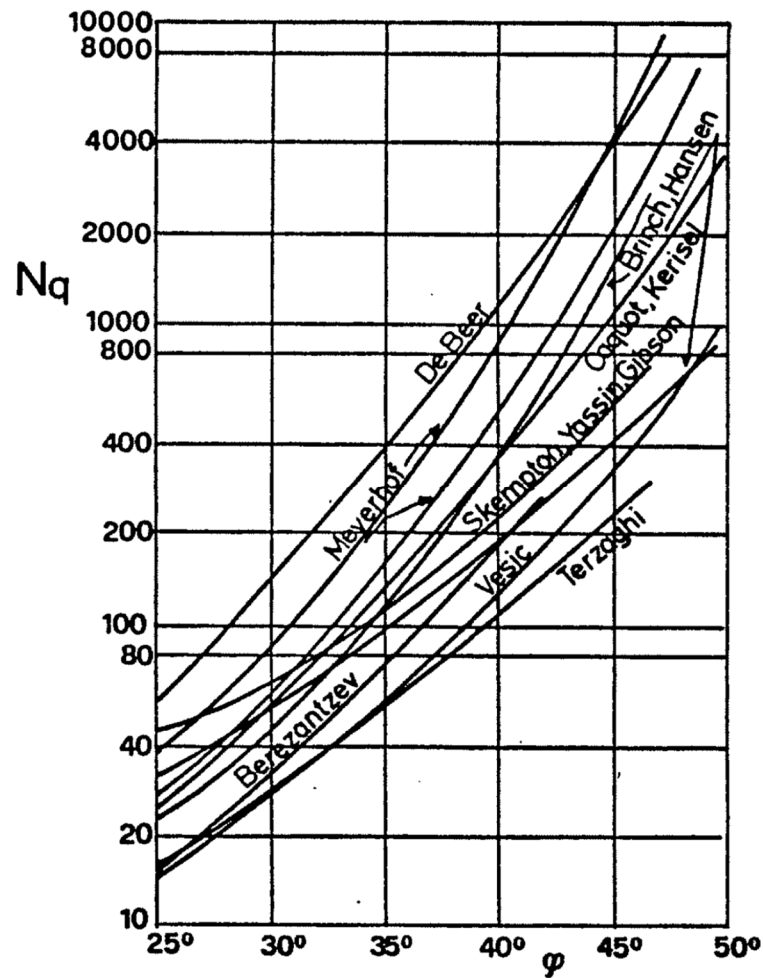



Figura 9.1 – Valori di  $N_q$  (secondo vari autori)

Nota  $N_q$ , si calcola  $N_c$  con:

$$N_c = (N_q - 1) \operatorname{ctg} \phi$$



|   |        |                  |  |         |
|---|--------|------------------|--|---------|
|  | Rev. 0 | Data Giugno 2023 | EI: BI029F-D-NUO-RT-09-r00                       | Pag. 40 |
|   |        |                  | RELAZIONE DI CALCOLO DEI SOSTEGNI<br>DEI TRACKER |         |

## 9.2. Carichi di progetto per il calcolo della lunghezza minima di infissione

Con i criteri illustrati nel precedente paragrafo si determina la lunghezza minima di infissione necessaria per sopportare i carichi verticali di progetto agenti sui supporti.

I carichi verticali SLU massimi e minimi si ottengono nella condizione di riposo dei Trackers e sono indipendenti quindi dalla posizione dei Trackers (interna o esterna), inoltre essendo le lunghezze di carico dei sostegni laterali e centrale identiche, le sollecitazioni agenti sono uguali per tutti i sostegni.

Si riassumono qui di seguito i carichi verticali di progetto:


In combinazione SLU03 (neve principale + vento verso il basso) si ottengono le massime azioni verticali di compressione agli SLU:

$$N_{\max, \text{comp}} = 47,0 \text{ kN}$$

In combinazione SLU02 (vento verso l'alto) si ottengono le massime azioni verticali di trazione agli SLU:

$$N_{\max, \text{traz}} = - 9,3 \text{ kN}$$

Con queste azioni si determinano le lunghezze minime di infissione dei pali adottando la sezione HEA140 ( $d = 0,14\text{m}$ ).

|   |        |                  |  |         |
|---|--------|------------------|--|---------|
|  | Rev. 0 | Data Giugno 2023 | El: BI029F-D-NUO-RT-09-r00                       | Pag. 41 |
|   |        |                  | RELAZIONE DI CALCOLO DEI SOSTEGNI<br>DEI TRACKER |         |

### 9.3. Calcolo della lunghezza minima di infissione

#### Stratigrafia

Si considera cautelativamente la presenza del solo strato superficiale detritico.

