



PROGETTO PER LA COSTRUZIONE E L'ESERCIZIO DI UN
IMPIANTO EOLICO DELLA POTENZA DI 61,2 MW
DENOMINATO "LACCANU" DA REALIZZARSI NEI
COMUNI DI BESSUDE, ITTIRI, THIESI E BANARI (SS) CON
LE RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE

RELAZIONE DI CALCOLO PER IL PREDIMENSIONAMENTO DELLE FONDAZIONI DEGLI AEROGENERATORI

Rev. 0.0

Data: 27 novembre 2023

QQR-WND-026.REL045a

Committente:

Queequeg Renewables Due S.r.l.
Piazza Cinque Giornate, 10
C. F. e P. IVA: 04578310163
PEC: queequegrenewablesdue@pec.it

Progetto e sviluppo:

Queequeg Renewables, ltd
2nd Floor, the Works,
14 Turnham Green Terrace Mews,
W41QU London (UK)
Company number: 11780524
email: mail@quren.co.uk

PROGETTO PER LA COSTRUZIONE E L'ESERCIZIO DI UN IMPIANTO EOLICO DELLA POTENZA DI 61.2 MW DENOMINATO "LACCANU" DA REALIZZARSI NEI COMUNI DI BESSUDE, ITTIRI, THIESI E BANARI (SS) CON LE RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE

COMMITTENTE: Queequeg Renewables Due S.r.l.

PROGETTISTA: Ing. Giuseppe Pili

OGGETTO DELL'ELABORATO:

RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO DELLE FONDAZIONI DEGLI AEROGENERATORI

INDICE

PREMESSA

NORMATIVE DI RIFERIMENTO

INQUADRAMENTO TERRITORIALE

CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

DESCRIZIONE DELL'OPERA DI FONDAZIONE

CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

TIPO DI ANALISI E MODELLO DI CALCOLO

CONDIZIONI DI CARICO

AZIONI SISMICHE

MODELLAZIONE CARICHI

VERIFICHE

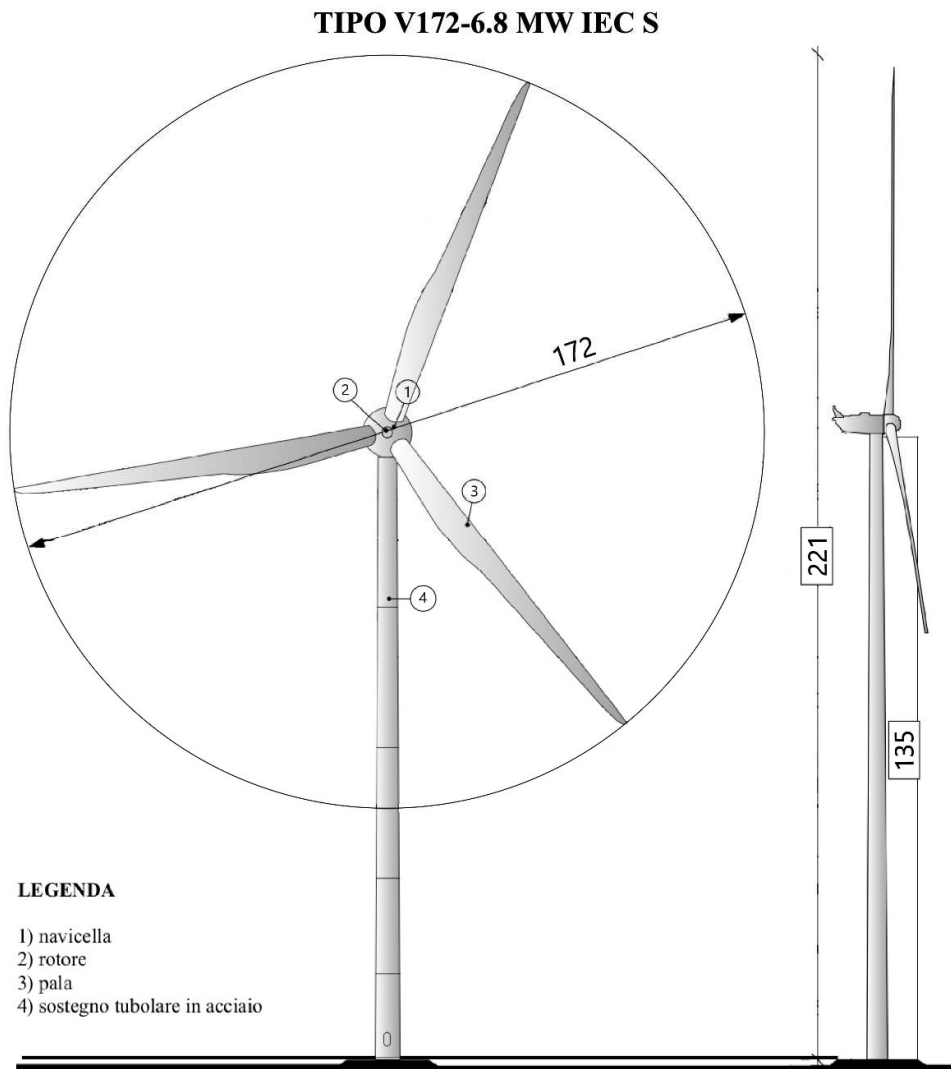
- GENERALITA'
- VERIFICA STABILITA' GLOBALE (EQU)
- VERIFICHE GEOTECNICHE (GEO) E STRUTTURALI (STR)

PREMESSA

La presente relazione ha per oggetto i calcoli di predimensionamento, con le relative verifiche agli Stati Limite Ultimi (D.M.17 Gennaio 2018), delle opere di fondazione di un parco eolico da realizzarsi su un'area in agro e ricadente nei territori comunali di Ittiri, Banari, Bessude e Thiesi (SS).

L'impianto sarà costituito da n. 9 aerogeneratori tripala, ad asse orizzontale, aventi ciascuno una potenza nominale di 6,8 MW per una potenza complessiva di 61,2 MW.

Le dimensioni degli aerogeneratori prevedono un'altezza al mozzo di 135 metri, diametro del rotore di 172 metri, ed un'altezza complessiva massima, fuori terra, di 221 metri.



La fondazione di tipo diretto (superficiale), costituita da un plinto in calcestruzzo, viene calcolata per sopportare, oltre al carico dell'aerogeneratore (torre, cabina di trasformazione e rotore) anche le sollecitazioni prodotte delle pale in movimento.

Le verifiche di stabilità del terreno e delle strutture di fondazione vengono eseguite con i metodi ed i procedimenti della geotecnica, tenendo conto delle massime sollecitazioni sul terreno che la struttura trasmette.

Tutti i calcoli di seguito riportati e la relativa scelta di materiali, sezioni e dimensioni andranno verificati in sede di progettazione esecutiva e potranno pertanto subire variazioni anche sostanziali per mantenere i necessari livelli di sicurezza.

Le caratteristiche geologiche e geotecniche dei terreni sono state estratte dallo studio geologico allegato al presente progetto.

NORMATIVE DI RIFERIMENTO

- Legge nr. 1086 del 05/11/1971: Norme per la disciplina delle opere in conglomerato cementizio, normale e precompresso ed a struttura metallica.
- Legge nr. 64 del 02/02/1974: Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche.
- D.M. LL.PP. del 11/03/1988: Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione.
- D.M. LL.PP. del 14/02/1992: Norme tecniche per l'esecuzione delle opere in cemento armato normale e precompresso e per le strutture metalliche.
- D.M. 9 Gennaio 1996: Norme Tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato normale e precompresso e per le strutture metalliche
- D.M. 16 Gennaio 1996: Norme Tecniche relative ai 'Criteri generali per la verifica di sicurezza delle costruzioni e dei carichi e sovraccarichi
- D.M. 16 Gennaio 1996: Norme Tecniche per le costruzioni in zone sismiche
- Circolare Ministero LL.PP. 15 Ottobre 1996 N. 252 AA.GG. /S.T.C.: Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche di cui al D.M. 9 Gennaio 1996
- Circolare Ministero LL.PP. 10 Aprile 1997 N. 65/AA.GG.: Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le costruzioni in zone sismiche di cui al D.M. 16 Gennaio 1996

- Norme Tecniche per le Costruzioni 2018 (D.M. 17 Gennaio 2018)
- Circolare 7 del 21/01/2019 C.S.LL.PP.: Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni"» di cui al Decreto Ministeriale 17 gennaio 2018
- CEI EN IEC 61400-1 (CEI 88-1) "Sistemi di generazione da fonte eolica – Parte 1: Prescrizioni di progettazione"

