



PROGETTO DI COSTRUZIONE ED ESERCIZIO DI UN IMPIANTO EOLICO DELLA POTENZA DI 99 MW DENOMINATO “PERDA PINTA” DA REALIZZARSI NEL COMUNE DI NUORO (NU) CON LE RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE ELETTRICHE .

CALCOLI PRELIMINARI DI DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE

Rev. 0.0

Data: Novembre 2022

WIND008-RC3

Committente:

Nuoro Wind S.r.l.
Corso di Porta Vittoria n. 9
20122 Milano (MI)
C. F. e P. IVA: 12332370969
PEC: nuorosrl@mailcertificata.net

Incaricato:

Queequeg Renewables, Ltd
Unit 3.03, 1110 Great West Road
TW80GP London (UK)
Company number: 111780524
email: mail@quenter.co.uk

Progettazione e SIA:

I.A.T. Consulenza e progetti S.r.l.



www.iatprogetti.it

PROGETTAZIONE:

I.A.T. Consulenza e Progetti S.r.l.

Ing. Giuseppe Frongia (Direttore Tecnico)

GRUPPO DI PROGETTAZIONE:

Ing. Giuseppe Frongia (Coordinatore e responsabile)

Ing. Marianna Barbarino

Ing. Enrica Batzella

Dott. Pian. Andrea Cappai

Ing. Paolo Desogus

Pian. Veronica Fais

Ing. Gianluca Melis

Ing. Andrea Onnis

Pian. Eleonora Re

Ing. Elisa Roych

COLLABORAZIONI SPECIALISTICHE:

Verifiche strutturali: Ing. Gianfranco Corda

Aspetti geologici e geotecnici: Dott. Geol. Maria Francesca Lobina e Dott. Geol. Mauro Pompei

Aspetti faunistici: Dott. Nat. Maurizio Medda

Caratterizzazione pedologica: Agr. Dott. Nat. Nicola Manis

Acustica: Ing. Antonio Dedoni

Aspetti floristico-vegetazionali: Agr. Dott. Nat. Fabio Schirru

Aspetti archeologici: Dott. Matteo Tatti

SOMMARIO

1	Premessa.....	4
2	Aspetti generali.....	5
3	Normativa di riferimento	7
4	Caratterizzazione geologica e geotecnica	8
4.1	Modello geotecnico di riferimento	8
4.2	Stratigrafia di progetto.....	8
5	Carichi di progetto	10
6	Verifica stabilità globale (equ).....	12
7	Verifica di resistenza della fondazione (STR).....	15
8	Conclusioni.....	20

1 Premessa

Il presente elaborato contiene i calcoli preliminari delle strutture di fondazione degli aerogeneratori previsti nel progetto del Parco eolico denominato "Perda Pinta", proposto dalla società Nuoro Wind S.r.l., da installare nel comune di NUORO; in particolare saranno condotte le verifiche strutturali ritenute significative ai fini del conseguimento dell'Autorizzazione Unica del progetto ai sensi del D.Lgs. 387/2003 Art. 12.

Il documento è redatto dalla I.A.T. Consulenza e progetti S.r.l. con il contributo specialistico dell'ing. Gianfranco Corda.

Per le finalità di calcolo, si è fatto riferimento ai dati di caratterizzazione delle terre contenuti nella relazione geologica e geotecnica allegata al progetto dell'impianto.

L'impianto sarà composto da n. 15 aerogeneratori riferibili indicativamente al modello Siemens Gamesa SG 6.6-170, con potenza nominale di 6.6 MW e diametro del rotore di 170 m.

Le verifiche strutturali per il plinto di fondazione sono basate sulle azioni di progetto indicate dal costruttore Siemens Gamesa per il modello SG 6.6-170, altezza al mozzo pari a 135 m; le azioni di progetto sono state desunte dallo specifico fascicolo sui carichi in fondazione fornito dal costruttore, documento "Foundation Loads T135-1298 – D2406108/002".

2 Aspetti generali

Il progetto proposto prevede l'installazione di n. 15 turbine di grande taglia, riferibili indicativamente al modello Siemens Gamesa SG 6.6-170, posizionate su torri di sostegno dell'altezza pari a 135 m, nonché l'approntamento delle opere accessorie indispensabili per un ottimale funzionamento e gestione degli aerogeneratori (viabilità e piazzole di servizio, distribuzione elettrica di impianto e opere per la successiva immissione dell'energia prodotta alla Rete di Trasmissione Nazionale).

Gli aerogeneratori in progetto saranno dislocati tra quote altimetriche indicativamente comprese nell'intervallo 810÷660 m s.l.m.

Ai fini delle presenti verifiche strutturali sono state considerate le azioni massime fornite dal costruttore nel documento "Foundation Loads T135-1298 – D2406108/002".

Ferme restando le caratteristiche dimensionali dell'aerogeneratore, non può escludersi peraltro che la scelta definitiva possa ricadere su un modello simile con migliori prestazioni di esercizio, qualora disponibile sul mercato prima dell'ottenimento della Autorizzazione Unica di cui all'art. 12 del D.Lgs. 387/2003.