| Strato |       | Strato | H strato<br>[m] | $\gamma$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] | Valori caratteristici |               |       |       |               |     |     |
|--------|-------|--------|-----------------|----------------------------------|-----------------------|---------------|-------|-------|---------------|-----|-----|
| Tipo   | prof. |        |                 |                                  | $\phi'$<br>[°]        | $c'$<br>[kPa] | $\mu$ | k     | $K = \mu * k$ | Nq  | Nc  |
| liv.0  | 0     | AR     | 6,5             | 20                               | 38                    | 0             | 0,364 | 0,750 | 0,273         | 100 | 127 |
| liv.1  | 6,5   |        |                 |                                  |                       |               |       |       |               |     |     |
| liv.2  |       |        |                 |                                  |                       |               |       |       |               |     |     |
| liv.3  |       |        |                 |                                  |                       |               |       |       |               |     |     |
| liv.4  |       |        |                 |                                  |                       |               |       |       |               |     |     |
| liv.5  |       |        |                 |                                  |                       |               |       |       |               |     |     |
| liv.6  |       |        |                 |                                  |                       |               |       |       |               |     |     |
| liv.7  |       |        |                 |                                  |                       |               |       |       |               |     |     |
| liv.8  |       |        |                 |                                  |                       |               |       |       |               |     |     |

Coefficienti di calcolo

$$\gamma_{R3,base} = 1,15$$

$$\gamma_{R3,laterale\ in\ compressione} = 1,15$$

$$\gamma_{R3,laterale\ in\ trazione} = 1,25$$

$$\text{Numero verticali indagate} = 7 \quad \text{da cui} \quad \xi_3 = 1,45$$

$$\text{Profondità della falda da p.c.} = 1,0\text{m.}$$

9.3.1. *COMPRESSIONE*  $N_{ed} = +47,0\text{kN}$

$$\text{Dimensione del profilo HE:} \quad \mathbf{D = 0,14} \quad \mathbf{L_{min} = 2,5m}$$

$$\sigma'_{vo} = 34,00 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_s = 11,8 \text{ kN}$$

$$Q_p = 66,6 \text{ kN}$$

$$R_{cd} = Q_s / (1,45 * 1,15) + Q_p / (1,45 * 1,15) = 47,0 \text{ kN} \quad \cong N_{ed}$$

9.3.2. *TRAZIONE*  $N_{ed} = -9,3 \text{ kN}$

$$\text{Dimensione del profilo HE:} \quad \mathbf{D = 0,14} \quad \mathbf{L_{min} = 3,2m}$$

$$Q_s = 17,9 \text{ kN}$$

$$R_{cd} = Q_s / (1,45 * 1,25) = 9,9 \text{ kN} \quad \cong N_{ed}$$

#### 9.4. Riepilogo lunghezze minime di infissione

Si riassumono i risultati ottenuti nel precedente paragrafo.

Per tutti i sostegni HEA140 la lunghezza minima di infissione risulta 3,2m, necessaria per soddisfare la verifica allo sfilamento.

**Tabella 5 – Riepilogo delle lunghezze minime di infissione per i diversi sostegni**

| Tipo di sostegno | Tipo di profilo | Lmin [m]<br>Compressione | Lmin [m]<br>Trazione | L[m]<br>di progetto |
|------------------|-----------------|--------------------------|----------------------|---------------------|
| SL/SC            | HE140           | 2,5                      | 3,2                  | <b>3,2</b>          |

Questa lunghezza sarà assunta come dato di input nella successiva verifica del carico limite orizzontale. Qualora la lunghezza di infissione considerata risultasse insufficiente, si determinerà la lunghezza necessaria a soddisfare anche la verifica alle azioni orizzontali.

#### 9.5. Carico limite orizzontale (ovvero trasversale)

Si considera la teoria di Broms (1964a, 1964b) applicata al caso specifico di palo libero di ruotare in testa e terreno incoerente.


In questo caso la teoria di Broms considera due possibili meccanismi di rottura:

- Comportamento di tipo “PALO CORTO”;
- Comportamento di tipo “PALO LUNGO”.

Si andrà quindi a ricercare il cinematismo di rottura dei pali e soddisfare poi le condizioni di equilibrio.

