



**PROGETTO:** Progetto Definitivo per il parco eolico da 48,0 MW  
"Energia Is Coris" costituito da n.9 aerogeneratori

Elaborato: Predimensionamento delle fondazioni degli aerogeneratori:  
Relazione generale

Codice Elaborato	Scala	Formato elaborato
WIND01.REL045		

PROPONENTE



Timbro e firma

Timbro e firma

REDATTORI

Ing. Giuseppe Pili  
Ing. Michele Pigliaru

COORDINAMENTO

**BIA s.r.l.**  
Piazza dell'Annunziata 7  
Cagliari (CA) - 09123  
P.IVA 03983480926  
energhiabia@pec.it



Rev.	Data	Descrizione	Elaborato	Verificato	Approvato
02					
01					
00	04/2022	Emissione per validazione	Giuseppe Pili Michele Pigliaru		

## INDICE

PREMESSA

NORMATIVE DI RIFERIMENTO

INQUADRAMENTO TERRITORIALE (DA COMPILARE)

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

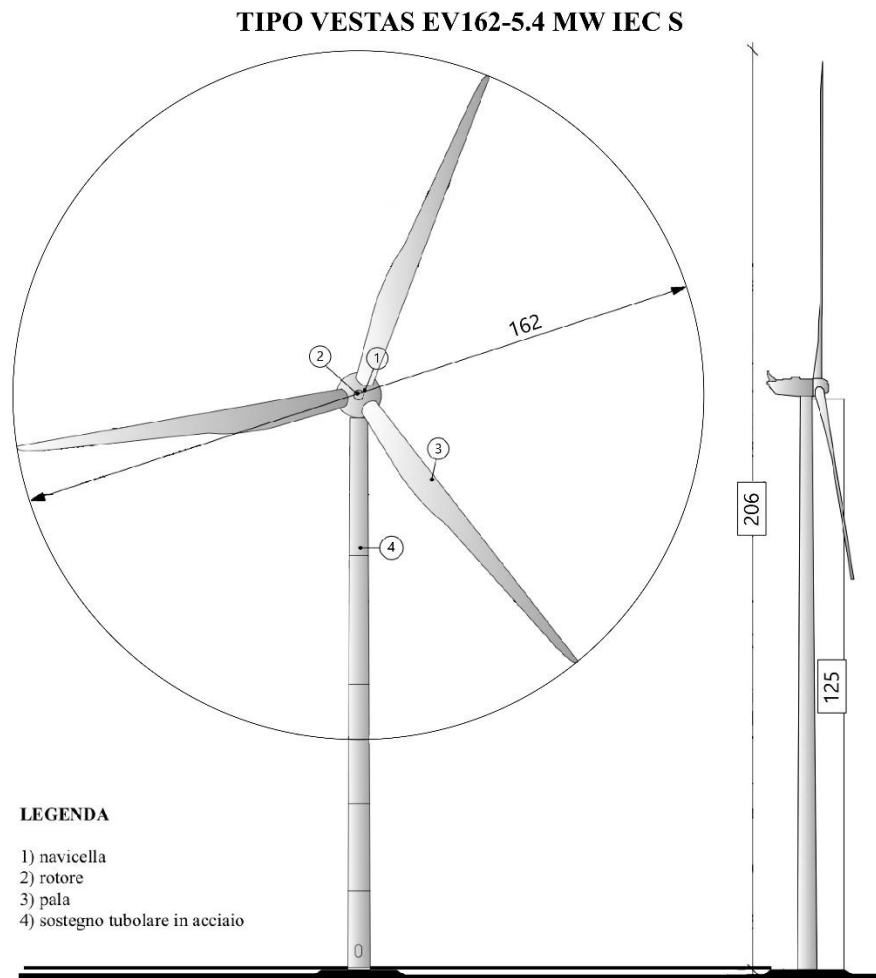
- GENERALITA'
- VERIFICA STABILITA' GLOBALE (EQU)
- VERIFICHE GEOTECNICHE (GEO) E STRUTTURALI (STR)

## 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 in agro dei Comuni di Villamassargia e Narcao, Provincia del Sud Sardegna (SU).

L'impianto sarà costituito da n. 9 aerogeneratori tripala, ad asse orizzontale, aventi ciascuno una potenza nominale di 5,4 MW per una potenza complessiva di 48,0 MW.

Le dimensioni degli aerogeneratori prevedono un'altezza al mozzo di 125 metri, diametro del rotore di 162 metri, ed un'altezza complessiva massima, fuori terra, di 206 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 (DA COMPILARE)**

L'area oggetto dell'impianto eolico è localizzata nella parte sud-occidentale della regione Sardegna, lungo il confine comunale superiore del comune di Narcao con il territorio di Villamassargia. Sei aerogeneratori ricadono lungo il perimetro comunale (WTG 01-06), a cavallo tra i due territori, mentre le ultime tre turbine ad est sono situate sul territorio di Villamassargia (WTG 07-09).

La connessione alla rete elettrica nazionale corre all'interno di un cavidotto interrato lungo la viabilità esistente situata sul territorio comunale di Villamassargia e Musei, dove giunge alla stazione elettrica "MUSEI", localizzata in loc. Is Peddis, a circa 1 km di distanza in linea d'aria dalla SS 130.

I comuni di Villamassargia e Narcao si trovano rispettivamente nelle regioni storiche del Campidano e del Sulcis, anche se alcune fonti collocano entrambe nella regione del Sulcis.

Si riportano di seguito le coordinate delle turbine:

Aerogeneratore	Gauss Boaga N (m)	Gauss Boaga E (m)	Altitudine (m)
WTG001	1 465 014	4 342 298	602
WTG002	1 465 873	4 342 292	572
WTG003	1 466 548	4 342 250	574
WTG004	1 467 722	4 342 457	600
WTG005	1 468 256	4 342 397	596
WTG006	1 468 875	4 342 527	596
WTG007	1 469 390	4 342 583	557
WTG008	1 469 855	4 342 797	580
WTG009	1 470 622	4 342 593	560

L'area in cui ricadono gli aerogeneratori in progetto è situata lungo la linea di confine tra i due comuni (Villamassargia e Narcao), in corrispondenza della diramazione nord-est della catena montuosa del Sulcis, a breve distanza dal perimetro del parco naturale del Sulcis, indicato nel Piano Paesaggistico Regionale ma mai istituito. Le turbine sono poste ad un'altitudine media poco

inferiore ai 600 m e distano in linea d'aria circa 4 km, a sud, dal centro urbano di Villamassargia e c.ca 3 km, in direzione opposta, dalla frazione urbana di Terraseo, sul territorio comunale di Narcao.

A distanze maggiori, inoltre, si trovano i due centri urbani principali, di riferimento dell'area: Carbonia è dislocata a circa 8 km in direzione ovest, alle pendici del sistema montuoso, mentre Iglesias si trova a circa 9 km in direzione nord-ovest, in prossimità della catena montuosa del Linas Marganai.



Sulla Carta Tecnica Regionale (CTR) l'impianto completo della linea di connessione alla S.E. di Terna ricade nei fogli 555160, 556130, 556090, 556050.

## CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

Le indagini di caratterizzazione del terreno hanno restituito valori geognostici differenti in ordine ai 9 punti di installazione degli aerogeneratori; allo stesso tempo, la natura del terreno caratterizzata da rocce, e la sua pendenza, modificano le quote del piano di posa degli stessi plinti. In seguito alle diverse condizioni geologiche rilevate mediante prove sperimentali in situ, e riportate nella relazione geologica allegata al progetto, sono stati identificati tre modelli rappresentativi sulla base dei quali verranno condotti i calcoli di predimensionamento strutturale.

PLINTO n°	PROFONDITA' PIANO DI POSA m.	TIPO PLINTO Ø m.	MODELLO GEOLOGICO
1	2,45	25,00	01
2	4,52	25,00	01
3	5,55	25,00	03
4	6,71	25,00	03
5	2,95	25,00	02
6	2,73	25,00	02
7	6,85	25,00	02
8	4,31	25,00	01
9	4,38	25,00	01

I 3 modelli geologici rilevati vengono sintetizzati nelle tabelle seguenti:

MODELLO GEOLOGICO 01					
SITO		VILLAMASSARGIA (T01, T02, T08, T09)			
TIPO DI TERRENO		S1 - Suolo/ Dolomia fratturata e alterata	S2 - Dolomia mediamente fratturata	S3 - Dolomia poco fratturata	S4 - Dolomia sana
DESCRIZIONE					
Peso di volume	[kN/mc]	19,614	20,594	21,575	22,556
Peso di volume saturo	[kN/mc]	20,594	21,575	22,556	23,536
Angolo di attrito interno	[°]	30,66	35,09	39,20	43,21
Dati Parametri Resistenza					
Coesione	[kPa]	15,98	6825,04	12822,98	25452,96
Dati Parametri Deformabilità					
Modulo elastico	[kPa]	4.600.000	9.100.000	24.250.000	50.000.000
Coefficiente di Poisson	[]	0,33	0,33	0,33	0,33
Modulo di taglio (G)	[kPa]	1.700.000	3.410.000	9.100.000	19.500.000
Velocità onde di taglio	[m/sec]	930	1275	2035	2872
Dati Stratigrafia					
Colonna Z	[m]	1,00	4,00	17,60	> 17,60

MODELLO GEOLOGICO 02					
SITO		VILLAMASSARGIA (T05, T06, T07)			
TIPO DI TERRENO		S1 - Metarenaria molto fratturata e alterata	S2 - Metarenaria fratturata e alterata	S3 - Metarenaria mediamente fratturata	S4 - Metarenaria poco fratturata
DESCRIZIONE					
Peso di volume	[kN/mc]	19,614	20,594	20,594	21,575
Peso di volume saturo	[kN/mc]	20,594	21,575	21,575	22,556
Angolo di attrito interno	[°]	29,65	32,48	35,25	38,42
Dati Parametri Resistenza					
Coesione	[kPa]	4377,02	6439,02	7295,03	8688,03
Dati Parametri Deformabilità					
Modulo elastico	[kPa]	4.717.017	6.296.023	9.905.040	15.975.062
Coefficiente di Poisson	[]	0,33	0,33	0,33	0,33
Modulo di taglio (G)	[kPa]	1.765.007	2.363.008	3.717.014	5.992.022
Velocità onde di taglio	[m/sec]	940	1060	1330	1650
Dati Stratigrafia					
Colonna Z	[m]	2,30	6,40	12,80	30,00

MODELLO GEOLOGICO 03					
SITO		VILLAMASSARGIA (T03, T04, VIABILITA')			
TIPO DI TERRENO		S1 - Suolo/ Terre mediamente addensate	S2 - Terre molto addensate e/o rocce molto fratturate	S3 - Roccia intensamente fratturata	S4 - Substrato roccioso intensamente fratturato
DESCRIZIONE					
Peso di volume	[kN/mc]	15,691	16,672	17,652	19,614
Peso di volume saturo	[kN/mc]	16,672	17,652	18,633	20,594
Angolo di attrito interno	[°]	21,60	25,45	29,00	32,00
Dati Parametri Resistenza					
Coesione	[kPa]	20,00	27,00	1699,01	3528,01
Dati Parametri Deformabilità					
Modulo elastico	[kPa]	422.002	657.002	1.900.007	5.335.020
Coefficiente di Poisson	[]	0,33	0,33	0,33	0,33
Modulo di taglio (G)	[kPa]	157.001	245.001	710.003	2.001.007
Velocità onde di taglio	[m/sec]	315	380	620	1000
Dati Stratigrafia					
Colonna Z	[m]	2,3	6,4	18,10	30,00



Nelle verifiche preliminari verrà assunto, a favore della sicurezza, un modello di riferimento che rappresenti le condizioni geologiche più sfavorevoli ed identificabili nel modello geologico 03.

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

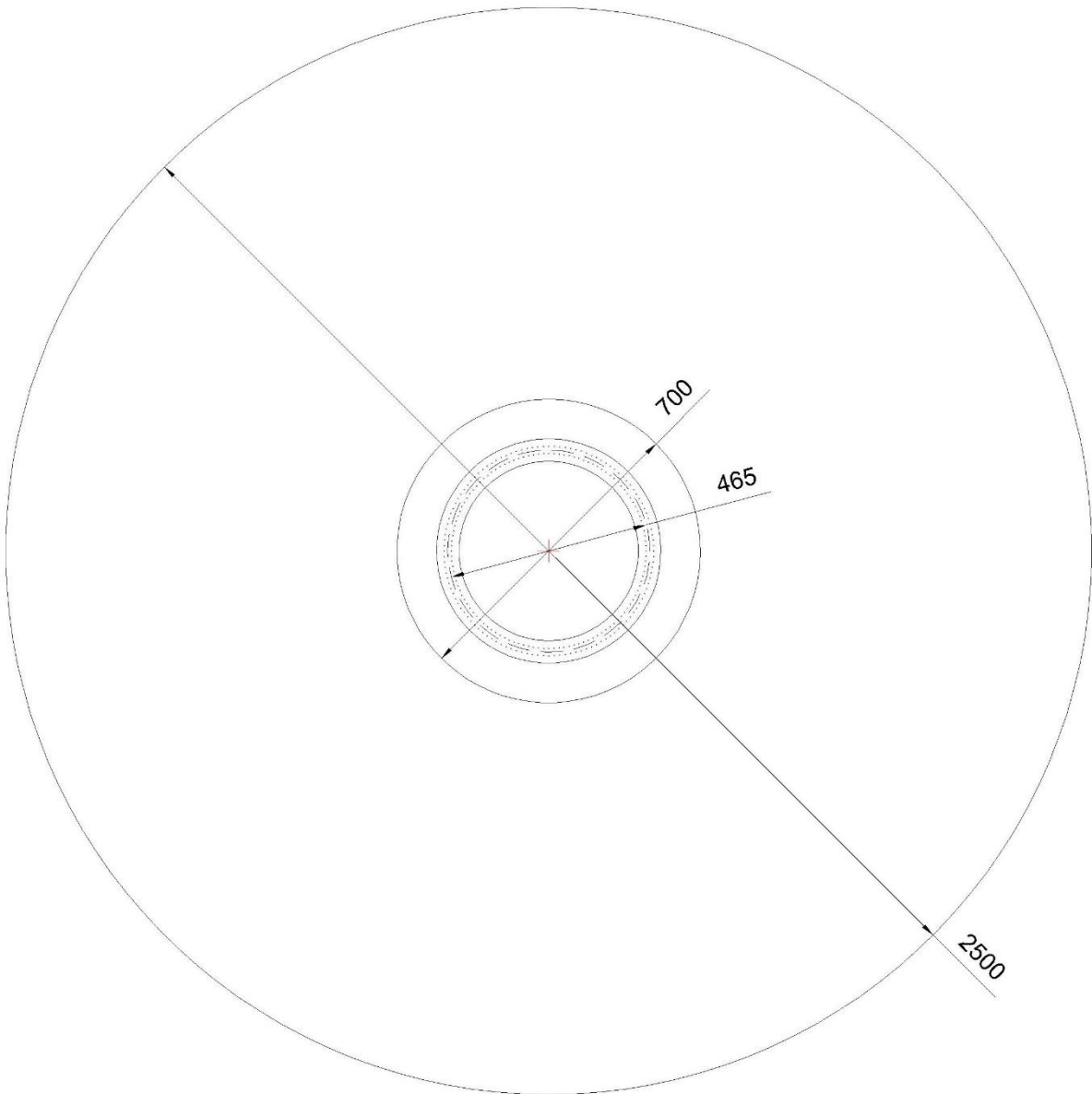
In fase di progettazione esecutiva i modelli geologici individuati andranno confermati da indagini specifiche e puntuali sui siti di imposta dei singoli aerogeneratori.