La natura dei terreni di sedime è caratterizzata dalla presenza di rocce granitiche con proprietà meccaniche elevate, sormontate localmente da uno strato di coltre detritica superficiale e da sabbie granitiche.

La tipologia dei terreni è dunque idonea per la realizzazione di fondazioni dirette, fatta salva l'esigenza di acquisire riscontri puntuali in tutte le postazioni eoliche, attraverso l'esecuzione di una campagna di indagini geognostiche e geotecniche che dovrà obbligatoriamente supportare la successiva fase di progettazione esecutiva.

Il basamento di fondazione previsto in progetto è del tipo a plinto superficiale, da realizzare in opera in calcestruzzo armato, a pianta circolare di diametro pari a 24.50 metri.

La fondazione oggetto di verifica è sostanzialmente una piastra circolare a sezione variabile con spessore massimo al centro, pari a circa 280 cm, e spessore minimo al bordo, pari a 60 cm.

La porzione centrale, denominata "colletto", presenta altezza costante di 2.80 m per un diametro pari a circa 6.00 m.

Il colletto è il nucleo del basamento in cui verranno posizionati i tirafondi di ancoraggio del primo anello della torre metallica, il restante settore circolare sarà ricoperto con uno strato orizzontale di rilevato misto arido, con funzione stabilizzante e di mascheramento.

I calcoli e le verifiche di seguito illustrati saranno preceduti da un breve cenno ai riferimenti della normativa vigente nonché alle azioni ed ai carichi di progetto.

Nello specifico sono stati condotti i seguenti accertamenti: verifica di stabilità globale del manufatto, considerato come corpo rigido, verifiche di resistenza del manufatto in calcestruzzo, verifiche di resistenza del

terreno nonché il calcolo dei cedimenti attesi, applicando i coefficienti di sicurezza previsti dalla normativa tecnica in corso di validità (DM 17/01/2018).

Le significative azioni orizzontali e flettenti, dovute alla particolare altezza delle torri in progetto, indirizzano il dimensionamento della fondazione ad un manufatto massivo tale da garantire anzitutto la stabilità globale oltre che a distribuire i carichi sul piano di posa.

Le pressioni di contatto calcolate risultano sempre inferiori al valore di resistenza del terreno, i cedimenti previsti sono generalmente trascurabili.

Il dimensionamento eseguito ha carattere di verifica preliminare, la geometria e le dimensioni del plinto indicate in precedenza sono da ritenersi orientative e potrebbero variare a seguito delle risultanze del dimensionamento esecutivo delle opere nonché sulla base di eventuali indicazioni specifiche fornite dal costruttore dell'aerogeneratore, in funzione della scelta definitiva del modello di turbina che sarà operata nell'ambito della fase di Autorizzazione Unica del progetto.

3 Normativa di riferimento

- Legge 05/11/1971 n. 1086

Norme per la disciplina delle opere in conglomerato cementizio armato, normale e precompresso ed a struttura metallica.

- D.M. 17/01/2018 – NTC 2018

Norme Tecniche per le Costruzioni.

- Circolare Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti 23/02/2019

Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni".

Vita nominale, classe d'uso e periodo di riferimento:

Tipo di costruzione: 2 (opere ordinarie)

Vita nominale: $V_N \geq 50$ anni

Classe d'uso: IV

Periodo di riferimento: $V_R = 100$ anni

Metodo di calcolo e verifica:

È stato utilizzato il metodo degli Stati Limite applicandolo così come previsto dalle NTC 2018 (D.M. 17/01/2018).

Le verifiche di stabilità sono state condotte per via diretta dallo scrivente, i calcoli e le verifiche di resistenza sono stati eseguiti utilizzando il programma di calcolo strutturale CDSWIN della STS, programma di calcolo automatico agli elementi finiti, e il programma di calcolo geotecnico LoadCap della GEOSTRU.

4 Caratterizzazione geologica e geotecnica

4.1 Modello geotecnico di riferimento

I calcoli strutturali delle fondazioni fanno riferimento ai dati contenuti nella relazione geologica e geotecnica preliminare redatta dai Geologi Maria Francesca Lobina e Mauro Pompei.

I Geologi hanno individuato la presenza di un substrato vulcanico litoide in affioramento o sormontato da una coltre detritica di spessore molto variabile.

Salvo gli opportuni ed obbligatori accertamenti nella fase più avanzata della progettazione, sono state individuate tre distinte tipologie di terreni direttamente interagenti con le strutture di fondazione e per le quali si riportano le caratteristiche meccaniche.