Le ipotesi di calcolo sono quelle di Broms:

- comportamento dell’interfaccia palo-terreno rigido-perfettamente plastico;
- la forma della sezione trasversale del palo sia ininfluenza. l’interazione palo-terreno è determinata dalla dimensione caratteristica  $d$  della sezione del palo misurata normalmente alla direzione del movimento;
- le azioni orizzontali possono chiamare in causa la resistenza strutturale dei pali (nel caso di comportamento palo lungo). Si ipotizza un comportamento flessionale dei pali di tipo rigido perfettamente plastico.

|   |        |                  |  |         |
|---|--------|------------------|--|---------|
|  | Rev. 0 | Data Giugno 2023 | EI: BI029F-D-NUO-RT-09-r00                       | Pag. 43 |
|   |        |                  | RELAZIONE DI CALCOLO DEI SOSTEGNI<br>DEI TRACKER |         |

Considerato che la verifica è principalmente influenzata dagli strati superficiali del terreno, si considerano i seguenti parametri geotecnici per l'intero sito di intervento:

$$\phi' = 38^\circ \quad \gamma = 20\text{kN/m}^3$$

### Comportamento tipo Palo Corto

Il cinematismo che si ipotizza è il seguente: a seguito dell'applicazione della forza orizzontale H (dovuta all'azione del vento) nel palo corto la rotazione avviene attorno ad un punto molto prossimo all'estremità inferiore del palo. Broms suggerisce in questo caso di assumere il centro di rotazione coincidente con la punta del palo e di schematizzare la risultante delle azioni del terreno al di sotto di tale punto con una forza concentrata F.

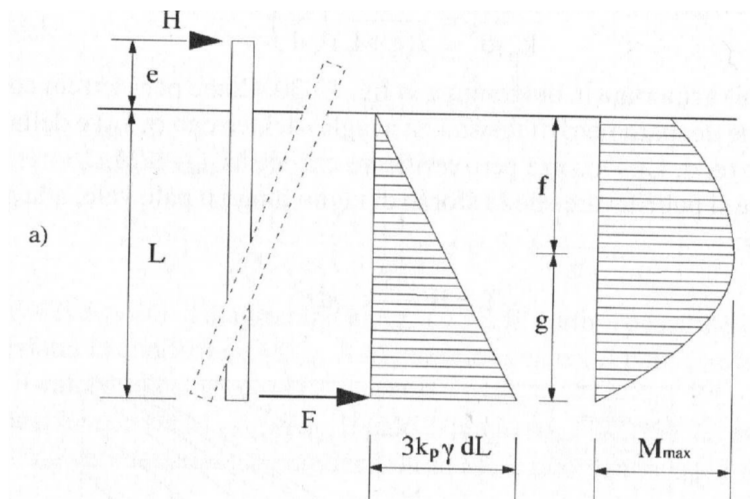


Figura 9.2 – Palo corto libero di ruotare in testa, terreni incoerenti


Imponendo l'equilibrio alla rotazione attorno alla punta del palo si ottiene il valore di Hlim che è funzione di  $\gamma$  e  $k_p$ :

$$\frac{H}{K_p \cdot \gamma \cdot d^3} = \frac{d}{2(e + L)} \left(\frac{L}{d}\right)^3$$

Il massimo momento Mmax si trova alla profondità f che è pari a:

$$f = 0,816 \sqrt{\frac{H}{k_p \cdot \gamma \cdot d}}$$

$$M_{max} = H \left( e + \frac{2}{3} f \right)$$

|   |        |                  |  |         |
|---|--------|------------------|--|---------|
|  | Rev. 0 | Data Giugno 2023 | El: BI029F-D-NUO-RT-09-r00                       | Pag. 44 |
|   |        |                  | RELAZIONE DI CALCOLO DEI SOSTEGNI<br>DEI TRACKER |         |

Per la validità dell'ipotesi assunta di comportamento tipo palo corto deve essere soddisfatta la condizione:

$$M_{max} \leq M_y = M_{pl}$$

Cioè il massimo momento  $M_{max}$  deve risultare inferiore al momento plastico caratteristico  $M_{pl} = M_y$  della sezione del palo.

Se invece risulta  $M_{max} > M_y = M_{pl}$  allora il palo è lungo.

### Comportamento tipo Palo Lungo

In questa condizione si ha un comportamento rappresentato nella seguente figura:

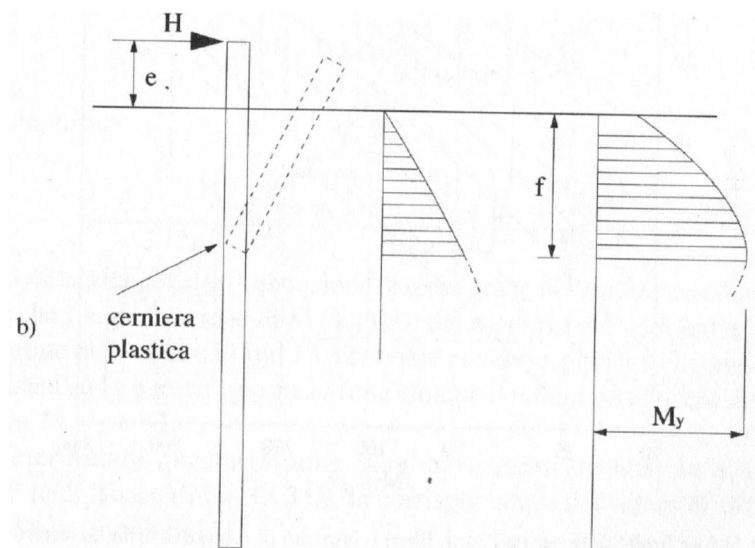



Figura 9.3 – Palo lungo libero di ruotare in testa, terreni incoerenti

Si eguaglia  $M_{max}$  a  $M_y$ :

$$H \left( e + 0,816 \frac{2}{3} \sqrt{\frac{H}{k_p \cdot \gamma \cdot d}} \right) = M_y$$

