



REGIONE SICILIA
REGIONE
SICILIA



COMUNE DI
TRAPANI



PROVINCIA DI
TRAPANI

PROGETTO DEFINITIVO

Impianto Agro-Fotovoltaico "Piana Borromea" della potenza di 54,5 MW integrato con impianto di accumulo da 10MW e relative opere di connessione da realizzare nel comune di Trapani in località "Borromea"

Titolo elaborato

REL.0005.Relazione preliminare sulle strutture

Codice elaborato

F0454AR04A

Scala

-

Riproduzione o consegna a terzi solo dietro specifica autorizzazione.

Progettazione



F4 ingegneria srl

Via Di Giura - Centro direzionale, 85100 Potenza
Tel: +39 0971 1944797 - Fax: +39 0971 55452
www.f4ingegneria.it - f4ingegneria@pec.it

Il Direttore Tecnico
(ing. Giovanni Di Santo)



Gruppo di lavoro

ing. Giuseppe MANZI
ing. Mauro MARELLA
ing. Marco LORUSSO
dott.For. Luigi ZUCCARO
arch. Gaia TELESCA
ing. Beniamino D'ERCOLE
ing. Rosanna SANTARSIERO



Società certificata secondo le norme UNI-EN ISO 9001:2015 e UNI-EN ISO 14001:2015 per l'erogazione di servizi di ingegneria nei settori: civile, idraulica, acustica, energia, ambiente (settore IAF: 34).

Consulenze specialistiche

Committente



SOLAR PIANA BORROMEA S.r.l.
[Indirizzo società]

Amministratore unico
GIANLUCA VENERONI

Data	Descrizione	Redatto	Verificato	Approvato
Giugno 2022	Prima emissione	BDE	MMA	GDS

Sommario

Premessa	1
1 Normativa di riferimento	4
2 Materiali impiegati e resistenze di calcolo	5
3 Terreno di fondazione	6
4 Analisi dei carichi	7
4.1 Neve	7
4.2 Vento	8
5 Azioni sulla struttura di fondazione	9
6 Verifiche geotecniche	10
6.1 Capacità portante dei pali	10
6.2 Verifica a carico limite verticale dei pali	11
6.3 Verifica a sfilamento dei pali	12
6.4 Verifica a ribaltamento dei pali	12

Premessa

La presente relazione accompagna il progetto definitivo di realizzazione di un impianto Agrofotovoltaico di produzione di energia da fonte fotovoltaica con potenza nominale di 54,5 MW sito nel comune di Trapani in località Piana Borromea. L'area di intervento presenta un'estensione complessiva di circa 90 ettari ed interessa terreni a funzione prevalentemente agricola. I tracker sono posizionati con un interasse di oltre 5 m in modo da assicurare una luce libera tra i moduli pari a circa 3 m utile alla coltivazione agricola.

In prossimità dell'impianto verranno realizzate le cabine di sottocampo e la cabina principale, dalla quale si diparte la linea di collegamento di media tensione a 30 kV interrata verso il punto di consegna previsto presso la stazione elettrica del produttore Solar Piana Borromea Srl, sita nella particella catastale n.264 del foglio 292 del Comune di Trapani.

L'impianto verrà installato a terra su tracker monoassiali con asse di rotazione nord-sud, infissi nel terreno con altezza massima da terra pari a 2,20 m.

I moduli fotovoltaici in silicio monocristallino bifacciali da 600Wp, saranno installati in fila singola in verticale (1 modulo portrait), su appositi profili metallici montati sulle strutture metalliche dei tracker infisse nel terreno, per una **profondità di circa 1.60 m**, senza bisogno di fondazioni in calcestruzzo. I moduli saranno organizzati in stringhe ciascuna da 30 moduli.

