



Nuovo impianto per la produzione di  
energia da fonte eolica nel comune di  
Siurgus Donigala e Selegas (SU)

Committente:

**Siurgus S.r.l.**  
via Michelangelo Buonarroti, 39  
20155 Milano  
C. F. e P. IVA: 11189260968  
PEC: siurgus@pec.it

RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO DELLE  
FONDAZIONI DEGLI AEROGENERATORI

Incaricato:

**Queequeg Renewables, ltd**  
Unit 3.21, 1110 Great West Road  
TW80GP London (UK)  
Company number: 111780524  
email: mail@quenter.co.uk

Rev. 0.0

Data: 12 Marzo 2021

WIND004.REL045



## Sommario

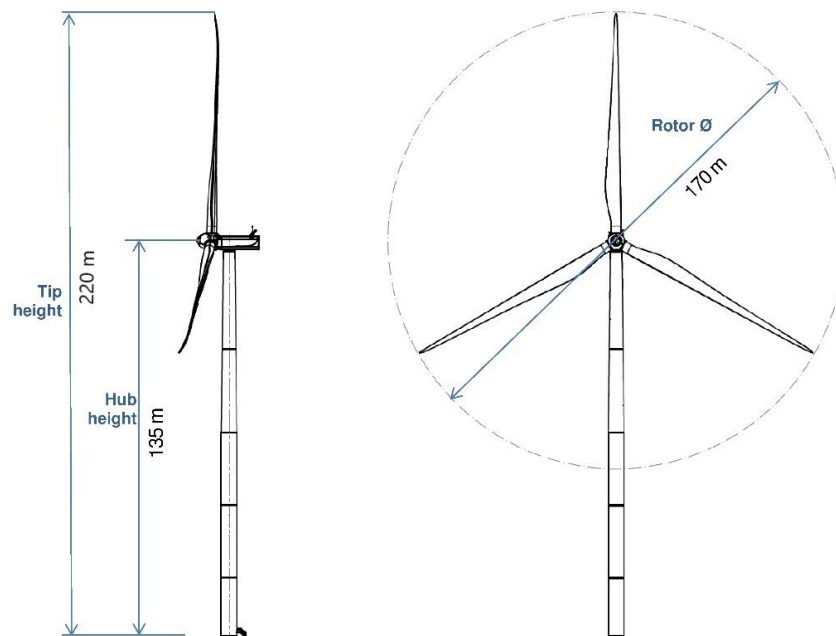
PREMESSA.....	4
NORMATIVE DI RIFERIMENTO .....	5
DESCRIZIONE DELL'OPERA DI FONDAZIONE .....	6
INQUADRAMENTO TERRITORIALE .....	8
CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA .....	9
CONDIZIONI DI CARICO.....	10
AZIONI SISMICHE.....	12
CARATTERISTICHE DEI MATERIALI .....	13
VERIFICHE STRUTTURALI .....	14
GENERALITA' .....	14
TIPO DI ANALISI.....	15
CARICHI APPLICATI .....	16
MODELLO DI CALCOLO .....	18
SOLLECITAZIONI DEL PLINTO DI FONDAZIONE .....	19
VERIFICHE DEL PLINTO DI FONDAZIONE.....	25

## 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 nel territorio comunale di Siurgus Donigala, Provincia del Sud Sardegna (SU).

L'impianto sarà costituito da n. 14 aerogeneratori tripala, ad asse orizzontale, aventi ciascuno una potenza nominale di 6,6 MW per una potenza complessiva di 92,40 MW.

Le dimensioni degli aerogeneratori prevedono un'altezza al mozzo di 135 metri, diametro del rotore di 170 metri, ed un'altezza complessiva massima, fuori terra, di 220 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 dalle 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

