



IMPIANTO EOLICO "NULVI"

COMUNE DI NULVI

PROPONENTE

Sardegna Nulvi 1 Srl
Via Nazionale n. 39
09024 - Nuraminis (SU)

IMPIANTO EOLICO "NULVI" NEL COMUNE DI NULVI

OGGETTO:

Calcoli preliminari dimensionamento
fondazioni aerogeneratori

CODICE ELABORATO

NL_PC_A009

COORDINAMENTO



BIA srl
P.IVA 03983480926
cod. destinatario KRRH6B9
+ 39 347 596 5654
energhiabia@gmail.com
energhiabia@pec.it
piazza dell'Annunziata n. 7
09123 Cagliari (CA) | Sardegna

GRUPPO DI LAVORO S.I.A.

Dott.ssa Geol. Cosima Atzori
Dott. Giulio Casu
Dott.Archeol. Fabrizio Delussu
Dott. Ing. Ivano Distinto
Dott.ssa Ing. Silvia Exana
Dott.Nat. Vincenzo Ferri
Dott. Ing. Carlo Foddie
Dott.ssa Ing. Ilaria Giovagnorio
Dott. Nat. Giorgio Lai
Dott. Federico Loddo
Dott. Ing. Giovanni Lovigu
Dott. Ing. Bruno Manca
Dott. Nat. Nicola Manis
Dott. Nat. Maurizio Medda
Dott.ssa Ing. Alessandra Scalas
Federica Zaccheddu

REDATTORE

Dott. Ing. Luca Bissoli
Dott. Ing. Ivano Distinto
Dott. Ing. Carlo Foddie



00	Novembre 2023	Emissione per procedura VIA
REV.	DATA	DESCRIZIONE REVISIONE

Sommario

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.....	11
7.1	CARICHI PERMANENTI	12
8.	VERIFICHE GEOTECNICHE	13
8.1	VERIFICA A RIBALTAMENTO	13
8.2	VERIFICA A SCORRIMENTO.....	14
8.3	VERIFICA DELLA CAPACITÀ PORTANTE E DELLE PRESSIONI IN ESERCIZIO SUL TERRENO	14

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 "Nulvi" ubicato nel comune Nulvi (SS), nella parte settentrionale 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 12 aerogeneratori per la produzione di energia elettrica da fonte eolica, del tipo tripala ad asse orizzontale, della potenza nominale di 6.200 kW ciascuna, per una complessiva del parco di 74.400 kW (74,4 MW).