Risolviendo l'equazione si determina il valore di H che non dipende da L, purché questa assuma almeno il valore per il quale si verifica  $M_{max}=M_y$ .

Il carico limite orizzontale di un determinato palo di lunghezza L è il minore fra i valori che si ottengono considerando i due comportamenti.

|   |        |                  |  |         |
|---|--------|------------------|--|---------|
|  | Rev. 0 | Data Giugno 2023 | El: BI029F-D-NUO-RT-09-r00                       | Pag. 45 |
|   |        |                  | RELAZIONE DI CALCOLO DEI SOSTEGNI<br>DEI TRACKER |         |

Il valore così calcolato andrà quindi diviso per il coefficiente parziale ( $R_3$ ) per determinare la resistenza di progetto per carichi trasversali:

$$R_{Tr,d} = H / \gamma_T \quad \text{con } \gamma_T = 1,3$$

Si riporta qui di seguito il calcolo della resistenza  $R_{Tr,d} = H / \gamma_T$

#### 9.5.1. Sostegno HEA140 - Acciaio S275 – $L = 3,2m$

$$M_y = M_{pl} = 47,7kNm$$

La condizione più gravosa è quella di lavoro del Tracker Esterno ( $\alpha = 60^\circ$ ):

$$H = 6,71 \text{ kN}$$

$$e = 3,20 \text{ m}$$

Considero il comportamento di Palo corto:

$$R_{Tr,d} = 23,2 \text{ kN} > H$$

$$M_{max} = 91,9 \text{ kNm} > M_y \quad \text{quindi il palo è lungo}$$

Considero il comportamento di Palo lungo:

$$R_{Tr,d} = 18,1 \text{ kN} > H$$

La verifica è soddisfatta con un coefficiente di sicurezza pari a  $CS = R_{Tr,d} / H = 2,7$ .

## 10. CALCOLO E VERIFICA STRUTTURALE DEI SOSTEGNI

Per il calcolo delle sollecitazioni SLU lungo il fusto dei sostegni si utilizza un modello di calcolo elastico che schematizza il terreno come mezzo alla Winkler.

Allo scopo si è costruito un modello di calcolo agli elementi finiti implementato con il programma SAP2000 v24.1.0.

I pali di sostegno dei Trackers sono vincolati al terreno considerando alla punta un vincolo a cerniera, mentre lungo il fusto, nella parte interessata dal terreno si sono implementate molle orizzontali con valore della costante  $k_h$  di reazione crescente linearmente con la profondità  $z$ :

$$k_h = n_h z/d \text{ [kN/m}^3\text{]}$$

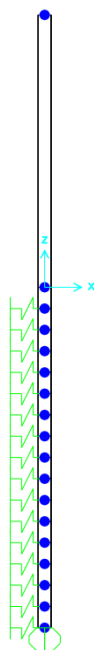
I valori della costante  $k_h$  variano da  $0 \text{ kN/m}^3$  alla quota del piano campagna e aumentano con la profondità fino alla punta posta a circa 3m di profondità.

Assumendo il valore di  $n_h = 7.500 \text{ kN/m}^3$ , indicativo per terreni incoerenti a medio addensamento (rif. tabella 14.5 del testo "Fondazioni" di C. Viggiani) si ottiene:

$$k_h \text{ punta} = 7.500 \text{ kN/m}^3 * 3\text{m} / d = 22.500 / d \text{ [kN/m}^3\text{]}$$


Nel modello si applicano molle orizzontali con passo verticale  $i = 0,25\text{m}$ , pertanto il valore della singola molla posta alla profondità  $z$  vale:

$$k_m = k_h * d * i = 0,25 * 7.500 * z = 1875 z \text{ [kN/m]}$$



| z<br>[m] | Km<br>[kN/m] |
|----------|--------------|
| 0,00     | 0            |
| 0,25     | 469          |
| 0,50     | 938          |
| 0,75     | 1406         |
| 1,00     | 1875         |
| 1,25     | 2344         |
| 1,50     | 2813         |
| 1,75     | 3281         |
| 2,00     | 3750         |
| 2,25     | 4219         |
| 2,50     | 4688         |
| 2,75     | 5156         |
| 3,00     | 5625         |