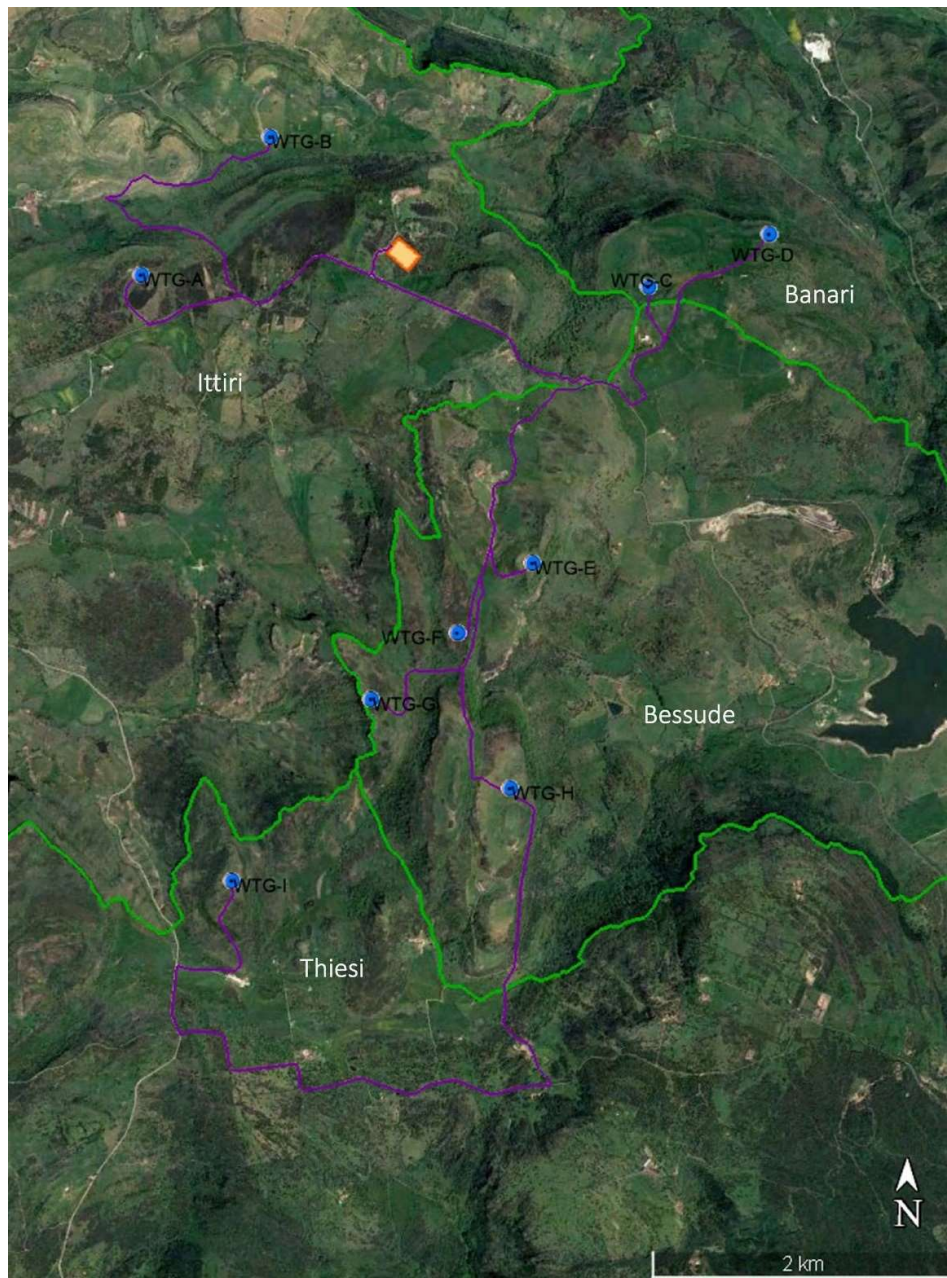
INQUADRAMENTO TERRITORIALE

Il proposto parco eolico "Laccanu" ricade a cavallo tra due regioni storiche della Regione Autonoma della Sardegna denominate *Mejlogu* e *Coros*. In particolare, dei 9 aerogeneratori a progetto, due sono localizzati nel territorio comunale di Ittiri, quattro in quello di Bessude, uno in quello di Thiesi, e due in quello di Banari, attraversandolo diagonalmente da nord-est a sud-ovest i limiti territoriali dei Comuni.



Sono indicati nel dettaglio i Fogli di Mappa nei quali ricadono gli aerogeneratori:

- Cartografia ufficiale dell'Istituto Geografico Militare (I.G.M) Serie 25 [Scala 1:25 000]:
 - Foglio 479 Sezione I "Ittiri";
- Carta Tecnica Regionale (C.T.R.) [Scala 1:10 000]:
 - Foglio 479040 Sezione "Diga e' su Bidighinzu";
 - Foglio 479080 Sezione "Monte Cheia";



Area di intervento e confini comunali (in verde) su immagine estratta da Google Earth 2022

Di seguito le coordinate assolute nel sistema Gauss Boaga – Roma 40 dei nuovi aerogeneratori:

Aerogeneratore	X	Y
WTG-A	1466416	4491683
WTG-B	1467444	4492475
WTG-C	1469729	4491645
WTG-D	1470480	4491984
WTG-E	1468902	4489845
WTG-F	1468444	4489393
WTG-G	1467909	4488960
WTG-H	1468787	4488403
WTG-I	1467045	4487770

Le opere di connessione da realizzare riguardano esclusivamente il comune di Ittiri, in cui è ipotizzata la connessione elettrica a 36kV dell'impianto alla RTN presso la sezione a 36kV della attuale SE RTN di Terna a 380kV da inserire in entra – esce alla linea 380 kV.

CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

Le turbine del parco "Laccanu" ricadono nella regione del Logudoro, un settore che sin dal Terziario è stato interessato dai movimenti tettonici distensivi che hanno coinvolto l'area Mediterranea e che in Sardegna hanno determinato la genesi della Fossa Sarda, una vasta fossa tettonica che si estende in direzione NW-SE dal Golfo dell'Asinara sino al Golfo di Cagliari.

In generale l'intera area interessata dal progetto è caratterizzata da tre principali tipologie di rocce vulcaniche, delle quali le più diffuse sono i depositi di flusso piroclastico in facies ignimbrítica e secondariamente andesitiche e di conseguenza ad ampi settori monolitologici dai caratteri omogenei.

Le prove eseguite hanno permesso di fatto di definire il modello geologico del sito ed in particolare, in relazione alle diverse condizioni geologiche e geostrutturali rilevate, è stato individuato nr.01 modello geologico rappresentativo descritto di seguito e sulla base del quale verrà condotto il calcolo di predimensionamento strutturale.

Il modello geologico rilevato viene sintetizzato nella tabella seguente:

MODELLO GEOLOGICO 01 (T01 → T09)						
SITO		"PROGETTO LACCANU"				
TIPO DI TERRENO		S0	S2	S3	S4	S5
DESCRIZIONE		Terreno di riporto	Calcari e calcareniti tenere e fratturate	Calcari e calcareniti litoidi integri	Vulcaniti litoidi fratturati	Vulcaniti litoidi integri
Spessore	[m]	4,00	5,00	5,00	10,00	10,00
Quota	[m]	-4,00	-6,00	-11,00	-21,00	-31,00
Peso di volume	[kN/mc]	18,633	21,575	23,536	21,084	21,084
Peso di volume saturo	[kN/mc]	19,123	22,555	24,517	22,065	22,065
Angolo di attrito interno	[°]	38°	28°	32°	30°	36°
Dati Parametri Resistenza						
Coesione	[kPa]	150	0	0	0	0
Dati Parametri Deformabilità						
Velocità onde di taglio	[m/sec]	420	600	850	650	950
Coefficiente di Poisson	[]	0,33	0,30	0,30	0,25	0,25
Modulo elastico (E)	[kPa]	147.100	515.000	1.127.000	568.000	1.213.000
Modulo di taglio (G)	[kPa]	55.300	198.000	434.000	227.000	485.000

Nella discretizzazione del modello geologico verrà assunto uno strato di ricoprimento (S0) avente lo scopo di simulare il volume di riporto steso sull'estradosso del plinto.

In fase di verifica, per la modellazione del terreno caratterizzato dalla presenza di roccia, si assumerà a favore di sicurezza una coesione pari a 0,00 kPa.

