



REGIONE
SARDEGNA



PROVINCIA DI
SASSARI



COMUNE DI
SASSARI

Realizzazione di un impianto agrivoltaico integrato con produzione agricola e produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile fotovoltaica e sistema di accumulo elettrochimico da ubicarsi in agro di Sassari (SS) e delle relative opere di connessione nel Comune di Sassari (SS) per la connessione alla Stazione Elettrica RTN

Impianto FV: Potenza nominale cc: 38,372 MWp - Potenza in immissione ca: 35 MVA
Sistema di accumulo: Potenza nominale ca: 10,00 MVA

ELABORATO

RELAZIONE DESCRITTIVA
DELLE FONDAZIONI TRACKER

IDENTIFICAZIONE ELABORATO

Livello progetto	Codice Pratica AU	Documento	Codice elaborato	n° foglio	n° tot. fogli	Nome file	Data	Scala
PD		R	2.9	1	18	R_2.9_FONDAZTRACKER.pdf	Dicembre 2022	n.a.

REVISIONI

Rev. n°	Data	Descrizione	Redatto	Verificato	Approvato
00	15/12/2022	I Emissione	SCARDIGNO	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



DIRITTI Questo elaborato è di proprietà della Marmaria Solare 1 S.r.l. 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 1 S.r.l.
Via TEVERE n° 41
00198 ROMA



Committente: MARMARIA SOLARE 1 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: 15/12/2022			Scala: n.a.

REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO AGRIVOLTAICO INTEGRATO CON PRODUZIONE AGRICOLA E PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA DA FONTE RINNOVABILE FOTOVOLTAICA E SISTEMA DI ACCUMULO ELETTROCHIMICO DA UBICARSI IN AGRO DI SASSARI (SS) E DELLE RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE NEL COMUNE DI SASSARI (SS) PER LA CONNESSIONE ALLA STAZIONE ELETTRICA RTN

Impianto FV: Potenza nominale cc: 38,372 MWp – Potenza nominale ca: 35 MVA

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

COMMITTENTE:

MARMARIA SOLARE 1 S.r.l.

Via TEVERE, 41
00198 – ROMA

PROGETTAZIONE a cura di:

MATE SYSTEM S.R.L.

Via Papa Pio XII, 8
70020 – Cassano delle Murge (BA)

Ing. Francesco Ambron

RELAZIONE DESCRITTIVA DELLE FONDAZIONI TRACKER

Committente: MARMARIA SOLARE 1 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: 15/12/2022			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	7
6. AZIONI SULLA STRUTTURA	9
7. VERIFICHE GEOTECNICHE.....	10
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.....	13
8. CONCLUSIONI	15

Committente: MARMARIA SOLARE 1 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: 15/12/2022			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 38,372 MW_p, da realizzarsi in agro di Sassari (SS) e delle relative opere connesse poste nel medesimo territorio comunale.

Al fine di ottimizzare la produzione di energia, l'impianto fotovoltaico sarà composto da 58.140 moduli fotovoltaici di nuova generazione in silicio monocristallino di potenza nominale pari a 660 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. 5.

Di seguito si riportano le caratteristiche principali:

- Produttore: CanadianSolar
- Modello: HiKu7 Mono
- Potenza massima (P_{max}): 660 Wp
- Tensione a circuito aperto (V_{oc} a STC): 45.4 V
- Corrente di corto circuito (I_{sc} a STC): 18.47A
- Dimensioni: 2384x1303x35mm
- Peso: 35.7kg

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 massimo: +60°;
- Angolo di Rotazione minimo: -60°;
- Altezza massima dei pannelli: 5,35 m;
- Altezza minima dei pannelli: 1,2 m;
- Pitch di impianto: 9 m;
- Profondità di infissione dei pali (presunta): 1,5 m
- Distanza tra i pannelli nella configurazione di massima distanza: 9 m;
- Distanza tra i pannelli nella configurazione di minima distanza: 4,22 m;
- Caratteristiche del suolo:
 - Pendenza Nord-Sud: 17%
 - Pendenza Est-Ovest: illimitata
- Fondazioni: Pali infissi

Committente: MARMARIA SOLARE 1 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: 15/12/2022	Formato: A4 Scala: n.a.

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 39,83 x 4,78 (lunghezza x larghezza).

I pali di supporto alla struttura saranno infissi direttamente nel terreno ed in fase esecutiva potrebbero essere scelte fondazioni in calcestruzzo se necessarie.