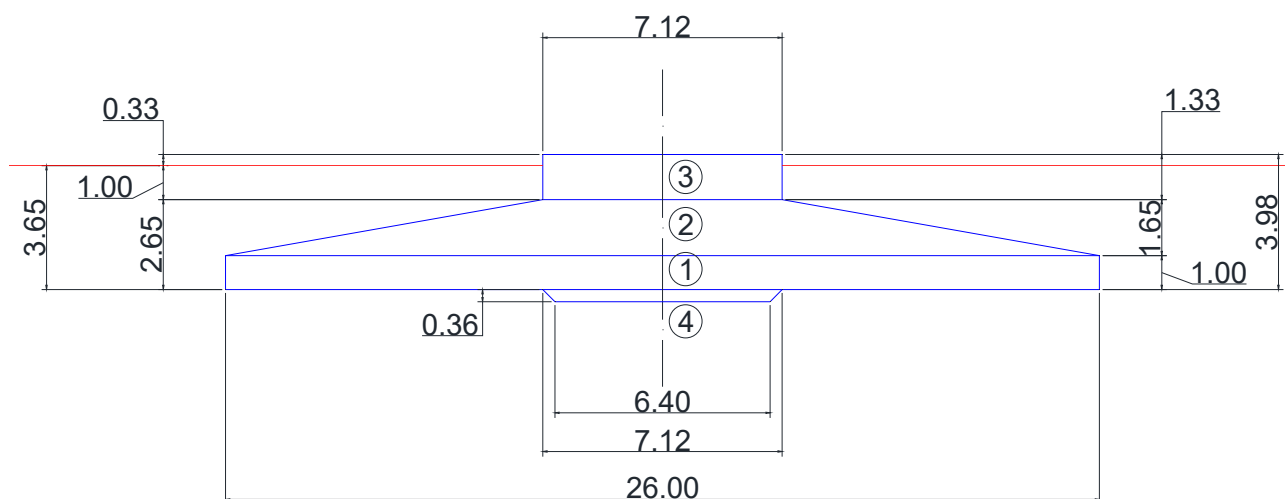
2.Premessa

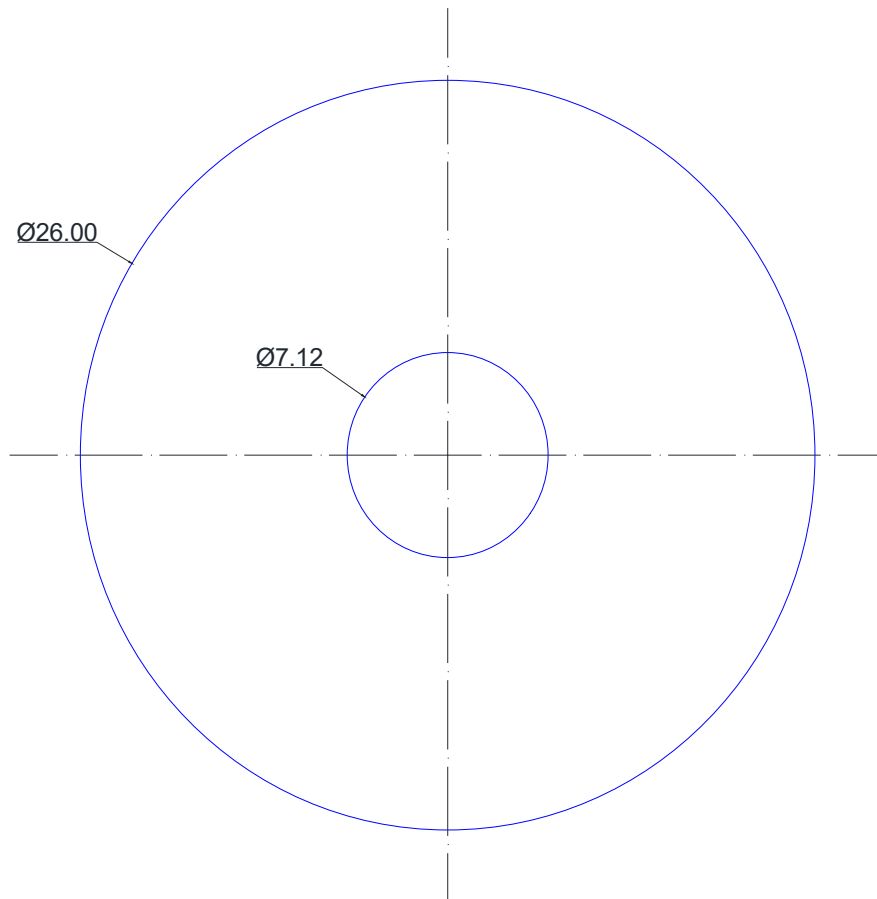
Il progetto del Parco Eolico si inquadra nell'ambito della ricerca di fonti energetiche alternative da utilizzare per la produzione d'energia elettrica.

L'intervento prevede l'installazione di 12 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 6.200 kW ciascuna, per una potenza nominale complessiva del parco di 74.400 kW.

