



REGIONE
SARDEGNA



PROVINCIA DI
SASSARI



COMUNE DI
MORES



COMUNE DI
TORRALBA



COMUNE DI
BONORVA

Realizzazione di un impianto agrivoltaico avanzato integrato con allevamento non intensivo di ovini, produzione agricola, produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile fotovoltaica e sistema di accumulo elettrochimico da ubicarsi in agro di Mores (SS) e delle relative opere di connessione alla Stazione Elettrica RTN nel Comune di Bonorva (SS)

Impianto FV: Potenza nominale cc: 72,618 MWp - Potenza in immissione ca: 60,00 MVA
Sistema di accumulo: Potenza nominale ca: 10,00 MVA

ELABORATO

RELAZIONE DESCRITTIVA DELLE FONDAZIONI TRACKER

IDENTIFICAZIONE ELABORATO

Livello progetto	Codice Pratica	Documento	Codice elaborato	n° foglio	n° tot. fogli	Nome file	Data	Scala
PD		R	2.9	1	16	R_2.9_FONDAZTRACKER.pdf	Dicembre 2023	n.a.

REVISIONI

Rev. n°	Data	Descrizione	Redatto	Verificato	Approvato
00	22/12/2023	I Emissione	MONFREDA	ADORNO	AMBRON

PROGETTAZIONE:

MATE System S.r.l.

Via G. Mameli, n.5
70020 Cassano delle Murge (BA)
tel. +39 080 5746758
mail: info@matesystemsrl.it
pec: matesystem@pec.it

Progettista:

Ing. Francesco Ambron



DIRITTI Questo elaborato è di proprietà della proponente pertanto non può essere riprodotto né integralmente, né in parte senza l'autorizzazione scritta della stessa. Da non utilizzare per scopi diversi da quelli per cui è stato fornito.

PROPONENTE:
MARMARIA SOLARE 3 S.r.l.
Via TEVERE n° 41
00198 ROMA



Committente: MARMARIA SOLARE 3 S.R.L. Via TEVERE, 41 – 00198 ROMA		Progettazione: Mate System S.r.l. Via G. Mameli n. 5, Cassano delle Murge (BA)	
Cod. elab.: R_2.9	Relazione descrittiva delle fondazioni tracker		Formato: A4
Data: 20/12/2023			Scala: n.a.

REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO AGRIVOLTAICO AVANZATO INTEGRATO CON ALLEVAMENTO NON INTENSIVO DI OVINI, PRODUZIONE AGRICOLA, PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA DA FONTE RINNOVABILE FOTOVOLTAICA E SISTEMA DI ACCUMULO ELETTROCHIMICO DA UBICARSI IN AGRO DI MORES (SS) E DELLE RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE ALLA STAZIONE ELETTRICA RTN NEL COMUNE DI BONORVA (SS)

Impianto FV:Potenza nominale cc: 72,618 MWp – Potenza nominale ca: 60 MVA

Sistema di accumulo: Potenza nominale ca: 10,000 MVA

COMMITTENTE:

MARMARIA SOLARE 3 S.r.l.

Via TEVERE, 41

00198– ROMA

PROGETTAZIONE a cura di:

MATE SYSTEM S.R.L.

Via Goffredo Mameli 5

70020 – Cassano delle Murge (BA)

Ing. Francesco Ambron

RELAZIONE DESCRITTIVA DELLE FONDAZIONI TRACKER

Committente: MARMARIA SOLARE 3 S.R.L. Via TEVERE, 41 – 00198 ROMA		Progettazione: Mate System S.r.l. Via G. Mameli n. 5, Cassano delle Murge (BA)	
Cod. elab.: R_2.9	Relazione descrittiva delle fondazioni tracker		Formato: A4
Data: 20/12/2023			Scala: n.a.

