

REGIONE  
BASILICATA



COMUNE DI  
FORENZA (PZ)



COMUNE DI PALAZZO  
SAN GERVASIO (PZ)



Provincia  
Potenza



**PROGETTO DEFINITIVO RELATIVO ALLA REALIZZAZIONE DI UN  
IMPIANTO EOLICO COSTITUITO DA 13 AEROGENERATORI E  
DALLE RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE ALLA R.T.N.**

**RELAZIONE PRELIMINARE SULLE STRUTTURE**

ELABORATO

**A.11**

PROPONENTE:

BLUE STONE  
**renewable III**

P.I. 15304181009  
Via Vincenzo Bellini,  
22 00198 Roma



PROGETTO E SIA:



Via della Resistenza, 48 - 70125 Bari - tel. 080 3219948 - fax. 080 2020986

Il DIRETTORE TECNICO  
Dott. Ing. Orazio Tricofico



CONSULENZA:

EM./REV.	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO	DESCRIZIONE
0	APRILE 2021	B.B.	A.A. - O.T.	A.A. - O.T.	Progetto definitivo

<b>A.11.a. PREMESSA .....</b>	<b>3</b>
<b>A.11.b. CARATTERIZZAZIONE DEL SITO .....</b>	<b>3</b>
<b>A.11.b.1. Inquadramento territoriale .....</b>	<b>3</b>
<b>A.11.b.2. Inquadramento geologico ed idrogeologico.....</b>	<b>8</b>
<b>A.11.b.3. Caratterizzazione geologica del sottosuolo.....</b>	<b>10</b>
<b>A.11.c. IPOTESI DI PROGETTO DELLA FONDAZIONE .....</b>	<b>11</b>
<b>A.11.d. MODELLO DI CALCOLO .....</b>	<b>13</b>
<b>A.11.e. NORME DI RIFERIMENTO .....</b>	<b>14</b>
<b>A.11.f. MATERIALI STRUTTURALI.....</b>	<b>14</b>
<b>A.11.g. ANALISI DEI CARICHI .....</b>	<b>15</b>
<b>A.11.g.1. Azioni derivanti dalla sovrastruttura.....</b>	<b>15</b>
<b>A.11.g.2. Peso proprio della fondazione.....</b>	<b>17</b>
<b>A.11.g.3. Peso proprio del riempimento.....</b>	<b>17</b>
<b>A.11.g.4. Azione sismica.....</b>	<b>18</b>
<b>A.11.g.5. Approcci di progetto e combinazioni di carico.....</b>	<b>20</b>
<b>A.11.h. VERIFICHE DI SICUREZZA GLOBALI.....</b>	<b>22</b>
<b>A.11.h.1. Gapping.....</b>	<b>23</b>
<b>A.11.h.2. Ribaltamento .....</b>	<b>24</b>
<b>A.11.h.3. Carico limite .....</b>	<b>24</b>
<b>A.11.h.4. Slittamento .....</b>	<b>29</b>
<b>A.11.h.5. Valutazione del modulo di reazione (Winkler) .....</b>	<b>32</b>
<b>A.11.h.6. Valutazione dei cedimenti.....</b>	<b>32</b>
<b>A.11.i. VERIFICHE STRUTTURALI .....</b>	<b>33</b>
<b>A.11.i.1. Risultati dell'analisi.....</b>	<b>33</b>



<b>A.11.i.2. Verifiche della resistenza a flessione .....</b>	<b>41</b>
<b>A.11.i.3. Dimensionamento delle armature superiori .....</b>	<b>41</b>
<b>A.11.i.4. Dimensionamento delle armature inferiori .....</b>	<b>42</b>
<b>A.11.i.5. Dimensionamento delle armature circolari superiori .....</b>	<b>44</b>
<b>A.11.i.6. Dimensionamento delle armature circolari inferiori .....</b>	<b>45</b>
<b>A.11.i.7. Verifica a taglio .....</b>	<b>46</b>
<b>A.11.i.8. Verifiche tensionali/di fessurazione.....</b>	<b>47</b>



### **A.11.a. PREMESSA**

La presente relazione ha lo scopo di illustrare i criteri adottati per il dimensionamento strutturale preliminare delle fondazioni delle torri eoliche individuate per la realizzazione del **parco eolico di potenza complessiva pari a 58,5 MW e relative opere di connessione alla RTN da realizzare nel comune di Forenza e Palazzo San Gervasio (Provincia di Potenza, in Regione Basilicata)**, proposto dalla società **BLUE STONE RENEWABLE III S.r.l.**

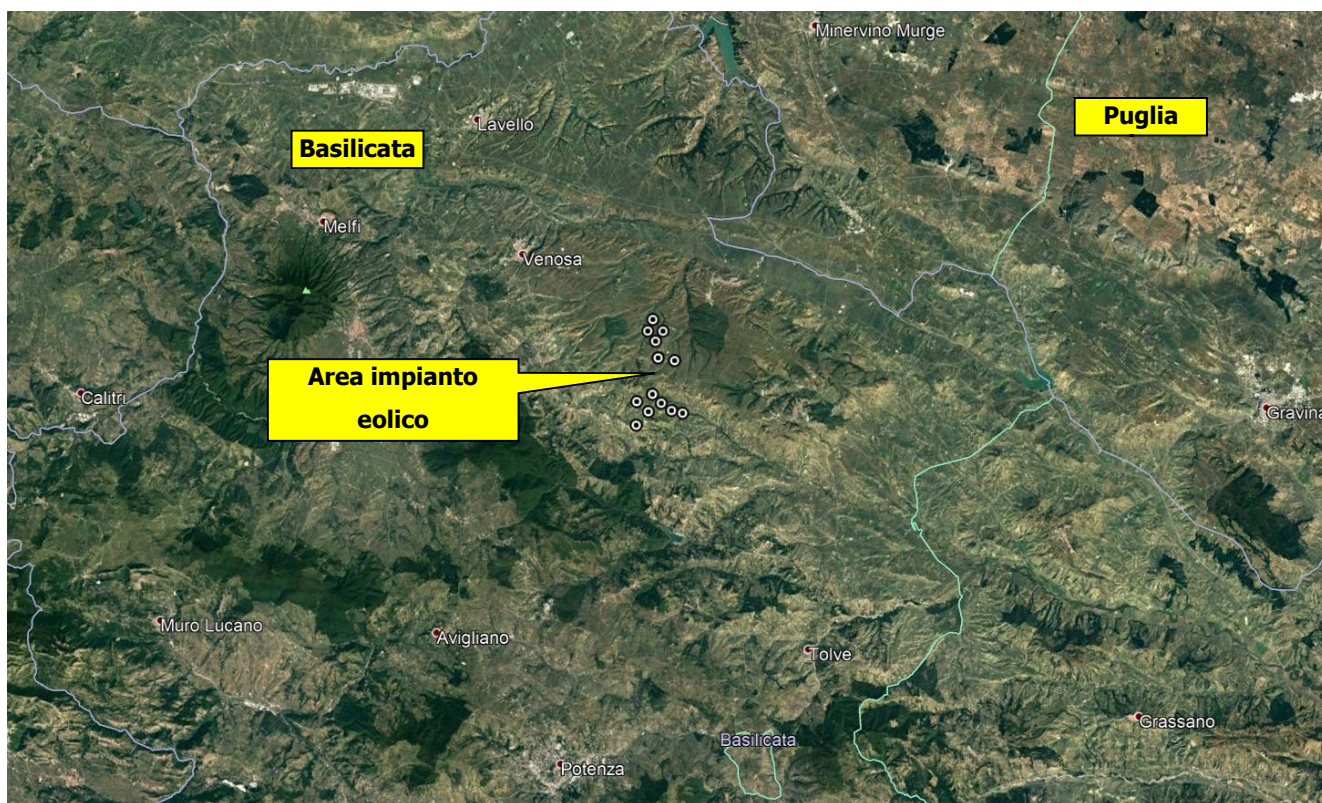
Questa fase progettuale ha carattere preliminare, pertanto dovranno essere rimandati alla fase esecutiva gli aspetti più dettagliati e peculiari dell'opera. In questa fase si illustreranno le ipotesi di partenza dalle quali si è partiti per il pre-dimensionamento delle strutture fondali, nonché gli esiti delle verifiche strutturali e geotecniche.

### **A.11.b. CARATTERIZZAZIONE DEL SITO**

#### **A.11.b.1. Inquadramento territoriale**

L'intervento in oggetto, come anticipato, è finalizzato alla realizzazione di un impianto di produzione di energia elettrica tramite conversione da fonte eolica, in zone classificate agricole, non di pregio, dal vigente strumento urbanistico comunale, da ubicare nel territorio dei comuni di **Palazzo San Gervasio** a nord e **Forenza** a sud, in provincia di Potenza, Basilicata.





**Figura 1-1: Inquadramento intervento di area vasta**

Il sito di intervento è situato nell'area a sud ovest del centro abitato di Palazzo San Gervasio, a circa 4500 m, a nord est a circa 3200 m dal centro abitato del comune di Forenza, a sud a circa 6000 m dal centro abitato di Acerenza, ad est a circa 7700 m dal centro abitato di Genzano di Lucania e a circa 5800 m dal centro abitato di Banzi.

È raggiungibile a nord, direttamente dalla SS168 per poi innestarsi nella SP 8 del Vulture, a sud percorrendo la SP 10 Venosina.

L'impianto è composto da 13 macchine con potenza unitaria di 4.5 MW, per una potenza complessiva pari a 58,5 MW.

Il sistema, quindi, sarà composto dai seguenti elementi principali:

- N° 13 Aerogeneratori tripala, di potenza unitaria pari a 4.5 MW, altezza mozzo 127.5 m, diametro rotore 145 m;
- Vani tecnici di trasformazione interni alle torri;
- Quadri elettrici MT;



- Sottostazione di trasformazione utente.

Gli interventi per l'installazione dei singoli aerogeneratori sono analoghi per le diverse aree; pertanto, di seguito saranno descritte le tipologie standard previste in progetto.

Infine, si evidenzia che tutti gli aerogeneratori componenti il Parco Eolico in oggetto sono stati installati su aree non potenzialmente in frana, lontane da bordi di scarpata e da creste rocciose molto strette ed allungate.

Le coordinate geografiche nel sistema UTM (WGS84; Fuso 33) ove sono posizionati gli aerogeneratori sono le seguenti:

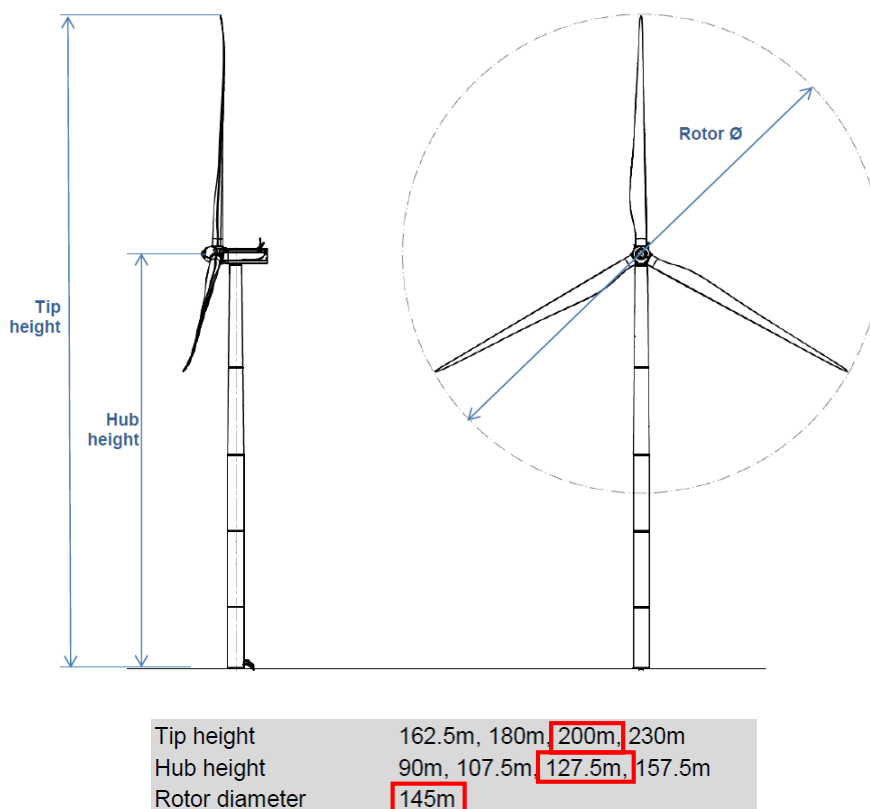
<b>ID TURBINA</b>	<b>UTM WGS84 33N Est (m)</b>	<b>UTM WGS84 33N Nord (m)</b>
<b>WTG01</b>	577375 m E	4529427 m N
<b>WTG02</b>	576943 m E	4528654 m N
<b>WTG03</b>	578009 m E	4528549 m N
<b>WTG04</b>	577431 m E	4527899 m N
<b>WTG05</b>	577503 m E	4526720 m N
<b>WTG06</b>	578636 m E	4526429 m N
<b>WTG07</b>	576882 m E	4524232 m N
<b>WTG08</b>	577440 m E	4523560 m N
<b>WTG09</b>	578107 m E	4522989 m N
<b>WTG10</b>	578860 m E	4522736 m N
<b>WTG11</b>	575740 m E	4523821 m N
<b>WTG12</b>	576488 m E	4523046 m N
<b>WTG13</b>	575566 m E	4522188 m N

La struttura tipo dell'aerogeneratore individuato consiste in:



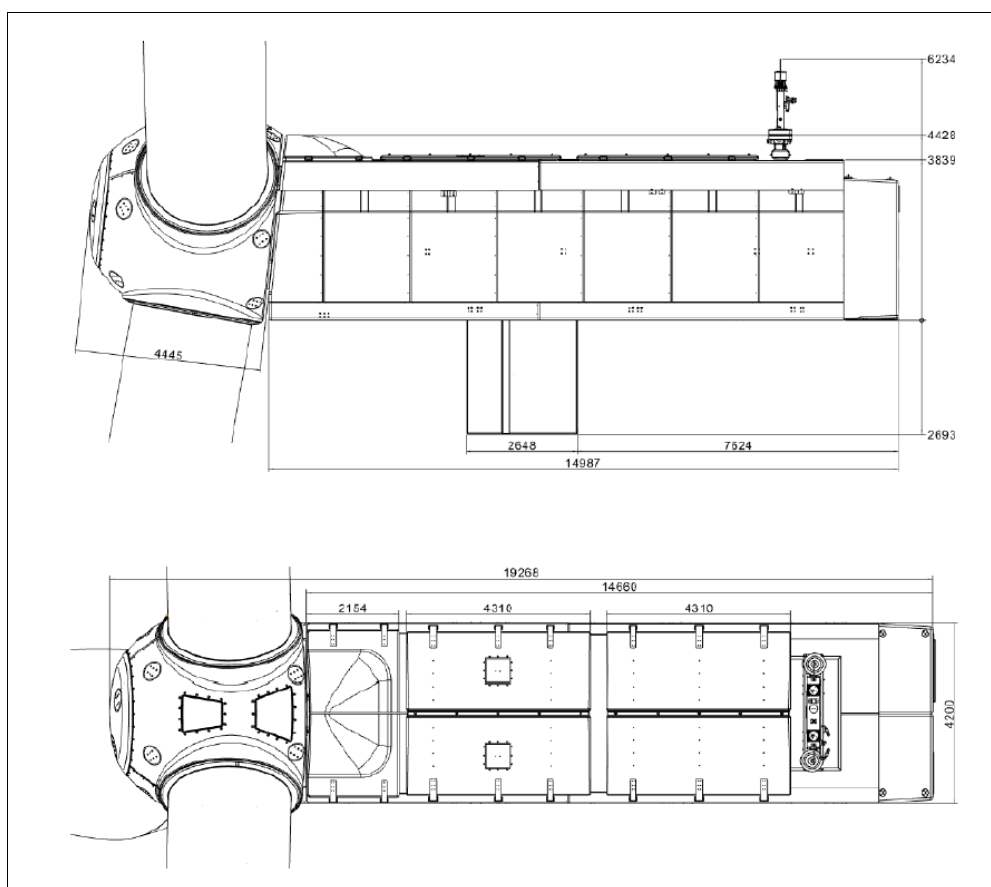
- una torre a struttura metallica tubolare di forma circolare, suddivisa in n. 5 tronchi da assemblarsi in cantiere. La base della torre viene ancorata alla fondazione mediante una serie di barre pre-tese (anchor cages);
- navicella, costituita da una struttura portante in acciaio e rivestita da un guscio in materiale composito (fibra di vetro in fibra epossidica), vincolata alla testa della torre tramite un cuscinetto a strisciamento che le consente di ruotare sul suo asse di imbardata contenente l'albero lento, unito direttamente al mozzo, che trasmette la potenza captata dalle pale al generatore attraverso un moltiplicatore di giri;
- un mozzo a cui sono collegate 3 pale, in materiale composito, formato da fibre di vetro in matrice epossidica, costituite da due gusci collegati ad una trave portante e con inserti di acciaio che uniscono la pala al cuscinetto e quindi al mozzo.

