



Nuovo impianto per la produzione di energia da fonte eolica nel comune di Maracalagonis (CA)

RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO DELLE FONDAZIONI DEGLI AEROGENERATORI

Rev. 0.0

Data: Giugno 2022

WIND003.REL045c

Committente:

Ecowind 2 S.r.l.

Via Alessandro Manzoni 30,
20121 Milano (MI)

P.IVA: 12071590967

PEC: ecowind2srl@legalmail.com

Incaricato:

Queequeg Renewables, ltd

Unit 3.21, 1110 Great West Road
TW80GP London (UK)

Company number: 111780524

email: mail@quenter.co.uk

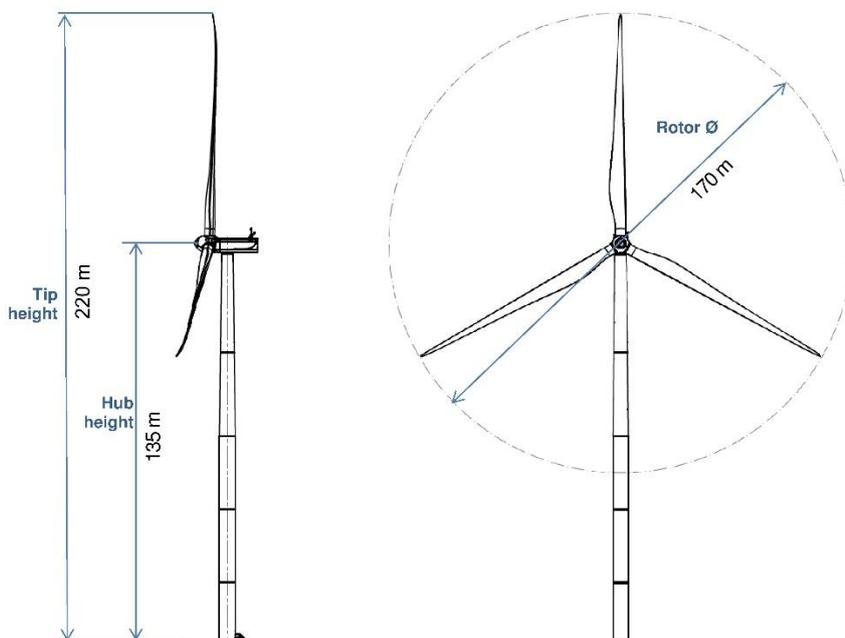
Sommario

PREMESSA.....	3
NORMATIVE DI RIFERIMENTO.....	5
DESCRIZIONE DELL'OPERA DI FONDAZIONE	6
INQUADRAMENTO TERRITORIALE	8
CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA.....	10
CONDIZIONI DI CARICO	12
AZIONI SISMICHE	14
CARATTERISTICHE DEI MATERIALI.....	15
VERIFICHE STRUTTURALI.....	15
GENERALITA'	15
TIPO DI ANALISI.....	16
CARICHI APPLICATI.....	17
MODELLO DI CALCOLO	19
SOLLECITAZIONI DEL PLINTO DI FONDAZIONE.....	21
VERIFICHE DEL PLINTO DI FONDAZIONE	27

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 Maracalagonis - Loc. Bruncu de Lianu, Provincia di Cagliari (CA). 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 92,4 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 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.

Sulla base di quanto emerso dai rilievi e dalle indagini in sito, nell'approccio progettuale, stante il contesto geologico si evidenziano le seguenti criticità a cui sarà necessario prestare la opportuna attenzione nella progettazione esecutiva dell'opera e nelle varie fasi di realizzazione.

L'analisi di tali fattori è funzionale alla progettazione e ha lo scopo di valutare la risposta del terreno ai nuovi carichi ed individuare azioni correttive o accorgimenti tali da limitarne gli effetti. Nello specifico:

- Azioni sulle pareti e stabilità dei fronti. Lo scavo stesso, in quanto genera depressione, può innescare locali smottamenti in corrispondenza degli orizzonti meno competenti a causa di fenomeni di detensionamento determinati dall'asportazione del materiale durante l'escavazione, in relazione soprattutto alle direzioni del sistema di fratturazione che può generare ribaltamenti di blocchi e scivolamenti di cunei deconfinati, pertanto si ritiene importante in fase di realizzazione degli scavi di fondazione eseguire un dettagliato rilievo geostrutturale finalizzato all'esclusione di ogni possibile rischio di crollo e/o slittamento di porzioni di parete.
- L'analisi ha permesso, di fatto, di definire il modello geologico del sito che viene di seguito riassunto. In particolare, in relazione alle diverse condizioni geologiche e geostrutturali rilevate, sono stati individuati nr.2 modelli geologici rappresentativi descritti di seguito.
- Sono stati distinti due litotipi principali - **Litotipo A** - rocce granitiche in disfacimento e/o rocce molto rippabili) e il **Litotipo B** – rocce da poco fratturate a integre. A loro volta i due litotipi sono stati suddivisi in ulteriori classi in relazione al grado di alterazione e di fratturazione.
- **Modello Geologico 01:** Tale modello, ottenuto dalla correlazione dei risultati di rilevamento geologico di campo, indagini geofisiche e dal sondaggio SN_01, tiene conto di un substrato costituito dall'ammasso roccioso granodioritico caratterizzato da una fratturazione medio-bassa principalmente per diaclasi. I risultati della sismica a rifrazione e MASW suggeriscono una profondità del substrato (Litotipo B2) intorno ai 13 metri. Il sovrastante Litotipo B1, riconosciuto per un repentino abbassamento della V delle onde di taglio e per una diminuzione sostanziale del PV, è probabilmente costituito da granodiorite fratturata e si riscontra tra i 10 e i 13 m. I primi 10 metri (Litotipo A1-A2-A3), sono costituiti da ciottoli residuali del basamento immersi in una matrice limo argillosa rossastra prodotto dell'alterazione chimica data dall'acqua infiltrata tra le fratture. Il litotipo A va probabilmente da clasto-sostenuto (regolite) a matrice-sostenuto dal basso verso l'alto stratigrafico. Il sondaggio ha permesso di determinare che la roccia può essere talvolta alterata chimicamente fino a profondità che superano gli 8,5 metri. Tra gli 8,5 m e gli 11,5 m (prof. max sondaggio) il granito risulta estremamente fratturato poco alterato chimicamente, caso del Litotipo A3-B1;
- **Modello Geologico 02:** Per tale modello si è tenuto conto dei risultati dati dal rilevamento geologico di campo e da indagini sismiche. La divisione dei litotipi è identica a quella del Modello 01, la differenza è data dagli spessori degli stessi. Il litotipo A può raggiungere profondità di 18,5 m.

Sotto i 18,5 m le caratteristiche dell'ammasso migliorano. Un tale grado di fratturazione e di alterazione chimica che si spinge fino a queste profondità, può essere dovuto non più solo a fenomeni superficiali. Probabilmente aree con queste caratteristiche sono situate in prossimità di piccole faglie non rilevabili perché coperte, ma che danno luogo ad una fascia di intensa fratturazione che si propaga in profondità nel substrato, l'alterazione chimica sarà poi data dall'acqua meteorica che potrà conseguentemente infiltrarsi a profondità maggiori.