Nella Figura 1 si riporta un estratto dei particolari costruttivi del tracker, strutture di sostegno.

Per maggiori informazioni si rimanda all'elaborato grafico di dettaglio (D_3.12_STRUTTURATRACKER).

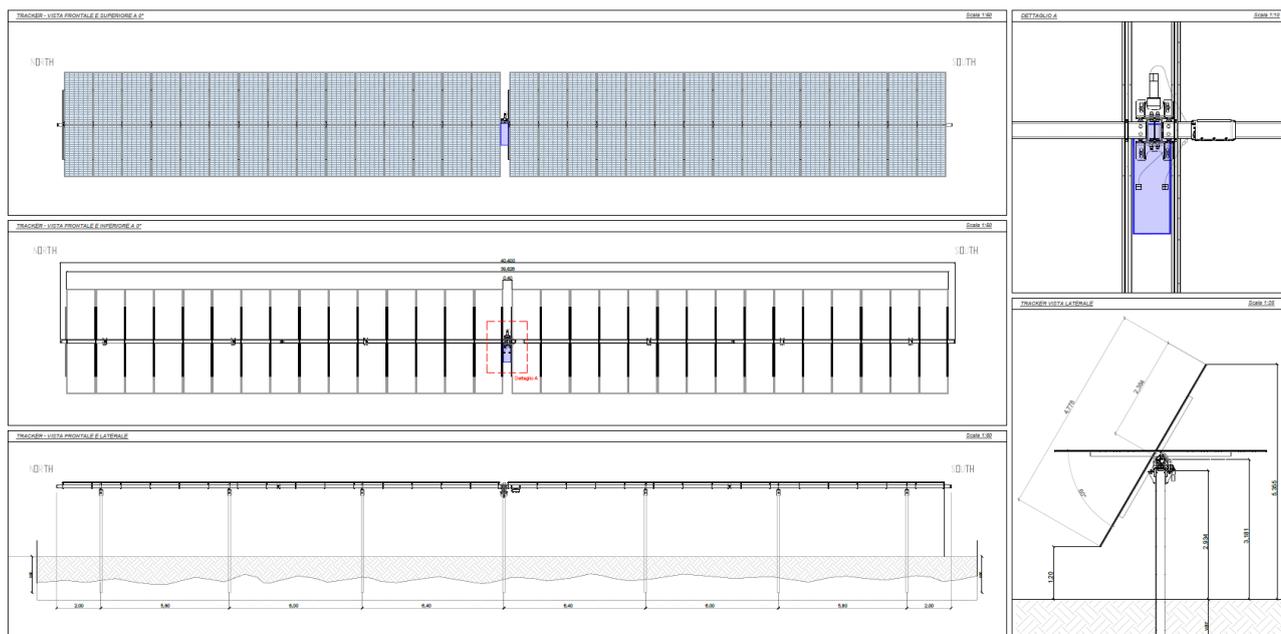


Figura 1 – Particolari costruttivi tracker

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.

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.

Committente: MARMARIA SOLARE 1 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: 15/12/2022			Scala: n.a.

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:

Caratteristiche acciaio																
N _{id}	γ _k	α _{T, i}	E	G	Stz	f _{yk,1} /	f _{tk,1} /	f _{yd,1} /	f _{td}	γ _s	γ _{M1}	γ _{M2}	γ _{M3,SLV}	γ _{M3,SLE}	γ _{M7}	
						f _{yk,2}	f _{tk,2}	f _{yd,2}							NCn	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.
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 precarico 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 1 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: 15/12/2022			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'idonea e ragionata campagna di indagini geognostiche dirette ed indirette, che potrà confermare o meno quanto si espone di seguito:

a) Unità litotecnica 1: DEPOSITI FLUVIO-LACUSTRI

Costituiti da successioni eteropiche di limi ed argille, originatesi per fenomeni di decantazione nella allora piana alluvionale, conseguentemente ad episodi di alluvionamento, e di depositi ghiaiosi in matrice argilloso-limosa e/o sabbiosa, con ciottoli poligenici (frequenti ciottoli vulcanici). Molto spesso si presentano sotto forme lentiformi con la prevalenza o della frazione limo-argillosa o di quella ghiaiosa. Il tutto si presenta privo di struttura, in assetto caotico, poco consistente, mediamente compressibile, plastico soprattutto nei livelli più fini:

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	21	0.50	60.00	50.00	0.47

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

b) Unità litotecnica 2: DEPOSITI LITORALI

Sono costituiti da calcareniti di detrito organico, calcari sabbiosi, marne arenacee e siltose, arenarie, conglomerati di ambiente sublitorale-epibatiale della trasgressione medio-miocenica. Si presentano sempre da ben addensati fino a litificati, poco compressibili e non plastici:

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
1.95	2.10	28	1.00	100.00	90.00	0.44

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

c) Unità litotecnica 3: LITOFACIES CALCAREO-MARNOSA

Committente: MARMARIA SOLARE 1 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: 15/12/2022			Scala: n.a.