Di seguito si presentano le dimensioni e le caratteristiche tecniche dell'aerogeneratore tipo **SIEMENS GAMESA SG 4.5-145 127.5m.**



**Figura 2: Struttura aerogeneratore**





**Figura 3: Tipico navicella WTG**

<b>Potenza nominale</b>	<b>4.5 MW</b>
<b>Numero di pale</b>	<b>3</b>
<b>Diametro rotore</b>	<b>145 m</b>
<b>Altezza del mozzo</b>	<b>127.5 m</b>
<b>Velocità del vento di cut-in</b>	<b>3 m/s</b>
<b>Velocità del vento di cut-out</b>	<b>27 m/s</b>
<b>Velocità del vento nominale</b>	<b>10.7 m/s</b>
<b>Generatore</b>	<b>Asincrono</b>
<b>Tensione</b>	<b>690 V</b>





Le principali infrastrutture viarie esistenti in prossimità del sito sono:

- I a Strada Provinciale 8 del Vulture;
- I a Strada Provinciale 6 Appula
- la Strada Provinciale 10 Venosina;
- la Strada comunale di Genzano.

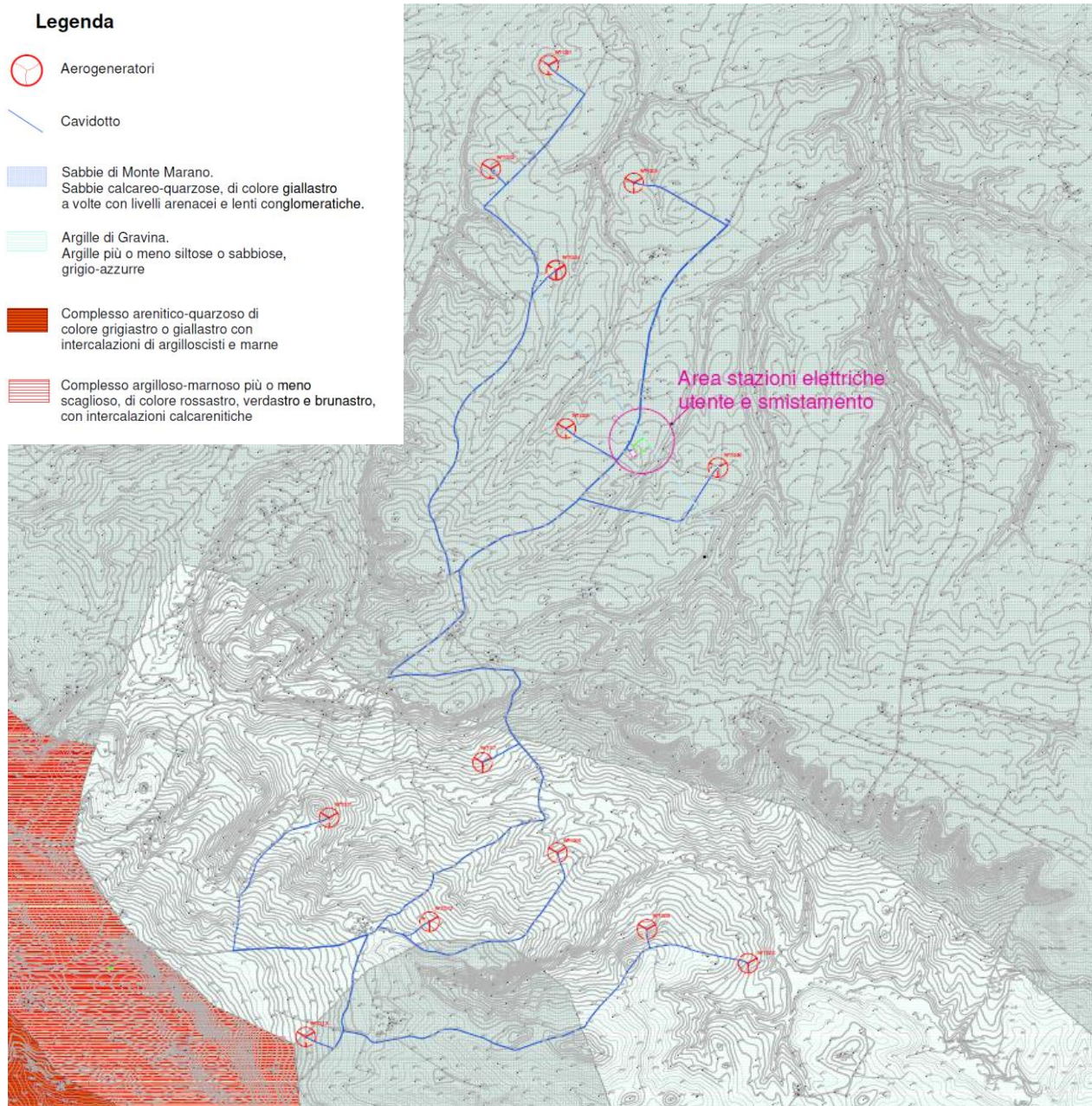
Il sito di impianto è attraversato altresì da:

- reti di telecomunicazione
- reti di distribuzione gas
- reti elettriche BT aeree su palificate
- rete elettriche MT aeree su palificate
- tombature e reti di impluvi naturali.

### **A.11.b.2. Inquadramento geologico ed idrogeologico**

Dal punto di vista geologico, il sito dove avranno sede gli aerogeneratori ricade nel Foglio 187 "Melfi" della Carta Geologica d'Italia in scala 1:100.000; si sviluppa a quote comprese tra circa 500 e 700 metri sul livello medio del mare.





**Figura 2-1: Stralcio Carta Geologica**

L'area vasta di progetto è caratterizzata da sedimenti risalenti al Miocene, prevalentemente appartenenti al Complesso Molassico-Quarzoarenitico.

Per quanto riguarda la morfologia dell'area, il territorio di Palazzo San Gervasio e di Forenza è posizionato sul complesso di sedimenti che costituisce la nota successione della Fossa Bradanica.



Si tratta di una depressione tettonica con asse allungato in direzione nord-ovest sud-est, compresa tra le Murge ad oriente e l'Appennino Lucano ad Occidente.

Le forme del rilievo della Fossa Bradanica sono condizionate in maniera determinante dalla natura clastica delle rocce che la costituiscono. Così come pure l'acclività dei versanti è più o meno accentuata, a seconda che essi siano costituiti da conglomerati, sabbie o argille, in relazione anche al loro stato di aggregazione o di assetto.

Considerato inoltre il fatto che questi materiali siano facilmente erodibili, risulta facile capire come la maggior parte delle forme del rilievo della Fossa Bradanica, siano in continua evoluzione. Difatti sono numerose le forme di dissesto gravitativo, dovute anche ad un eccessivo sfruttamento agricolo dei terreni, causato da spietramento e/o disboscamento.

Strettamente alle aree di sedime si ritiene che **la realizzazione del parco eolico, ed in particolar modo dell'area impianto, possa migliorare le condizioni di stabilità dei pendii in quanto si procederà alla sistemazione superficiale dei terreni con regimentazione delle acque di corrivazione.**

Anche la posa del cavidotto, per il quale sarà necessario uno scavo limitato nelle dimensioni e nei volumi di terreno rimossi, non intaccherà i fattori di sicurezza preesistenti delle aree attraversate dall'opera a rete.

In virtù di quanto rilevato **nella relazione Geologica (cfr. allegato A.2), è possibile affermare che la realizzazione del progetto di che trattasi non andrà ad interferire con l'attuale stato di equilibrio dei luoghi e, quindi, assolutamente sarà ininfluenza sul grado di pericolosità/rischio idrogeologico delle aree attraversate che, comunque, si presentano stabili.**

### **A.11.b.3. Caratterizzazione geologica del sottosuolo**

Dal punto di vista geologico, i litotipi su cui insiste l'area oggetto di indagine sono caratterizzati, per gli aerogeneratori WTG1, WTG2, WTG3, WTG4, WTG5, WTG6, da sedimenti sabbioso-limosi di natura calcareo-quarzosi con presenza di livelli arenitici e lenti conglomeratiche mentre per gli



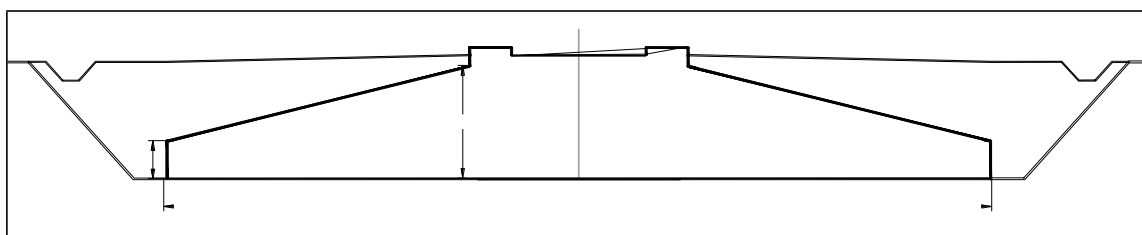
aerogeneratori WTG7, WTG8, WTG9, WTG10, WTG11, WTG12, WTG13 dai depositi argilloso-sabbiosi di colore grigio azzurro, stratigraficamente basali ai sedimenti sabbioso-limosi.

Per quanto riguarda la morfologia dell'area, il territorio di Palazzo San Gervasio e Forenza è posizionato sul complesso di sedimenti che costituisce la nota successione della Fossa Bradanica.

Si tratta di una depressione tettonica con asse allungato in direzione nord-ovest sud-est, compresa tra le Murge ad oriente e l'Appennino Lucano ad Occidente.

### **A.11.c. IPOTESI DI PROGETTO DELLA FONDAZIONE**

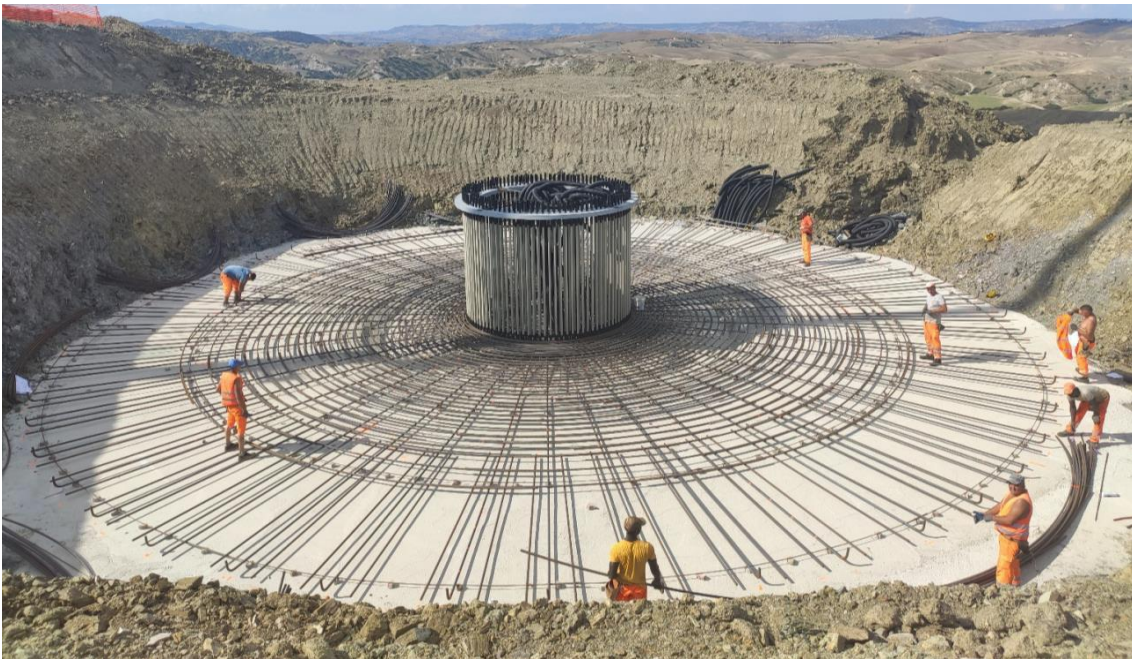
Le fondazione in progetto è in calcestruzzo armato, con pianta di forma circolare di diametro  $D_e = 20.80$  m, a spessore variabile da un minimo di 0.5 m, sul bordo esterno, ad un massimo di 3mt in corrispondenza della zona centrale di attacco della parte in elevazione della torre.



**Figura 5: sezione qualitativa plinto fondazione**

La base della torre è solidarizzata alla struttura fondale mediante un sistema di tirafondi (anchor cages) pre-tesi ed annegati nel getto del plinto di fondazione.





**Figura 3: Posa anchor cages tipo**



**Figura 4: armatura plinto tipo**

In questa fase progettuale si è optato per fondazioni di tipo superficiale, con piano di posa impostato a -3mt dal piano campagna.