Sommario

1. PREMESSA	3
2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO	4
3. MATERIALI IMPIEGATI E RESISTENZA DI CALCOLO	4
4. TERRENO DI FONDAZIONE	5
5. ANALISI DEI CARICHI.....	6
6. AZIONI SULLA STRUTTURA.....	8
7. VERIFICHE GEOTECNICHE	9
7.1. Equazione generale della capacità portante dei pali	10
7.2. Verifica a carico limite verticale dei pali.....	11
7.3. Verifica a sfilamento dei pali.....	12
7.4. Verifica a ribaltamento dei pali	12
8. CONCLUSIONI.....	15

Committente: MARMARIA SOLARE 3 S.R.L. Via TEVERE, 41 – 00198 ROMA		Progettazione: Mate System S.r.l. Via G. Mameli n. 5, Cassano delle Murge (BA)	
Cod. elab.: R_2.9	Relazione descrittiva delle fondazioni tracker		Formato: A4
Data: 20/12/2023			Scala: n.a.

1. PREMESSA

La presente relazione descrittiva è relativa al progetto di realizzazione di un impianto di produzione di energia elettrica da fonte fotovoltaica della potenza pari a 72,618 MW_p, da realizzarsi in agro di Mores (SS), e delle relative opere connesse, in agro del Comune di Bonorva (SS). Ad esso sarà associato un Sistema di Accumulo dell'energia (BESS) di potenza nominale pari a 10MW.

Al fine di ottimizzare la produzione di energia, l'impianto fotovoltaico sarà composto da 109.200 moduli fotovoltaici di nuova generazione in silicio monocristallino di potenza nominale pari a 665 Wp cadauno.

L'insieme di 30 moduli, collegati tra loro elettricamente, formerà una stringa fotovoltaica.

Il collegamento elettrico tra i vari moduli avverrà direttamente sotto le strutture di sostegno dei pannelli con cavi esterni graffettati alle stesse. Ogni struttura di sostegno, denominate "tracker", porterà 2 stringhe fotovoltaiche complete; l'insieme di più stringhe fotovoltaiche, collegata in parallelo tra loro, costituirà un sottocampo o sezione e si collegheranno alle MV skids. Le MV skids previste saranno in n. 11.

La struttura di sostegno dei moduli fotovoltaici sarà ad inseguitore solare monoassiale; si tratta di una struttura a pali infissi, completamente adattabile alle dimensioni del pannello fotovoltaico, alle condizioni geotecniche del sito ed alla quantità di spazio di installazione disponibile.

In via generale le strutture fotovoltaiche avranno le seguenti caratteristiche:

- Sistema di Rotazione: ad asse singolo orizzontale;
- Angolo di Rotazione: $\pm 13^\circ$;
- Caratteristiche del suolo:
 - Pendenza Nord-Sud: 17%
 - Pendenza Est-Ovest: illimitata
- Fondazioni: Pali infissi

Nello specifico quella scelta per il progetto in questione, essendo ciascuna struttura costituita da 60 moduli fotovoltaici disposti su due file, avrà dimensioni pari a 40,40 x 4,78 (lung. x largh.).

Per la realizzazione di tale impianto saranno utilizzate strutture di sostegno di tipo mobile (tracker), realizzate in acciaio da costruzione e progettate secondo gli Eurocodici. Le strutture di sostegno verranno ancorate al terreno per mezzo di fondazioni a vite o pali profilati a C ad infissione, cioè dei pali in acciaio che possono presentare sulla parte finale una filettatura in grado di consentire una vera e propria avvitatura del palo nel terreno o un'infissione a percussione tramite macchina battipali.

Questi pali saranno piantati nel terreno per una idonea profondità dal piano campagna e serviranno come punto di ancoraggio per le strutture di supporto dei pannelli. Tali strutture, realizzate per mezzo di profili in acciaio zincato tra loro collegati, andranno a creare un telaio di appoggio per i pannelli fotovoltaici.

