



Regione Emilia-Romagna
Provincia di Bologna
Comune di Camugnano
Comune di Castiglione dei Pepoli

PROGETTO DEFINITIVO

Nome progetto

"Eolico Camugnano"

Oggetto

Progetto per la realizzazione di un impianto eolico da 30 MW con sistema di accumulo da 8 MW e relative opere di connessione, da ubicarsi nei Comuni di Camugnano (BO) e Castiglione dei Pepoli (BO).

Titolo

Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore

Committente:



ENERGIA PULITA TRE S.R.L.
Via della Chimica 103
85100 Potenza (PZ)

Progettista:





SYNERGY S.R.L.
Via Clodoveo Bonazzi, 2
40013 - Castel Maggiore (BO)

Il professionista:
Ing. Pierpaolo Semproli
(c/o Teleios srl - progettista opere civili)



7					
6					
5					
4					
3					
2					
1					
0	08/03/2024	EMISSIONE	Ing. F. Fiorelli	Ing. P. Semproli	Ing. L. Malservisi
Rev.	Data	Motivo Revisione	Eseguito	Verificato	Approvato

Tipologia: RELAZIONE	Formato: A4	Foglio: -
Scala: -	File: SYN036.PD.RC.005_00	Tavola: N° SYN036.PD.RC.005

Progettazione:  via Clodoveo Bonazzi, 2 40013 Castel Maggiore (BO)	Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore	Committente:  ENERGIA PULITA TRE S.r.l. via della Chimica, 103 85100 Potenza (PZ)
--	---	--

SOMMARIO

1	INTRODUZIONE.....	3
2	NORMATIVA TECNICA E DOCUMENTI TECNICI DI RIFERIMENTO	4
2.1	NORME.....	4
2.2	DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO	4
2.3	RIFERIMENTI TECNICI.....	4
2.3.1	Articoli e libri generali.....	4
2.3.2	Pali di fondazione	5
2.3.3	Codice di calcolo BEM Repute.....	6
3	DESCRIZIONE MATERIALI E PRODOTTI PER USO STRUTTURALE	7
3.1	CONGLOMERATO CEMENTIZIO PER OPERE NON STRUTTURALI.....	7
3.2	CONGLOMERATO CEMENTIZIO PER GETTO PALI TRIVELLATI	7
3.3	CONGLOMERATO CEMENTIZIO PER GETTO PLINTO FONDAZIONE	8
3.4	ACCIAIO PER ARMATURE.....	9
4	GEOMETRIA DELLA FONDAZIONE	10
5	SOLLECITAZIONI AGENTI SULLA FONDAZIONE	12
6	MODELLO GEOTECNICO DEL SOTTOSUOLO	14
7	PARAMETRIZZAZIONE SISMICA DEL SITO	15
8	CRITERI DI PROGETTO	16
9	ASPETTI TEORICI RIGUARDANTI FONDAZIONI PROFONDE	18
9.1	CALCOLO CON METODI BASATI SUI PARAMETRI DI RESISTENZA	18
10	CRITERI DI ANALISI DELLE PALIFICATE	20
11	ANALISI DELLE PALIFICATE.....	21
11.1	PLINTO WTG	21
12	CALCOLO DELLA CAPACITÀ PORTANTE ULTIMA DEI PALI.....	32
13	VERIFICHE DI CAPACITÀ PORTANTE ASSIALE	33
14	CAPACITÀ PORTANTE PALI ALLE AZIONI ORIZZONTALI.....	35
15	VERIFICA DEL CEDIMENTO DELLE FONDAZIONI	37
16	ANALISI DI STABILITÀ DEI VERSANTI.....	39
16.1	CODICE SSAP2010	39
16.2	ANALISI ALLO STATO DI PROGETTO	41
17	VERIFICHE STRUTTURALI DEI PALI DI FONDAZIONE	43
17.1	VERIFICA DI RESISTENZA A FLESSIONE E TAGLIO DEI PALI	43
17.2	VERIFICA DELL'ANCORAGGIO DEI PALI ALLA FONDAZIONE	47
18	CRITERI GENERALI DI VERIFICA STRUTTURALE DEL PLINTO.....	49
18.1	VERIFICA A FLESSIONE.....	49
18.2	VERIFICA A TAGLIO E PUNZONAMENTO.....	52
18.3	MODELLAZIONE DELLE FONDAZIONI SU PALI	52
19	VERIFICA STRUTTURALE PLINTO FONDAZIONE.....	53
20	GIUDIZIO MOTIVATO DI ACCETTABILITÀ DEI RISULTATI.....	2

Progettazione:  via Clodoveo Bonazzi, 2 40013 Castel Maggiore (BO)	Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore	Committente:  ENERGIA PULITA TRE S.r.l. via della Chimica, 103 85100 Potenza (PZ)
--	---	--

1 INTRODUZIONE

Oggetto della presente relazione è il dimensionamento e verifica della fondazione, sia rispetto alle verifiche geotecniche sia rispetto al dimensionamento delle armature, degli aerogeneratori, in seguito abbreviati con la sigla WTG (Wind Turbine Generator), previsti all'interno del progetto per la realizzazione di un impianto eolico da 30 MW con sistema di accumulo da 8MW e relative opere di connessione, da ubicarsi nel comune di Camugnano (BO) e Castiglione dei Pepoli (BO).

La struttura in oggetto viene progettata e verificata ai sensi delle vigenti Norme per le Costruzioni NTC2018 (di cui al D.M. 17/01/2018 /1/).

Si condurranno le verifiche, ai sensi di quanto appena detto, in campo statico, allo Stato Limite Ultimo ed allo Stato Limite di Esercizio.

Le valutazioni geotecniche, basate caratterizzazione geologica e morfologica del sito e sui carichi trasmessi dalla struttura, hanno portato alla scelta di realizzare una fondazione profonda costituita da un plinto circolare che collega 24 pali aventi diametro 1200 mm e lunghezza netta di 28 m.

Tali pali sono posti lungo un perimetro circolare di raggio 11,46 m ad un interasse angolare di 15°.



Il plinto è formato da un'unica soletta, di forma circolare e di diametro 24.92 m e spessore variabile con un minimo di 3.10m, debitamente collegata al fusto della torre WTG tramite gabbia di tirafondi.

Si veda in tal senso quanto riportato con maggiore dettaglio al capitolo 4.

Nei capitoli successivi sarà riportata un'analisi geotecnica della fondazione e saranno illustrati i criteri di analisi della stessa.

Seguirà poi l'analisi e il dimensionamento strutturale della stessa.

La trattazione è redatta sulla scorta della caratterizzazione geologica e dei calcoli della struttura in elevazione, indicati ai punti /9/ /10/ della Documentazione e Bibliografia di Riferimento (cap. 2).

Progettazione:  via Clodoveo Bonazzi, 2 40013 Castel Maggiore (BO)	Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore	Committente:  ENERGIA PULITA TRE S.r.l. via della Chimica, 103 85100 Potenza (PZ)
--	---	--

2 NORMATIVA TECNICA E DOCUMENTI TECNICI DI RIFERIMENTO

2.1 Norme

- /1/ D.M.Infrastrutture e trasporti del 17.01.2018: “Norme tecniche per le costruzioni”.
- /2/ Circolare Ministero Infrastrutture e trasporti del 21.01.2019 n.7: “Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”.
- /3/ D.M.LL.PP. del 05.11.1971: Norme per la disciplina delle opere in conglomerato cementizio armato normale e precompresso e per le strutture metalliche.
- /4/ D.M.LL.PP. del 02.02.1974: Provvedimenti per costruzioni con particolari prescrizioni per zone sismiche.
- /5/ UNI EN 1992-1-1: 2005: Eurocodice 2 - Progettazione delle strutture di calcestruzzo. Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici.
- /6/ Eurocodice 7 – UNI EN 1997-1: 2005 – “Progettazione Geotecnica. Parte 1: Regole generali”
- /7/ Eurocodice 8 – UNI EN 1998-1: 2005 “Progettazione delle strutture per la resistenza sismica Parte 1: Regole generali, azioni sismiche e regole per gli edifici”
- /8/ Eurocodice 8 – UNI EN 1998-5:2005: - “Progettazione delle strutture per la resistenza sismica. Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici”.



2.2 Documentazione di riferimento

- /9/ SYN036.PD.RG.001 Relazione geologica.
- /10/ SYN036.PD.RG.002 Relazione geotecnica
- /11/ SYN036.PD.DT.004 Casseratura e armatura fondazione aerogeneratore

2.3 Riferimenti tecnici



2.3.1 Articoli e libri generali

- /12/ Cestari F.: Prove geotecniche in sito; Geo-Graph Ed., Segrate, 1990.
- /13/ Fardis – Carvalho – Elnashai – Faccioli – Pinto: Designers' guide to EN 1998-1 and EN 1998-5. Thomas Telford Editor, 2005.
- /14/ Tomlinson, M. J. – “Foundation design and construction” 7th edition. Prentice Hall, 2001.
- /15/ Tomlinson M.J. : Pile design and construction practice. E & FN Spon, 2004
- /16/ Fleming K., Weltman A., Randolph M., Elson K. (2008). “Piling Engineering”. Taylor & Francis group.
- /17/ Bond – A. Harris “Decoding EC7” Taylor e Francis Edition, 2009.
- /18/ Salgado R.: The Engineering of Foundations. Mc Graw Hill, 2008.
- /19/ Fellenius B.H. Basics of foundation design. Electronic edition. November 2020.
- /20/ Viggiani C., Mandolini A., Russo G. (2011) – “Piles and Pile Foundations”. CRC Press.

Progettazione:  via Clodoveo Bonazzi, 2 40013 Castel Maggiore (BO)	Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore	Committente:  ENERGIA PULITA TRE S.r.l. via della Chimica, 103 85100 Potenza (PZ)
--	---	--



2.3.2 Pali di fondazione

- /21/Associazione geotecnica italiana: “ Raccomandazioni sui pali di fondazione” Dicembre 1984.
- /22/Poulos e Davis – Analisi e progettazione di fondazioni su pali – Dario Flaccovio Editore.
- /23/R. Berardi “Capacità portante di un singolo palo soggetto a carico assiale” – Atti delle Conferenze di Geotecnica di Torino – XVI Ciclo.
- /24/Battaglio – Lancellotta “Pali di fondazione nei terreni coesivi” – Atti delle Conferenze di Geotecnica di Torino – XII Ciclo.
- /25/Pasqualini “Pali di fondazione nei terreni non coesivi” – Atti delle Conferenze di Geotecnica di Torino – XII Ciclo.
- /26/Jardin, F. and Overy, R. and Standing, J. - ICP Design Methods for Driven Piles in Sands and Clays, London: Thomas Telford, 2005.
- /27/Prezzi M., Seo H – “Analytical solutions for a vertically loaded pile in multilayered soil”. Geomechanics and Geoengineering: An International Journal Vol. 00, No. 00,2006.
- /28/Salgado R., Prezzi M, Basu D., Choi Y. S. - Response of Laterally Loaded Rectangular and Circular Piles in Soils with Properties Varying with Depth. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 140, Issue 4 (April 2014).
- /29/Bustamante, M., and Ganeselli, L. (1982). "Pile bearing capacity predictions by means of static penetrometer CPT." Proc., 2nd European Symposium on Penetration Testing (ESOPT-II), Vol. 2, Amsterdam, 493 – 500.
- /30/Bauduin, V.U.B. – “Design of axially loaded compression piles according to Eurocode 7”.
- /31/Poulos, H. (2009). Optimisation of pile foundation system design in East Asia. Piling and Deep Foundations Asia Summit "Ensuring Cost-Effective, Safe and Sustainable Foundations in East Asia", Part 1, July, Lantau, Hong Kong, China.
- /32/Poulos, H.G. (2011). The De Mello foundation engineering legacy. Soils and rocks, San Paolo, 34(1): 3-31, January – April 2011.
- /33/Randolph M.F., Wroth C.P. (1978). "Analysis of deformations of vertically loaded piles". Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, vol. 104, GT12, 1465-1488.
- /34/Broms, B. B., "Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils," Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, American Society of Civil Engineers, Vol 89, No. SM2, March 1964, pp 27-63.
- /35/Broms, B. B., "Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils," Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, American Society of Civil Engineers, Vol 89, No. SM3, May 1964, pp 123-157.
- /36/Cecconi M., Pane V., Isidori F. – « Un'estensione della Teoria di Broms nel calcolo dei pali sollecitati da forze orizzontali ». V CNRIG - Convegno Nazionale dei Ricercatori di Ingegneria Geotecnica. Bari, 15-16 Settembre 2006. Atti, Vol. 1, pp. 295-311.
- /37/Franceschini M.,(2014) - Analisi del comportamento dei pali a spostamento di terreno realizzati nell'ambito del campo prove presso lo stabilimento della società Ceramica Sant'Agostino (FE), IAGIG 2014.
- /38/M. Franceschini – Progetto, realizzazione e collaudo di micropali valvolati di grande portata. L'esempio di fondazioni per un capannone industriale. – INARCOS n.641 – Luglio-Agosto 2003.
- /39/Bustamante – Doix: “Une methode pour le calcul des tirants et des micropieux injectes”. Bull. Lab. P. e Ch. Dic. 1985.
- /40/Franceschini M., Fiorelli F. (2012). La previsione della curva carico-cedimenti per micropali valvolati: un primo caso di studio. Atti del 2° IAGIG - Incontro Annuale dei Giovani Ingegneri Geotecnici. Bologna, 4-5 Maggio 2012.
- /41/Franceschini M., Fiorelli F. (2012). La curva carico-cedimenti specializzata per micropali valvolati: riflessioni su un caso di studio. Il Geologo. Trimestrale dell'Ordine dei Geologi della Toscana. Anno XXIII n.88 Giugno 2012 p. 6-13.
- /42/M. Franceschini, F. Fiorelli, E. Bandiera, V. Colella, G. Cortellazzo & A. Dei Svaldi. “Deep foundations of the new Pavilion 37 – fair quarter Bologna.” CPT'22 Bologna 2022 – 5° International Symposium on Cone Penetration Testing, 8 – 10 giugno 2022.