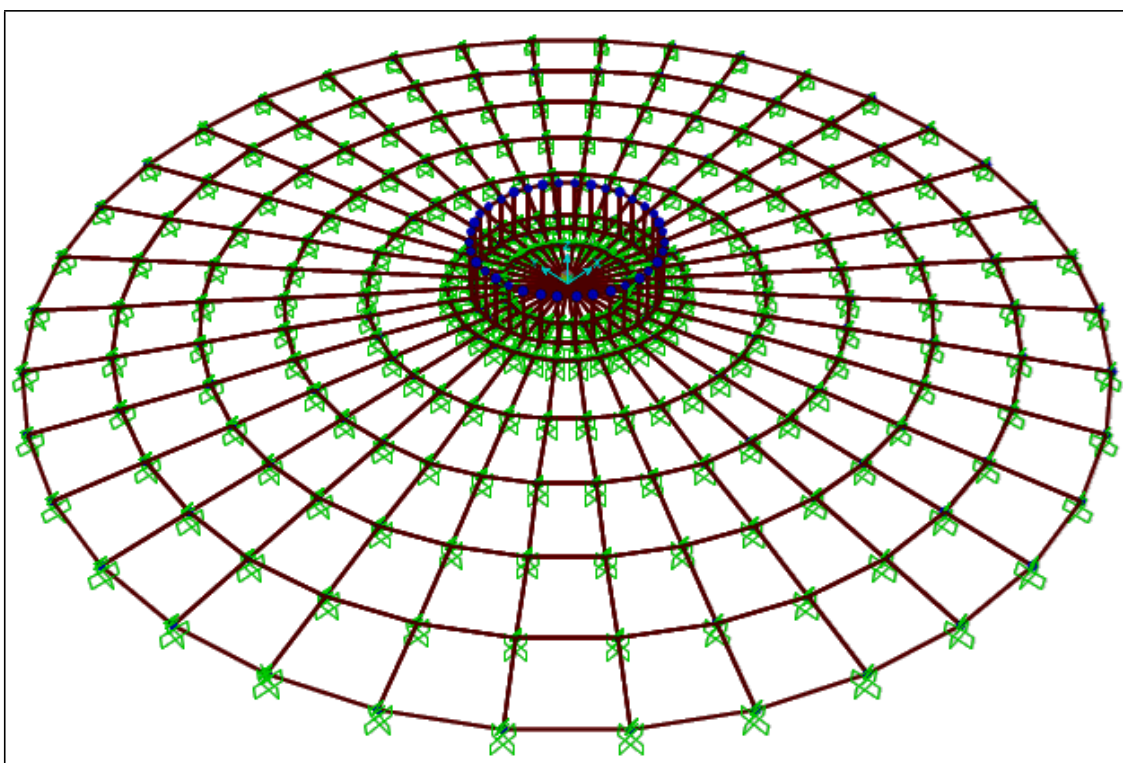


### **A.11.d. MODELLO DI CALCOLO**

La fondazione è stata modellata con elementi finiti tipo "shell-thick" vincolati su suolo elastico alla Winkler e bloccati in modo isostatico contro le labilità di piano. La costante di sottofondo  $k$  (di Winkler) è stata calcolata come riportato al paragrafo A.11.h.5;

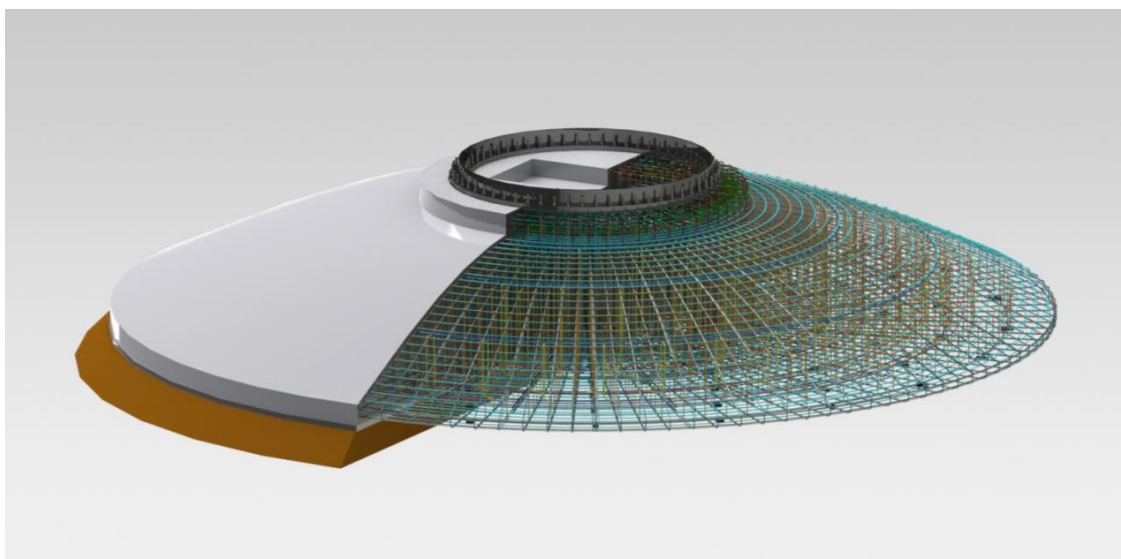
Il terreno è considerato col modello alla Winkler – molle non reagenti a trazione, pertanto le verifiche condotte sono di tipo non lineare.

I carichi provenienti dalla struttura in elevazione ( $F_z$ ,  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $M_z$ ,  $M_x$ ,  $M_y$ ) vengono applicati ad un nodo centrale posto ad una quota superiore rispetto al piano medio della piastra; questo nodo è collegato, attraverso una serie di elementi rigidi, alla corona di nodi (indicati con C nella figura 9) cui corrisponde l'attacco della torre alla fondazione.



**Figura 5: modello di calcolo a elementi finiti**





**Figura 6: Modello 3d fondazione**

#### **A.11.e. NORME DI RIFERIMENTO**

- DM 17/01/2018 - Nuove norme tecniche per le costruzioni
- Circ. 21 Gennaio 2019, n. 7/C.S.LL.PP.

#### **A.11.f. MATERIALI STRUTTURALI**

##### **CALCESTRUZZO STRUTTURALE**

Classe di resistenza C28/35 ( $R_{ck} \geq 35 \text{ N/mm}^2$ ) Classe di esposizione XC2 - Prospetto 4  
UNI 11104 Dosaggio di cemento  $\geq 320 \text{ kg/mc}$  d'impasto Rapporto A/C  $\leq 0,55$

Contenuto max di cloruri Cl 0,20%

Dimensione max inerti 25 mm

Consistenza S4

Copriferro min 50 mm

Rck .....	35	N/mm <sup>2</sup>
fck .....	29.05	N/mm <sup>2</sup>



$\gamma_c$ .....	1.50	
$\alpha_{cc}$ .....	0.85	
$f_{cd}$ .....	16.46	N/mm <sup>2</sup>
$f_{ctm}$ .....	2.83	N/mm <sup>2</sup>
$f_{ctd}$ .....	1.32	N/mm <sup>2</sup>
$v_1$ .....	0.50	
$f'_{cd}$ .....	8.23	N/mm <sup>2</sup>
$E_{cm}$ .....	32588.11	N/mm <sup>2</sup>

**ACCIAIO PER ARMATURE**

Tipo	B 450 C
$f_y$ .....	450.00 N/mm <sup>2</sup>
$f_t$ .....	540.00 N/mm <sup>2</sup>
$\gamma_s$ .....	1.15
$f_{yd}$ .....	391.30 N/mm <sup>2</sup>
$E_s$ .....	210'000.00 N/mm <sup>2</sup>
$\epsilon_{yd}$ .....	1.86
$\epsilon_{ud}$ .....	67.50

**A.11.g. ANALISI DEI CARICHI**

I carichi considerati nel modello sono:

- 1) I carichi provenienti dalla struttura in elevazione ( $F_z$ ,  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $M_z$ ,  $M_x$ ,  $M_y$ );
- 2) Il peso proprio della fondazione (calcolato in automatico dal software di calcolo);
- 3) Il peso del terreno di rinterro (sovraccarico permanente).

**A.11.g.1. Azioni derivanti dalla sovrastruttura**

Per quanto concerne gli scarichi in fondazione derivanti dall'aerogeneratore si farà riferimento alle specifiche di seguito riportate. Si precisa che I carichi sono non fattorizzati ("excl. PLF") pertanto ad essi sono da applicare i "Partial Load Factor" riportati nella 3° colonna, e che sono in accordo con quanto riportato nella norma tabella 3 § 7.6.2.1.





Characteristic Extreme								
Lead	LC/Family	PLF	Type	Mbt	Mzt	FndFr	Fzt	Ref
Sensor	[-]	[-]	[-]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]	[-]
Mbt	23CoEogVra4(fam180)	1.10	Abs	<b>125500</b>	-698.8	1176	-4946	[2]
Mzt	22VOGHWO300(fam168)	1.10	Abs	21970	<b>-10060</b>	203.9	-4774	[2]
FndFr	23CoEogVra5(fam181)	1.10	Abs	125300	-536.4	<b>1201</b>	-4961	[2]
Fzt	22VOGHWO200(fam167)	1.10	Abs	36490	1621	367.4	<b>-5040</b>	[1]

**Figura 7: Scarichi in fondazione – Condizioni di carico Abnormal**

Characteristic Extreme								
Lead	LC/Family	PLF	Type	Mbt	Mzt	FndFr	Fzt	Ref
Sensor	[-]	[-]	[-]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]	[-]
Mbt	32PREogVra11(fam242)	1.35	Abs	<b>106000</b>	-498.6	968.4	-4936	[1]
Mzt	21RPY8Vo1a00(fam116)	1.35	Abs	36880	<b>-9622</b>	343.8	-4840	[2]
FndFr	14EcdVrpa00(fam54)	1.35	Abs	98730	-1765	<b>973.7</b>	-4946	[2]
Fzt	12IceUHWO100(fam27)	1.35	Abs	37170	2040	379.6	<b>-5094</b>	[2]

**Figura 8: Scarico in fondazione – Condizioni di carico Normal**

Production loads							
		Char. load	Prob.:1e-2	Prob.:1e-4	Ref		
M <sub>res</sub>	[kNm]	106000.00	73172.11	81799.59	[1]	[2]	[1]
M <sub>z</sub>	[kNm]	-9622.07	-4079.72	-6879.56	[2]	[1]	[1]
F <sub>res</sub>	[kN]	973.74	679.73	777.36	[2]	[2]	[2]
F <sub>z</sub>	[kN]	-5094.38	-4979.90	-5012.99	[2]	[2]	[2]

**Figura 9: Scarico in fondazione – Riepilogo delle massimi caratteristici delle componenti**

**Table 3 – Partial safety factors for loads  $\gamma_f$**

Unfavourable loads			Favourable loads
Type of design situation (see Table 2)			
Normal (N)	Abnormal (A)	Transport and erection (T)	All design situations
1,35	1,1	1,5	0,9

**Figura 10: Coefficienti di combinazione previsti dalla specifica tecnica**



**A.11.g.2. Peso proprio della fondazione**

La geometria della fondazione è di seguito definita:

Diametro del plinto di fondazione:	De	=	20.80	m
Diametro esterno del piedistallo:	Di	=	5.50	m
Diametro interno del piedistallo:	Dint	=	3.00	m
Altezza minima plinto (al bordo):	Hedge	=	1.50	m
Altezza massima plinto (al centro):	Hslab	=	3.30	m
Altezza massima plinto + piedistallo:	H	=	3.60	m
Scalino esterno del piedistallo:	H - Hslab	=	0.30	m
Scalino interno del piedistallo:	Hint	=	0.20	m
Pendenza estradosso soletta:	$\alpha$	=	19.46	%
Pendenza profilo terreno:	$\delta$	=	2.00	%
Ricoprimento minimo:	H <sub>backfill,min</sub>	=	0.30	m

I volume del plinto è di 1.032,19 m<sup>3</sup> pertanto il peso è pari a 25.804,75 kN.

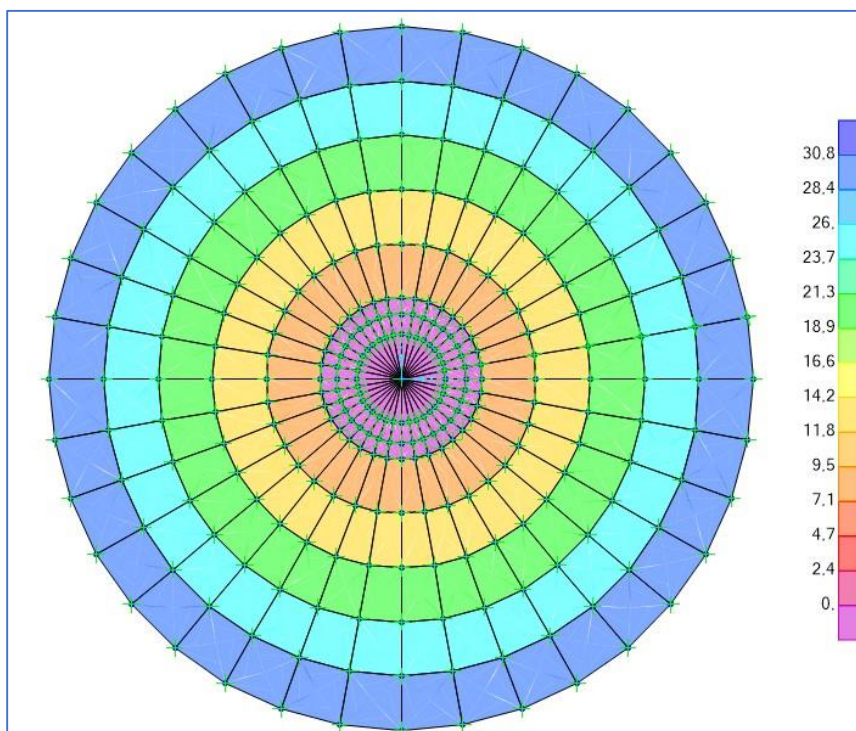
**A.11.g.3. Peso proprio del riempimento**

È previsto un rinterro al di sopra e a fianco del plinto di fondazione, da realizzarsi con materiale drenante di buone caratteristiche meccaniche. Si assume, in sede di analisi, un peso di volume pari a 17.5 kN/m<sup>3</sup>, e si assegna questo peso come pressione verticale variabile applicata sugli elementi shell che modellano il plinto, secondo quanto riportato nella successiva tabella.

Raggio interno [m]	Raggio esterno [m]	H = spessore riempim. [m]	q <sub>riempim.</sub> [kN/m <sup>2</sup> ]
2.750	4.600	0.62	8.31
4.600	6.450	0.95	13.89
6.450	8.300	1.27	19.50
8.300	10.150	1.59	25.13
10.150	12.000	1.92	30.76

**Figura 11: carichi dovuti al riempimento**





**Figura 12: Distribuzione delle pressioni dovute al riempimento sul plinto**

Il peso totale del riempimento è pari a 9.574 kN.

#### **A.11.g.4. Azione sismica**

Dal punto di vista sismico l'area in oggetto è classificata come zona sismica 2 (O.P.C.M. 3274/'03).