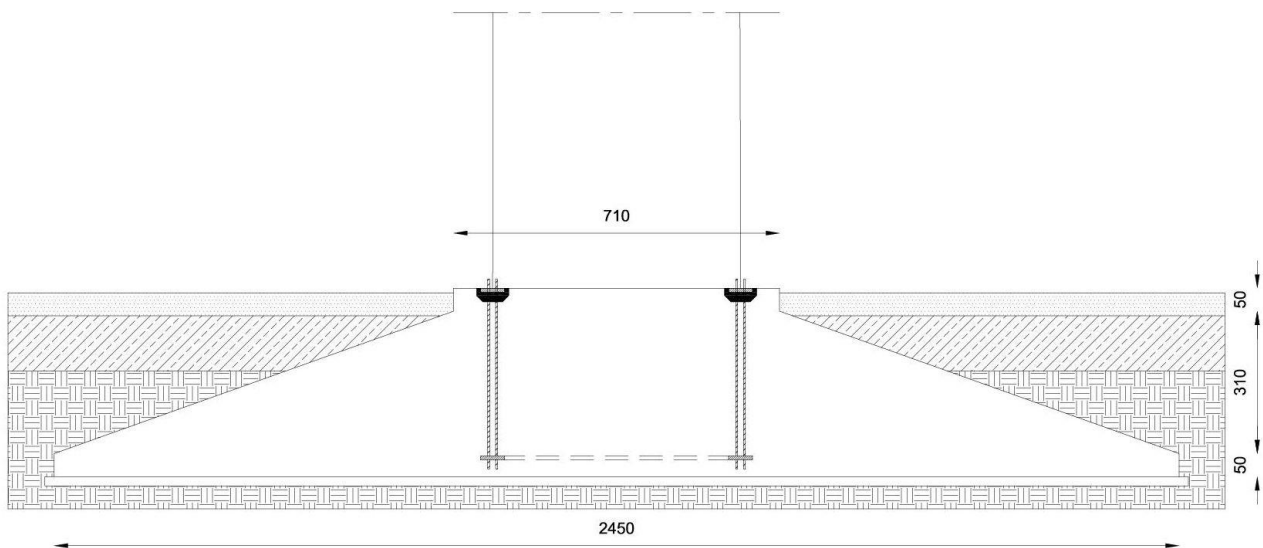
## DESCRIZIONE DELL'OPERA DI FONDAZIONE

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

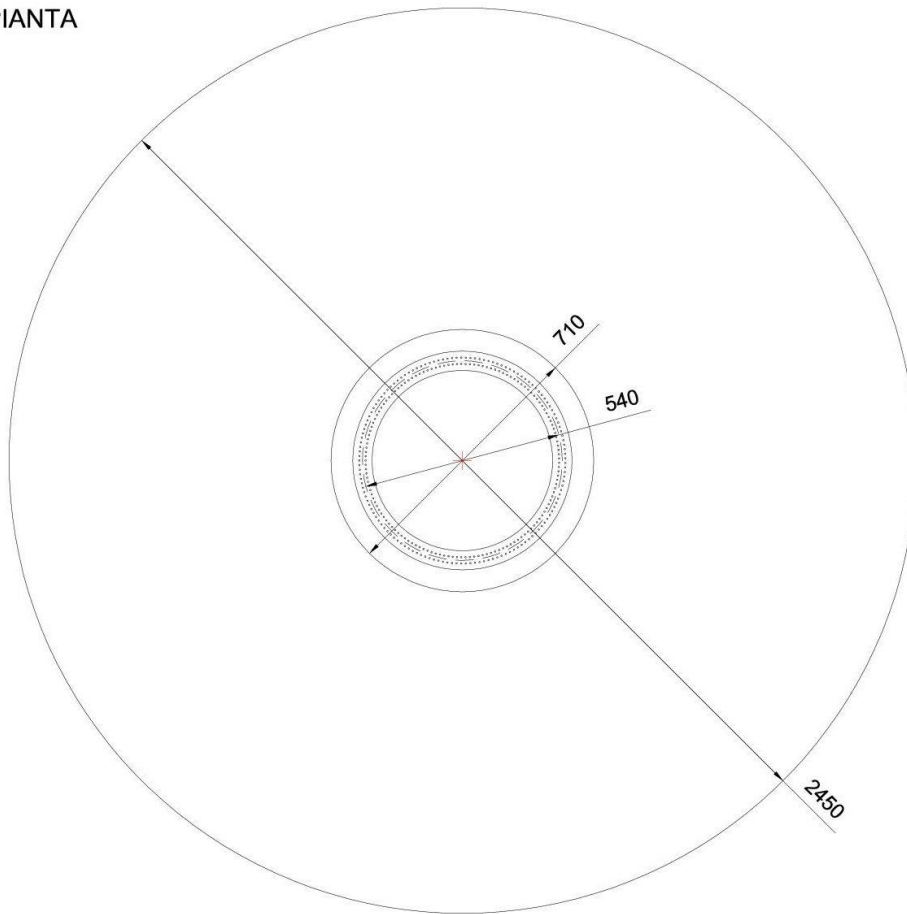
In questa fase si prevede la realizzazione di opere di fondazione di tipo diretto costituite da un plinto con forma tronco-conica, circolare in pianta con diametro massimo pari a 24,50 metri, ed una sezione trapezia avente altezza minima al bordo esterno pari a 0,50 metri, altezza di 3,60 metri nel profilo della connessione della parte tronco-conica con il colletto centrale dove raggiunge i 4,10 metri altezza.

Il profilo superiore del plinto emerge di 10 centimetri rispetto al piano di campagna.

### SEZIONE



PIANTA



In corrispondenza del colletto centrale, punto di connessione tra il plinto e la torre eolica, è prevista l'installazione di una doppia flangia.

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 140 fori su cui andranno inserite 280 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.



## INQUADRAMENTO TERRITORIALE

Le opere in progetto ricadono in agro del Comune di Siurgus Donigala nella Provincia del Sud Sardegna (SU).

Siurgus Donigala è un Comune della provincia del Sud Sardegna situato nella zona centro-meridionale della Sardegna, a 452 metri sul livello del mare.

L'inquadramento cartografico di riferimento è il seguente:

- Cartografia ufficiale dell'Istituto Geografico Militare I.G.M scala 1:25 000. Serie 25 -Fogli: 548 sez. I "Goni".
- Carta Tecnica Regionale scala 1:10 000 - Fogli: 548030 "Siurgus Donigala" e 548040 "Goni".





## CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

Il modello geotecnico sulla base del quale verrà prodotto il predimensionamento strutturale è realizzato in funzione dei parametri riportati nella relazione geologica allegata al progetto ed ottenuta in seguito a prove sperimentali in situ, riferito al sito con una tipologia di terreni prevalente. Si tratta comunque di un predimensionamento strutturale che potrebbe essere oggetto di modifiche a seguito della impostazione della fase esecutiva per la quale sarà necessario accertare puntualmente per ciascuna pala la caratterizzazione geologica (tipologia di terreni e stratificazione degli stessi) di ogni sito d'installazione.

I parametri adottati nella modellazione del terreno e della sua stratigrafia sono sintetizzati nelle seguenti tabelle:

<b>STRATIGRAFIA – SITO: SIURGUS DONIGALA (SU)</b>			
	Colonna 1	Colonna 2	Colonna 3
Terreno	Z 1 (m)	Z 2 (m)	Z 3 (m)
S1	0,3	-	-
S2	3,6	-	-
S3	>11,1	-	-

<b>MODELLO GEOLOGICO – SITO: SIURGUS DONIGALA (SU)</b>				
TIPO DI TERRENO		S1 - Terreno vegetale	S2 - Argilla sabbiosa e sabbia argillosa	S3 - Arenaria compatta
DESCRIZIONE				
Peso di volume	[kN/mc]	17,652	17,652	18,633
Peso di volume saturo	[kN/mc]	19,614	18,633	19,614
Angolo di attrito interno	[°]	25,00	28,14	29,96
<b>Dati Parametri Resistenza</b>				
Coesione	[kPa]	0,00	16,67	17,65
<b>Dati Parametri Deformabilità</b>				
Modulo elastico	[kPa]	725.986	725.986	1.558.963
Coefficiente di Poisson	[]	0,33	0,33	0,33
Modulo di taglio (G)	[kPa]	274.978	274.978	588.007
Velocità onde di taglio	[m/sec]	340	340	700

