

PARCO EOLICO "KERSONESUS"

COMUNE DI TEULADA

PROVINCIA DEL SUD SARDEGNA (SU)



STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE

Elaborato:

PROGETTO DEFINITIVO OPERE CIVILI

Calcoli preliminari dimensionamento fondazioni aerogeneratori

Identificativo file:

TL_PC_A009

Data: Marzo 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
0	16/03/2023	Emesso per procedura di VIA			

PARCO EOLICO "KERSONESUS"

Realizzazione del Parco Eolico "Kersonesus" nel Comune di Teulada (SU)
N° 7 WTG da 6,20 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
"KERSONESUS"
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	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 CAPACITA' PORTANTE E DELLE PRESSIONI IN ESERCIZIO SUL TERRENO	14

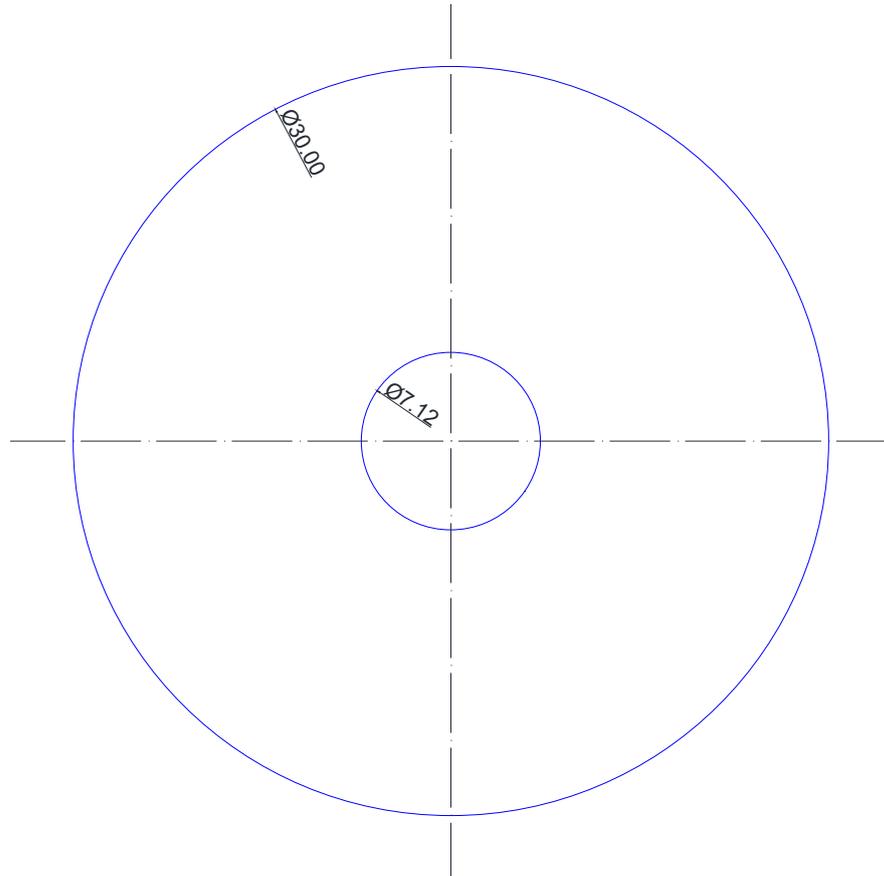
1 INTRODUZIONE

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 "Kersonesus" ubicato nel comune di Teulada (Su), nella parte meridionale della regione Sardegna che rientra nella regione storica del Sulcis.

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 6.200 kW ciascuna, per una complessiva del parco di 43.400 kW (43,4 MW).

