

PARCO EOLICO

COMUNE DI ISILI

PROVINCIA DEL SUD SARDEGNA (SU)



STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE

Elaborato:

PROGETTO DEFINITIVO OPERE CIVILI

Calcoli preliminari dimensionamento fondazioni aerogeneratori

Identificativo file:

IS_PC_A009

Data: Ottobre 2023

Il committente: Sardeolica s.r.l.

Coordinamento: FAD SYSTEM SRL - Società di ingegneria

Dott. Ing. Ivano Distinto

Dott. Ing. Carlo Foddis

Elaborato a cura di:

Ing. Luca Bissoli

| rev. | data | descrizione revisione | rev. | data | descrizione revisione |
|------|---------------|-----------------------------|------|------|-----------------------|
| 00 | Novembre 2023 | Emissione per procedura VIA | | | |
| | | | | | |

PARCO EOLICO COMUNE DI ISILI

Realizzazione del Parco Eolico nel Comune di Isili (SU)
N° 7 WTG da 7,20 MW

CALCOLI PRELIMINARI
DIMENSIONAMENTO FONDAZIONI AEROGENERATORI

COLLABORAZIONI SPECIALISTICHE:

Verifiche strutturali Ing. Luca Bissoli

Aspetti geologici geotecnici Dott.ssa Geol. Cosima Atzori

**PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DEL PARCO EOLICO
COMUNE DI ISILI
OPERE CIVILI: CALCOLI PRELIMINARI DIMENSIONAMENTO FONDAZIONI AEROGENERATORE**

INDICE

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | INTRODUZIONE..... | 3 |
| 2 | PREMESSA..... | 4 |
| 3 | MATERIALI UTILIZZATI | 7 |
| 4 | NORMATIVA | 7 |
| 5 | VITA NOMINALE E CLASSE D'USO | 7 |
| 6 | INQUADRAMENTO GEOLOGICO | 8 |
| 7 | ANALISI DEI CARICHI | 12 |
| 7.1 | CARICHI PERMANENTI | 13 |
| 8 | VERIFICHE GEOTECNICHE | 14 |
| 8.1 | VERIFICA A RIBALTAMENTO..... | 14 |
| 8.2 | VERIFICA A SCORRIMENTO | 15 |
| 8.3 | VERIFICA DELLA CAPACITA' PORTANTE E DELLE PRESSIONI IN ESERCIZIO SUL TERRENO | 15 |

1 INTRODUZIONE

La presente Relazione Tecnica costituisce, insieme alle tavole grafiche e ai documenti in allegato, il Progetto Definitivo delle opere civili per la realizzazione del Parco Eolico nel comune di Isili (SU), nella parte meridionale della regione Sardegna.

Il progetto si inquadra nell'ambito della ricerca di fonti energetiche alternative da utilizzare per la produzione di energia elettrica.

L'intervento proposto prevede l'installazione di 7 aerogeneratori per la produzione di energia elettrica da fonte eolica, del tipo tripala ad asse orizzontale, della potenza nominale di 7.200 kW ciascuna, per una potenza complessiva del parco di 50.400 kW (50,4 MW).

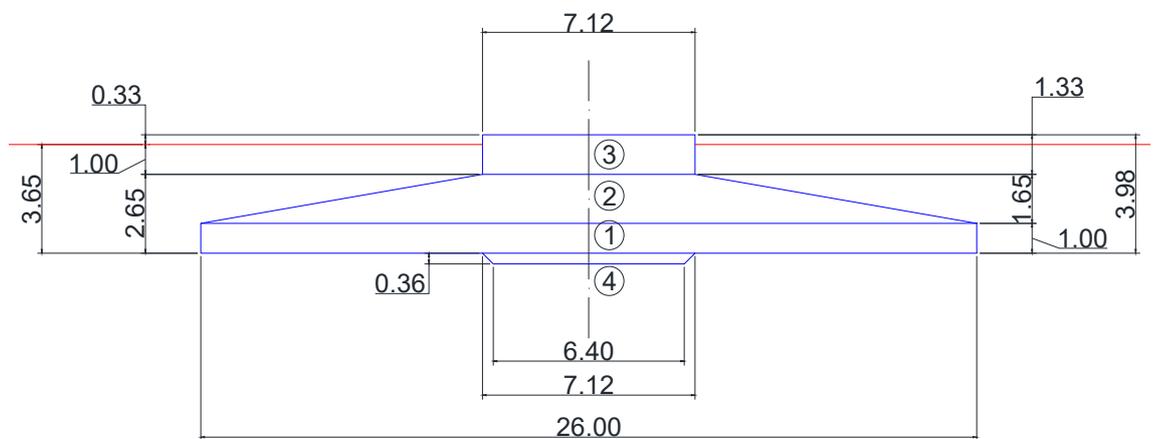
2 PREMESSA

Il progetto del Parco Eolico si inquadra nell'ambito della ricerca di fonti energetiche alternative da utilizzare per la produzione d'energia elettrica.