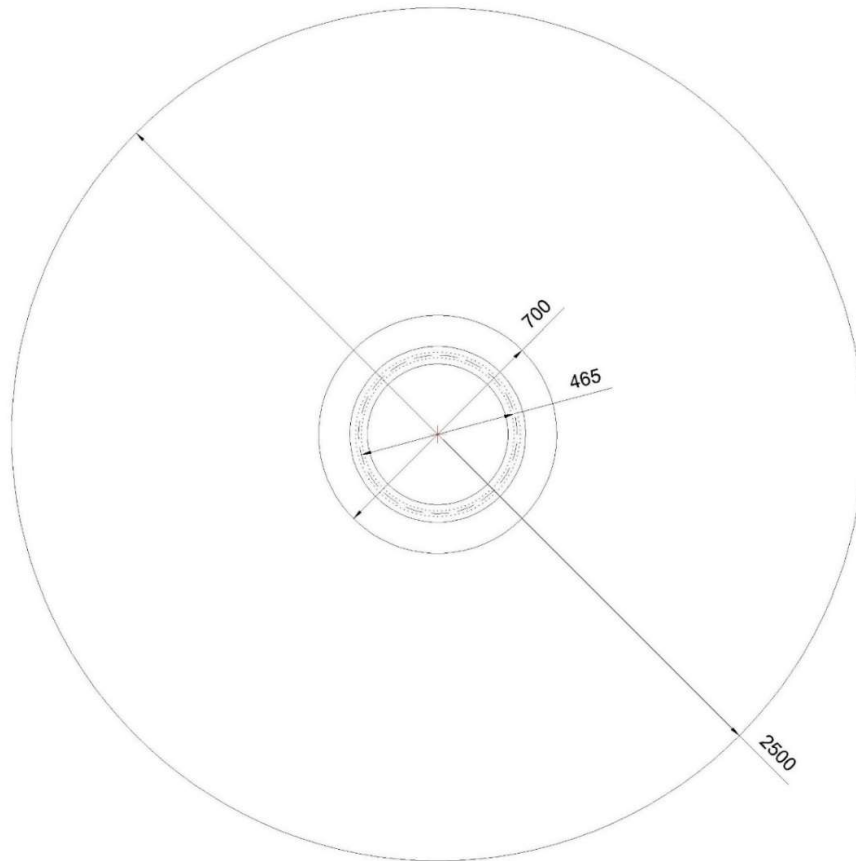
In fase di progettazione esecutiva il modello geologico individuato dovrà essere confermato da indagini specifiche e puntuali sui siti di imposta dei singoli aerogeneratori.

DESCRIZIONE DELL'OPERA DI FONDAZIONE

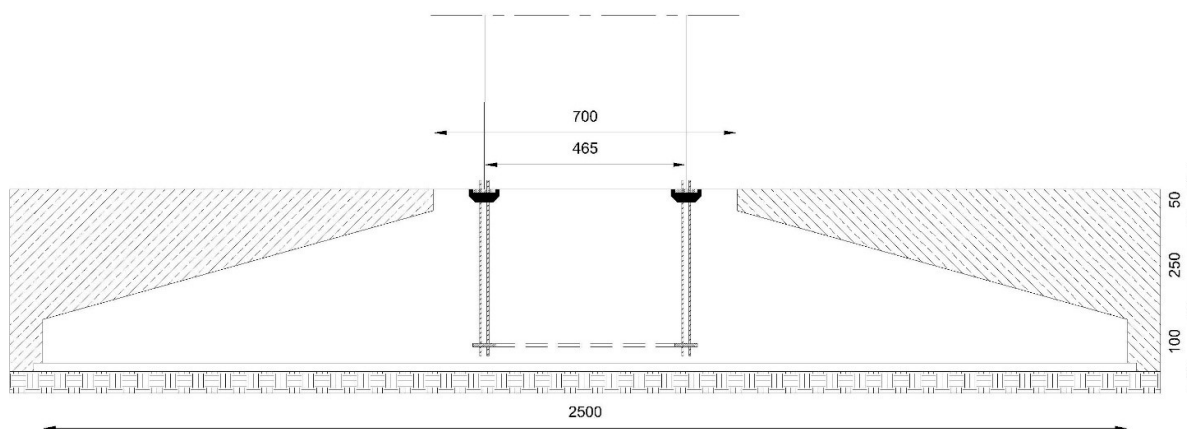
Il dimensionamento preliminare, in attesa della scelta progettuale del committente, tiene conto del modello tipologico di aerogeneratore descritto in premessa.

In questa fase si prevede la realizzazione di opere di fondazione di tipo diretto costituite da un plinto con forma tronco-conica, circolare in pianta con diametro massimo pari a 25,00 metri, ed una sezione trapezia avente altezza minima al bordo esterno pari a 1,00 metri, altezza di 2,50 metri nel profilo della connessione della parte tronco-conica con il colletto centrale dove raggiunge i 4,00 metri altezza.

PIANTA MODELLO PLINTO AEROGENERATORE D.25,0 m.



SEZIONE MODELLO PLINTO AEROGENERATORE D.25,0 m.



Volume plinto: $V_p = 1.065,78 \text{ m}^3$

Peso proprio plinto: $W_p = 26.111,61$ kN

Volume netto terreno riportato di ricoprimento: $V_t = 897,7$ m³

Peso proprio netto terreno riportato di ricoprimento: $W_t = 14.004,12$ kN

In corrispondenza del colletto centrale, punto di connessione tra il plinto e la torre eolica, è prevista l'installazione di una doppia flangia collegata alla gabbia di ancoraggio ("anchor cage") che ha la funzione di rendere solidale alla fondazione la soprastante turbina eolica.

Quella inferiore, rialzata rispetto al piano di posa del plinto di fondazione, viene collegata dai tirafondi, aventi una lunghezza di 4000 millimetri, con la piastra superiore su cui si inserisce la flangia di giunzione della torre eolica.

Sia la piastra inferiore, che quella superiore sono dotate di due file di fori disposte radialmente rispetto al centro della base circolare della torre; sono disposti 120 fori su 2 file su cui andranno inserite 240 barre filettate ancorate sulla piastra inferiore e annegate in opera per il collegamento della flangia della torre eolica.

In aderenza al plinto di fondazione dovrà essere previsto opportuno drenaggio per l'allontanamento delle acque dalla fondazione.

CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

Le caratteristiche dei materiali adottati per il predimensionamento delle fondazioni in calcestruzzo armato sono le seguenti:

- Acciaio: B450C
- Calcestruzzo per il sottofondo: C16/20
- Calcestruzzo per il plinto: C35/45
- Calcestruzzo per il colletto: C50/60
- Malta fibrorinforzata per sigillatura "anchor cage": C90/105

Nelle verifiche di predimensionamento il comportamento dei materiali è assunto in regime elastico lineare.

TIPO DI ANALISI E MODELLO DI CALCOLO

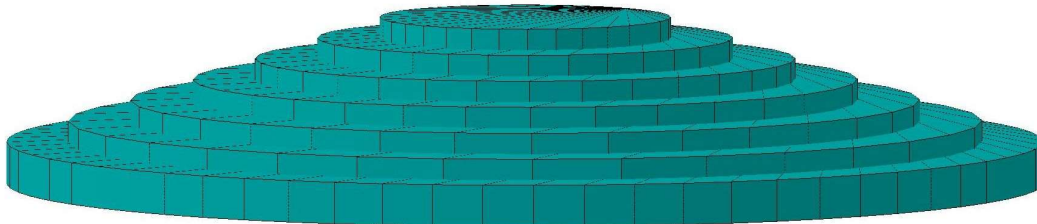
Il metodo di analisi utilizzato è quello statico, che modella le azioni dinamiche agenti sulla struttura mediante l'applicazione di forze statiche equivalenti.

Le forze applicate sono comprensive degli effetti dinamici ordinari delle azioni che rappresentano. Per determinare le sollecitazioni, agenti sul terreno e sul plinto di fondazione, sono state combinate tra di loro le azioni gravitazionali (peso proprio del plinto e del terreno gravante su di esso), le azioni equivalenti dell'aerogeneratore e le azioni sismiche, secondo quanto previsto dalla normativa vigente.