## CONDIZIONI DI CARICO

Nella fase di predimensionamento si utilizzano i carichi sulle fondazioni calcolati in accordo alla norma IEC 61400 Ed3 e definiti per un aerogeneratore di riferimento; in questo caso verrà adottato il modello SG 6.0-170 T135-50A prodotto dalla società Siemens Gamesa Renewable Energy S.A. Si riportano qui di seguito i valori contenuti nel documento ufficiale D2406108/002 rilasciato dal produttore in data 17/04/2020; si rimanda alla fase di progettazione esecutiva il dimensionamento sui dati relativi al fornitore scelto.

### Extreme load SG 6.0-170 HH 135

Load case	Load factor	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)	Mx (kNm)	My (kNm)	Mz (kNm)
Dic22_3bn_v11.0_p_s8	1,1	1899,37	-30,2	-8518,03	10542,98	248324,9	848,69

I carichi forniti da Siemens Gamesa come "Extreme load" sono i carichi statici massimi per la specifica turbina eolica 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 le norme IEC 61400 o DIBt.

Pertanto, i carichi forniti da Siemens Gamesa come "Extreme load" 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 case	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)	Mx (kNm)	My (kNm)	Mz (kNm)
Dic14_v90.0_p_000	1316,18	54,14	-7707,99	2463,44	186812,5	294,48

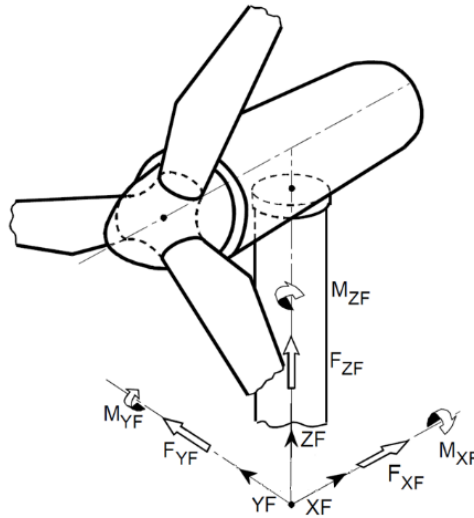
### Quasi-permanent load SG 6.0-170 HH 135

pf = 0,01000	Carichi dell'aerogeneratore alla sezione					
Quota sezione dalla base (m)	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)	Mx (kNm)	My (kNm)	Mz (kNm)
0	1006,5	113,9	-7544,75	20249,99	139551,8	4991,2

### Fatigue load SG 6.0-170 HH 135 (valore medio)

Load factor	F <sub>x</sub> (kN)	F <sub>y</sub> (kN)	F <sub>z</sub> (kN)	M <sub>x</sub> (kNm)	M <sub>y</sub> (kNm)	M <sub>z</sub> (kNm)
1,0	478,42	-5,29	-7608,11	4649,15	66600,68	-58,85

I carichi sono applicati nel 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:

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

### AZIONI SISMICHE

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

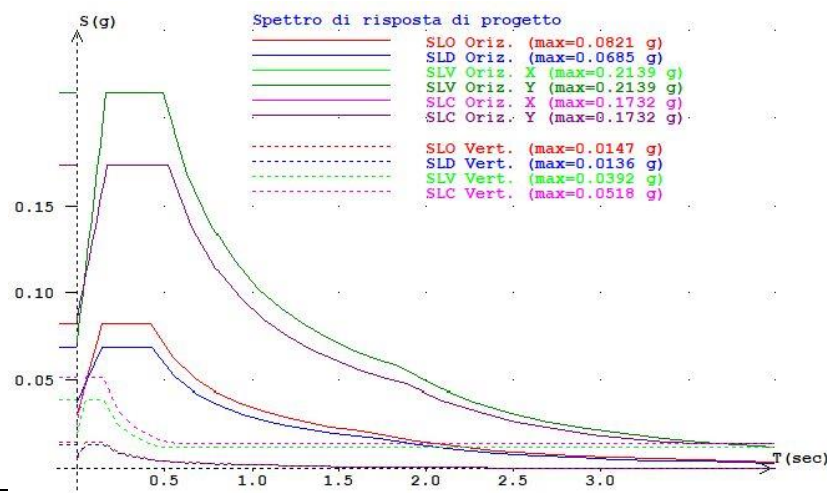
Nel presente progetto, l'azione sismica è stata valutata tenendo conto dei seguenti parametri:

- Classe d'uso: IV (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		
	ag	Fo	Tc*	ag	Fo	Tc*	ag	Fo	Tc*
SARDEGNA	0,18 6	2,61	0,27 3	0,23 5	2,67	0,29 6	0,27 4	2,70	0,30 3
	TR=101			TR=140			TR=201		
	ag	Fo	Tc*	ag	Fo	Tc*	ag	Fo	Tc*
	0,31 4	2,73	0,30 7	0,35 1	2,78	0,31 3	0,39 3	2,82	0,32 2
	TR=475			TR=975			TR=2475		
	ag	Fo	Tc*	ag	Fo	Tc*	ag	Fo	Tc*
0,50 0	2,88	0,34 0	0,60 3	2,98	0,37 2	0,74 7	3,09	0,40 1	

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:



## 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: C20/25
- Calcestruzzo per il plinto: C35/45
- Calcestruzzo per il colletto: C40/50

## VERIFICHE STRUTTURALI

### GENERALITA'

Le verifiche sono state condotte con il metodo degli stati limite (SLU e SLE) utilizzando i coefficienti parziali della normativa di cui al DM 17.01.2018.