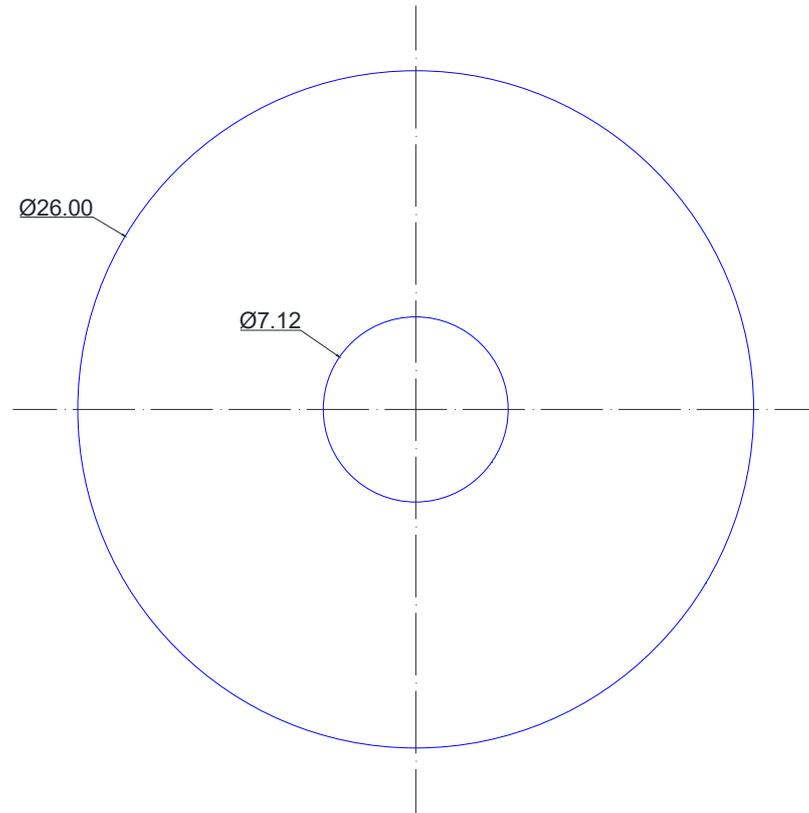
L'intervento proposto dalla società Sardeolica srl prevede l'installazione di 7 aerogeneratori per la produzione di energia elettrica da fonte eolica, del tipo tripala ad asse orizzontale con altezza al mozzo 119 m, diametro rotore 162 m, della potenza nominale di 7.200 kW ciascuna, per una potenza nominale complessiva del parco di 50.400 kW.

La seguente relazione riguarda il predimensionamento e la verifica geotecnica preliminare del plinto di fondazione.

Il plinto di fondazione ha pianta circolare con raggio di 13,00 m; è composto da una parte inferiore cilindrica ($h = 1,00$ m), una intermedia troncoconica ($h = 1,65$ m), ed una superiore cilindrica di altezza 1,33 m che sporge dal piano campagna di circa 30 cm. La fondazione ha un'altezza complessiva di 3,98 m.

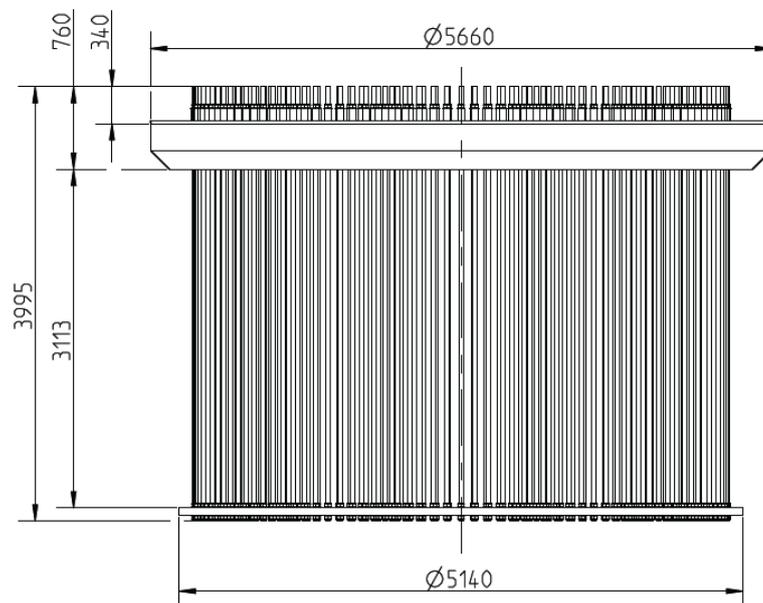
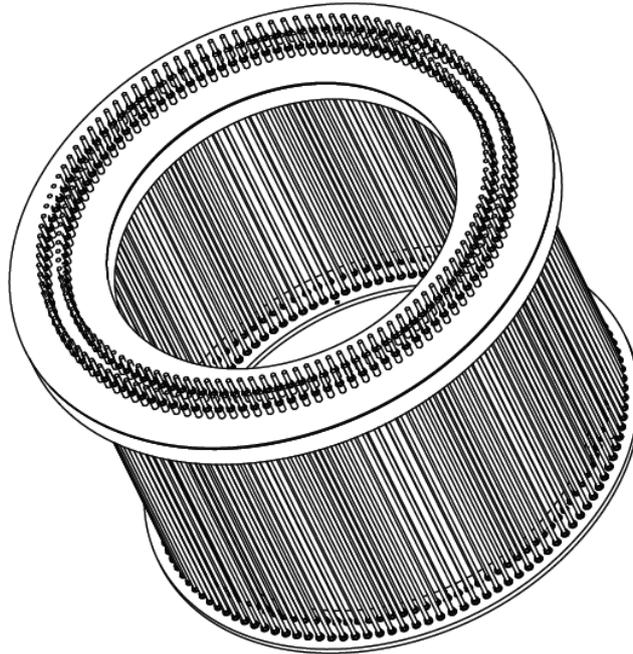


PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DEL PARCO EOLICO
COMUNE DI ISILI
OPERE CIVILI: CALCOLI PRELIMINARI DIMENSIONAMENTO FONDAZIONI AEROGENERATORE



Il collegamento della torre alla fondazione è ottenuto attraverso un doppio anello di tirafondi (120+120) tipo M42 CL 10.9 ad alta resistenza collegati inferiormente con una flangia circolare in acciaio S355J2 annegata nel calcestruzzo della fondazione. I tirafondi nella parte superiore del plinto sono collegati alla flangia del primo concio della torre.

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DEL PARCO EOLICO
COMUNE DI ISILI
OPERE CIVILI: CALCOLI PRELIMINARI DIMENSIONAMENTO FONDAZIONI AEROGENERATORE



3 MATERIALI UTILIZZATI

Calcestruzzo:

| | |
|-----------------------|---------------------------|
| magrone | C 16/20 N/mm ² |
| getto di prima fase | C 50/60 N/mm ² |
| getto di seconda fase | C 50/60 N/mm ² |

salvo differenze in fase di progettazione esecutiva.

Acciaio:

| | |
|---|--------|
| acciaio in barre ad aderenza migliorata | B 450C |
|---|--------|

4 NORMATIVA

- Norme tecniche per le costruzioni (NTC 2018) D. Min. Infrastrutture e Trasporti del 17.01.2018;
- Circ. Ministero Infrastrutture e Trasporti 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP. Istruzioni per l'applicazione dell' "Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 17 gennaio 2018.

La relazione è stata inoltre redatta secondo le specifiche fornite dalla soc. VESTAS, in particolare:

- Doc. Num. 0121-6940 VER01 "Combine Foundation loads–EV162-6.5/6.8/7.2 MW, Mk1B, IECS, 119 m – 50/60 Hz, GS".

5 VITA NOMINALE E CLASSE D'USO

Tipo di costruzione: 2 (Opere ordinarie)

