



REGIONE
PUGLIA



PROVINCIA
DI FOGGIA



COMUNE
DI CANDELA



COMUNE
DI ASCOLI SATRIANO

Realizzazione di impianto agrivoltaico con produzione agricola e produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile fotovoltaica da ubicarsi in località Posta Fissa in agro di Candela (FG) e delle relative opere di connessione alla Stazione elettrica SE Camerelle nel Comune di Ascoli Satriano (FG)

Potenza nominale cc: 30,39 MWp - Potenza in immissione ca: 30,00 MVA

ELABORATO

RELAZIONE DESCRITTIVA FONDAZIONI TRACKER

IDENTIFICAZIONE ELABORATO

Livello progetto	Codice Pratica	documento	codice elaborato	n° foglio	n° tot. fogli	Nome file	Data	Scala
PD		R	2.14			R_2.14_FONDAZTRACKER.pdf	12/2021	n.a.

REVISIONI

Rev. n°	Data	Descrizione	Redatto	Verificato	Approvato
00	17/12/2021	1° Emissione	SPINELLI	PETRELLI	AMBRON

PROGETTAZIONE:

MATE System Unipersonale srl

Via Papa Pio XII, n.8 70020 Cassano delle Murge (BA)
tel. +39 080 5746758
mail: info@matesystemsrl.it pec: matesystem@pec.it



DIRITTI Questo elaborato è di proprietà della Luminora Candela 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:
LUMINORA CANDELA S.R.L.
Via TEVERE n.°41 00198
ROMA

Il legale rappresentante
Dott. PABLO MIGUEL OTIN PINTADO

Committente: LUMINORA CANDELA S.r.l. Via TEVERE, 41 – 00198 ROMA	Progettazione: Mate System Unipersonale S.r.l. Via Papa Pio XII n.8, Cassano delle Murge (BA)
Cod. elab.: R_2.14	Relazione Descrittiva delle Fondazioni Tracker
Data: 17/12/2021	

REALIZZAZIONE DI IMPIANTO AGRIVOLTAICO CON PRODUZIONE AGRICOLA E PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA DA FONTE RINNOVABILE FOTOVOLTAICA DA UBICARSI IN LOCALITA' POSTA FISSA IN AGRO DI CANDELA (FG) E DELLE RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE ALLA STAZIONE ELETTRICA SE CAMERELLE NEL COMUNE DI ASCOLI SATRIANO (FG)

Potenza nominale cc: 30,39 MWp - Potenza in immissione ca: 30,00 MVA

COMMITTENTE:
LUMINORA CANDELA S.R.L.
Via Tevere, 41
00198 – Roma

PROGETTAZIONE a cura di:
MATE SYSTEM UNIPERSONALE S.r.l.
Via Papa Pio XII, 8
70020 – Cassano delle Murge (BA)

Ing. Francesco Ambron

PIANO TECNICO DELLE OPERE

RELAZIONE DESCRITTIVA DELLE FONDAZIONI DEL TRACKER

Committente: LUMINORA CANDELA S.r.l. Via TEVERE, 41 – 00198 ROMA		Progettazione: Mate System Unipersonale S.r.l. Via Papa Pio XII n.8, Cassano delle Murge (BA)	
Cod. elab.: R_2.14	Relazione Descrittiva delle Fondazioni Tracker		Formato: A4
Data: 17/12/2021			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	13
7.4. Verifica a ribaltamento dei pali.....	13

Committente: LUMINORA CANDELA S.r.l. Via TEVERE, 41 – 00198 ROMA	Progettazione: Mate System Unipersonale S.r.l. Via Papa Pio XII n.8, Cassano delle Murge (BA)
Cod. elab.: R_2.14	Relazione Descrittiva delle Fondazioni Tracker
Data: 17/12/2021	

1. Premessa

La presente relazione è relativa al progetto di realizzazione di un impianto di produzione di energia elettrica da fonte fotovoltaica della potenza di **30,39 MWp**, denominato “**Parco fotovoltaico Luminora Candela**”, in agro dei comuni di Candela (FG), e delle relative opere connesse in agro dei comuni di Candela (FG) e Ascoli Satriano (FG).