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

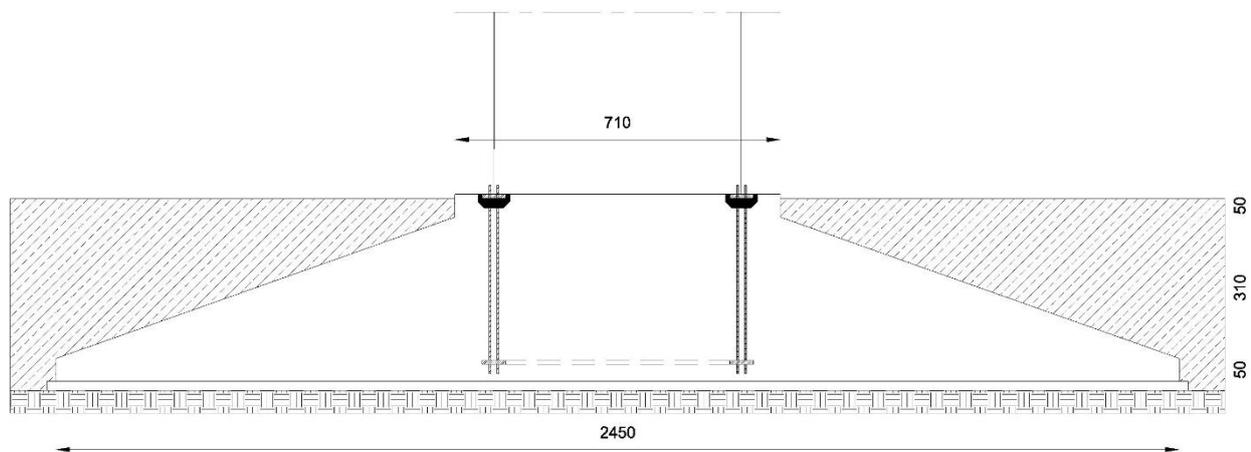
DESCRIZIONE DELL'OPERA DI FONDAZIONE

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

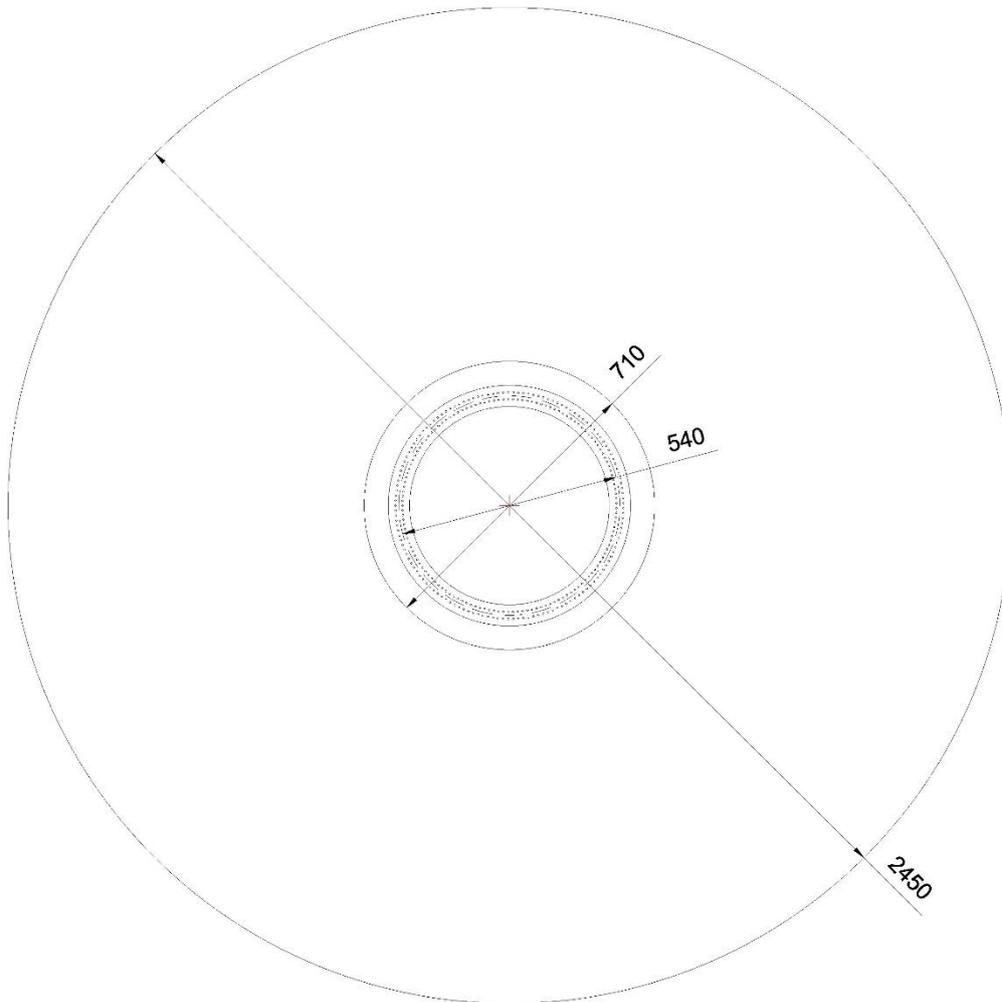
In questa fase si prevede la realizzazione di opere di fondazione di tipo diretto costituite da un plinto con forma tronco-conica, circolare in pianta con diametro massimo pari a 24,50 metri, ed una sezione trapezia avente altezza minima al bordo esterno pari a 0,50 metri, altezza di 3,60 metri nel profilo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

SEZIONE MODELLO GEOLOGICO 01 E 02 D.24,50 m.



PIANTA MODELLO GEOLOGICO 01 E 02 D.24,50 m.



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 Maracalagonis– Loc. Bruncu de Lianu nella Provincia di Cagliari (NU)



È prevista l'installazione di quattordici aerogeneratori di ultima generazione ad asse orizzontale (HAWTG, Horizontal axis wind turbine generators) di potenza pari a 6,6 MW ciascuno, per una potenza complessiva di 92,4 MW, denominati in ordine crescente da WTG001 a WTG014. Sarà inoltre installata una torre anemometrica di misura che monitorerà le condizioni di vento e ambientali della zona di impianto per tutta la vita di quest'ultimo.

Di seguito le coordinate assolute nel sistema WGS84 dei nuovi aerogeneratori:

Aerogeneratore	CooX	CooY	CooZ
WTG001	1536368.583	4339008.329	321
WTG002	1535156.337	4339560.923	501
WTG003	1538058.740	4339519.341	678
WTG004	1538214.087	4338730.348	592
WTG005	1536787.866	4337233.403	530
WTG006	1537571.352	4337448.357	564
WTG007	1538129.925	4337650.813	564
WTG008	1538246.199	4338165.999	532
WTG009	1536840.138	4339222.730	401
WTG010	1535246.799	4338990.539	396
WTG011	1536469.533	4338399.080	407
WTG012	1537231.039	4338560.993	552
WTG013	1537520.016	4339231.078	581
WTG014	1534970.376	4340142.446	491

Il progetto si sviluppa sui rilievi montuosi del campidano orientale, nel territorio della provincia di Cagliari, quadrante sud-orientale della Regione Autonoma della Sardegna. L'estensione dell'area è di circa 5,32 km², prevalentemente collinare nella parte orientale e più pianeggiante verso ovest.

L'area di progetto destinata ai generatori eolici occupa invece un'area, intesa come sottesa dalle posizioni degli aerogeneratori più periferici, pari a 531,5 ha e si sviluppa longitudinalmente (N-S) per circa 3 km e latitudinalmente (E-O) per circa 3,16 km.

In termini d'inserimento paesaggistico, le aree interessate dagli aerogeneratori rientrano nell'ambito Paesaggistico censito dal P.P.R. all'art. 14 delle N.T.A. "Golfo orientale di Cagliari".

CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

Le indagini di caratterizzazione del terreno hanno restituito valori geognostici differenti in ordine ai 14 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 funzione dei parametri ottenuti in seguito a prove sperimentali in situ, e riportati nella relazione geologica allegata al progetto, sono stati quindi identificati due modelli geotecnici rappresentativi sulla base del quale verranno prodotte le analisi di predimensionamento strutturale.

PLINTO n°	PROFONDITA' PIANO DI POSA m.	TIPO PLINTO Ø m.	MODELLO GEOLOGICO
1	6,00	24,50	01
2	6,20	24,50	01
3	4,60	24,50	01
4	2,00	24,50	01
5	5,50	24,50	01
6	6,50	24,50	02
7	5,10	24,50	02
8	3,60	24,50	01
9	5,50	24,50	01
10	3,10	24,50	01
11	10,30	24,50	01
12	4,40	24,50	01
13	5,10	24,50	01
14	8,30	24,50	01

Nella discretizzazione dei modelli geologici verrà assunto, inoltre, uno strato di ricoprimento (S0) avente lo scopo di simulare il volume di riporto steso sull'estradosso del plinto fino a raggiungere la quota d'imposta del cassonetto della piazzola.

In seguito all'analisi delle caratteristiche geomeccaniche in sito degli ammassi rocciosi interessati dal progetto e mediante l'applicazione del metodo di Hoek-Brown per la definizione dei parametri geotecnici dell'ammasso roccioso, sono stati ottenuti i seguenti valori caratterizzanti le formazioni geologiche incontrate:

STRATIGRAFIA MODELLO GEOLOGICO 01 MARACALAGONIS (CA): PLINTO 4			
	Colonna 1	Colonna 2	Colonna 3
	Z 1 (m)	Z 2(m)	Z 3 (m)
Terreno (S0)	4,0		
Terreno (S1)	6,0		
Terreno (S2)	9,0		
Terreno (S3)	12,0		
Terreno (S4)	15,0		
Terreno (S5)	>15,0		

MODELLO GEOLOGICO							
SITO		MARACALAGONIS - MOD 01					
TIPO DI TERRENO		S0 TERRENO RIPORTO	S1 LITOTIPO A1	S2 LITOTIPO A2	S3 LITOTIPO A3	S4 LITOTIPO B1	S5 LITOTIPO B2
DESCRIZIONE							
Peso di volume	[kN/mc]	18,633	17,652	18,633	19,614	20,594	22,556
Peso di volume saturo	[kN/mc]	19,123	18,633	19,123	20,104	21,085	22,556
Angolo di attrito interno	[°]	38,00	35,00	36,12	40,00	45,33	50,00
Dati Parametri Resistenza							
Coesione	[kPa]	0,00	98,07	149,65	196,13	1.800,01	4.889,60
Dati Parametri Deformabilità							
Modulo elastico	[kPa]	147.100	314.000	892.000	1.981.000	5.158.000	16.397.000
Coefficiente di Poisson	[]	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
Modulo di taglio (G)	[kPa]	55.300	118.000	333.000	745.000	1.932.000	6.149.000
Velocità onde di taglio	[m/sec]	420	255	420	610	960	1.635

STRATIGRAFIA MODELLO GEOLOGICO 02 MARACALAGONIS (CA): PLINTO 7			
	Colonna 1	Colonna 2	Colonna 3
	Z 1 (m)	Z 2(m)	Z 3 (m)
Terreno (S0)	4,0		
Terreno (S2)	6,0		
Terreno (S3)	18,0		
Terreno (S4)	34,0		
Terreno (S5)	> 34,0		

MODELLO GEOLOGICO						
SITO		MARACALAGONIS - MOD 02				
TIPO DI TERRENO		S0 TERRENO RIPORTO	S2 LITOTIPO A2	S3 LITOTIPO A3	S4 LITOTIPO B1	S5 LITOTIPO B2
DESCRIZIONE						
Peso di volume	[kN/mc]	18,633	18,633	19,614	20,594	22,556
Peso di volume saturo	[kN/mc]	19,123	19,417	20,104	21,085	22,556
Angolo di attrito interno	[°]	38,00	35,00	40,00	46,20	49,90
Dati Parametri Resistenza						
Coesione	[kPa]	0,00	196,13	490,33	1.887,39	1.961,33
Dati Parametri Deformabilità						
Modulo elastico	[kPa]	147.100	814.000	2.079.000	5.492.000	12.543.000
Coefficiente di Poisson	[]	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
Modulo di taglio (G)	[kPa]	55.300	304.000	785.000	2.059.000	4.707.000
Velocità onde di taglio	[m/sec]	420	400	625	1.010	1.540

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	F _x (kN)	F _y (kN)	F _z (kN)	M _x (kNm)	M _y (kNm)	M _z (kNm)
Dic14_v90.0_p_000	1316,18	54,14	-7707,99	2463,44	186812,5	294,48

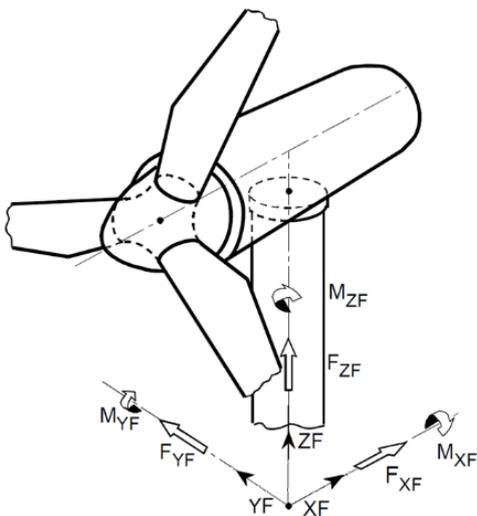
Quasi-permanent load SG 6.0-170 HH 135

pf = 0,01000	Carichi dell'aerogeneratore alla sezione					
Quota sezione dalla base (m)	F _x (kN)	F _y (kN)	F _z (kN)	M _x (kNm)	M _y (kNm)	M _z (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 _x (kN)	F _y (kN)	F _z (kN)	M _x (kNm)	M _y (kNm)	M _z (kNm)
1,0	478,42	-5,29	-7608,11	4649,15	66600,68	-58,85

I carichi sono applicati 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 dell'azione sismica.

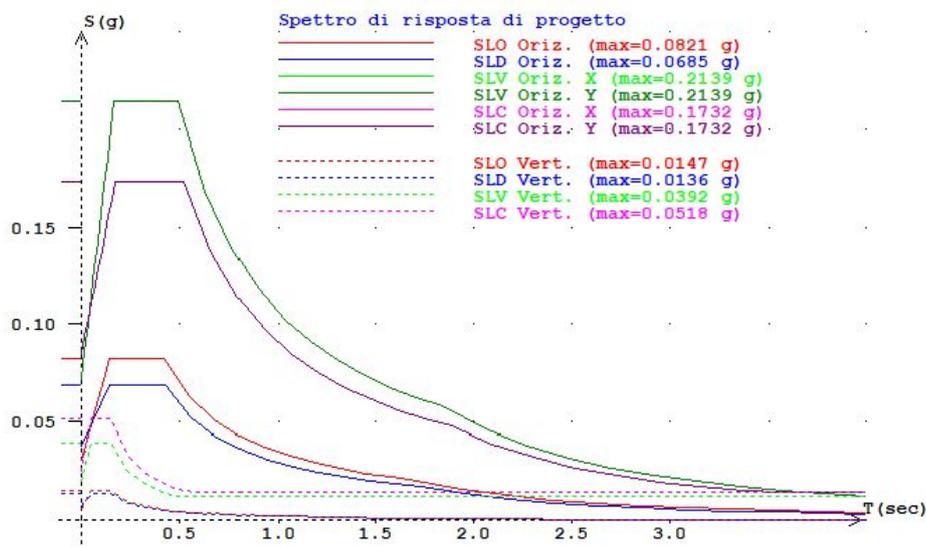
Nel presente progetto, l'azione sismica è stata valutata tenendo conto dei seguenti parametri:

- 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	0,186	2,61	0,273	0,235	2,67	0,296	0,274	2,70	0,303
	TR=101			TR=140			TR=201		
	ag	Fo	Tc*	ag	Fo	Tc*	ag	Fo	Tc*
	0,314	2,73	0,307	0,351	2,78	0,313	0,393	2,82	0,322
	TR=475			TR=975			TR=2475		
	ag	Fo	Tc*	ag	Fo	Tc*	ag	Fo	Tc*
	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:



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 γ_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:

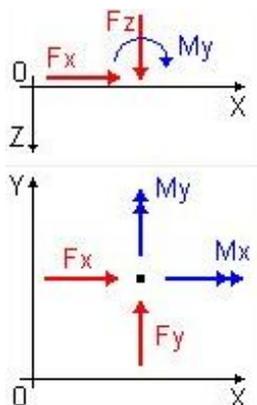
- sezioni interamente reagenti con rigidezze valutate riferendosi al solo calcestruzzo;
- relazioni tensione deformazione lineari;
- valori medi del modulo d'elasticità.

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.

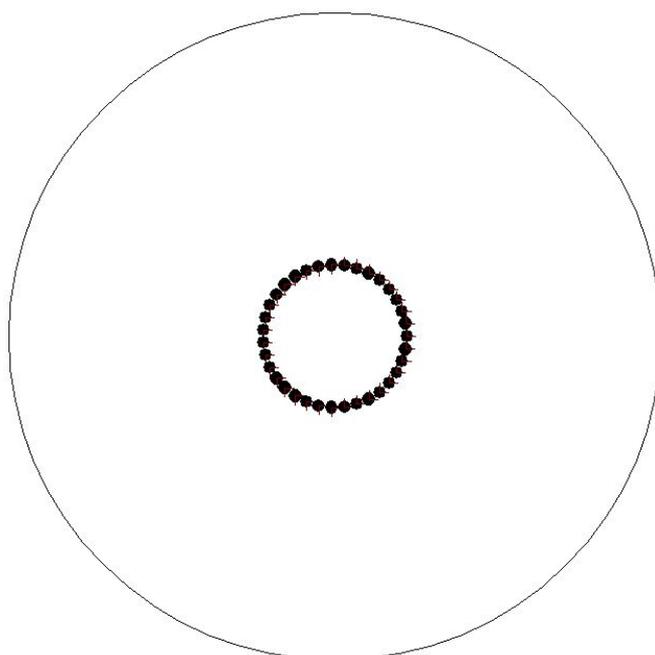
CARICHI APPLICATI

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 (140×2); 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;

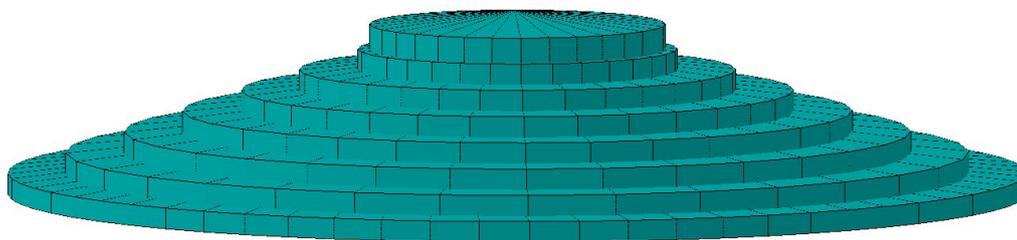
$D = 24,5$ metri - Diametro massimo del plinto;

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.

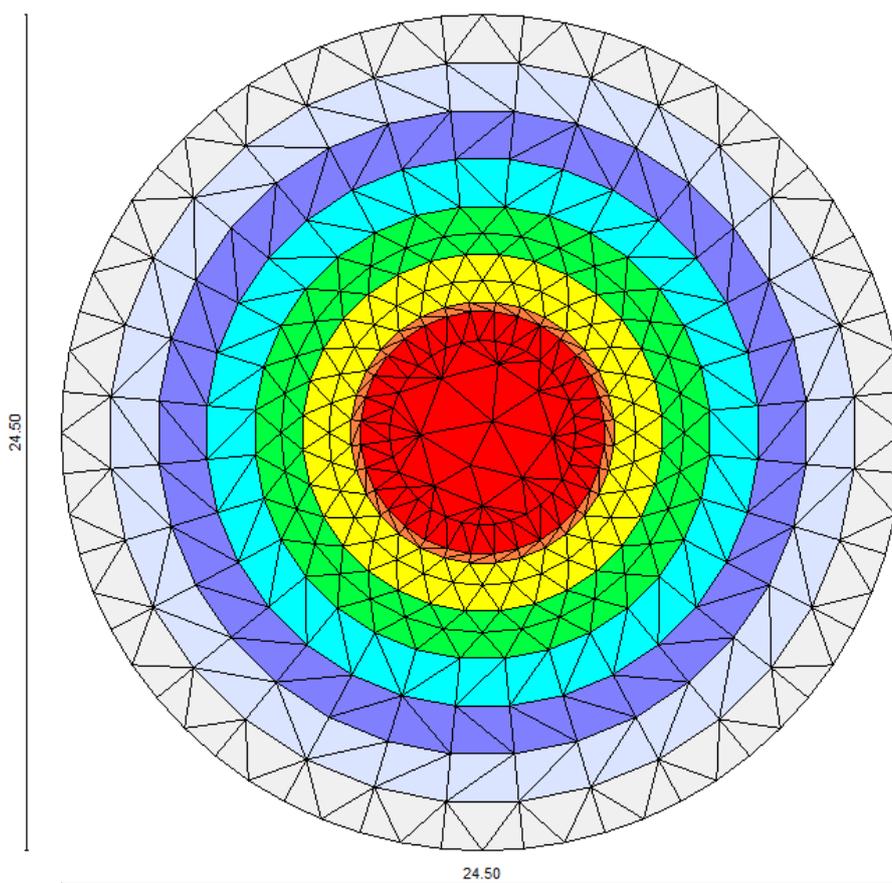
I risultati ottenuti saranno quindi applicabili per qualsiasi orientamento dell'aerogeneratore e delle sollecitazioni di esercizio da esso prodotte.

MODELLO DI CALCOLO

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



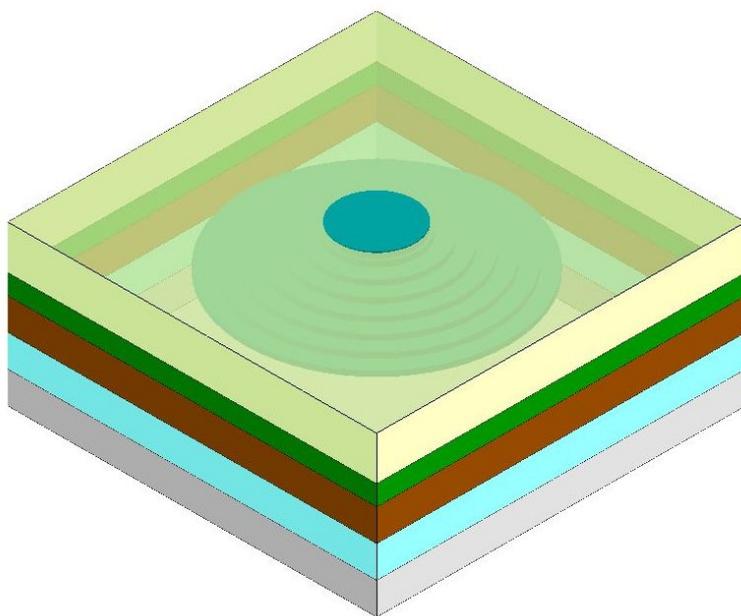
La struttura è stata discretizzata ovvero suddivisa in elementi triangolari (mesh) connessi fra di loro in corrispondenza dei nodi; per l'analisi della piastra soggetta a carichi nel piano vengono utilizzati elementi triangolari a 6 nodi.