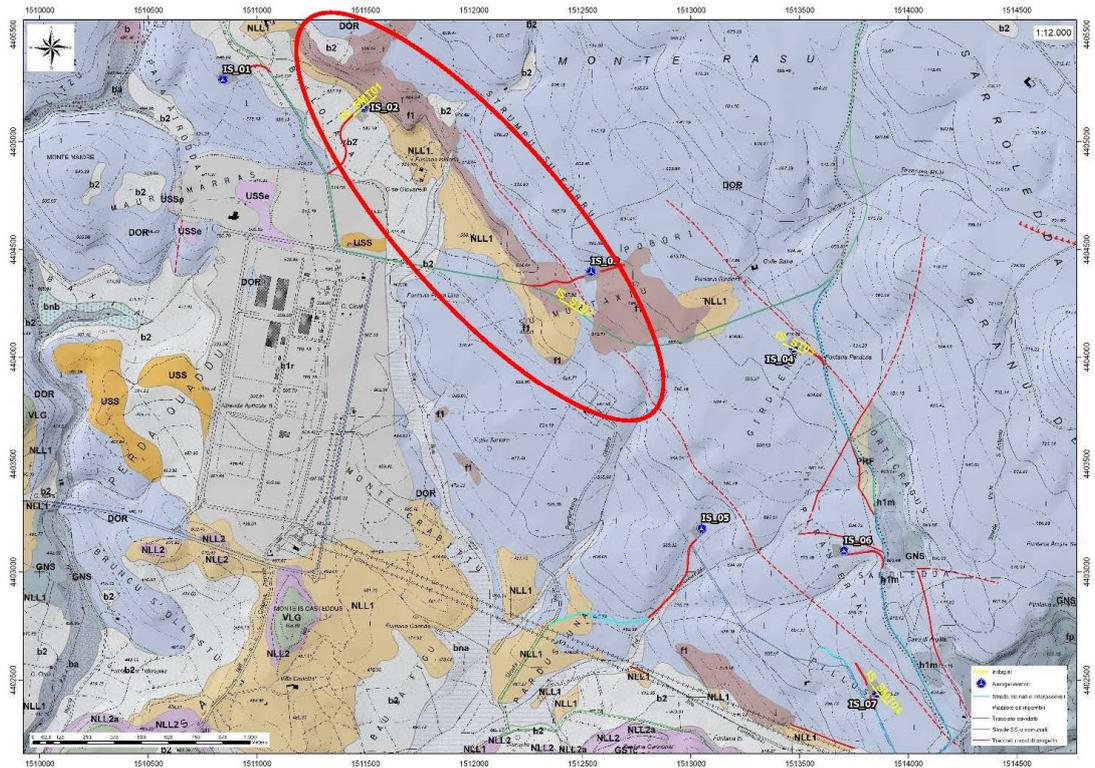
Vita nominale: $V_N \geq 50$ anni

Classe d'uso: III

Periodo di riferimento: $V_R = 75$ anni

6 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Dalle indagini geofisiche si identificano due condizioni geologiche rappresentative di gruppi di turbine.



MODELLO 01

Turbine IS_01 – IS_02 – IS_03:

da 0,00 a 2,5m – depositi colluviali/eluviali/suoli

da 2,5m a 6m – conglomerati poligenici e sabbie alterate, debolmente consolidate

da 6,00m a 20,00m – dolomie e calcari dolomitici da intensamente fratturati a fratturati

da 20,00m a 32m – dolomie e calcari dolomitici da fratturati a sani

FALDA: a partire dalla quota di 6m da p.c. (su IS_02) e 4,00m da p.c. (su IS_03 si riscontra presenza di falda. Nell'area è presente una risorgenza denominata Funtana Isidoriu nei pressi della IS_01.

MODELLO 02

Turbine IS_04 – IS_05 – IS_06 – IS_07:

da 0,00 a 1,00m – depositi colluviali/eluviali/suoli

da 1,00m a 11mm – dolomie e calcari dolomitici da intensamente fratturati a dfratturati

da 11,00m a 50m – dolomie e calcari dolomitici da fratturati a sani

FALDA: non riscontrata

Per quanto concerne la parametrizzazione stante le risultanze si ritiene di adottare come modello geologico del sito quello maggiormente cautelativo e perciò a caratteristiche geotecniche peggiori e condizioni di falda presente.

Pertanto, la stratigrafia di riferimento è la seguente:

MODELLO GEOLOGICO UNICO PER TUTTE LE TURBINE

da 0,00 a 2,5m – depositi colluviali/eluviali/suoli (S1)

da 2,5m a 6m – conglomerati poligenici e sabbie alterate, debolmente consolidate (S2)

da 6,00m a 10,00m – dolomie e calcari dolomitici da intensamente fratturati a molto fratturati
(S3)

da 10,00m a 20m - dolomie e calcari dolomitici da molto fratturati a fratturati (S4)

da 20,00m a 32m - dolomie e calcari dolomitici da fratturati a sani (S5)

FALDA: a partire dalla quota di 4m da p.c.

Di seguito i parametri geotecnici.

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DEL PARCO EOLICO
COMUNE DI ISILI
OPERE CIVILI: CALCOLI PRELIMINARI DIMENSIONAMENTO FONDAZIONI AEROGENERATORE

| MODELLO GEOLOGICO 01 | | | | | | |
|------------------------------|---------|-----------------------------|---|--|---|-------------------------|
| Dati Parametri Resistenza | | | | | | |
| Tipo di Terreno | | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 |
| Descrizione | | Depositi eluvio-colluviali/ | conglomerati poligenici e sabbie alterate, debolmente consolidate | Substrato roccioso da fratturato a poco fratturato | Substrato roccioso da fratturato a sano | Substrato roccioso sano |
| Peso di volume** | [kg/mc] | 1.800 | 2.000 | 2.100 | 2.350 | 2.400 |
| Peso di volume saturo** | [kg/mc] | 1.900 | 2.100 | 2.100 | 2.350 | 2.400 |
| Angolo di attrito* | [°] | 26,12 | 32,50 | 35,15 | 38,25 | 45 |
| Coesione* | [Mpa] | 0.5 | 0,00 | 0,288 | 3,54 | 14 |
| Dati Parametri Deformabilità | | | | | | |
| Modulo elastico ** | [Mpa] | 28 | 92 | 365 | 1037 | 2960 |
| Coefficiente di Poisson** | □ | 0,33 | 0,33 | 0,33 | 0,33 | 0,33 |
| Modulo di taglio (G)** | [Mpa] | 88 | 284 | 1138 | 2589 | 5051 |
| Velocità onde di taglio Vs** | [m/sec] | 210 | 370 | 720 | 1050 | 1450 |

*Valori ricavati da interpolazioni su ROCDATA da confermare con indagini dirette e puntuali

** Valori ricavati da dati derivati dalle indagini geofisiche da confermare con indagini dirette e puntuali

Per quanto concerne l'installazione degli aerogeneratori, gli stessi prevedono opere fondanti costituite da plinti circolari a sezione troncoconica il cui piano di posa è previsto ad una profondità di riferimento di 3.65 m da piano campagna.