Al fine di ottimizzare la produzione di energia, l'impianto agrivoltaico in oggetto sarà composto da **45.360** moduli fotovoltaici di nuova generazione in silicio monocristallino di potenza nominale pari a **670 Wp/cad**.

Di seguito si riportano le caratteristiche principali:

- Produttore: Trina Solar
- Modello: TSM-DE21
- Potenza massima (Pmax): 670 Wp
- Tensione a circuito aperto (Voc a STC): 46.1V
- Corrente di corto circuito (Isc a STC): 18.62A
- Dimensioni: 2384x1303x35mm
- Peso: 33.9kg

Dal punto di vista del collegamento, si prevede di collegare elettricamente n° 30 moduli in serie per formare una stringa; 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 porterà una stringa fotovoltaica per un totale di 1512 stringhe; l'insieme di più stringhe fotovoltaiche, collegate in parallelo tra loro, costituirà un sottocampo. Complessivamente sono previsti n° 7 sottocampi ed ognuno afferirà ad una cabina di trasformazione MT/BT.

Le strutture metalliche di supporto ai pannelli fotovoltaici, denominati “tracker”, avranno le seguenti caratteristiche:

- Produttore: SOLTEC
- Modello: RS-485
- Range di rotazione: $\pm 60^\circ$
- Massima pendenza lungo l'asse di rotazione: Nord-Sud 17%; Est-Ovest illimitata

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.

Committente: LUMINORA CANDELA S.r.l. Via TEVERE, 41 – 00198 ROMA		Progettazione: Mate System Unipersonale S.r.l. Via Papa Pio XII n.8, Cassano delle Murge (BA)	
Cod. elab.: R_2.14	Relazione Descrittiva delle Fondazioni Tracker		Formato: A4
Data: 17/12/2021			Scala: n.a.

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.

2. Normativa di riferimento

Le fasi di analisi e verifica della struttura di fondazione sono state condotte 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.I.L.L.P.P. "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																
Nid	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}	
	[N/mm ²]	[1/°C]	[N/mm ²]	[N/mm ²]		[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]						NCn	Cnt
S275 - (S275)																
001	78.500	0,000012	210.000	80.769	P	275,00 255,00	430 410	261,90 242,86	-	1,05	1,05	1,25	-	-	-	-

LEGENDA:

Nid	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 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 - 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 $t \leq 40$ mm).
$f_{yk,2}$	Resistenza caratteristica allo snervamento (per profili con 40 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 mm < $t \leq 80$ mm).
NOTE	[-] = Parametro non significativo per il materiale.

Committente: LUMINORA CANDELA S.r.l. Via TEVERE, 41 – 00198 ROMA	Progettazione: Mate System Unipersonale S.r.l. Via Papa Pio XII n.8, Cassano delle Murge (BA)
Cod. elab.: R_2.14	Formato: A4
Data: 17/12/2021	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.

La modellazione geotecnica lungo i settori indagati è stata definita dall'elaborazione di tutte le risultanze delle verticali geotecniche e delle prove di laboratorio, implementando quindi diverse sezioni rappresentative (cfr. Relazione geologica), misurate con rilievo topografico.

L'area che verrà interessata dall'opera in progetto è caratterizzata, in affioramento e fino alla profondità investigata, prevalentemente da tre tipologie di depositi, qui di seguito descritti:

- Deposito di copertura vegetale, con prevalente componente sabbiosa, di colore giallastro brunastro, con ciottoli di varia origine e composizione, con uno spessore che va da pochi centimetri fino ad un metro;
- Depositi ciottoloso-sabbiosi, ed a luoghi argillosi, vistosamente terrazzati, sopraelevati tra i 100 ed i 15 metri rispetto agli alvei attuali dei fiumi. Essi poggiano con contatto erosivo sulle formazioni e i depositi sottostanti. Questa formazione corrisponde ai depositi terrazzati dell'Ofanto e del Carapelle (nell'area investigata i depositi sono quelli dell'Ofanto);
- Deposito argilloso e argilloso-marnoso di colore grigio-azzurrognolo, con a luoghi livelli sabbiosi e arenacei di colore giallastro. Le argille si estendono anche al di sotto degli estesi depositi terrazzati del fiume Ofanto, arrivando a profondità molto maggiori rispetto a quelle investigate. Questa formazione corrisponde alle Argille subappennine.