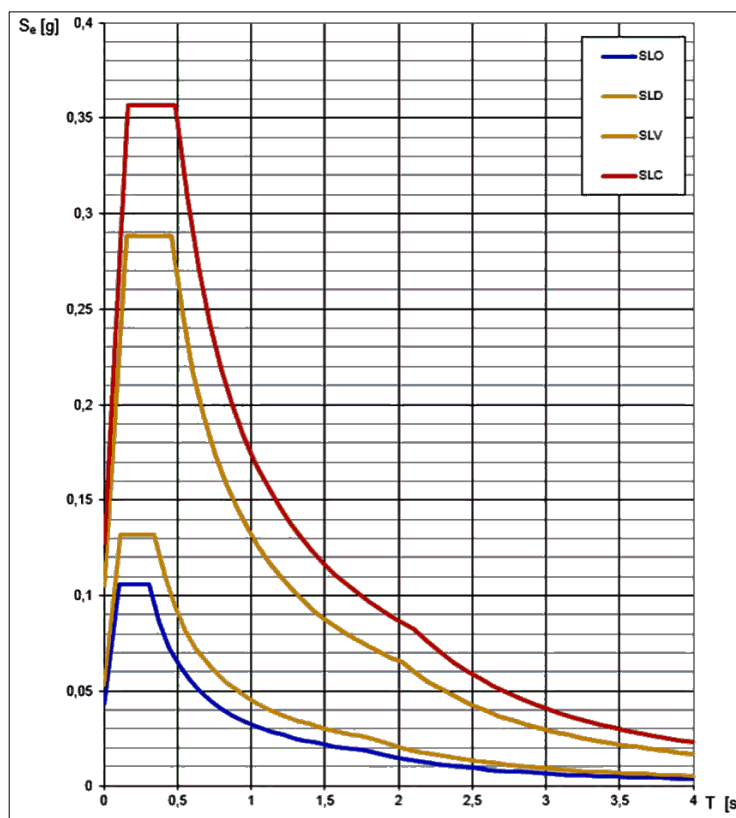
Si riportano le seguenti ipotesi di caratterizzazione sismica del sito e dell'opera in oggetto:

Zona sismica	Zona 2
Vita nominale	50 anni
Classe d'uso	IV
$C_U$	2,0
Periodo di riferimento per l'azione sismica – $V_R = V_N * C_U$	100 anni
Categoria suolo di fondazione	C
Categoria topografica	T1 ( $i < 15^\circ$ )

In funzione dei dati sopra riportati si calcolano i parametri utili alla costruzione dello spettro elastico di progetto:



Stati limite		$P_{VR}$	$T_R$ [anni]	$a_g$ [m/s <sup>2</sup> ]	$F_o$ [-]	$T_c^*$ [s]
Stati limite di esercizio	SLO	81%	30	0,037g	2,420	0,278
	SLD	63%	35	0,039g	2,423	0,289
Stati limite ultimi	SLV	10%	332	0,085g	2,635	0,429
	SLC	5%	682	0,104g	2,729	0,456



**Figura 13: Spettri elastici di progetto**

In linea generale nelle strutture eoliche l'azione orizzontale prevalente è quella dovuta ai venti, pertanto, a meno di valutazioni più specifiche, l'azione sismica è trascurabile in questo tipo di analisi.

Ai fini della presente relazione si fa riferimento a scenari di progetto non sismici, assumendo come carichi dimensionanti quelli calcolati con le simulazioni di cui al § 6.3 - scenari di progetto non sismici previsti dalla norma, condizioni di carico di tipo Normal/Abnormal.



**A.11.g.5. Approcci di progetto e combinazioni di carico**

Per le verifiche geotecniche si fa riferimento all'approccio 2, in accordo la combinazione A1+M1+R3 e le tabelle seguenti:

CARICHI	EFFETTO	Coefficiente Parziale $\gamma_F$ (o $\gamma_E$ )	EQU	(A1) STR	(A2) GEO
Permanenti	Favorevole	$\gamma_{G1}$	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Permanenti non strutturali <sup>(1)</sup>	Favorevole	$\gamma_{G2}$	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Variabili	Favorevole	$\gamma_{Qi}$	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

VERIFICA	COEFFICIENTE PARZIALE (R1)	COEFFICIENTE PARZIALE (R2)	COEFFICIENTE PARZIALE (R3)
Capacità portante	$\gamma_R = 1,0$	$\gamma_R = 1,8$	$\gamma_R = 2,3$
Scorrimento	$\gamma_R = 1,0$	$\gamma_R = 1,1$	$\gamma_R = 1,1$

Nella logica del metodo degli Stati Limite ogni azione è stata classificata in base al tipo di "sorgente" e al tipo di carico. Ciò anche nell'ottica di operare una corretta applicazione della norma [5], specifica per gli aerogeneratori, assieme con i criteri di progettazione previsti dalla norma [1] valida per tutte le costruzioni civili ed industriali.

AZIONE	TIPO DI CARICO	NORMA DI RIFERIMENTO	COEFFICIENTI PARZIALI $\gamma_F$	
			STR-GEO	EQU
Peso proprio fondazione	Permanente fondazione	[1]	1,00 / 1,30	0,90
Peso terreno riempimento	Permanente fondazione	[1]	0,80 / 1,50	0,80
Peso aerogeneratore [Fzt]	Permanente aerogener.	[5]	0,90 / 1,10 1,35	0,90
Vento aerogen. [FndFr]	Variabile aerogeneratore	[5]	/ 1,10 1,35	/ 1,10 1,35

**Figura 14: Possibili valori dei coefficienti parziali delle azioni adottati nel presente progetto**



Nella tabella a seguire si riporta l'elenco completo delle combinazioni di carico adottate nelle verifiche della fondazione dell'aerogeneratore in oggetto. Le ultime 6 colonne "N", "V", "M" indicano: "N" – carichi permanenti dell'aerogeneratore (indicati con  $F_{zi}$  in tabella 8 e tabella 9)

"V", "M" – azione derivante dal vento agente sull'aerogeneratore, valutata secondo [5]

Il pedice "Nor" oppure "Abn" identifica il tipo di combinazione in accordo con [5].

Combinazione	Peso proprio fondazione	Peso del terreno di riempimento	Componenti dello scarico derivante dall'aerogeneratore					
			NNor	NAbn	VNor	VAbn	MNor	MAbn
1 Normal SLU1	1,30	1,50	1,35		1,35		1,35	
2 Normal SLU2	1,00	1,00	0,90		1,35		1,35	
3 Abnormal 1.10	1,30	1,50		1,10		1,10		1,10
4 Abnormal 0.90	1,00	1,00		0,90		1,10		1,10
5 Normal EQU	0,90	0,00	0,90		1,35		1,35	
6 Abnormal EQU	0,90	0,00		0,90		1,10		1,10
7 Normal	1,00	1,00	1,00		1,00		1,00	
8 Abnormal	1,00	1,00		1,00		1,00		1,00
9 Quasi permanente	1,00	1,00	1,00		1,00		1,00	

**Figura 15: Coefficienti parziali delle azioni utilizzati ai fini del presente progetto**

Come si può notare, in queste combinazioni (che, come si è detto, sono state analizzate in assumendo la non linearità del modello) le prime 4 sono riconducibili a stati limite ultimi e, pertanto, sono state adottate per le verifiche di resistenza STR/GEO. Anche la 5 – 6 sono riconducibili a stati limite ultimi, ma di tipo EQU, pertanto sono state utilizzate unicamente nelle verifiche a ribaltamento.

Nella combinazione 7 gli scarichi  $N_{Nor}$ ,  $V_{Nor}$  e  $M_{Nor}$  si riferiscono ai valori riportati in tabella 10 (valori caratteristici), pertanto la combinazione 7 è stata adottata per la valutazione delle tensioni (SLE R) su calcestruzzo e armatura, oltre che per la valutazione dei cedimenti di fondazione.

L'assenza di dati relativi all'azione del vento con tempo di ritorno tipici dei valori frequenti/quasi permanenti costituisce un limite in questa fase di progettazione, non permettendo di condurre le verifiche di fessurazione rispetto a valori plausibili delle sollecitazioni in fondazione. Queste verifiche sono, pertanto, state condotte assumendo i momenti flettenti della combinazione rara (n. 7, peraltro coincidente con la 8 per quanto detto). Per lo stesso motivo, le verifiche di gapping (di



cui al 6.2) saranno condotte per le combinazioni 7, 8 e 9, assumendo per la combinazione quasi permanente gli stessi valori di scarico della 7.

Nella tabelle a seguire si riporta un riepilogo dei fattori parziali, dei coefficienti e fattori di sicurezza.

Verifica		Tipo di combinazione			Coefficienti parziali delle azioni $\gamma$ ?				
					Peso proprio	Riempimento	Fz	H	M
GEO (abnormal)	Carico limite	Approccio 2	A1+M1+R3	Abnormal 2	1.00	1.00	0.90	1.10	1.10
	Carico limite	Approccio 2	A1+M1+R3	Abnormal 1	1.30	1.50	1.10	1.10	1.10
	Scorrimento	Approccio 2	A1+M1+R3	Abnormal 2	1.00	1.00	0.90	1.10	1.10
GEO (normal)	Carico limite	Approccio 2	A1+M1+R3	Normal SLU2	1.00	1.00	0.90	1.35	1.35
	Carico limite	Approccio 2	A1+M1+R3	Normal SLU1	1.30	1.50	1.35	1.35	1.35
	Scorrimento	Approccio 2	A1+M1+R3	Normal SLU2	1.00	1.00	0.90	1.35	1.35
EQU	Ribaltamento	IEC	normal case	Normal EQU	0.90	0.00	0.90	1.35	1.35
		IEC	abnormal case	Abnorm.EQU	0.90	0.00	0.90	1.10	1.10
	Gapping	IEC	normal case	Normal	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
		IEC	abnormal case	Abnormal	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Verifica		Tipo di combinazione			Coefficiente materiale (terreno) $\gamma$ ?			$\gamma$ ?	F.S.
					$\tan(\phi')$	$c'$	Cu		
GEO (abnormal)	Carico limite	Approccio 2	A1+M 1+R3	Abnormal 2	1.00	1.00	1.00	2.30	3.11
	Carico limite	Approccio 2	A1+M 1+R3	Abnormal 1	1.00	1.00	1.00	2.30	-
	Scorrimento	Approccio 2	A1+M 1+R3	Abnormal 2	1.00	1.00	1.00	1.10	2.77
GEO (normal)	Carico limite	Approccio 2	A1+M 1+R3	Normal SLU2	1.00	1.00	1.00	2.30	2.91
	Carico limite	Approccio 2	A1+M 1+R3	Normal SLU1	1.00	1.00	1.00	2.30	3.01
	Scorrimento	Approccio 2	A1+M 1+R3	Normal SLU2	1.00	1.00	1.00	1.10	2.37
EQU	Ribaltamento	IEC	normal case	Normal EQU					2.25
		IEC	abnormal case	Abnorm.EQU					2.33
	Gapping	IEC	normal case	Normal					1.11
		IEC	abnormal case	Abnormal					2.19

### A.11.h. VERIFICHE DI SICUREZZA GLOBALI

Le verifiche riguardanti la sicurezza degli elementi strutturali sono state eseguite in accordo con il metodo degli stati limite di cui ai cap. 2, 4 e 6 di [1], tenendo conto delle ulteriori richieste prestazionali previste nella normativa di settore [5].

Le verifiche esposte nel seguito si fondano sui dati di calcolo forniti dal progettista della parte in elevazione, e che sono riassunti nelle successive tabelle (§ 6.3).

Sono state condotte le verifiche seguenti:

- 1) verifiche globali di ribaltamento



- 2) verifiche globali di gapping (parzializzazione delle pressioni sul piano di appoggio)
- 3) verifiche geotecniche di resistenza a slittamento e carico limite
- 4) valutazioni dei cedimenti massimi assoluti e differenziali
- 5) valutazione della costante di Winkler
- 6) verifiche di resistenza a flessione / taglio della piastra di fondazione
- 7) verifiche a fessurazione della piastra di fondazione.

### A.11.h.1. Gapping

La verifica di GAPPING è condotta assumendo che in combinazione 9 (quasi permanente, che nel nostro caso, coincide con la Normal) si abbia un'impronta sul terreno pari al 100 % della sagoma del plinto. Per le combinazioni 7 e 8 si assume, invece, che l'impronta possa ridursi fino al 50% della sagoma del plinto. Per garantire il 100% di sezione reagente occorre che la risultante abbia un'eccentricità massima e non superiore a 0,125 D - essendo D pari al diametro del plinto - mentre per garantire che la porzione compressa sia non inferiore al 50% dell'area di base del plinto occorre limitare l'eccentricità a 0,294 D. Di seguito si riportano le verifiche di gapping rispetto alla combinazione Qp, Normal e Abnormal tutte non fattorizzate.

	TOWER BOTTOM			FOUNDATION BOTTOM		
	CHARACTERISTIC VALUES					
	Q.p.	Normal	Abnormal FC = 1	Q.p.	Normal	Abnormal FC = 1
Fz	5'094.00	5'094.00	5'040.00	40'472.32	40'472.32	40'418.32
Fxy	973.00	973.00	1'201.00	973.00	973.00	1'201.00
Mxy	106'000.00	106'000.00	125'500.00	109'823.89	109'823.89	130'219.93
	DESIGN VALUES (FACTORED)					
Fz	5'094.00	5'094.00	5'040.00	40'472.32	40'472.32	40'418.32
Fxy	973.00	973.00	1'201.00	973.00	973.00	1'201.00
Mxy	106'000.00	106'000.00	125'500.00	109'823.89	109'823.89	130'219.93

**Figura 16: Analisi scarichi in fondazione – Tower bottom (= estradosso) e Foundation bottom (intradosso plinto)**

		QP	Normal	Abnormal
Eccentricity	e [m] =	2.71	2.71	3.22
	(e / D) =	0.113	0.113	0.134





	(e / D) max	0.125	0.294	0.294
Check	FS =	1.1056	2.600	2.190

**Figura 17: Verifica di Gapping****A.11.h.2. Ribaltamento**

La verifica a ribaltamento è dettagliata nelle seguenti tabelle.

	Peso proprio	Riempimento	Fz	H	M
Normal EQU	0.90	0.00	0.90	1.35	1.35
Abnor. EQU	0.90	0.00	0.90	1.10	1.10

**Figura 18: Coefficienti di combinazione per la verifica a ribaltamento**

	Normal EQU	Abnor. EQU
Mo (overturning) [kNm]	148'262.25	143'241.92
Ms (stabilizing) [kNm]	333'706.47	333'123.27
FS = Ms / Mo	2.251	2.326

**Figura 19: Verifica a ribaltamento****A.11.h.3. Carico limite**

Le verifiche a carico limite, per condizioni drenate e non drenate, sono dettagliate nelle successive tabelle. Si è adottato il metodo di verifica di cui all'appendice D di [4].

