



# AGROVOLTAICO CELENTANO

## PROGETTO DEFINITIVO

**Autorizzazione Unica ai sensi del D.Lgs. 29 dicembre 2003, n. 387 per un impianto agrovoltaiico di superficie pari a 126 ha costituito da oliveto superintensivo, piante officinali, asparagiaia e apicoltura integrati ad un impianto fotovoltaico con tracker monoassiali (78,2 MWp) sito in località Celentano nel Comune di San Severo (FG)**

CODICE ELABORATO:

R.3

TITOLO ELABORATO:

Calcoli preliminari dimensionamento  
strutture e fondazioni

SCALA:

-

FORMATO:

A4

PROPONENTE:

**SIRINO SOLAR ITALY S.R.L.**  
Via Guido d'Arezzo 15 - 20145 Milano  
C.F. e P.IVA 10813400966 -  
sirinosolar@legalmail.it

AMMINISTRATORI

Lopez Francesch Jordi  
Lawrence Stephen Scott

PROGETTISTA:

 **Studio Santi**  
Innovation in Energy  
We support the Sustainable Development Goals  
CERTIFIED ISO 9001, ISO 14001, ISO 50001  


Studio Santi srl con socio unico  
Via Enrico Fermi n. 46 - 00058 Santa Marinella (RM)  
www.studiosanti.eu - info@studiosanti.eu  
tel +39 0766 53 68 98

Ing. Federico Santi  
Ordine degli Ingegneri di Roma N. A20930

 **iride**  
Istituto per la Ricerca e l'Ingegneria Dell'Ecosostenibilità

Istituto I.R.I.D.E. Srl  
Via Cristoforo Colombo 163 - 00147 Roma  
www.istituto-iride.com - iride@pec.istituto-iride.com  
Tel +39 06 51606033

Ing. Mauro Di Prete  
Ordine degli Ingegneri di Roma N. A14624



REV.	DATA	STATO	PREPARATO	RIESAMINATO	APPROVATO
00	06-06-2022	PRIMA EMISSIONE	R. SBARRA	F. CASTELLANI	F. SANTI

Questo documento o parte di esso non può essere riprodotto, salvato, trasmesso, riutilizzato in altri progetti in alcuna forma sia essa elettronica, meccanica, fotografica senza la preventiva autorizzazione di Studio Santi srl. Le informazioni contenute nel presente documento sono da intendersi valide limitatamente all'oggetto del documento stesso. Altre informazioni sono da ritenersi non valide ai fini dell'esecuzione. Le informazioni riportate nel presente documento non sono da intendersi "shop drawing" e pertanto l'esecutore delle opere dovrà verificare in campo quanto necessario per l'acquisto dei materiali.

## Sommario

1	PREMESSA.....	2
2	DESCRIZIONE DELL'OPERA.....	3
3	SCELTE PROGETTUALI.....	5
4	NORMATIVE DI RIFERIMENTO.....	6
5	MATERIALI.....	8
6	AZIONI AGENTI SULLE STRUTTURE.....	9
6.1	Peso proprio degli elementi.....	9
6.2	Azione del Vento.....	9
6.3	Carico da neve.....	10
7	Combinazione delle azioni.....	11
8	CALCOLO STRUTTURALE.....	12
9	VERIFICA PRELIMINARE DI PORTANZA DELLA PORTANZA DEL PALO DI FONDAZIONE.....	13
9.1	MODELLO GEOTECNICO DEL TERRENO.....	13
9.2	CAPACITÀ PORTANTE DEL PALO.....	14

## 1 PREMESSA

La presente relazione tecnica descrive le scelte progettuali di predimensionamento delle strutture di un parco fotovoltaico denominato "Agrovoltaiico Celentano" avente potenza di picco nominale pari a 78,2 MWp.

Le opere più significative che saranno realizzate sono le seguenti:

- Tracker per il posizionamento dei pannelli fotovoltaici;
- Cavidotto AT interrato per il collegamento alla stazione Terna- Rignano -S. Severo Sud;
- Strade di circolazione interne;
- Cabine elettriche;
- Recinzioni.

L'impianto sarà realizzato su un terreno agricolo della superficie complessiva di circa 126 ettari, sita nel comune di San Severo (FG). La scelta degli elementi strutturali è stata fatta tenendo in considerazione i seguenti parametri:

- Dimensione ed importanza dell'impianto;
- Azioni agenti sulle strutture;
- Caratteristiche geotecniche del sito;
- Posizionamento ed accessibilità dello stesso;
- Tempistiche di realizzazione dell'impianto;
- Impatto ambientale dell'opera;
- Reversibilità dell'intervento.