Nelle verifiche di sicurezza devono essere presi in considerazione tutti i meccanismi di stato limite ultimo:

1) SLU di tipo geotecnico (GEO)

- collasso per carico limite dell'insieme fondazione-terreno;
- collasso per scorrimento sul piano di posa;
- stabilità globale;

2) SLU di tipo strutturale (STR)

- raggiungimento della resistenza negli elementi strutturali;

La verifica di stabilità globale deve essere 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  $\gamma_R$  non deve essere portato in conto.

## TIPO DI ANALISI

L'analisi per le combinazioni delle azioni permanenti e variabili è stata condotta in regime elastico lineare.

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

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

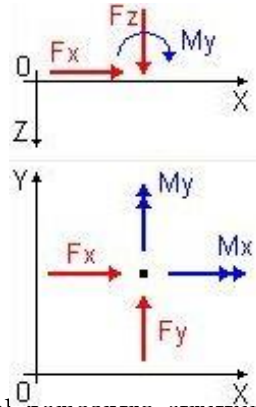
Il metodo di analisi utilizzato è quello statico, che modella le azioni dinamiche agenti sulla struttura mediante l'applicazione di forze statiche equivalenti.

Le forze applicate sono comprensive degli effetti dinamici ordinari delle azioni che rappresentano.



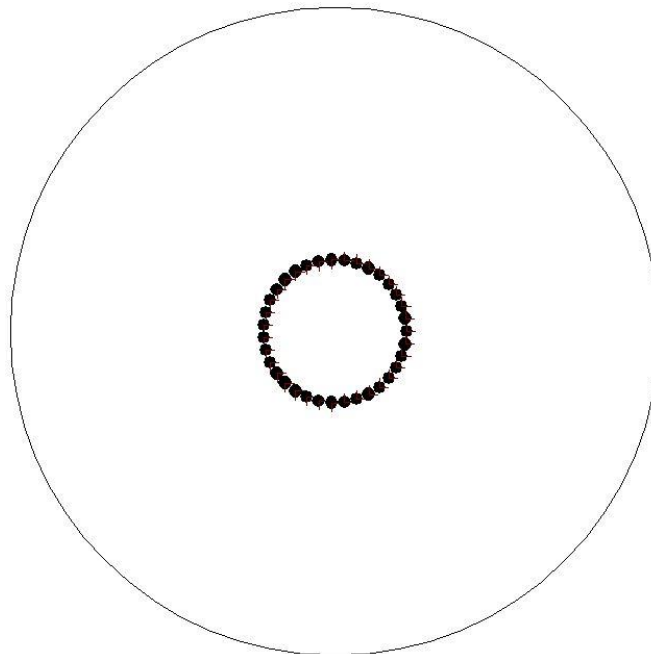
## CARICHI APPLICATI

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 5,40 metri e corrispondente alla circonferenza media di ancoraggio della flangia dell'aerogeneratore.

Per semplicità è stata scomposta la sollecitazione in un numero di 35 punti, ovvero una quarta parte dei bulloni disposti su due file (140x2); i punti di applicazione sono così ricavati:



Parametri per la redistribuzione delle forze:

$N = 35$  - Numero di punti di applicazione del carico;

$d = 5,40$  metri - Diametro medio della gabbia dei tirafondi;

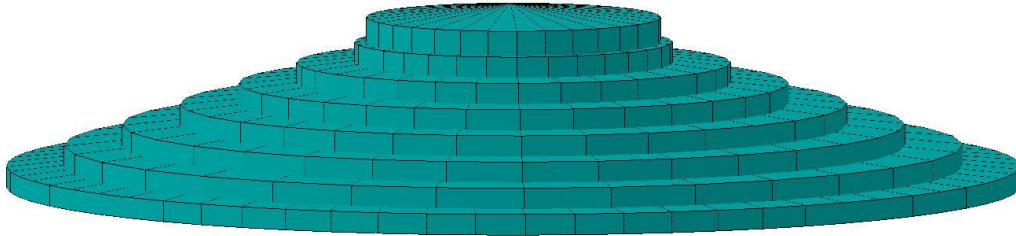
$D = 24,5$  metri - Diametro massimo del plinto;

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.

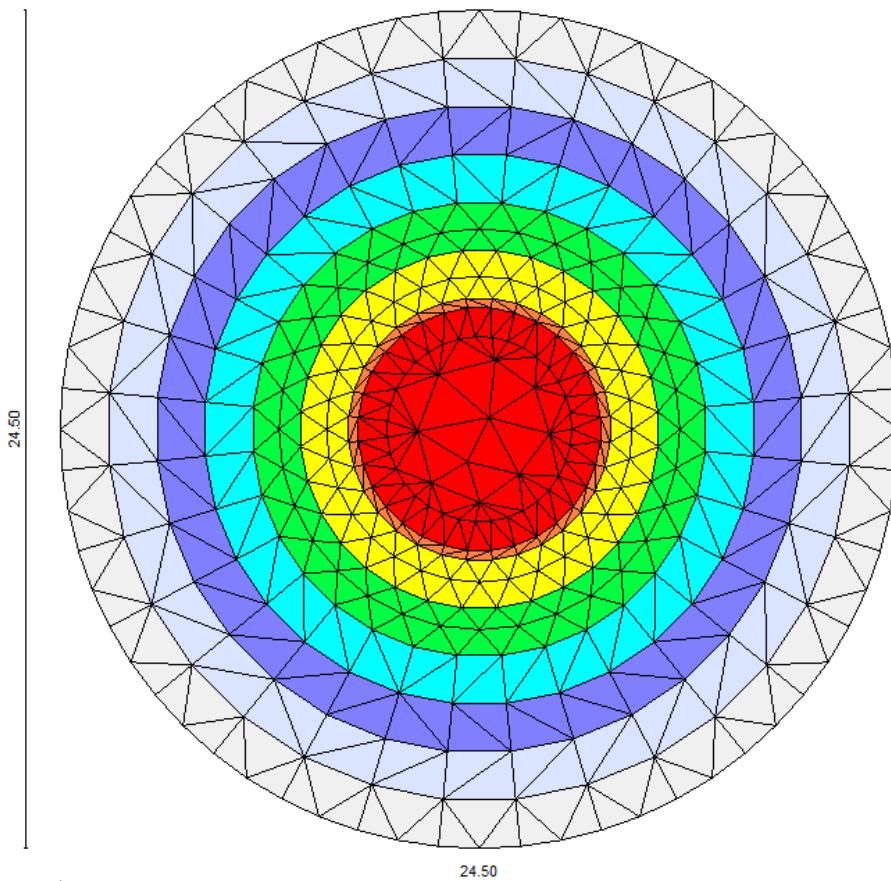
I risultati ottenuti saranno quindi applicabili per qualsiasi orientamento dell'aerogeneratore e delle sollecitazioni di esercizio da esso prodotte.