### **DESCRIZIONE DELL'OPERA DI FONDAZIONE**

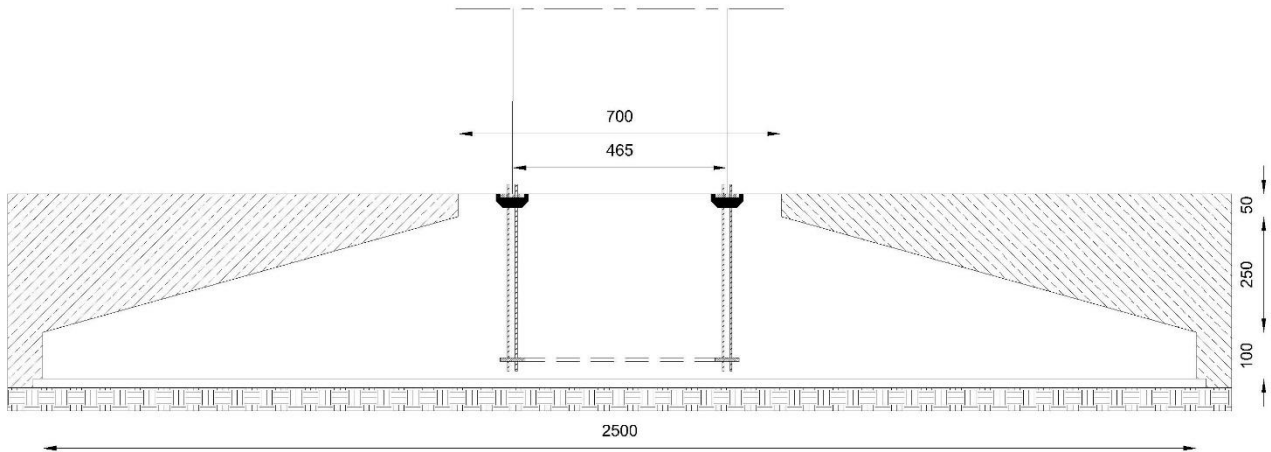
Il dimensionamento preliminare, in attesa della scelta progettuale del committente, tiene conto del modello tipologico di aerogeneratore descritto in premessa.

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:  $W_p = 26.111,61 \text{ kN}$

Volume netto terreno riportata di ricoprimento:  $V_t = 897,7 \text{ m}^3$

Peso proprio netto terreno riportata di ricoprimento:  $W_t = 14.004,12 \text{ kN}$

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

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

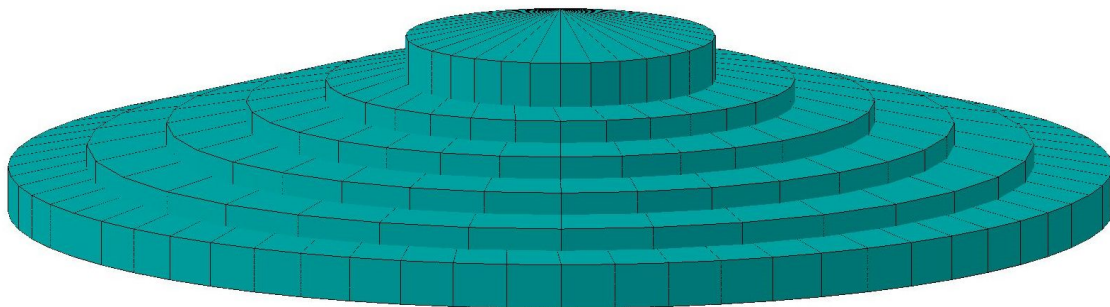
Il metodo di analisi utilizzato è quello statico, che modella le azioni dinamiche agenti sulla struttura mediante l'applicazione di forze statiche equivalenti.

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.

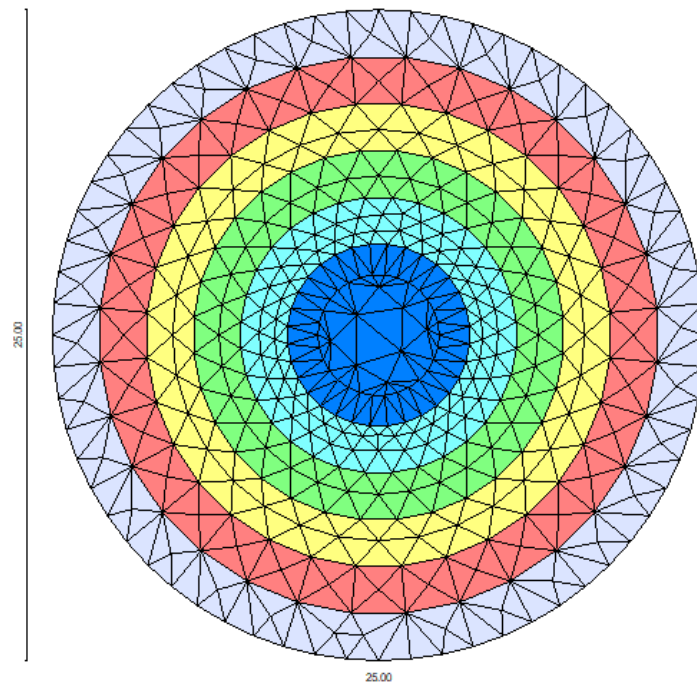
Le sollecitazioni sono state quindi ottenute mediante un'analisi agli elementi finiti (FEM), eseguita tramite l'ausilio del Software dell'Aztec Informatica, API++ vers.14.02.D (licenza n°AIU6197B1).

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.