## 2 DESCRIZIONE DELL'OPERA

Per la realizzazione del campo fotovoltaico saranno utilizzate due tipologie di Tracker aventi le caratteristiche riportate di seguito:

### Tracker tipo 1:

- Modello: ERCAM Seguidor Solar 1 eje modelo E20.72.VR.1-58.13.02.PL;
- Numero dei moduli (inseguitori) installati sulla struttura: 58;
- Angolo di inseguimento:  $\pm 55^\circ$ ;
- Dimensione dei moduli fotovoltaici: 1303X2384 mm;
- Superficie totale del campo fotovoltaico per ogni tracker: 180.16 mq;
- Elementi strutturali in acciaio S355 JC con trattamento superficiale anticorrosione;
- Tipologia di fondazione: palo in acciaio infisso nel terreno.

### Tracker tipo 2:

- Modello: ERCAM Seguidor Solar 1 eje modelo E20.72.VR.1- 29.07.01.P;
- Numero dei moduli (inseguitori) installati sulla struttura: 29;
- Angolo di inseguimento:  $\pm 55^\circ$ ;
- Dimensione dei moduli fotovoltaici: 1303X2384 mm;
- Superficie totale del campo fotovoltaico per ogni tracker: 90.08 mq;
- Elementi strutturali in acciaio S355 JC con trattamento superficiale anticorrosione;
- Tipologia di fondazione: palo in acciaio infisso nel terreno.

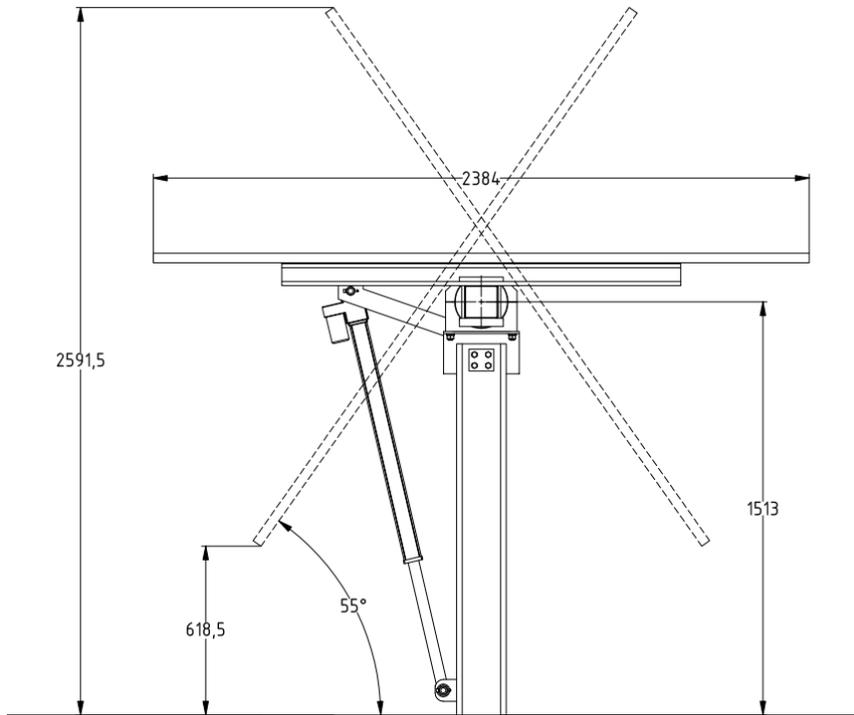
Entrambe le tipologie di tracker sono fissate a terra mediante profili tubolari di due tipologie differenti:

- Palo Attuatore (elemento verticale fuori terra);
- Palo Generico (palo di fondazione).

Sui pali verticali saranno collocate due orditure di travi orizzontali (travi principali e travi secondarie) che andranno a formare l'intelaiatura di supporto dei pannelli fotovoltaici. Tale intelaiatura sarà in grado di ruotare intorno all'asse orizzontale, in modo da ottimizzare l'orientamento dei pannelli solari.

Nell'immagine seguente è riportata una sezione tipologica dei Tracker.