Progettazione:  via Clodoveo Bonazzi, 2 40013 Castel Maggiore (BO)	Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore	Committente:  ENERGIA PULITA TRE S.r.l. via della Chimica, 103 85100 Potenza (PZ)
--	---	--

2.3.3 Codice di calcolo BEM Repute

- /43/Shen; The: "Analysis of laterally loaded pile group using a variational approach" Geotechnique 53, No.5, 525-526.
- /44/Basile: "Integrated form og singular Mindlin's solution" 10th ACME Conference, Swansea p.191-194.
- /45/Bond, A. J. & Basile, F. (2006). Repute 1.5, Pile-group Design Software. User Manual, Geocentrix Ltd, United Kingdom, 60 p.
- /46/Basile, F. (2003). Load-transfer method vs. continuum solution in pile group analysis and design. Proc. BGA Int. Conf. on Foundations, Dundee, pp 109-118.
- /47/Hardy e O'Brien "Non-linear analysis of large pile groups for the new Wembley stadium" (Proc. 10th Int. Conf. on Piling and Deep Foundations, May 2006, Amsterdam, The Netherlands, pp. 303-310).
- /48/Bond, A. J. & Basile, F. (2010). Repute 2.0, Software for pile design and analysis. Reference Manual, Geocentrix Ltd, United Kingdom, 49p.
- /49/Poulos, H. (2009). Optimisation of pile foundation system design in East Asia. Piling and Deep Foundations Asia Summit "Ensuring Cost-Effective, Safe and Sustainable Foundations in East Asia", Part 1, July, Lantau, Hong Kong, China.
- /50/Poulos, H. & Bunce, G. (2008). Foundation design for the Burj Dubai - The World's Tallest Building. Proc. 6th Int. Conf. on Case Histories in Geotechnical Engineering and Symposium in Honor of Professor James K. Mitchell, Arlington, Va (Usa), Paper No. 1.47, pp 1-16.
- /51/Poulos, H. (2008). The piled raft foundation for the Burj Dubai – Design and performance. IGS-Ferroc Terzaghi Oration 2008, Indian Geotechnical Society, Indore, India.
- /52/Salgado, R., Dipanjan, B., Gavin, K., Kumar, S., Estrada Alvarez, G.M. & Ahmad, S.F. (2008). Analysis, design, testing and performance of foundations. Proc. 6th Int. Conf. on Case Histories in Geotechnical Engineering and Symposium in Honor of Professor James K. Mitchell, Arlington, Va (Usa), General Report - Session 1, pp 1-23.
- /53/Poulos, H. (2008). Foundation design for high-rise buildings: Emirates Towers and Burj Dubai case studies. Proc. Piling and Deep Foundations Summit 2008, Shangri-La Hotel, Dubai, United Arab Emirates, Opening Keynote Session.
- /54/O'Brien, A.S. (2007). Raising the 133m high Triumphal Arch at the New Wembley Stadium, Risk Management via the Observational Method. Proc. Of the 14th European Conference on Soil mechanics and Geotechnical Engineering, Madrid, Millpress Science Publishers, Rotterdam, The Netherlands, pp. 365-370.
- /55/Hardy, S. & O'Brien, A.S. (2006). Non-linear analysis of large pile groups for the new Wembley stadium. Proc. 10th Int. Conf. on Piling and Deep Foundations, Amsterdam, The Netherlands, Publ. by Deep Foundation Institute (DFI), USA, pp. 303-310.
- /56/O'Brien, A.S., Hardy, S., Farooq, I., & Ellis, E.A. (2005). Foundation engineering for the UK's new national stadium at Wembley. Proc. 16th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Osaka, Japan, pp. 1533-1536.
- /57/Basile, F. (2010). Torsional response of pile groups. Proc. 11th DFI/EFFC Int. Conf. on Geotechnical Challenges in Urban Regeneration, London, 26-28 May 2010, 13 p, in press.
- /58/Basile, F. (2003). Analysis and design of pile groups. In "Numerical Analysis and Modelling in Geomechanics" (ed. J. W. Bull), Spon Press, London, Chapter 10, pp 278-315.
- /59/Basile, F. (1999). Non-linear analysis of pile groups. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering, Vol. 137, No. 2, April, pp 105-115.

Progettazione:  via Clodoveo Bonazzi, 2 40013 Castel Maggiore (BO)	Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore	Committente:  ENERGIA PULITA TRE S.r.l. via della Chimica, 103 85100 Potenza (PZ)
--	---	--

3 DESCRIZIONE MATERIALI E PRODOTTI PER USO STRUTTURALE

Per tutti i materiali utilizzati, attenendosi al piano di manutenzione redatto, la durabilità risulta compatibile con la vita utile dell'opera.

Per quanto concerne le proprietà meccaniche dei materiali strutturali il progetto prevede quanto segue.

3.1 Conglomerato cementizio per opere non strutturali

Ai fini non strutturali il conglomerato cementizio dovrà avere le seguenti caratteristiche:

Classe C12/15

con le seguenti resistenze:

Resistenza caratteristica cilindrica a compressione: $f_{ck} = 12 \text{ MPa}$

Resistenza caratteristica cubica a compressione: $R_{ck} = 15 \text{ MPa}$

3.2 Conglomerato cementizio per getto pali trivellati

La composizione del conglomerato cementizio sarà a:

prestazione garantita e conforme alla Norma EN206-1

La classe di resistenza adottata nella progettazione esecutiva di tutte le strutture di fondazione sarà:

Classe C25/30

con le seguenti resistenze:

Resistenza caratteristica cilindrica a compressione: $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$

Resistenza caratteristica cubica a compressione: $R_{ck} = 30 \text{ MPa}$

Resistenze di calcolo:

- Calcestruzzo - SLU: $f_{cd} = \alpha_{cc} \times f_{ck} / \gamma_{mc} = 0.85 \times 25 / 1.5 = 14.16 \text{ MPa}$

- Calcestruzzo – SLE (rara): $\sigma_c = 0.60 \times f_{ck} = 0.60 \times 25 = 15.00 \text{ MPa}$

- Calcestruzzo – SLE (quasi permanente): $\sigma_c = 0.45 \times f_{ck} = 0.45 \times 25 = 11.20 \text{ MPa}$



➤ **Classe di esposizione per tutte le strutture: XC2**

Secondo Linee guida per il calcestruzzo strutturale emesse dal S.T.C. del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

➤ **Condizioni Ambientali: ORDINARIE**

➤ **Modalità di messa in opera:** Secondo Linee guida per il calcestruzzo strutturale emesse dal S.T.C. del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

Il copriferro sarà pari a 60 mm per i pali trivellati.

Progettazione:  via Clodoveo Bonazzi, 2 40013 Castel Maggiore (BO)	Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore	Committente:  ENERGIA PULITA TRE S.r.l. via della Chimica, 103 85100 Potenza (PZ)
--	---	--

Il conglomerato strutturale in opera sarà inoltre caratterizzato dai seguenti requisiti compositivi e prestazionali:

- classe di consistenza misurata mediante abbassamento al cono:
 $S_4 = 160 - 210\text{mm}$ secondo UNI 9858;
- diametro massimo dell'aggregato: 25 mm
- rapporto max. acqua/cemento = 0.60
- Classe di contenuto in cloruri nel cls: Cl 0.20 ($\leq 0.20\%$)

3.3 Conglomerato cementizio per getto plinto fondazione

La composizione del conglomerato cementizio sarà a:

prestazione garantita e conforme alla Norma EN206-1

La classe di resistenza adottata nella progettazione esecutiva di tutte le strutture di fondazione sarà:

Classe C32/40

con le seguenti resistenze:

Resistenza caratteristica cilindrica a compressione: $f_{ck} = 32 \text{ MPa}$

Resistenza caratteristica cubica a compressione: $R_{ck} = 40 \text{ MPa}$

Resistenze di calcolo:

- Calcestruzzo - SLU: $f_{cd} = \alpha_{cc} \times f_{ck} / \gamma_{mc} = 0.85 \times 32 / 1.5 = 18.13 \text{ MPa}$
- Calcestruzzo – SLE (rara): $\sigma_c = 0.60 \times f_{ck} = 0.60 \times 32 = 19.20 \text{ MPa}$
- Calcestruzzo – SLE (quasi permanente): $\sigma_c = 0.45 \times f_{ck} = 0.45 \times 32 = 14.40 \text{ MPa}$

➤ **Classe di esposizione per tutte le strutture: XC4/XF3**

Secondo Linee guida per il calcestruzzo strutturale emesse dal S.T.C. del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.



➤ **Condizioni Ambientali: ORDINARIE**

➤ **Modalità di messa in opera:** Secondo Linee guida per il calcestruzzo strutturale emesse dal S.T.C. del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

Il copriferro sarà pari a 40 mm per le strutture fondali in opera.

Il conglomerato strutturale in opera sarà inoltre caratterizzato dai seguenti requisiti compositivi e prestazionali:

- classe di consistenza misurata mediante abbassamento al cono:
 $S_4 = 160 - 210\text{mm}$ secondo UNI 9858;
- diametro massimo dell'aggregato: 25 mm
- rapporto max. acqua/cemento = 0.50
- Classe di contenuto in cloruri nel cls: Cl 0.20 ($\leq 0.20\%$)

Progettazione:  via Clodoveo Bonazzi, 2 40013 Castel Maggiore (BO)	Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore	Committente:  ENERGIA PULITA TRE S.r.l. via della Chimica, 103 85100 Potenza (PZ)
--	---	--

3.4 Acciaio per armature

Si useranno



barre in acciaio saldabile del tipo B450C

avente le seguenti caratteristiche meccaniche:

- Tensione caratteristica di snervamento $f_{y, nom} \geq 450 \text{ N/mm}^2$
- Tensione caratteristica di rottura $f_{t, nom} \geq 540 \text{ N/mm}^2$
- Allungamento percentuale $(A_{Gt})_K \geq 7.5\%$

Per $f_y = f_{y, nom}$ si hanno le seguenti resistenze di calcolo:

- Acciaio - SLU: $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_{ms} = 450 / 1.15 = 391.30 \text{ MPa}$
- Acciaio – SLE (tutte): $\sigma_s = 0.80 \times f_{yk} = 0.80 \times 450 = 360.00 \text{ MPa}$

Progettazione:  via Clodoveo Bonazzi, 2 40013 Castel Maggiore (BO)	Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore	Committente:  ENERGIA PULITA TRE S.r.l. via della Chimica, 103 85100 Potenza (PZ)
--	---	--

4 GEOMETRIA DELLA FONDAZIONE

In questo capitolo si descrivono gli aspetti geometrici più significativi di quanto in progetto, così da chiarirne gli aspetti legati alla concezione strutturale e anche per chiarire l'iter progettuale e di calcolo.

La fondazione adottata per la torre WTG è costituita da un plinto circolare che collega n.24 pali trivellati aventi diametro di 1200 mm e lunghezza netta (riferita a partire dall'intradosso della fondazione) di 28.0 m.

Tali pali sono posti lungo un perimetro circolare di raggio 11,46 m ad un interasse angolare di 15°.

Il plinto è formato da un'unica soletta, di forma circolare e di diametro 24.92 m e spessore variabile con un minimo di 3.10m, debitamente collegata al fusto della torre WTG mediante tirafondi.

Il piano di imposta della fondazione è a -4.30 m dal livello del piano finito.

Le principali caratteristiche geometriche della fondazione sono:

- Dimensioni plinto fondazione: Circolare - Diametro 24.92 m
- Altezza blocco fondazione: min. 315 cm
max 375 cm
- Tecnologia pali: Pali trivellati
- Diametro pali: 1200 mm
- Interasse pali: interasse radiale 15°
Distanza sulla corda 2.99 m
- Lunghezza pali: 28 m netto da intradosso fondazione
- Numero pali: 24
- Armatura pali: n. .ro 20 barre ϕ 20mm
Spirale ϕ 10 mm passo 20 cm

Si allegano degli schemi per meglio chiarire la geometria della fondazione sopra descritta.

Progettazione:



via Clodoveo Bonazzi, 2
40013 Castel Maggiore (BO)

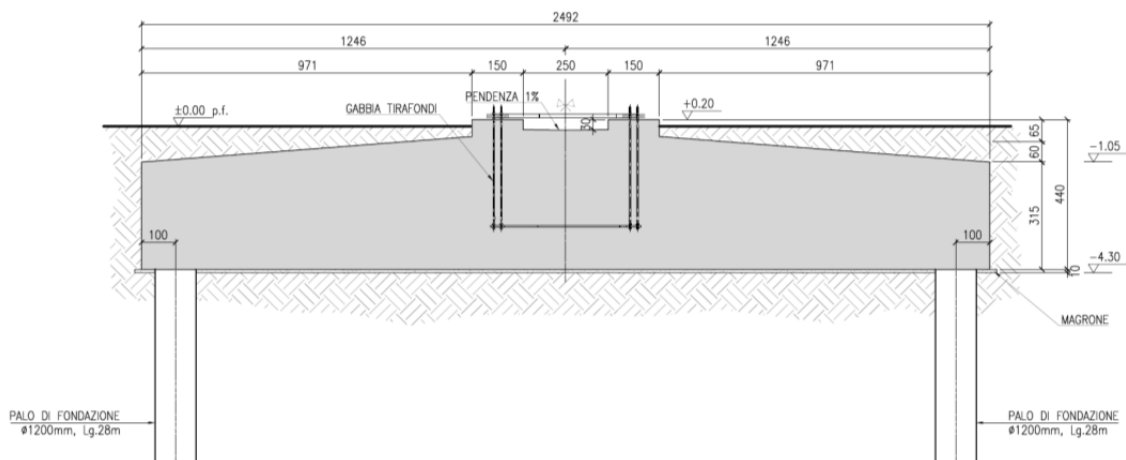
**Relazione di calcolo fondazione
aerogeneratore**

Committente:

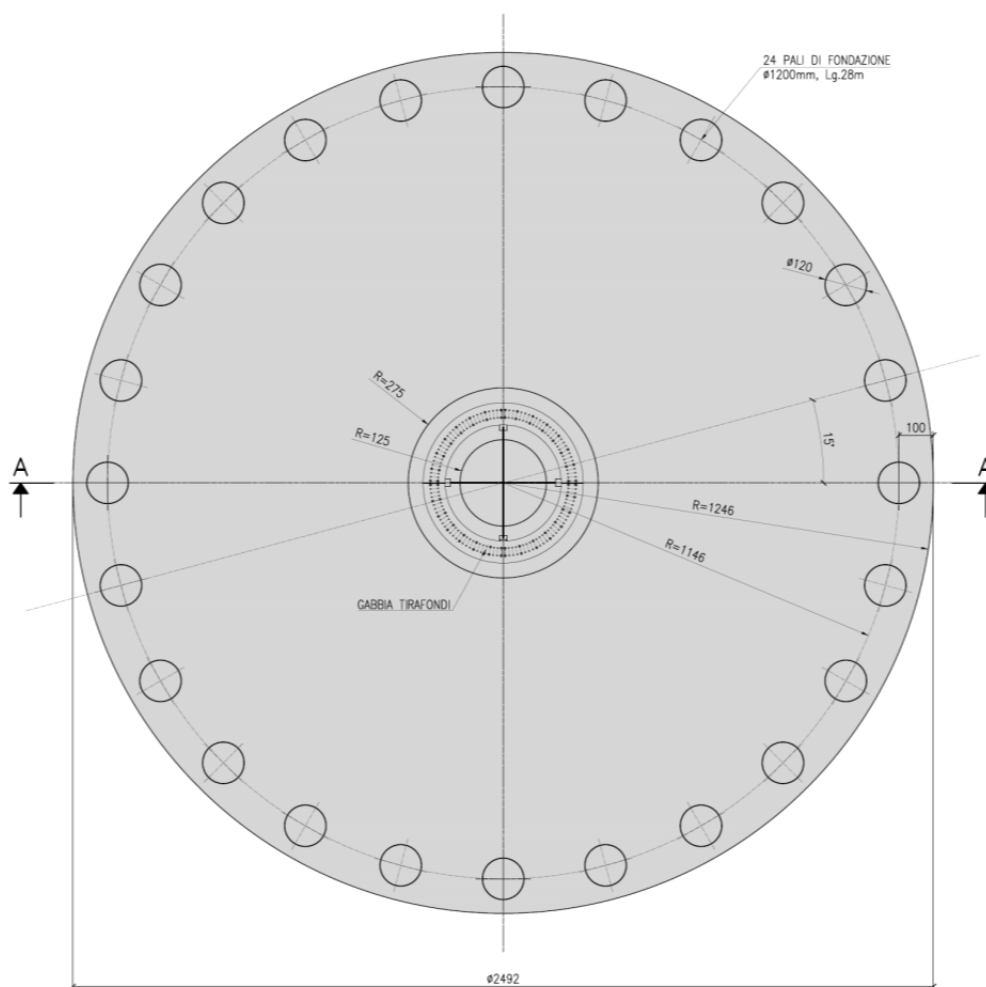


ENERGIA PULITA TRE S.r.l.
via della Chimica, 103
85100 Potenza (PZ)

⇒ Sezioni verticale della fondazione



⇒ Pianta della fondazione



Per maggiore dettaglio si faccia riferimento ai disegni esecutivi /11/.