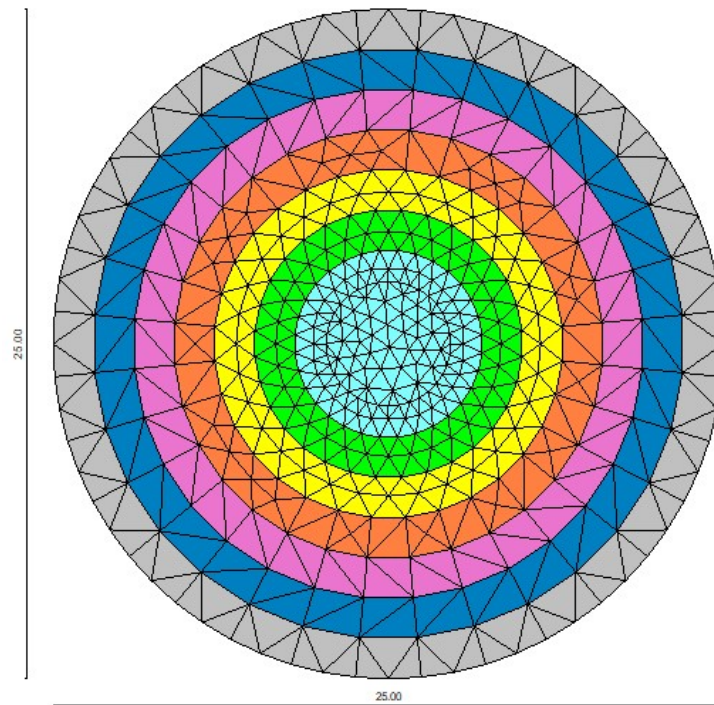
Le sollecitazioni sono state quindi ottenute mediante un'analisi agli elementi finiti (FEM), eseguita tramite l'ausilio del Software dell'Aztec Informatica, API++ vers.16.01.B (licenza n°AIU6197B1).

Le sollecitazioni, ottenute dall'analisi agli elementi finiti, vengono sintetizzate nelle immagini di output del software di calcolo; la restituzione grafica delle sollecitazioni fornisce un importante strumento di analisi che evidenzia con immediatezza le condizioni di maggiore sollecitazione del plinto di fondazione.

Per il calcolo geotecnico e strutturale, e le successive verifiche, l'opera di fondazione è stata schematizzata come una piastra a spessore variabile.



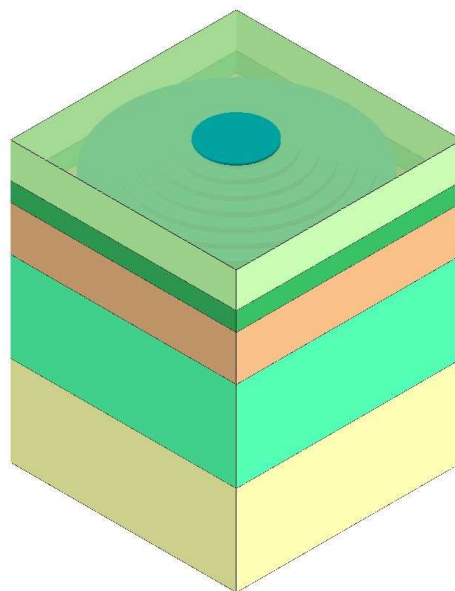
La struttura è stata discretizzata ovvero suddivisa in elementi triangolari (mesh) connessi fra di loro in corrispondenza dei nodi; per l'analisi della piastra soggetta a carichi nel piano vengono utilizzati elementi triangolari a 6 nodi.



Il plinto di fondazione, modellato come piastra circolare a spessori variabili viene così suddivisa:

- 820 mesh;
- 443 nodi;

Viene generato un nodo in corrispondenza dei 30 carichi concentrati applicati.



Vista 3D del modello FEM con stratigrafia del terreno

Il terreno di fondazione viene modellato con delle molle disposte in corrispondenza dei nodi.

La rigidezza delle molle è proporzionale alla costante di sottofondo k ed all'area dell'elemento.

CONDIZIONI DI CARICO

Nella fase di predimensionamento si utilizzano i carichi sulle fondazioni calcolati in accordo alla norma IEC 61400-1 Ed.4 e definiti per un aerogeneratore di riferimento; in questo caso, in attesa della scelta dell'aerogeneratore che verrà installato nel "Progetto Laccanu", verranno adottati i carichi di progetto estratti dalla bibliografia tecnica e determinati per un aerogeneratore avente un rotore con diametro di 170 m ed un'altezza al mozzo di 135 m.

Si rimanda alla fase di progettazione esecutiva il dimensionamento sui dati relativi al fornitore scelto.

Extreme loads 170-H 135

Load factor	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)	Mx (kNm)	My (kNm)	Mz (kNm)
1,1	1899,37	-30,2	-8518,03	10542,98	248324,9	848,69

I carichi "Extreme loads" sono i carichi statici massimi calcolati per qualsiasi condizione.

Includono il comportamento dinamico della struttura e corrispondono al caso più sfavorevole alla base dell'aerogeneratore tra i diversi casi di carico, secondo la norma IEC 61400-1.

I carichi "Extreme loads" sono i carichi di progetto della fondazione e non devono essere divisi o combinati con altri carichi.

Characteristic load SG 6.0-170 HH 135

Load factor	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)	Mx (kNm)	My (kNm)	Mz (kNm)
1,0	1316,18	54,14	-7707,99	2463,44	186812,5	294,48

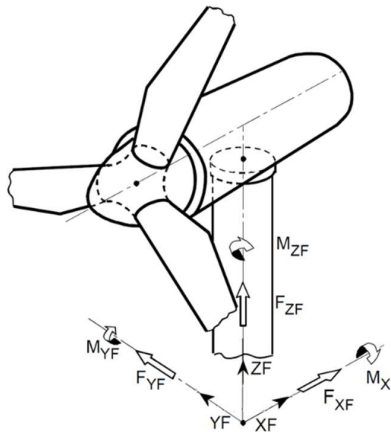
Quasi-permanent load SG 6.0-170 HH 135

Load factor	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)	Mx (kNm)	My (kNm)	Mz (kNm)
1,0	1006,5	113,9	-7544,75	20249,99	139551,8	4991,2

Fatigue load 170-H 135 (valore medio)

Load factor	F _x (kN)	F _y (kN)	F _z (kN)	M _x (kNm)	M _y (kNm)	M _z (kNm)
1,0	478,42	-5,29	-7608,11	4649,15	66600,68	-58,85

I carichi sono applicati ad una quota di 0,20 m. dalla base della torre ovvero dal punto di intersezione fra la torre eolica e l'estradosso del plinto di fondazione secondo il sistema di coordinate riportato nell'immagine seguente:



Oltre a tali sollecitazioni, si considera agente sulle opere di fondazione il carico prodotto dal terreno di ricoprimento del plinto.

Per la verifica degli elementi strutturali del nodo torre/plinto di fondazione e per la verifica delle fondazioni le sollecitazioni sopra riportate sono state combinate secondo quanto previsto al punto 2.5.3 del D.M. 17/01/2018:

- Combinazione fondamentale (Extreme load), impiegata per gli stati limite ultimi (SLU):

$$\gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \gamma_{Q3} \cdot \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots \quad [2.5.1]$$

- Combinazione caratteristica (Characteristic load), cosiddetta rara, generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) irreversibili:

$$G_1 + G_2 + P + Q_{k1} + \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots \quad [2.5.2]$$

- Combinazione quasi permanente (Quasi-permanent load), generalmente impiegata per gli effetti a lungo termine (SLE):

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots \quad [2.5.4]$$

- Combinazione sismica, impiegata per gli SLU ed SLE connessi all'azione sismica E:

$$E + G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots \quad [2.5.5]$$

Nella tabella seguente vengono indicati i coefficienti parziali di sicurezza per i carichi nelle verifiche agli Stati limite ultimi in accordo al D.M. 17/01/2018 (NTC 2018).

AZIONE	TIPO DI CARICO	COEFFICIENTE γ_F	COEFFICIENTI PARZIALI FAVOREVOLI / SFAVOREVOLI		
			EQU	A1	A2
Peso proprio fondazione (W_p)	Permanente proprio (G_1)	γ_{G1}	0,9 / 1,1	1,0 / 1,3	1,0 / 1,0
Peso terreno riempimento (W_t)	Permanente portato (G_2)	γ_{G2}	0,8 / 1,5	0,8 / 1,5	0,8 / 1,3
Peso aerogeneratore (F_z)	Permanente portato (G_2)	γ_{G2}	0,8 / 1,5	0,8 / 1,5	0,8 / 1,3
Vento aerogeneratore (F_y, M_x, M_z)	Variabile (Q)	γ_Q	0,0 / 1,5	0,0 / 1,5	0,0 / 1,3

Nella tabella seguente vengono indicati i coefficienti parziali di sicurezza per i carichi nelle verifiche agli Stati limite ultimi in accordo alla norma IEC 61400-1.

AZIONE	TIPO DI CARICO	COEFFICIENTE γ_F	COEFFICIENTI PARZIALI FAVOREVOLI / SFAVOREVOLI		
			NORMAL	ABNORMAL	FATIGUE
Peso proprio fondazione (W_p)	Permanente proprio (G_1)	γ_{G1}	0,9 / 1,35	0,9 / 1,1	1,0
Peso terreno riempimento (W_t)	Permanente portato (G_2)	γ_{G2}	0,9 / 1,35	0,9 / 1,1	1,0
Peso aerogeneratore (F_z)	Permanente portato (G_2)	γ_{G2}	0,9 / 1,35	0,9 / 1,1	1,0
Vento aerogeneratore (F_y, M_x, M_z)	Variabile (Q)	γ_Q	0,9 / 1,35	0,9 / 1,1	1,0

AZIONI SISMICHE

Nello sviluppo dei calcoli strutturali e per le verifiche geotecniche si valutano le sollecitazioni prodotte dell'azione sismica.