Le strutture metalliche di supporto ai pannelli fotovoltaici, denominate "tracker", saranno posizionate con asse nord-sud dato che sono in grado di variare l'angolazione orientare i pannelli in modo da "inseguire" la fonte solare durante il suo moto apparente sulla volta celeste. In allegato alla presente relazione è presente la scheda tecnica di dettaglio della struttura, mentre nel seguito si riportano le caratteristiche principali:

Caratteristiche principali tracker

- *Tipo di inseguitore*: Tracker orizzontale, monoassiale con asse di rotazione N-S e inseguimento E-O.
- *Sistema di inseguimento*: Controllo dell'inseguimento basato su orologio astronomico, auto riconfigurante ad ogni riaccensione.
- *Deviazione massima*: $\pm 2^\circ$
- *Configurazione*: 1 x V (verticale o "portrait")
- *Intervallo di Inclinazione*: $\pm 60^\circ$
- *Movimentazione*: Attuatore lineare autolubrificante.
- *Bilanciamento*: Struttura completamente bilanciata (asse di rotazione allineato con il baricentro della parte in movimentazione).
- *Backtracking*: Indipendente, sia meccanicamente che elettricamente, per ogni fila e completamente regolabile in base al montaggio ed alle pendenze su lato Est e lato Ovest.
- *Alimentazione motori*: Alimentazione standard AC 148V, 50/60 Hz;
- *Monitoraggio*: Comunicazione Wireless o wired in tempo reale tramite protocollo ModBus/TCP.
- *Materiale*: Acciaio strutturale con caratteristiche in accordo ai calcoli strutturali secondo norme vigenti

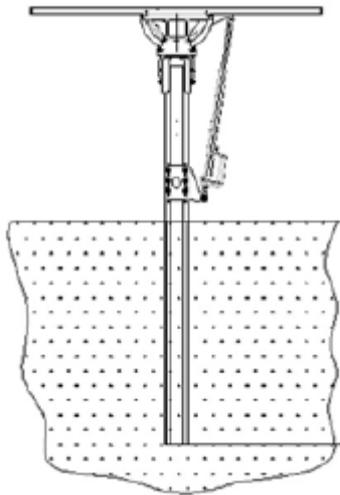
Impianto Agro-Fotovoltaico "Piana Borromea" della potenza di 54,5 MW integrato con impianto di accumulo da 10MW e relative opere di connessione da realizzare nel comune di Trapani in località "Borromea"

REL.0005.Relazione preliminare sulle strutture

- **Protezione superficiale:** Tutti gli elementi dovranno essere in acciaio zincati a caldo secondo ISO1461:2009. Dovranno essere considerati ambienti aggressivi industriali per una durata minima di 25 anni.
- **Messa a terra elettrica:** Struttura metallica in continuità elettrica, con messa a terra tramite pali di fondazione.
- **Altezza minima:** altezza minima dei moduli dal terreno alla massima inclinazione pari a 400mm.
- **Altezza massima:** altezza massima dei moduli dal terreno alla massima inclinazione pari a 2000mm (per tracker a 55°).
- **Tolleranze di installazione:** Altezza: ± 20 mm; Nord/Sud: ± 20 mm; Est Ovest: ± 20 mm; Inclinazione: $\pm 2^\circ$; Torsione: $\pm 5^\circ$; Inclinazione del terreno N/S: $\pm 4^\circ$ in direzione N/S (estendibile); Inclinazione del terreno E/O: Nessuna limitazione

Caratteristiche Sistema a inseguimento solare	
Configurazione moduli	verticale
Tipologia Tracker	Singolo Asse orizzontale indipendente
File di tracker	Indipendenti
Algoritmo di backtracking	si
Errore tracking	$\pm 2^\circ$
Posizione protezione vento	0°
Posizione notturna	0°
Sistema motore	attuatore lineare
Motore	Produzione Europea
Alimentazione motore	alimentazione cablata in daisy chain AC, 148 V, 50/60 Hz
Possibilità di controllo manuale (manutenzione)	si
Alimentazione distribuita Input	400V 3phase 50/60 Hz.
Alimentazione Centralizzata	fino a 800V 3phase 50/60Hz
Comunicazione	RS485 - Ethernet - (fibra opzionale) - 5GHz wi-fi wireless
Interfaccia di comunicazione	Web HMI
Minima altezza da terra con inclinazione massima	0,4 m
Sensori forniti per sicurezza vento	anemometro per direzione e velocità vento
Temperature di esercizio	-20°C / 50°C
Tolleranze di installazione fondazioni	altezza ± 20 mm. Nord/Sud ± 20 mm. Est / Ovest ± 20 mm. Inclinazione 2° Foundation Installation – Twist 5° .
fissaggio moduli	rivetti / viti-bulloni
Fondazioni	infilazione diretta o pre-foro con compattazione
Installation/Foundation	European Production
Protezione Protections electrical box	minimo IP55