Per le verifiche delle fondazioni riportate successivamente, in via cautelativa, si farà riferimento ai seguenti parametri geotecnici più sfavorevoli:

| | |
|-----------------------------------|--|
| $c' = 0$ KPa | (Coesione) |
| $\phi' = 32.5^\circ$ | (Angolo di attrito interno) |
| $\gamma = 18.0$ kN/m ³ | (Peso di volume del terreno a lato della fondazione) |
| $\gamma = 20.0$ kN/m ³ | (Peso di volume del terreno sotto la fondazione) |
| $\omega = 15^\circ$ | (Inclinazione dei pendii) |

Si considera inoltre la presenza di acqua alla quota di imposta della fondazione.

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DEL PARCO EOLICO
COMUNE DI ISILI
OPERE CIVILI: CALCOLI PRELIMINARI DIMENSIONAMENTO FONDAZIONI AEROGENERATORE

Questa ipotesi non modifica il carico applicato, la pressione sotto la fondazione è nulla, tuttavia la verifica va svolta in termini di sforzi efficaci pertanto il peso di volume del terreno sotto la fondazione si modifica come segue:

$$\gamma' = \gamma - \gamma_w = 20.0 - 10.0 = 10.0 \text{ kN/m}^3 \quad (\text{Peso di volume del terreno sotto la fondazione})$$

I parametri utilizzati sono da considerarsi compatibili con le caratteristiche riscontrate in fase preliminare ma richiederanno i dovuti approfondimenti nelle successive fasi di progettazione. Tuttavia, i risultati successivi, mostreranno come la verifica della capacità portante sia ampiamente soddisfatta.

7 ANALISI DEI CARICHI

I carichi agenti sulla sommità della fondazione sono stati ricavati dal documento "0121-6940 VER01" della Società Vestas Wind allegato in appendice. I carichi riportati nel documento sono considerati agenti 20 cm sopra al livello del terreno.

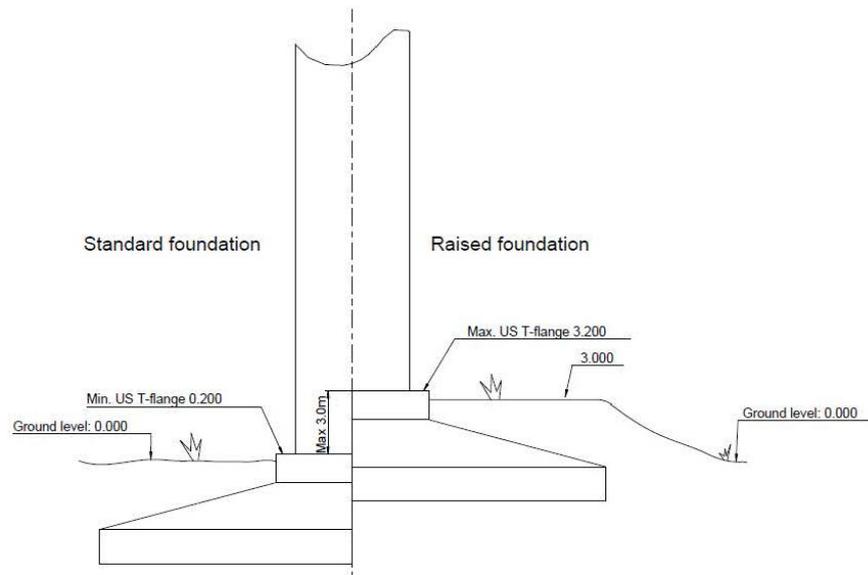


Figure 1-1 Tower and Foundation interface

| Characteristic Extreme | | | | | | | | |
|------------------------|---------------------|------|------|---------------|---------------|-------------|--------------|-----|
| Lead | LC/Family | PLF | Type | Mbt | Mzt | FndFr | Fzt | Ref |
| Sensor | [-] | [-] | [-] | [kNm] | [kNm] | [kN] | [kN] | [-] |
| Mbt | 14Ecdvraa00(fam97) | 1.35 | Abs | 138700 | -1670 | 1148 | -6852 | [2] |
| Mzt | 23NTMHWO100(fam224) | 1.35 | Abs | 39600 | -15950 | 311.0 | -6656 | [3] |
| FndFr | 23NTMvra00(fam221) | 1.35 | Abs | 123100 | -852.4 | 1322 | -6878 | [3] |
| Fzt | 12IceUHWO100(fam76) | 1.35 | Abs | 74190 | 1811 | 654.5 | -7044 | [3] |

Table 2-1 Characteristic Extreme (excl. PLF). Load cases sorted with PLF.