Figura 10.1 – Modello agli elementi finiti utilizzato per il calcolo delle sollecitazioni lungo il palo e valori delle costanti di molla

|   |        |                  |  |         |
|---|--------|------------------|--|---------|
|  | Rev. 0 | Data Giugno 2023 | El: BI029F-D-NUO-RT-09-r00                       | Pag. 47 |
|   |        |                  | RELAZIONE DI CALCOLO DEI SOSTEGNI<br>DEI TRACKER |         |

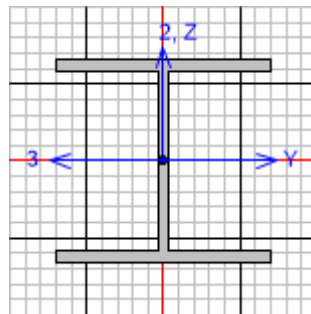
Nei seguenti paragrafi si riporta la verifica automatica eseguita dal programma considerando le diverse condizioni e combinazioni di carico SLU.

Si esplicita per la condizione e combinazione più gravosa il rapporto fra domanda e capacità (D/C) della sezione più sollecitata.

### 10.1.1. Condizione di riposo ( $\alpha=5^\circ$ ) – Comb. SLU02

Profilo HEA140 in acciaio S275 - L = 3,2 m

D/C Ratio: 0,553 < 1,00



#### Italian NTC 2018 STEEL SECTION CHECK (Summary for Combo and Station)

Units : KN, m, C

|              |               |                   |                     |
|--------------|---------------|-------------------|---------------------|
| Frame : 2    | X Mid: 0,     | Combo: COMBSLU2-5 | Design Type: Column |
| Length: 0,25 | Y Mid: 0,     | Shape: HE140A     | Frame Type: DCH-MRF |
| Loc : 0,     | Z Mid: -0,375 | Class: Class 1    | Rolled : Yes        |

|                      |                         |                  |
|----------------------|-------------------------|------------------|
| Interaction=Method B | MultiResponse=Envelopes | P-Delta Done? No |
| Consider Torsion? No |                         |                  |

|              |              |              |              |                           |
|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------------------|
| GammaM0=1,05 | GammaM1=1,05 | GammaM2=1,25 | D/C Lim=0,95 | Prin. Axis Angle = 0, deg |
| An/Ag=1,     | RLLF=1,      | PLLF=0,75    |              |                           |

|              |              |            |                 |                  |
|--------------|--------------|------------|-----------------|------------------|
| Aeff=0,003   | Av,2=0,001   | Av,3=0,003 | eNy=0,          | eNz=0,           |
| A=0,003      | Iy=1,033E-05 | iy=0,057   | Wel,y=1,553E-04 | Weff,y=1,553E-04 |
| It=8,100E-08 | Iz=3,890E-06 | iz=0,035   | Wel,z=5,557E-05 | Weff,z=5,557E-05 |
| Iw=1,507E-08 | Iyz=0,       | h=0,133    | Wpl,y=1,730E-04 |                  |
| E=210000000, | fy=275000,   | fu=430000, | Wpl,z=8,480E-05 |                  |

#### STRESS CHECK FORCES & MOMENTS

| Location | Ned   | My,Ed   | Mz,Ed | V2,Ed | V3,Ed | TEd |
|----------|-------|---------|-------|-------|-------|-----|
| 0,       | 8,583 | -25,065 | 0,    | 2,547 | 0,    | 0,  |


#### PMM DEMAND/CAPACITY RATIO (Governing Equation NTC Eq 4.2.38(y))

|            |                   |   |                    |    |
|------------|-------------------|---|--------------------|----|
| D/C Ratio: | 0,553             | < | 0,95               | OK |
|            | = (My,Ed/Mn,y,Rd) |   | (NTC Eq 4.2.38(y)) |    |

#### AXIAL FORCE DESIGN

|       |          |          |
|-------|----------|----------|
| NEd   | Nc,Rd    | Nt,Rd    |
| Force | Capacity | Capacity |



|   |        |                  |  |  |  |         |
|---|--------|------------------|--|--|--|---------|
|  | Rev. 0 | Data Giugno 2023 | EI: BI029F-D-NUO-RT-09-r00                       |  |  | Pag. 48 |
|   |        |                  | RELAZIONE DI CALCOLO DEI SOSTEGNI<br>DEI TRACKER |  |  |         |