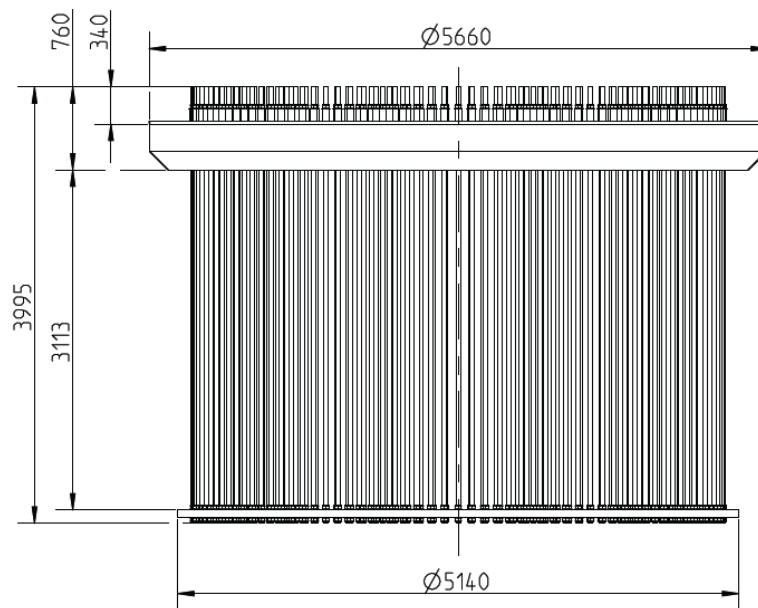
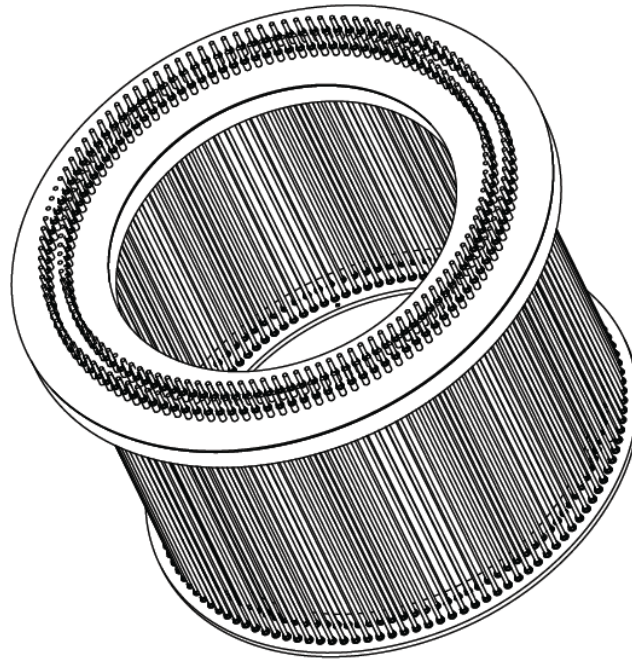
La seguente relazione riguarda il predimensionamento e la verifica geotecnica preliminare del plinto di fondazione.

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.





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.



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 VER 00 "Preliminary Foundation loads Mk1B EV162 6.5/6.8/7.2MW HH119 TA27708".

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

Lo studio condotto finalizzato ad individuare le caratteristiche geologiche, geomorfologiche idrogeologiche e geostrutturali dell'area di interesse alle opere di progetto ha permesso, attraverso il rilievo diretto in sito, le indagini geognostiche e l'interpretazione sinergica tra le informazioni derivate di definire nr. 2 modelli geologici e geotecnici ai sensi delle NTC 2018 rappresentativi delle diverse condizioni del sito, con particolare riferimento alle posizioni degli aerogeneratori.