## MODELLO DI CALCOLO

Per il calcolo 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:

- 728 mesh;
- 397 nodi;

Viene generato un nodo in corrispondenza dei 35 carichi concentrati applicati.

*Vista 3D del modello FEM con stratigrafia del terreno*

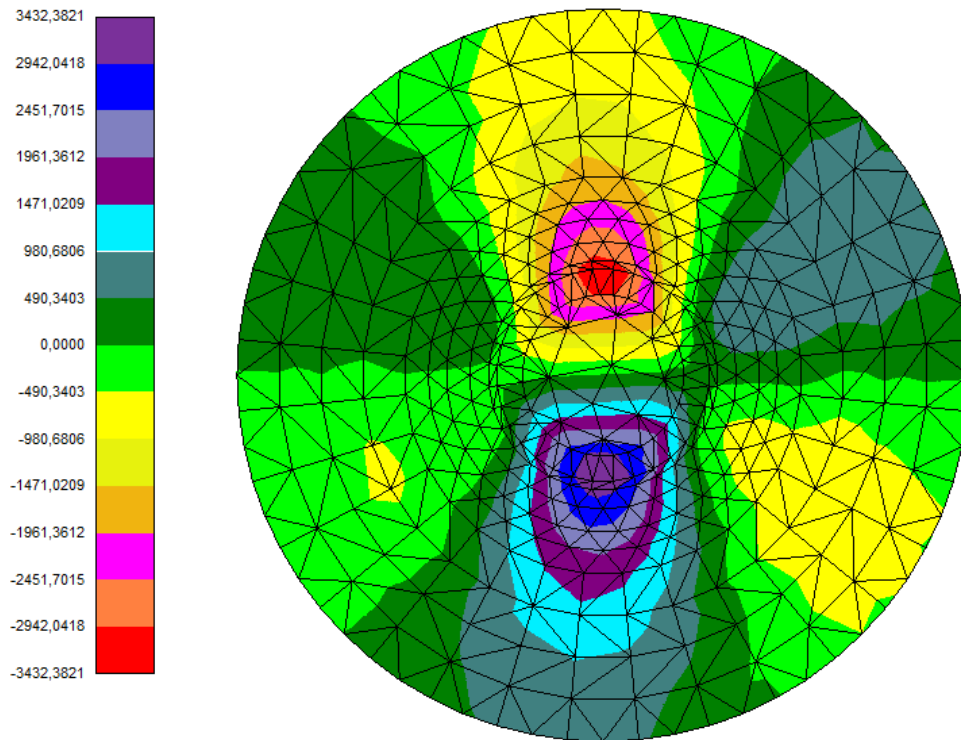
Il terreno di fondazione viene modellato con delle molle disposte in corrispondenza dei nodi.  
La rigidità delle molle è proporzionale alla costante di sottofondo  $k$  ed all'area dell'elemento.

## **SOLLECITAZIONI DEL PLINTO DI FONDAZIONE**

Per determinare le sollecitazioni, agenti sul blocco 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.14.02.B (licenza n°AIU3390LY).

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.