Axial 8,583 822,381 822,381

Npl,Rd Nu,Rd Ncr,T Ncr,TF An/Ag  
822,381 972,144 111826,413 111826,413 1,

| Curve        | Alpha  | Ncr        | LambdaBar | Phi   | Chi | Nb,Rd   |
|--------------|--------|------------|-----------|-------|-----|---------|
| Y-Y          | b 0,34 | 342562,125 | 0,05      | 0,476 | 1,  | 822,381 |
| Y-Y Braced   | b 0,34 | 342562,125 | 0,05      | 0,476 | 1,  | 822,381 |
| Z-Z          | c 0,49 | 128999,677 | 0,082     | 0,474 | 1,  | 822,381 |
| Z-Z Braced   | c 0,49 | 128999,677 | 0,082     | 0,474 | 1,  | 822,381 |
| Torsional TF | c 0,49 | 111826,413 | 0,088     | 0,476 | 1,  | 822,381 |

MOMENT DESIGN

|     | MEd<br>Moment | MEd, span<br>Moment | Mm,Ed<br>Moment | Meq,Ed<br>Moment |
|-----|---------------|---------------------|-----------------|------------------|
| Y-Y | -25,065       | -25,065             | -25,065         | -24,81           |
| Z-Z | 0,            | 8,169E-15           | 0,              | 8,127E-15        |

|     | Mc,Rd<br>Capacity | Mv,Rd<br>Capacity | Mn,Rd<br>Capacity | Mb,Rd<br>Capacity |
|-----|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Y-Y | 45,31             | 45,31             | 45,31             | 45,31             |
| Z-Z | 22,21             | 22,21             | 22,21             |                   |

| LTB | Curve | AlphaLT | LambdaBarLT | PhiLT | ChiLT | Iw        | Mcr      |
|-----|-------|---------|-------------|-------|-------|-----------|----------|
|     | b     | 0,34    | 0,076       | 0,482 | 1,    | 1,507E-08 | 8197,619 |

| Factors | kw    | Psi      | C2    | C3         | zj         |
|---------|-------|----------|-------|------------|------------|
|         | 1,    | 1,014    | 0,    | 0,995      |            |
|         | za    | zs       | zg    | zz         | zj         |
|         | 0,067 | -1,4E-17 | 0,067 | -2,660E-18 | -1,122E-17 |

| Factors | kyy  | kyz | kzy   | kzz |
|---------|------|-----|-------|-----|
|         | 0,99 | 0,6 | 0,682 | 1,  |

|        | Ved<br>Force | Vpl,Rd<br>Capacity | Ved/Vpl,Rd<br>Ratio | rho<br>Factor |
|--------|--------------|--------------------|---------------------|---------------|
| 2-Axis | 2,547        | 152,836            | 0,017               | 1,            |
| 3-Axis | 0,           | 378,329            | 0,                  | 1,            |

SHEAR DESIGN

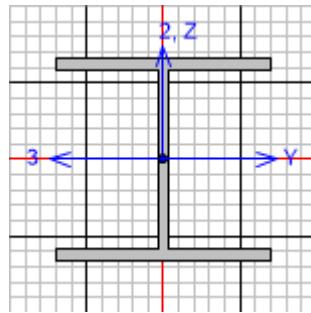
|        | VEd<br>Force | TEd<br>Torsion | Vc,Rd<br>Capacity | Stress<br>Ratio | Status<br>Check |
|--------|--------------|----------------|-------------------|-----------------|-----------------|
| 2-Axis | 2,547        | 0,             | 152,836           | 0,017           | OK              |
| 3-Axis | 0,           | 0,             | 378,329           | 0,              | OK              |

|        | Vpl,Rd<br>Capacity | Eta<br>Factor | Lambdabar<br>Ratio | Chi<br>Factor |
|--------|--------------------|---------------|--------------------|---------------|
| 2-Axis | 152,836            | 1,2           | 0,227              | 1,2           |
| 3-Axis | 378,329            | 1,2           | 0,                 | 1,            |

### 10.1.2. Condizione di lavoro (alfa=60°) – Comb. SLU01

Profilo HEA140 in acciaio S275 - L = 3,2 m

D/C Ratio: 0,539 < 1,00



Italian NTC 2018 STEEL SECTION CHECK (Summary for Combo and Station)  
Units : KN, m, C

Frame : 2 X Mid: 0, Combo: COMBSLU1-60 Design Type: Column  
Length: 0,25 Y Mid: 0, Shape: HE140A Frame Type: DCH-MRF  
Loc : 0,25 Z Mid: -0,375 Class: Class 1 Rolled : Yes

Interaction=Method B MultiResponse=Envelopes P-Delta Done? No  
Consider Torsion? No

GammaM0=1,05 GammaM1=1,05 GammaM2=1,25 D/C Lim=0,95 Prin. Axis Angle = 0, deg  
An/Ag=1, RLLF=1, PLLF=0,75