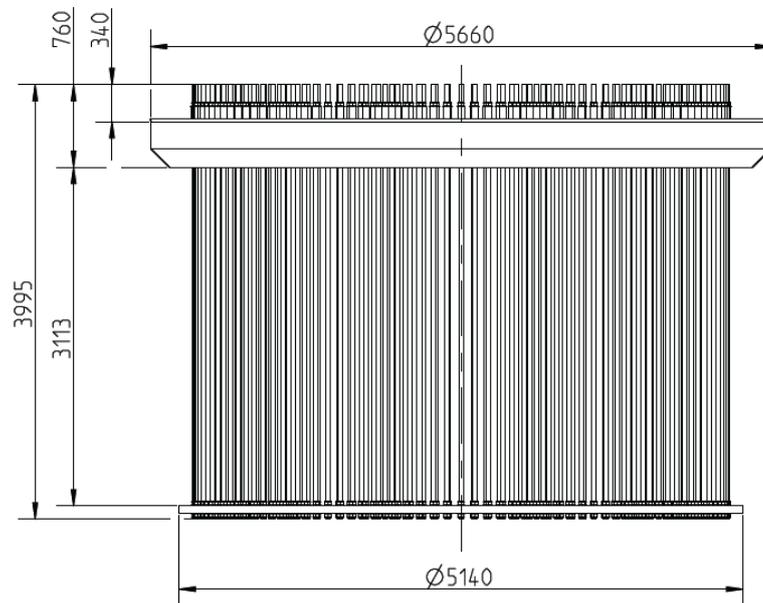
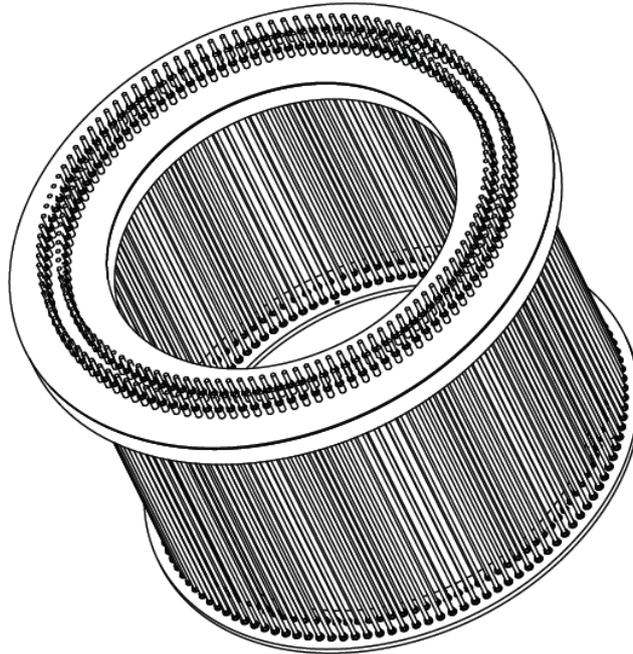
**PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DEL PARCO EOLICO
"KERSONESUS"
OPERE CIVILI: CALCOLI PRELIMINARI DIMENSIONAMENTO FONDAZIONI AEROGENERATORE**



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
"KERSONESUS"

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. 0096 - 8470 VER04 "Combine Foundation loads – TA27D00 EV150 – 5.4/5.6/6.0 MW & EV162 - 5.4/5.6/6.0/6.2 MW EnVentus, IECS, 125 m".

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

La Geologa Dott.ssa Cosima Atzori ha redatto la Relazione Geologica preliminare (TEULADA_PD_R15 Relazione Geologica) sulla base dello studio effettuato.

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 e alla viabilità di accesso e di servizio al sito.**

MODELLO 01

00.00m - 2.50m	S1 - Terre di copertura (suolo/depositi eluvio-colluviali)
02.50m - 4.00m	S2 - Alternanze di metamorfiti: Siltiti, arenarie, arenarie quarzose alterate e molto alterate
04.00m - 9,00m	S3 - Alternanze di metamorfiti: Siltiti, arenarie, arenarie quarzose alterate e molto fratturate
09,00m - 18,00m	S4 - Substrato roccioso da debolmente a fratturato
18,00m - 24,00m	S5 - Substrato roccioso da debolmente fratturato a sano
24,00m - 32,00m	S6 - Substrato roccioso sano

Teulada - MODELLO GEOLOGICO 01 (TL_A, TL_02, TL_03, TL_05, TL_06, TL_08)							
Tipo di Terreno	Dati Parametri Resistenza						
		S1	S2	S3	S4	S5	S6
Descrizione							
Peso di volume	[kg/mc]	1600	1700	1800	1950	2000	2100
Peso di volume saturo	[kg/mc]	1700	1800	1900	1950	2000	2100
Angolo di attrito interno*	[°]	24	26	28	35	40	45
Coesione*	[Mpa]	0,016	0.030	4.52	6.68	12.30	16.87
Dati Parametri Deformabilità							
Modulo elastico	[Mpa]	91	109	190	562	1177	4587
Coefficiente di Poisson	[]	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
Modulo di taglio (G)	[Mpa]	284	412	716	1402	2207	6884
Velocità onde di taglio Vs	[m/sec]	420	490	630	860	1050	1810

*Valori ottenuti per via empirica variando i parametri su RocData in relazione alla profondità e ai parametri misurati con l'indagine geofisica.

**PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DEL PARCO EOLICO
"KERSONESUS"
OPERE CIVILI: CALCOLI PRELIMINARI DIMENSIONAMENTO FONDAZIONI AEROGENERATORE**

MODELLO 02

00.00m - 2.70m	S1 - Terre di copertura (suolo/depositi eluvio-colluviali/alterazione dei graniti-sabbione)
02.70m - 4.50m	S2 - Substrato roccioso molto alterato
04.50m - 13,00m	S3 - Substrato roccioso alterato e molto fratturato
13,00m - 18,00m	S4 - Substrato roccioso da debolmente a fratturato
18,00m - 32,00m	S5 - Substrato roccioso da debolmente fratturato a sano
24,00m - 32,00m	S6 - Substrato roccioso sano

Teulada - MODELLO GEOLOGICO 01 (TL_A, TL_02, TL_03, TL_05, TL_06, TL_08)							
		Dati Parametri Resistenza					
Tipo di Terreno		S1	S2	S3	S4	S5	S6
Descrizione							
Peso di volume	[kg/mc]	1600	1700	1800	1950	2000	2100
Peso di volume saturo	[kg/mc]	1700	1800	1900	1950	2000	2100
Angolo di attrito interno*	[°]	24	26	28	40	45	50
Coesione*	[Mpa]	0,008	0.015	3.51	5.48	8.42	9.44
Dati Parametri Deformabilità							
Modulo elastico	[Mpa]	54	68	51	499	2181	7343
Coefficiente di Poisson	[]	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
Modulo di taglio (G)	[Mpa]	167	206	382	1245	4089	11.013
Velocità onde di taglio Vs	[m/sec]	325	350	460	810	1430	2290

*Valori ottenuti per via empirica variando i parametri su RocData in relazione alla profondità e ai parametri misurati con l'indagine geofisica.

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.

L'analisi geologica ha restituito per queste profondità di scavo una condizione generalmente rappresentata da ammassi rocciosi da molto fratturati a fratturati in relazione alla tipologia litologica come definito nei diversi modelli geologici individuati. In ordine al grado di fratturazione 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.

**PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DEL PARCO EOLICO
"KERSONESUS"
OPERE CIVILI: CALCOLI PRELIMINARI DIMENSIONAMENTO FONDAZIONI AEROGENERATORE**

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

$c' = 351 \text{ KPa}$	(Coesione)
$\varnothing' = 26^\circ$	(Angolo di attrito interno)
$\gamma = 16.0 \text{ kN/m}^3$	(Peso di volume del terreno a lato della fondazione)
$\gamma = 19.0 \text{ kN/m}^3$	(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:

$$\gamma' = \gamma - \gamma_w = 19.0 - 10.0 = 9.0 \text{ kN/m}^3 \quad (\text{Peso di volume del terreno sotto la fondazione})$$

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 "0096 - 8470 VER04" della Società Vestas Wind allegato in appendice. I carichi riportati nel documento sono considerati agenti 20 cm sopra al livello del terreno.