5 SOLLECITAZIONI AGENTI SULLA FONDAZIONE

Le azioni trasmesse dall'aerogeneratore alla fondazione sono valutate facendo riferimento a valori tipologici per torri con le caratteristiche di quelle che si prevede di installare nell'impianto in oggetto.

In tale documento sono riportate i carichi necessari per il dimensionamento fondale agli Stati Limite Ultimi e di Esercizio, oltre che le prescrizioni e le prestazioni minime richieste al sistema terreno-fondazione in termini di cedimento e rigidezza (per i quali si rimanda al capitolo 15).

I carichi sono valutati alla base della torre, all'estradosso della fondazione, considerando il seguente sistema di coordinate.

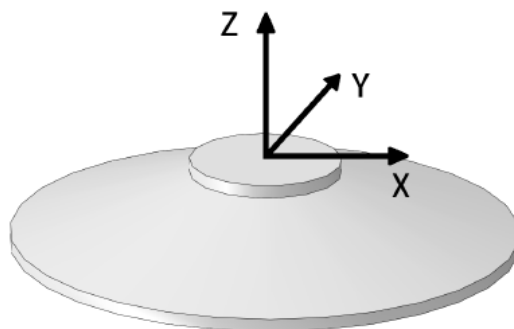


Figure 1: Coordinate system

Si riepilogano per ciascuno stato limite, le azioni globali agenti sulla fondazione, con riferimento alle quali saranno condotte nei capitoli successivi le verifiche geotecniche e strutturali del plinto e dei pali di fondazione.

A tali azioni è stato aggiunto il solo peso proprio del plinto, introdotto all'interno del programma di analisi BEM delle palificate Repute.

Combinazioni agli Stati limite Ultimi SLU



Extreme unfactored loads — Partial safety factor NOT applied										
System: TS Ø 1.100 m (TB) (Result ID: 17401263)										
Load	DLC	LC name	γ_f [—]	Mxy [kNm]	ΔMxy [kNm]	MxyTotal [kNm]	Mz [kNm]	Fxy [kN]	Fz [kN]	
Mxy	absmax	2.3 IEC_Ed3_NCV_60_02030000_C_02_02_21p0	1.00	140425	5549	145974	-2498	1249	-6282	
Mz	absmax	2.2 IEC_Ed3_NCV_60_02020000_B_02_21p0	1.00	26729	5549	32278	-10459	253	-5982	
Fxy	absmax	2.3 IEC_Ed3_NCV_60_02030000_B_02_01_12p5	1.00	140495	5549	146044	-85	1294	-6352	

Le azioni sono valutate facendo riferimento alla Norma IEC 61400-1 che è specifica delle strutture di produzione di energia da fonte eolica.

Tale Norma fa riferimento ad approcci di calcolo semi-probabilistico agli Stati Limite, quindi in questo è concorde alle Norme Tecniche NTC2018 /1/, ma considera differenti coefficienti parziali delle azioni.

Per tale ragione, e operando dal punto di vista della cautela, si prendono in considerazione le azioni "estreme" ("Extreme loads") NON fattorizzate e vi si applicano i coefficienti parziali di amplificazione delle azioni del gruppo A1 (approccio di calcolo 2, con combinazione dei coefficienti A1+M1+R3) delle NTC2018. Si considera la sola forza verticale Fz come azione permanente mentre le altre componenti di sollecitazione (tagli e momenti), principalmente indotte dall'azione eolica, sono considerate come azioni variabili.

Ciò premesso, si ottengono i seguenti valori SLU delle azioni agenti all'estradosso della fondazione.

Progettazione:  via Clodoveo Bonazzi, 2 40013 Castel Maggiore (BO)	Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore	Committente:  ENERGIA PULITA TRE S.r.l. via della Chimica, 103 85100 Potenza (PZ)
--	---	--



Load cmb	Mxy total [kNm]	Mz [kNm]	Fxy [kN]	Fz [kN]
Mxy comp	218961	-3747	1874	-8167
Fxy comp	219066	-128	1941	-8258
Mz comp	48417	-15689	380	-7777

Combinazioni agli Stati Limite di Esercizio SLE - Carichi Caratteristici

Normal loads — Partial safety factor NOT applied										
System: TS @ 1.100 m (TB) (Result ID: 17617481)										
Load	DLC	LC name	γ_f [-]	Mxy [kNm]	Δ Mxy [kNm]	MxyTotal [kNm]	Mz [kNm]	Fxy [kN]	Fz [kN]	
Mxy	absmax	1.4	IEC_Ed3_NCV_60_01040000_B_01_01_02_10p5	1.00	118905	5549	124454	444	1035	-6386
Mz	absmax	2.1/2.4	IEC_Ed3_NCV_60_02010204_B_07_02_26p0	1.00	26308	5549	31857	-8915	312	-6086
Fxy	absmax	1.3	IEC_Ed3_NCV_60_01030000_A_05_12p0	1.00	98763	5549	104312	-624	1200	-6191

Combinazioni agli Stati Limite di Esercizio SLE - Carichi quasi-permanenti

Quasi-Permanent Loads				
System: TS @ 1.100 m (TB) (Result ID: 17299213)				
γ_f [-]	Mxy [kNm]	Mz [kNm]	Fxy [kN]	Fz [kN]
1.0	102531.1	2864.4	960.4	-6692.6

Progettazione:  via Clodoveo Bonazzi, 2 40013 Castel Maggiore (BO)	Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore	Committente:  ENERGIA PULITA TRE S.r.l. via della Chimica, 103 85100 Potenza (PZ)
--	---	--

6 MODELLO GEOTECNICO DEL SOTTOSUOLO

La costruzione del modello geotecnico è finalizzata ad ottenere i parametri che saranno impiegati nei calcoli geotecnici, a partire dall'interpretazione delle indagini geognostiche condotte e analizzate nella relazione geotecnica.

Un modello geotecnico del terreno è un insieme di parametri geotecnici e di leggi costitutive che rendono possibile descriverne in modo matematico la risposta meccanica. È chiaro come, a secondo del problema geotecnico che si sta affrontando, dei criteri di calcolo scelti e delle ipotesi alla base degli stessi, sia necessario elaborare uno **specifico modello geotecnico** che sia **congruente con le necessità del calcolo che si sta conducendo**. È concettualmente sbagliato, quindi, parlare di "modello geotecnico" ma piuttosto è giusto parlare, per lo stesso strato di terreno, di "modelli geotecnici".

Dal momento in cui sono previste fondazioni profonde, il modello geotecnico è stato studiato appositamente per essere utilizzato per il programma di calcolo Repute, per le analisi delle palificate con un metodo numerico non lineare. I parametri che seguono sono pertanto conformi all'impiego di un modello costitutivo non lineare (iperbolico) nelle analisi sopra dette.

Come già detto in /10/, in ragione del livello di progettazione e di autorizzazione del progetto in oggetto, il modello geotecnico è stato desunto a partire da studi di carattere bibliografico e cartografico, impiegando parametri ragionevoli e usuali per terreni quali quelli delle formazioni in oggetto frutto anche di esperienze dirette in precedenti lavori su litologie simili.

Il contesto di analisi è quello tipico dei siti di installazione dei diversi aerogeneratori previsti nell'impianto in oggetto.



Si rimanda alla fase esecutiva la realizzazione delle opportune indagini geologiche e geognostiche per l'accurata caratterizzazione geotecnica dei terreni e l'aggiornamento del modello geotecnico.

Si riporta un riepilogo dei parametri geotecnici che compongono il modello geotecnico generale del sito in esame. In esso sono riportati:

- Denominazione degli strati omogenei considerati nelle analisi;
- Spessore degli strati;
- I parametri di resistenza sia drenata (ϕ' , c') che non drenata (s_u);
- I parametri di rigidezza, rappresentati dal il modulo $E_{0, \text{palo-terreno}}$.

Modello geotecnico generale del terreno

Descrizione	Profondità (m)		Peso vol γ kN/mc	Res non dren S_u kPa	Modulo $E_{0, \text{palo-terreno}}$ MPa
	da	a			
<i>Coltre</i>	0	7	18	50	190
<i>Formazione molto alterata</i>	7	10	18	110	442
<i>Formazione alterata</i>	10	15	18	150	442
<i>Formazione compatta</i>	15	oltre	18	>200	520

Progettazione:  via Clodoveo Bonazzi, 2 40013 Castel Maggiore (BO)	Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore	Committente:  ENERGIA PULITA TRE S.r.l. via della Chimica, 103 85100 Potenza (PZ)
--	---	--

7 PARAMETRIZZAZIONE SISMICA DEL SITO

La tipologia strutturale in progetto è classificata in categoria 3, con vita nominale pari a 100 anni, e classe d'uso IV.

La parametrizzazione sismica del sito oggetto di intervento fornisce le seguenti evidenze:

	Tr	ag	F0	T*c
SLO	120	0.109	2.455	0.279
SLD	201	0.133	2.452	0.282
SLV	1898	0.273	2.463	0.316
SLC	2475	0.294	2.522	0.320

Si è considerato:

- | | | |
|---|-------------------------------|-------------|
| ➤ Opere con livelli prestazioni elevate | Vita nominale ≥ 100 anni | § 2.4.1 /1/ |
| ➤ Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti | Classe d'uso IV | § 2.4.2 /1/ |
| ➤ Coefficiente d'uso | $C_u = 2.0$ | § 2.4.3 /1/ |

Si è inoltre considerata una superficie topografica (T2) ed un sottosuolo di categoria C.

In condizioni “pseudostatiche” l'azione sismica può essere rappresentata con una forza statica equivalente pari al prodotto delle forze di gravità per un opportuno coefficiente sismico.

Nelle analisi di stabilità di versante, anche nel caso in cui sia presente sul versante stessi una struttura o un'infrastruttura (vedi §7.11.3.5.1 NTC2018) i valori dei coefficienti sismici orizzontali k_h e verticale k_v possono essere valutati mediante le espressioni

$$k_h = \beta_s \cdot a_{\max}/g$$

$$k_v = \pm 0,5 \cdot k_h$$



Considerando il seguente valore del coefficiente β_s definiti dalla norma :

$$\beta_s = 0,38$$

Si ottengono pertanto i seguenti valori dei coefficienti sismici pseudostatici da impiegarsi per il calcolo delle forze inerziali:

$$k_h = 0,161$$

$$k_v = \pm 0,5 \cdot k_h = 0,081$$

Progettazione:  via Clodoveo Bonazzi, 2 40013 Castel Maggiore (BO)	Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore	Committente:  ENERGIA PULITA TRE S.r.l. via della Chimica, 103 85100 Potenza (PZ)
--	---	--

8 CRITERI DI PROGETTO

Le analisi sono effettuate in accordo D.M. 17/01/2018 (NTC2018, doc. /1/) tenendo conto di possibili Stati Limite di tipo geotecnico e di tipo strutturale. Nello specifico, sono da considerarsi le verifiche dei seguenti stati limite:

FONDAZIONI PROFONDE (PALI)

SLU di tipo strutturale (STR):

- Raggiungimento della resistenza dei pali;

SLU di tipo geotecnico (GEO):

- Collasso per carico limite della palificata nei riguardi dei carichi assiali;
- Collasso per carico limite di sfilamento nei riguardi dei carichi assiali di trazione;
- Collasso per carico limite della palificata nei riguardi dei carichi trasversali;

SLE in esercizio:

- Compatibilità degli spostamenti con le opere in elevazione e relativa funzionalità.

Per ogni stato limite considerato è stato verificato che non si raggiunga una condizione di stato limite ultimo, ovvero che sia rispettata la condizione:

$$Ed \leq Rd$$

dove Ed è il valore di progetto dell'azione o dell'effetto dell'azione e Rd il valore di progetto della resistenza del sistema.

Per ciascun stato limite di esercizio considerato è stato verificato che sia rispettata la condizione:

$$Ed \leq Cd$$



dove Ed è il valore di progetto degli effetti delle azioni e Cd è il prescritto valore limite di tale effetto.

Le verifiche delle fondazioni su pali devono essere effettuate secondo l'Approccio 2, con la combinazione (A1+M1+R3), tenendo conto dei valori dei coefficienti parziali riportati in Tabella°1 ÷ Tabella 2.

È possibile correlare i valori di capacità portante limite dei pali, al fine di determinare il valore unico di progetto della resistenza assiale dei pali di fondazione, applicando la procedura riportata nelle NTC2018 /1/ al § 6.4.3.1.1.

Il valore caratteristico della resistenza dei pali sarà determinato impiegando i fattori di correlazione ξ_3 e ξ_4 , riportati in Tabella 2, in quanto si fa riferimento a valutazioni analitiche basate sui dati geotecnici dedotti dalle indagini geognostiche condotte.

Le relazioni che legano i valori di resistenza limite valutati analiticamente al valore caratteristico sono le seguenti, sempre tratte dal § 6.4.3.1.1 delle NTC2018 /1/.

Progettazione:  via Clodoveo Bonazzi, 2 40013 Castel Maggiore (BO)	Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore	Committente:  ENERGIA PULITA TRE S.r.l. via della Chimica, 103 85100 Potenza (PZ)
--	---	--

$$R_{c,k} = \text{Min} \left\{ \frac{(R_{c,cal})_{media}}{\xi_3}, \frac{(R_{c,cal})_{min}}{\xi_4} \right\}$$

$$R_{t,k} = \text{Min} \left\{ \frac{(R_{t,cal})_{media}}{\xi_3}, \frac{(R_{t,cal})_{min}}{\xi_4} \right\}$$

Così determinato il valore caratteristico della resistenza dei pali, si passa al relativo valore di progetto applicando, come usuale nell'approccio progettuale semi-probabilistico con coeff. parziali di sicurezza a cui si rifanno le Norme NTC2018, il coefficiente parziale γ sulla resistenza.

Nel caso dei pali tale coefficiente non è univoco, ma dipendente dalla tecnologia costruttiva degli stessi oltre che dalla componente resistente (laterale, punta, ecc.). Si veda in tal senso la Tabella 1.



Tabella 1 – “Coefficienti parziali da applicare alle resistenze caratteristiche a carico verticale dei pali”

VERIFICA	Simbolo	Pali infissi	Pali trivellati	Pali ad elica continua
	γ_R	(R3)	(R3)	(R3)
Base	γ_B	1.15	1.35	1.30
Laterale in compressione	γ_s	1.15	1.15	1.15
Totale (*)	γ	1.15	1.30	1.25
Laterale in trazione	γ_{st}	1.25	1.25	1.25

*da applicare alle resistenze caratteristiche dedotte dai risultati di prove di carico di progetto

Tabella 2 – “Fattori di correlazione per la determinazione della resistenza caratteristica dei pali in funzione del numero di verticali indagate”

Numero di profili di indagine	1	2	3	4	5	7	≥ 10
ξ_3	1.70	1.65	1.60	1.55	1.50	1.45	1.40
ξ_4	1.70	1.55	1.48	1.42	1.34	1.28	1.21

Progettazione:  via Clodoveo Bonazzi, 2 40013 Castel Maggiore (BO)	Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore	Committente:  ENERGIA PULITA TRE S.r.l. via della Chimica, 103 85100 Potenza (PZ)
--	---	--

9 ASPETTI TEORICI RIGUARDANTI FONDAZIONI PROFONDE

La capacità portante assiale a compressione di un palo è distinguibile in due componenti: una **attritiva**, che si genera lungo la superficie laterale dei pali (resistenza laterale), ed una di **punta**, il cui meccanismo resistente è in qualche maniera simile a quello di una fondazione superficiale (di area molto minore ma con molto più approfondimento nel terreno).