Aeff=0,003 Av,2=0,001 Av,3=0,003 eNy=0, eNz=0,  
A=0,003 Iy=1,033E-05 iy=0,057 Wel,y=1,553E-04 Weff,y=1,553E-04  
It=8,100E-08 Iz=3,890E-06 iz=0,035 Wel,z=5,557E-05 Weff,z=5,557E-05  
Iw=1,507E-08 Iyz=0, h=0,133 Wpl,y=1,730E-04  
E=210000000, fy=275000, fu=430000, Wpl,z=8,480E-05

#### STRESS CHECK FORCES & MOMENTS

| Location | Ned     | My,Ed  | Mz,Ed      | V2,Ed | V3,Ed | TEd |
|----------|---------|--------|------------|-------|-------|-----|
| 0,25     | -19,191 | 23,675 | -7,722E-15 | 2,11  | 0,    | 0,  |

#### PMM DEMAND/CAPACITY RATIO (Governing Equation NTC Eq C4.2.37)

D/C Ratio: 0,539 = 0,023 + 0,516 + 0, < 0,95 OK  
= NEd / (Chi\_y NRk / GammaM1) + kyy (My,Ed + NEd eNy) / (Chi\_LT My,Rk / GammaM1)  
+ kyz (Mz,Ed + NEd eNz) / (Mz,Rk / GammaM1) (NTC Eq C4.2.37)

#### AXIAL FORCE DESIGN

|              | NEd<br>Force | Nc,Rd<br>Capacity | Nt,Rd<br>Capacity | Npl,Rd  | Nu,Rd   | Ncr,T      | Ncr,TF     | An/Ag |
|--------------|--------------|-------------------|-------------------|---------|---------|------------|------------|-------|
| Axial        | -19,191      | 822,381           | 822,381           | 822,381 | 972,144 | 111826,413 | 111826,413 | 1,    |
| Curve        | Alpha        | Ncr               | LambdaBar         | Phi     | Chi     | Nb,Rd      |            |       |
| Y-Y          | b            | 0,34              | 342562,125        | 0,05    | 0,476   | 1,         | 822,381    |       |
| Y-Y Braced   | b            | 0,34              | 342562,125        | 0,05    | 0,476   | 1,         | 822,381    |       |
| Z-Z          | c            | 0,49              | 128999,677        | 0,082   | 0,474   | 1,         | 822,381    |       |
| Z-Z Braced   | c            | 0,49              | 128999,677        | 0,082   | 0,474   | 1,         | 822,381    |       |
| Torsional TF | c            | 0,49              | 111826,413        | 0,088   | 0,476   | 1,         | 822,381    |       |

MOMENT DESIGN

|     | MEd<br>Moment | MEd, span<br>Moment | Mm, Ed<br>Moment | Meq, Ed<br>Moment |
|-----|---------------|---------------------|------------------|-------------------|
| Y-Y | 23,675        | 23,675              | 23,675           | 23,464            |
| Z-Z | 0,            | -7,722E-15          | 0,               | 7,687E-15         |

|     | Mc, Rd<br>Capacity | Mv, Rd<br>Capacity | Mn, Rd<br>Capacity | Mb, Rd<br>Capacity |
|-----|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Y-Y | 45,31              | 45,31              | 45,31              | 45,31              |
| Z-Z | 22,21              | 22,21              | 22,21              |                    |

|     | Curve<br>b | AlphaLT<br>0,34 | LambdaBarLT<br>0,076 | PhiLT<br>0,482 | ChiLT<br>1, | Iw<br>1,507E-08 | Mcr<br>8183,498 |
|-----|------------|-----------------|----------------------|----------------|-------------|-----------------|-----------------|
| LTB |            |                 |                      |                |             |                 |                 |

| Factors | kw<br>1,    | Psi<br>1,012   | C2<br>0,    | C3<br>0,995      | zj<br>1,122E-17 |
|---------|-------------|----------------|-------------|------------------|-----------------|
|         | za<br>0,067 | zs<br>-1,4E-17 | zg<br>0,067 | zz<br>-2,660E-18 |                 |

| Factors | kyy<br>0,988 | kyz<br>0,594 | kzy<br>0,682 | kzz<br>0,99 |
|---------|--------------|--------------|--------------|-------------|
|         |              |              |              |             |

|        | Ved<br>Force | Vpl, Rd<br>Capacity | Ved/Vpl, Rd<br>Ratio | rho<br>Factor |
|--------|--------------|---------------------|----------------------|---------------|
| 2-Axis | 2,11         | 152,836             | 0,014                | 1,            |
| 3-Axis | 0,           | 378,329             | 0,                   | 1,            |