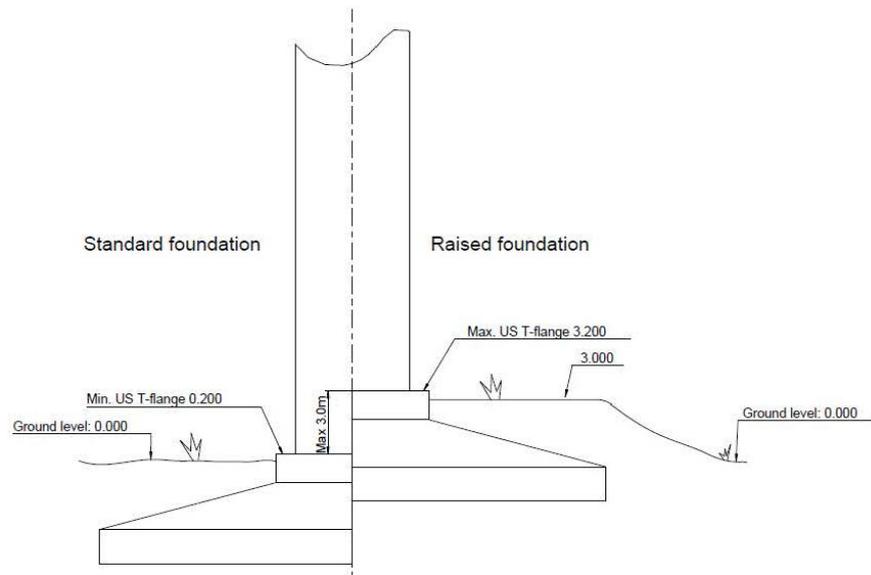


Figure 1-1 Tower and Foundation interface

Characteristic Extreme								
Lead	LC/Family	PLF	Type	Mbt	Mzt	FndFr	Fzt	Ref
Sensor	[-]	[-]	[-]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]	[-]
Mbt	14Ecdvraa00(fam89)	1.35	Abs	147900	3222	1142	-6853	[6]
Mzt	23NTMSCHWO100(fam216)	1.35	Abs	43278	-16546	475	-6595	[4]
FndFr	23NTMHCvra00(fam219)	1.35	Abs	112800	3548	1317	-6850	[7]
Fzt	12IceUHWO100(fam70)	1.35	Abs	69281	-1636	509	-7079	[7]

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

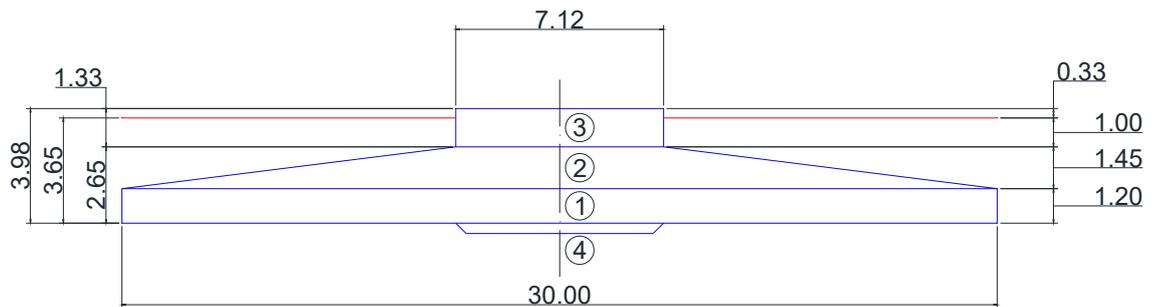
7.1 CARICHI PERMANENTI

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 $= 30^2 \pi 1.2 / 4 = 848.23 \text{ m}^3$
- 2) Volume cono superiore $= (\pi/3) 1.45 (15^2 + 3.56^2 + 15 \cdot 3.56) = 441.98 \text{ m}^3$
- 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 = 1356.09 m³



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

$$\text{P.P. fondazione} = 1356.09 \cdot 25 = 33902.35 \text{ kN}$$

Calcolo del peso del terreno di rinterro

$$\text{Volume fondazione interrata} = 1356.09 - 7.12^2 \pi 0.33 / 4 - 12.93 = 1330.02 \text{ m}^3$$

$$\text{Volume terreno di rinterro} = 30^2 \pi 3.65 / 4 - 1330.02 = 1250.01 \text{ m}^3$$

Considerando un peso di volume del terreno di ricoprimento di 16.00 kN/m³ il peso del rinterro risulta:

$$\text{P.P. rinterro} = 1250.01 \cdot 16 = 20000.16 \text{ kN}$$

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 "0096 - 8470 VER04"):

$$M_{\text{torre}} = 147900 \text{ kN m}$$

$$V_{\text{torre}} = 1317 \text{ kN}$$

$$N_{\text{torre}} = 7079 \text{ kN}$$

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

$$M_{\text{base}} = M_{\text{torre}} + V_{\text{torre}} \cdot H_{\text{fondazione}} = 147900 + 1317 \cdot 3.98 = 153141.66 \text{ kN m}$$

$$N_{\text{base}} = N_{\text{torre}} + N_{\text{fondazione}} = 7079 + 33902.35 + 20000.16 = 60981.51 \text{ kN}$$