Il primo meccanismo è molto più rigido del secondo ed inizia a manifestarsi già per piccoli valori di scorrimento relativo palo - terreno (cedimenti verticali).

Per valori di cedimento molto maggiori, anche di ordini di grandezza, si mobilita la portata di punta; proprio per non considerare valori non realistici di tale componente, che in ogni caso sarebbero da ignorare a causa di criteri legati alla funzionalità dell'opera, se ne calcola solitamente l'entità per prefissati valori di spostamento verticale (5 – 10 % del diametro del palo).

Nella letteratura scientifica internazionale sono reperibili numerosi e ben studiati metodi di calcolo della capacità portante dei pali di fondazione: metodi per il calcolo della resistenza laterale, in suoli coesivi o incoerenti, direttamente dai parametri di resistenza dei materiali o per correlazione diretta con prove in sito (in particolar modo penetrometriche statiche CPT e CPTu), metodi per il calcolo della portata di punta a rottura, per certi valori di cedimento del palo, basandosi sui parametri di resistenza o, ancora, per correlazione diretta con prove in sito.

I valori di resistenza, alla punta e per attrito laterale per le litologie coesive ed incoerente, così calcolati sono dei valori di capacità portante limite.

Molto importante, ma spesso invece trascurato nella pratica, è il contributo del peso proprio del palo. Nella resistenza a compressione, data dalla somma della componente laterale e di quella di punta, il valore del peso proprio del palo è considerato come carico gravante, ovvero come una azione permanente sfavorevole.

A trazione, invece (condizione nella quale la resistenza è naturalmente uguale alla sola componente attritiva laterale), la resistenza aumenta a causa del peso proprio del palo, considerato come azione permanente favorevole.

Nel presente capitolo si descrivono gli aspetti teorici di base delle teorie che si impiegheranno per valutare la capacità portante limite dei pali impiegati nel progetto.

9.1 Calcolo con metodi basati sui parametri di resistenza

In presenza di litologia coesiva, assumendo un comportamento non drenato del materiale, la tensione tangenziale resistente che si esplica lungo il fusto del palo è proporzionale alla resistenza non drenata a mezzo di un coefficiente di aderenza α , con la formula:

$$\tau_{lat} = \alpha \cdot S_u$$

e con α che assume valori decrescenti all'aumentare della S_u .

La portata alla punta è invece “simile” a quella di una fondazione superficiale: la pressione sulla punta del palo è pari al valore della resistenza non drenata per un fattore di capacità portante N_c che assume valori molto prossimi a 9; a questa componente si va a sommare anche la tensione litostatica verticale.

$$Q_b = (9 \cdot S_u + \sigma_v) \cdot A_b$$

In litologia incoerente, la tensione tangenziale laterale vale:

$$\tau_{lat} = K \cdot \sigma_v \cdot \tan \phi$$

$$K_0 = (1 - \sin \phi)$$

Nella quale K è il coefficiente di spinta orizzontale, valutabile in condizioni di riposo o in funzione della tecnologia costruttiva del palo.

La resistenza di punta è valutabile secondo la teoria di Berezantsev che tiene conto dello spostamento limite ammissibile:

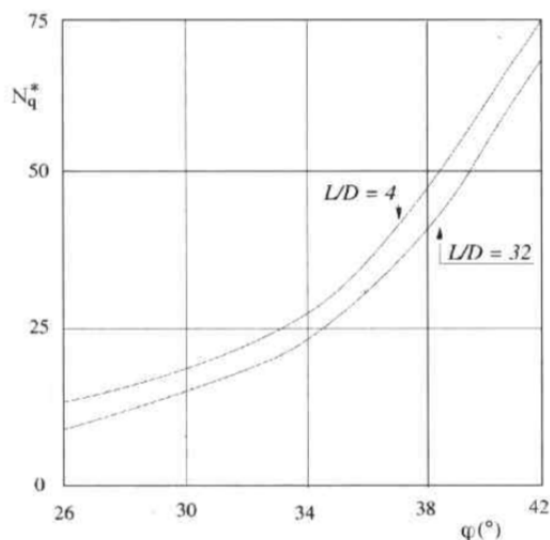
$$Q_b = (\gamma \cdot B_k \cdot \phi) \cdot A_b$$

Nella quale Bk è un fattore di capacità portante che varia in funzione della snellezza del palo (L / ϕ).



In alternativa la resistenza di punta può essere calcolata secondo la teoria di Berezantsev (1963):

$$Q_b = A_b \cdot \sigma_v \cdot N_q^*$$

Nella quale N_q^* è un fattore di capacità portante che varia in funzione dell'angolo di resistenza al taglio del terreno ϕ (vedi grafico seguente), mentre A_b è l'area di base del palo e σ_v la tensione litostatica alla profondità della punta del palo.



Tutti i metodi di calcolo citati e descritti nel presente paragrafo sono ampiamente dettagliati nel riferimento bibliografico /23/.

Progettazione:  via Clodoveo Bonazzi, 2 40013 Castel Maggiore (BO)	Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore	Committente:  ENERGIA PULITA TRE S.r.l. via della Chimica, 103 85100 Potenza (PZ)
--	---	--

10 CRITERI DI ANALISI DELLE PALIFICATE

Dopo aver ricavato il modello geotecnico con il quale analizzare le palificate, che costituiscono le fondazioni di quanto in progetto, si passa all'analisi della palificata, intesa come gruppo di pali collegati in testa da un elemento rigido (plinto in c.a., nel caso specifico). Ciò significa ripartire le azioni che le sovrastrutture trasmettono in fondazione tra tutti i pali del gruppo, determinarne le azioni di compressione e trazione e anche le sollecitazioni di taglio e flettenti per tutte le condizioni di carico ritenute significative. Allo stesso tempo vengono valutati anche gli spostamenti, in campo non lineare viste le assunzioni di calcolo e modellazione operate.

Tutto questo è fatto, come ampiamente spiegato, tenendo conto in modo corretto e non forfettario degli effetti di gruppo e di schermatura reciproca dei pali.

Per perseguire tutti tali obiettivi si è fatto ricorso ad un approccio di calcolo numerico mediante il programma di calcolo **Repute**, sviluppato dalla Soc. Geocentrix.

Repute è un codice geotecnico di tipo BEM (Boundary Element Method), specifico per l'analisi di gruppi di pali in ambito tridimensionale.

Si intende col termine "geotecnico" che è un approccio di calcolo che non solo consente la modellazione della fondazione su pali, ma anche del volume di terreno col quale essa si trova ad interagire. Il terreno può essere modellato con una successione di strati omogenei, ognuno dei quali descritto con modelli costitutivi specifici (terreni coesivi, terreni incoerenti, rocce, ecc.) sia in campo di comportamento lineare che non lineare, caratterizzandone sia la resistenza che la deformabilità.

In caso di modello costitutivo lineare, com'è usuale, è necessario descrivere la deformabilità del suolo mediante un valore di rigidezza costante, che si sceglie solitamente in corrispondenza di un valore secante ad un certo tasso (elevato) di deformazione così da rappresentare la risposta del terreno a valle degli spostamenti manifestati a seguito dell'applicazione dei carichi.

Come tutti gli approcci lineari in ambito geotecnico, quasi sempre usati per via della loro semplicità ma allo stesso tempo quasi sempre poco accurati, a causa della natura peculiare del materiale terreno, soffre della grande incertezza legata proprio alla determinazione di un valore di rigidezza secante che sia, a valle dell'analisi, congruente con l'entità delle deformazioni riscontrate.

Si ricorda che, a differenza degli altri materiali da costruzione, le cui proprietà possono essere definite a priori, il terreno è altamente disomogeneo e anisotropo, risponde in maniera non lineare già da piccole deformazioni, può soffrire di fenomeni quali il creep nel lungo periodo a carico costante, ma può anche incrementare la sua resistenza e rigidezza in seguito all'accumulo di deformazioni plastiche. Da qui l'estrema necessità di valutare per esso il corretto percorso di carico e, quindi, una valutazione non lineare.

Per tutte tali ragioni si è fatto riferimento ad un approccio di calcolo con comportamento costitutivo non lineare del terreno: in tal caso la risposta meccanica del suolo è descritta da un modello iperbolico che, in funzione del procedere dell'analisi, dell'incrementarsi delle sollecitazioni (tensioni) e quindi dei rispettivi spostamenti (deformazioni), è in grado di aggiornare passo-passo, in maniera ricorsiva e iterativa, la propria rigidezza per adattarsi al percorso di carico che si sta imponendo. La deformabilità del terreno, con un siffatto approccio di calcolo, viene descritta mediante valori di rigidezza in valore tangente iniziale, cioè valutati a piccole deformazioni: è poi la legge costitutiva iperbolica adottata a considerarne la variazione a più grandi livelli deformativi.

Il vantaggio di tale approccio non solo sta in tutto quanto sopra detto, quindi in una modellazione più accurata ed attinente la realtà, con minore pericolo di avere errato la definizione delle rigidezze e, quindi, avendo falsato i risultati ottenuti. Il vantaggio sta anche nel fatto che le rigidezze del terreno per piccole deformazioni sono facilmente misurabili dalle indagini geofisiche in sito, che analizzano il terreno nel suo stato naturale, sono facilmente ripetibili, e robuste nella loro interpretazione. È invece ben nota la difficoltà di misurare la deformabilità del terreno per altre vie, soprattutto mediante indagini di laboratorio che soffrono del disturbo arrecato al campione e che, in ogni caso, vanno correlate, come sopra detto, ai livelli deformativi attesi, cosa ben difficile da operarsi all'atto pratico.

Questo programma e modo di analisi è stato utilizzato per qualunque configurazione di pali e di carichi. Per quanto sopra detto, si ritiene che tale modellazione risulti più adatta ad affrontare il tema in esame rispetto al metodo della "ripartizione strutturale", come ben descritto nei paragrafi successivi.

11 ANALISI DELLE PALIFICATE

Nel presente capitolo si riportano i risultati delle analisi delle fondazioni su pali condotte, in campo statico e sismico, con approccio numerico BEM e legame costitutivo del terreno non lineare con il software Repute. I criteri di analisi delle fondazioni su pali sono stati descritti in dettaglio ai capitoli precedenti.

Come sopra detto, Repute opera in regime di modellazione tridimensionale, considerando gli effetti di interazione reciproca tra i pali (effetti di gruppo, in termini di ripartizione del carico, di "ombreggiamento" nel caso di azioni orizzontali e di cedimento).

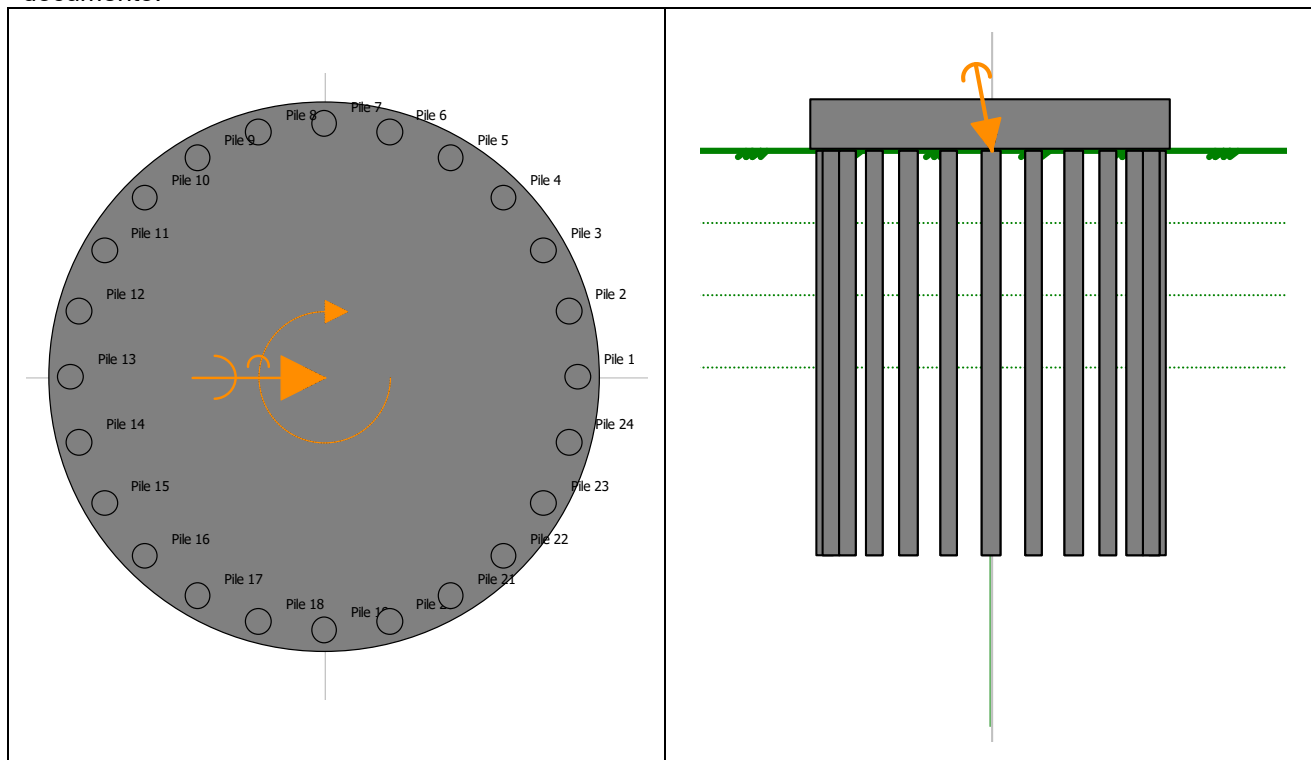
Di seguito viene riportato in forma estesa il calcolo statico per la sola condizione di massima compressione, così da mostrare il modello di calcolo ed i principali risultati dell'analisi Repute.

Successivamente, per le altre condizioni, si riporterà solo un prospetto riepilogativo nel quale si riporteranno:

- Massimi valori di compressione e trazione assiale nei pali;
- Massimi valori delle forze di taglio nei pali;
- Massimi valori dei momenti flettenti nei pali;
- Massimi valori degli spostamenti dei pali.

11.1 Plinto WTG

Di seguito un'immagine del modello di calcolo. La numerazione dei pali fa riferimento solo al presente documento.