Unità A – Suoli e terre brune spessore medio pari a 0,50 m

Peso specifico = 16,50 -17,50 kN/m³

Angolo attrito interno $\phi = 27-29^\circ$

Modulo elastico $E = 70 \text{ daN/cm}^2$

Coesione $c = 0.00 \text{ daN/cm}^2$

Unità B – Sabbione quarzoso-feldspatico da sciolto a med. addensato - spess. - 2,00 / - 4.00 m

Peso specifico = 18,50 – 20,00 kN/m³

Angolo attrito interno $\phi = 34-36^\circ$

Modulo elastico $E = 350 - 500 \text{ daN/cm}^2$

Coesione $c = 0,10 - 0,30 \text{ daN/cm}^2$

Unità C – Basamento granitico

Peso specifico = 23,00 – 24,00 kN/m³

Angolo attrito interno $\phi = 40-45^\circ$

Modulo elastico $E = 35.000 - 50.000 \text{ daN/cm}^2$

Coesione $c = 1,50 – 3,00 \text{ daN/cm}^2$

4.2 Stratigrafia di progetto

La stratigrafia considerata nel calcolo preliminare delle opere di fondazione è stata valutata considerando i valori della caratterizzazione meccanica delle rocce granitoidi (Unità C), considerando che gli strati superficiali saranno rimossi dalle attività di scavo; si rimanda alle successive fasi la valutazione dei dati puntuali per ogni singola piazzola di installazione.

Peso specifico = 24,00 kN/m³

Angolo attrito interno $\phi = 40^\circ$

Modulo elastico $E = 35.000 \text{ daN/cm}^2$

Coesione $c = 0.00 \text{ daN/cm}^2$

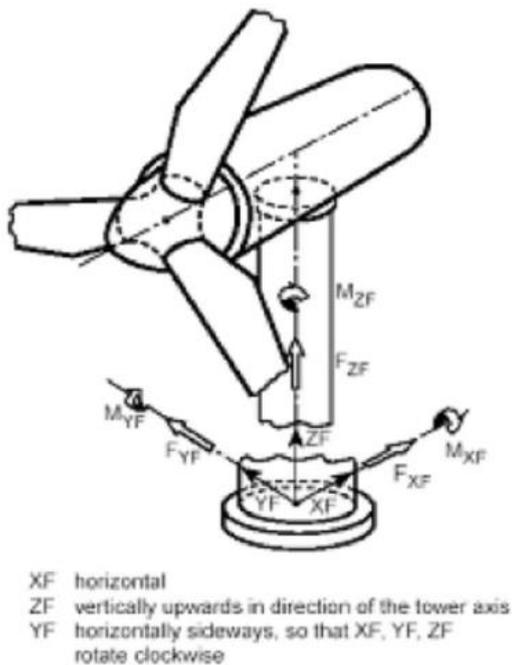
I terreni indagati possono essere individuati nella Categoria di sottosuolo del tipo "A" ovvero "ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi".

I Geologi riferiscono che si possono cautelativamente assumere valori di capacità portante dell'ordine rispettivamente di $1,5 \text{ daN/cm}^2$ (Unità B) e $3,5 \text{ daN/cm}^2$ (Unità C) senza che si manifestino cedimenti di entità apprezzabile, il substrato granitoide in posto, così come il sabbione granitico, offrono elevate garanzie di stabilità nel tempo per le opere fondali.

5 Carichi di progetto

Per la definizione delle azioni di progetto al piede della torre sono state assunte come riferimento le azioni agenti sulla fondazione di una torre eolica di caratteristiche assimilabili all'aerogeneratore previsto in progetto.

Per le verifiche preliminari sulle strutture di fondazione sono state considerate le azioni massime fornite dal costruttore nel documento "Foundation Loads T135-1298 – D2406108/002".



Load case	F_x (kN)	F_y (kN)	F_z (kN)	F_{xy} (kN)	M_x (kNm)	M_y (kNm)	M_z (kNm)	M_{xy} (kNm)
Dlc14_v90.0_p_000	1316,18	54,14	-7707,99	1317,29	2463,44	186812,5	294,48	186828,7

Nella tabella precedente sono definite le azioni massime al piede della torre, tali valori verranno utilizzati per le verifiche allo stato limite ultimo con i coefficienti di sicurezza previsti dalla normativa italiana, il DM 17/01/2018.

I carichi riportati in tabella sono i carichi massimi in condizioni estreme (*extreme loads*), calcolati per le specifiche condizioni climatiche riportate nella tabella seguente.

Description	Unit	Value
Design code	-	IEC-61400-1 Ed3
IEC Class	-	3A
Design life time according to IEC	years	20
Annual average wind speed at hub height, V_{ave}	m/s	7.5
Extreme wind speed at hub height (10-min with 50 years return period), V_{ref}	m/s	57
Mean turbulence intensity at 15 m/s, I_{ref}	-	0.16
Average air density, ρ	kg/m ³	1.225

Table 1 Design code information and climatic conditions

Le predette condizioni climatiche utilizzate dal Costruttore per il calcolo dei carichi estremi al piede della torre sono da considerare quale condizione limite per poter installare questo modello di torre nel sito in progetto.

È dunque necessario verificare la compatibilità tra le condizioni climatiche previste dalle Norme Tecniche per le Costruzioni per il sito di installazione e quelle limite specificate dal Costruttore.