Committente: MARMARIA SOLARE 3 S.R.L. Via TEVERE, 41 – 00198 ROMA		Progettazione: Mate System S.r.l. Via G. Mameli n. 5, Cassano delle Murge (BA)	
Cod. elab.: R_2.9	Relazione descrittiva delle fondazioni tracker		Formato: A4
Data: 20/12/2023			Scala: n.a.

Con questa modalità di installazione dei pali di sostegno non saranno necessarie trivellazioni dell'area e saranno evitati ulteriori movimenti terra rispetto a quelli già previsti per la realizzazione delle altre opere.

2. 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".

3. MATERIALI IMPIEGATI E RESISTENZA 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:

N _{id}	γ _k	α _{T, i}	E	G	Stz	Caratteristiche acciaio											
						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}	γ _{M3,SLV}	γ _{M3,SLE}	γ _{M7}		
	[N/m ³]	[1/°C]	[N/mm ²]	[N/mm ²]		[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]							NCn t	Cnt
S275 - (S275)																	
001	78.500	0,000012	210.00 0	80.769	P	275,00 255,00	430 410	261,90 242,86	-	1,05	1,05	1,25	-	-	-	-	-

LEGENDA:

- N_{id}** Numero identificativo del materiale, nella relativa tabella dei materiali.
γ_k Peso specifico.
α_{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 ≤ 40 mm).
f_{tk,2} Resistenza caratteristica a Rottura (per profili con 40 mm < t ≤ 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.
γ_{M3,SLV} Coefficiente parziale di sicurezza per scorrimento allo SLV (Bulloni).
γ_{M3,SLE} Coefficiente parziale di sicurezza per scorrimento allo SLE (Bulloni).
γ_{M7} Coefficiente parziale di sicurezza precario di bulloni ad alta resistenza (Bulloni - NCn = 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 ≤ 40 mm).
f_{yk,2} Resistenza caratteristica allo snervamento (per profili con 40 mm < t ≤ 80 mm).
f_{yd,1} Resistenza di calcolo (per profili con t ≤ 40 mm).
f_{yd,2} Resistenza di calcolo (per profili con 40 mm < t ≤ 80 mm).
NOTE [-] = Parametro non significativo per il materiale.

Committente: MARMARIA SOLARE 3 S.R.L. Via TEVERE, 41 – 00198 ROMA		Progettazione: Mate System S.r.l. Via G. Mameli n. 5, Cassano delle Murge (BA)	
Cod. elab.: R_2.9	Relazione descrittiva delle fondazioni tracker		Formato: A4
Data: 20/12/2023			Scala: n.a.

4. 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.

Per la caratterizzazione geotecnica dei terreni di sedime in questa fase preliminare è risultato opportuno fare riferimento e confronti con parametri di resistenza "operativi", stimati sulla base di indicazioni di letteratura e tarate sui risultati di "back analysis" (Skempton, 1977; Tavenas & Leroueil, 1981).

Si rimanda al successivo grado di approfondimento della progettazione (progetto definitivo/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:

a) Unità litotecnica 1: DEPOSITI ALLUVIONALI

Trattasi di limi sabbiosi o sabbie limose con scarsa argilla. A luoghi si rinvencono sotto forme lenticolari ghiaia in matrice sabbiosa. Si tratta generalmente di terreni a media consistenza, di colore marroncino o grigiastro, poco plastici. Il tutto si presenta caotico, rimaneggiato, umido, poco plastico e poco compressibile:

γ_{nk} (t/m ³)	$\gamma_{sat k}$ (t/m ³)	ϕ'_k (gradi)	C'_k (t/m ²)	Ed'_k (kg/cm ²)	E (kg/cm ²)	μ
1.85	2.00	26	0.00	80.00	70.00	0.47

Figura 1 - Caratteristiche meccaniche del terreno (cfr. Relazione geologica)

b) Unità litotecnica 2: BASALTI DEL LOGUDORO

Costituita da basalti alcalini e transizionali, basaniti, trachibasalti e hawaiiiti, talora con noduli peridotitici e andesiti basaltiche e basalti subalcalini. Probabilmente potrebbero esserci intercalazioni di conglomerati, sabbie e/o argille fluvio-lacustri e la presenza di conchi di scorie basaltiche