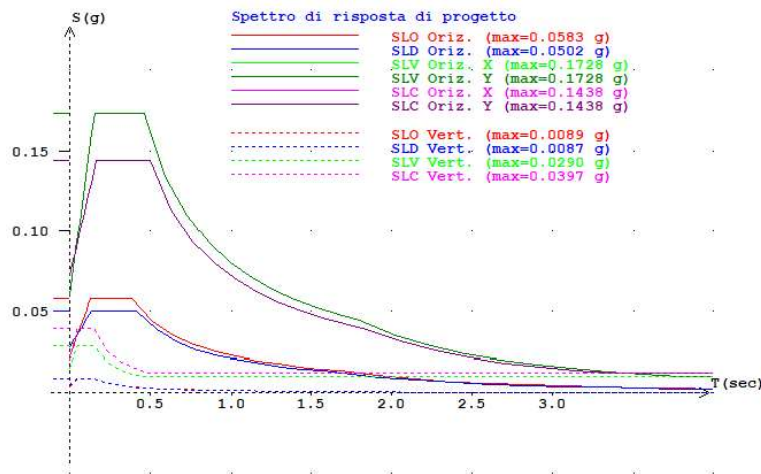
Nel presente progetto, l'azione sismica è stata valutata tenendo conto dei seguenti parametri:

- Classe d'uso: II (Punto 2.4.2 del D.M. 17/01/2018);
- Vita nominale: 50 anni (Punto 2.4.1 del D.M. 17/01/2018);
- Categoria di suolo: B (Punto 3.2.2 del D.M. 17/01/2018);
- Categoria topografica: T1 (Tabella 3.2.III del D.M. 17/01/2018);

Si riportano i parametri sismici di riferimento per la Sardegna contenuti nel D.M.14/01/2008 – Allegato B, Tabella 2:

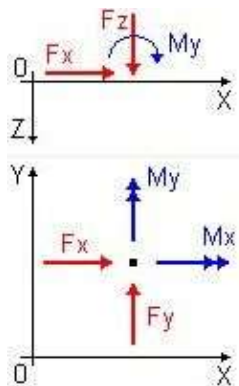
SITO	TR=30			TR=50			TR=72		
	a _g	F _o	T _c *	a _g	F _o	T _c *	a _g	F _o	T _c *
SARDEGNA	0,186	2,61	0,273	0,235	2,67	0,296	0,274	2,70	0,303
	TR=101			TR=140			TR=201		
	a _g	F _o	T _c *	a _g	F _o	T _c *	a _g	F _o	T _c *
	0,314	2,73	0,307	0,351	2,78	0,313	0,393	2,82	0,322
	TR=475			TR=975			TR=2475		
	a _g	F _o	T _c *	a _g	F _o	T _c *	a _g	F _o	T _c *
	0,500	2,88	0,340	0,603	2,98	0,372	0,747	3,09	0,401

Considerando tali valori si ottengono i seguenti spettri di risposta elastici che, utilizzando un fattore di struttura $q = 1$, coincidono con gli spettri di risposta di progetto:



MODELLAZIONE CARICHI

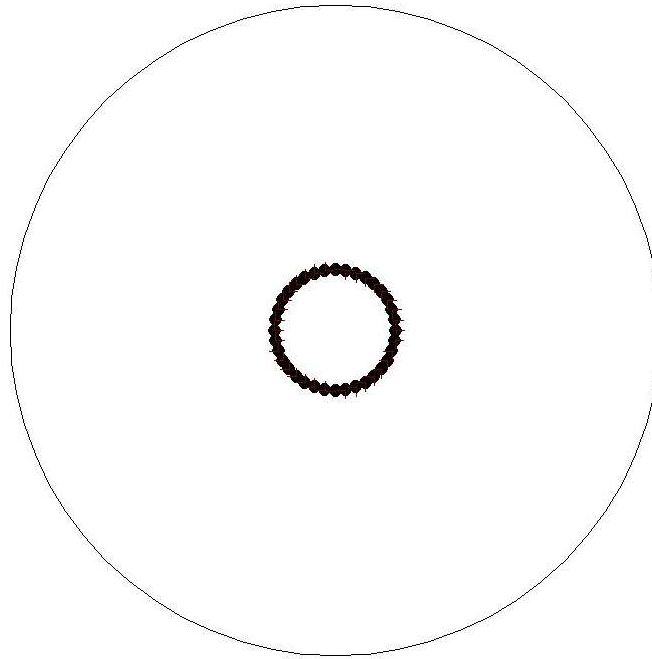
Le azioni provenienti dalla struttura in elevazione sono state applicate al modello FEM della piastra di fondazione in accordo al sistema di riferimento del software, rappresentato nella figura seguente.



Le azioni, applicate come risultanti nel baricentro strutturale (Punto 0;0) sono state distribuite in una circonferenza avente diametro 4,65 metri e corrispondente alla circonferenza media di ancoraggio della flangia dell'aerogeneratore.

La generazione crea una serie di carichi di diversa entità che si applicano come risultante su una circonferenza; in questo caso i momenti vengono trasformati in sforzi normali di trazione e compressione applicati ad una distanza pari al raggio della circonferenza.

La sollecitazione trasmessa dalla torre eolica sulla fondazione è stata scomposta in 30 punti (disposizione radiale con passo di 12°); i punti di applicazione sono così ricavati:



Parametri per la redistribuzione delle forze:

$N = 30$ - Numero di punti di applicazione del carico;

$d = 4,65$ metri - Diametro medio della gabbia dei tirafondi;

$D = 25,0$ metri - Diametro massimo del plinto;

In considerazione della simmetria della struttura, e della possibilità di completa rotazione dell'aerogeneratore lungo il suo asse, le condizioni di carico si potranno verificare in ognuna delle direzioni uscenti dal centro della torre; convenzionalmente si applicheranno le azioni su un sistema orientato secondo gli assi di riferimento principali X, Y e Z.

I risultati ottenuti saranno quindi applicabili per qualsiasi orientamento dell'aerogeneratore e delle sollecitazioni di esercizio da esso prodotte.

VERIFICHE

GENERALITA'

Le verifiche di sicurezza, condotte con il "Metodo degli Stati Limite" (SLU e SLE), sono le seguenti:

- 1) Stati limite ultimi SLU di equilibrio come corpo rigido (EQU);
 - Verifica di stabilità globale;
- 2) Stati limite ultimi SLU di resistenza della struttura di fondazione (STR):
 - Verifica di resistenza a flessione/taglio della piastra di fondazione;
 - Verifica a punzonamento;
- 3) Stati limite ultimi SLU di resistenza del terreno (GEO);
 - Verifica del carico limite dell'insieme fondazione-terreno;
 - Verifica dei cedimenti massimi assoluti e differenziali;
 - Verifica a scorrimento sul piano di posa;
- 4) Stati limite di esercizio SLE:
 - Verifica a fessurazione della piastra di fondazione;

La verifica di stabilità globale viene effettuata, analogamente a quanto previsto nel § 6.8, secondo la Combinazione 2 (A2+M2+R2) dell'Approccio 1, tenendo conto dei coefficienti parziali riportati nelle Tabelle 6.2.I e 6.2.II per le azioni e i parametri geotecnici e nella Tab. 6.8.I per le resistenze globali.

Le rimanenti verifiche devono essere effettuate applicando la combinazione (A1+M1+R3) di coefficienti parziali prevista dall'Approccio 2, tenendo conto dei valori dei coefficienti parziali riportati nelle Tabelle 6.2.I, 6.2.II e 6.4.I.

Nelle verifiche nei confronti di SLU di tipo strutturale (STR), il coefficiente γ_R non deve essere portato in conto.

VERIFICA STABILITA' GLOBALE (EQU)

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

VERIFICA A RIBALTAMENTO

La verifica si effettua allo stato limite di equilibrio come corpo rigido (EQU).