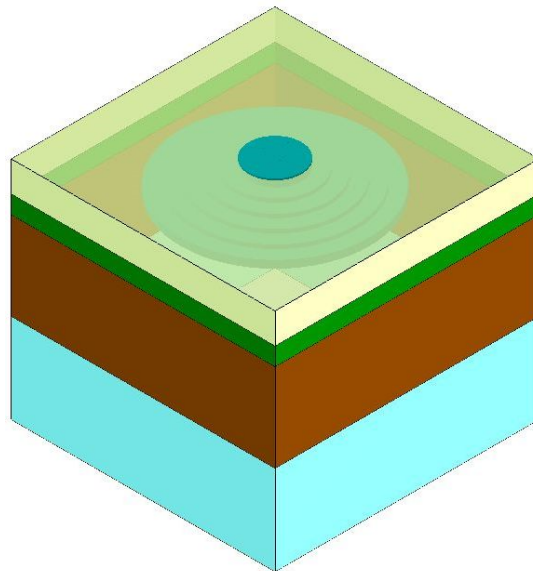
La struttura è stata discretizzata ovvero suddivisa in elementi triangolari (mesh) connessi fra di loro in corrispondenza dei nodi; per l'analisi della piastra soggetta a carichi nel piano vengono utilizzati elementi triangolari a 6 nodi.



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

- 842 mesh;
- 454 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 rigidità 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 verrà adottato il modello EnVentus EV162-5.4 MW-H125 prodotto dalla società Vestas Wind Systems A/S.

Si riportano qui di seguito i valori contenuti nel documento ufficiale [0096-8470] VER 04 rilasciato dal produttore in data 13/10/2021; si rimanda alla fase di progettazione esecutiva il dimensionamento sui dati relativi al fornitore scelto.

### Extreme loads EV162-5.4 MW-H 125

Load case	Load factor	Fy (kN)	Fz (kN)	Mx (kNm)	Mz (kNm)
Production loads	1,35	1.317,34	-7.079,00	147.900,00	-16.545,64

I carichi forniti da Vestas come "Extreme loads" sono i carichi statici massimi per la specifica turbina eolica calcolati per qualsiasi condizione.

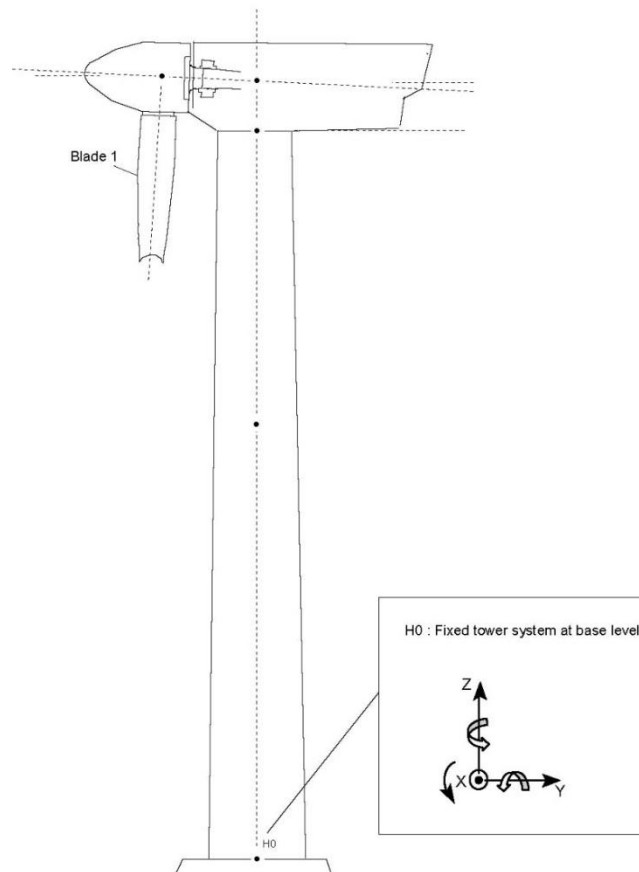
Includono il comportamento dinamico della struttura e corrispondono al caso più sfavorevole alla base dell'aerogeneratore tra i diversi casi di carico, secondo la norma IEC 61400-1.

Pertanto, i carichi forniti da Vestas come "Extreme loads" sono i carichi di progetto della fondazione e non devono essere divisi o combinati con altri carichi.

### Fatigue load EV162-5.4 MW-H 125 (valore medio)

Load factor	Fy (kN)	Mx (kNm)	Mz (kNm)
1,0	508,42	-68.454,21	-228,80

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 $\gamma_F$	COEFFICIENTI PARZIALI FAVOREVOLI / SFAVOREVOLI		
			EQU	A1	A2
Peso proprio fondazione ( $W_p$ )	Permanente proprio ( $G_1$ )	$\gamma_{G1}$	0,9 / 1,1	1,0 / 1,3	1,0 / 1,0
Peso terreno riempimento ( $W_t$ )	Permanente portato ( $G_2$ )	$\gamma_{G2}$	0,8 / 1,5	0,8 / 1,5	0,8 / 1,3
Peso aerogeneratore ( $F_z$ )	Permanente portato ( $G_2$ )	$\gamma_{G2}$	0,8 / 1,5	0,8 / 1,5	0,8 / 1,3
Vento aerogeneratore ( $F_y, M_x, M_z$ )	Variabile (Q)	$\gamma_Q$	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 $\gamma_F$	COEFFICIENTI PARZIALI FAVOREVOLI / SFAVOREVOLI		
			NORMAL	ABNORMAL	FATIGUE
Peso proprio fondazione ( $W_p$ )	Permanente proprio ( $G_1$ )	$\gamma_{G1}$	0,9 / 1,35	0,9 / 1,1	1,0
Peso terreno riempimento ( $W_t$ )	Permanente portato ( $G_2$ )	$\gamma_{G2}$	0,9 / 1,35	0,9 / 1,1	1,0
Peso aerogeneratore ( $F_z$ )	Permanente portato ( $G_2$ )	$\gamma_{G2}$	0,9 / 1,35	0,9 / 1,1	1,0
Vento aerogeneratore ( $F_y, M_x, M_z$ )	Variabile (Q)	$\gamma_Q$	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.

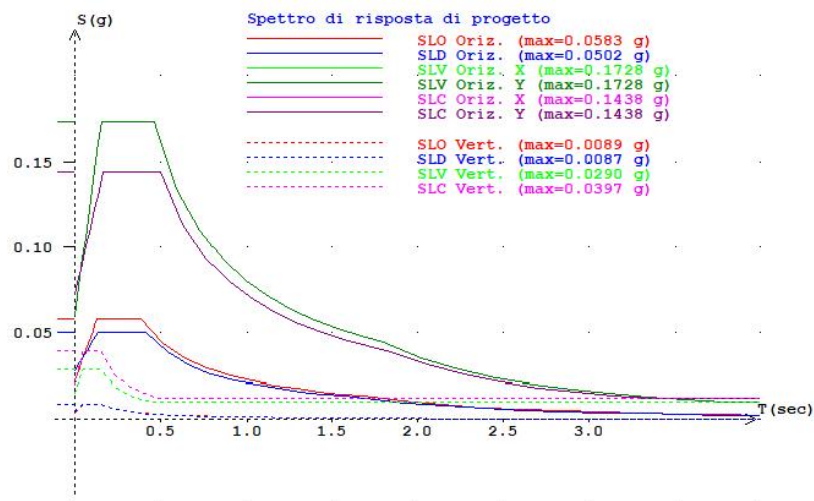
Nel presente progetto, l'azione sismica è stata valutata tenendo conto dei seguenti parametri:

- 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:

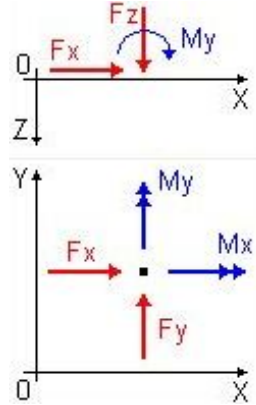
SITO	TR=30			TR=50			TR=72		
	a <sub>g</sub>	F <sub>o</sub>	T <sub>c</sub> *	a <sub>g</sub>	F <sub>o</sub>	T <sub>c</sub> *	a <sub>g</sub>	F <sub>o</sub>	T <sub>c</sub> *
SARDEGNA	0,186	2,61	0,273	0,235	2,67	0,296	0,274	2,70	0,303
	TR=101			TR=140			TR=201		
	a <sub>g</sub>	F <sub>o</sub>	T <sub>c</sub> *	a <sub>g</sub>	F <sub>o</sub>	T <sub>c</sub> *	a <sub>g</sub>	F <sub>o</sub>	T <sub>c</sub> *
	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 <sub>g</sub>	F <sub>o</sub>	T <sub>c</sub> *	a <sub>g</sub>	F <sub>o</sub>	T <sub>c</sub> *	a <sub>g</sub>	F <sub>o</sub>	T <sub>c</sub> *
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

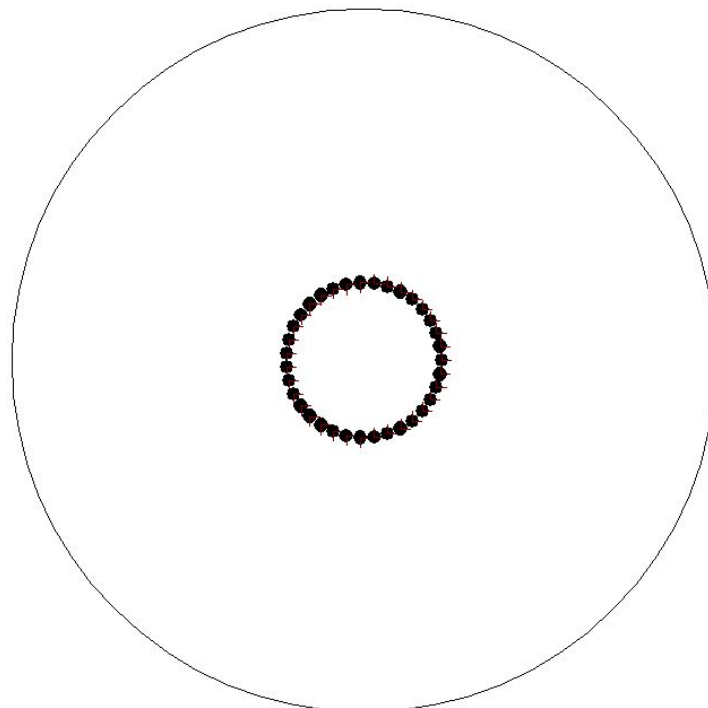
Le azioni provenienti dalla struttura in elevazione sono state applicate al modello FEM della piastra di fondazione in accordo al sistema di riferimento del software, rappresentato nella figura seguente.



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.

Per semplicità è stata scomposta la sollecitazione in un numero di 30 punti, ovvero una quarta parte dei bulloni disposti su due file (120x2); 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  $\gamma_R$  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	Fy kN	Mx kNm
- 7.079,00	1.317,34	147.900,00

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	Fy kN	Mx kNm
26.111,61	14.004,12	- 7.079,00	1.317,34	152.870,00

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

$$Mr = Y_Q \cdot (Mx + Fy \cdot H_{tot}) = 1,5 \cdot (152.870 + 1,5 \cdot 1.317,34) = 232.269,02 \text{ kNm}$$

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

$$Ms = Y_{G1} \cdot (Fz \cdot r + Wp \cdot r) = 0,9 \cdot (7.079 \cdot 12,50 + 26.111,61 \cdot 12,5) = 373.394,36 \text{ kNm}$$

$$\eta = Ms / Mr = 373.394,36 / 232.269,02 = 1,61 > 1 \text{ VERIFICATO}$$

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.

**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 esplicitiva delle resistenze che si oppongono allo scorrimento; l'analisi numerica completa è allegata nei tabulati di calcolo.

$F_h$  → Forza agente orizzontale che attiva lo scorrimento:

$$F_h = \gamma_Q \cdot F_y = 1,5 \cdot 1.317,34 = 1.976,01 \text{ kN}$$

$F_r$  → Forza resistente orizzontale che si oppone allo scorrimento:

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

in cui

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

$$\rightarrow F_r = 0,9 \cdot 33.190,61 \cdot \tan (0,67 \cdot 25,45) = 9.162,02 \text{ kN}$$

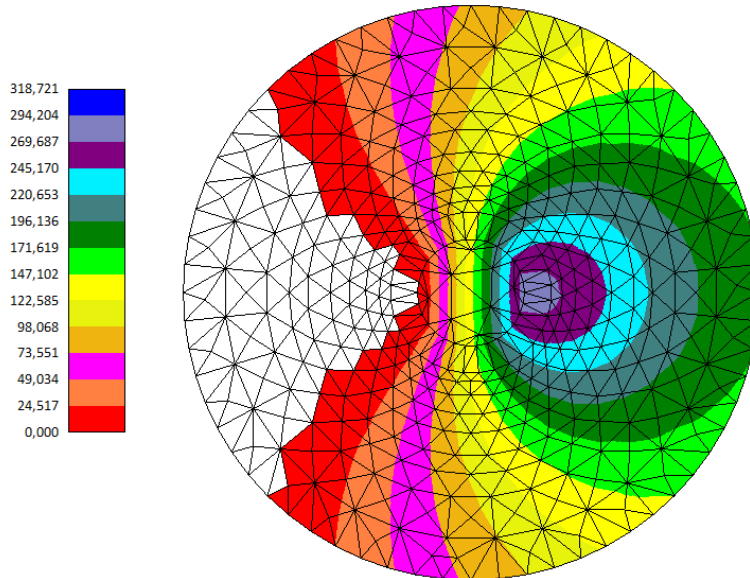
$$\eta = F_r / F_h = 9.162,02 / 1.976,01 = 4,64 > 1 \text{ VERIFICATO}$$

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.

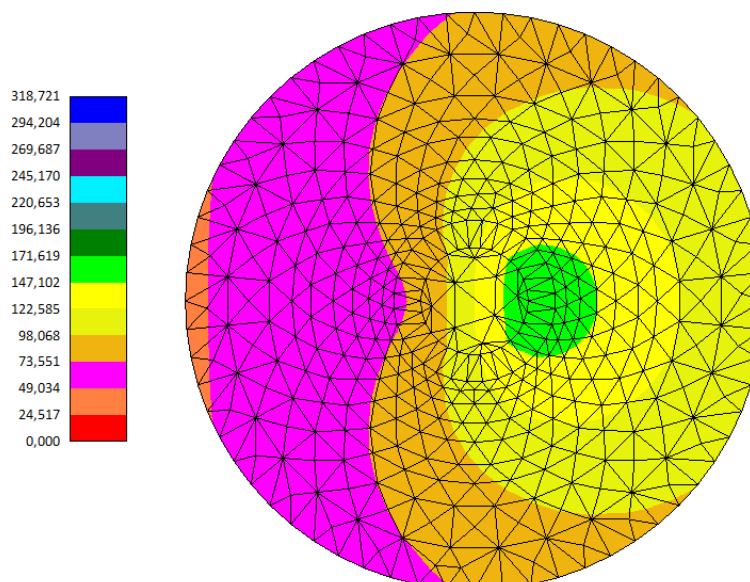
## VERIFICA DELLA CAPACITA' PORTANTE DEL TERRENO E DEI CEDIMENTI

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.