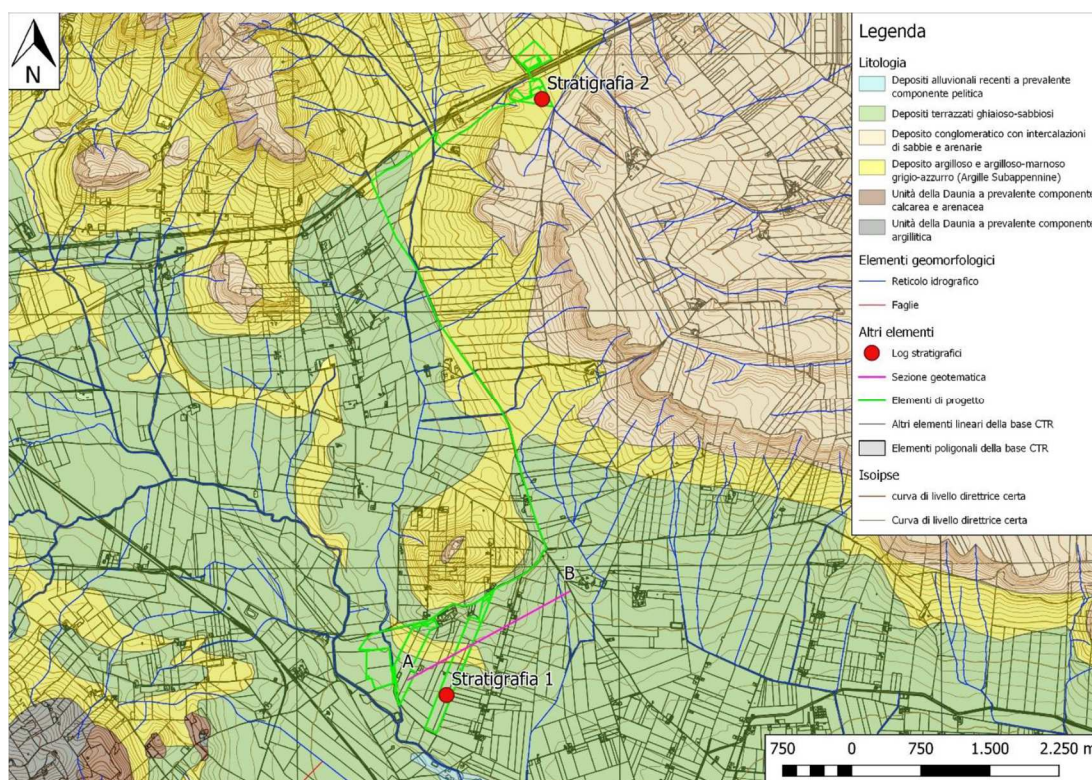
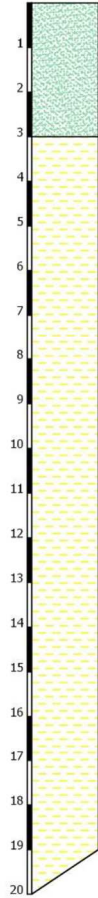


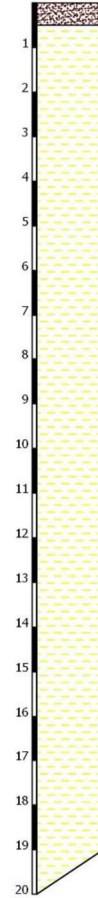
Figura 1 - Ubicazione log stratigrafici e sezioni stratigrafiche (cfr. Relazione geologica)

Committente: LUMINORA CANDELA S.r.l. Via TEVERE, 41 – 00198 ROMA		Progettazione: Mate System Unipersonale S.r.l. Via Papa Pio XII n.8, Cassano delle Murge (BA)	
Cod. elab.: R_2.14	Relazione Descrittiva delle Fondazioni Tracker		Formato: A4
Data: 17/12/2021			Scala: n.a.

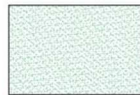
Stratigrafia 1



Stratigrafia 2



Deposito di copertura vegetale, con prevalente componente sabbiosa, di colore giallastro-brunastro, con ciottoli di varia origine e composizione.