I carichi, applicati ad una quota di 0,20 m. rispetto alla sommità della fondazione, sono i seguenti:

Fz kN	Fx kN	My kNm
- 8.518,03	1.899,37	248.324,90

I carichi trasmessi alla base della fondazione, ovvero ad una quota di -4,0 m. rispetto alla sommità della fondazione, sono i seguenti:

Peso proprio plinto di fondazione Wp kN	Peso proprio terreno di riempimento Wt kN	Fz kN	Fx kN	My kNm
26.111,61	14.004,12	- 8.518,03	1.899,37	255.682,67

Mr → Momento ribaltante alla base della fondazione ($H_{tot} = 4,00$ m):

$$Mr = Y_Q \cdot (M_x + F_x \cdot H_{tot}) = 1,5 \cdot (255.682,67 + 1.899,37 \cdot 4,00) = 394.920,23 \text{ kNm}$$

Ms → Momento stabilizzante ($r = 12,50$ m):

$$Ms = Y_{G1} \cdot [(F_z + W_p + W_t)] \cdot r = 0,9 \cdot [(8.518,03 + 26.111,61 + 14.004,12) \cdot 12,5] = 547.129,8 \text{ kNm}$$

$$\eta = Ms / Mr = 547.129,8 / 394.920,23 = 1,38 > 1 \text{ VERIFICATO}$$

VERIFICHE GEOTECNICHE (GEO) E STRUTTURALI (STR)

Per la determinazione degli effetti delle azioni, le verifiche saranno effettuate assumendo:

- sezioni interamente reagenti con rigidzze valutate riferendosi al solo calcestruzzo;
- relazioni tensione deformazione lineari;
- valori medi del modulo d'elasticità.

VERIFICHE DI RESISTENZA DEL TERRENO (GEO)**VERIFICA ALLO SCORRIMENTO**

Si riporta la verifica semplificata esplicativa delle resistenze che si oppongono allo scorrimento; l'analisi numerica completa è allegata nei tabulati di calcolo.

$F_h \rightarrow$ Forza agente orizzontale che attiva lo scorrimento:

$$F_h = \gamma_Q \cdot F_x = 1,5 \cdot 1.899,37 = 2.849,06 \text{ kN}$$

$F_r \rightarrow$ Forza resistente orizzontale che si oppone allo scorrimento:

$$F_r = \gamma_{G1} \cdot W_{\text{tot}} \cdot \tan \delta$$

in cui

- W_{tot} è il peso totale dell'aerogeneratore e della fondazione [kN];
- δ è l'angolo di attrito tra fondazione e terreno ed è assunto pari a 2/3 del valore dell'angolo di attrito del terreno ($\delta \approx 0,67 \varphi$);

$$\rightarrow F_r = 0,9 \cdot 33.190,61 \cdot \tan (0,67 \cdot 28) = 10.145,84 \text{ kN}$$

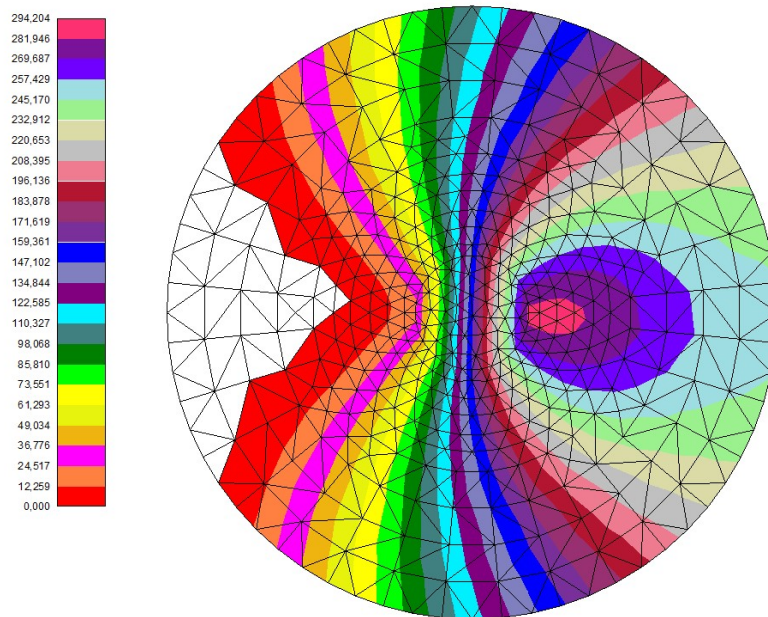
$$\eta = F_r / F_h = 10.145,84 / 2.849,06 = 3,56 > 1 \text{ VERIFICATO}$$

A vantaggio della sicurezza si trascura, oltre che il contributo stabilizzante del terreno riportato di ricoprimento, anche l'azione laterale prodotta dal terreno sulla verticale dello scavo.

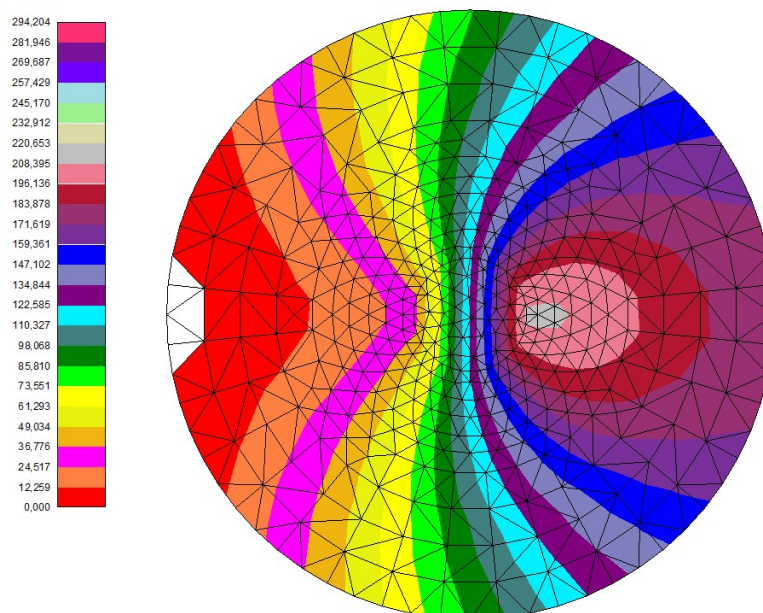
VERIFICA DELLA CAPACITA' PORTANTE DEL TERRENO E DEI CEDIMENTI

Per il calcolo della capacità portante è stato utilizzato l'approccio 2, mentre per il calcolo dei cedimenti, data la natura dello strato di posa della fondazione, è stato utilizzato il metodo elastico.

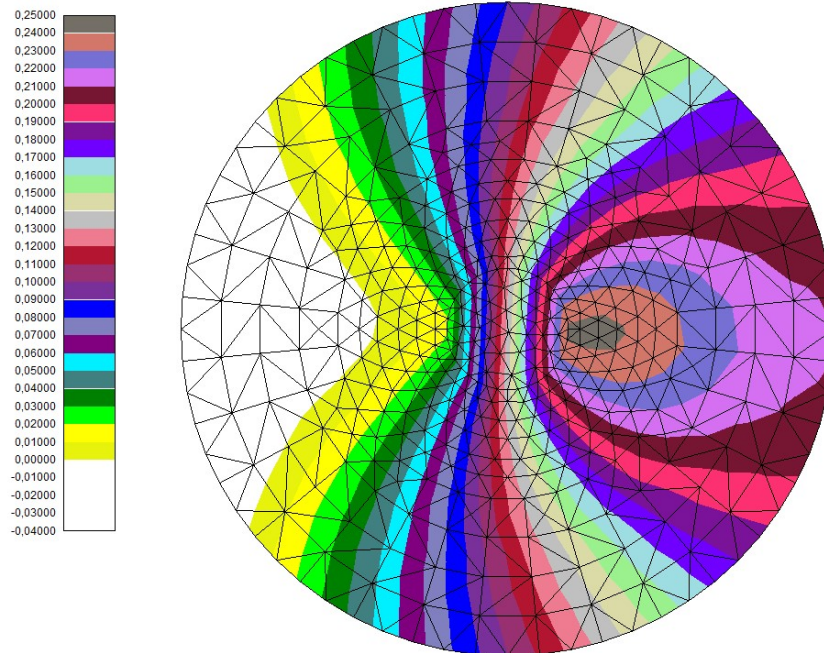
Si allegano i tabulati di output del software di calcolo.