In particolare, è necessario verificare che la velocità massima del vento prevista dalla normativa vigente per il sito in progetto sia almeno inferiore a quella prevista nella tabella precedente:

Art. 3.3 D.M. 17/01/2018 (NTC 2018) - Azioni del Vento

Sito installazione: Regione Sardegna - Provincia di Nuoro - comune di Nuoro

$$a_s = 800 \text{ m s.l.m.m.} \quad a_{s, \max} = a_s + 220 \text{ (altezza mozzo + raggio)} = 1020 \text{ m}$$

Zona Climatica di riferimento = 5

$$a_0 = 750 \text{ m} \quad v_{b,0} = 28 \text{ m/s} \quad k_s = 0.40$$

$$\text{per } a_s > a_0 \quad v_b = v_{b,0} \times C_a \quad C_a = 1 + k_s (a_{s, \max} / a_0 - 1) \quad C_a = 1.15$$

Velocità massima di riferimento indicata dalle NTC 2018 (10 min, 50 anni T_r):

$$v_b = 32.20 \text{ m/s}$$

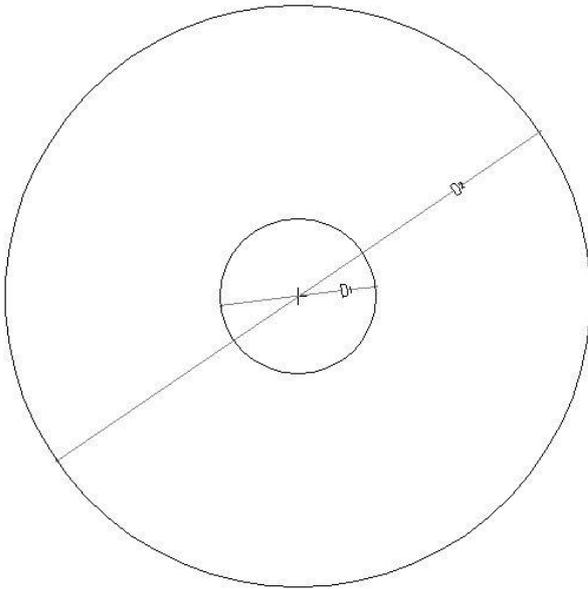
Velocità massima indicata dal produttore (10 min, 50 anni T_r):

$$V_{ref} = 37.50 \text{ m/s}$$

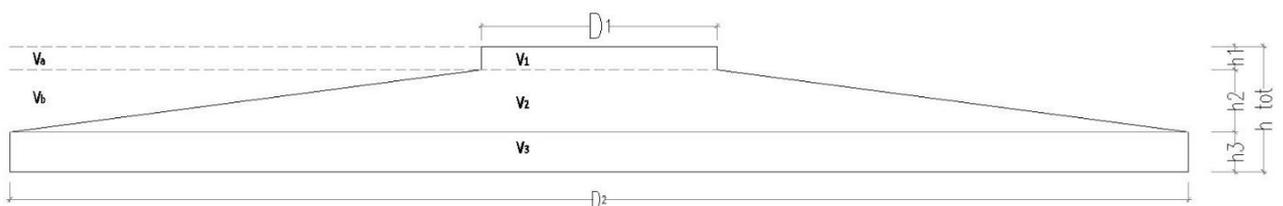
La velocità massima indicata dal Costruttore è superiore a quella prevista dalla normativa vigente per il sito in progetto, la verifica di compatibilità è dunque soddisfatta.

6 Verifica stabilità globale (equ)

Si conducono nel seguito le verifiche di stabilità globale del basamento di fondazione, con riferimento alle azioni di progetto precedentemente indicate.



Schema in pianta basamento di fondazione



Schema in sezione basamento di fondazione

DATI GEOMETRICI FONDAZIONE:

diametro colletto =	$d_1 = 6.00 \text{ m}$
diametro esterno =	$d_2 = 24.50 \text{ m}$
altezza colletto =	$h_1 = 0.30 \text{ m}$
altezza intermedia =	$h_2 = 1.90 \text{ m}$
altezza minima =	$h_3 = 0.60 \text{ m}$
altezza totale =	$h_{tot} = 2.80 \text{ m}$

A - VERIFICA AL RIBALTAMENTO

$\gamma_{G1} = 0.90$	$\gamma_{G2} = 0.80$	$\gamma_q = 1.50$
----------------------	----------------------	-------------------

CARICHI VERTICALI

Peso del basamento

$$G_1 = 25 \times \pi \times [d_1^2 \times h_1 + 1/3 \times (d_1^2 + d_1 \times d_2 + d_2^2) \times h_2 + d_2^2 \times h_3] / 4$$

$$G_1 = 17'015 \text{ kN}$$

Peso del terreno di ricoprimento

$$G_2 = 16 \times \pi \times [(d_2^2 - d_1^2) \times (h_1 - 0.10) + (d_2^2 \times h_2) - 1/3 \times (d_1^2 + d_2 \times d_1 + d_2^2) \times h_2] / 4$$

$$G_2 = 9'511 \text{ kN}$$

Peso della torre

$$V = 7'710 \text{ kN}$$

AZIONI PER LA CONDIZIONE DI CARICO EQU

(peso proprio basamento + peso terreno ricoprimento - senza coefficienti parziali)