MODELLO GEOLOGICO 01

Sulla base dei dati ricavati dalle indagini geognostiche e dalla classificazione degli ammassi rocciosi si definiscono i parametri geotecnici rappresentativi di un **modello geologico del sito per le turbine AG02, AG03, AG04, AG09, AG11, AG12:**

0,00 - 2,70m depositi eluvio-colluviali / roccia da addensata a fortemente addensata (**S1**)

2,70 – 10,70m substrato roccioso fratturato (**S2**)

10,70 -35,00m substrato roccioso da fratturato a sano (**S3**)

35,00m –40,00m substrato roccioso sano (**S4**)

MODELLO GEOLOGICO 01 (AG02, AG03, AG04, AG09, AG11, AG12)					
Dati Parametri Resistenza					
Tipo di Terreno		S1	S2	S3	S4
Descrizione		depositi eluvio-colluviali / roccia da addensata a fortemente addensata	substrato roccioso fratturato	substrato roccioso da fratturato a sano	substrato roccioso sano
Peso di volume**	[kg/mc]	1.800	2.000	2.350	2.450
Peso di volume saturo**	[kg/mc]	1.900	2.100	2.350	2.450
Angolo di attrito* interno	[°]	43.52	45.63	47.23	49.54
Coesione*	[Mpa]	0.075	0,524	1,072	1,254
Modulo elastico **	[Mpa]	276	608	1493	12173
Coefficiente di Poisson**	∅	0,33	0,33	0,33	0,33
Modulo di taglio (G)**	[Mpa]	853	1893	3727	18260
Velocità onde di taglio Vs**	[m/sec]	690	950	1260	2730

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

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

MODELLO GEOLOGICO 02

Sulla base dei dati ricavati dalle indagini geognostiche e dalla classificazione degli ammassi rocciosi si definiscono i parametri geotecnici rappresentativi di un **modello geologico del sito per le turbine AG05, AG06, AG07, AG08, AG10:**

0,00 - 2,70m depositi eluvio-colluviali / terre moderatamente addensate **(S1)**

2,70 – 10,50m terre da addensate a molto addensate **(S2)**

10,50 -33,10m substrato roccioso da fratturato a sano **(S3)**

33,10m –40,00m substrato roccioso sano **(S4)**

MODELLO GEOLOGICO 02 (AG05, AG06, AG07, AG08, AG10)					
Dati Parametri Resistenza					
Tipo di Terreno		S1	S2	S3	S4
Descrizione		depositi eluvio-colluviali / terre moderatamente addensate	terre da addensate a molto addensate	substrato roccioso da fratturato a sano	substrato roccioso sano
Peso di volume**	[kg/mc]	1.800	2.000	2.350	2.450
Peso di volume saturo**	[kg/mc]	1.900	2.100	2.350	2.450
Angolo di attrito* interno	[°]	27,25	29,54	40,45	46,74
Coesione*	[Mpa]	0.132	0,250	1,034	1,120
Modulo elastico **	[Mpa]	28	65	616	6021
Coefficiente di Poisson**	[]	0,33	0,33	0,33	0,33
Modulo di taglio (G)**	[Mpa]	88	206	1540	9032
Velocità onde di taglio Vs**	[m/sec]	220	310	810	1920

*Valori ricavati da interpolazioni empiriche 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.

Si identifica la criticità relativa alla circolazione idrica sotterranea secondaria o indotta e/o stagnazione di acque di pioggia – pur se non è stata rilevata in fase di indagine, vanno considerati gli effetti dell'eventuale presenza d'acqua alla quota di imposta delle fondazioni in relazione ad una possibile circolazione idrica indotta dai fenomeni di detensionamento dovuti agli scavi, con particolare riferimento alla stagionalità degli apporti idrici e del relativo flusso negli ambiti più superficiali.

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

$c' = 250 \text{ KPa}$	(Coesione)
$\phi' = 29.54^\circ$	(Angolo di attrito interno)
$\gamma = 18.0 \text{ kN/m}^3$	(Peso di volume del terreno a lato della fondazione)
$\gamma = 20.0 \text{ kN/m}^3$	(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.

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 VER 00" della Società Vestas Wind allegato in appendice. I carichi riportati nel documento sono considerati agenti 20 cm sopra al livello del terreno.