Modello di calcolo: pianta e sezioni fondazione

Progettazione:



via Clodoveo Bonazzi, 2
40013 Castel Maggiore (BO)

Relazione di calcolo fondazione
aerogeneratore

Committente:

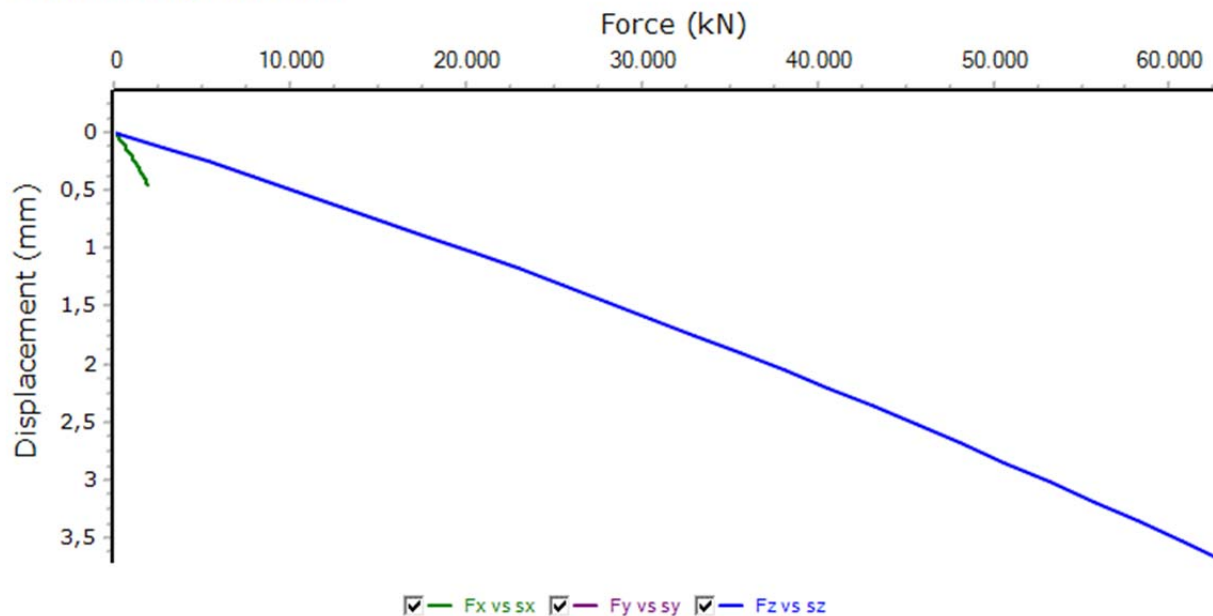


ENERGIA PULITA TRE S.r.l.
via della Chimica, 103
85100 Potenza (PZ)

SLU Fxy Cmb: Condizione di massima compressione

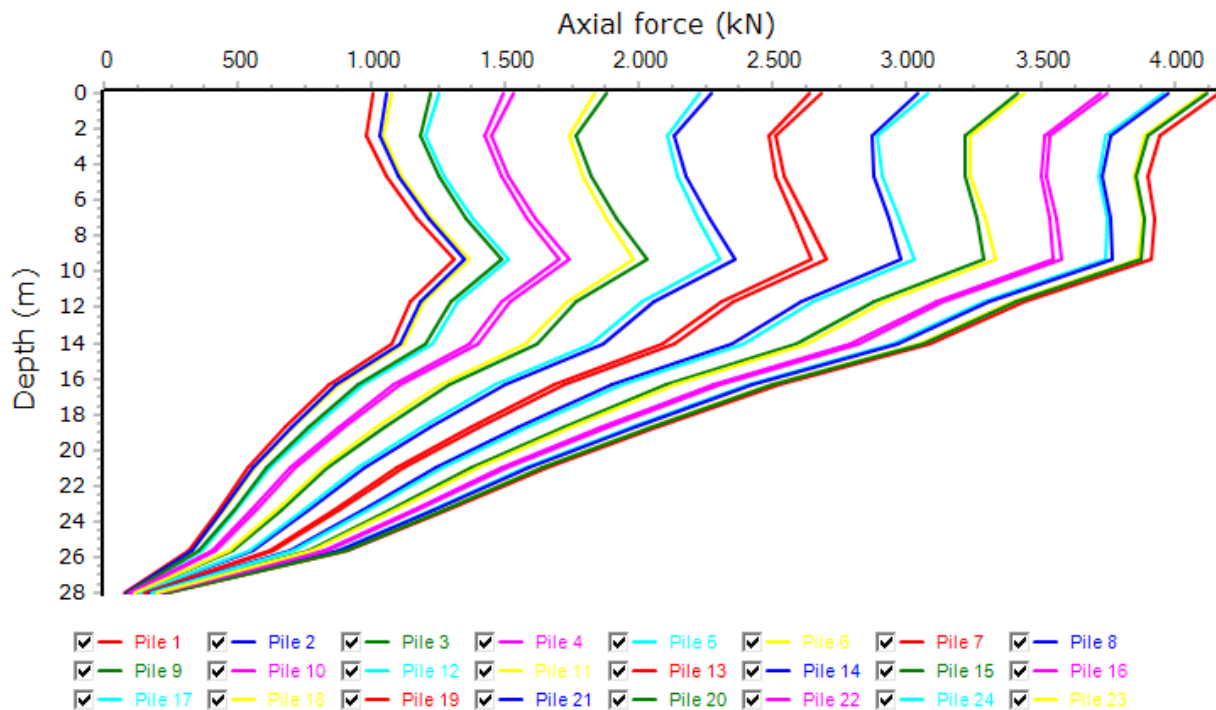
Output: curve sollecitazione/spostamento

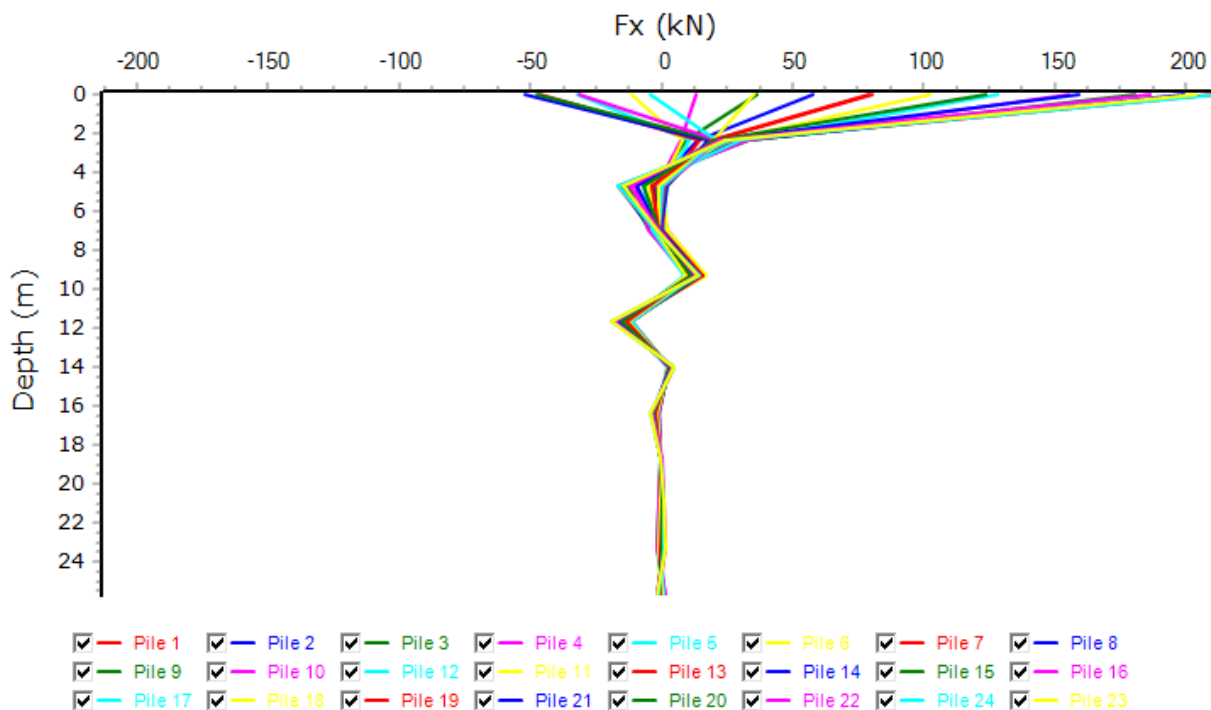
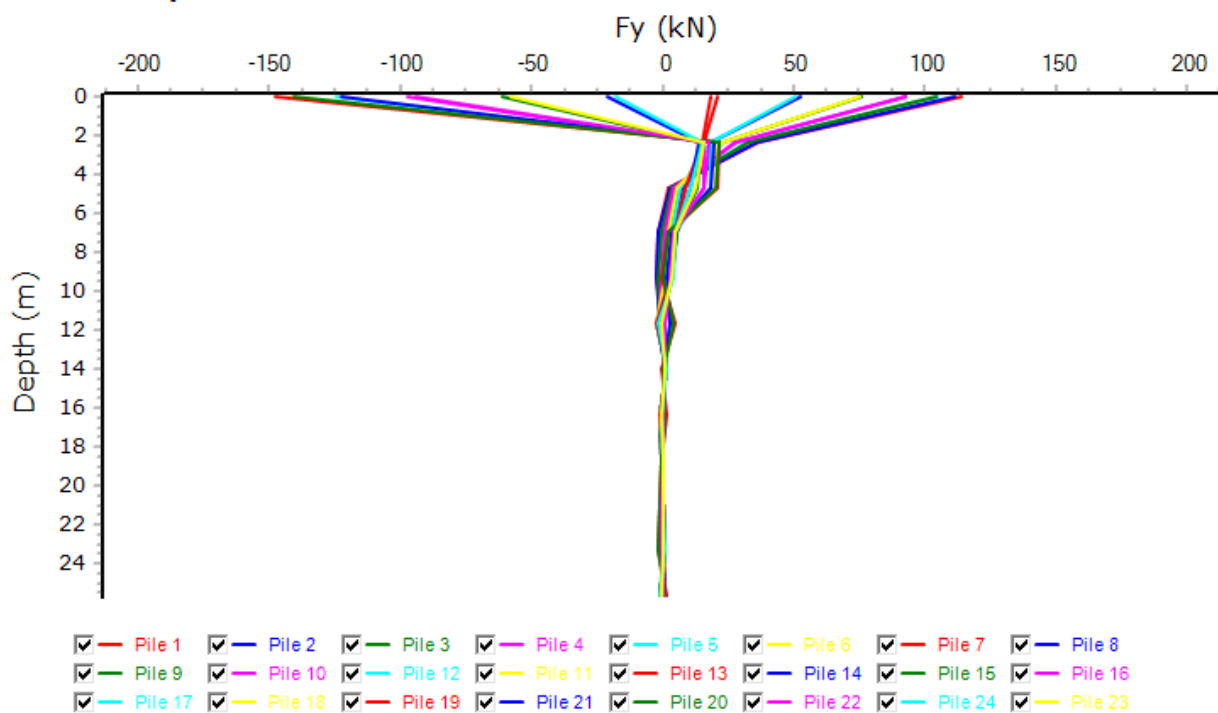
Load vs displacement



Output: Profilo verticale forze assiali pali Fz (SLU)

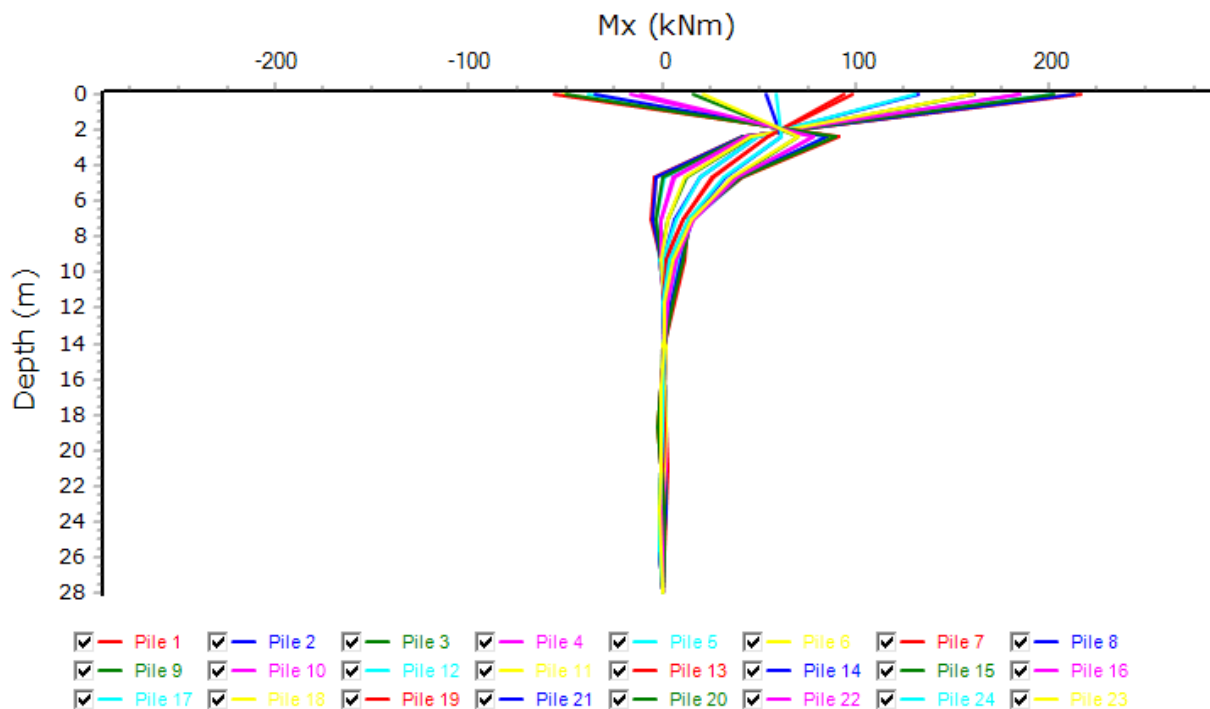
Forces on piles



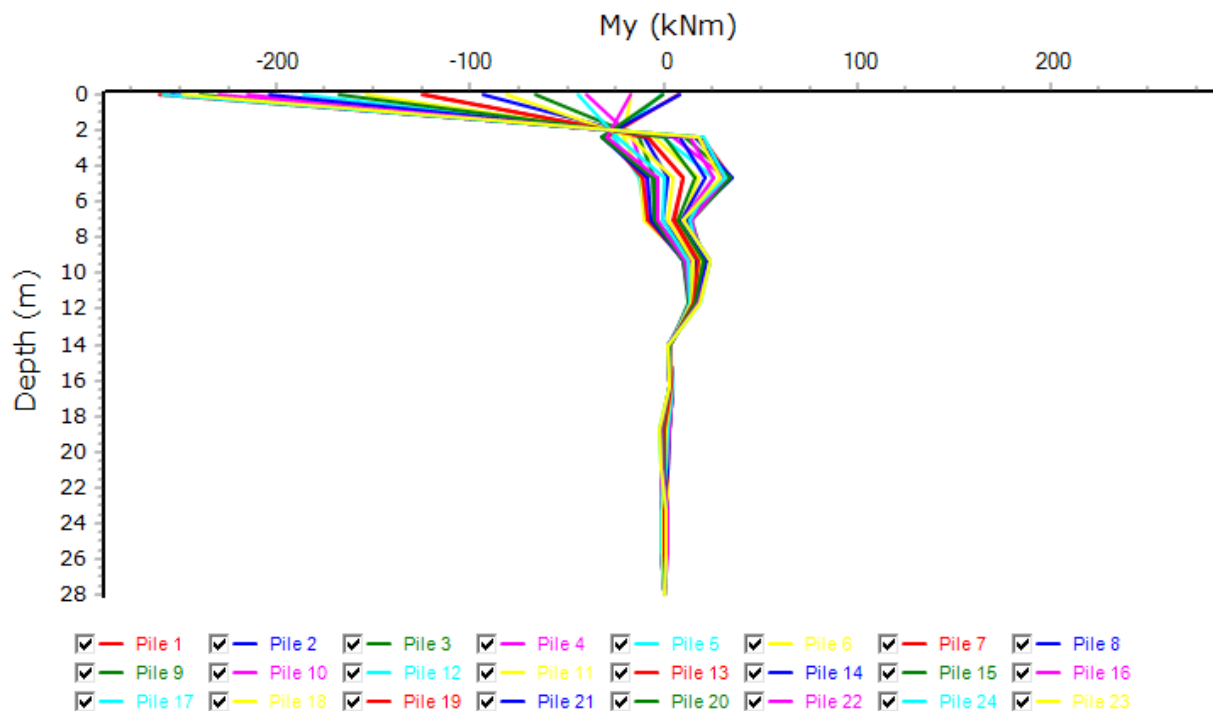
Output: Profili verticali forze orizzontali pali Fx - Fy (SLU)
Forces on piles