**R.3 - Calcoli preliminari dimensionamento strutture e fondazioni**



*Figura 1 sezione tipologica tracker (dimensioni in centimetri)*

Per la realizzazione degli elementi strutturali saranno utilizzati i seguenti profili metallici:

- Palo generico: profilo scatolare del tipo CF- 160X30. Il palo generico sarà infisso nel terreno e costituisce la struttura di fondazione.
- Palo attuatore: profilo tipo IPE 180 AA. Il palo attuatore costituisce il pilastro verticale di sostegno delle strutture superiori.
- Orditura principale: Profilo scatolare del tipo 120X4.
- Orditura secondaria: Profilo a "C" del tipo OF-80x40x28x1,5. Sui profili dell'orditura secondaria saranno installati i pannelli fotovoltaici.

### 3 SCELTE PROGETTUALI

I tracker descritti in precedenza possono essere considerati come strutture “leggere”, il cui peso proprio è trascurabile rispetto alle azioni variabili agenti sugli stessi. Per la loro forma, l’azione del vento risulta essere dimensionante sia per le strutture in elevazione che per le strutture di fondazione.

L’azione del vento agente sui pannelli solari tende a sollecitare prevalentemente a flessione i pilastri; ne deriva che le strutture di fondazione saranno sollecitate principalmente da azioni orizzontali e flettenti a fronte di forze verticali di entità limitata.

Tutte le strutture (sia in elevazione che di fondazione) saranno realizzate utilizzando profili in acciaio, questo consentirà di avere una notevole flessibilità in fase realizzativa, limitando il peso degli elementi strutturali rispetto ad altre soluzioni costruttive.

Le strutture in acciaio consentono di avere un elevato grado di prefabbricazione, riducendo notevolmente i tempi di realizzazione, inoltre, a fine della vita utile, potranno essere facilmente smontate e rimosse per essere riciclate ovvero riutilizzate. Questo aspetto ha una valenza particolare per le strutture di fondazione in quanto, essendo realizzate con pali in acciaio infissi nel terreno, potranno essere facilmente rimossi estraendoli dal terreno.

## 4 NORMATIVE DI RIFERIMENTO

Si elencano di seguito le principali normative utilizzate per progettazione e la verifica degli elementi strutturali:

- D.M. Infrastrutture 17 gennaio 2018: "Nuove Norme tecniche per le Costruzioni 2018" (NTC);
- CIRCOLARE 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP.
- L. n. 1086 05.11.1971 "Norme per la disciplina delle opere di conglomerato cementizio armato, normale e precompresso ed a struttura metallica";
- Legge 02/02/1974 n. 64, Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche;
- Circolare Min. LL. PP. Del 14/02/1974 n. 11951;
- D.M. LL.PP. 14.02.1992 "Norme tecniche per l'esecuzione delle opere in cemento armato normale e precompresso e per le strutture metalliche" e relativa Circ. Min. LL.PP n° 37406/STC del 24.06.1993;
- D.M. LL.PP. 09.01.1996 "Norme tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato, normale e precompresso e per le strutture metalliche" e relativa Circ. Min. LL.PP n° 252 AA.GG./S.T.C. del 15.10.1996;
- D.M. LL.PP. 16.01.1996 "Norme tecniche relative ai Criteri generali per la verifica di sicurezza delle costruzioni e dei carichi e dei sovraccarichi" e relativa Circ. Min. LL.PP. n° 156AA.GG./STC del 04.07.1996;
- Circolare Min. LL.PP. 04/07/1996, n. 156 AA.GG./STC. "Istruzioni per l'applicazione delle "Norme tecniche relative ai Criteri generali per la verifica di sicurezza delle costruzioni e dei carichi e dei sovraccarichi" di cui al D.M. 16/01/1996;
- Circolare del 10/04/1997 n. 65 del Ministero dei LL.PP., Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le costruzioni in zone sismiche di cui al D.M. 16/01/1996.
- ORDINANZ P.C.M. N: 3274 del 02/05/2003 (G.U. 08/05/2003, n. 105 suppl.) modificata ed integrata ai sensi della ORDINANZA P.C.M. N. 3316 del 02/10/2003 (G.U. 10/10//2003, n. 236) e della ORDINANZA P.C.M. N. 3431del 03/05/2005 (G.U. 10-5-2005, n. 107 -suppl.): Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica;
- D.P.C.M. n° 3685 del 21/10/03, G.U. n° 252, del 29/10/03; Presidenza del Consiglio dei ministri, Dipartimento della Protezione Civile, Ufficio Servizio Sismico Nazionale, 29/03/04: Elementi informativi sull'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei ministri n. 3274 del 20 marzo 2003, recante "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica" (G.U. n. 105 del 8.5.2003);
- D.M. Infrastrutture e Trasporti del 14-09-2005 "Norme tecniche per le costruzioni." (G.U. n.222 del 23/9/2005 - Suppl. Ordinario n.159);
- O.P.C.M. n° 3519 del 28/04/06, G.U. n° 108, del 11/05/06;