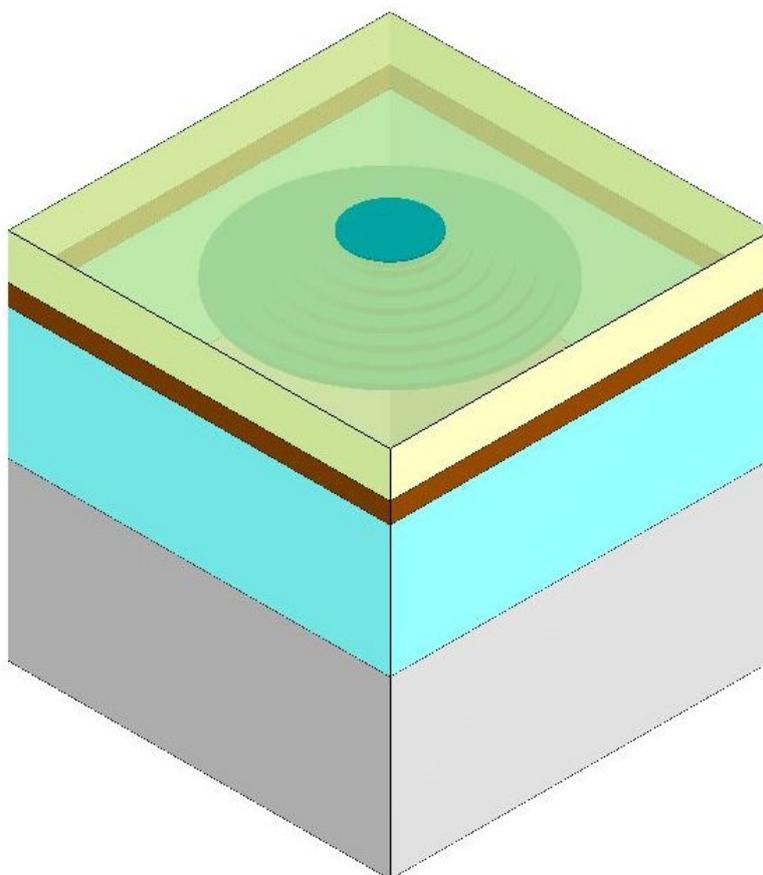
Il plinto di fondazione, modellato come piastra circolare a spessori variabili viene così suddivisa:

- 728 mesh;
- 397 nodi;

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



Vista 3D del modello FEM con stratigrafia del terreno (Plinto 4) – Modello geologico 01



Vista 3D del modello FEM con stratigrafia del terreno (Plinto 7) – Modello geologico 02

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.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.