Distribuzione del momento  $M_{xy}$  (KNm) nella piastra di fondazione

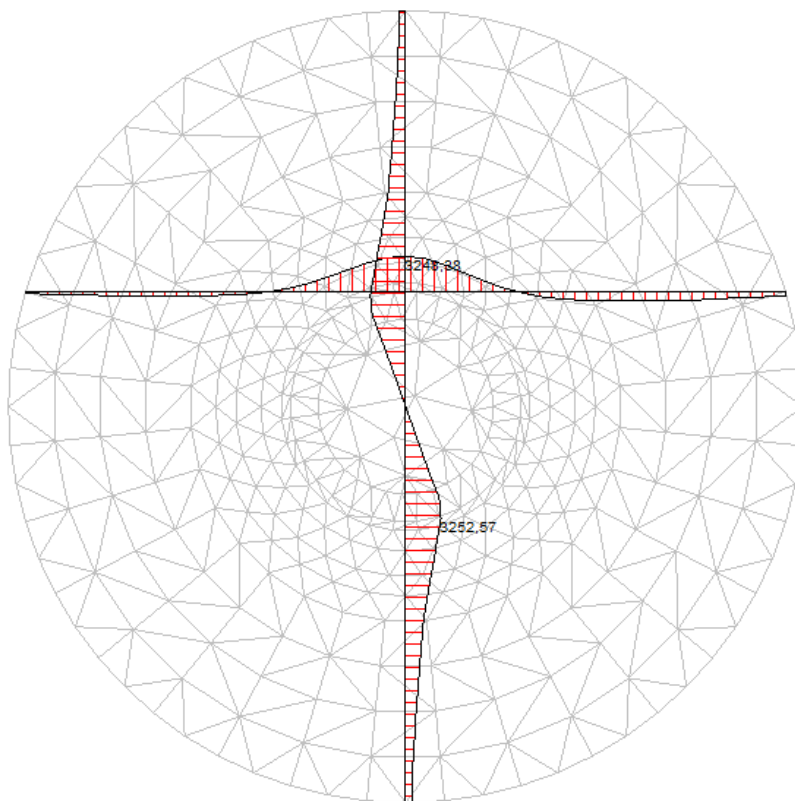
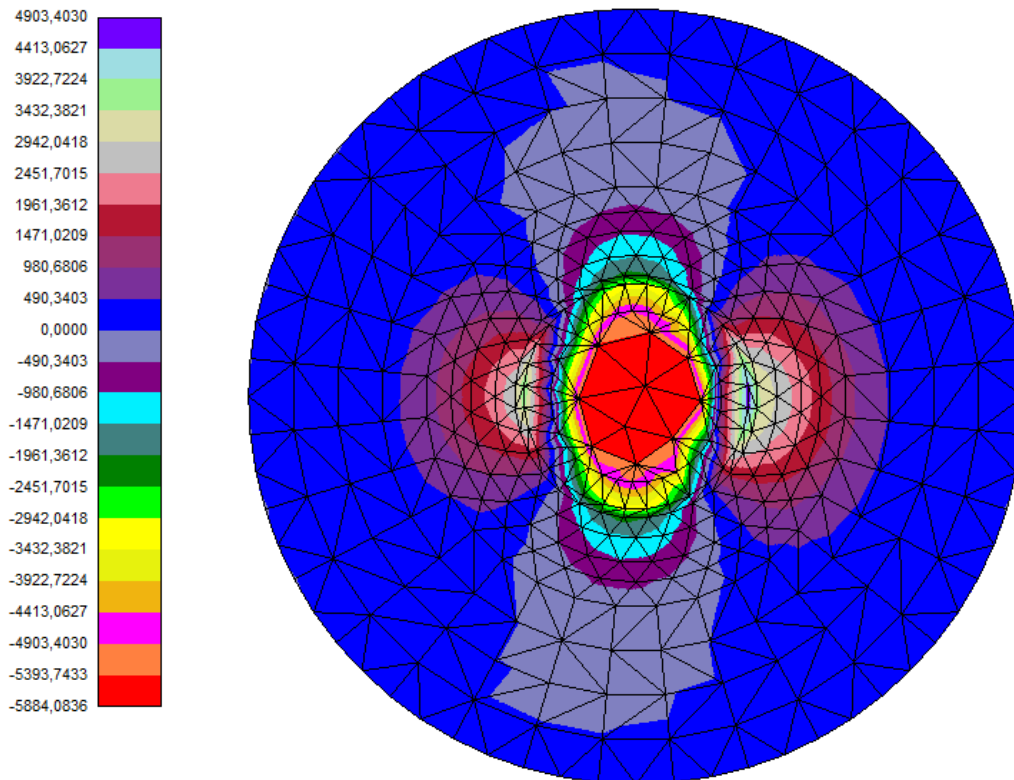


Diagramma del momento  $M_{xy}$  (KNm) nella piastra di fondazione



Distribuzione del taglio Tx (KN) nella piastra di fondazione

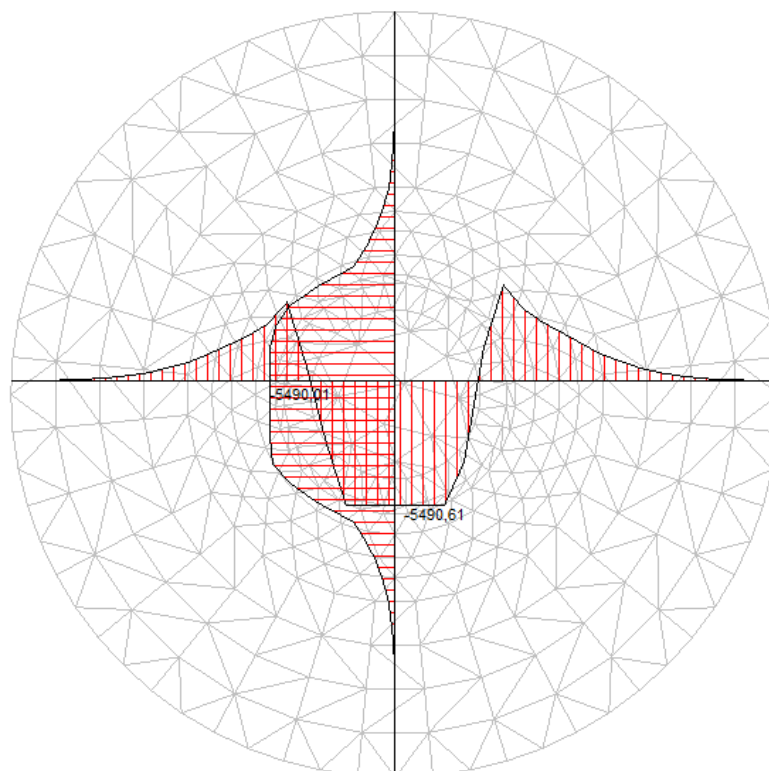
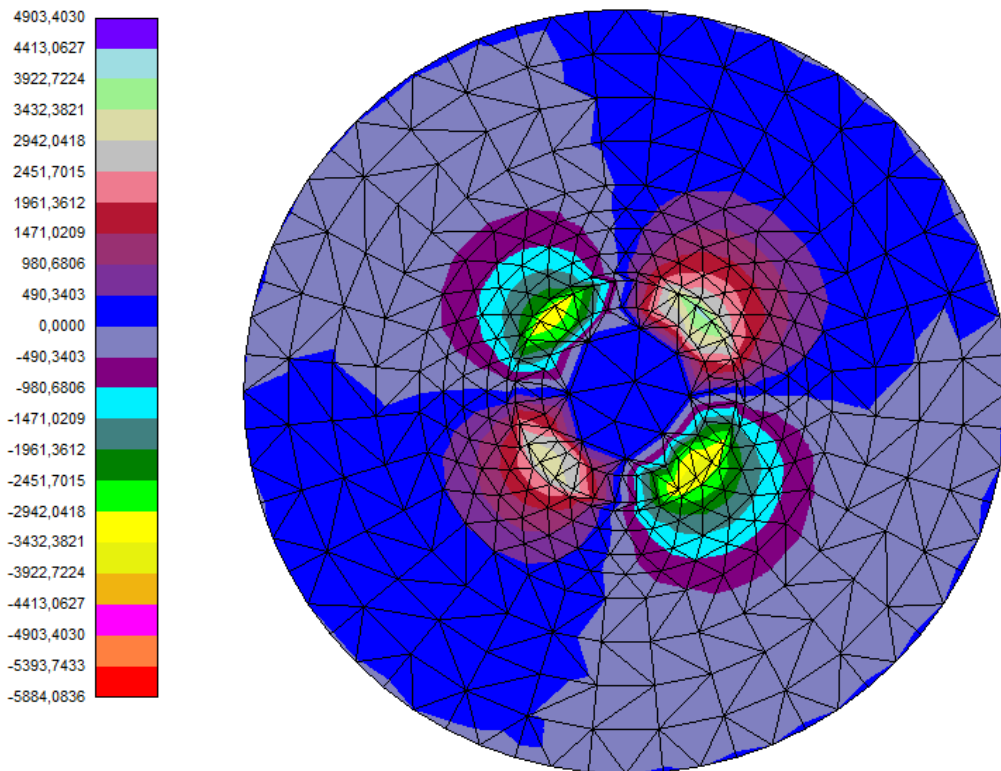