Depositi carbonatici di piattaforma costituiti da calcari compatti chiari, marne e calcareniti glauconitiche sublitorali, dolomie e calcari dolomitici grigi con vene calcitiche, calcari bioclastici, calcari massicci oolitici, calcari micritici, calcari marnosi e marne. Si tratta di litologie a consistenza lapidea e, pertanto con ottimi caratteri litotecnici:

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
2.30	2.40	35	5.00	200.00	190.00	0.40

Figura 4 - Caratteristiche meccaniche del terreno (cfr. Relazione geologica)

d) Unità litotecnica 4: COMPLESSO VULCANICO (Depositi Vulcanici - Basamento)

Da un punto di vista applicativo, il complesso litologico presenta degli ottimi caratteri geotecnici in quanto si tratta di materiale non plastico, non compressibile, con elevata resistenza a taglio ed a compressione monoassiale, seppur variamente fratturato:

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
2.30	2.35	40	5.00	400.00	350.00	0.35

Figura 5 - Caratteristiche meccaniche del terreno (cfr. Relazione geologica)

Legenda:

γ_{nk} (t/m³): Peso dell'unità di volume; γ_{satk} (t/m³): Peso dell'unità di volume saturo; ϕ'_k (gradi): Angolo di attrito interno; C'_k (t/m²): Coesione consolidata-drenata; C_{uk} (t/m²): Coesione non consolidata-non drenata; Ed'_k (kg/cm²): Modulo Edometrico; E(kg/cm²): Modulo Elastico λ : Coefficiente di Poisson

Committente: MARMARIA SOLARE 1 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: 15/12/2022			Scala: n.a.

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 6 - 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 7 - 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 85 m, il valore di riferimento del carico della neve al suolo, q_{sk} , è pari a 0,60 kN/m².

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:

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

[3.4.5]

Figura 8 - NTC 2018 - §3.4.2. Valore di riferimento del carico della neve al suolo

Committente: MARMARIA SOLARE I 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: 15/12/2022			Scala: n.a.

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 9 - 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 10 - 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 a pari a 0°, il carico neve sulla copertura è pari a:

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

Committente: MARMARIA SOLARE 1 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: 15/12/2022			Scala: n.a.

▪ **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 11:

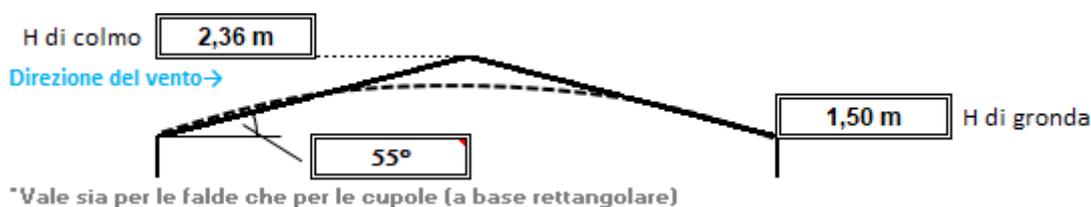


Figura 11 - Schema copertura inclinata per il calcolo dell'azione del vento

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**.

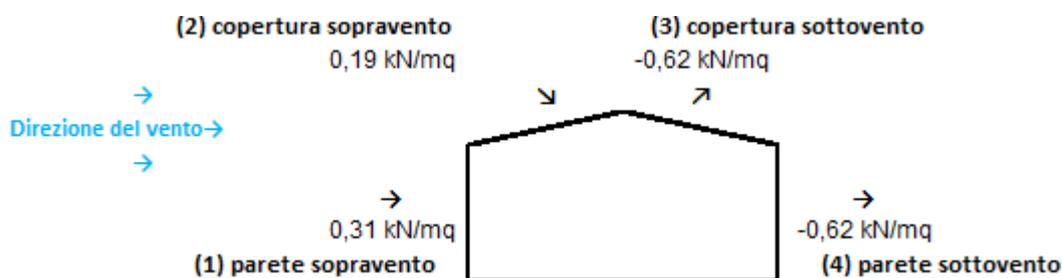


Figura 12 - Azione del vento

Committente: MARMARIA SOLARE I 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: 15/12/2022			Scala: n.a.