Figura 2 - Caratteristiche meccaniche del terreno (cfr. Relazione geologica)

γ_{nk} (t/m ³)	$\gamma_{sat k}$ (t/m ³)	ϕ'_k (gradi)	C'_k (t/m ²)
2.10	2.25	30	5.00

Committente: MARMARIA SOLARE 3 S.R.L. Via TEVERE, 41 – 00198 ROMA		Progettazione: Mate System S.r.l. Via G. Mameli n. 5, Cassano delle Murge (BA)	
Cod. elab.: R_2.9	Relazione descrittiva delle fondazioni tracker		Formato: A4
Data: 20/12/2023			Scala: n.a.

c) Unità litotecnica 3: UNITA' DI MONTE CUGUTADA

Costituita da andesiti basaltiche e andesiti, porfiriche, pirossenico-anfiboliche; si rinvencono in cupole di ristagno e colate, con associati prodotti epiclastici e sottili intercalari sedimentari; potenti colate talora autoclastiche e dicchi. Spesso in eteotropia si rinvencono depositi di flusso piroclastico in facies ignimbratica, a chimismo riodiacitico, pomiceo-cineritici, debolmente saldati, spesso argillificati, ricchi in pomici:

γ_{nk} (t/m ³)	$\gamma_{sat k}$ (t/m ³)	φ'_k (gradi)	C'_k (t/m ²)
2.30	2.35	35	5.00

Figura 3 - Caratteristiche meccaniche del terreno (cfr. Relazione geologica)

5. ANALISI DEI CARICHI

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

ANALISI DEI CARICHI			
P.P_{UPN160}	Peso Proprio UPN160	0,28	kN
P.P_{pan}	Peso proprio PANNELLO	0,35	kN
P_{neve}	Neve	0,48	kN/m ²
P_{vento}	Vento	0,62	kN/m ³

Figura 4 - Analisi dei carichi agenti sulla fondazione

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.

- **Neve**

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;

μ_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.

Figura 5 - NTC 2018 - §3.4.1. Carico della neve sulle coperture

In accordo con le NTC 2018, considerando un'altitudine sul livello del mare pari a 150 m, il valore di riferimento del carico della neve al suolo, q_{sk} , è pari a 0,60 kN/m².

Committente: MARMARIA SOLARE 3 S.R.L. Via TEVERE, 41 – 00198 ROMA		Progettazione: Mate System S.r.l. Via G. Mameli n. 5, Cassano delle Murge (BA)	
Cod. elab.: R_2.9	Relazione descrittiva delle fondazioni tracker		Formato: A4
Data: 20/12/2023			Scala: n.a.

Zona III

Agrigento, Brindisi, Cagliari, Caltanissetta, Carbonia-Iglesias, Caserta, Catania, Catanzaro, Cosenza, Crotone, Enna, Grosseto, Latina, Lecce, Livorno, Matera, Medio Campidano, Messina, Napoli, Nuoro, Ogliastra, Olbia-Tempio, **Oristano**, Palermo, Pisa, Potenza, Ragusa, Reggio Calabria, Roma, Salerno, Sassari, Siena, Siracusa, Taranto, Terni, Trapani, Vibo Valentia, Viterbo:

$q_{sk} = 0,60 \text{ kN/m}^2$	$a_s \leq 200 \text{ m}$	[3.4.5]
$q_{sk} = 0,51 [1 + (a_s/481)^2] \text{ kN/m}^2$	$a_s > 200 \text{ m}$	

Figura 6 - NTC 2018 - 3.4.2. Valore di riferimento del carico della neve al suolo

Considerando un'inclinazione della falda variabile da 0° a 55°, il coefficiente di forma della copertura, μ_1 , è assunto pari a 0,8 (condizione più gravosa):