$G_1 = 17'015 \text{ kN}$	$G_2 = 9'511 \text{ kN}$
---------------------------	--------------------------

(momento flettente + azione orizzontale al piede della torre + peso permanente torre - senza coefficienti parziali)

$M = 186'830 \text{ kNm}$	$H = 1'320 \text{ kN}$	$V = 7'710 \text{ kN}$
---------------------------	------------------------	------------------------

MOMENTO STABILIZZANTE

$$M_{STA} = (0.9 \times G_1 + 0.8 \times G_2 + 0.9 \times V) \times d_2 / 2$$

$$M_{STA} = (0.9 \times 17'015 + 0.8 \times 9'511 + 0.9 \times 7'710) \times 12 = 358'335 \text{ kNm}$$

MOMENTO RIBALTANTE

$$M_{RIB} = \gamma_q \times (M + H \times h_{tot})$$

$$M_{RIB} = 1.5 \times (186'830 + 1'320 \times 2.8) = 285'790 \text{ kNm}$$

Coefficiente di sicurezza:

$$M_{STA} / M_{RIB} = 1.25$$

Verifica soddisfatta considerando il peso stabilizzante del rilevato.

B – VERIFICA SCORRIMENTO

$\gamma_{G1} = 0.90$	$\gamma_{G2} = 0.80$	$\gamma_q = 1.50$
----------------------	----------------------	-------------------

Risultante forze che attivano lo scorrimento:

$$H = 1'320 \text{ kN}$$

$$F_{scr} = \gamma_q \times H = 1'980 \text{ kN}$$

Risultante forze che si oppongono allo scorrimento:

Peso della torre

$$V = 7'710 \text{ kN}$$

Peso del basamento

$$G_1 = 17'015 \text{ kN}$$

Peso del terreno di ricoprimento

$$G_2 = 9'511 \text{ kN}$$

Angolo di attrito terreno/fondazione

$$\phi = 40^\circ$$

$$\phi' = 0.5 \phi$$

$$F_{sta} = \tan\phi' \times (\gamma_{G1} \times G_1 + \gamma_{G1} \times V) = 8'099 \text{ kN}$$

Coefficiente di sicurezza:

$$F_{sta} / F_{scr} = 4.09$$

Verifica soddisfatta senza considerare il peso stabilizzante del rilevato.

7 Verifica di resistenza della fondazione (STR)

Si riportano nel seguito i risultati di calcolo del modello strutturale, realizzato discretizzando il basamento in elementi finiti di sezione variabile, e verificando le sezioni in c.a.

La fondazione è stata verificata con riferimento alla stratigrafia di progetto, considerando la Categoria di sottosuolo A ed una costante di winkler pari a 10 kg/cm^3 .

COMBINAZIONE DI CARICO 1 – (SLE)

(peso proprio basamento + peso terreno ricoprimento - senza coefficienti parziali)

$G_1 = 17'015 \text{ kN}$	$G_2 = 9'511 \text{ kN}$
---------------------------	--------------------------

COMBINAZIONE DI CARICO 2 – (SLE)

(peso proprio basamento + peso terreno ricoprimento + azioni dalla Torre - senza coefficienti parziali)

$G_1 = 17'015 \text{ kN}$	$G_2 = 9'511 \text{ kN}$	$V = 7'710 \text{ kN}$
$M_F = 186'830 \text{ kNm}$	$H = 1'320 \text{ kN}$	$M_T = 295 \text{ kNm}$

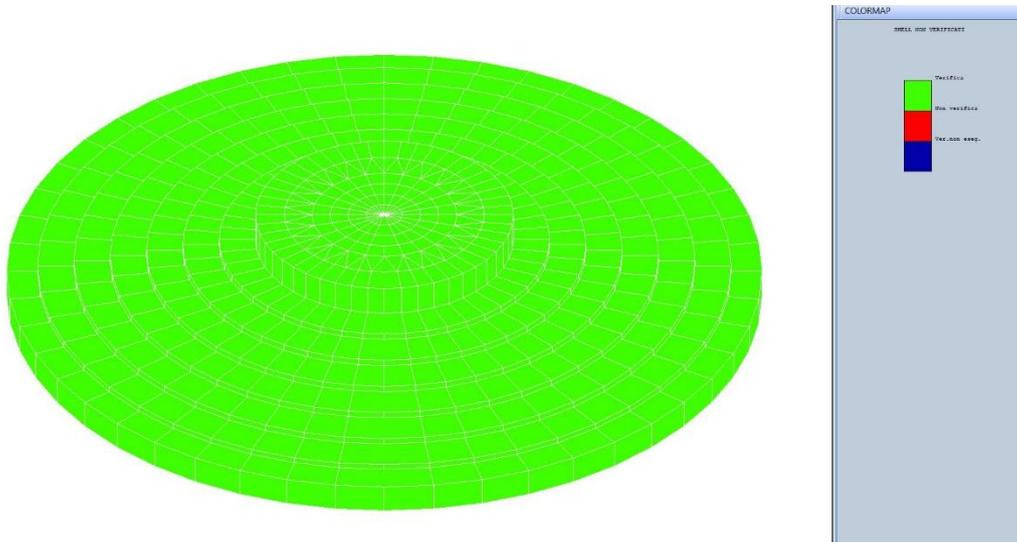
COMBINAZIONE DI CARICO 3 – (SLU)