Depositi ciottoloso-sabbiosi, ed a luoghi argillosi, vistosamente terrazzati, sopraelevati tra i 100 ed i 15 metri rispetto agli alvei attuali dei fiumi. Essi poggiano con contatto erosivo sulle formazioni e i depositi sottostanti.



Deposito argilloso e argilloso-limoso di colore grigio-azzurro o giallastro in superficie per alterazione. Con a luoghi livelli sabbiosi e arenacei, anch'essi di colore giallastro.

Figura 2 - Stratigrafie interpretative del sottosuolo dell'area di intervento (cfr. Relazione geologica)

Committente: LUMINORA CANDELA S.r.l. Via TEVERE, 41 – 00198 ROMA		Progettazione: Mate System Unipersonale S.r.l. Via Papa Pio XII n.8, Cassano delle Murge (BA)	
Cod. elab.: R_2.14	Relazione Descrittiva delle Fondazioni Tracker		Formato: A4
Data: 17/12/2021			Scala: n.a.

Le principali caratteristiche di ciascuno strato sono riassunte nella seguente tabella:

N	Descrizione strato	Profondità tetto [m da p.c.]	Profondità tetto [m da p.c.]	γ [g/cm ³]	c [kg/cm ²]	Φ [°]
1	Deposito ciottoloso-sabbiosi, ed a luoghi argillosi, vistosamente terrazzati	0	3	1,85	0,46	21,97
2	Deposito argilloso e argilloso-limoso di colore grigio-azzurro o giallastro in superficie per alterazione	3	20	1,96	1,82	27,71

Figura 3 - Caratteristiche meccaniche del terreno

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	0,31	kN
P_{neve}	Neve	1,02	kN/m ²
P_{vento}	Vento	0,62	kN/m ²

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 340 m, il valore di riferimento del carico della neve al suolo, q_{sk} , è pari a 1,275 kN/m².

Committente: LUMINORA CANDELA S.r.l. Via TEVERE, 41 – 00198 ROMA	Progettazione: Mate System Unipersonale S.r.l. Via Papa Pio XII n.8, Cassano delle Murge (BA)
Cod. elab.: R_2.14	Relazione Descrittiva delle Fondazioni Tracker
Data: 17/12/2021	Formato: A4 Scala: n.a.

Zona II

Arezzo, Ascoli Piceno, Avellino, Bari, Barletta-Andria-Trani, Benevento, Campobasso, Chieti, Fermo, Ferrara, Firenze, **Foggia**, Frosinone, Genova, Gorizia, Imperia, Isernia, L'Aquila, La Spezia, Lucca, Macerata, Mantova, Massa Carrara, Padova, Perugia, Pescara, Pistoia, Prato, Rieti, Rovigo, Savona, Teramo, Trieste, Venezia, Verona:

$$q_{sk} = 1,00 \text{ kN/m}^2 \quad a_s \leq 200 \text{ m} \quad [3.4.4]$$

$$q_{sk} = 0,85 [1 + (a_s/481)^2] \text{ kN/m}^2 \quad a_s > 200 \text{ m}$$

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 CE 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:

$$q_s = 1,275 \cdot 0,8 \cdot 1,00 \cdot 1,00 = 1,02 \text{ kN/mq}$$

▪ Vento

In accordo con le NTC 2018, considerando un'altitudine sul livello del mare pari a 340 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 altezze riportate in *Figura 7*:

Committente: LUMINORA CANDELA S.r.l. Via TEVERE, 41 – 00198 ROMA	Progettazione: Mate System Unipersonale S.r.l. Via Papa Pio XII n.8, Cassano delle Murge (BA)
Cod. elab.: R_2.14	Relazione Descrittiva delle Fondazioni Tracker
Data: 17/12/2021	Formato: A4 Scala: n.a.

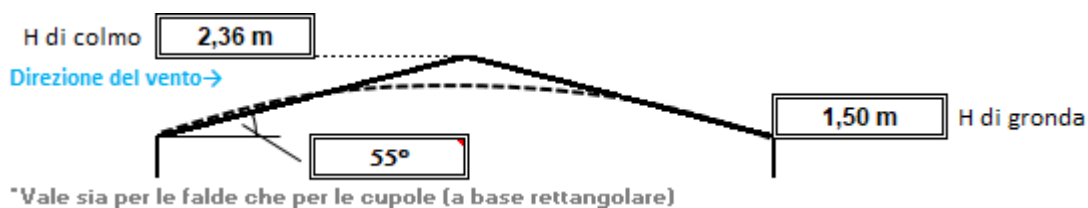


Figura 9 - Schema copertura inclinata per il calcolo dell'azione del vento

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/m^2** .