Tab. 3.4.II – Valori del coefficiente di forma

Coefficiente di forma	$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha < 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
μ_1	0,8	$0,8 \cdot \frac{(60 - \alpha)}{30}$	0,0

Figura 7 - NTC 2018 - Tab. 3.4.II Valori del coefficiente di forma

Considerando una classe di topografia normale, il coefficiente di esposizione, C_E , è assunto pari a 1,0:

Tab. 3.4.I – Valori di C_E per diverse classi di esposizione

Topografia	Descrizione	C_E
Battuta dai venti	Aree pianeggianti non ostruite esposte su tutti i lati, senza costruzioni o alberi più alti	0,9
Normale	Aree in cui non è presente una significativa rimozione di neve sulla costruzione prodotta dal vento, a causa del terreno, altre costruzioni o alberi	1,0
Riparata	Aree in cui la costruzione considerata è sensibilmente più bassa del circostante terreno o circondata da costruzioni o alberi più alti	1,1

Figura 8 - NTC 2018 - Tab. 3.4.I Valori di C_E per diverse classi di esposizione

Il coefficiente termico, C_t , è pari a 1,00.

Considerando la condizione più gravosa, ovvero quando l'inclinazione della falda è pari a 0°, il carico neve sulla copertura è pari a:

$$q_s = 0,60 \cdot 0,8 \cdot 1,00 \cdot 1,00 = \mathbf{0,48 \text{ kN/mq}}$$

▪ Vento

In accordo con le NTC2018, considerando un'altitudine sul livello del mare pari a 150 m, tempo di ritorno 50 anni, classe di rugosità del terreno D, inclinazione della falda variabile da 0° a 55°, 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:

Committente: MARMARIA SOLARE 3 S.R.L. Via TEVERE, 41 – 00198 ROMA	Progettazione: Mate System S.r.l. Via G. Mameli n. 5, Cassano delle Murge (BA)
Cod. elab.: R_2.9	Relazione descrittiva delle fondazioni tracker
Data: 20/12/2023	Formato: A4 Scala: n.a.

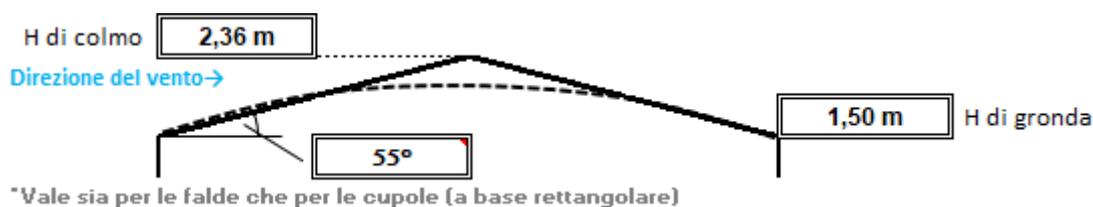


Figura 9 - Schema copertura inclinata per il calcolo dell'azione del vento

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 **0.62 kN/mq**.

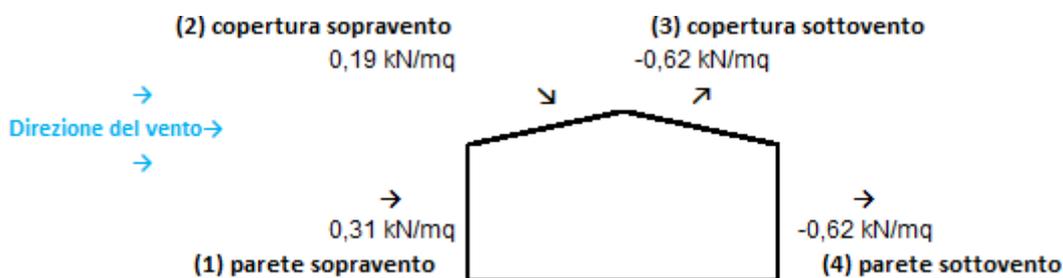


Figura 10 - Azione del vento

6. AZIONI SULLA STRUTTURA

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.