SHEAR DESIGN

|        | VEd<br>Force | TEd<br>Torsion | Vc, Rd<br>Capacity | Stress<br>Ratio | Status<br>Check |
|--------|--------------|----------------|--------------------|-----------------|-----------------|
| 2-Axis | 2,11         | 0,             | 152,836            | 0,014           | OK              |
| 3-Axis | 0,           | 0,             | 378,329            | 0,              | OK              |

|        | Vpl, Rd<br>Capacity | Eta<br>Factor | LambdaBar<br>Ratio | Chi<br>Factor |
|--------|---------------------|---------------|--------------------|---------------|
| 2-Axis | 152,836             | 1,2           | 0,227              | 1,2           |
| 3-Axis | 378,329             | 1,2           | 0,                 | 1,            |

## 11. CONCLUSIONI

Il calcolo ha evidenziato che la lunghezza di infissione dei sostegni dei Trackers è governata dalla verifica allo sfilamento in condizioni di riposo ( $\alpha=5^\circ$ ).

In questa condizione, in cui i pannelli sono quasi orizzontali, non si ha l'effetto schermante dei pannelli esterni su quelli interni e pertanto le lunghezze di infissione dei supporti dei Trackers esterni sono uguali a quelle dei supporti interni.

Inoltre nella configurazione analizzata che prevede 5 sostegni per tracker, le aree di influenza dei carichi sui sostegni sono uguali e pertanto si è adottato un unico profilo per tutti i sostegni.

Si riporta in un'unica tabella riassuntiva l'esito delle verifiche condotte.

**Tabella 6 – Riepilogo complessivo delle verifiche**

| Tipo Acciaio | Sigla del sostegno      | Posizione Tracker | Tipo di sostegno | Tipo di profilo | Linf. (*) [m] | RTr,d / H (>1,0) | D/C (<1,0) |
|--------------|-------------------------|-------------------|------------------|-----------------|---------------|------------------|------------|
| S275         | TE/TI-SL/SC-S275-HEA140 | TE/TI             | SL/SC            | HEA140          | 3,2           | 2,7              | 0,553      |

(\*) Linf. = Lunghezza di infissione minima per soddisfare la verifica geotecnica allo sfilamento

### Legenda:

TE: Tracker Esterno

TI: Tracker Interno

SL: Sostegno Laterale

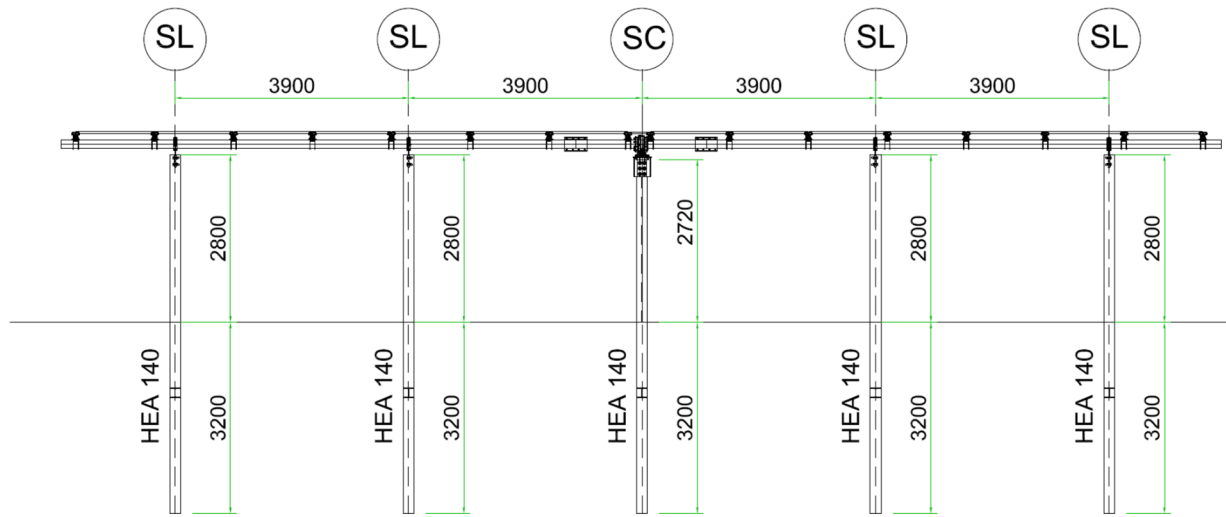
SC: Sostegno Centrale

Linf.: Lunghezza minima di infissione per soddisfare la verifica di cap. portante/sfilamento

RTr,d / H Verifica carico limite orizzontale (rapporto resistenza/azione orizzontale)

D/C Verifica strutturale (coefficiente di sfruttamento della sezione)

Per maggiore chiarezza si riporta lo schema dei supporti dei Trackers.

**ACCIAIO S275***Figura 11.1 – Tracker con 5 supporti HEA140*