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

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	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
Resistenza non drenata	c_{uk}	γ_{cu}	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	γ_r	γ_r	1,0	1,0

Figura 14 -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 (R3)	Pali trivellati (R3)	Pali ad elica continua (R3)
	γ_R			
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 15 - Tab. 6.4.II - Coefficienti parziali γ_R da applicare alle resistenze caratteristiche a carico verticale dei pali

Committente: MARMARIA SOLARE 1 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: 15/12/2022			Scala: n.a.

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 stati considerate le caratteristiche meccaniche dei terreni riportate nella Relazione Geologica (Fig. 2 - Caratteristiche meccaniche del terreno).

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

Committente: MARMARIA SOLARE 1 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: 15/12/2022			Scala: n.a.

- $\sigma'_{v_0} = \gamma * z = 22,555 * 1,50 = 33,825 \text{ kN/m}^2$
- $\gamma = 22,555 \text{ kN/m}^3$ (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.

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

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 17 - 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 18 - 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 G_1 ;
- γ_{G2} coefficiente parziale dei carichi permanenti non strutturali G_2 ;
- γ_{Qi} coefficiente parziale delle azioni variabili Q.

Committente: MARMARIA SOLARE 1 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: 15/12/2022			Scala: n.a.

Quindi il carico di esercizio è risultato pari a:

$$Q_{es} = (1,3 * 0,28) + (1,5 * 0,35) + (1,5 * 1,20) + (1,5 * 1,92) = 6,004 \text{ kN}$$

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

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

$$Q_{es} = (0,28 + 0,35) - (1,5 * 1,92) = -2,253 \text{ kN}$$

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.

Committente: MARMARIA SOLARE 1 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: 15/12/2022	Formato: A4 Scala: n.a.

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):

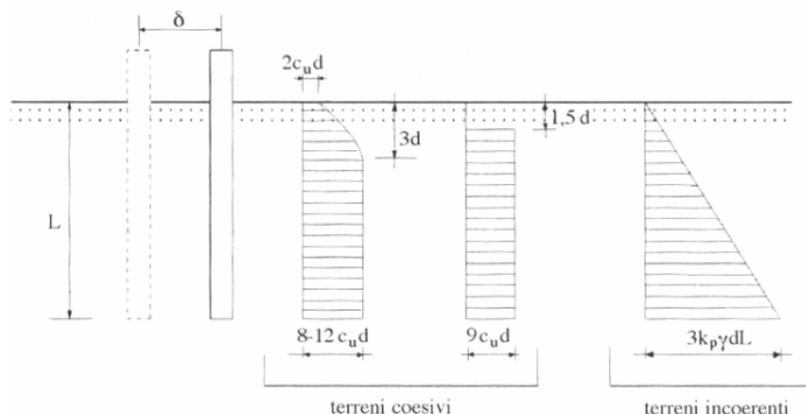


Figura 19 - Resistenza limite del terreno

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:

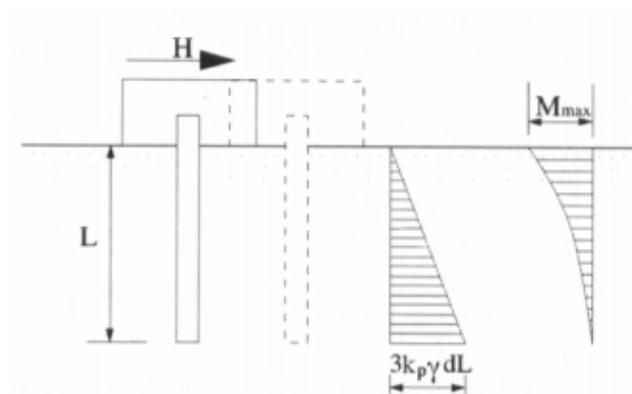


Figura 20 - Resistenza limite del terreno di un palo impedito di ruotare a testa

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

Committente: MARMARIA SOLARE 1 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: 15/12/2022			Scala: n.a.

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

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 1 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: 15/12/2022			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 **0,92 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.