**SCARICHI DI PROGETTO PER VERIFICHE DI PORTANZA**

	Peso proprio	Riempimento	Fz	H	M
Normal SLU2	1.00	1.00	0.90	1.35	1.35
Normal SLU1	1.30	1.50	1.35	1.35	1.35
Abnormal 2	1.00	1.00	0.90	1.10	1.10
Abnormal 1	1.30	1.50	1.10	1.10	1.10

	TOWER BOTTOM				FOUNDATION BOTTOM			
	Normal SLU		Abnormal SLU		Normal SLU		Abnormal SLU	
Fz	4'584.60	6'876.90	4'536.00	5'544.00	39'962.92	54'783.44	39'914.32	53'450.54
Fxy	1'313.55	1'313.55	1'321.10	1'321.10	1'313.55	1'313.55	1'321.10	1'321.10
Mxy	143'100.00	143'100.00	138'050.00	138'050.00	148'262.25	148'262.25	143'241.92	143'241.92

**Figura 20: Analisi scarichi in fondazione****VERTICAL BEARING CAPACITY CHECK**

Soil unit weight

 $\gamma$ 

18.70 kPa



Backfilling unit weight	$\gamma^*$		17.50	kPa
Friction angle	$\varphi'$		22.0°	
Effective cohesion	$c'$		25.00	kPa
Undrained cohesion	$C_u$		200	kPa
Design bending moment	$M_{xy}$		143'242	kNm
Design torque moment	$M_z$		12'172.60	kNm
Design vertical load	$F_z$		39'914	kN
Design tangential load	$H$		1'321	kN
Radius	$R$		12.00	m
Depth of foundation	$D$			m
Eccentricity	$e$	$M_{xy}/F_z$	3.59	m
Ellipse minor axes	$B_e$	$2*(R-e)$	16.82	m
Ellipse major axes	$L_e$	$2 R [1-(1-B_e/2R)^2]^{1/2}$		
Effective loaded area	$A_{eff}$	$2*[R^2 \arccos(e/R)-e*(R^2 - e^2)^{1/2}]$	282.73	m <sup>2</sup>
Effective length	$L_{eff}$	$(A_{eff}*L_e/B_e)^{1/2}$	19.62	m
Effective width	$B_{eff}$	$L_{eff}*B_e/L_e$	14.41	m
Horizontal force	$H'$	$2*M_z/L_{eff}+[H^2+(2*M_z/L_{eff})^2]^{1/2}$	3'053.40	kN
Inclination of foundation	$\eta$		0.0°	
$N_c$	$N_c$	$(7.82 - 1) / \tan(22.0^\circ) =$	16.883	
$N_q$	$N_q$			
$N_\gamma$	$N_\gamma$	$2 * (7.82 - 1) * \tan(22.0^\circ) =$	5.512	
Shape factor	$s_c$	$(1.28 * 7.82 - 1) / (7.82 - 1) =$	1.316	
Shape factor	$s_q$			
Shape factor	$s_\gamma$	$1 - 0.3 * 14.41 / 19.62 =$	0.780	
Load inclination factor	$i_c$	$0.92 - (1 - 0.92)/(16.88 - 1) =$	0.912	
Load inclination factor	$i_q$	$(1 - 3163.4 / (39914 + 282.73 * 25.0 / \tan(22^\circ)))^{1.5} =$	0.917	
Load inclination factor	$i_\gamma$	$(1 - 3163.4 / (39914 + 282.73 * 25.0 / \tan(22^\circ)))^{1.5} * (1.58 - 1) =$	0.869	
Found. inclination fact.	$b_c$	$1.0 - (1 - 1.0)/(16.88 * \tan(22.0^\circ)) =$	1.000	
Found. inclination fact.	$b_q$	$(1 - \tan(0.0^\circ) * \tan(22.0^\circ))^2 =$	1.000	
Found. inclination fact.	$b_\gamma$	$1.0 =$	1.000	
Backfill pressure	$q'$	$17.5 * 0.0 =$	0.00	kPa
Component c		$25.0 * 16.88 * 1.32 * 0.91 * 1.0 =$	506.516	kPa
Component q		$0.0 * 7.82 * 1.28 * 0.92 * 1.0 =$	0.000	kPa
Component $\gamma$		$18.7 * 14.41/2 * 5.51 * 0.78 * 0.87 * 1.0 =$	502.971	kPa



Resistance factor	$\gamma_R$		2.300
Design bearing capacity	$q_{rd}$	$(506.52 + 0.0 + 502.97)/2.3 =$	439 kPa
Design pressure	$q_{sd}$	$39'914.32 / 282.73 =$	141 kPa
Bearing check	FS	$438.91 / 141.17 =$	3.109 > 1 OK

**Figura 21: Verifica a carico limite in condizioni drenate – Combinazione Abnormal 2 (4)**



**VERTICAL BEARING CAPACITY CHECK**

Soil unit weight	$\gamma$		18.70	kPa
Backfilling unit weight	$\gamma^*$		17.50	kPa
Friction angle $\phi'$		22.0°		
Effective cohesion	$c'$		25.00	kPa
Undrained cohesion	$C_u$		200	kPa
Design bending moment	$M_{xy}$		148'262	kNm
Design torque moment	$M_z$		17'536.10	kNm
Design vertical load	$F_z$		39'963	kN
Design tangential load	$H$		1'314	kN
Radius $R$		12.00	m	
Depth of doudation	$D$			m
Eccentricity $e$	$M_{xy}/F_z$	3.71	m	
Ellipse minor axes	$B_e$	$2*(R-e)$	16.58	m
Ellipse major axes	$L_e$	$2 R [1-(1-B_e/2R)^2]^{1/2}$	22.82	m
Effective loaded area	$A_{eff}$	$2*[R^2 \arccos(e/R)-e*(R^2 - e^2)^{1/2}]$	277.19	m <sup>2</sup>
Effective lenght	$L_{eff}$		$(A_{eff}*L_e/B_e)^{1/2}$	
19.53	m			
Effective width $B_{eff}$		$L_{eff}*B_e/L_e$	14.19	m
Horizontal force $H'$		$2*M_z/L_{eff}+[H^2+(2*M_z/L_{eff})^2]^{1/2}$	4'020.07	kN
Inclination of foundation	$\eta$		0.0°	
$N_c$	$N_c$	$(7.82 - 1) / \tan(22.0^\circ) =$	16.883	
$N_q$	$N_q$	$\gamma * (1 + \tan^2(\phi')) * \tan(\phi')$	∞	
$N_\gamma$	$N_\gamma$	$2 * (7.82 - 1) * \tan(22.0^\circ) =$	5.512	
Shape factor $s_c$		$(1.27 * 7.82 - 1) / (7.82 - 1) =$	1.312	
Shape factor $s_q$		$1 + \frac{1.44 * B_e}{L_e} * \tan(\phi')$	∞	
Shape factor $s_\gamma$		$1 - 0.3 * 14.19 / 19.53 =$	0.782	
Load inclination factor	$i_c$		$0.89 - (1 - 0.89)/(16.88 - 1) =$	0.884
Load inclination factor	$i_q$		$(1 - 4'020.07 / (39'963 + 277.19 * 25.0 / \tan(22.0^\circ)))^{1.58} =$	0.891
Load inclination factor	$i_\gamma$		$(1 - 4'020.07 / (39'963 + 277.19 * 25.0 / \tan(22.0^\circ)))^{1.58} * (1 - 1) =$	0.828
Found. inclination fact.	$b_c$		$1.0 - (1 - 1.0)/(16.88 * \tan(22.0^\circ)) =$	1.000
Found. inclination fact.	$b_q$		$(1 - \tan(0.0^\circ) * \tan(22.0^\circ))^2 =$	1.000



Found. inclination fact.	$b_{\gamma}$	1.0 =	1.000
Backfill pressure $q'$	$17.5 * 0.0 =$	0.00	kPa
Component c	$25.0 * 16.88 * 1.31 * 0.88 * 1.0 =$	489.683	kPa
Component q	$0.0 * 7.82 * 1.27 * 0.89 * 1.0 =$	0.000	kPa
Component $\gamma$	$18.7 * 14.19/2 * 5.51 * 0.78 * 0.83 * 1.0 =$	473.785	kPa
Resistance factor	$\gamma_R$		2.300
Design bearing capacity	$q_{rd}$	$(489.68 + 0.0 + 473.79)/2.3 =$	419 kPa
Design pressure $q_{sd}$	$39'962.92 / 277.19 =$	144	kPa
Bearing check	FS	$418.9 / 144.17 =$	2.906 > 1 OK

**Figura 22: Verifica a carico limite in condizioni drenate – Combinazione Normal SLU 2**

**VERTICAL BEARING CAPACITY CHECK**

Soil unit weight	$\gamma$		18.70	kPa
Backfilling unit weight	$\gamma^*$		17.50	kPa
Friction angle	$\varphi'$		22.0°	
Effective cohesion	$c'$		25.00	kPa
Undrained cohesion	$C_u$		200	kPa
Design bending moment	$M_{xy}$		148'262	kNm
Design torque moment	$M_z$		17'536.10	kNm
Design vertical load	$F_z$		54'783	kN
Design tangential load	$H$		1'314	kN
Radius	$R$		12.00	m
Depth of doudnation	$D$			m
Eccentricity	$e$	$M_{xy}/F_z$	2.71	m
Ellipse minor axes	$B_e$	$2*(R-e)$	18.59	m
Ellipse major axes	$L_e$	$2 R [1-(1-B_e/2R)^2]^{1/2}$	23.38	m
Effective loaded area	$A_{eff}$	$2*[R^2 \arccos(e/R)-e*(R^2 - e^2)^{1/2}]$	323.60	m <sup>2</sup>
Effective lenght	$L_{eff}$	$(A_{eff}*L_e/B_e)^{1/2}$	20.18	m
Effective width	$B_{eff}$	$L_{eff}*B_e/L_e$	16.04	m
Horizontal force	$H'$	$2*M_z/L_{eff}+[H^2+(2*M_z/L_{eff})^2]^{1/2}$	3'917.14	kN
Inclination of foundation	$\eta$		0.0°	
$N_c$	$N_c$	$2 + \pi =$	5.142	
$N_q$	$N_q$	1 =	1.000	
$N_{\gamma}$	$N_{\gamma}$	0 =	0.000	
Shape factor	$s_c$	$1 + 0.2 * (16.04 / 20.18) =$	1.159	
Shape factor	$s_q$	1 =	1.000	
Shape factor	$s_{\gamma}$	1 =	1.000	



Load inclination factor	$i_c$	$1/2 * [1 + \sqrt{(1 - 3*917.14 / 323.6 / 200.0)}]$	=	0.985	
Load inclination factor	$i_q$		=	1.000	
Load inclination factor	$i_\gamma$		=	1.000	
Found. inclination fact.	$b_c$	$1 - 2 * \text{rad}(0.0^\circ) / (2 + \pi)$	=	1.000	
Found. inclination fact.	$b_q$		=	1.000	
Found. inclination fact.	$b_\gamma$		=	1.000	
Backfill pressure	$q'$		$17.5 * 0.0 =$	0.00	kPa
Component c		$200.0 * 5.14 * 1.16 * 0.98 * 1.0 =$		1'173.496	kPa
Component q		$0.0 * 1.0 * 1.0 * 1.0 * 1.0 =$		0.000	kPa
Component $\gamma$		$18.7 * 16.04/2 * 0.0 * 1.0 * 1.0 * 1.0 =$		0.000	kPa
Resistance factor	$\gamma_R$			2.300	
Design bearing capacity	$q_{rd}$	$(1'173.5 + 0.0 + 0.0)/2.3 =$		510	kPa
Design pressure	$q_{sd}$	$54'783.44 / 323.6 =$		169	kPa
Bearing check	FS	$510.22 / 169.3 =$		3.014	> 1 OK

**Figura 23: Verifica a carico limite in condizioni non drenate – Combinazione Normal SLU 1**

#### A.11.h.4. Slittamento

Di seguito di dettaglia la verifica a slittamento.

	DEAD	BACKFILL	Fz	H	M
Normal SLU2	1.00	1.00	0.90	1.35	1.35
Abnormal 2	1.00	1.00	0.90	1.10	1.10

	TOWER BOTTOM		FOUNDATION BOTTOM	
	Normal SLU2	Abnormal 2	Normal SLU2	Abnormal 2
Fz	4'584.60	4'536.00	39'962.92	39'914.32
Fxy	1'313.55	1'321.10	1'313.55	1'321.10
Mxy	143'100.00	138'050.00	148'262.25	143'241.92

**Figura 24: Analisi scarichi in fondazione**

#### SLIDING CHECK

Soil unit weight	$\gamma$	18.70	kPa
Backfilling unit weight	$\gamma^*$	17.50	kPa
Undrained cohesion	$C_u$	200	kPa



Design bending moment	$M_{xy}$		143'242	kNm
Design torque moment	$M_z$		14'288.67	kNm
Design vertical load	$F_z$		39'914	kN
Design tangential load	$H$		1'321	kN
Radius	$R$		12.00	m
Eccentricity	$e$	$M_{xy}/F_z$	3.59	m
Ellipse minor axes	$B_e$	$2*(R-e)$	16.82	m
Ellipse major axes	$L_e$	$2 R [1-(1-B_e/2R)^2]^{1/2}$	22.90	m
Effective loaded area	$A_{eff}$	$2*[R^2 \arccos(e/R)-e*(R^2 - e^2)^{1/2}]$	282.73	m <sup>2</sup>
Effective length	$L_{eff}$	$(A_{eff}*L_e/B_e)^{1/2}$	19.62	m
Effective width	$B_{eff}$	$L_{eff}*B_e/L_e$	14.41	m
Horizontal force	$H'$	$2*M_z/I_{eff}+[H^2+(2*M_z/I_{eff})^2]^{1/2}$	3'423.10	kN
Friction angle	$\phi'$		22.0°	
Struct.-ground friction	$\delta'$	$2/3 * 22° =$	14.7°	
Undrained adhesion	$C_a$		200	kPa
Resistance factor	$\gamma_R$		1.100	
Design sliding resist.	$R_d$	$F_z \tan(\delta) / \gamma?$	9'497	kN
Sliding check	$FS$	$9'496.83 / 3'423.1 =$	2.774	> 1 OK

**Figura 25: Verifica a slittamento – Combinazione Abnormal SLU 2**



**SLIDING CHECK**

Soil unit weight	$\gamma$		18.70	kPa
Backfilling unit weight	$\gamma^*$		17.50	kPa
Undrained cohesion	$C_u$		200	kPa
Design bending moment	$M_{xy}$		148'262	kNm
Design torque moment	$M_z$		17'536.10	kNm
Design vertical load	$F_z$		39'963	kN
Design tangential load	$H$		1'314	kN
Radius	$R$		12.00	m
Eccentricity	$e$	$M_{xy}/F_z$	3.71	m
Ellipse minor axes	$B_e$	$2*(R-e)$	16.58	m
Ellipse major axes	$L_e$	$2 R [1-(1-B_e/2R)^2]^{1/2}$	22.82	m
Effective loaded area	$A_{eff}$	$2*[R^2 \arccos(e/R)-e*(R^2 - e^2)^{1/2}]$	277.19	m <sup>2</sup>
Effective lenght	$L_{eff}$	$(A_{eff}*L_e/B_e)^{1/2}$	19.53	m
Effective width	$B_{eff}$	$L_{eff}*B_e/L_e$	14.19	m
Horizontal force	$H'$	$2*M_z/L_{eff}+[H^2+(2*M_z/L_{eff})^2]^{1/2}$	4'020.07	kN
Friction angle	$\varphi'$		22.0°	
Struct.-ground friction	$\delta'$	$2/3 * 22° =$	14.7°	
Undrained adhesion	$C_a$		200	kPa
Resistance factor	$\gamma_R$		1.100	
Design sliding resist.	$R_d$	$F_z \tan(\delta) / \gamma^? =$	9'508	kN
Sliding check	$FS$	$9'508.39 / 4'020.07 =$	2.365	> 1 OK

**Figura 26: Verifica a slittamento – Combinazione Normal SLU 2**





### A.11.h.5. Valutazione del modulo di reazione (Winkler)

#### VALUTAZIONE MODULO DI REAZIONE SOTTOFONDO (WINKLER)

n. stratigraphy 1

- on stratum over bedrock
- on stratum over half-space
- embedded in stratum over bedrock

Parameter	Symbol	Expression / note	Value
Static shear modulus	G		7.69 N/mm <sup>2</sup>
Static Young modulus	E		20.00 N/mm <sup>2</sup>
Poisson ratio	v		0.30 -
Foundation radius	R		12.00 m
Thickness of layer	H		120.00 m
	$\alpha_r$	(for circular rigid foundation)	-
Winkler modulus	$K_w$	$\frac{4GR}{1-\nu} (1 + 1.28 \frac{R}{H}) \frac{1}{\pi R^2}$	1'315.21 kN/m <sup>3</sup>

Figura 27: Valutazione della costante di Winkler

### A.11.h.6. Valutazione dei cedimenti

Il cedimento medio in combinazione SLE Rara (Normal) si assume pari al rapporto tra la pressione media e la costante di Winkler di ui al punto precedente.