Coerentemente con quanto riportato nelle norme attualmente in vigore (NTC del 14/01/2008) e solo se non in contrasto con le stesse, possono essere presi a riferimento i seguenti codici internazionali:

- UNI EN 1991-1-3: 2004 "Eurocodice 1 - Azioni sulle strutture – Parte 1 – 3: Azioni in generale - Carichi da Neve";
- UNI EN 1991-1-4: 2005. Eurocodice 1 – Azioni sulle strutture – parte 1 – 4: Azioni in generale - Azioni del vento;
- UNI EN 1993-1-3:2007 "Eurocodice 3 - Progettazione delle strutture di acciaio – Parte 1-3: Regole generali - Regole supplementari per l'impiego dei profilati e delle lamiere sottili piegati a freddo".

## 5 MATERIALI

Tutti gli elementi strutturali, così come descritti nei paragrafi precedenti, saranno realizzati in acciaio S355 JR e soggetti a trattamento di zincatura anticorrosivo.

Le principali caratteristiche dell'acciaio S355 JR sono riportate di seguito:

Acciai laminati				
Norma e tipo di acciaio	Spessore nominale della membratura			
	$t \leq 40$ mm		$40 \text{ mm} < t \leq 80$ mm	
EN 10025-2	$f_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_u$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_u$ [N/mm <sup>2</sup> ]
S 355	355	510	335	470

## 6 AZIONI AGENTI SULLE STRUTTURE

Sugli elementi strutturali si considerano agenti le seguenti azioni:

- Peso proprio degli elementi strutturali;
- Azione del vento;
- Carico da neve;
- Azioni termiche;
- Azione sismica.

In prima approssimazione è possibile trascurare gli effetti sia dell'azione termica che dell'azione sismica.

Si riportano di seguito i parametri utilizzati per la localizzazione dell'intervento:

- Località: SAN SEVERO
- Provincia: FOGGIA
- Regione: PUGLIA
- Coordinate GPS:
- Latitudine: 41,68500 N
- Longitudine: 15,38100 E
- Altitudine s.l.m.: 86,0 m

Per il calcolo dell'azione del vento e della neve si è fatto riferimento a quanto indicato nel D.M. 17 gennaio 2018 - NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI Cap. 3 - AZIONI SULLE COSTRUZIONI - Par. 3.3 e 3.4

### 6.1 Peso proprio degli elementi

Il peso proprio degli elementi strutturali è definito in automatico dal software di calcolo utilizzato per la progettazione delle strutture.

È stato inoltre considerato agente sull'intelaiatura il peso dei moduli fotovoltaici stimato pari a circa 0,114 kN/m<sup>2</sup>.

### 6.2 Azione del Vento

La forza esercitata dal vento sugli elementi strutturali è stata determinata utilizzando i parametri riportati di seguito:

- Zona vento = 3
- Velocità base della zona,  $V_{b.o} = 27$  m/s (Tab. 3.3.I NTC18)
- Altitudine base della zona,  $A_o = 500$  m (Tab. 3.3.I NTC18)
- Altitudine del sito,  $A_s = 86$  m
- Velocità di riferimento,  $V_b = 27,00$  m/s ( $V_b = V_{b.o}$  per  $A_s \leq A_o$ )
- Periodo di ritorno,  $T_r = 30$  anni
- $C_r = 0,75 (1 - 0,2 \ln(-\ln(1-1/T_r)))^{1/2} = 0.971$
- Velocità riferita al periodo di ritorno di progetto,  $V_r = V_b C_r = 26,22$  m/s