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:

$$N_d = \gamma_{G1} N_{\text{base}} = 0.9 \cdot 60981.51 = 54883.36 \text{ kN}$$

$$M_s = N_d \cdot D/2 = 54883.36 \cdot 30/2 = 823250.38 \text{ kN m}$$

Momento ribaltante alla base della fondazione risulta:

$$M_r = \gamma_Q M_{\text{base}} = 1.5 \cdot 153141.66 = 229712.49 \text{ kN m}$$

Il coefficiente di sicurezza al ribaltamento risulta:

$$SF = M_s / M_r = 823250.38 / 229712.49 = 3.58 > 1.0 \quad \text{verifica positiva}$$

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:

$$V_d = \gamma Q T \text{ torre} = 1.5 \cdot 1317 = 1975.5 \text{ kN}$$

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 26°

$$V_{\text{attrito}} = N_{\text{base}} \cdot \tan\left(\frac{2}{3} \varnothing'\right) = 60981.51 \cdot \tan\left(\frac{2}{3} \cdot 26^\circ\right) = 19032.55 \text{ kN}$$

Il coefficiente di sicurezza allo scorrimento risulta:

$$SF = V_{\text{attrito}} / V_d = 19032.55 / 1975.5 = 9.63 > \gamma_R = 1.1 \quad \text{verifica positiva}$$

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.

**PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DEL PARCO EOLICO
"KERSONESUS"
OPERE CIVILI: CALCOLI PRELIMINARI DIMENSIONAMENTO FONDAZIONI AEROGENERATORE**

Il calcolo è stato eseguito tenendo conto dei seguenti parametri:

Fondazione circolare:	$\varnothing = 30 \text{ m}$
Profondità piano di posa:	$D = 3.65 \text{ m}$
Peso di volume (sotto la fondazione):	$\gamma' = 9.0 \text{ kN/m}^3$
Peso di volume (laterale):	$\gamma' = 16.0 \text{ kN/m}^3$
Angolo d'attrito:	$\varnothing' = 26^\circ$
Coesione:	$c' = 351 \text{ kN/m}^2$
Pressione geostatica sul piano di posa:	$q = 58.4 \text{ kN/m}^2$
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:

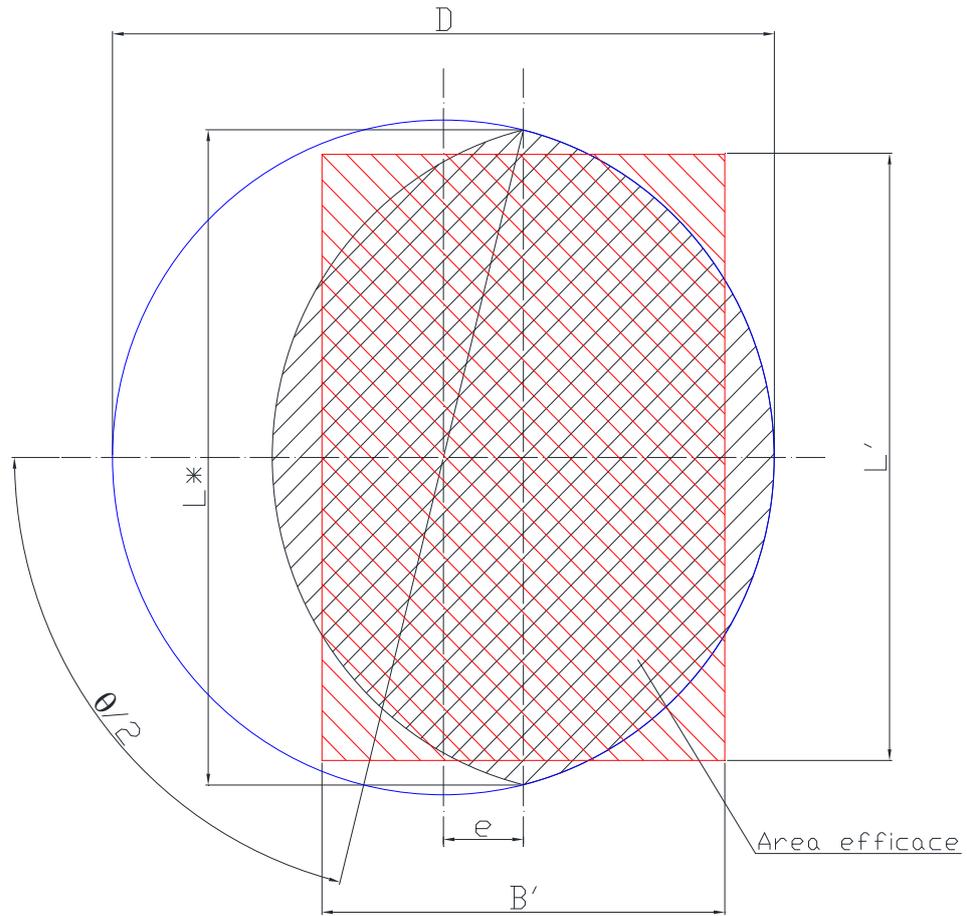
$$q_u = c' \cdot N_c \cdot s_c \cdot d_c \cdot i_c \cdot g_c + q' \cdot N_q \cdot s_q \cdot d_q \cdot i_q \cdot g_q + 0.5 \cdot B' \cdot \gamma' \cdot N_\gamma \cdot s_\gamma \cdot d_\gamma \cdot i_\gamma \cdot g_\gamma$$