Ogni inseguitore è sempre dotato di un palo centrale di tipo **OMEGA 50x250x100 sp.5mm** ed un numero variabile di pali Z. Il particolare profilo dei pali Z consente una efficace penetrazione in differenti tipologie di terreni ed un'ottima tenuta alle sollecitazioni dovute alla movimentazione della struttura e carichi da vento

**Figura 1: Palo del tracker interrato nel suolo**

Le fondazioni sono costituite, dunque, da pali in acciaio **OMEGA 50x250x100 sp. 5mm** infissi. L'avanzamento nel terreno alla profondità desiderata avviene attraverso un processo di battitura del palo componente la struttura del "tracker". Ciascun "tracker" monofila è in grado di muoversi in maniera indipendente rispetto agli altri, in quanto ognuno è movimentato del proprio sistema di motorizzazione.

Le strutture di supporto sono state dimensionate in maniera tale da non consentire un elevato impatto visivo. L'altezza massima raggiungibile da ciascun pannello, infatti, è inferiore a 3.00 m rispetto al piano campagna. In questo modo, tra l'altro, gli elementi da installare ricadono all'interno della casistica A.5.9 (in quanto trattasi di "Pannelli solari e fotovoltaici su strutture di sostegno (pali e simili) di altezza $\leq 3,00$ m dotati di certificato e/o brevetto ministeriale") della DGR 739 del 12.06.2012 "Atto di indirizzo per la definizione delle Opere Minori ai fini della sicurezza per le costruzioni in zona sismica" che disciplina le opere che risultano esentate dall'applicazione delle disposizioni della l.r. 38/1997 e del d.p.R. 380/2001 e che, pertanto, non sono soggette al deposito presso gli uffici dell'ex Genio Civile.

1 Normativa di riferimento

Le fasi di analisi e verifica della struttura di fondazione è stata condotta in accordo alle seguenti disposizioni normative, per quanto applicabili in relazione al criterio di calcolo adottato dal progettista, evidenziato nel prosieguo della presente relazione:

- **D. M. Infrastrutture Trasporti 17/01/2018** (G.U. 20/02/2018 n. 42 - Suppl. Ord.) "Aggiornamento delle Norme tecniche per le Costruzioni".
- **Circolare 21 Gennaio 2019, n. 7/C.S.LL.PP.** "Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni"» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018"
- **Eurocodice 7 - "Progettazione geotecnica"** - ENV 1997-1 per quanto non in contrasto con le disposizioni del D.M. 2008 "Norme Tecniche per le Costruzioni".

2 Materiali impiegati e resistenze di calcolo

Tutti i materiali strutturali impiegati devono essere muniti di marcatura "CE", ed essere conformi alle prescrizioni del "REGOLAMENTO (UE) N. 305/2011 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 9 marzo 2011", in merito ai prodotti da costruzione.

Per la realizzazione dell'opera in oggetto saranno impiegati i seguenti materiali:

Caratteristiche acciaio																
N _{id}	γ_k	$\alpha_{T,i}$	E	G	Stz	$f_{yk,1}/f_{yk,2}$	$f_{tk,1}/f_{tk,2}$	$f_{yd,1}/f_{yd,2}$	f_{td}	γ_s	γ_{M1}	γ_{M2}	$\gamma_{M3,SLV}$	$\gamma_{M3,SLE}$	γ_{M7}	
															NCnt	Cnt
	[N/m ³]	[1/°C]	[N/mm ²]	[N/mm ²]		[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]							
S275 - (S275)																
001	78.500	0,000012	210.000	80.769	P	275,00	430	261,90	-	1,05	1,05	1,25	-	-	-	-
						255,00	410	242,86								

LEGENDA:

- N_{id}** Numero identificativo del materiale, nella relativa tabella dei materiali.
- γ_k** Peso specifico.
- $\alpha_{T,i}$** Coefficiente di dilatazione termica.
- E** Modulo elastico normale.
- G** Modulo elastico tangenziale.
- Stz** Tipo di situazione: [F] = di Fatto (Esistente); [P] = di Progetto (Nuovo).
- $f_{tk,1}$** Resistenza caratteristica a Rottura (per profili con $t \leq 40$ mm).
- $f_{tk,2}$** Resistenza caratteristica a Rottura (per profili con $40 \text{ mm} < t \leq 80$ mm).
- f_{td}** Resistenza di calcolo a Rottura (Bulloni).
- γ_s** Coefficiente parziale di sicurezza allo SLV del materiale.
- γ_{M1}** Coefficiente parziale di sicurezza per instabilità.
- γ_{M2}** Coefficiente parziale di sicurezza per sezioni tese indebolite.
- $\gamma_{M3,SLV}$** Coefficiente parziale di sicurezza per scorrimento allo SLV (Bulloni).
- $\gamma_{M3,SLE}$** Coefficiente parziale di sicurezza per scorrimento allo SLE (Bulloni).
- γ_{M7}** Coefficiente parziale di sicurezza precarico di bulloni ad alta resistenza (Bulloni - NCnt = con serraggio NON controllato; Cnt = con serraggio controllato). [-] = parametro NON significativo per il materiale.
- $f_{yk,1}$** Resistenza caratteristica allo snervamento (per profili con $t \leq 40$ mm).
- $f_{yk,2}$** Resistenza caratteristica allo snervamento (per profili con $40 \text{ mm} < t \leq 80$ mm).
- $f_{yd,1}$** Resistenza di calcolo (per profili con $t \leq 40$ mm).
- $f_{yd,2}$** Resistenza di calcolo (per profili con $40 \text{ mm} < t \leq 80$ mm).
- NOTE** [-] = Parametro non significativo per il materiale.

3 Terreno di fondazione

Per modello geotecnico si intende uno schema rappresentativo delle condizioni stratigrafiche, del regime delle pressioni interstiziali e delle caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni e delle rocce comprese nel volume significativo, finalizzate all'analisi quantitativa di uno specifico problema geotecnico.

Al fine di dare solo delle prime indicazioni sulle caratteristiche geotecniche dei terreni in affioramento, di seguito ne saranno riportati i principali parametri fisico-meccanici che scaturiscono da considerazioni macroscopiche effettuate sugli affioramenti in campagna e dalla letteratura tecnica specializzata. (cfr. Relazione geologica).

Si rimanda al successivo grado di approfondimento della progettazione (progetto esecutivo) la verifica puntuale delle caratteristiche stratigrafiche, litologiche, geotecniche, idrogeologiche, sismiche dei terreni di sedime, tramite un'ideale e ragionata campagna di indagini geognostiche dirette ed indirette, che potrà confermare o meno quanto si espone di seguito.

Complessivamente i terreni presenti nell'area sono rappresentati da depositi di natura argillo-arenacea ai quali possono essere attribuiti indicativamente i seguenti parametri geotecnici:

- Peso di volume (stato naturale) $\gamma = 18 \text{ KN/m}^3$
- Coesione efficace $c' = 25 \text{ KN/m}^2$
- Angolo di attrito efficace $\phi' = 22^\circ$
- Modulo Edometrico $E = 5500 \text{ KN/m}^2$
- Categoria di sottosuolo = "B" o "C"

4 Analisi dei carichi

Le forze agenti sulla fondazione in esame sono di seguito descritte:

Tabella 1: Analisi dei carichi agenti sulla fondazione

ANALISI DEI CARICHI			
P.P _{OMEGA}	Peso Proprio OMEGA 50x250x100	0,79	kN
P.P _{pan.}	Peso Proprio PANNELLO	0,35	kN
P. _{neve}	Neve	0,48	kN/m ²
P. _{vento}	Vento	0,71	kN/m ²

Le azioni della neve e del vento sono di seguito dettagliate. Le sollecitazioni indotte dal sisma risultano inferiori a quelle dovute al vento; per questo motivo l'azione sismica può essere trascurata.

4.1 Neve

In accordo con le NTC2018, considerando un'altitudine sul livello del mare pari a 93 m, classe di topografia normale (coefficiente di esposizione pari a 1), coefficiente topografico pari a 1 ed inclinazione della falda che varia da 0° a 60°. Si ottiene un valore del **carico neve pari a 0.48 kN/m²** quando si considera la condizione più gravosa, ovvero quando l'inclinazione della falda è pari a 0°.