La pressione media, sulla base dell'analisi di carichi esposta ai punti precedenti, vale

$$Q_{\text{MEDIA,SLE}} = 40472 / (3,1416 * 12^2) = 89 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Cedimento elastico medio atteso} = 100 * 80 / 1315 \approx 6 \text{ cm.}$$

Il cedimento differenziale massimo atteso, sempre in combinazione rara, secondo la formulazione di Bowles:



Parameter	Symbol	Expression / note	Value
Poisson ratio	$\nu$		
Static Young modulus	E	(Layer 1)	20.00 N/mm <sup>2</sup>
		(Layer 2)	0.00 N/mm <sup>2</sup>
		(mean value)	20.00 N/mm <sup>2</sup>
Thickness of Layer 1	t <sub>1</sub>	(Layer 1)	120.00 m
Bending moment (Qp)	M	(normal quasi permanent)	109'823.89 kNm
Influence factor	I <sub>θ</sub>	(rigid circular spread foundation)	5.53
Static rotation	tan(θ)	$\tan(\theta) = \frac{(1-\nu^2)}{E} \frac{M}{B^2 L} I_{\theta}$	2.00 mm/m

Figura 28: Valutazione del cedimento massimo differenziale (rotazione) in combinazione SLE rara (Normal)

## A.11.i. VERIFICHE STRUTTURALI

### A.11.i.1. Risultati dell'analisi

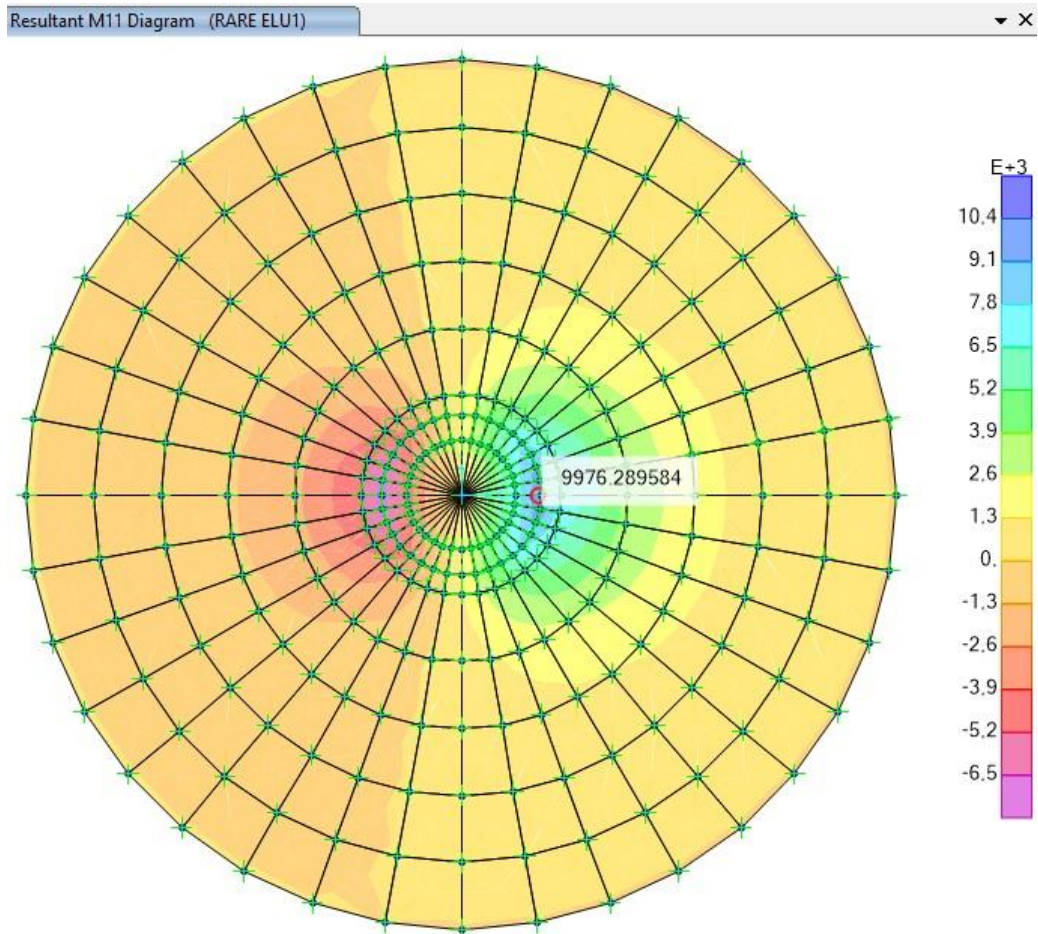
A seguire si riportano le tabelle relative alle sollecitazioni di piastra, ottenute dall'analisi strutturale in accordo ai criteri di modellazione su esposti. Nel seguito si assume la convenzione che considera:

- i momenti radiali di piastra indicati con M11 o anche come M2
- i momenti circonferenziali di piastra con M22 o anche come M1

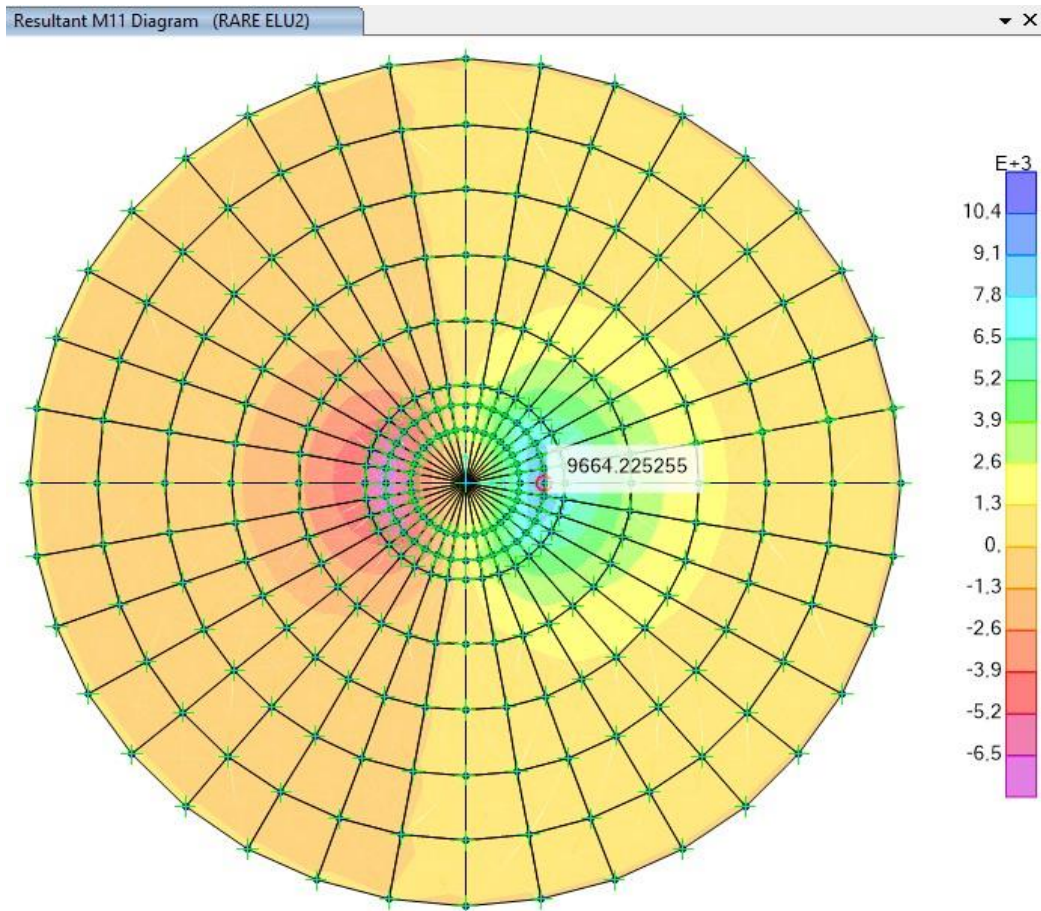
Momenti di piastra (valori max/min)	M <sub>11(+)</sub> [kNm/m]	M <sub>11(-)</sub> [kNm/m]	M <sub>22(+)</sub> [kNm/m]	M <sub>22(-)</sub> [kNm/m]
Normal SLU 1	9'976.29	-7'246.51	6'050.36	-3'142.56
Normal SLU 2	9'664.23	-7'503.30	5'552.23	-3'653.56
Abnormal 0,9	10'239.19	-7'927.33	5'790.81	-3'970.22
Abnormal 1,1	10'262.49	-7'987.51	6'083.09	-3'658.01