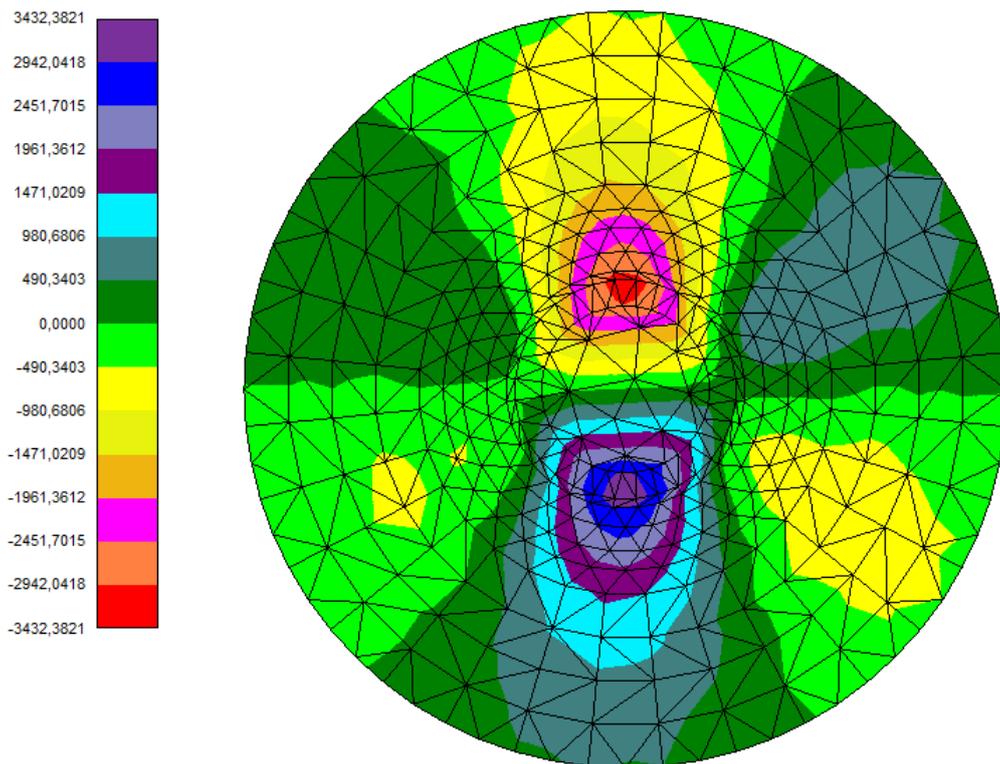


Diagramma del momento M_{xy} (KNm) – MOD01

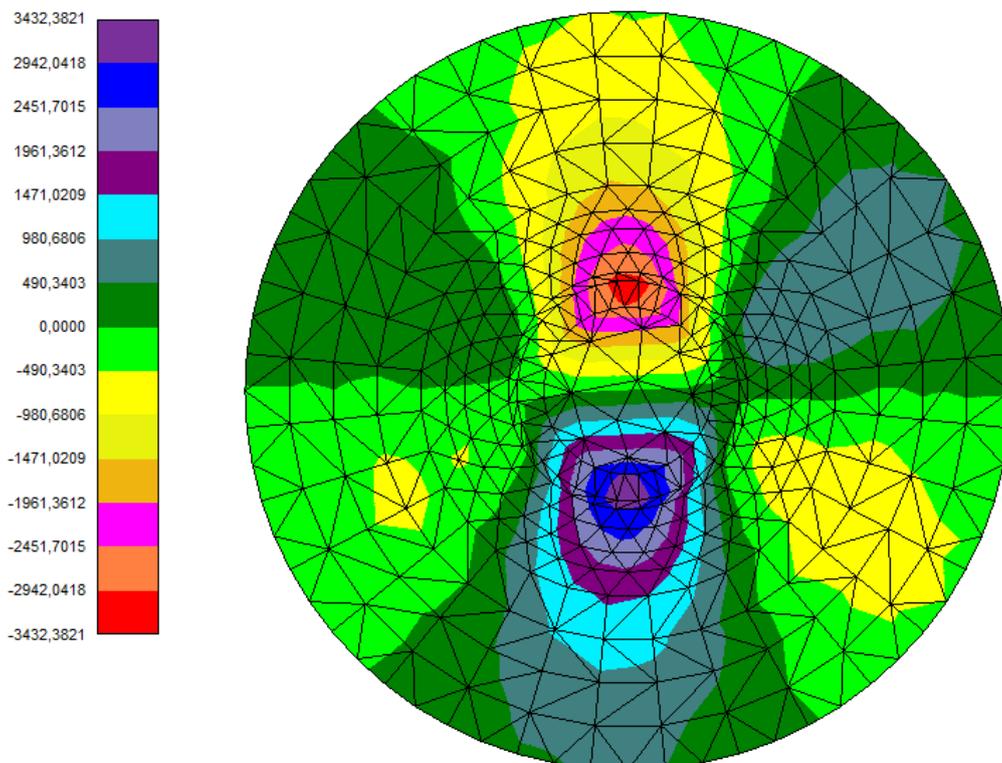
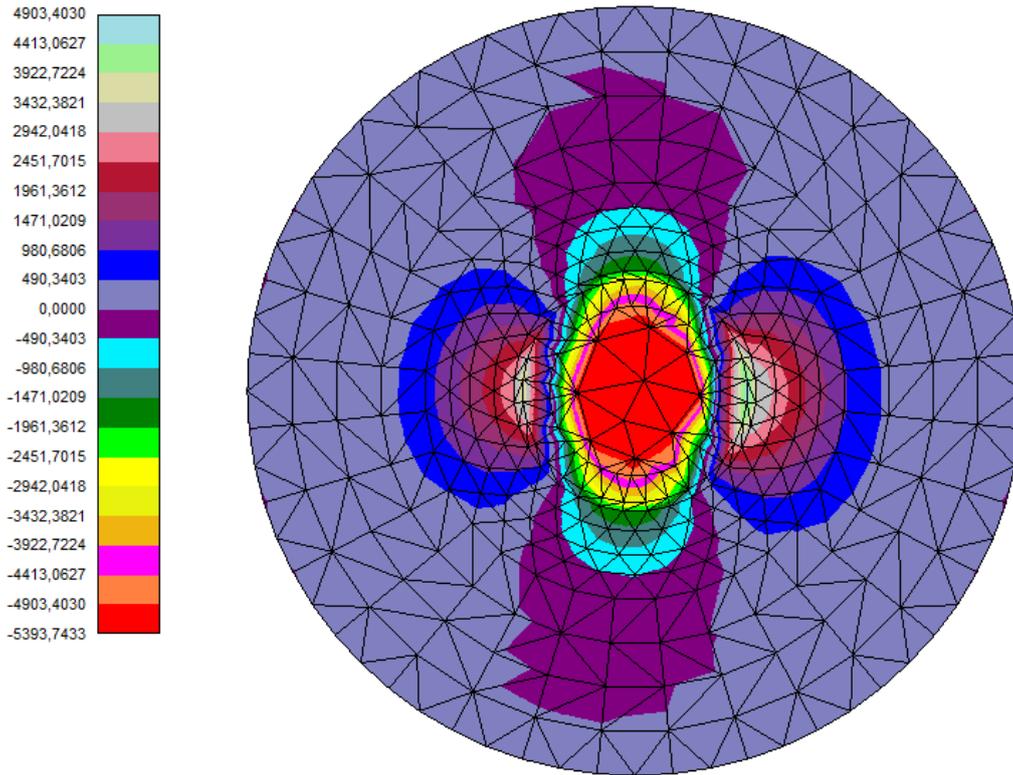
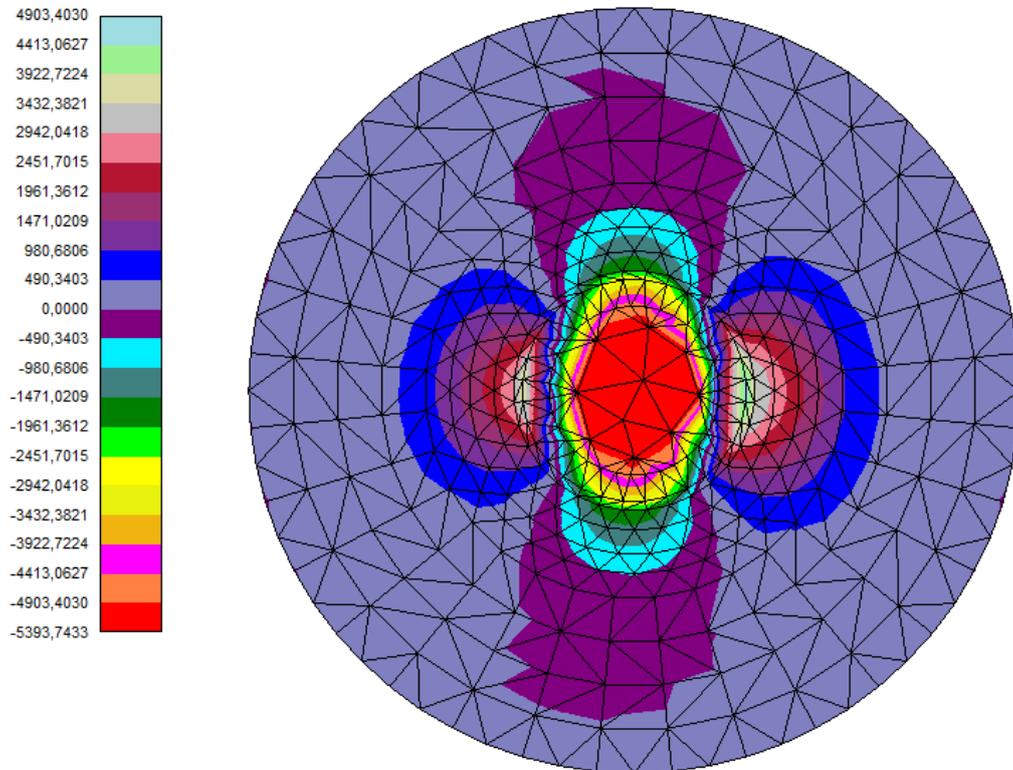


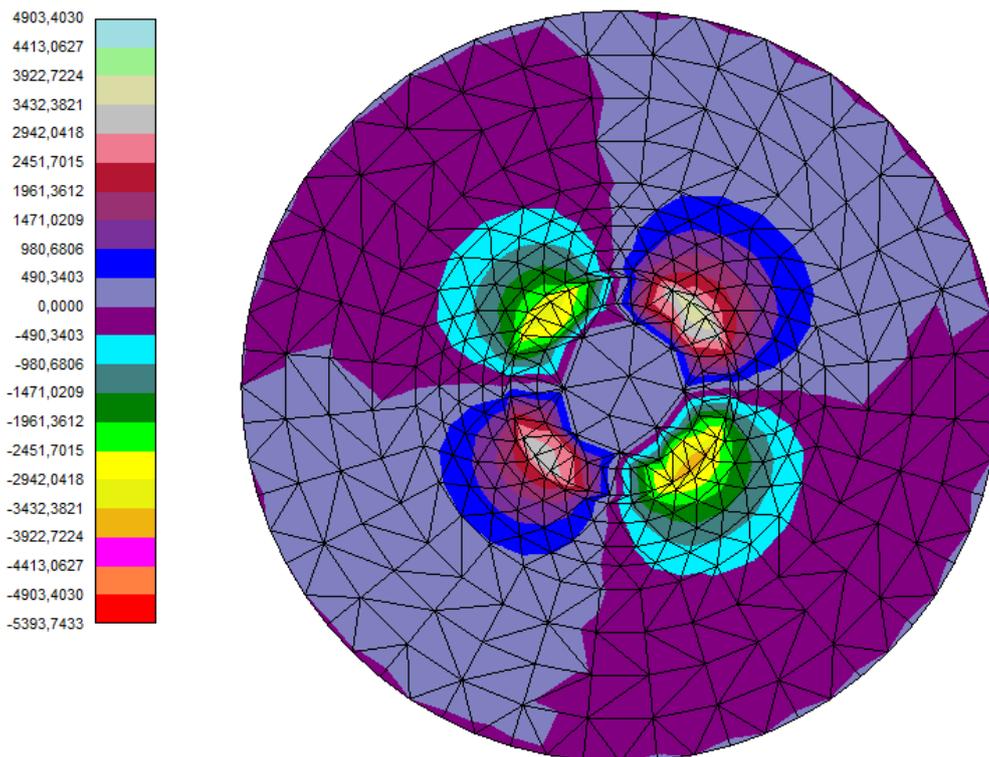
Diagramma del momento M_{xy} (KNm) – MOD02