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_{G1}

Figura 11 - Tab. 6.2.I - Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni

Committente: MARMARIA SOLARE 3 S.R.L. Via TEVERE, 41 – 00198 ROMA		Progettazione: Mate System S.r.l. Via G. Mameli n. 5, Cassano delle Murge (BA)	
Cod. elab.: R_2.9	Relazione descrittiva delle fondazioni tracker		Formato: A4
Data: 20/12/2023			Scala: n.a.

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.

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
Coesione 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

Figura 12 -Tab. 6.2.II -Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno

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.

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.

Figura 13 - Tab. 6.4.II - Coefficienti parziali γ_R da applicare alle resistenze caratteristiche a carico verticale dei pali

7. VERIFICHE GEOTECNICHE

Le fondazioni delle strutture di sostegno dei pannelli fotovoltaici saranno costituite da pali in acciaio di profilo UPN 160.

L'avanzamento nel terreno alla profondità desiderata avviene attraverso un processo di battitura del palo. In accordo con le NTC 2018, 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 (Fig. 2 - Caratteristiche meccaniche del terreno).

Committente: MARMARIA SOLARE 3 S.R.L. Via TEVERE, 41 – 00198 ROMA		Progettazione: Mate System S.r.l. Via G. Mameli n. 5, Cassano delle Murge (BA)	
Cod. elab.: R_2.9	Relazione descrittiva delle fondazioni tracker		Formato: A4
Data: 20/12/2023			Scala: n.a.

7.1. Equazione generale della 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;
- $S_{lim} = s * \text{perimetro} * L$
- $s = \mu * k * \sigma'_{v_0}$

I coefficienti μ e k sono stati definiti dalla tabella seguente:

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	$\tan(\varphi')$

Figura 14 - Valori di k e μ in funzione del tipo di palo e del terreno

- $\sigma'_{v_0} = \gamma * z = 22,555 * 1,50 = 33,825 \text{ kN/m}^2$
- $\gamma = 22,555 \text{ kN/m}^3$ (peso di volume)
- $z = 1,50 \text{ m}$ (profondità di infissione del palo)
- Perimetro del UPN160 = $(160 + 65 + 65) * 2 = 580 \text{ mm} = 0.58 \text{ m}$

Quindi la resistenza laterale del palo S_{lim} risulta pari a 7,42 kN.

$$Q_{lim} = S_{lim} = 7,42 \text{ kN}$$

Committente: MARMARIA SOLARE 3 S.R.L. Via TEVERE, 41 – 00198 ROMA		Progettazione: Mate System S.r.l. Via G. Mameli n. 5, Cassano delle Murge (BA)	
Cod. elab.: R_2.9	Relazione descrittiva delle fondazioni tracker		Formato: A4
Data: 20/12/2023			Scala: n.a.

7.2. 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 3,10 m².

ANALISI DEI CARICHI			
P.P_{UPN160}	Peso Proprio UPN160	0,28	kN
P.P_{pan}	Peso proprio PANNELLO	0,35	kN
P_{neve}	Neve	1,488	kN/m ²
P_{vento}	Vento	1,922	kN/m ³

Figura 15 - Carichi concentrati sulla fondazione

Le varie forze agenti sono state combinate tra di loro utilizzando i coefficienti parziali per le azioni ed i coefficienti di combinazione riportati nelle NTC 2018.