(peso proprio basamento + peso terreno ricoprimento + azioni dalla Torre - con i coefficienti parziali)

$G_1 = \gamma_{G1} \times 17'015 \text{ kN}$	$G_2 = \gamma_{G2} \times 9'511 \text{ kN}$	$V = \gamma_{G2} \times 7'710 \text{ kN}$
$M = \gamma_q \times 186'830 \text{ kNm}$	$H = \gamma_q \times 1'320 \text{ kN}$	$M_T = \gamma_q \times 295 \text{ kNm}$

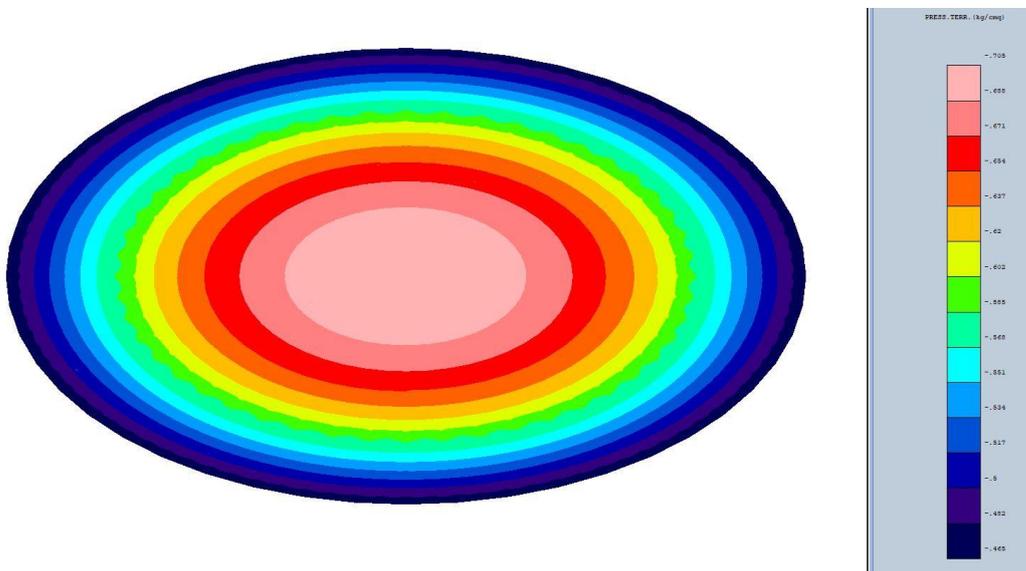
$\gamma_{G1} = 1.3$	$\gamma_{G2} = 1.5$	$\gamma_q = 1.50$
---------------------	---------------------	-------------------

COLORMAP VERIFICHE ELEMENTI SHELL



a – PRESSIONI DI CONTATTO

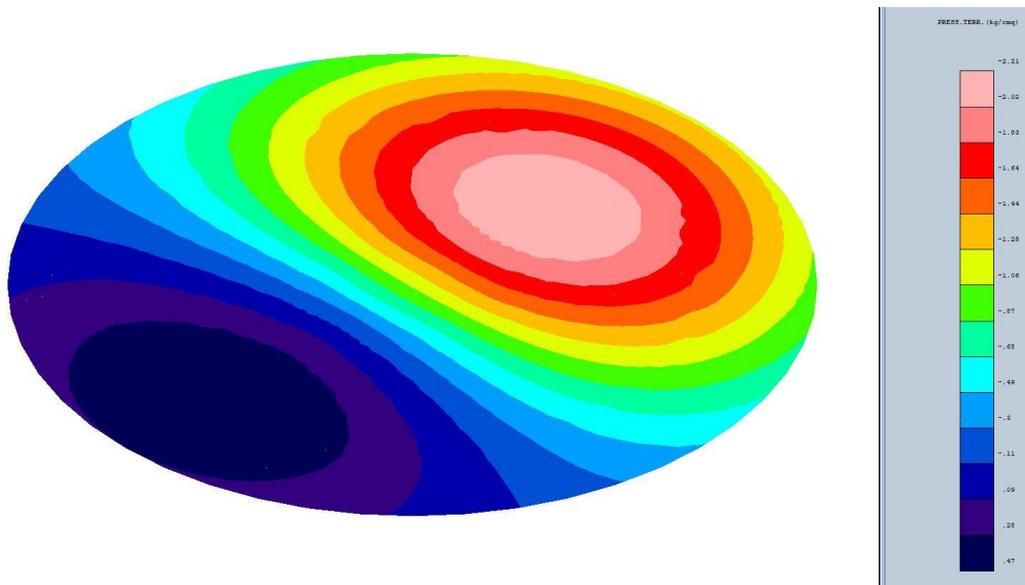
COLORMAP PRESSIONI DI CONTATTO COMBINAZIONE 1 (P.P. + PERM.)