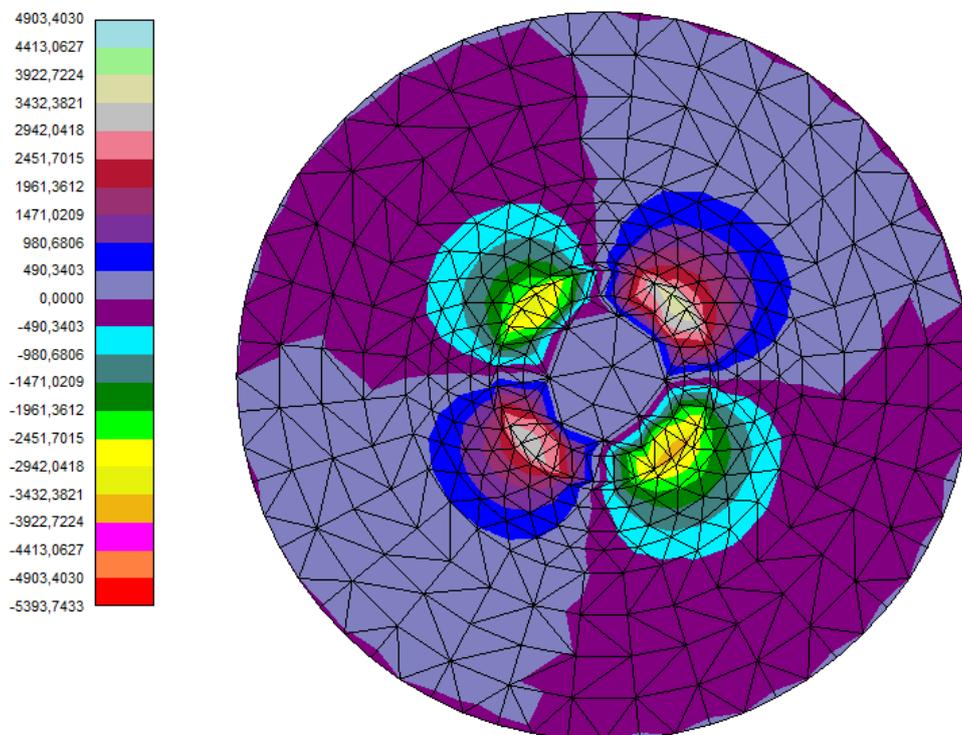
Distribuzione del taglio Tx (KN) - MOD01



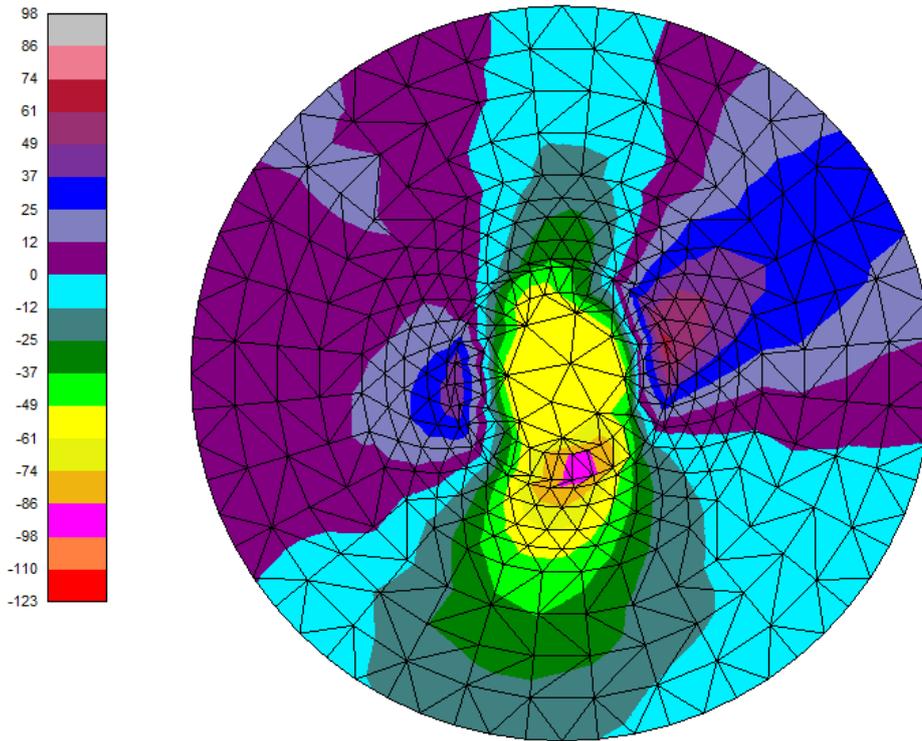
Distribuzione del taglio Tx (KN) - MOD02



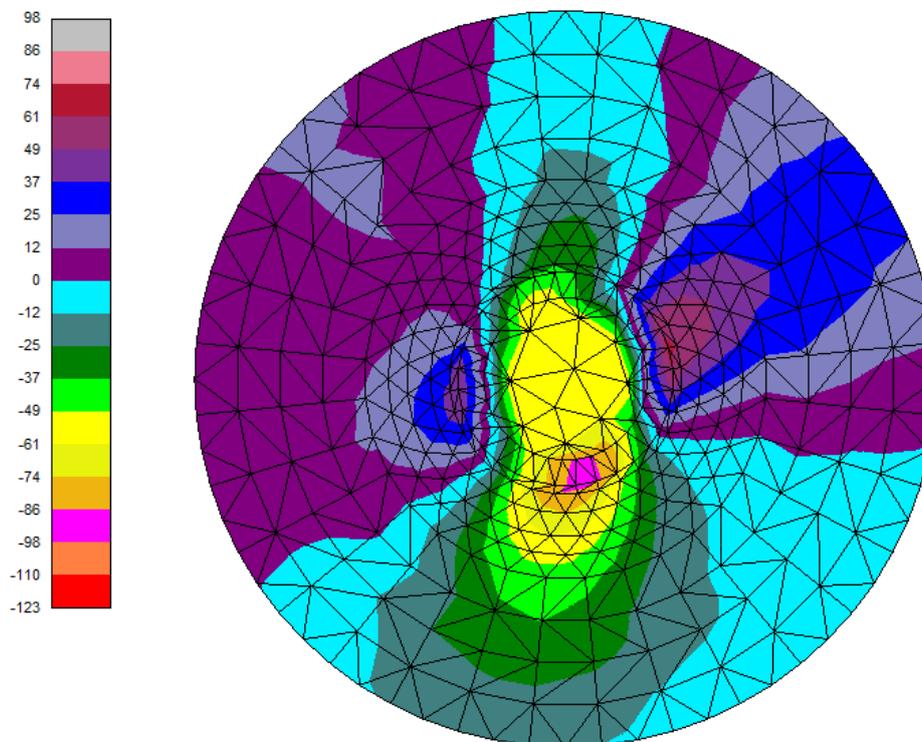
Distribuzione del taglio T_y (KN) – MOD01