Forces on piles


Output: Profili verticali momenti flettenti pali Mx - My (SLU)

Bending moments on piles



Bending moments on piles



Progettazione:

via Clodoveo Bonazzi, 2
40013 Castel Maggiore (BO)

**Relazione di calcolo fondazione
aerogeneratore**

Committente:

ENERGIA PULITA TRE S.r.l.
via della Chimica, 103
85100 Potenza (PZ)

SLU: Condizione Massima compressione

Resulting forces and moments (top of element)					Resulting displacement and rotations (mid-element)			
Location	Forces		Moments		Location	Displacements		Rotations
Depth (m)	Axial force (kN)	Transverse force (kN)	Bending moment (kNm)	Torque (kNm)	Depth (m)	Axial displacement (mm)	Transverse displacement (mm)	Twist (mrad)
- Name : Pile 1								
0,	2679,	211,67	278,36	-0,37	0,	3,72	0,56	0,
- Name : Pile 10								
0,	1489,5	93,41	188,68	-0,33	0,	2,77	0,56	0,
- Name : Pile 11								
0,	1833,7	75,81	161,42	-0,34	0,	3,03	0,56	0,
- Name : Pile 12								
0,	2226,5	60,05	130,5	-0,36	0,	3,33	0,56	0,
- Name : Pile 13								
0,	2638,9	49,82	94,71	-0,37	0,	3,65	0,56	0,
- Name : Pile 14								
0,	3042,9	56,01	54,79	-0,36	0,	3,98	0,56	0,
- Name : Pile 15								
0,	3412,1	77,36	15,85	-0,34	0,	4,29	0,56	0,
- Name : Pile 16								
0,	3722,7	102,1	23,69	-0,33	0,	4,55	0,56	0,
- Name : Pile 17								
0,	3959,8	124,67	58,3	-0,34	0,	4,76	0,56	0,
- Name : Pile 18								
0,	4111,1	146,07	95,83	-0,35	0,	4,89	0,56	0,
- Name : Pile 19								
0,	4166,9	168,07	136,43	-0,34	0,	4,94	0,56	0,
- Name : Pile 2								
0,	2270,7	206,39	286,66	-0,36	0,	3,39	0,56	0,
- Name : Pile 20								
0,	4122,5	187,56	174,93	-0,34	0,	4,91	0,56	0,
- Name : Pile 21								
0,	3979,7	201,11	205,92	-0,34	0,	4,79	0,56	0,
- Name : Pile 22								
0,	3748,2	208,64	229,66	-0,33	0,	4,6	0,56	0,
- Name : Pile 23								
0,	3442,3	212,19	248,93	-0,34	0,	4,34	0,56	0,
- Name : Pile 24								
0,	3078,1	213,02	265,05	-0,36	0,	4,04	0,56	0,
- Name : Pile 3								
0,	1878,8	195,77	288,17	-0,34	0,	3,08	0,56	0,
- Name : Pile 4								
0,	1530,7	181,32	283,45	-0,33	0,	2,82	0,56	0,
- Name : Pile 5								
0,	1253,5	165,82	274,25	-0,34	0,	2,61	0,56	0,
- Name : Pile 6								
0,	1071,8	151,53	262,66	-0,36	0,	2,48	0,56	0,
- Name : Pile 7								
0,	1003,2	138,68	249,11	-0,37	0,	2,43	0,56	0,
- Name : Pile 8								
0,	1054,7	125,61	232,68	-0,36	0,	2,46	0,56	0,
- Name : Pile 9								
0,	1222,	110,57	212,56	-0,34	0,	2,58	0,56	0,
	min 1003,20 min 4166,90	min 49,82 max 213,02	min 15,85 max 288,17	min -0,37 max -0,33		min 2,39 max 4,94	min 0,46 max 0,56	min -0,00 max -0,00

Progettazione:

via Clodoveo Bonazzi, 2
40013 Castel Maggiore (BO)

Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore

Committente:

ENERGIA PULITA TRE S.r.l.
via della Chimica, 103
85100 Potenza (PZ)

SLU Mxy Cmb

Resulting forces and moments (top of element)					Resulting displacement and rotations (mid-element)			
Location	Forces		Moments		Location	Displacements		Rotations
Depth (m)	Axial force (kN)	Transverse force (kN)	Bending moment (kNm)	Torque (kNm)	Depth (m)	Axial displacement (mm)	Transverse displacement (mm)	Twist (mrad)
- Name : Pile 1								
0,	2674,9	216,4	280,38	3,7	0,	3,71	0,55	0,
- Name : Pile 10								
0,	1486,8	108,9	211,68	3,27	0,	2,77	0,55	0,
- Name : Pile 11								
0,	1831,	92,16	184,52	3,38	0,	3,02	0,55	0,
- Name : Pile 12								
0,	2223,7	77,75	153,66	3,62	0,	3,32	0,55	0,
- Name : Pile 13								
0,	2635,9	67,19	117,48	3,7	0,	3,65	0,55	0,
- Name : Pile 14								
0,	3039,7	68,21	76,	3,62	0,	3,97	0,55	0,
- Name : Pile 15								
0,	3408,7	85,07	36,06	3,39	0,	4,28	0,55	0,
- Name : Pile 16								
0,	3719,2	107,63	16,48	3,27	0,	4,54	0,55	0,
- Name : Pile 17								
0,	3956,	128,67	43,9	3,4	0,	4,75	0,55	0,
- Name : Pile 18								
0,	4106,7	147,94	80,33	3,57	0,	4,88	0,55	0,
- Name : Pile 19								
0,	4161,9	169,07	122,81	3,61	0,	4,93	0,55	0,
- Name : Pile 2								
0,	2266,6	212,	291,75	3,62	0,	3,38	0,55	0,
- Name : Pile 20								
0,	4117,1	189,06	164,1	3,55	0,	4,9	0,55	0,
- Name : Pile 21								
0,	3974,6	203,69	198,26	3,39	0,	4,78	0,55	0,
- Name : Pile 22								
0,	3743,6	212,4	225,09	3,28	0,	4,59	0,55	0,
- Name : Pile 23								
0,	3438,1	216,58	246,82	3,39	0,	4,33	0,55	0,
- Name : Pile 24								
0,	3073,9	217,58	264,96	3,62	0,	4,03	0,55	0,
- Name : Pile 3								
0,	1874,8	203,11	296,74	3,38	0,	3,08	0,55	0,
- Name : Pile 4								
0,	1526,8	190,39	295,34	3,27	0,	2,81	0,55	0,
- Name : Pile 5								
0,	1249,8	176,58	289,28	3,38	0,	2,6	0,55	0,
- Name : Pile 6								
0,	1068,2	163,85	280,27	3,62	0,	2,47	0,55	0,
- Name : Pile 7								
0,	999,8	152,41	268,94	3,7	0,	2,42	0,55	0,
- Name : Pile 8								
0,	1051,5	140,27	254,17	3,62	0,	2,46	0,55	0,
- Name : Pile 9								
0,	1219,1	125,72	235,12	3,38	0,	2,57	0,55	0,
	min 999,80 min 4161,90	min 67,19 max 217,58	min 16,48 max 296,74	min 3,27 max 3,70		min 2,39 max 4,93	min 0,44 max 0,55	min 0,00 max 0,00

Progettazione:

via Clodoveo Bonazzi, 2
40013 Castel Maggiore (BO)

Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore

Committente:

ENERGIA PULITA TRE S.r.l.
via della Chimica, 103
85100 Potenza (PZ)

SLU Mz Cmb

Resulting forces and moments (top of element)					Resulting displacement and rotations (mid-element)			
Location	Forces		Moments		Location	Displacements		Rotations
Depth (m)	Axial force (kN)	Transverse force (kN)	Bending moment (kNm)	Torque (kNm)	Depth (m)	Axial displacement t (mm)	Transverse displacement t (mm)	Twist (mrad)
- Name : Pile 1								
0,	2607,4	191,17	226,65	17,22	0,	3,55	0,12	0,02
- Name : Pile 10								
0,	2353,1	168,21	222,61	15,3	0,	3,34	0,12	0,02
- Name : Pile 11								
0,	2425,6	167,86	217,25	15,81	0,	3,4	0,12	0,02
- Name : Pile 12								
0,	2509,4	167,13	209,66	16,87	0,	3,47	0,12	0,02
- Name : Pile 13								
0,	2599,2	164,75	199,89	17,22	0,	3,54	0,12	0,02
- Name : Pile 14								
0,	2689,7	161,86	190,34	16,87	0,	3,61	0,12	0,02
- Name : Pile 15								
0,	2774,5	162,77	185,49	15,81	0,	3,68	0,12	0,02
- Name : Pile 16								
0,	2846,9	167,32	185,29	15,3	0,	3,74	0,12	0,02
- Name : Pile 17								
0,	2902,1	172,33	186,02	15,81	0,	3,78	0,12	0,02
- Name : Pile 18								
0,	2936,3	175,29	185,55	16,87	0,	3,81	0,12	0,02
- Name : Pile 19								
0,	2948,2	176,11	185,09	17,22	0,	3,82	0,12	0,02
- Name : Pile 2								
0,	2517,2	188,54	230,52	16,87	0,	3,48	0,12	0,02
- Name : Pile 20								
0,	2938,2	177,45	188,12	16,87	0,	3,81	0,12	0,02
- Name : Pile 21								
0,	2906,1	181,78	197,	15,81	0,	3,79	0,12	0,02
- Name : Pile 22								
0,	2853,	186,99	207,8	15,3	0,	3,74	0,12	0,02
- Name : Pile 23								
0,	2782,1	190,89	216,66	15,81	0,	3,69	0,12	0,02
- Name : Pile 24								
0,	2698,	192,33	222,68	16,87	0,	3,62	0,12	0,02
- Name : Pile 3								
0,	2433,1	187,	235,7	15,81	0,	3,41	0,12	0,02
- Name : Pile 4								
0,	2359,9	186,46	240,48	15,3	0,	3,35	0,12	0,02
- Name : Pile 5								
0,	2302,6	185,76	242,78	15,81	0,	3,31	0,12	0,02
- Name : Pile 6								
0,	2265,2	184,09	241,93	16,87	0,	3,28	0,12	0,02
- Name : Pile 7								
0,	2251,1	180,57	238,32	17,22	0,	3,27	0,12	0,02
- Name : Pile 8								
0,	2262,1	175,06	232,72	16,87	0,	3,27	0,12	0,02
- Name : Pile 9								
0,	2297,2	170,16	227,12	15,81	0,	3,3	0,12	0,02
min 2251,10 min 161,86 min 185,09 min 15,30					min 3,19 min 0,10 min 0,01			
##### max 192,33 max 242,78 max 17,22					max 3,82 max 0,30 max 0,02			

Progettazione:

via Clodoveo Bonazzi, 2
40013 Castel Maggiore (BO)

**Relazione di calcolo fondazione
aerogeneratore**

Committente:

ENERGIA PULITA TRE S.r.l.
via della Chimica, 103
85100 Potenza (PZ)

SLE QP - comb

Resulting forces and moments (top of element)						Resulting displacement and rotations (mid-element)				
Location	Forces		Moments		Location	Displacements		Rotations		
Depth (m)	Axial force (kN)	Transverse force (kN)	Bending moment (kNm)	Torque (kNm)	Depth (m)	Axial displacement (mm)	Transverse displacement (mm)	Twist (mrad)		
-	Name : Pile 1									
	0,	2049,1	146,81	173,83	2,96	0,	2,7	0,26	0,	
-	Name : Pile 10									
	0,	1500,8	83,7	129,24	2,62	0,	2,28	0,26	0,	
-	Name : Pile 11									
	0,	1656,7	76,03	113,19	2,71	0,	2,39	0,26	0,	
-	Name : Pile 12									
	0,	1837,	70,48	95,26	2,89	0,	2,53	0,26	0,	
-	Name : Pile 13									
	0,	2029,1	67,33	75,71	2,96	0,	2,67	0,26	0,	
-	Name : Pile 14									
	0,	2220,1	68,54	56,98	2,89	0,	2,81	0,26	0,	
-	Name : Pile 15									
	0,	2396,9	75,49	45,56	2,71	0,	2,95	0,26	0,	
-	Name : Pile 16									
	0,	2547,4	85,96	45,7	2,62	0,	3,07	0,26	0,	
-	Name : Pile 17									
	0,	2662,5	97,12	54,49	2,71	0,	3,16	0,26	0,	
-	Name : Pile 18									
	0,	2734,9	107,54	68,31	2,89	0,	3,22	0,26	0,	
-	Name : Pile 19									
	0,	2761,1	117,89	86,5	2,96	0,	3,24	0,26	0,	
-	Name : Pile 2									
	0,	1857,7	144,13	179,88	2,89	0,	2,55	0,26	0,	
-	Name : Pile 20									
	0,	2740,3	127,49	106,55	2,89	0,	3,22	0,26	0,	
-	Name : Pile 21									
	0,	2672,6	135,38	125,64	2,71	0,	3,17	0,26	0,	
-	Name : Pile 22									
	0,	2561,2	141,25	141,96	2,62	0,	3,09	0,26	0,	
-	Name : Pile 23									
	0,	2413,5	145,05	154,96	2,71	0,	2,97	0,26	0,	
-	Name : Pile 24									
	0,	2238,7	147,03	165,41	2,89	0,	2,84	0,26	0,	
-	Name : Pile 3									
	0,	1676,8	138,84	182,57	2,71	0,	2,42	0,26	0,	
-	Name : Pile 4									
	0,	1518,6	131,54	181,75	2,62	0,	2,3	0,26	0,	
-	Name : Pile 5									
	0,	1394,4	124,04	178,12	2,71	0,	2,21	0,26	0,	
-	Name : Pile 6									
	0,	1313,9	117,06	172,49	2,89	0,	2,15	0,26	0,	
-	Name : Pile 7									
	0,	1283,8	110,16	165,12	2,96	0,	2,13	0,26	0,	
-	Name : Pile 8									
	0,	1306,8	102,2	155,57	2,89	0,	2,14	0,26	0,	
-	Name : Pile 9									
	0,	1381,1	92,92	143,45	2,71	0,	2,2	0,26	0,	
min 1283,80 max 2761,10						min 2,09 max 3,24			min 0,19 max 0,26	
min 45,56 max 182,57						min 2,62 max 2,96			min 0,00 max 0,00	