Pressione di contatto SLE:

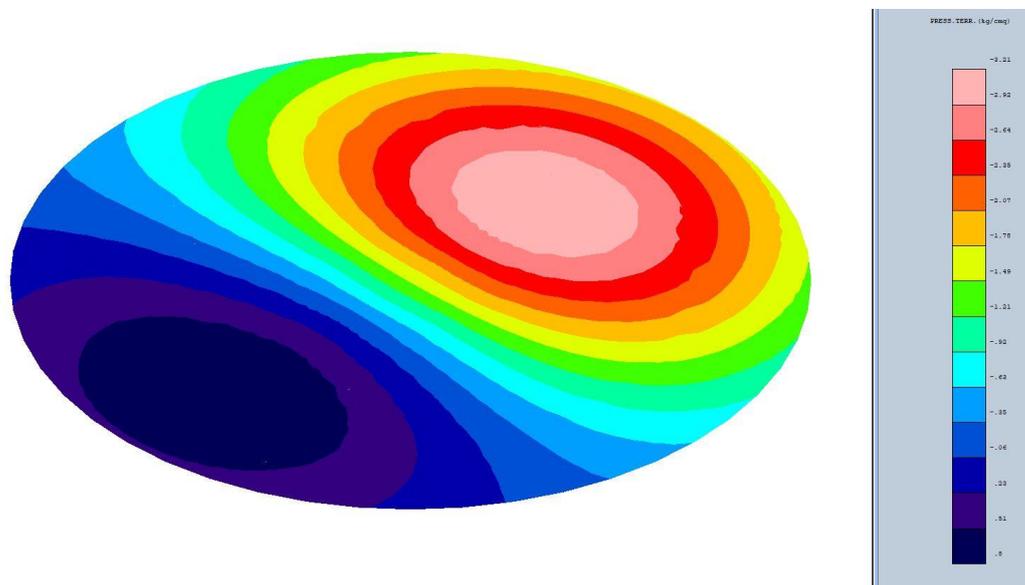
$$\sigma_{pp} = 0.71 \text{ kg/cm}^2$$

COLORMAP PRESSIONI DI CONTATTO COMBINAZIONE 2 (P.P. + PERM. + AZIONI TORRE)



Pressione di contatto SLE: $\sigma_{es} = 2.21 \text{ kg/cm}^2$

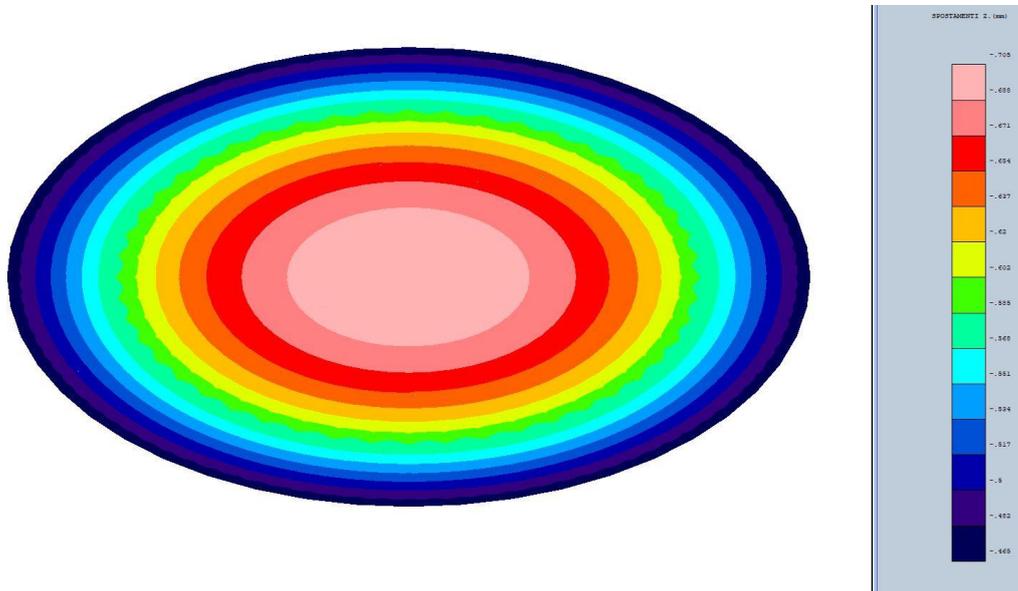
COLORMAP PRESSIONI DI CONTATTO COMBINAZIONE 3 (P.P. + PERM. + AZIONI TORRE)