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

$$e = M/N = 229712.49 / 60981.51 = 3.77 \text{ m}$$

$$A = (30/2)^2 \cdot (150.91^\circ/180^\circ \cdot \pi - \sin(150.91^\circ)) = 483.23 \text{ m}^2$$

**PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DEL PARCO EOLICO
"KERSONESUS"
OPERE CIVILI: CALCOLI PRELIMINARI DIMENSIONAMENTO FONDAZIONI AEROGENERATORE**



L'area efficace di 483.23 m^2 viene assimilata a quella di una fondazione rettangolare di lati B' e L' . Dovendo essere soddisfatta la seguente condizione:

$$L^* = 29.03 \text{ m} > L' > 0.85 L^* = 24.68 \text{ m}$$

si pone $L' = 26.85 \text{ m}$ da cui si ricava $B' = 18.00 \text{ m}$.

**PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DEL PARCO EOLICO
"KERSONESUS"
OPERE CIVILI: CALCOLI PRELIMINARI DIMENSIONAMENTO FONDAZIONI AEROGENERATORE**

I fattori calcolati sono i seguenti:

$N_c = 22.254$	$N_q = 11.854$	$N_\gamma = 7.941$
$s_c = 1.357$	$s_q = 1.327$	$s_\gamma = 0.732$
$d_c = 1.035$	$d_q = 1.027$	$d_\gamma = 1.000$
$i_c = 0.987$	$i_q = 0.988$	$i_\gamma = 0.983$
$g_c = 0.898$	$g_q = 0.487$	$g_\gamma = 0.487$

Pertanto il valore della capacità portante è dato da:

$$q_u = 351 \cdot 27.703 + 58.4 \cdot 7.773 + 0.5 \cdot 18.0 \cdot 9.0 \cdot 2.783 = 10403.1 \text{ kN/m}^2$$

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

$$Q_u = 10403.1 \cdot 483.23 = 5027090 \text{ kN}$$

$$SF = 5027090 / 60981.51 = 82.43 > \gamma R = 2.3 \quad \text{verifica positiva}$$

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:

$$\begin{aligned} N_{\text{base}} &= 60981.51 \text{ kN} & M_{\text{base}} &= 153141.66 \text{ kN m} \\ e &= M_{\text{base}} / N_{\text{base}} = 153141.66 / 60981.51 = 2.51 \text{ m} \\ \varnothing/8 &= 30/8 = 3.75 \text{ m} & e &< \varnothing/8 \end{aligned}$$

$$SF = 2.51/3.75 = 0.670 < 1.0 \quad \text{verifica positiva}$$

La sezione risulta interamente reagente, la pressione massima sul terreno risulta:

$$\sigma_t = N_{\text{base}} / A + M_{\text{base}} / W = 1.44 \text{ kg / cm}^2$$