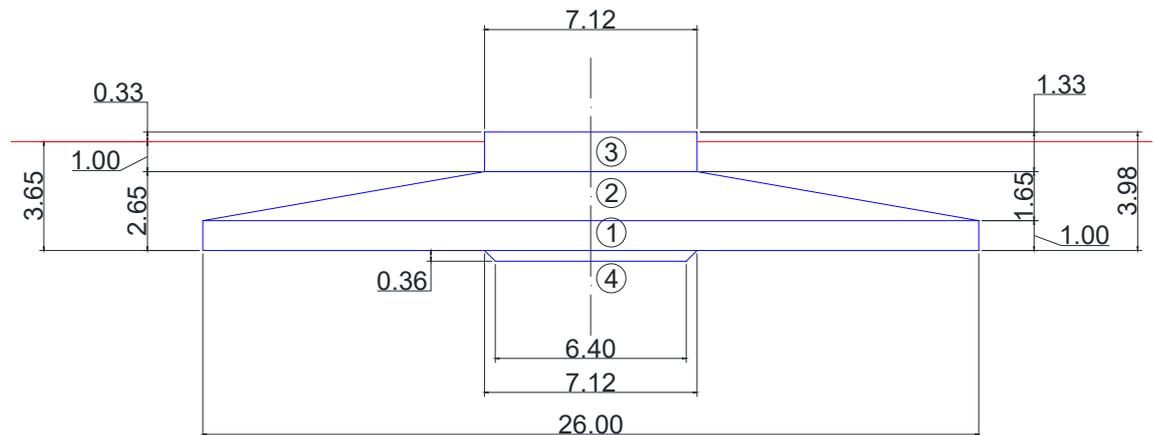
7.1 CARICHI PERMANENTI

I carichi permanenti sono dati dal peso della fondazione e dal peso proprio del terreno di ricoprimento.

Calcolo del peso della fondazione

- 1) Volume cilindro $= 26^2 \pi 1.0 / 4 = 530.93 \text{ m}^3$
- 2) Volume cono superiore $= (\pi/3) 1.65 (13^2 + 3.56^2 + 13 \cdot 3.56) = 393.88 \text{ m}^3$
- 3) Volume cilindro superiore $= 7.12^2 \pi 1.33 / 4 = 52.95 \text{ m}^3$
- 4) Volume cono inferiore $= (\pi/3) 0.36 (3.2^2 + 3.56^2 + 3.2 \cdot 3.56) = 12.93 \text{ m}^3$

Volume totale fondazione = 990.69 m³



Considerando un peso specifico del calcestruzzo armato di 25.00 kN/m³ il peso della fondazione risulta:

$$\text{P.P. fondazione} = 990.69 \cdot 25 = 24767.30 \text{ kN}$$

Calcolo del peso del terreno di rinterro

$$\text{Volume fondazione interrata} = 990.69 - 7.12^2 \pi 0.33 / 4 - 12.93 = 964.62 \text{ m}^3$$

$$\text{Volume terreno di rinterro} = 26^2 \pi 3.65 / 4 - 964.62 = 973.27 \text{ m}^3$$

Considerando un peso di volume del terreno di ricoprimento di 18.00 kN/m³ il peso del rinterro risulta:

$$\text{P.P. rinterro} = 973.27 \cdot 18 = 17518.89 \text{ kN}$$

8 VERIFICHE GEOTECNICHE

8.1 VERIFICA A RIBALTAMENTO

La stabilità viene verificata controllando che la struttura sia in grado di garantire l'equilibrio sotto le azioni di carico previste, la verifica si effettua allo stato limite di equilibrio come corpo rigido (EQU).

I carichi alla sommità della fondazione sono i seguenti (dal doc vestas "0121-6940 VER01):

$$M \text{ torre} = 138700 \text{ kN m}$$

$$V \text{ torre} = 1322 \text{ kN}$$

$$N \text{ torre} = 7044 \text{ kN}$$

I carichi alla base della fondazione con cui svolgere la verifica al ribaltamento sono i seguenti:

$$M \text{ base} = M \text{ torre} + V \text{ torre} \cdot H \text{ fondazione} = 138700 + 1322 \cdot 3.98 = 143961.56 \text{ kN m}$$

$$N \text{ base} = N \text{ torre} + N \text{ fondazione} = 7044 + 24767.3 + 17518.89 = 49330.19 \text{ kN}$$

I coefficienti parziali per le azioni da utilizzare sono i seguenti:

$$\gamma_{G1} = 0.9$$

$$\gamma_{G2} = 0$$

$$\gamma_Q = 1.5$$

Il carico verticale e il relativo momento stabilizzante alla base della fondazione risultano:

$$N_d = \gamma_{G1} N \text{ base} = 0.9 \cdot 49330.19 = 44397.17 \text{ kN}$$

$$M_s = N_d \cdot D/2 = 44397.17 \cdot 26/2 = 577163.22 \text{ kN m}$$

Momento ribaltante alla base della fondazione risulta:

$$M_r = \gamma_Q M \text{ base} = 1.5 \cdot 143961.56 = 215942.34 \text{ kN m}$$

Il coefficiente di sicurezza al ribaltamento risulta:

$$SF = M_s / M_r = 577163.22 / 215942.34 = 2.673 > 1.0 \quad \text{verifica positiva}$$