### R.3 - Calcoli preliminari dimensionamento strutture e fondazioni

- Classe di rugosità del terreno: D [Aree prive di ostacoli o con al di più rari ostacoli isolati (aperta campagna, aeroporti, aree agricole, zone paludose o sabbiose, superfici innevate o ghiacciate, mare, laghi...)]
- Esposizione: Cat. II - Zona costiera entro 10 km dal mare (  $K_r = 0,19$ ;  $Z_o = 0,05$  m;  $Z_{min} = 4$  m )
- Pressione cinetica di riferimento,  $q_b = 43$  daN/mq
- Coefficiente dinamico,  $C_d = 1,00$
- Coefficiente di esposizione topografica,  $C_t = 1,00$
- Coefficiente di esposizione,  $C_e = 1,80$
- Altezza dell'edificio,  $h = 2,60$  m

La massima azione del vento si ha quando i moduli fotovoltaici hanno un'inclinazione di  $55^\circ$  sull'orizzontale, in questo caso infatti si ha la massima superficie esposta al vento.

Per la determinazione del coefficiente di forma si è assimilata la struttura in oggetto ad una tettoia isolata priva di ostacoli al di sotto del piano dei moduli e con un'inclinazione pari a  $55^\circ$ .

Sotto queste ipotesi il coefficiente di forma  $C_p$  assume i seguenti valori:

- Coefficiente di forma  $C_p$  su superfici sopravento: +2.03
- Coefficiente di forma per superfici sottovento: -2.88

La pressione esercitata dal vento assume i seguenti valori:

- Pressione sopravento: 157.12 daN/mq
- Pressione sottovento: 222.91 daN/mq

### 6.3 Carico da neve

Il carico da neve risulta essere massimo quando i moduli fotovoltaici sono disposti in posizione orizzontale rispetto al piano campagna.

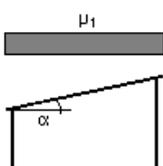
Si riportano di seguito i parametri utilizzati per determinare il carico da neve agenti sulle strutture.

- Zona Neve = II
- Periodo di ritorno,  $T_r = 30$  anni
- $C_{tr} = [(1 - v^{(6^{1/2}/\pi)} \ln[-\ln(1-1/T_r) + 0.57722]) / (1 + 2.5923v)] = 0.91$
- $C_e$  (coeff. di esposizione al vento) = 0,90
- Valore caratteristico del carico al suolo =  $q_{sk} C_e C_{tr} = 81$  daN/mq

#### Copertura ad una falda:

- Angolo di inclinazione della falda  $\alpha = 0,0^\circ$
- Copertura piana  $W = 2.4$  m,  $L = 38.0$  m  $\Rightarrow L_c = 4.6$ ,  $C_{ef} = 1.000$
- $\mu_1 = 0,80 \Rightarrow Q_1 = 65$  daN/mq

Schema di carico:



## 7 Combinazione delle azioni

Per il dimensionamento e la verifica degli elementi strutturali si è fatto riferimento agli Stati Limite che verosimilmente possono verificarsi durante la vita utile della struttura.

Le combinazioni di carico prese in considerazione nei calcoli strutturali sono le seguenti:

Azioni agenti sulla struttura:

- Peso proprio degli elementi strutturali  $W_e$
- Azione del vento positiva  $W_{up}$
- Azione del vento negativa  $W_{dw}$
- Azione della neve  $S$

Combinazioni agli Stati Limite Ultimi

- CSLU1:  $Ed=1,3 \times W_e - 1,5 \times W_{up} + 0,5 \times 1,5 \times S$
- CSLU2:  $Ed=1,0 \times W_e + 1,5 \times W_{dw} + 0,5 \times 1,5 \times S$
- CSLU3:  $Ed=1,3 \times W_e - 0,6 \times 1,5 \times W_{up} + 1,5 \times S$
- CSLU4:  $Ed=1,3 \times W_e + 0,6 \times 1,5 \times W_{dw} + 1,5 \times S$
- CSLU5:  $Ed=1,3 \times W_e - 1,5 \times W_{up}$
- CSLU6:  $Ed=1,3 \times W_e + 1,5 \times S$
- CSLU7:  $Ed=1,0 \times W_e + 1,5 \times W_{dw}$

Combinazioni agli Stati Limite di Esercizio

- CSLS1:  $Ed=1,0 \times W_e - 1,0 \times W_{up} + 0,5 \times S$
- CSLS2:  $Ed=1,0 \times W_e + 1,0 \times W_{dw} + 0,5 \times S$
- CSLS3:  $Ed=1,0 \times W_e - 0,6 \times W_{up} + 1,0 \times S$
- CSLS4:  $Ed=1,0 \times W_e + 0,6 \times W_{dw} + 1,0 \times S$
- CSLS5:  $Ed=1,0 \times W_e - 1,0 \times W_{up}$
- CSLS6:  $Ed=1,0 \times W_e + 1,0 \times S$
- CSLS7:  $Ed=1,0 \times W_e + 1,0 \times W_{dw}$

Come si può osservare, le maggiori sollecitazioni agenti sulla struttura sono dovute all'azione del vento agente sulle superfici sopravento e sottovento.