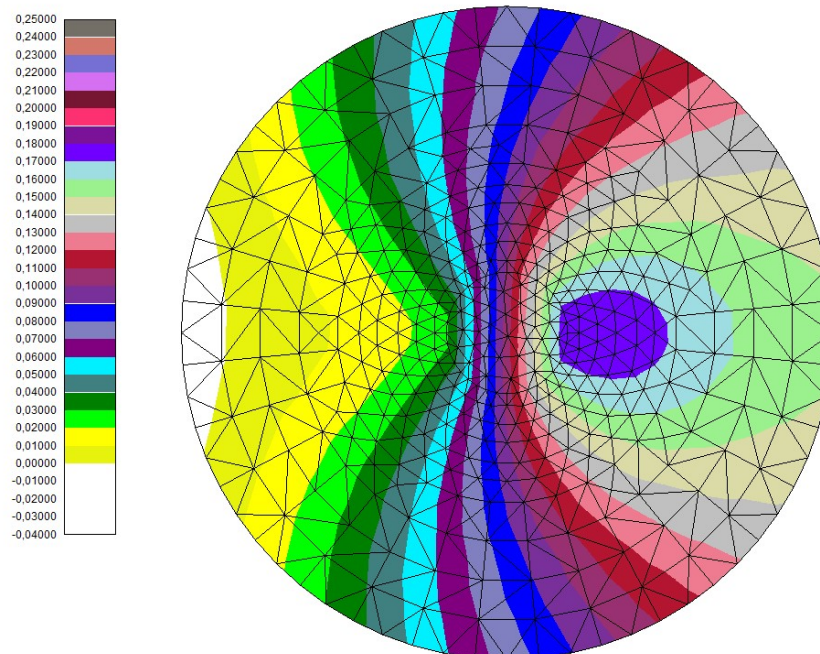
Pressioni [kPa] – SLU (COMB.1)



Pressioni [kPa] – SLE (COMB.2)



Spostamenti verticali (cm) – SLU (COMB.1)



Spostamenti verticali (cm) – SLE (COMB.2)

VERIFICA DI RESISTENZA DELLA FONDAZIONE (STR)

Si riportano nel seguito gli stati tensionali calcolati per il modello strutturale (basamento suddiviso in elementi finiti di sezione variabile) e verificando le sezioni in c.a. con riferimento alle armature tipiche previste negli elaborati tecnici Vestas.