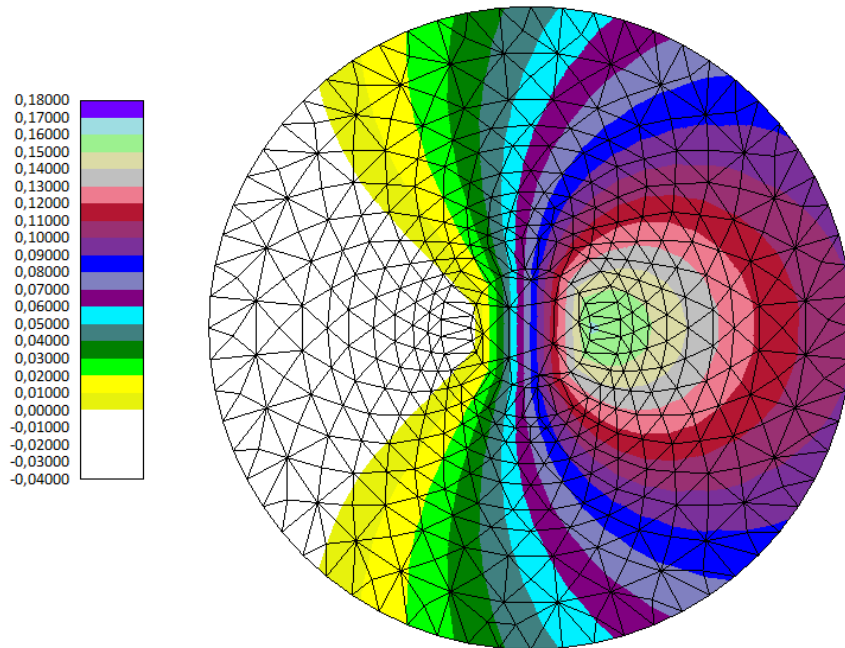


Pressioni [kPa] – SLU (COMB.2)

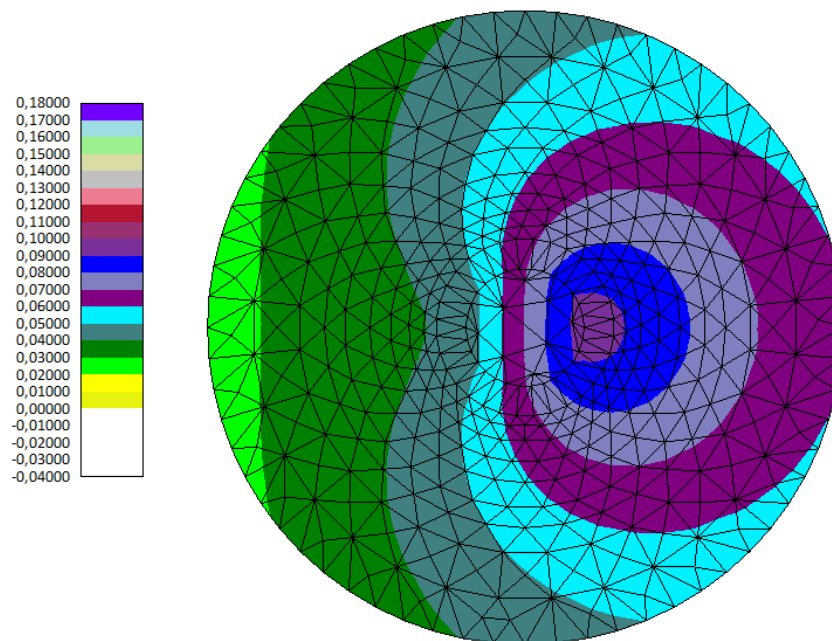


Pressioni [kPa] – SLE (COMB.3)





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



Spostamenti verticali (cm) – SLE (COMB.3)

### 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.

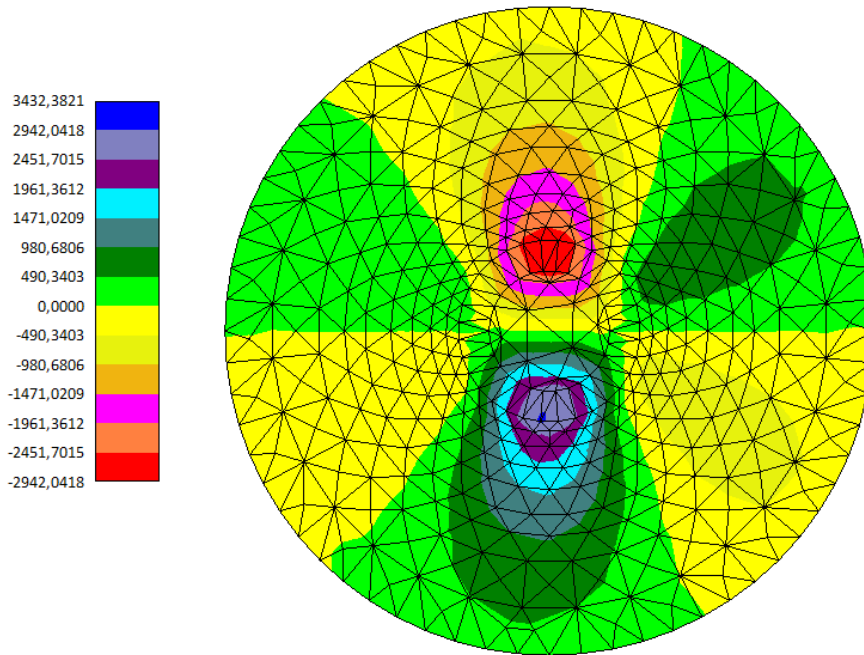


Diagramma del momento  $M_{xy}$  (KNm) – SLU (COMB.2)