Distribuzione del taglio T_y (KN) – MOD02



Distribuzione dello sforzo normale N_{xy} (KN) – MOD01

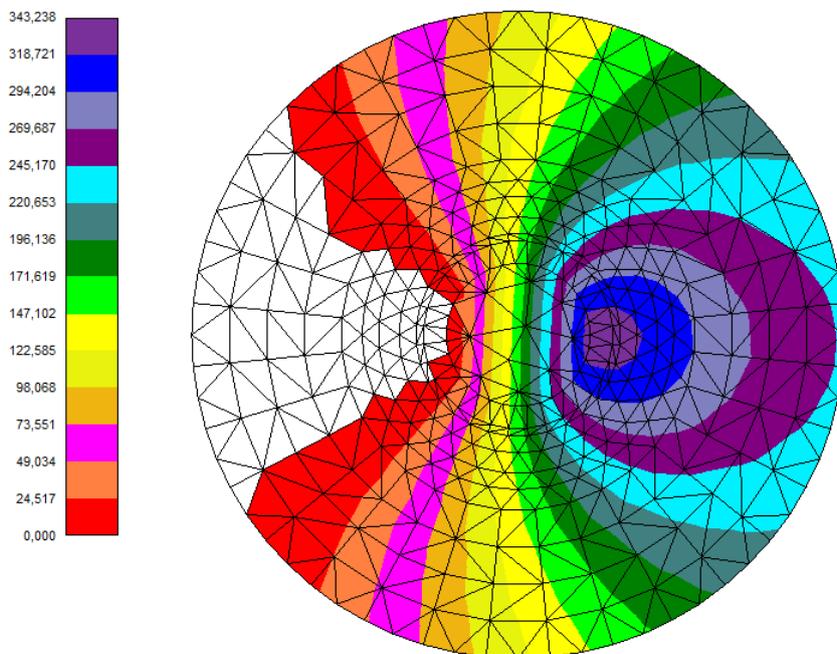


Distribuzione dello sforzo normale N_{xy} (KN) – MOD02

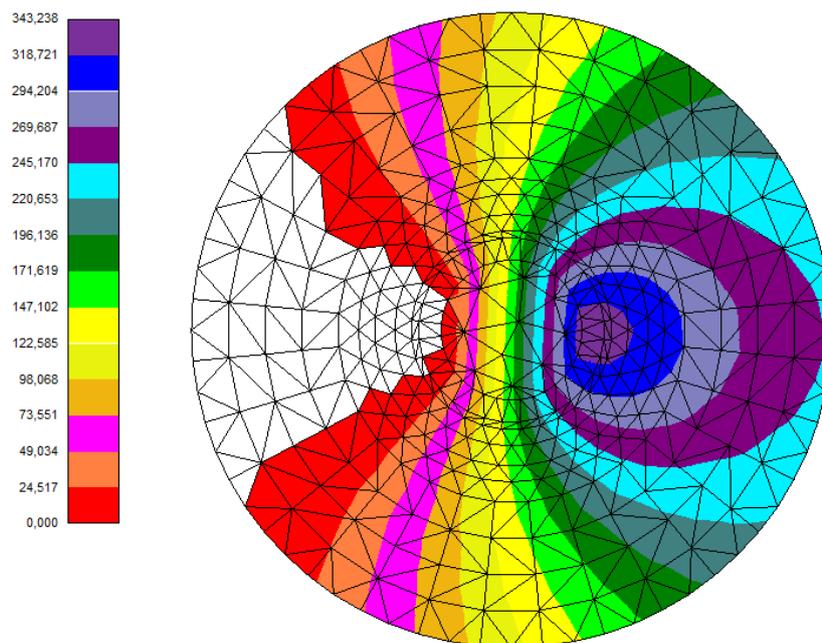
Osservando la restituzione grafica dei risultati possiamo affermare che le sollecitazioni massime, agenti sulla struttura, sono localizzate in corrispondenza degli ancoraggi della flangia della torre di sostegno; l'analisi di una direzione di sollecitazione è applicabile a qualsiasi direzione in virtù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

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.



Pressioni [kPa] – MOD01



Pressioni [kPa] – MOD02

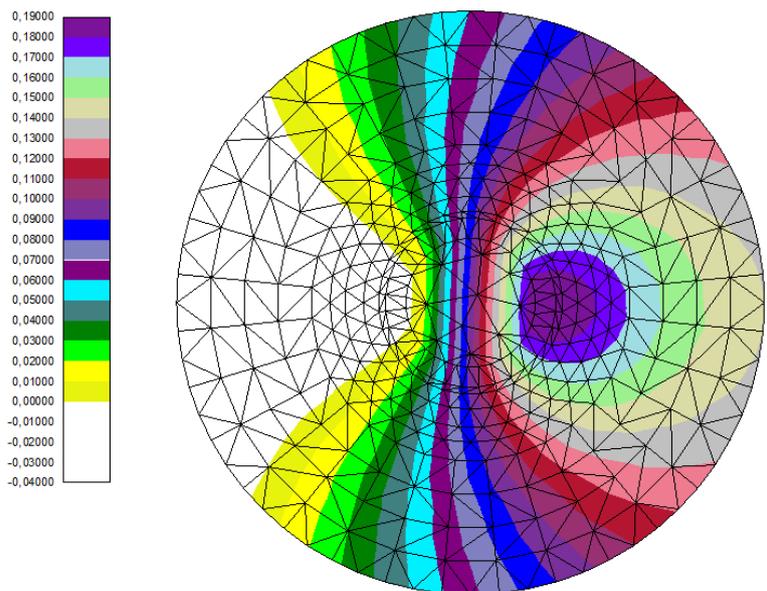


Diagramma spostamenti verticali W (cm) – MOD01

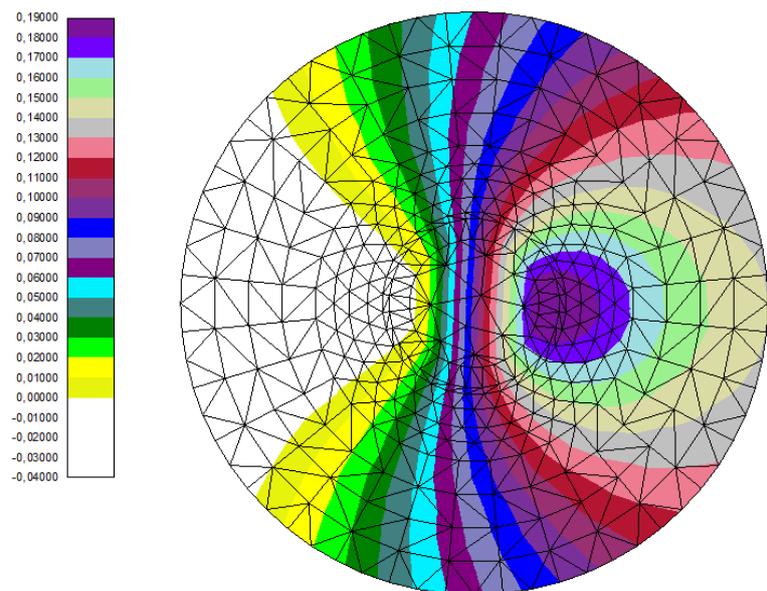


Diagramma spostamenti verticali W (cm) – MOD02

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 riportate nei tabulati di calcolo (vedi **Allegato “A”** e **“B”** alla relazione di calcolo **WIND003.REL045**), si sono 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**.