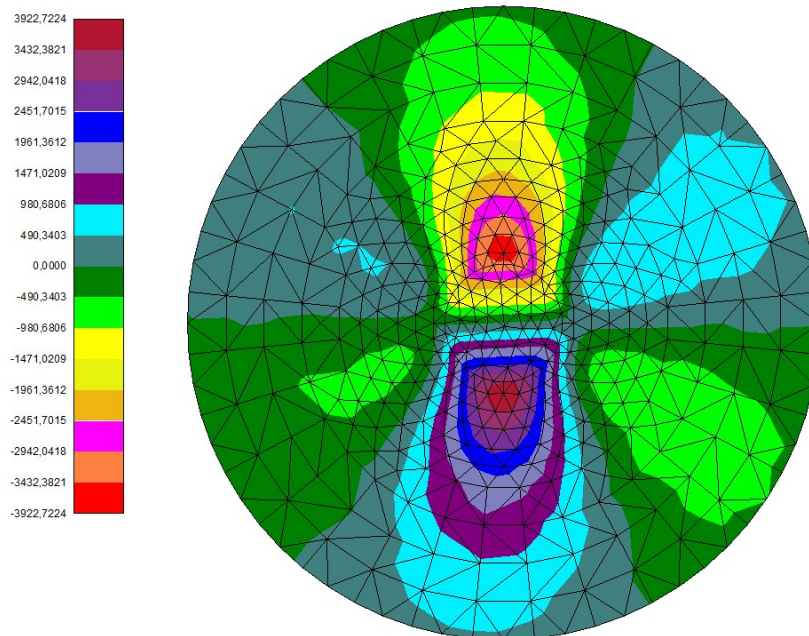
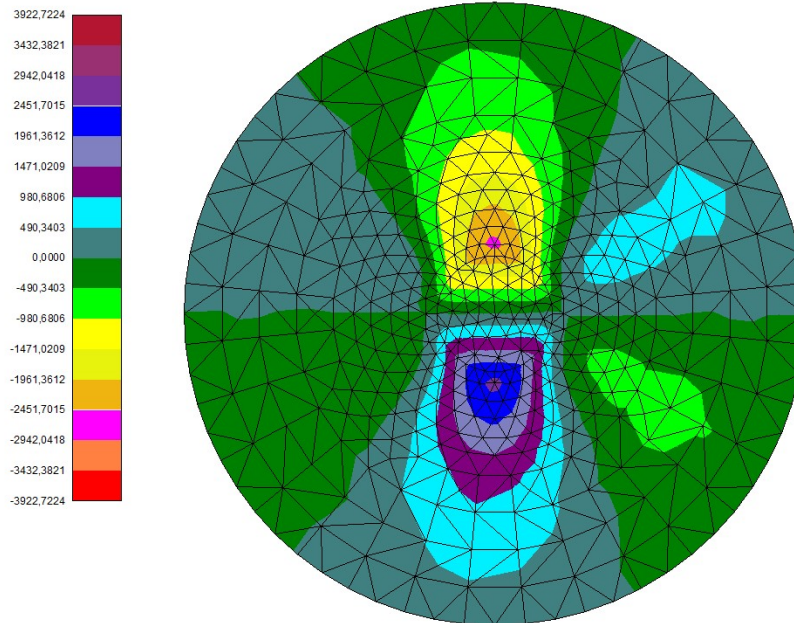
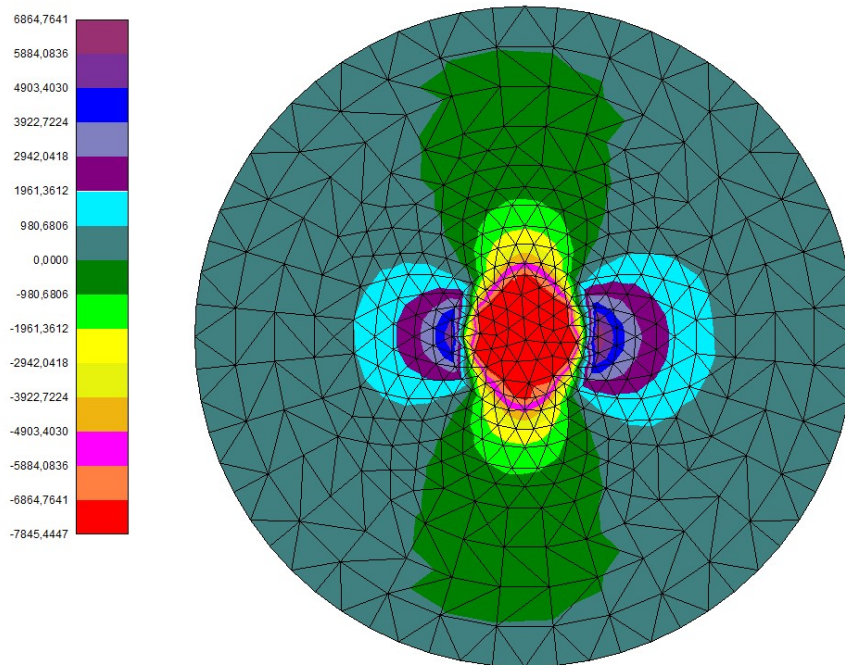
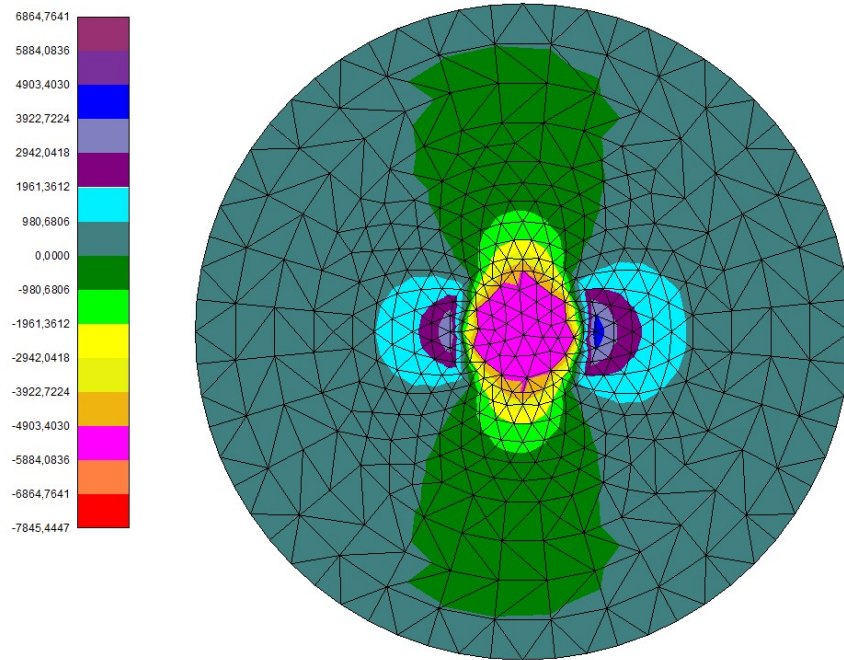
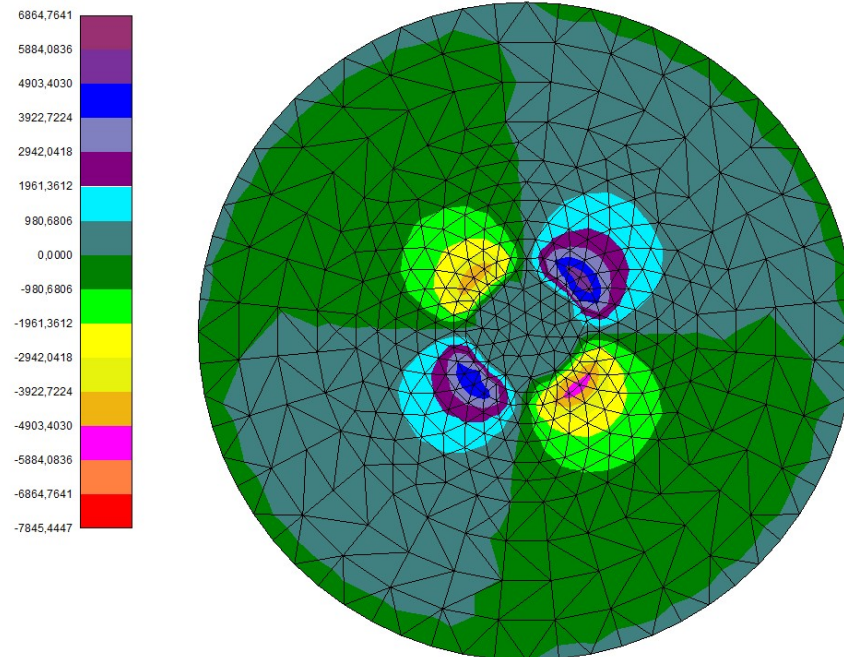
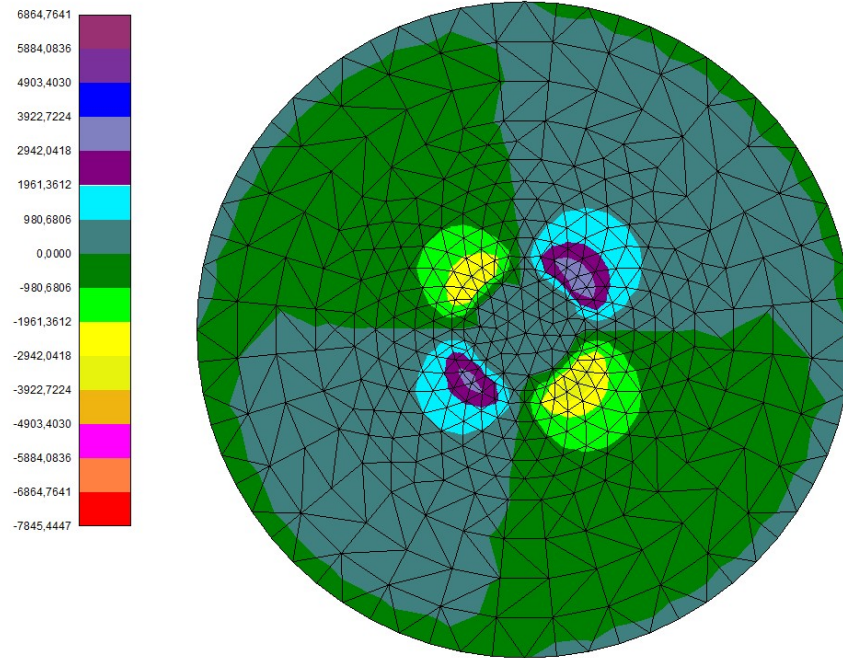
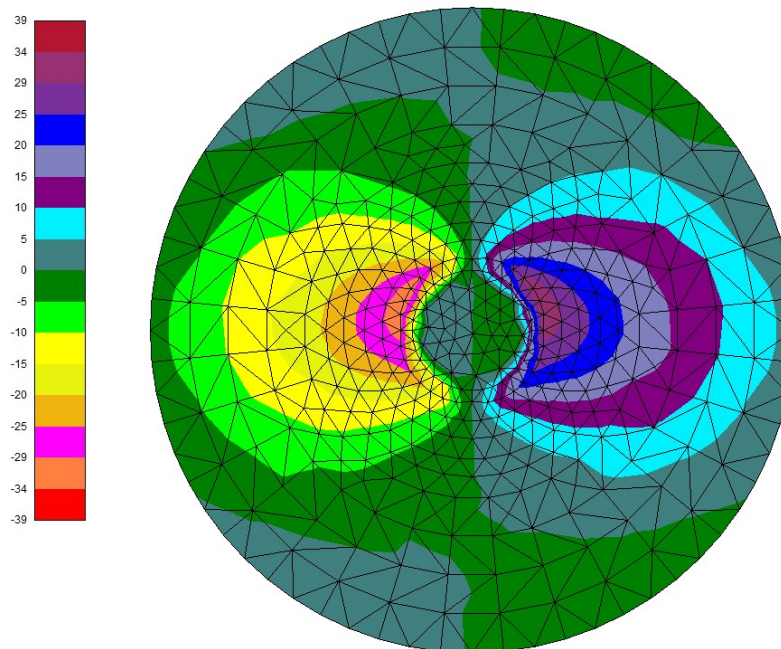
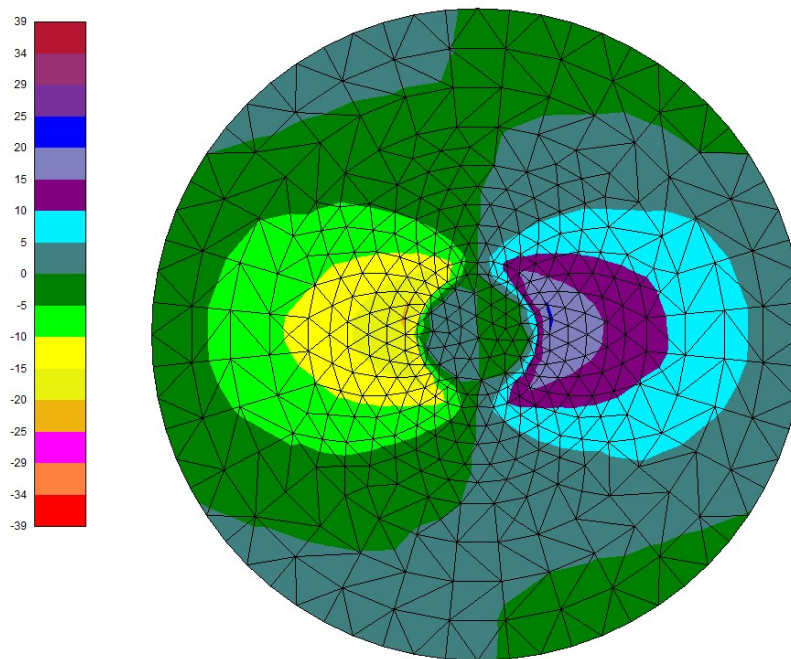


Diagramma del momento Mxy (KNm) – SLU (COMB.1)

Diagramma del momento M_{xy} (KNm) - SLE (COMB.2)Distribuzione del taglio T_x (KN) – SLU (COMB.1)

Distribuzione del taglio T_x (KN) - SLE (COMB.2)Distribuzione del taglio T_y (KN) – SLU (COMB.1)

Distribuzione del taglio T_y (KN) - SLE (COMB.2)Distribuzione dello sforzo normale N_x (KN) – SLU (COMB.1)



Distribuzione dello sforzo normale N_x (KN) – SLE (COMB.2)

Osservando la restituzione grafica dei risultati possiamo affermare che le sollecitazioni massime, agenti sulla struttura, sono localizzate in corrispondenza degli ancoraggi della flangia della torre di sostegno; l'analisi di una direzione di sollecitazione è applicabile a qualsiasi direzione in virtù della rotazione completa dell'aerogeneratore sull'asse della torre di sostegno.

Dalle analisi dei tabulati di output (riportati nell'elaborato fascicolo dei calcoli) provenienti dalle modellazioni in esame è stato possibile desumere le condizioni di sollecitazioni agenti più gravose e, altresì, le sezioni della piastra maggiormente sollecitata.

A sua volta, conoscendo le sollecitazioni (si rimanda al fascicolo dei calcoli) sono state eseguite le opportune verifiche agli SLU e SLE ai sensi del DM 17/01/2018; tali verifiche, riportate nei tabulati di calcolo allegati, si concludono con **esito positivo**.