4 CARICO NEVE SULLA COPERTURA E COMBINAZIONI DI CARICO

$$q_s \text{ (carico neve sulla copertura [N/m}^2\text{])} = \mu_i \cdot q_{sk} \cdot C_E \cdot C_t$$

μ_i (coefficiente di forma)

q_{sk} (valore caratteristico della neve al suolo [kN/m²])

C_E (coefficiente di esposizione)

C_t (coefficiente termico)

4.1 Combinazione per il caso di copertura ad una falda

Inclinazione falda	0 [deg]
--------------------	---------

μ_1	0.80
---------	------

0.48 kN/mq μ_1

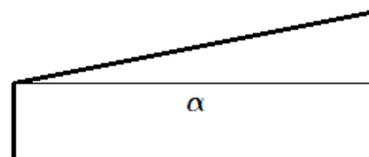


Figura 2: azione della neve per una falda inclinata a 0°

4.2 Vento

In accordo con le NTC2018, considerando un'altitudine sul livello del mare pari a 93 m, tempo di ritorno 50 anni, classe di rugosità del terreno D, inclinazione della falda variabile da 0° a 60°, coefficiente dinamico pari a 1, coefficiente topografico pari a 1 (condizione non isolata) ed assimilando la struttura in esame al caso di tettoia ad uno spiovente avente le altezze riportate in figura 3:

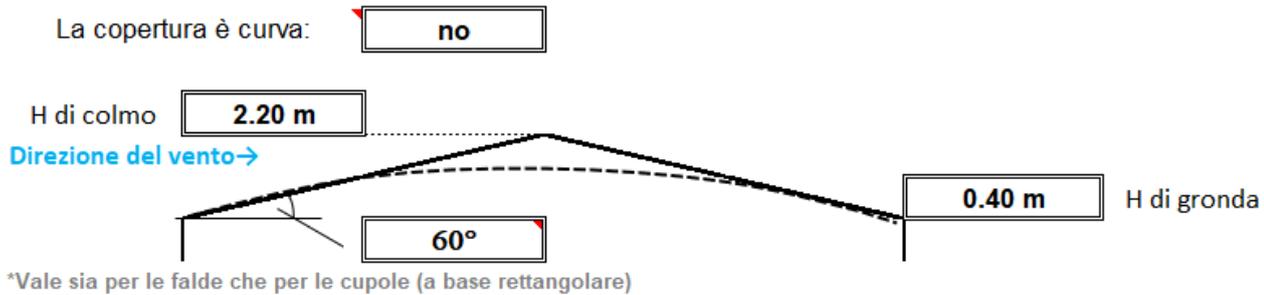


Figura 3: schema copertura inclinata per il calcolo dell'azione del vento

Considerando l'inclinazione massima di 55° del pannello, in quanto l'area esposta a vento è maggiore in questa condizione, si ottiene un valore del **carico vento pari a 0.71 kN/m²**.

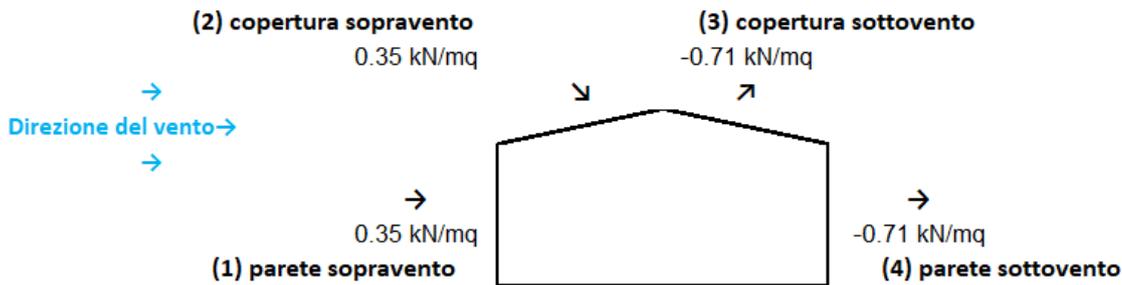


Figura 4: Azione del vento

5 Azioni sulla struttura di fondazione

Le verifiche strutturali e geotecniche delle fondazioni sono state effettuate con l'Approccio 2 come definito al §2.6.1 del D.M. 2018, attraverso la combinazione **A1+M1+R3**. Le azioni sono state amplificate tramite i coefficienti della colonna A1 definiti nella Tab. 6.2.I del D.M. 2018.