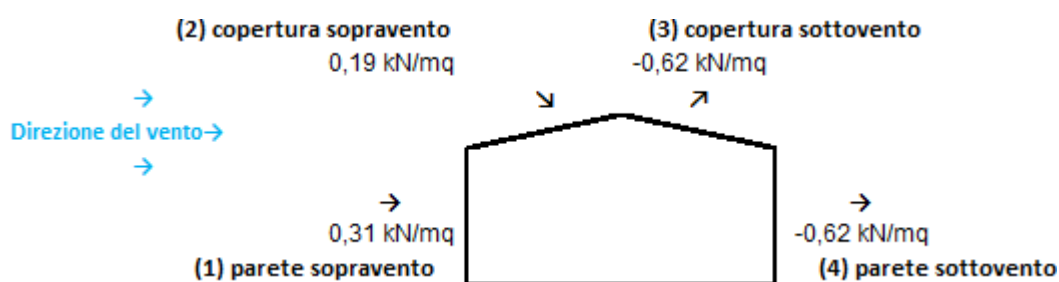


Figura 10 - Azione del vento

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
Carichi permanenti G_2 ⁽¹⁾	Favorevole	γ_{G2}	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevole			1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevole	γ_{Q1}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole			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

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.

Committente: LUMINORA CANDELA S.r.l. Via TEVERE, 41 – 00198 ROMA		Progettazione: Mate System Unipersonale S.r.l. Via Papa Pio XII n.8, Cassano delle Murge (BA)	
Cod. elab.: R_2.14	Relazione Descrittiva delle Fondazioni Tracker		Formato: A4
Data: 17/12/2021			Scala: n.a.

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 (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 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 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} :

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

Committente: LUMINORA CANDELA S.r.l. Via TEVERE, 41 – 00198 ROMA		Progettazione: Mate System Unipersonale S.r.l. Via Papa Pio XII n.8, Cassano delle Murge (BA)	
Cod. elab.: R_2.14	Relazione Descrittiva delle Fondazioni Tracker		Formato: A4
Data: 17/12/2021			Scala: n.a.

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;
- $S_{lim} = s * perimetro * L$
- $s = \mu * k * \sigma'_{v_0}$

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

- $\sigma'_{v_0} = \gamma * z = 18,14 * 2,00 = 36,28 \text{ kN/m}^2$
- $\gamma = 18,14 \text{ kN/m}^3$ (peso di volume)
- $z = 2,00 \text{ m}$ (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 10,61 kN.

$$Q_{lim} = S_{lim} = 10,61 \text{ kN}$$

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	0,31	kN
P_{neve}	Neve	3,16	kN/m ²
P_{vento}	Vento	1,92	kN/m ²

Figura 15 - Carichi concentrati sulla fondazione

Committente: LUMINORA CANDELA S.r.l. Via TEVERE, 41 – 00198 ROMA		Progettazione: Mate System Unipersonale S.r.l. Via Papa Pio XII n.8, Cassano delle Murge (BA)	
Cod. elab.: R_2.14	Relazione Descrittiva delle Fondazioni Tracker		Formato: A4
Data: 17/12/2021			Scala: n.a.

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

Quindi il carico di esercizio è risultato pari a:

$$Q_{es} = (1,3 * 0,28) + (1,5 * 0,31) + (1,5 * 3,16) + (1,5 * 1,92) = 8,449 \text{ kN}$$

$$Q_{lim} = S_{lim} = 5,97 \text{ kN}$$

La verifica risulta soddisfatta essendo il rapporto $\frac{Q_{lim}}{Q_{es}} \geq \gamma_S$ 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;
- $\frac{Q_{lim}}{Q_{es}} = 1.26 \geq 1.15$

Committente: LUMINORA CANDELA S.r.l. Via TEVERE, 41 – 00198 ROMA	Progettazione: Mate System Unipersonale S.r.l. Via Papa Pio XII n.8, Cassano delle Murge (BA)
Cod. elab.: R_2.14	Relazione Descrittiva delle Fondazioni Tracker
Data: 17/12/2021	Formato: A4 Scala: n.a.