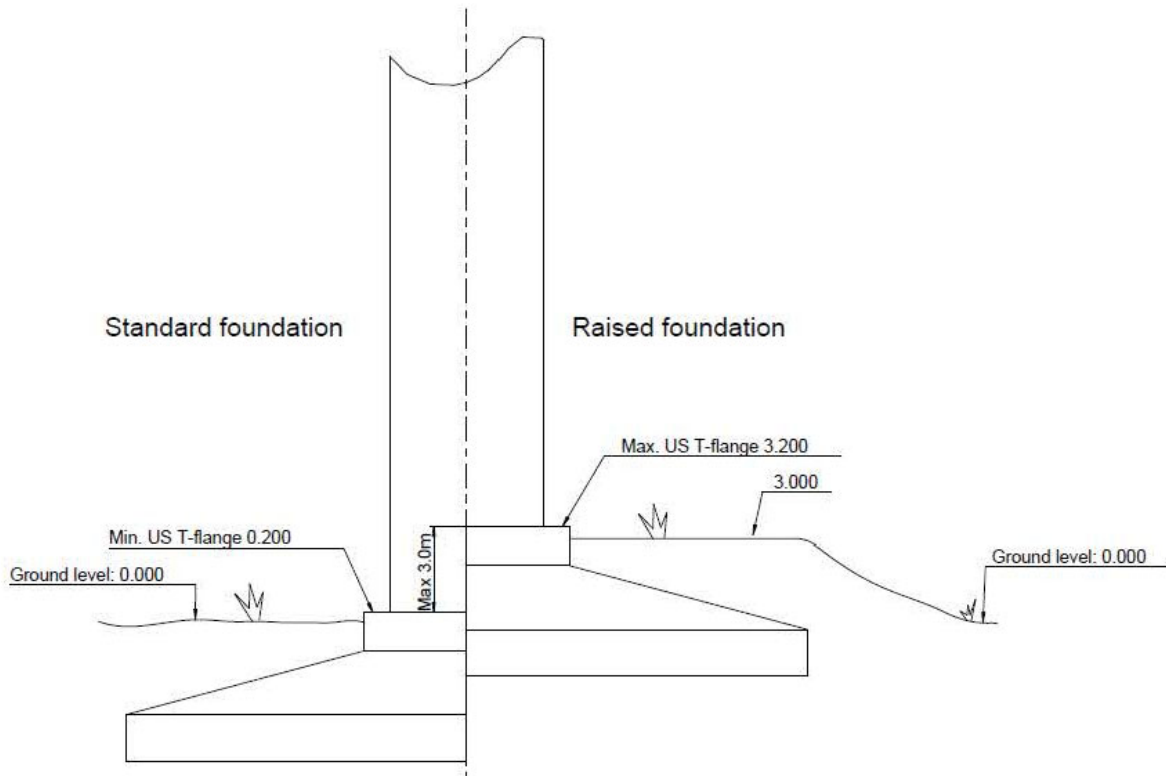


Figure 1-1 Tower and Foundation interface

Characteristic Extreme								
Lead	LC/Family	PLF	Type	Mbt	Mzt	FndFr	Fzt	Ref
Sensor	[-]	[-]	[-]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]	[-]
Mbt	14Ecdvraa00(fam97)	1.35	Abs	152100	1686	1280	-6866	[3]
Mzt	98NTMHC2400(fam482)	1.35	Abs	13409	-16178	98.96	-6580	[1]
FndFr	23NTMHCvra00(fam227)	1.35	Abs	127600	3600	1367	-6941	[3]
Fzt	1316etm00(fam89)	1.37	Abs	77679	3053	670.5	-7017	[1]