Pressione di contatto SLU: $\sigma_{max} = 3.21 \text{ kg/cm}^2$

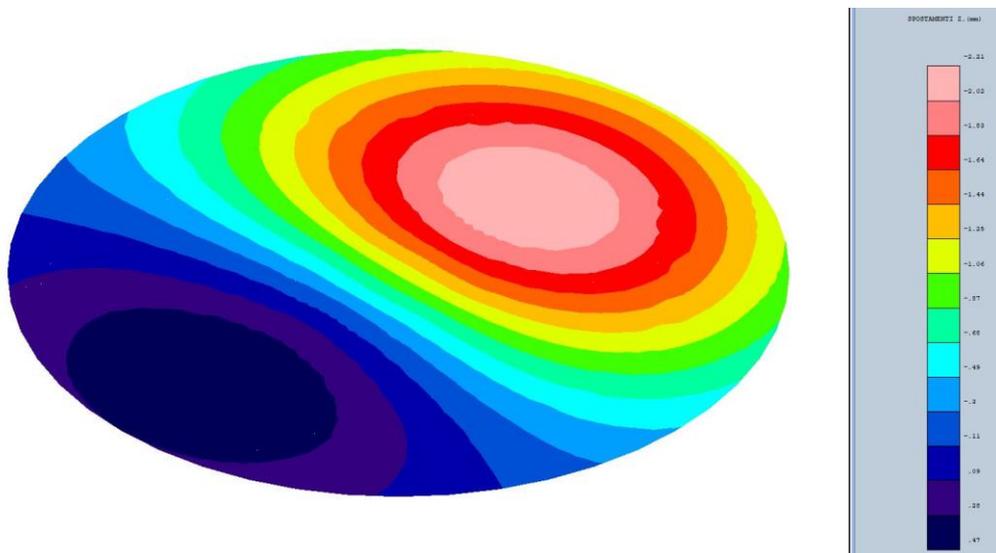
b – CEDIMENTI ATTESI

COLORMAP SPOSTAMENTI VERTICALI COMBINAZIONE 1 (P.P. + PERM.)



Spostamento massimo SLE: $w_1 = 0.71 \text{ mm}$

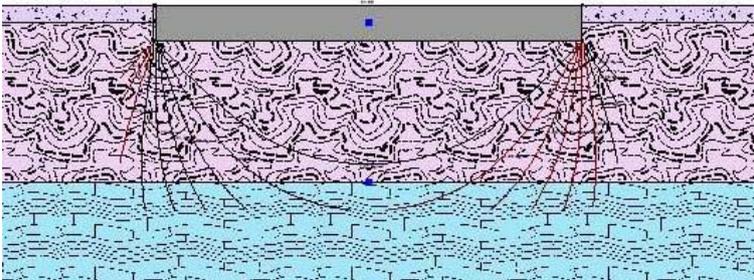
COLORMAP SPOSTAMENTI VERTICALI COMBINAZIONE 2 (P.P. + PERM. + AZIONI TORRE)



Spostamento massimo SLE: $w_{es} = 2.21 \text{ mm}$

VERIFICA DI RESISTENZA DEL TERRENO (GEO)

Le verifiche geotecniche sono state condotte con l'ausilio del software LoadCap 2020, programma di verifiche geotecniche per fondazioni superficiali.



DATI GENERALI

```
=====
```

Diametro della fondazione	24.50	m
Profondità piano di posa	3.00	m
Altezza di incastro	0.60	m
Pressione massima sul terreno	3.21	kg/cm ²
Cedimento massimo atteso	2.21	mm

```
=====
```

La presenza del substrato lapideo offre una resistenza di progetto molto alta, i cedimenti massimi sono trascurabili.

8 Conclusioni

Il presente elaborato contiene i calcoli preliminari delle strutture di fondazione degli aerogeneratori previsti nel progetto del Parco eolico in località "Perda Pinta", proposto dalla società Nuoro Wind S.r.l., da installare nel comune di Nuoro (Provincia di Nuoro).

Con riferimento ai carichi di progetto, alla caratterizzazione geotecnica preliminare nonché ai risultati delle verifiche di stabilità, resistenza delle strutture e del terreno di fondazione, si può riassumere quanto segue:

nei siti di installazione degli aerogeneratori in progetto è stata verificata una fondazione diretta a pianta circolare, avente diametro di 24.50 m e spessore massimo pari a 2.80 metri;

la presenza di un substrato roccioso offre una resistenza di progetto molto elevata ed i cedimenti massimi sono trascurabili;

nei siti di installazione in cui, nell'ambito delle indagini geologiche e geotecniche da condursi nella fase più avanzata della progettazione, fosse rinvenuta alla quota di posa del basamento la presenza di materiale sabbioso di natura granitica di spessore superiore al valore ipotizzato, la profondità di scavo dovrà essere opportunamente incrementata e la quota ottimale di posa potrà essere recuperata con calcestruzzo magro dello spessore necessario (50÷100 cm).

Nelle fasi più avanzate della progettazione, pertanto, sarà indispensabile disporre di dati geotecnici specifici per ogni singola postazione eolica al fine di confermare o, se necessario, variare le previsioni ed i calcoli qui riportati in via preliminare.