Figura 29: Valori massimi dei momenti di piastra



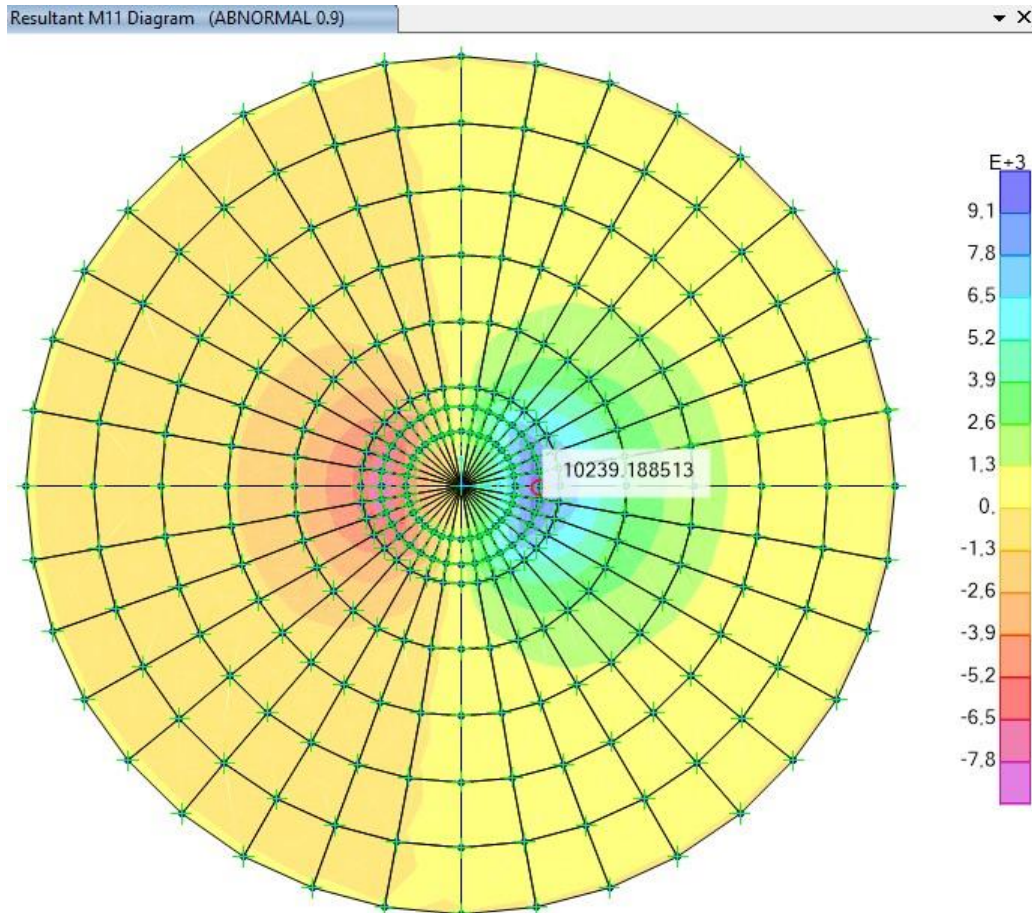


**Figura 30: Momento Massimo  $M_{11}$  Normal SLU 1 [kNm/m]**

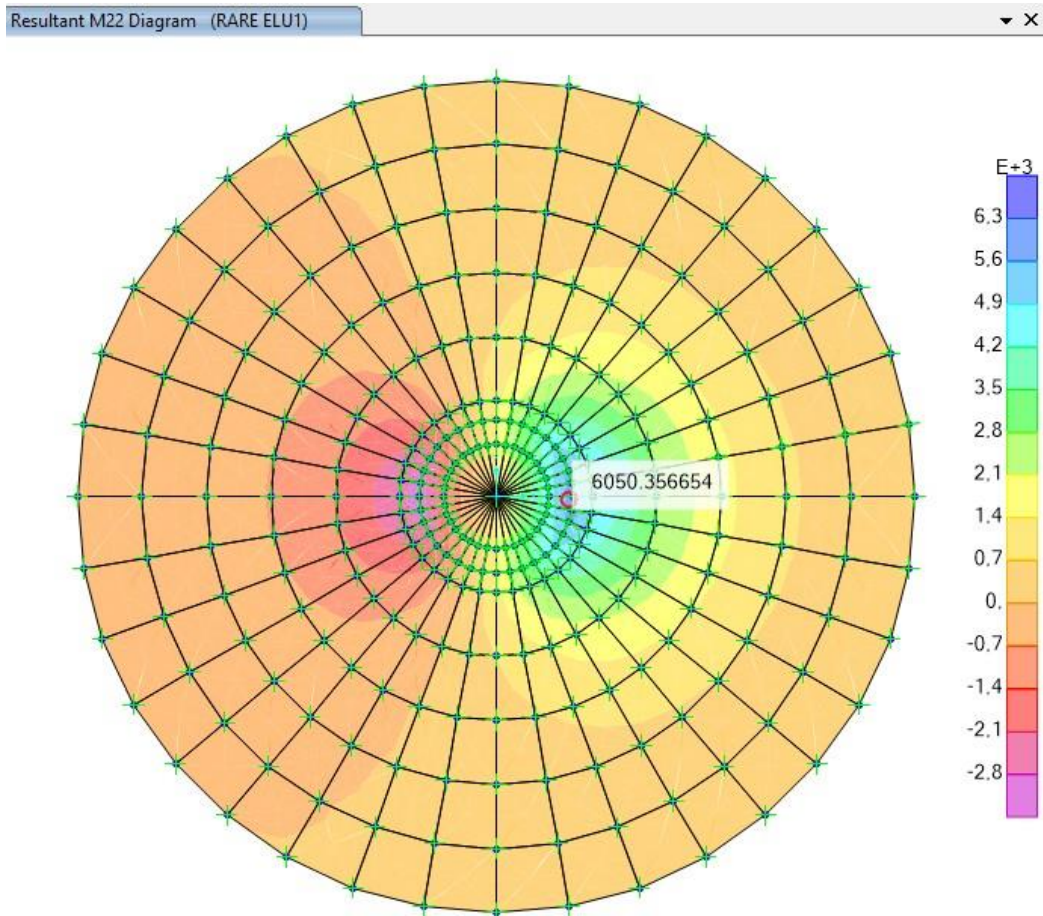


**Figura 31: Momento Massimo  $M_{11}$  Normal SLU 2 [kNm/m]**



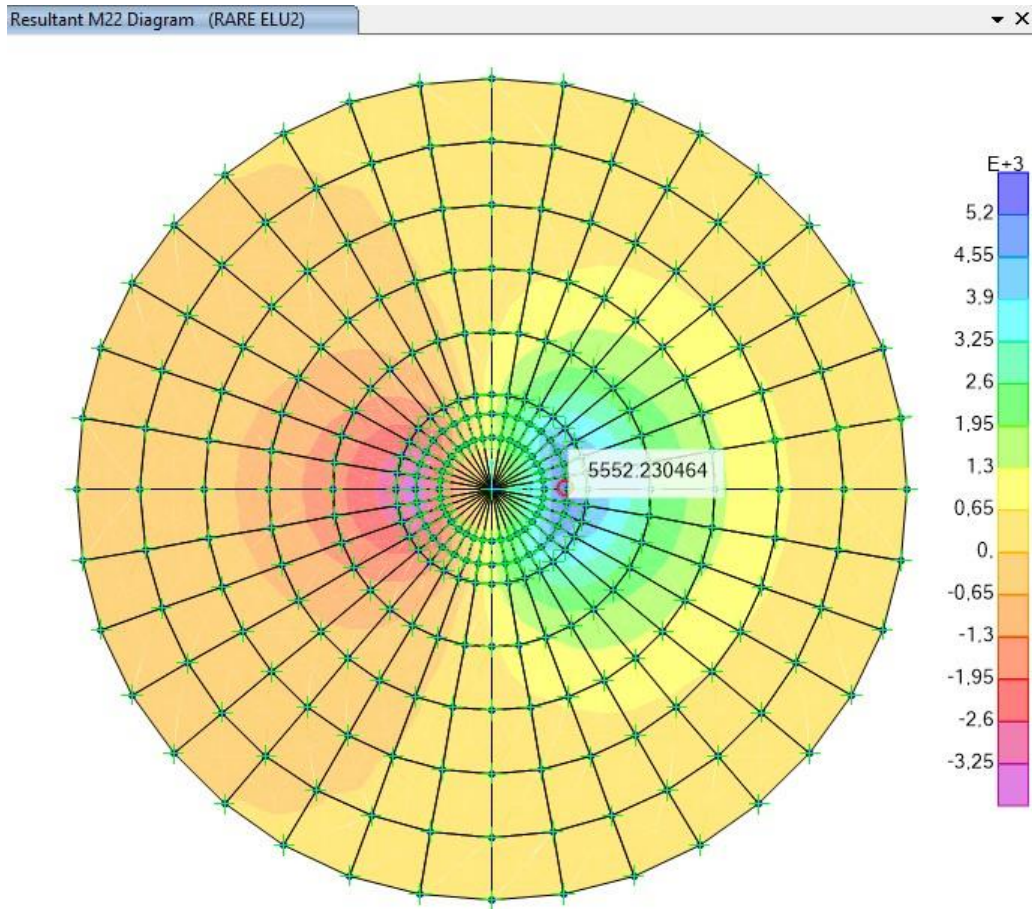


**Figura 32: Momento Massimo  $M_{11}$  ABNORMAL 0.9 [kNm/m]**



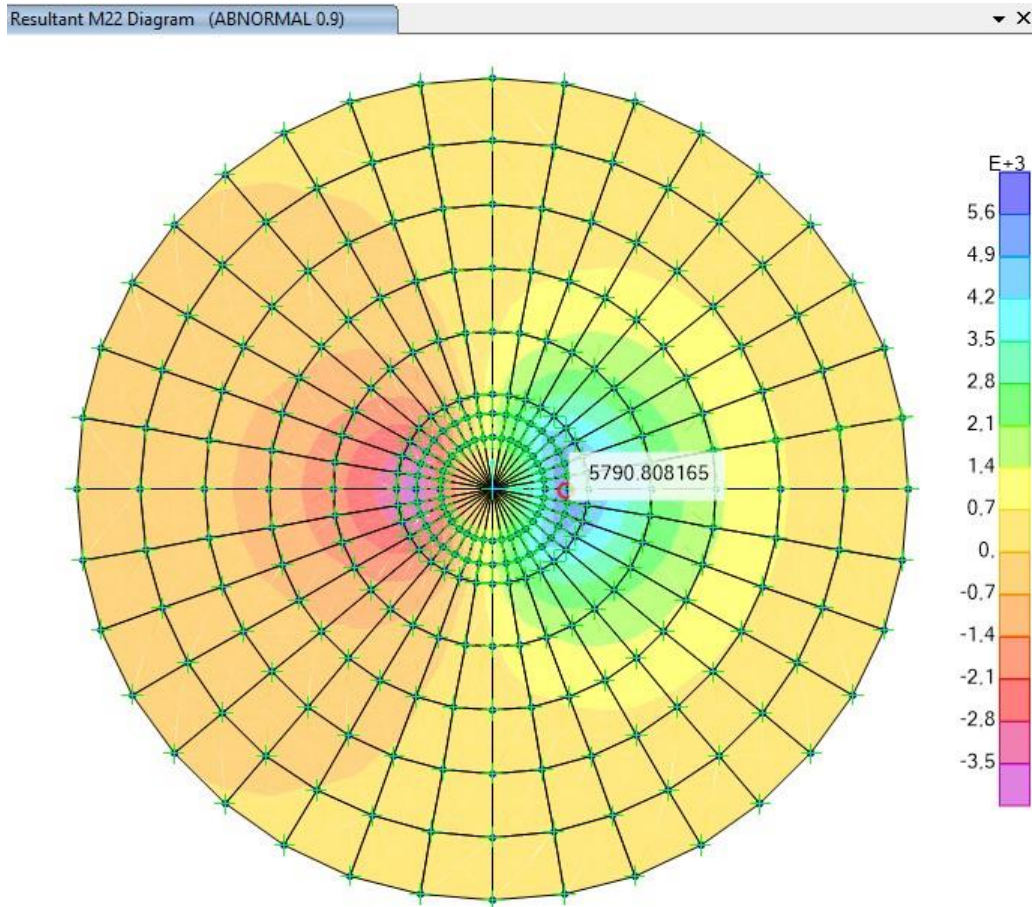
**Figura 33: Momento Massimo M22 Normal SLU 1 [kNm/m]**





**Figura 34: Momento Massimo M22 Normal ELU 2 [kNm/m]**

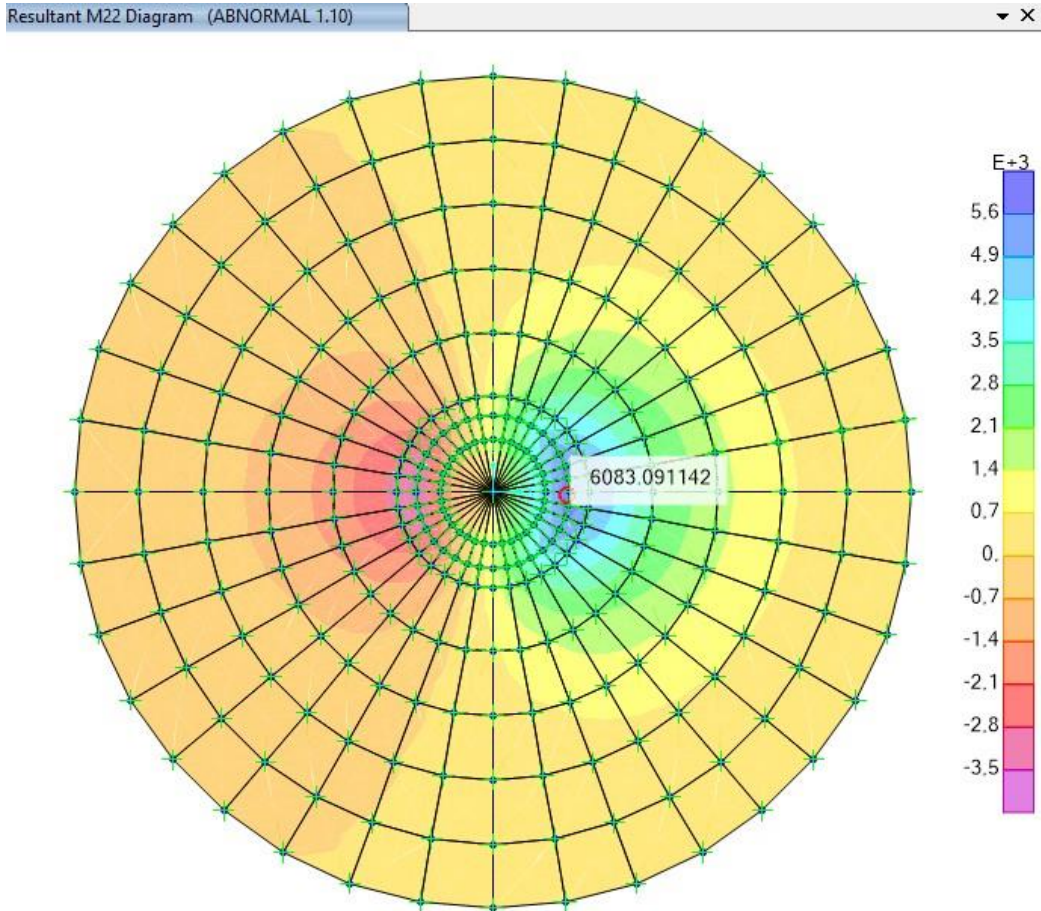




**Figura 35: Momento Massimo M<sub>22</sub> ABNORMAL 0.9 [kNm/m]**







**Figura 36: Momento Massimo M<sub>22</sub> ABNORMAL 1.10 [kNm/m]**

SOLLECITAZIONI DI PIASTRA								
	Raggio [m]	2.200	2.750	4.600	6.450	8.300	10.150	12.000
MOMENTI RADIALI	M2(+) [kNm/m]	9'976.3	7'510.8	3'582.1	1'791.9	743.0	167.2	-17.9
NORMALSLU1	M2(-) [kNm/m]	-7'246.5	-5'219.7	-2'340.2	-1'152.9	-476.6	-106.9	11.6
MOMENTI RADIALI	M2(+) [kNm/m]	9'664.2	7'257.4	3'461.4	1'735.7	721.8	163.0	-17.1
NORMALSLU2	M2(-) [kNm/m]	-7'503.3	-5'404.8	-2'371.8	-1'114.5	-422.3	-82.9	10.1
MOMENTI RADIALI	M2(+) [kNm/m]	10'239.2	7'692.2	3'675.6	1'845.5	768.4	173.8	-18.1
ABNORMAL 0.9	M2(-) [kNm/m]	-7'927.3	-5'694.7	-2'467.9	-1'140.2	-427.5	-83.4	10.4
MOMENTI RADIALI	M2(+) [kNm/m]	10'262.5	7'703.7	3'664.6	1'834.6	762.0	172.0	-18.3
ABNORMAL 1.10	M2(-) [kNm/m]	-7'987.5	-5'785.9	-2'610.9	-1'285.8	-530.3	-118.5	13.0
TAGLIO RADIALE	M2(+) [kNm/m]	4'522.9	3'316.8	1'656.7	879.3	509.6	242.8	120.8
NORMALSLU1	M2(-) [kNm/m]	4'077.2	2'587.9	1'186.7	585.1	329.9	156.0	77.5
TAGLIO RADIALE	M2(+) [kNm/m]	4'454.9	3'212.4	1'594.1	844.4	490.8	234.7	117.1
NORMALSLU2	M2(-) [kNm/m]	4'144.0	2'701.2	1'252.5	612.7	327.7	140.5	62.8
TAGLIO RADIALE	M2(+) [kNm/m]	4'713.7	3'394.5	1'684.8	893.7	520.4	249.2	124.5
ABNORMAL 0.9	M2(-) [kNm/m]	4'397.9	2'875.5	1'331.7	644.2	338.4	143.6	63.9
TAGLIO RADIALE	M2(+) [kNm/m]	4'737.2	3'426.1	1'700.6	899.2	521.2	248.8	124.0
ABNORMAL 1.10	M2(-) [kNm/m]	4'376.1	2'830.8	1'312.5	652.6	368.3	173.8	86.1



	Raggio [m]	2.200	2.750	4.600	6.450	8.300	10.150	12.000
MOMENTI RADIALI	M2(+) [kNm/m]	7'315.3	5'504.0	2'626.1	1'315.4	546.2	123.0	-13.1
QP SLE	M2(-) [kNm/m]	-5'442.4	-3'926.0	-1'760.8	-865.9	-357.2	-80.0	8.8

**Figura 37: Valori massimi/minimi delle sollecitazioni di piastra in funzione della distanza R dal centro del plinto**

### A.11.i.2. Verifiche della resistenza a flessione

L'armatura tesa è stata dimensionata secondo la nota formula  $A_s = M_{ed} / (0.9 \cdot d \cdot f_{yd})$  essendo:

$d$  = altezza utile

$M_{ed}$  = momento di progetto di piastra

L'armatura principale (radiale) è stata dimensionata tenendo conto dei minimi normativi previsti per le travi nel cap. 4 di [1].

$$A_{smin\_ELU} = 0,26 (f_{ctm} / f_{yk}) b d$$

Non sono, invece, stati tenuti in considerazione i minimi normativi di cui al cap. 7 della stessa norma, avendo optato per una progettazione in campo elastico (fattore di struttura  $q = 1$ ).