Progettazione:

via Clodoveo Bonazzi, 2
40013 Castel Maggiore (BO)

**Relazione di calcolo fondazione
aerogeneratore**

Committente:

ENERGIA PULITA TRE S.r.l.
via della Chimica, 103
85100 Potenza (PZ)

SLE CAR Mxy comb

Resulting forces and moments (top of element)					Resulting displacement and rotations (mid-element)			
Location	Forces		Moments		Location	Displacements		Rotations
Depth (m)	Axial force (kN)	Transverse force (kN)	Bending moment (kNm)	Torque (kNm)	Depth (m)	Axial displacement (mm)	Transverse displacement (mm)	Twist (mrad)
- Name : Pile 1								
0,	2041,1	143,95	174,47	0,32	0,	2,69	0,29	0,
- Name : Pile 10								
0,	1375,6	72,22	121,4	0,28	0,	2,19	0,29	0,
- Name : Pile 11								
0,	1566,2	64,08	104,46	0,29	0,	2,33	0,29	0,
- Name : Pile 12								
0,	1786,1	58,31	85,32	0,31	0,	2,49	0,29	0,
- Name : Pile 13								
0,	2019,6	55,72	63,87	0,32	0,	2,66	0,29	0,
- Name : Pile 14								
0,	2251,1	58,8	42,03	0,31	0,	2,84	0,29	0,
- Name : Pile 15								
0,	2464,6	68,04	26,71	0,29	0,	3,	0,29	0,
- Name : Pile 16								
0,	2645,8	80,51	28,73	0,28	0,	3,14	0,29	0,
- Name : Pile 17								
0,	2784,2	93,21	43,29	0,29	0,	3,25	0,29	0,
- Name : Pile 18								
0,	2871,1	105,15	62,42	0,31	0,	3,32	0,29	0,
- Name : Pile 19								
0,	2902,4	116,68	84,23	0,32	0,	3,35	0,29	0,
- Name : Pile 2								
0,	1808,6	140,35	179,92	0,31	0,	2,52	0,29	0,
- Name : Pile 20								
0,	2876,8	126,7	106,01	0,31	0,	3,33	0,29	0,
- Name : Pile 21								
0,	2794,8	134,6	125,7	0,29	0,	3,27	0,29	0,
- Name : Pile 22								
0,	2660,4	140,01	142,17	0,28	0,	3,16	0,29	0,
- Name : Pile 23								
0,	2482,	143,27	155,34	0,29	0,	3,03	0,29	0,
- Name : Pile 24								
0,	2270,7	144,67	166,02	0,31	0,	2,87	0,29	0,
- Name : Pile 3								
0,	1588,3	133,5	181,44	0,29	0,	2,35	0,29	0,
- Name : Pile 4								
0,	1395,2	124,65	179,16	0,28	0,	2,21	0,29	0,
- Name : Pile 5								
0,	1243,5	115,58	174,33	0,29	0,	2,1	0,29	0,
- Name : Pile 6								
0,	1145,3	107,44	167,73	0,31	0,	2,03	0,29	0,
- Name : Pile 7								
0,	1108,8	99,76	159,63	0,32	0,	2,	0,29	0,
- Name : Pile 8								
0,	1137,4	91,37	149,32	0,31	0,	2,02	0,29	0,
- Name : Pile 9								
0,	1228,8	81,83	136,52	0,29	0,	2,09	0,29	0,
	min 1108,80 max 2902,40	min 55,72 max 144,67	min 26,71 max 181,44	min 0,28 max 0,32		min 1,97 max 3,35	min 0,23 max 0,29	min 0,00 max 0,00

Progettazione:

via Clodoveo Bonazzi, 2
40013 Castel Maggiore (BO)



**Relazione di calcolo fondazione
aerogeneratore**

Committente:

ENERGIA PULITA TRE S.r.l.
via della Chimica, 103
85100 Potenza (PZ)



SLE CAR Fxy comb

Resulting forces and moments (top of element)					Resulting displacement and rotations (mid-element)			
Location	Forces		Moments		Location	Displacements		Rotations
Depth (m)	Axial force (kN)	Transverse force (kN)	Bending moment (kNm)	Torque (kNm)	Depth (m)	Axial displacement (mm)	Transverse displacement (mm)	Twist (mrad)
- Name : Pile 1								
0,	2031,	149,99	181,55	0,52	0,	2,67	0,3	0,
- Name : Pile 10								
0,	1468,6	71,74	115,12	0,46	0,	2,24	0,3	0,
- Name : Pile 11								
0,	1627,	60,72	96,16	0,48	0,	2,36	0,3	0,
- Name : Pile 12								
0,	1810,5	51,99	75,06	0,51	0,	2,49	0,3	0,
- Name : Pile 13								
0,	2006,	47,46	51,76	0,52	0,	2,64	0,3	0,
- Name : Pile 14								
0,	2200,5	50,73	28,49	0,51	0,	2,78	0,3	0,
- Name : Pile 15								
0,	2380,6	61,65	17,86	0,48	0,	2,92	0,3	0,
- Name : Pile 16								
0,	2533,8	76,08	32,48	0,46	0,	3,04	0,3	0,
- Name : Pile 17								
0,	2651,2	90,72	52,61	0,48	0,	3,13	0,3	0,
- Name : Pile 18								
0,	2725,5	104,52	73,86	0,51	0,	3,19	0,3	0,
- Name : Pile 19								
0,	2752,8	117,36	95,76	0,52	0,	3,22	0,3	0,
- Name : Pile 2								
0,	1836,4	146,65	185,76	0,51	0,	2,53	0,3	0,
- Name : Pile 20								
0,	2732,2	128,29	116,98	0,51	0,	3,2	0,3	0,
- Name : Pile 21								
0,	2663,9	137,1	136,12	0,48	0,	3,15	0,3	0,
- Name : Pile 22								
0,	2551,1	143,64	152,07	0,46	0,	3,07	0,3	0,
- Name : Pile 23								
0,	2401,1	148,	164,55	0,48	0,	2,95	0,3	0,
- Name : Pile 24								
0,	2223,6	150,18	174,25	0,51	0,	2,82	0,3	0,
- Name : Pile 3								
0,	1652,2	140,01	185,96	0,48	0,	2,39	0,3	0,
- Name : Pile 4								
0,	1490,8	131,19	182,44	0,46	0,	2,27	0,3	0,
- Name : Pile 5								
0,	1363,9	121,8	176,07	0,48	0,	2,18	0,3	0,
- Name : Pile 6								
0,	1281,3	112,98	167,9	0,51	0,	2,11	0,3	0,
- Name : Pile 7								
0,	1249,8	104,37	158,15	0,52	0,	2,09	0,3	0,
- Name : Pile 8								
0,	1272,4	94,8	146,26	0,51	0,	2,11	0,3	0,
- Name : Pile 9								
0,	1347,3	83,63	131,87	0,48	0,	2,16	0,3	0,
	min 1249,80 max 2752,80	min 47,46 max 150,18	min 17,86 max 185,96	min 0,46 max 0,52		min 2,05 max 3,22	min 0,26 max 0,30	min 0,00 max 0,00

Progettazione:  via Clodoveo Bonazzi, 2 40013 Castel Maggiore (BO)	Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore	Committente:  ENERGIA PULITA TRE S.r.l. via della Chimica, 103 85100 Potenza (PZ)
--	---	--

Si riscontrano, in ultima analisi, i seguenti valori massimi, cui si farà poi riferimento nella conduzione delle verifiche geotecniche dei pali di fondazione.

	SLU
Sforzo assiale di compressione [kN]	4166
Sforzo di taglio [KN]	218
Momento Flettente [kNm]	297

Progettazione:  via Clodoveo Bonazzi, 2 40013 Castel Maggiore (BO)	Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore	Committente:  ENERGIA PULITA TRE S.r.l. via della Chimica, 103 85100 Potenza (PZ)
--	---	--

12 CALCOLO DELLA CAPACITÀ PORTANTE ULTIMA DEI PALI

Si valuta la resistenza geotecnica assiale (capacità portante) limite dei pali. Si valuteranno, separatamente, la resistenza per attrito sulla superficie laterale dei pali e la resistenza alla punta.

Le valutazioni vengono operate in accordo con la modellazione geotecnica riportata al documento /10/ e qui ripresa al capitolo 6.

Per quanto riguarda i criteri di calcolo adottati si faccia riferimento a quanto descritto al capitolo 9.

Caratteristiche palo di fondazione:



Diametro palo (m) =	1,20	γ_{cls} (kN/mc) =	25	Livello falda per il palo (m) =	50,00
Tratto infisso in fondazione (m) =	0,00	Peso palo (kN) =	791,68	Sottospinta idraulica (kN) =	0,00
Lunghezza effettiva palo (m) =	28,00	Area palo (m ²) =	1,1310	Area punta palo (m ²) =	1,1310
Lunghezza compresa trivellazione vuoto =	28,00				

CARATTERISTICHE LITOLOGICHE E GEOTECNICHE.												
Inizio strato	Fine strato	Lungh. strato	Angolo attrito ϕ	Coesione Cu	Peso specifico	pres.base strato	press.metà strato	k	α	tens. laterale	A laterale	Portata laterale
m	m	m	gradi	kPa	kN/mc	kN/m ²	kN/m ²			kPa	m ²	kN
0,0	1,0	1,00	0	0	18	18,0	9	0,00	0,00	0	3,77	0,0
1,0	3,0	2,00	0	50	18	54,0	36	0,00	0,60	30	7,54	226,2
3,0	8,0	5,00	0	110	18	144,0	99	0,00	0,40	44	18,85	829,4
8,0	13,0	5,00	0	150	18	234,0	189	0,00	0,40	60	18,85	1131,0
13,0	16,0	3,00	0	200	18	288,0	261	0,00	0,40	80	11,31	904,8
16,0	19,0	3,00	0	220	18	342,0	315	0,00	0,40	88	11,31	995,3
19,0	23,0	4,00	0	240	18	414,0	378	0,00	0,40	96	15,08	1447,6
23,0	28,0	5,00	0	260	18	504,0	459	0,00	0,40	104	18,85	1960,4
Press. totale base qv =						504				R laterale totale =		
												7494,6

Portata alla punta per terreni COESIVI				
Dati input	Formula		qb (MPa)	Rp (kN)
Nc = 9	R punta = A x (Cu x Nc + σ_v)		2,84	3216,5

Si considera:

- Resistenza per attrito laterale: **R_{lat} = 7495 kN**
- Resistenza alla punta: **R_{pta} = 3215 kN**

Progettazione:  via Clodoveo Bonazzi, 2 40013 Castel Maggiore (BO)	Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore	Committente:  ENERGIA PULITA TRE S.r.l. via della Chimica, 103 85100 Potenza (PZ)
--	---	--

13 VERIFICHE DI CAPACITÀ PORTANTE ASSIALE

Dopo aver determinato i valori ultimi di capacità portante (capitolo 12), applicando i metodi di calcolo di cui al capitolo 9, ed una volta note le massime sollecitazioni afferenti il palo più sollecitato del gruppo, in condizioni statiche (capitolo 11), si procede, in questo capitolo, con le verifiche geotecniche di capacità portante assiale applicando la procedura per determinare il valore di progetto della resistenza assiale dei pali di fondazione riportata nelle NTC2018 /1/ al § 6.4.3.1.1.

La verifica sarà condotta facendo riferimento all'approccio progettuale 2.

Verifica in campo statico – SLU

CALCOLO DELLA RESISTENZA DI PROGETTO DI UN PALO DI FONDAZIONE.

APPROCCIO 2



<i>Azione agente sulla testa del palo:</i>		Ed,compr	Ed,traz.
<i>Combin. 1: A1 + M1 + R3</i>	A1 [kN]	4166	0

<i>Caratteristiche palo:</i>			
Diam. testa[m]	1,2	Peso palo:	791,68 kN
Lungh.: [m]	28	Profondità falda=	50,0 m
		Event. attrito neg =	0 kN

<i>Azione agente sul palo con peso proprio:</i>		Ed,compr	Ed,traz.
<i>Combin. 1: A1 + M1 + R3</i>	A1 [kN]	5195,2	0,0

Tipo palo:	Coefficienti di sicurezza parziali γ_R		
Trivellato	Base γ_b	Lat. com. γ_s	Lat. traz. γ_{st}
R3	1,35	1,15	1,25

Fattori di correlazione	
Nro prove:	1
ξ_3	ξ_4
1,70	1,7

Progettazione:  via Clodoveo Bonazzi, 2 40013 Castel Maggiore (BO)	Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore	Committente:  ENERGIA PULITA TRE S.r.l. via della Chimica, 103 85100 Potenza (PZ)
--	---	--

Risultati di capacità portante forniti da ogni prova:

Nro prova	1	2	3	4	5
Rpunta	3215	0	0	0	0
Rlat,comp	7495	0	0	0	0
Rlat,traz	7495	0	0	0	0
Totali	10710	0	0	0	0

	Valor medio	Valor minimo
Rpunta	3215,0	3215
Rlat,comp	7495,0	7495
Rlat,traz	7495,0	7495
Totali	10710,0	10710

Calcolo valore caratteristico resistenza comp.

$$R_{punta,k} = \text{Min} (R_{p,med}/\xi_3; R_{p,min}/\xi_4) = [\text{kN}]$$

$$R_{lat,c,k} = \text{Min} (R_{l,c,md}/\xi_3; R_{l,c,min}/\xi_4) = [\text{kN}]$$

$$R_{compr,k} = \text{Min} (R_{c,md}/\xi_3; R_{c,min}/\xi_4) = [\text{kN}]$$

Rmed/ ξ_3	Rmin/ ξ_4	Valore minimo	
1891,18	1891,18	1891,18	
4408,82	4408,82	4408,82	
6300,00	6300,00	6300,00	Totale

Calcolo valore caratteristico resistenza traz.

$$R_{lat,t,k} = \text{Min} (R_{l,t,md}/\xi_3; R_{l,t,min}/\xi_4) = [\text{kN}]$$

Rmed/ ξ_3	Rmin/ ξ_4	Valore minimo
4408,82	4408,82	4408,82

Resistenza di progetto del palo:

Combinazione 1	Rp, k/ γ_b	RI, c, k/ γ_s	RI, t, k/ γ_{st}	Totale		
Compress.	Rc,d [kN]	1400,87	3833,76	5234,6	>	5195,2 kN
Trazione	RI,d [kN]		3527,06	3527,1	>	0,0 kN

VERIFICA SODDISFATTA

La verifica è soddisfatta.

14 CAPACITÀ PORTANTE PALI ALLE AZIONI ORIZZONTALI

Si valuta di seguito la resistenza geotecnica (capacità portante) limite dei pali nei confronti delle azioni trasversali.

Nel caso di pali di fondazione verticali soggetti ad azioni orizzontali all'estremità superiore l'entità della portata geotecnica limite sopportabile dal complesso palo-terreno può essere valutato impiegando la classica teoria di Broms (1964, /34/ /35/).