8.2 VERIFICA A SCORRIMENTO

La verifica di scorrimento viene eseguita controllando che non si verifichi lo scivolamento della fondazione sul piano di posa e quindi che la forza d'attrito fra terreno e fondazione sia maggiore del taglio sollecitante. Nel calcolo non è stato necessario considerare che la base della fondazione sia incassata di circa 3,65 m rispetto al piano di campagna.

L'azione che attiva lo scorrimento è il taglio alla base della torre:

$$V_d = \gamma Q \quad V_{\text{torre}} = 1.5 \cdot 1322 = 1983 \text{ kN}$$

L'azione che si oppone allo scorrimento è la forza d'attrito che si sviluppa fra il terreno e la fondazione. L'angolo d'attrito minimo del terreno riscontrato è 32.5°

$$V_{\text{attrito}} = N_{\text{base}} \cdot \tan(2/3 \cdot \phi') = 49330.19 \cdot \tan(2/3 \cdot 32.5^\circ) = 19597.63 \text{ kN}$$

Il coefficiente di sicurezza allo scorrimento risulta:

$$SF = V_{\text{attrito}} / V_d = 19597.63 / 1983 = 9.88 > \gamma_R = 1.1 \quad \text{verifica positiva}$$

8.3 VERIFICA DELLA CAPACITA' PORTANTE E DELLE PRESSIONI IN ESERCIZIO SUL TERRENO

Il calcolo della capacità portante della fondazione viene eseguito considerando la seguente espressione:

$$q_u = c' \cdot N_c \cdot s_c \cdot d_c \cdot i_c \cdot b_c \cdot g_c + q' \cdot N_q \cdot s_q \cdot d_q \cdot i_q \cdot b_q \cdot g_q + 0.5 \cdot B \cdot \gamma' \cdot N_\gamma \cdot s_\gamma \cdot d_\gamma \cdot i_\gamma \cdot b_\gamma \cdot g_\gamma$$

in cui: N_c, N_q, N_γ , sono i fattori di carico limite;

s_c, s_q, s_γ , sono i fattori di forma;

d_c, d_q, d_γ , sono i fattori di profondità;

i_c, i_q, i_γ , sono i fattori di inclinazione del carico;

b_c, b_q, b_γ , sono i fattori di inclinazione del piano di posa;

g_c, g_q, g_γ , sono i fattori d'inclinazione del pendio.

Il calcolo è stato eseguito tenendo conto dei seguenti parametri:

| | |
|---|---------------------------------|
| Fondazione circolare: | $\varnothing = 26 \text{ m}$ |
| Profondità piano di posa: | $D = 3.65 \text{ m}$ |
| Peso di volume (sotto la fondazione): | $\gamma' = 10.0 \text{ kN/m}^3$ |
| Peso di volume (laterale): | $\gamma' = 18.0 \text{ kN/m}^3$ |
| Angolo d'attrito: | $\varnothing' = 32.5^\circ$ |
| Coesione: | $c' = 0 \text{ kN/m}^2$ |
| Pressione geostatica sul piano di posa: | $q = 65.7 \text{ kN/m}^2$ |
| Inclinazione del piano di posa: | $\alpha = 0^\circ$ |
| Inclinazione del pendio: | $\omega = 15^\circ$ |

Per quanto riguarda i parametri geotecnici sono stati utilizzati i valori minimi ottenuti dalle indagini, si considera la presenza di acqua fino al piano d'imposta della fondazione.

Avendo il piano di posa orizzontale e la coesione nulla la formula della capacità portante si semplifica come segue:

$$q_u = q' \cdot N_q \cdot s_q \cdot d_q \cdot i_q \cdot g_q + 0.5 \cdot B' \cdot \gamma' \cdot N_\gamma \cdot s_\gamma \cdot d_\gamma \cdot i_\gamma \cdot g_\gamma$$