Tabella 1: Tab. 6.2.I – Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni

	Effetto	Coefficiente Parziale γ_F (o γ_E)	EQU	(A1)	(A2)
Carichi permanenti G_1	Favorevole	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti $G_2^{(1)}$	Favorevole	γ_{G2}	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevole	γ_{Q1}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

⁽¹⁾ Per i carichi permanenti G_2 si applica quanto indicato alla Tabella 2.6.I. Per la spinta delle terre si fa riferimento ai coefficienti γ_{G2}

I valori di resistenza del terreno sono stati ridotti tramite i coefficienti della colonna M1 definiti nella Tab. 6.2.II del D.M. 2018.

Tabella 2: Tab. 6.2.II – Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno

Parametro	Grandezza alla quale applicare il coefficiente parziale	Coefficiente parziale γ_M	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \varphi'_k$	$\gamma_{\varphi'}$	1,0	1,25
Coazione efficace	c'_k	γ_c	1,0	1,25
Resistenza non drenata	c_{uk}	γ_{cu}	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	γ_γ	γ_γ	1,0	1,0

I valori di resistenza del terreno sono stati verificati tramite i coefficienti della colonna R3 pali infissi definiti nella Tab. 6.4.II del D.M. 2018

Tabella 3: Tab. 6.4.II – Coefficienti parziali γ_R da applicare alle resistenze caratteristiche a carico verticale dei pali

Resistenza	Simbolo	Pali infissi	Pali trivellati	Pali ad elica continua
	γ_R	(R3)	(R3)	(R3)
Base	γ_b	1,15	1,35	1,3
Laterale in compressione	γ_s	1,15	1,15	1,15
Totale ^(*)	γ	1,15	1,30	1,25
Laterale in trazione	γ_{st}	1,25	1,25	1,25

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

6 Verifiche geotecniche

Le fondazioni delle strutture di sostegno dei pannelli fotovoltaici saranno costituite da pali in acciaio di profilo OMEGA 50x250x100.

L'avanzamento nel terreno alla profondità desiderata avviene attraverso un processo di battitura del palo. In accordo con le NTC2018, le verifiche sono state effettuate secondo l'Approccio 2, con la combinazione (A1+M1+R3); sono state considerate le caratteristiche meccaniche dei terreni riportate nella Relazione Geologica (tabella 1).

6.1 Capacità portante dei pali

Il calcolo della capacità portante dei pali segue la trattazione teorica del carico limite di una fondazione superficiale. Ai fini del calcolo, il carico limite di un palo Q_{lim} viene convenzionalmente suddiviso in due aliquote, la resistenza alla punta P_{lim} e la resistenza laterale S_{lim} :

$$Q_{lim} = P_{lim} + S_{lim}$$

dove:

- P_{lim} è la resistenza alla punta che nel caso in esame è stata posta pari a zero in quanto la superficie alla punta del palo è approssimabile a zero;
- $S_{lim} = s * \text{perimetro} * L$
- $s = \mu * k * \sigma'_{v0}$

I coefficienti μ e k sono stati definiti dalla tabella

Tabella 4: Valori di k e μ in funzione del tipo di palo e del terreno

Tipo di palo	k (S)	k (D)	μ
Batt. profilato	0.7	1.0	0.36
Batt. tubo acc. chiuso	1.0	2.0	0.36
Batt. Cls prefabbricato	1.0	2.0	$\tan(0.75\varphi')$
Batt. Cls gettato	1.0	3.0	$\tan(\varphi')$
Trivellato	0.5	0.4	$\tan(\varphi')$
Elica continua	0.7	0.9	$\tan(\varphi')$

Nell'ipotesi di una profondità di **infissione pari a 1.60** m si ottiene:

- $\sigma'_{v0} = \gamma * z/2 = 18 * 1.60/2 = 14.4 \text{ kN/m}^2$
- $\gamma = \text{peso di volume} = 18 \text{ kN/m}^3$
- $z = \text{profondità di infissione del palo} = 1.60 \text{ m}$
- $\text{perimetro del profilo OMEGA } 50 \times 250 \times 100 = 1400 \text{ mm} = 1.40 \text{ m}$
- $K = 0,7$ e $\mu = 0.36$ per profilo battuto

Quindi la resistenza laterale del palo S_{lim} è risultata pari a 8.13 KN

$$Q_{lim} = S_{lim} = (0.36 \cdot 0.7 \cdot 14.4) \cdot 1.40 \cdot 1.60 = 8.13 \text{ kN}$$

6.2 Verifica a carico limite verticale dei pali

Le forze agenti sulla struttura di fondazione sono di seguito riportate.