## 8 CALCOLO STRUTTURALE

La determinazione delle sollecitazioni agenti sui singoli elementi strutturali e le verifiche di resistenza degli stessi, è stata effettuata mediante modellazione agli elementi finiti della struttura.

La modellazione strutturale è stata effettuata utilizzando il software di calcolo CYPE 3D, utilizzando le seguenti ipotesi:

- Le strutture sono state modellate utilizzando elementi agli elementi finiti di tipo "beam" monodimensionale con comportamento elastico lineare;
- Tutti i carichi applicati sono considerati del tipo lineare;
- I moduli fotovoltaici non sono stati considerati come elementi strutturali ma come un carico equivalente applicato alle strutture.

Le verifiche di resistenza sono state condotte controllando che, per ogni combinazione di carico, il rapporto tra la resistenza di progetto e la sollecitazione calcolata sia sempre maggiore di 1.

## 9 VERIFICA PRELIMINARE DI PORTANZA DELLA PORTANZA DEL PALO DI FONDAZIONE

Le fondazioni dei tracker saranno realizzate mediante pali in acciaio infissi nel terreno. I pali saranno sollecitati principalmente ad azione orizzontali e flettenti, derivanti principalmente della forza del vento agente sulle strutture in elevazione.

Una volta messi in opera i pali di fondazione dovranno essere sottoposti alle seguenti prove:

- Prova di estrazione del palo;
- Prova di ribaltamento della fondazione;
- Prova di carico a compressione.

### 9.1 MODELLO GEOTECNICO DEL TERRENO

Per determinare le caratteristiche geotecniche del terreno e realizzare un modello del suolo per la verifica delle fondazioni, è stato condotto uno studio geologico dell'area, che ha compreso anche l'esecuzione di prove sia in sito che in laboratorio.

Si riportano di seguito le caratteristiche geotecniche del modello di terreno che è stato utilizzato per la verifica delle fondazioni.

Quota piezometrica della falda: 11,50 metri dal piano campagna

Profondità da 0,0 a 1,0 metri – Terreno vegetale rimaneggiato (escluso dal calcolo della portanza delle fondazioni)

#### **Profondità da 1,0 a 2,0 metri – Strato SU**

- Contenuto d'acqua naturale:  $W = 21\%$
- Peso di volume:  $\gamma_v = 17,00 \text{ kN/m}^3$
- Peso di volume saturo:  $\gamma_s = 18,00 \text{ kN/m}^3$
- Grado di saturazione  $S_r = 82.5\%$
- Indice di plasticità:  $I_p = -- \%$
- Coesione:  $C = 0,0 \text{ kN/m}^2$
- Angolo di attrito:  $\phi = 21^\circ$

#### **Profondità da 2,0 a 7,0 metri – Strato LS: Limo con sabbia argilloso**

- Contenuto d'acqua naturale:  $W = 21\%$
- Peso di volume:  $\gamma_v = 18.90 \text{ kN/m}^3$
- Peso di volume saturo:  $\gamma_s = 19.65 \text{ kN/m}^3$
- Grado di saturazione  $S_r = 82.5\%$
- Indice di plasticità:  $I_p = 10.3 \%$
- Coesione:  $C = 12.75 \text{ kN/m}^2$
- Angolo di attrito:  $\phi = 22^\circ$

**Profondità da 7,0 a 15,0 metri – LG: limo argilloso sabbioso**

- Contenuto d'acqua naturale:  $W = 26.35\%$
- Peso di volume:  $\gamma_v = 18.70 \text{ kN/m}^3$
- Peso di volume saturo:  $\gamma_s = 19.15 \text{ kN/m}^3$
- Grado di saturazione  $S_r = 89.7\%$
- Indice di plasticità:  $I_p = 15.5 \%$
- Coesione:  $C = 10.85 \text{ kN/m}^2$
- Angolo di attrito:  $\phi = 21.8^\circ$

**Profondità da 15,0 a 25,0 metri - GH: ghiaie in matrice sabbiosa**

- Peso di volume:  $\gamma_v = 18.00 \text{ kN/m}^3$
- Coesione:  $C = 0.00 \text{ kN/m}^2$
- Angolo di attrito:  $\phi = 33^\circ$

**9.2 CAPACITÀ PORTANTE DEL PALO**

La capacità portante del palo è somma del contributo offerto dalla portanza alla punta e dalla resistenza laterale.