Diagramma del taglio Tx (KN) nella piastra di fondazione





Distribuzione del taglio  $T_y$  (KN) nella piastra di fondazione

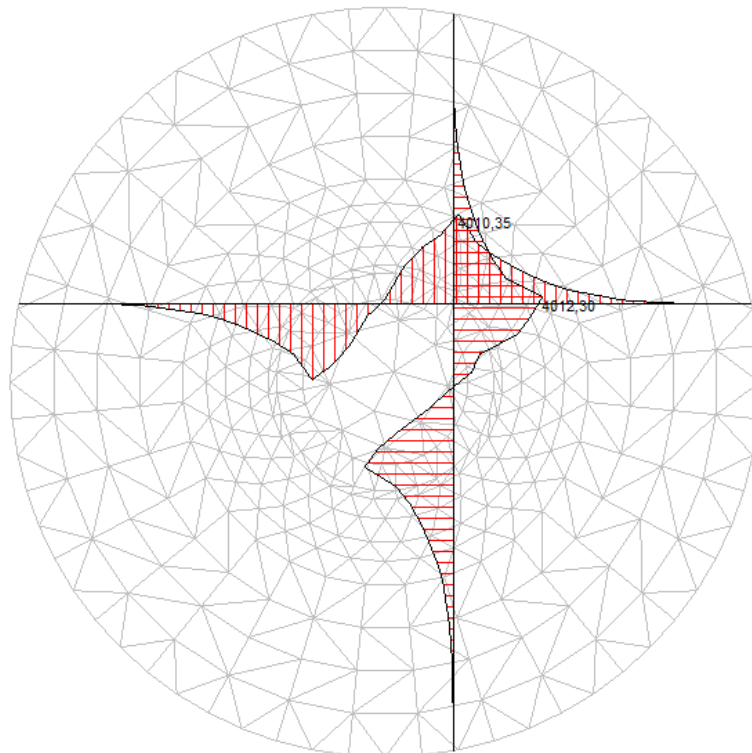
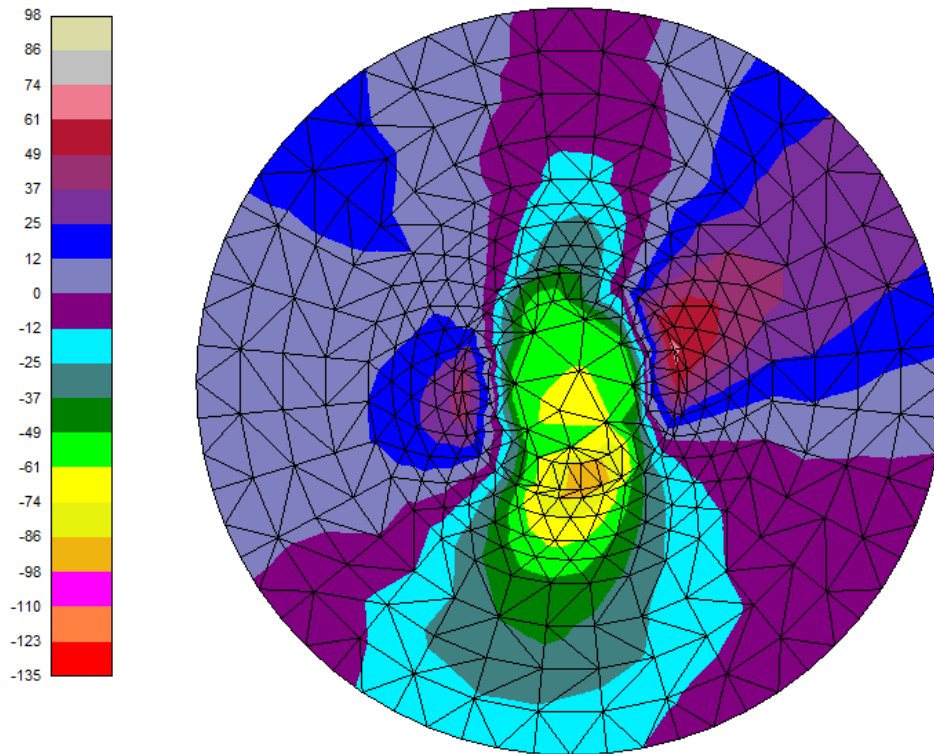