L'area efficace della fondazione (vedi figura successiva) viene calcolata in base all'eccentricità delle azioni applicate:

$$e = M/N = 215942.34 / 49330.19 = 4.377 \text{ m}$$

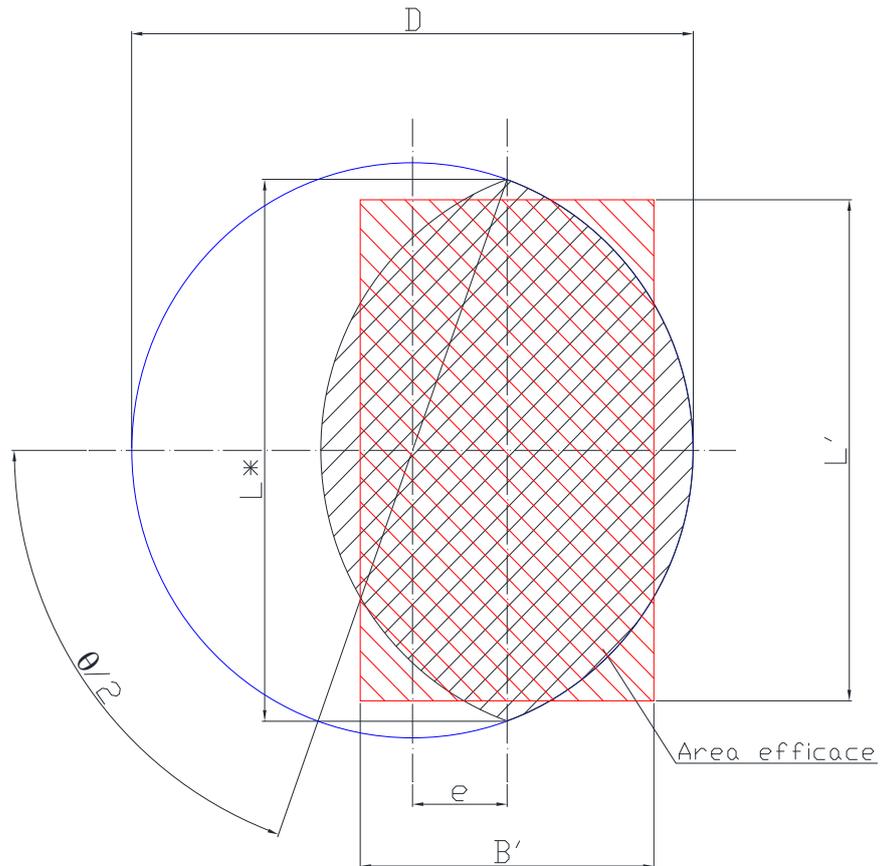
$$A = (26/2)^2 \cdot (140.64^\circ/180^\circ \cdot \pi - \sin(140.64^\circ)) = 307.68 \text{ m}^2$$

L'area efficace di 307.68 m^2 viene assimilata a quella di una fondazione rettangolare di lati B' e L' . Dovendo essere soddisfatta la seguente condizione:

$$L^* = 24.48 \text{ m} > L' > 0.85 L^* = 20.81 \text{ m}$$

si pone $L' = 22.65 \text{ m}$ da cui si ricava $B' = 13.59 \text{ m}$.

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DEL PARCO EOLICO
COMUNE DI ISILI
OPERE CIVILI: CALCOLI PRELIMINARI DIMENSIONAMENTO FONDAZIONI AEROGENERATORE



I fattori calcolati sono i seguenti:

| | |
|----------------|---------------------|
| $N_q = 24.585$ | $N_\gamma = 22.538$ |
| $s_q = 1.382$ | $s_\gamma = 0.760$ |
| $d_q = 1.038$ | $d_\gamma = 1.000$ |
| $i_q = 0.903$ | $i_\gamma = 0.867$ |
| $g_q = 0.487$ | $g_\gamma = 0.487$ |

Pertanto il valore della capacità portante è dato da:

$$q_u = 65.7 \cdot 15.528 + 0.5 \cdot 13.587 \cdot 10.0 \cdot 7.234 = 1511.67 \text{ kN/m}^2$$

Il carico ultimo della fondazione si ottiene moltiplicando la capacità portante, q_u , per l'area della fondazione equivalente:

$$Q_u = 1511.67 \cdot 307.68 = 465106.5 \text{ kN}$$

$$SF = 465106.5 / 49330.19 = 9.43 > \gamma_R = 2.3 \quad \text{verifica positiva}$$

Si verifica inoltre che durante le fasi operative non vi sia distacco tra l'intradosso della fondazione e il terreno.

La verifica viene eseguita utilizzando i valori caratteristici delle azioni all'intradosso già definite in precedenza:

$$N \text{ base} = 49330.19 \text{ kN}$$

$$M \text{ base} = 143961.56 \text{ kN m}$$

$$e = M \text{ base} / N \text{ base} = 143961.56 / 49330.19 = 2.918 \text{ m}$$

$$\varnothing/8 = 26/8 = 3.25 \text{ m}$$

$$e < \varnothing/8$$

$$SF = 2.918 / 3.25 = 0.898 < 1.0$$

verifica positiva

La sezione risulta interamente reagente, le pressioni massima e minima sul terreno risultano:

$$\sigma_{t \text{ max}} = N \text{ base} / A + M \text{ base} / W = 1.763 \text{ kg} / \text{cm}^2$$

$$\sigma_{t \text{ min}} = N \text{ base} / A - M \text{ base} / W = 0.095 \text{ kg} / \text{cm}^2$$