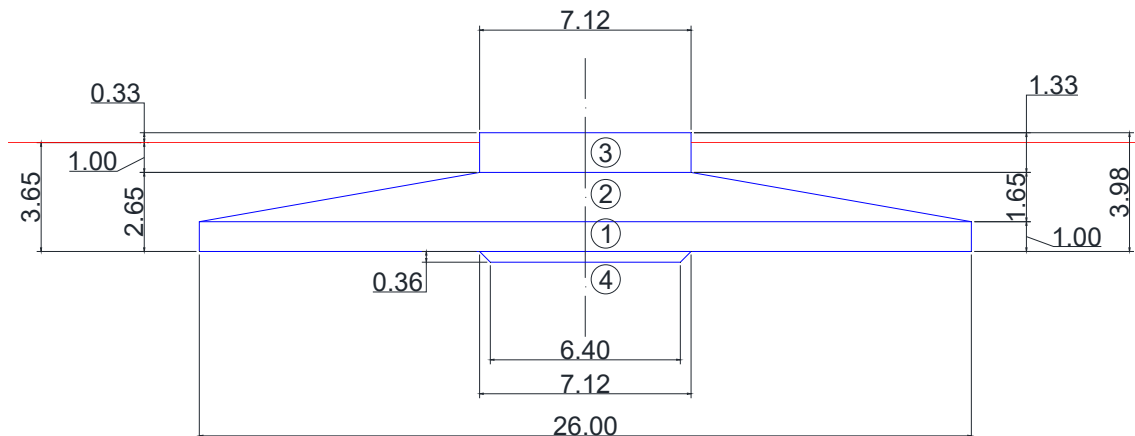
Table 2-1 Characteristic Extreme (excl. PLF). Load cases sorted with PLF.

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 VER 00"):

$$M_{\text{torre}} = 152100 \text{ kN m}$$

$$V_{\text{torre}} = 1367 \text{ kN}$$

$$N_{\text{torre}} = 7017 \text{ kN}$$

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

$$M_{\text{base}} = M_{\text{torre}} + V_{\text{torre}} \cdot H_{\text{fondazione}} = 152100 + 1367 \cdot 3.98 = 157540.66 \text{ kN m}$$

$$N_{\text{base}} = N_{\text{torre}} + N_{\text{fondazione}} = 7017 + 24767.3 + 17518.89 = 49303.19 \text{ kN}$$

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:

$$N_d = \gamma_{G1} N_{\text{base}} = 0.9 \cdot 49303.19 = 44372.87 \text{ kN}$$

$$M_s = N_d \cdot D/2 = 44372.87 \cdot 26/2 = 576847.32 \text{ kN m}$$

Momento ribaltante alla base della fondazione risulta:

$$M_r = \gamma_Q M_{\text{base}} = 1.5 \cdot 157540.66 = 236310.99 \text{ kN m}$$

Il coefficiente di sicurezza al ribaltamento risulta:

$$SF = M_s / M_r = 576847.32 / 236310.99 = 2.441 > 1.0 \quad \text{verifica positiva}$$

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:

$$V_d = \gamma Q \quad V_{\text{torre}} = 1.5 \cdot 1367 = 2050.5 \text{ kN}$$

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 29.54°

$$V_{\text{attrito}} = N_{\text{base}} \cdot \text{tg}(2/3 \cdot \phi') = 49303.19 \cdot \text{tg}(2/3 \cdot 29.54^\circ) = 17646.62 \text{ kN}$$

Il coefficiente di sicurezza allo scorrimento risulta:

$$SF = V_{\text{attrito}} / V_d = 17646.62 / 2050.5 = 8.61 > \gamma_R = 1.1 \quad \text{verifica positiva}$$

8.3 Verifica della capacità 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:	$\varnothing' = 29.54^\circ$
Coesione:	$c' = 250 \text{ kN/m}^2$
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 la formula della capacità portante si semplifica come segue:

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

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

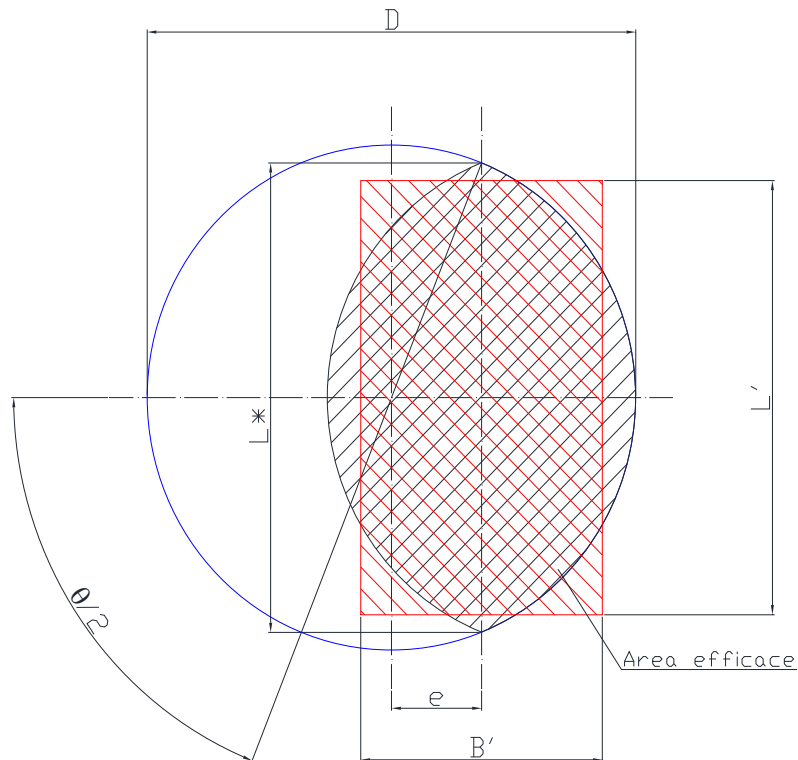
$$e = M/N = 236310.99 / 49303.19 = 4.793 \text{ m}$$

$$A = (26/2)^2 \cdot (136.73^\circ/180^\circ \cdot \pi - \sin(136.73^\circ)) = 287.46 \text{ m}^2$$

L'area efficace di 287.46 m² viene assimilata a quella di una fondazione rettangolare di lati B' e L'. Dovendo essere soddisfatta la seguente condizione:

$$L^* = 24.168 \text{ m} > L' > 0.85 L^* = 20.543 \text{ m}$$

si pone $L' = 22.356 \text{ m}$ da cui si ricava $B' = 12.858 \text{ m}$.



I fattori calcolati sono i seguenti:

$N_c = 29.062$	$N_q = 17.469$	$N_\gamma = 13.999$
$s_c = 1.346$	$s_q = 1.326$	$s_\gamma = 0.770$
$d_c = 1.088$	$d_q = 1.083$	$d_\gamma = 1.000$
$i_c = 0.969$	$i_q = 0.971$	$i_\gamma = 0.960$
$g_c = 0.898$	$g_q = 0.487$	$g_\gamma = 0.487$

Pertanto il valore della capacità portante è dato da:

$$q_u = 250 \cdot 37.033 + 65.7 \cdot 11.862 + 0.5 \cdot 12.858 \cdot 10.0 \cdot 5.039 = 10361.54 \text{ kN/m}^2$$

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

$$Q_u = 10361.54 \cdot 287.46 = 2978528.3 \text{ kN}$$

$$SF = 2978528.3 / 49303.19 = 60.4 > \gamma R = 2.3 \quad \text{verifica positiva}$$

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:

$$N_{\text{base}} = 49303.19 \text{ kN}$$

$$M_{\text{base}} = 157540.66 \text{ kN m}$$

$$e = M_{\text{base}} / N_{\text{base}} = 157540.66 / 49303.19 = 3.195 \text{ m}$$

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

$$e < \phi/8$$

$$SF = 3.195 / 3.25 = 0.983 < 1.0$$

verifica positiva

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

$$\sigma_{t_{\text{max}}} = N_{\text{base}} / A + M_{\text{base}} / W = 1.842 \text{ kg / cm}^2$$

$$\sigma_{t_{\text{min}}} = N_{\text{base}} / A - M_{\text{base}} / W = 0.016 \text{ kg / cm}^2$$