L'area su cui agiscono le sollecitazioni è pari all'area del singolo pannello fotovoltaico, circa 2.80 m².

Tabella 5: carichi concentrati agenti sulla fondazione

ANALISI DEI CARICHI			
P.P _{OMEGA}	Peso Proprio OMEGA 50x250x100	0,79	kN
P.P _{pan.}	Peso Proprio PANNELLO	0,35	kN
P _{neve}	Neve	1,34	kN
P _{vento}	Vento	1,98	kN

Le varie forze agenti sono state combinate tra di loro utilizzando i coefficienti parziali per le azioni ed i coefficienti di combinazione riportati nelle NTC2018.

Tabella 6: Tab. 2.6.1 – Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni nelle verifiche SLU

		Coefficiente γ_f	EQU	A1	A2
Carichi permanenti G ₁	Favorevoli	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevoli		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti non strutturali G ₂ ⁽¹⁾	Favorevoli	γ_{G2}	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevoli		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevoli	γ_{Qi}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevoli		1,5	1,5	1,3

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

$$Q_{es} = (\gamma_{G1} * P \cdot P_{OMEGA}) + (\gamma_{G2} * P \cdot P_{pan.}) + (\gamma_{Qi} * P \cdot neve) + (\gamma_{Qi} * P \cdot vento)$$

Dove:

- γ_{G1} coefficiente parziale dei carichi permanenti G1;
- γ_{G2} coefficiente parziale dei carichi permanenti non strutturali G2;
- γ_{Qi} coefficiente parziale delle azioni variabili Q.

Quindi il carico di esercizio è risultato pari a:

$$Q_{es} = (1.3 * 0.79) + (1.5 * 0.35) + (1.5 * 1.34) + (1.5 * 1.98) = 6.54 \text{ kN}$$

$$Q_{lim} = S_{lim} = 8.13 \text{ kN}$$

La verifica risulta soddisfatta essendo il rapporto tra $\frac{Q_{lim}}{Q_{es}} \geq \gamma_s$ dove :

- $\gamma_s=1.24$ è il coefficiente laterale in compressione funzione del tipo di palo come riportato nella tabella 6.4.II della NTC2018
- $\frac{Q_{lim}}{Q_{es}} = 1.24 \geq 1.15$

6.3 Verifica a sfilamento dei pali

Per la verifica a sfilamento del palo di fondazione è stata considerata l'azione del vento pari a 0.71kN/m^2 che agisce sulla parte della struttura sottovento, in quanto risulta essere la più elevata. A vantaggio di sicurezza è stata considerata la risultante verticale agente alla superficie di azione del vento.

La combinazione di carico utilizzata è la seguente.

$$Q_{es} = (P \cdot P_{OMEGA} + P \cdot P_{pan.}) + (\gamma_{Qi} * P_{vento})$$

Dove:

- γ_{Qi} coefficiente parziale delle azioni variabili Q (tabella 8).

$$Q_{es} = (0.79 + 0.35) - (1.5 * 1.98) = - 1.84 \text{ kN}$$

A vantaggio di sicurezza viene amplificato solo il carico vento.

Essendo $S_{lim} = 8.13 \text{ kN}$ si ha un rapporto pari a:

$$\frac{S_{lim}}{Q_{es}} = |4.41|$$

Il rapporto tra S_{lim} e Q_{es} risulta maggiore di $\gamma_{st}=1.25$, ovvero il coefficiente laterale in trazione, come riportato nella tabella 6.4.II della NTC2018, perciò la verifica a sfilamento del palo risulta soddisfatta.