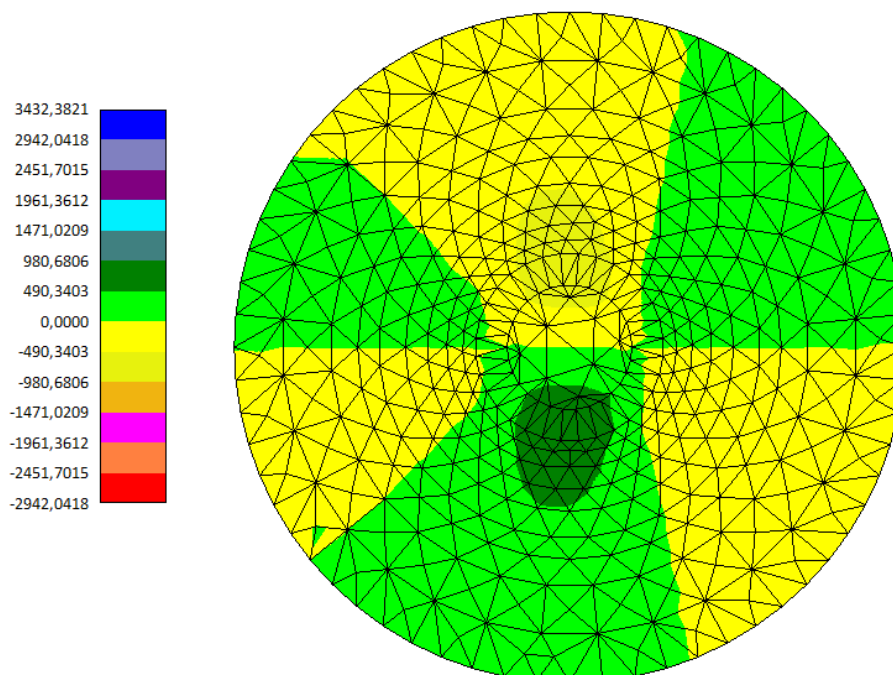
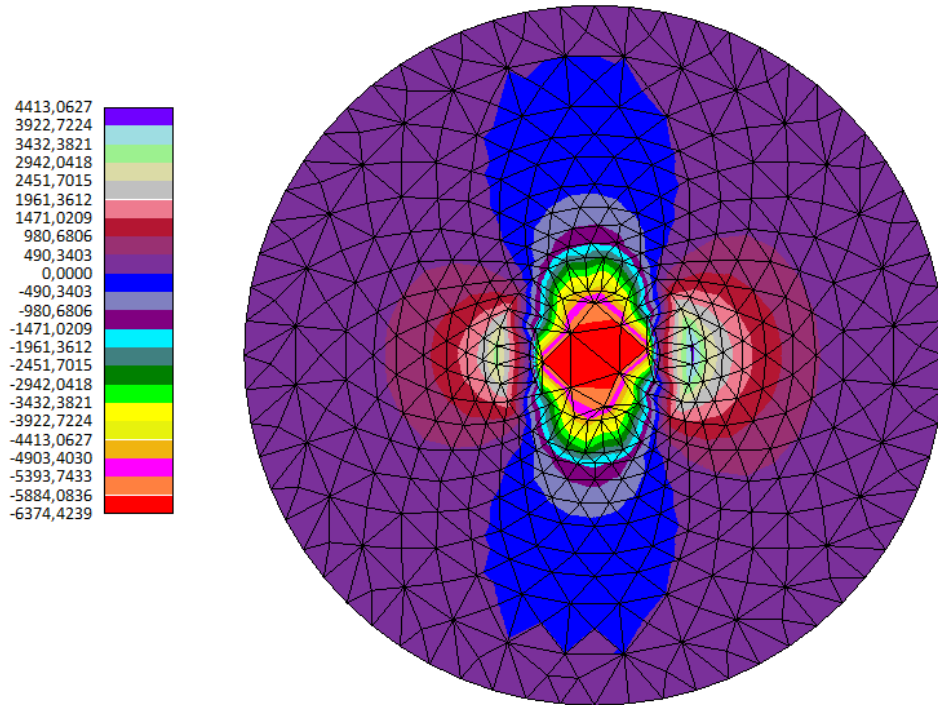
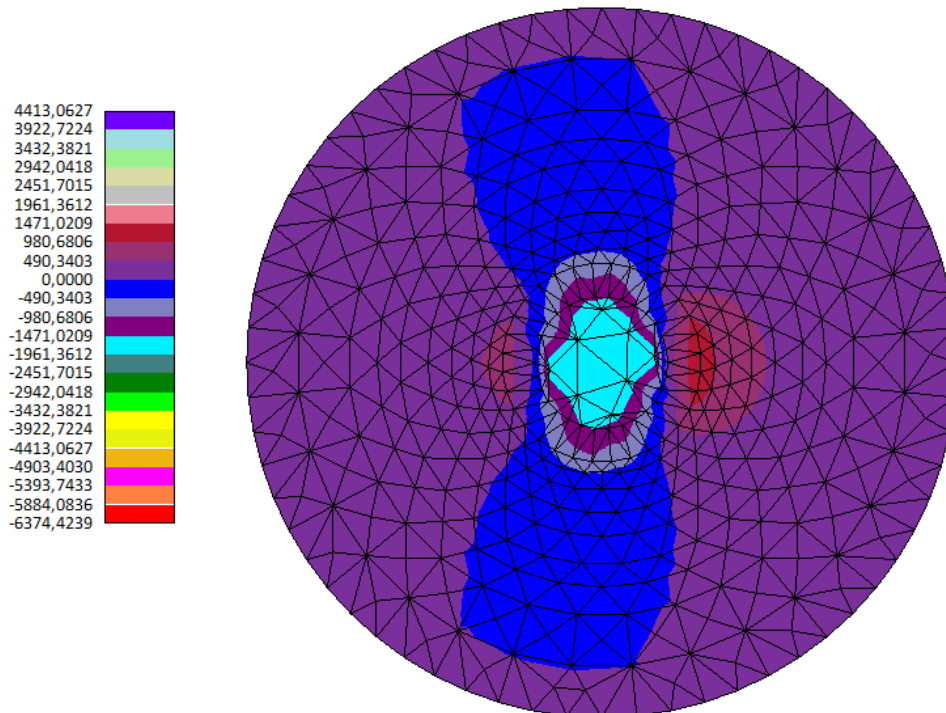


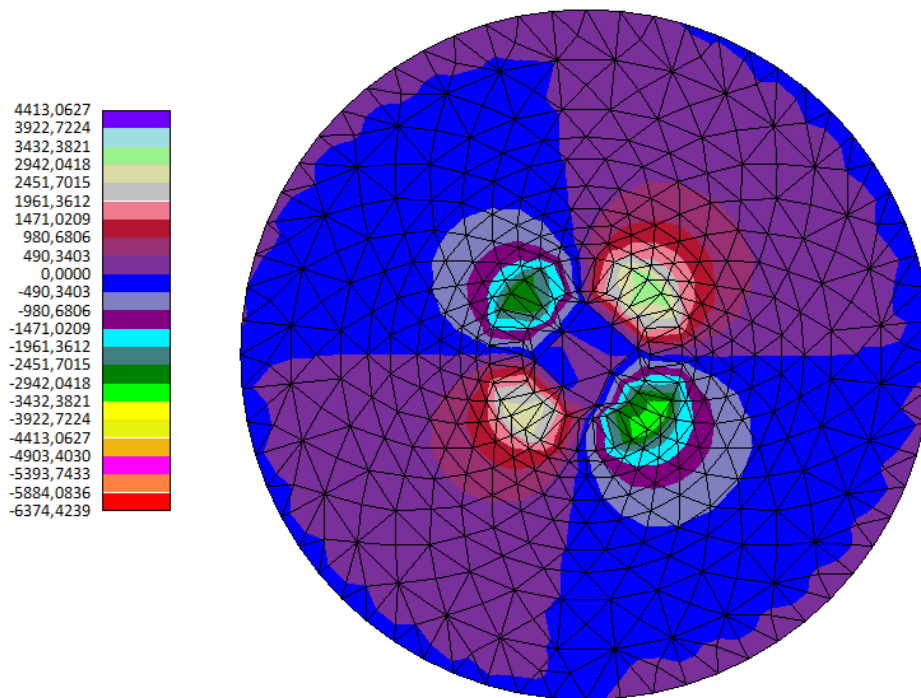
Diagramma del momento Mxy (KNm) - SLE (COMB.3)