Diagramma del taglio  $T_y$  (KN) nella piastra di fondazione



Distribuzione dello sforzo normale  $N_{xy}$  (KN) nella piastra di fondazione

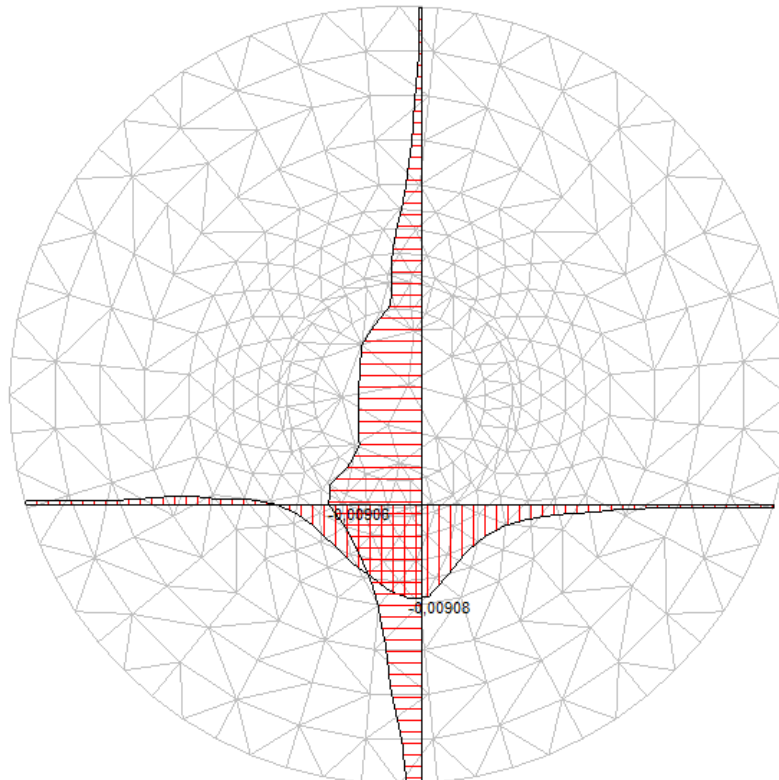


Diagramma dello sforzo normale  $N_{xy}$  (KN) nella piastra di fondazione

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.

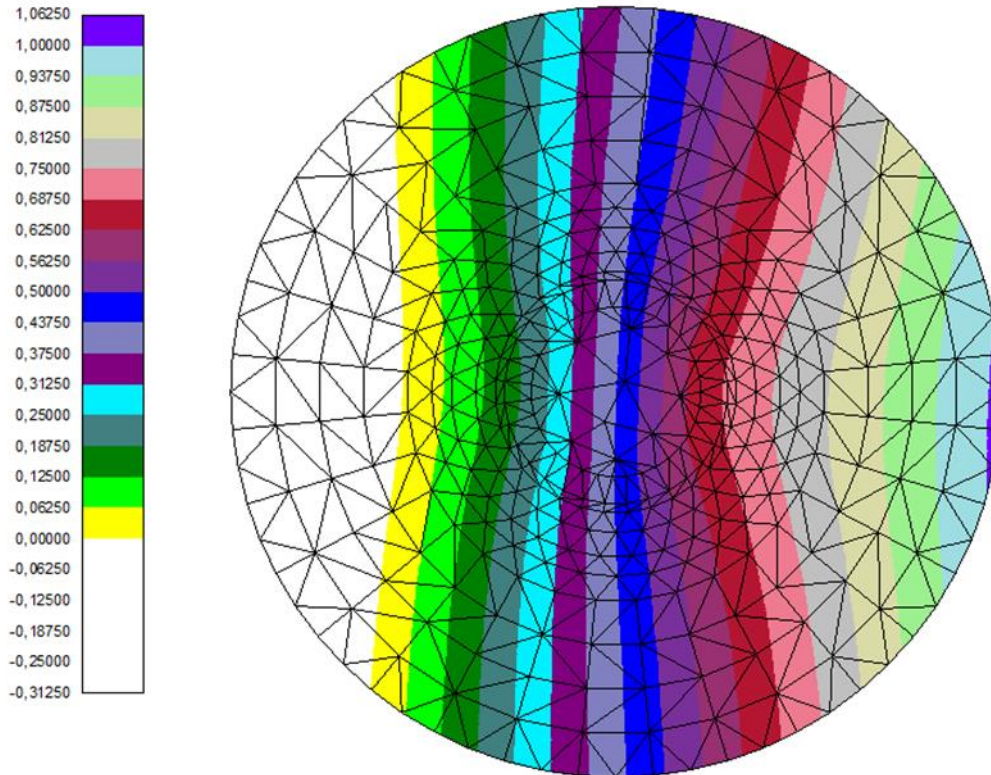


Diagramma spostamenti verticali W (cm)

## VERIFICHE DEL PLINTO DI FONDAZIONE

A sua volta, conoscendo le sollecitazioni (si rimanda al fascicolo dei calcoli) si sono eseguite le opportune verifiche agli SLU e SLE ai sensi del DM 17/01/2018; tali verifiche sono riportate nei paragrafi seguenti.

Dalle analisi dei tabulati di output (Tabulati di calcolo preliminare fondazioni aerogeneratore - Appendice A alla presente relazione) provenienti dalle modellazioni in esame è stato possibile desumere le condizioni di sollecitazioni agenti più gravose e, altresì, le sezioni della piastra maggiormente sollecitata.

La dimensione del plinto prevista preliminarmente potrà eventualmente variare con l'approfondimento delle indagini geologiche in fase esecutiva, volte a determinare le caratteristiche del terreno, e con riferimento alla tipologia strutturale optata (per l'eventuale possibilità di utilizzare plinti di fondazione su pali).

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