La capacità portante alla punta è stata determinata utilizzando la seguente espressione:

$$q_p = \alpha \overline{N_{60}} f_d$$

Dove si è indicato con:

- $q_p$ : resistenza unitaria alla punta alla punta del palo;
- $\alpha$ : è parametro che dipende dalla granulometria media del terreno e vale 0.1 MPa per terreni a grana fina ( $D_{50} < 0.2 \text{ mm}$ ) e 0,2 MPa per terreni a grana grossa ( $D_{50} > 0,6 \text{ mm}$ );
- $N_{60}$ : è il valore medio dell'indice NSPT determinato per l'area di interesse;
- $f_d$ : è un fattore adimensionale che dipende dal diametro  $D$  del palo ed è determinato con la formula seguente.

$$f_d = 1 - \frac{1}{3} D$$

La resistenza totale alla punta è determinata con la formula seguente:

$$Q_p = A_p q_p$$

Dove:

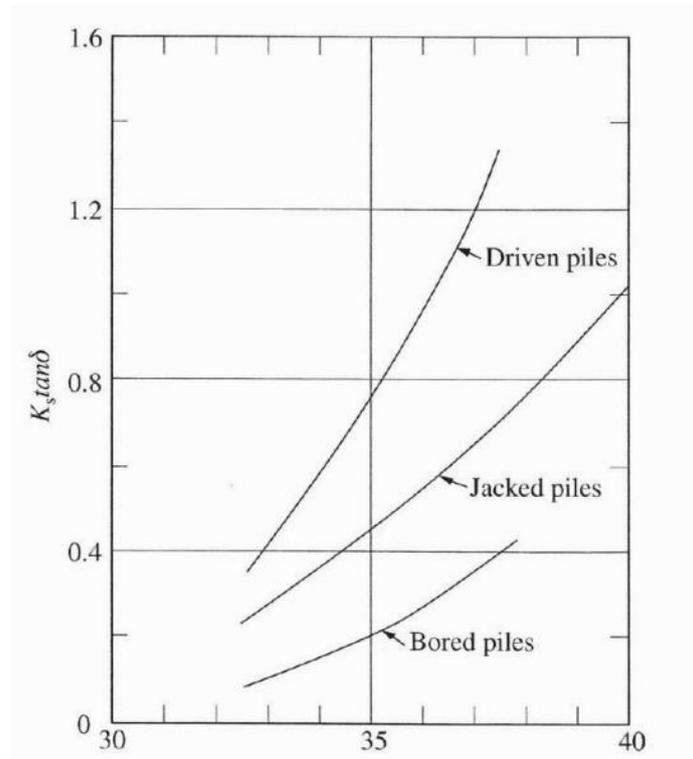
- $Q_p$  è la resistenza totale alla punta
- $A_p$  è l'area trasversale della punta del palo;
- $q_p$ : è la resistenza unitaria alla punta.

La resistenza laterale del palo è stata determinata utilizzando la formula seguente:

$$Q_f = K_s \tan \delta \overline{\sigma'_v} \pi d L$$

Dove si è indicato con:

- $Q_f$ : resistenza laterale del palo;
- $\delta$ : angolo di attrito tra palo e terreno;
- $\overline{\sigma'_v}$ : tensione efficace verticale media;
- $L$ : lunghezza del palo.



Fissato il diametro  $D$  del palo, la lunghezza di infissione è stata determinata in modo iterativo imponendo l'equilibrio tra l'azione verticale di progetto e la somma della resistenza laterale ed alla punta del palo.

L'azione flettente agente sulla testa del palo è equivalente ad una forza orizzontale eccentrica, che determina la formazione di spinte attive e passive nel terreno secondo lo schema riportato nella figura sottostante.