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

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

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

Figura 16 - Tab. 2.6.I Coefficienti parziali per le azioni i per l'effetto delle azioni nelle verifiche SLU

$$Q_{es} = (\gamma_{G1} * P.P_{UPN160}) + (\gamma_{G2} * P.P_{pan}) + (\gamma_{Qi} * P_{neve}) + (\gamma_{Qi} * P_{vento})$$

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:

$$Q_{es} = (1,3 * 0,28) + (1,5 * 0,35) + (1,5 * 1,488) + (1,5 * 1,922) = 6,004 \text{ kN}$$

$$Q_{lim} = S_{lim} = 7,42 \text{ kN}$$

Committente: MARMARIA SOLARE 3 S.R.L. Via TEVERE, 41 – 00198 ROMA		Progettazione: Mate System S.r.l. Via G. Mameli n. 5, Cassano delle Murge (BA)	
Cod. elab.: R_2.9	Relazione descrittiva delle fondazioni tracker		Formato: A4
Data: 20/12/2023			Scala: n.a.

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

- $\gamma_S = 1.15$ è il coefficiente laterale in compressione funzione del tipo di palo, come riportato nella tabella 6.4.II delle NTC 2018;
- $\frac{Q_{lim}}{Q_{es}} = 1,23 \geq 1,15$

7.3. Verifica a sfilamento dei pali

Per la verifica a sfilamento del palo di fondazione è stata considerata l'azione del vento pari a **0.62 kN/m²** 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:

$$Q_{es} = (P \cdot P_{UPN160} + P \cdot P_{pan}) + (\gamma_{Qi} * P_{vento})$$

Dove:

- γ_{Qi} coefficiente parziale delle azioni variabili (*Figura 10*)

$$Q_{es} = (0,28 + 0,35) - (1,5 * 1,922) = -2,253 \text{ kN}$$

A vantaggio di sicurezza viene amplificato solo il carico vento.

Essendo $S_{lim} = 7,42 \text{ kN}$ si ha un rapporto pari a:

$$\frac{S_{lim}}{Q_{es}} = |3,30|$$

Il rapporto tra S_{lim} e Q_{es} risulta maggiore di $\gamma_{st} = 1.25$, ovvero il coefficiente laterale di trazione, come riportato della Tabella 6.4.II della NTC 2018, perciò la verifica a sfilamento del palo risulta soddisfatta.

7.4. 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):

Committente: MARMARIA SOLARE 3 S.R.L. Via TEVERE, 41 – 00198 ROMA	Progettazione: Mate System S.r.l. Via G. Mameli n. 5, Cassano delle Murge (BA)
Cod. elab.: R_2,9	Relazione descrittiva delle fondazioni tracker
Data: 20/12/2023	Formato: A4 Scala: n.a.

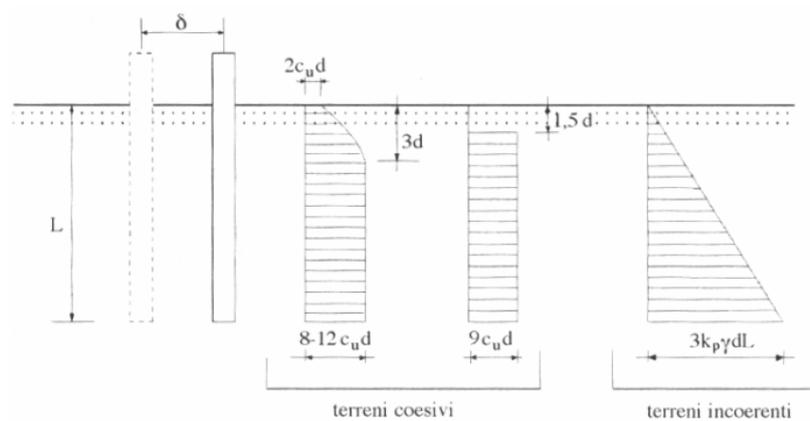


Figura 17 - Resistenza limite del terreno

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:

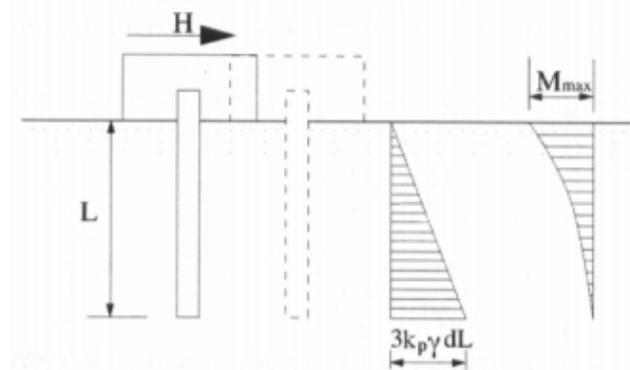


Figura 18 - Resistenza limite del terreno di un palo impedito di ruotare a testa

$$H = 1,5 * L^2 * k_p * \gamma * d$$

Dove:

- $L = 1,50 \text{ m}$ profondità di infissione del palo;
- $k_p = \frac{1+\text{sen}\varphi}{1-\text{sen}\varphi} = 3,65$ coefficiente di spinta passiva;
- $\varphi = 35^\circ$ angolo di attrito del terreno
- $\gamma = 22,55 \text{ kN/m}^3$ (peso di volume)
- $d = 0,16 \text{ m}$ lato lungo del profilo UPN160

$$H = 1,5 * (1,50)^2 * 3,65 * 22,55 * 0,16 = 44,47 \text{ kN}$$

Committente: MARMARIA SOLARE 3 S.R.L. Via TEVERE, 41 – 00198 ROMA		Progettazione: Mate System S.r.l. Via G. Mameli n. 5, Cassano delle Murge (BA)	
Cod. elab.: R_2.9	Relazione descrittiva delle fondazioni tracker		Formato: A4
Data: 20/12/2023			Scala: n.a.

Il momento stabilizzante risulta pari a:

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

$$M_{stabilizzante} = \frac{2}{3} * 44,46 * 1,50 = 44,47 \text{ kNm}$$

Questo momento viene confrontato con quello ribaltante che si ottiene dalla componente orizzontale del vento che cautelativamente è stata presa pari a **0,62 kN/m²**:

$$M_{ribaltante} = P_{vento} * A_{pannello} * b$$

Dove b è il braccio di azione della componente orizzontale, che è pari a 3,65 m, ovvero l'altezza del palo da terra al colmo, mentre $A_{pannello} = 3,10 \text{ m}^2$.

$$M_{ribaltante} = 0,62 * 3,10 * 3,65 = 7,02 \text{ kNm}$$

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

Committente: MARMARIA SOLARE 3 S.R.L. Via TEVERE, 41 – 00198 ROMA		Progettazione: Mate System S.r.l. Via G. Mameli n. 5, Cassano delle Murge (BA)	
Cod. elab.: R_2.9	Relazione descrittiva delle fondazioni tracker		Formato: A4
Data: 20/12/2023			Scala: n.a.

8. CONCLUSIONI

Le verifiche delle strutture metalliche di supporto ai pannelli fotovoltaici, denominati “tracker” sono state condotte considerando in prima battuta la stratigrafia del sottosuolo dell’area interessata (cfr. Relazione Geologica). Sulla base di ciò, si sono determinate le azioni della neve e del vento, secondo quanto definito dalla normativa vigente (NTC 2018).

In particolare, dai calcoli condotti, il **carico neve** è risultato pari a **0,48 kN/mq**, mentre il **carico vento** pari a **0,62 kN/mq**.

Le fondazioni delle strutture di sostegno saranno costituite da pali in acciaio di profilo UPN 160. L’avanzamento nel terreno alla profondità desiderata (**1,50 mt**) avviene attraverso un processo di battitura del palo **senza la necessità di ricorrere ad un ancoraggio con impiego di calcestruzzo**.

Si è giunti a tale soluzione effettuando le seguenti verifiche:

- Verifica a carico limite verticale dei pali;
- Verifica a sfilamento dei pali;
- Verifica a ribaltamento dei pali.

Le verifiche sono risultate tutte soddisfatte.