6.4 Verifica a ribaltamento dei pali

Per la verifica a ribaltamento del palo è stata utilizzata la teoria di BROMS, che caratterizza il comportamento flessionale del palo con un comportamento di tipo rigido-perfettamente plastico. Sulla base di analisi teoriche e di osservazioni sperimentali si assume che la resistenza p del terreno abbia l'andamento riportato in figura (cfr. FONDAZIONI di Carlo Viggiani):

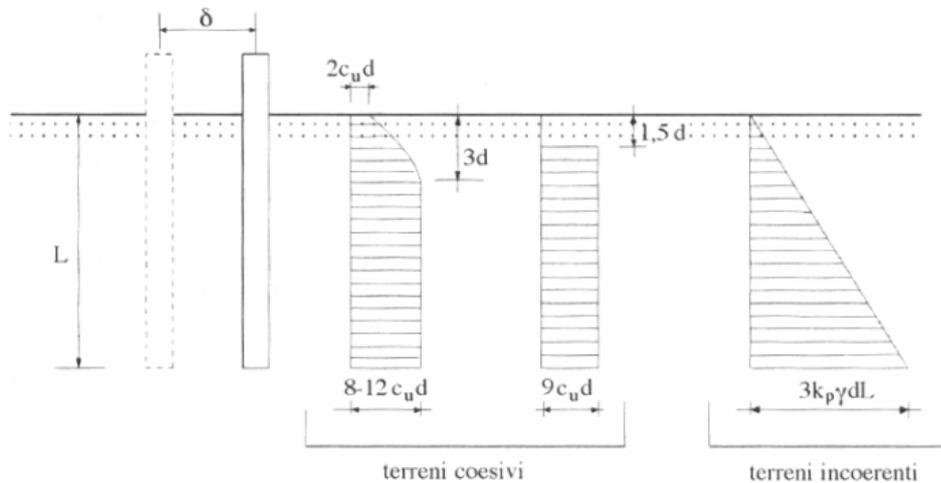


Figura 5: resistenza limite del terreno

Il terreno in esame è incoerente perciò si è proceduto a calcolare la forza ribaltante in testa al palo ipotizzando il palo impedito di ruotare in testa:

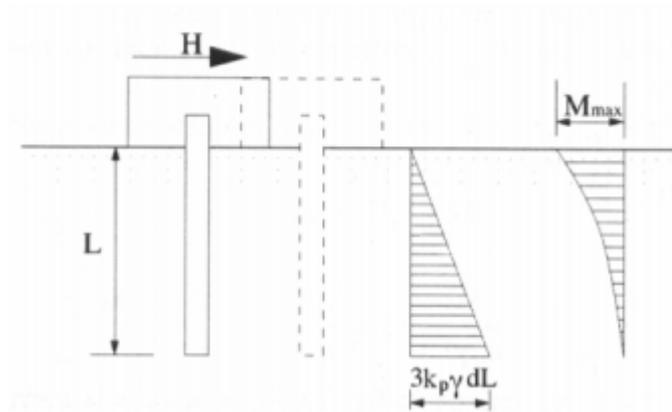


Figura 6: resistenza limite del terreno di un palo corto impedito di ruotare in testa

$$H = 1.5 * L^2 * k_p * \gamma * d$$

Dove:

- $L=1.60$ m: profondità di infissione del palo;
- $k_p = \frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi} = 2.20$: coefficiente di spinta passiva;
- $\varphi = 22^\circ$: angolo di attrito del terreno
- $\gamma = 18$ kN/m³: peso di volume
- $d = 0.25$ m: Lato lungo del profilo OMEGA

$$H = 1.5 * 1.60^2 * 2.20 * 18 * 0.25 = 37.97 \text{ kN}$$

Il momento stabilizzante risulta pari a:

$$M_{stabilizzante} = \frac{2}{3} * H * L$$

$$M_{stabilizzante} = \frac{2}{3} * 37.97 * 1.60 = 40.50 \text{ kNm}$$

Questo momento viene confrontato con quello ribaltante che si ottiene dalla componente orizzontale del vento che cautelativamente è stata presa pari a **0.71 kN/m²**:

$$M_{ribaltante} = P_{vento} * A_{pan.} * b$$

Dove b= braccio di azione della componente orizzontale, che è pari a 2.20 m, ovvero l'altezza del palo da terra al colmo, mentre $A_{pan.}$ =area del pannello pari a 2.79 m².

$$M_{ribaltante} = 0.71 * 2.79 * 2.20 = 4.37 \text{ kNm}$$

Essendo $M_{stabilizzante} \geq M_{ribaltante}$ la verifica risulta soddisfatta.