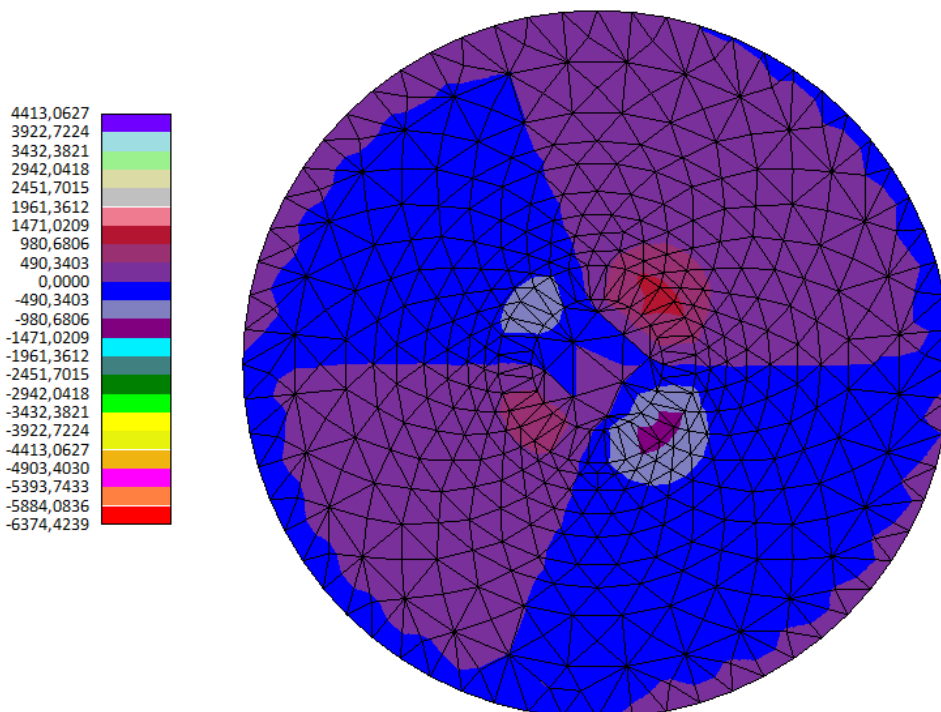
Distribuzione del taglio Tx (KN) – SLU (COMB.2)



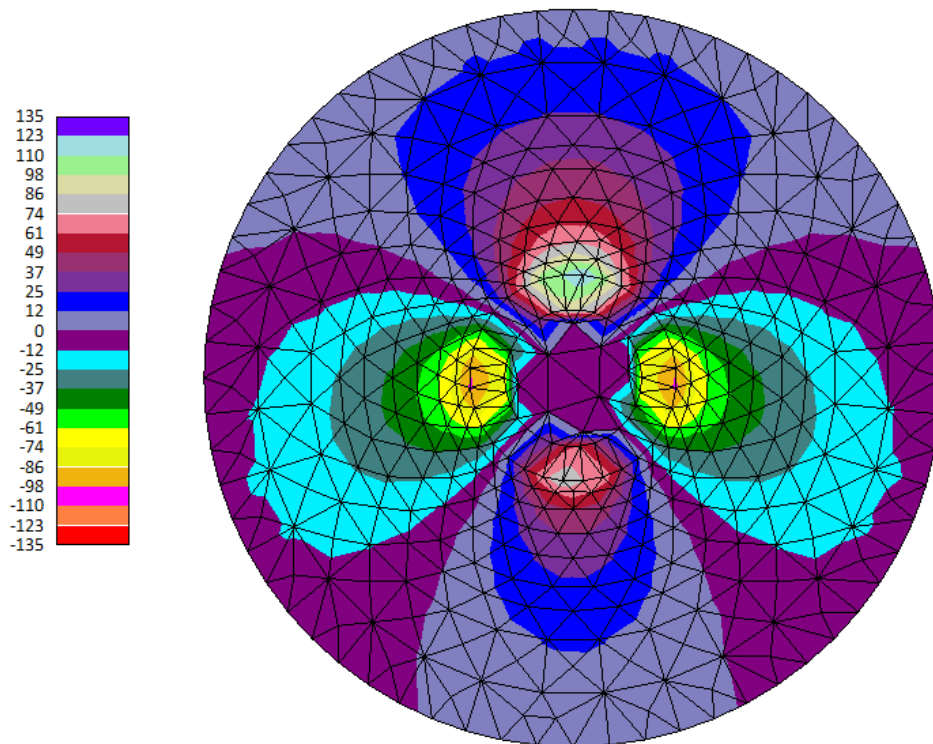
Distribuzione del taglio Tx (KN) - SLE (COMB.3)



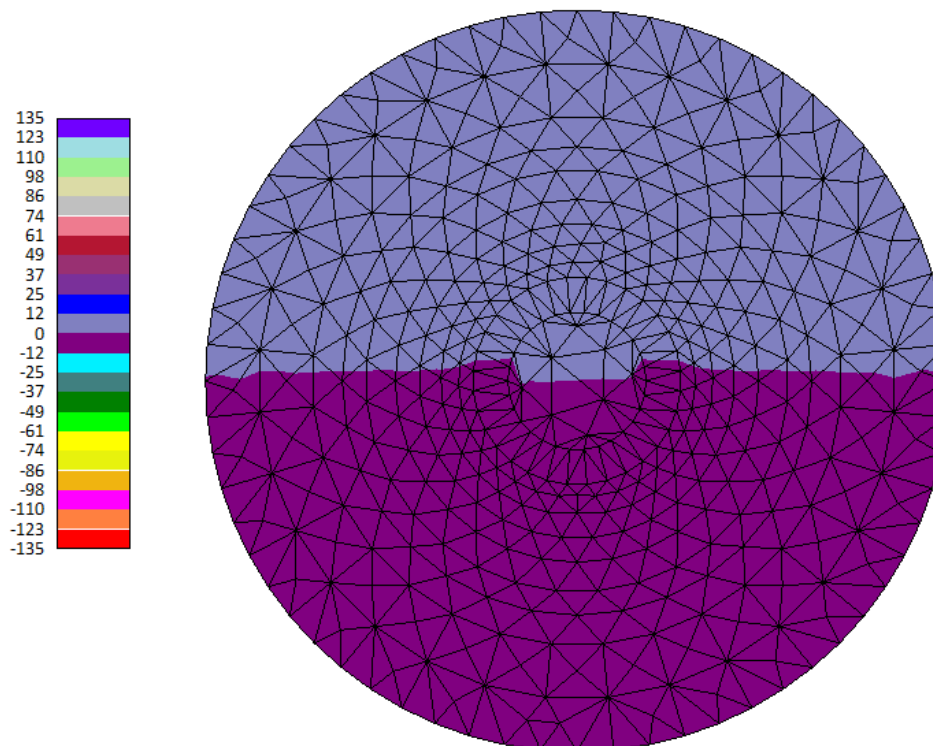
Distribuzione del taglio Ty (KN) – SLU (COMB.2)



Distribuzione del taglio Ty (KN) - SLE (COMB.3)



Distribuzione dello sforzo normale  $N_{xy}$  (KN) – SLU (COMB.2)



Distribuzione dello sforzo normale  $N_{xy}$  (KN) – SLE (COMB.3)

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.