### A.11.i.3. Dimensionamento delle armature superiori

ARMATURA RADIALE SUP.	$r_i$	$h$ = altezza	$d$ = altezza	$M_2$	$2\pi r_i M_2$	$f_{yd}$
	2.200	3.600	3.510	7'246.51	100'117.79	391.30
	2.750	3.300	3.210	5'219.68	90'143.86	391.30
	4.600	2.940	2.850	2'340.24	67'604.94	391.30
	6.450	2.580	2.490	1'114.47	45'142.57	391.30
	8.300	2.220	2.130	422.27	22'010.42	391.30
	10.150	1.860	1.770	82.92	5'285.39	391.30
	12.000	1.500	1.410	-13.01	-980.68	391.30



As da calcolo [mm <sup>2</sup> ]	A <sub>cls</sub> [mm <sup>2</sup> ]	As',min [mm <sup>2</sup> ] (0,26 f <sub>ctm</sub> / f <sub>yk</sub> A <sub>cls</sub> )	n.Ø 26 calcolo	n.Ø 32 disposta	n.Ø 32 disposta	n.Ø 32 disposta
80'992.90	49'737'600	81'156	153	120	60	
79'739.58	56'991'000	92'774	151	120	60	
67'356.01	84'930'720	137'782	127	120	60	
51'478.95	104'505'480	168'791	97	120	60	60
29'342.12	115'715'280	185'801	56	120	60	60
8'479.04	118'560'120	188'812	16	120	60	60
-1'974.93	113'040'000	177'824	-4	120	60	60

CHECK	interfero min/max netto orizz. [cm]	A <sub>s,calcolo</sub> [mm <sup>2</sup> /m]	As,min [mm <sup>2</sup> /m] (0,26 f <sub>ctm</sub> / f <sub>yk</sub> A <sub>cls</sub> )	A <sub>s,disposta</sub> [mm <sup>2</sup> /m]	As,min fessura z [mm <sup>2</sup> /m]
OK	8.3 / 19.8	5'862.25	5'874.04	10'472.73	4'119.42
OK	11.2 / 25.6	4'617.23	5'371.98	8'378.18	3'776.14
OK	8.8 / 20.9	2'331.63	4'769.52	5'008.70	3'364.19
OK	13.7	1'270.90	4'167.05	4'762.79	2'952.25
OK	18.5	562.93	3'564.59	3'701.20	2'540.31
OK	23.4	133.02	2'962.12	3'026.60	2'128.37
OK	28.2	-26.21	2'359.66	2'560.00	1'716.43

**Figura 38: Dimensionamento e verifica dei minimi normativi per i ferri radiali superiori (3 strati Ø32)**

Si dispongono 120Ø32 radiali su primo strato e 60Ø32 su secondo strato, entrambi per tutta la lunghezza radiale, in sovrapposizione con 60Ø32 efficaci a partire dalla sezione di raggio R=4,60 m.

**A.11.i.4. Dimensionamento delle armature inferiori**

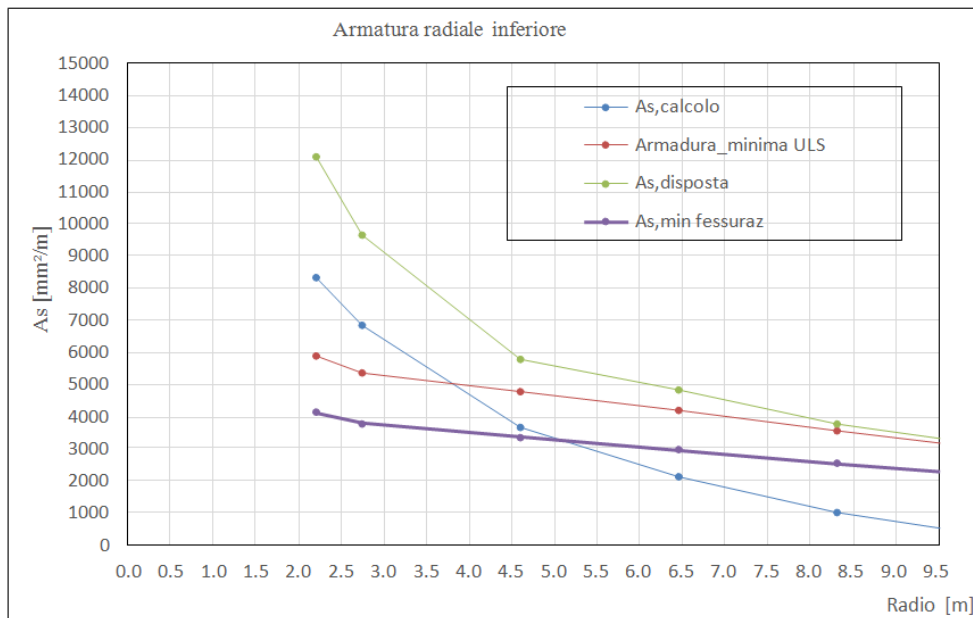
ARMATURA RADIALE INF.	r <sub>i</sub> [m]	h = altezza [m]	d = altezza utile [m]	M <sub>2</sub> [kNm/m]	2π r <sub>i</sub> M <sub>2</sub> [kNm]	f <sub>yd</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]
	2.200	3.600	3.510	10'262.49	141'786.61	391.30
	2.750	3.300	3.210	7'703.75	133'043.68	391.30
	4.600	2.940	2.850	3'675.60	106'180.78	391.30
	6.450	2.580	2.490	1'845.49	74'753.53	391.30
	8.300	2.220	2.130	768.38	40'050.82	391.30
	10.150	1.860	1.770	173.80	11'078.30	391.30
	12.000	1.500	1.410	-17.10	-1'288.77	391.30



As da calcolo [mm <sup>2</sup> ]	A cls [mm <sup>2</sup> ]	As,min [mm <sup>2</sup> ] (0,26 fctm/ fyk Acls)	n.Ø 26 calcolo	n.Ø 28 disposta	n.Ø 32 disposta	n.Ø 32 disposta
114'701.98	49'737'600	81'156	217	88	140	
117'687.96	56'991'000	92'774	222	88	140	
105'789.82	84'930'720	137'782	200	88	140	
85'246.23	104'505'480	168'791	161	88		17
53'391.80	115'715'280	185'801	101	88		17
17'772.26	118'560'120	188'812	34	88		17
-2'595.37	113'040'000	177'824	-5	88		17

CHECK	interfero min/max netto orizz. [cm]	As,calcolo [mm <sup>2</sup> /m]	As,min [mm <sup>2</sup> /m] (0,26 fctm / fyk Acls)	As,disposta [mm <sup>2</sup> /m]	As,min fessuraz [mm <sup>2</sup> /m]
OK	6.7 / 12.9	8'302.11	5'874.04	12'065.45	4'119.42
OK	9.1 / 16.8	6'814.59	5'371.98	9'652.36	3'776.14
OK	17.4 / 30.0	3'662.07	4'769.52	5'770.43	3'364.19
OK	12.3	2'104.53	4'167.05	4'829.77	2'952.25
OK	16.7	1'024.32	3'564.59	3'753.25	2'540.31
OK	21.1	278.82	2'962.12	3'069.16	2'128.37
OK	25.5	-34.44	2'359.66	2'596.00	1'716.43

**Figura 39: Dimensionamento e verifica dei minimi normativi per i ferri radiali inferiori (3 strati Ø32)**



**Figura 40: Area armatura radiale inferiore: da calcolo, minima (da norma), effettivamente disposta e da fessurazione**



### A.11.i.5. Dimensionamento delle armature circolari superiori

ARMATURA CIRCONF. SUP	$r_i$	$h_i =$ altezza sez. [m]	$d^* =$ altezza utile [m]
	2.200	3.600	3.510
	3.675	3.120	3.030
	5.525	2.760	2.670
	7.375	2.400	2.310
	10.150	1.860	1.770

$M_I$ [kNm/m]	$f_{yd}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$A_{s',calcolo}$ [mm <sup>2</sup> /m]	n.Ø 25 / m (strett. necessaria)
3'142.56	391.30	2542.25	6
2'037.52	391.30	1909.43	4
1'091.78	391.30	1161.10	3
546.04	391.30	671.20	2
167.33	391.30	268.44	1

$A_{cls}$ [mm <sup>2</sup> ]	$A_{s',min}$ [mm <sup>2</sup> /m] 20% $A_{s,long,inf}$	$A_{s',min}$ fessura z. [mm <sup>2</sup> /m]
3'600'000	2095	4119.42
3'120'000	1339	3570.17
2'760'000	977	3158.22
2'400'000	846	2746.28
1'860'000	673	2128.37

n.Ø 25 / m (min)	n.Ø 25 / sect. disposta	n.Ø 25 / m disposta	$A_{s',disposta}$ [mm <sup>2</sup> /m]	CHECK
5.18	16	12.80	6283.19	OK
3.89	9	4.86	2388.03	OK
2.37	8	4.32	2122.70	OK
1.73	7	3.78	1857.36	OK
1.38	14	3.78	1857.36	OK

Figura 41: Dimensionamento e verifica dei minimi normativi per i ferri circolari superiori



**A.11.i.6. Dimensionamento delle armature circolari inferiori**

ARMATURA CIRCONF. INF	<b>r<sub>i</sub></b> [m]	<b>h<sub>i</sub> = altezza sez.</b> [m]	<b>d* = altezza utile</b> [m]
	2.200	3.600	3.510
	3.675	3.120	3.030
	5.525	2.760	2.670
	7.375	2.400	2.310
	10.150	1.860	1.770

<b>M<sub>I</sub></b> [kNm/m]	<b>f<sub>yd</sub></b> [N/mm <sup>2</sup> ]	<b>A<sub>s,calcolo</sub></b> [mm <sup>2</sup> /m]	<b>n.Ø 25 / m</b> (strett.)
6'083.09	391.30	4921.08	11
4'005.82	391.30	3753.98	8
2'236.24	391.30	2378.21	5
1'199.47	391.30	1474.41	4
422.39	391.30	677.61	2

<b>A<sub>cls</sub></b> [mm <sup>2</sup> ]	<b>A<sub>s,min</sub> [mm<sup>2</sup>/m]</b> 20% A <sub>s,long,inf</sub>	<b>A<sub>s,min</sub> fessuraz.</b> [mm <sup>2</sup> /m]
3'600'000	2413	4119.42
3'120'000	1542	3570.17
2'760'000	1060	3158.22
2'400'000	858	2746.28
1'860'000	682	2128.37

<b>n.Ø 25 / m</b> (min)	<b>n.Ø 25 / sect.</b> disposta	<b>n.Ø 25 / m</b> disposta	<b>A<sub>s,disposta</sub></b> [mm <sup>2</sup> /m]	<b>CHECK</b>
10.03	14	11.20	5497.79	OK
7.65	15	8.11	3980.06	OK
4.85	9	5.38	2643.17	OK
3.01	6	4.62	2265.57	OK
1.39	11	3.85	1887.98	OK

**Figura 42: Dimensionamento e verifica dei minimi normativi per i ferri circolari inferiori**



**A.11.i.7. Verifica a taglio**

A seguire si riportano le verifiche a taglio di piastra, agente sulle sezioni aventi normale parallela alla direzione radiale. Si dispone un'armatura trasversale costituita da staffe a 2 braccia  $\varnothing 20$

Ai fini della verifica si procede secondo due step:

- 1) verifica dell'effettiva necessità di armatura trasversale
- 2) valutazione, se richiesta, dell'area di armatura trasversale per unità di superficie (armatura trasversale di piastra).

Resistenza a taglio senza armatura trasversale							
Raggio [m]	$V_{Ed}$ [kN/m]	d altezza utile [m]	$A_{s,rad}$ [cm <sup>2</sup> /m]	$K < 2$	$\rho_l < 2\%$	$V_{Rd,c}$ [kN/m]	$V_{Rd,c} > V_{Ed}$
2.75	<b>3'426</b>	3.21	96.52	1.250	0.301 %	1'002	Richiesta
4.60	<b>1'701</b>	2.85	57.70	1.265	0.202 %	789	Richiesta
6.45	<b>899</b>	2.49	48.30	1.283	0.194 %	694	Richiesta
8.30	<b>521</b>	2.13	37.53	1.306	0.176 %	610	Non richiesta
10.15	<b>249</b>	1.77	30.69	1.336	0.173 %	524	Non richiesta
12.00	<b>125</b>	1.41	25.96	1.377	0.184 %	437	Non richiesta

**Figura 43: Verifica a taglio in assenza di armatura trasversale**

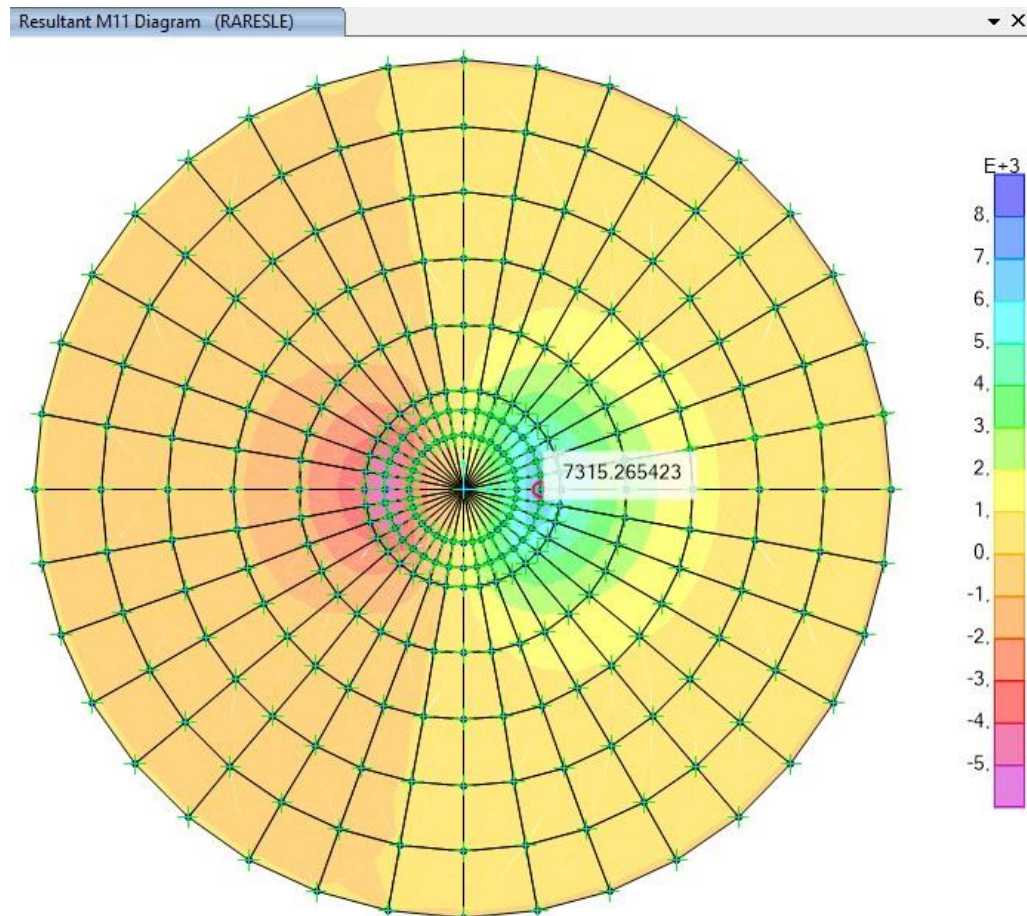
Resistenza con armatura trasversale				
$(A_{sw}/s)_{min}$ [cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]	Passo circonfer.	Passo radiale	$A_{sw}/s$ [cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]	Check
12.12	0.29 m	0.65 m	33.57	OK
6.78	0.48 m	0.65 m	20.07	OK
4.10	0.68 m	0.65 m	14.31	OK
2.78	0.87 m	0.65 m	11.12	OK
1.60				
1.00				

**Figura 44: Dimensionamento dell'armatura trasversale (a taglio) di piastra**



### A.11.i.8. Verifiche tensionali/di fessurazione

Le verifiche a fessurazione sono state condotte nella combinazione RARA, assieme alle verifiche dei limiti tensionali di esercizio.



**Figura 45: Momento radiale in combinazione SLE Rara [kNm/m]**