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

$$Q_{es} = (0,28 + 0,31) - (1,5 * 1,92) = -2,29 \text{ kN}$$

A vantaggio di sicurezza viene amplificato solo il carico vento.

Essendo $S_{lim} = 5.97 \text{ kN}$ si ha un rapporto pari a:

$$\frac{S_{lim}}{Q_{es}} = |2,61|$$

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):

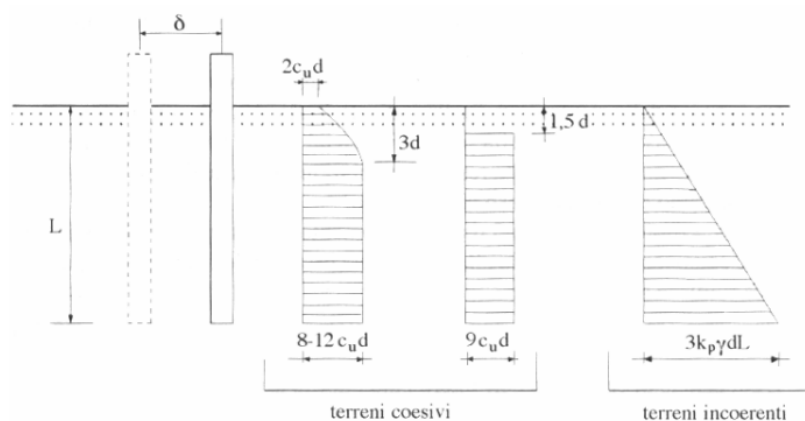


Figura 17 - Resistenza limite del terreno

Committente: LUMINORA CANDELA S.r.l. Via TEVERE, 41 – 00198 ROMA	Progettazione: Mate System Unipersonale S.r.l. Via Papa Pio XII n.8, Cassano delle Murge (BA)
Cod. elab.: R_2.14	Relazione Descrittiva delle Fondazioni Tracker
Data: 17/12/2021	Formato: A4 Scala: n.a.

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:

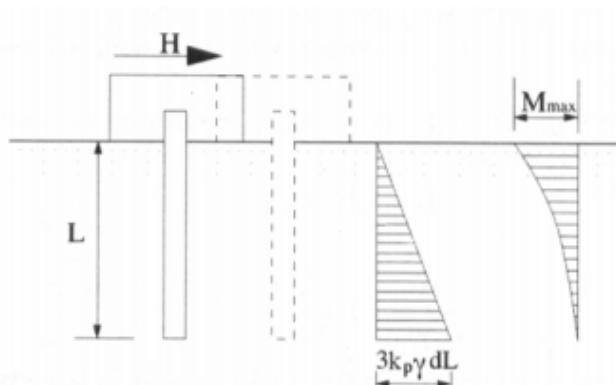


Figura 18 - Resistenza limite del terreno di un palo impedito di ruotare in testa

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

Dove:

- $L = 2,00 \text{ m}$ profondità di infissione del palo;
- $k_p = \frac{1+\text{sen}\varphi}{1-\text{sen}\varphi} = 3$ coefficiente di spinta passiva;
- $\varphi = 30^\circ$ angolo di attrito del terreno
- $\gamma = 17,65 \text{ kN/m}^3$ (peso di volume)
- $d = 0,16 \text{ m}$ lato lungo del profilo UPN160

$$H = 1,5 * 1,5^2 * 3 * 17,65 * 0,16 = 52,2432 \text{ kN}$$

Il momento stabilizzante risulta pari a:

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

$$M_{\text{stabilizzante}} = \frac{2}{3} * 28.593 * 2,00 = 69,66 \text{ kNm}$$

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**:

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

Dove b è il braccio di azione della componente orizzontale, che è pari a 1,95 m, ovvero l'altezza del palo da terra al colmo, mentre $A_{\text{pannello}} = 3,10 \text{ m}^2$.

$$M_{\text{ribaltante}} = 0,62 * 3,10 * 1,95 = 3,75 \text{ kNm}$$

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