PALO DI FONDAZIONE SOGGETTO A CARICHI ORIZZONTALI**Palo in terreno coesivo vincolato in testa**

(Teoria di Broms, 1964)

Caratteristiche del terrenoCoesione non drenata: $c_u = 50,0$ kPaPeso specifico terreno: $\gamma = 18,0$ kN/m³**Caratteristiche del palo di fondazione**Lunghezza: $L = 28,00$ mDiametro: $d = 1,20$ mSnellezza: $L/d = 23,33333$ Momento di plasticizzazione: $M_y = 1355,0$ kNm**Carico applicato**Carico: $H_{Sd} = 218$ kN**Meccanismo di palo corto**

Azione orizzontale massima:

$$H_{pal\,q\,corto} = c_u d^2 9 \left(\frac{L}{d} - 1,5 \right) = 14148 \text{ kN}$$

Momento flettente massimo:

$$M_{max} = c_u d^3 \left[4,5 \left(\frac{L}{d} \right)^2 - 10,125 \right] = 210805 \text{ kNm}$$

Meccanismo di palo intermedio

$$H_{pal\,int\,medio} = c_u d^2 \left[-9 \left(\frac{L}{d} + 1,5 \right) + 9 \sqrt{2 \left(\frac{L}{d} \right)^2 + \frac{4}{9} \frac{M_y}{c_u d^3} + 4,5} \right] = 5403 \text{ kN}$$

Meccanismo di palo lungo

$$H_{pal\,o\,lungo} = c_u d^2 \left[-13,5 + \sqrt{18225 + 36 \frac{M_y}{c_u d^3}} \right] = 996 \text{ kN}$$

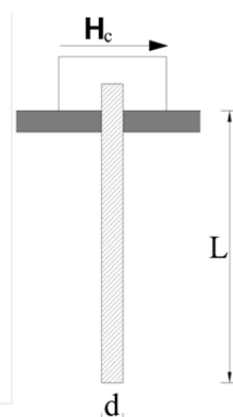
In condizioni di rottura si rileva il superamento del momento di plasticizzazione

Il meccanismo di rottura corrisponde a quello di palo lungo

Carico critico orizzontale e fattore di sicurezza

Il carico di rottura ha un valore pari a:



$$H_c = 996 \text{ kN}$$



Si ricava una resistenza limite orizzontale di:

$$H_{lim} = 996 \text{ kN}$$

Si esegue la verifica geotecnica di capacità portante trasversale dei pali facendo riferimento ai criteri di verifica descritti al § 6.4.3.1.2 delle NTC2018 /1/ ed ai valori limite di resistenza come sopra valutati.

Progettazione:  via Clodoveo Bonazzi, 2 40013 Castel Maggiore (BO)	Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore	Committente:  ENERGIA PULITA TRE S.r.l. via della Chimica, 103 85100 Potenza (PZ)
--	---	--

APPROCCIO 2

Azione agente sulla testa del palo:

Combin. 1:	Taglio Tsd (kN)
A1 + M1 + R3	218

Caratteristiche palo:

Diam. [m]	1,2	Profondità falda=	50,0	m
Lungh.: [m]	28	Event. attrito neg =	0	kN

Fattori di correlazione

Nro prove:	1
ξ_3	ξ_4
1,7	1,7

Nro prova	1	2	3	4	5
Carico critico orizzontale	996	0	0	0	0

min dei min
996

	medio	Valor minimo
Rtr,calc	996,0	996

Calcolo valore caratteristico della resistenza.



	Rmed/ ξ_3	Rmin/ ξ_4	Valore minimo
Rtr,d = Min (Rc,md/ ξ_3 ; Rc,min/ ξ_4) = [kN]	585,88	585,88	585,88

Resistenza di progetto del palo:

Approccio 2	Rtr,k/ γ_t	Tsd (kN)
Verifica	450,68	218,0

VERIFICA SODDISFATTA

La verifica è soddisfatta.

Progettazione:  via Clodoveo Bonazzi, 2 40013 Castel Maggiore (BO)	Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore	Committente:  ENERGIA PULITA TRE S.r.l. via della Chimica, 103 85100 Potenza (PZ)
--	---	--

15 VERIFICA DEL CEDIMENTO DELLE FONDAZIONI

Questo capitolo concerne le verifiche della funzionalità delle opere in progetto, quindi in particolar modo del cedimento delle fondazioni su pali.

In accordo con quanto usualmente definito per aerogeneratori con le caratteristiche di quelle che si prevede di installare nell'impianto in oggetto, le fondazioni devono garantire delle prestazioni che siano coerenti con le assunzioni fatte durante la modellazione della torre e il calcolo dei carichi alla base delle turbine eoliche. Tali prestazioni sono:

- **Cedimenti:** al fine di assicurare un ottimale comportamento della turbina eolica, il cedimento differenziale della fondazione non deve eccedere il limite di **3mm/m**.
- **Rigidezza rotazionale:** la rigidezza del sistema terreno-fondazione può avere una grande influenza sul comportamento dinamico della turbina e, di conseguenza sugli sforzi interni che si trasmettono attraverso la struttura. Per tale motivo, la fondazione deve assicurare un minimo di rigidezza rotazionale (relazione tra il momento applicato e la rotazione risultante alla base della torre):
 - o Condizione di carico quasi-permanente: la rigidezza rotazionale deve essere **$\geq 110 \text{ GN m/rad}$** . In aggiunta, la rigidezza orizzontale (relazione tra la forza applicata orizzontale e lo spostamento risultante alla base della torre) deve essere **$\geq 500 \text{ MN/m}$** .
 - o Condizione di carico SLU "Extreme Loads": la rigidezza rotazionale deve essere **$\geq 28 \text{ GN m/rad}$** .

Il cedimento delle fondazioni su pali è stato valutato con approccio numerico agli elementi di contorno (BEM) mediante analisi svolte con software Repute, i cui risultati inerenti sollecitazioni e spostamenti sui singoli pali del gruppo sono stati riportati e riepilogati al capitolo 11.

Repute fornisce i risultati inerenti sia il singolo palo che la palificata nel suo complesso: entrambi tali riscontri sono comprensivi degli effetti di interazione reciproca tra i pali (effetti di gruppo).

Si riepilogano nei seguenti tabulati di output di Repute, i risultati in termini di cedimento e rotazione della palificata per le diverse condizioni di carico, esplicitando anche i cedimenti differenziali e le rigidezze, rotazionali e traslazionali, che si ottengono di conseguenza.

SLU

Fxy Comb

Actions						Effects of Actions					
Forces			Moments			Displacements			Rotations		
Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)	Mx (kNm)	My (kNm)	Mz (kNm)	sx (mm)	sy (mm)	sz (mm)	thetax (mrad)	thetay (mrad)	thetaz (mrad)
1941,	0,	62939,2	219065,7	0,	128,	0,46	-0,33	3,68	-0,11	0,	0,

Momento alla base **219066 kNm**

Rotazione **0,11 mrad**

Rigidezza rotazionale **1991,51 GNm/rad** > **28 GN/rad**



Mxy Comb

Actions						Effects of Actions					
Forces			Moments			Displacements			Rotations		
Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)	Mx (kNm)	My (kNm)	Mz (kNm)	sx (mm)	sy (mm)	sz (mm)	thetax (mrad)	thetay (mrad)	thetaz (mrad)
1874,	0,	62848,4	218961,6	0,	3747,	0,45	-0,33	3,68	-0,11	0,	0,

Momento alla base **218961 kNm**

Rotazione **0,11 mrad**

Rigidezza rotazionale **1990,55 GNm/rad** > **28 GNm/rad**

Progettazione:  via Clodoveo Bonazzi, 2 40013 Castel Maggiore (BO)	Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore	Committente:  ENERGIA PULITA TRE S.r.l. via della Chimica, 103 85100 Potenza (PZ)
--	---	--

SLE

SLE QP Comb

Actions						Effects of Actions					
Forces			Moments			Displacements			Rotations		
Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)	Mx (kNm)	My (kNm)	Mz (kNm)	sx (mm)	sy (mm)	sz (mm)	thetax (mrad)	thetay (mrad)	thetaz (mrad)
960,4	0,	48755,2	102531,2	0,	2864,4	0,22	-0,14	2,68	-0,05	0,	0,

Rigidezza rotazionale

Momento alla base	102531 kNm		
Rotazione fondazione	0,05 mrad		
rigidezza rotazionale	2050,62 GNm/rad	>	110 GNm/rad

Rigidezza orizzontale

Forza alla base	961 kN		
Spostamento orizzontale fondazione	0,22 mm		
rigidezza rotazionale	4368 MN/m	>	500 MN/m

Cedimento differenziale

angolo rotazione fondazione	0,05 mrad	Cedimento assoluto
cedimento differenziale	0,05000 mm/m	2,68 mm

SLE CAR Fxy

Actions						Effects of Actions					
Forces			Moments			Displacements			Rotations		
Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)	Mx (kNm)	My (kNm)	Mz (kNm)	sx (mm)	sy (mm)	sz (mm)	thetax (mrad)	thetay (mrad)	thetaz (mrad)
1200,	0,	48253,6	104312,1	0,	624,	0,27	-0,14	2,65	-0,05	0,	0,



fx _y	Angolo rotazione fondazione =	0,05 mrad
	Cedimento differenziale =	0,05000 mm/m
	Cedimento assoluto =	2,65 mm

SLE CAR Mxy

Actions						Effects of Actions					
Forces			Moments			Displacements			Rotations		
Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)	Mx (kNm)	My (kNm)	Mz (kNm)	sx (mm)	sy (mm)	sz (mm)	thetax (mrad)	thetay (mrad)	thetaz (mrad)
1035,	0,	48448,5	124454,3	0,	444,	0,23	-0,17	2,68	-0,06	0,	0,

Mxy cmb	Angolo rotazione fondazione =	0,06 mrad
	Cedimento differenziale =	0,06000 mm/m
	Cedimento assoluto =	2,67 mm

I valori sono ampiamente compatibili con la funzionalità dell'opera in progetto e con le prestazioni minime richieste.

Progettazione:  via Clodoveo Bonazzi, 2 40013 Castel Maggiore (BO)	Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore	Committente:  ENERGIA PULITA TRE S.r.l. via della Chimica, 103 85100 Potenza (PZ)
--	---	--

16 ANALISI DI STABILITÀ DEI VERSANTI

Sono state condotte delle analisi di stabilità dei versanti nello stato di progetto in cui si prevede la costruzione di quanto in oggetto.

Lo scopo è mostrare come la costruzione delle stesse non abbia una influenza negativa sulla sicurezza e stabilità dei luoghi;

Tali analisi sono state condotte con il software SSAP2010 (descritto al paragrafo successivo) impiegando il metodo dell'equilibrio limite.

Valgono le parametrizzazioni sismiche di cui al precedente capitolo e la parametrizzazione geotecnica di cui ai precedenti capitoli 6 e 7.

16.1 Codice SSAP2010

Il Programma SSAP 2010 è un software che nasce dall'attività di ricerca svolta nello sviluppo di algoritmi che consentono di ottenere una ottimale modellizzazione della configurazione geomeccanica e litostratigrafica dei pendii in terreni sciolti, quindi specifico per l'analisi di stabilità di pendii e fronti di scavo.

Il primo passo nell'analisi della stabilità di un pendio naturale o di opere in terra è fissare e definire una corretta caratterizzazione geolitologica dell'area; in tale fase è necessario tener conto delle eventuali disomogeneità presenti nella massa del pendio, in particolar modo delle variazioni del profilo stratigrafico, quali ad esempio disomogeneità costituite da strati e lenti di materiali aventi diverse caratteristiche geomeccaniche, livelli di falda variabili, topografie irregolari, la presenza di elementi stabilizzanti (muri di sostegno, palificate, geogriglie, ecc.).

Dal punto di vista geologico infatti tutti gli elementi di discontinuità costituiscono parte caratterizzante del pendio e, come tali, non possono essere trascurati a priori da operazioni di eccessiva generalizzazione e semplificazione nella definizione del profilo stratigrafico e geomeccanico.



Talvolta invece, a causa di approssimazioni insite nei codici di calcolo esistenti o a causa dei tempi di calcolo, gli elementi di discontinuità rilevati vengono trascurati o semplificati eccessivamente, con conseguenza, in termini di affidabilità ed accuratezza, sul risultato finale.

Seguendo questi principi, il codice SSAP è stato sviluppato mirando ai seguenti obiettivi:

1. Possibilità di rappresentare adeguatamente tutte le discontinuità presenti nei pendii naturali od artificiali.
2. Evitare tutte le eccessive assunzioni semplificative sulla stratigrafia, sul profilo della falda, sulle superfici di scorrimento.
3. Seguire gli attuali standard e normative nelle verifiche di stabilità dei pendii in terreni sciolti e ammassi rocciosi fratturati.
4. Implementare nel software una serie di strumenti di calcolo tra i più avanzati e originali nell'ambito dei modelli di calcolo per le verifiche all'equilibrio limite.
5. Facilità di uso e interfaccia amichevole, con console a pulsanti, uso del mouse e di sistemi touch-screen, un sistema di aiuto contestuale.

SSAP2010 è caratterizzato dalla implementazione al suo interno di 7 metodi di calcolo rigorosi che operano nell'ambito della metodologia della verifica della stabilità dei pendii mediante il **metodo dell'equilibrio limite**. In particolare:

- Janbu Rigoroso (1973);
- Spencer (1973)
- Sarma I (1973);
- Morgenstern & Price (1965);
- Chen & Morgenstern (1983)
- Sarma II (1979)
- Borselli (2016)



Progettazione:  via Clodoveo Bonazzi, 2 40013 Castel Maggiore (BO)	Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore	Committente:  ENERGIA PULITA TRE S.r.l. via della Chimica, 103 85100 Potenza (PZ)
--	---	--

Altre importanti caratteristiche di SSAP 2010 sono:

- La possibilità di caratterizzare geomeccanicamente gli ammassi rocciosi fratturati mediante il criterio di rottura di Hoek et al. (2002, 2006) e eseguire le verifiche di stabilità in pendii costituiti, del tutto o in parte, da ammassi rocciosi fratturati.
- Possibilità di combinare in uno stesso pendio sia strati, o lenti, caratterizzati come terreni sciolti che come ammassi rocciosi fratturati usando il criterio di rottura di Hoek.
- Possibilità di tenere conto della presenza di strutture di sostegno tipo palificate e valutare l'incremento del fattore di sicurezza indotto, attraverso un modello di calcolo e progettazione derivato da quello di Ito e Matsui (1981) e Hassiotis et al (1997), Kumar & Hall (2006). Inoltre una innovativa e originale procedura per il calcolo automatico della forza di reazione effettivamente mobilitata dalla palificata è stata integrata nel metodo di calcolo per la risoluzione rigorosa del valore di F_s .
- SSAP implementa un metodo rigoroso per considerare la resistenza offerta da sistemi di tiranti (attivi e passivi) e con distribuzione di resistenza lineare o non lineare.
- Implementa un metodo completo e rigoroso per considerare l'incremento di resistenza offerta da sistemi di geogriglie/geosintetici, ed in particolare per l'effetto di resistenza al pullout.
- L'analisi può includere: il calcolo del Coefficiente Sismico Critico, come proposto da Sarma (1973) e la possibilità di verificare l'effetto di forze stabilizzanti alla base del pendio (muro di sostegno e palificata) o destabilizzanti in testa al pendio (tension cracks riempiti di acqua).
- Completa verifica di superfici di scivolamento singole definite dall'utente e calcolo del coefficiente sismico critico (secondo il metodo proposto da Sarma, 1973) applicato anche agli altri metodi di calcolo (Janbu, Spencer, ecc.).
- Controllo stringente, effettuato in modo automatico, affinché nessuna parte delle superfici soggette a verifica violi il principio di rottura di Mohr-Coulomb o di Hoek et al (2002, 2006).

SSAP2010 implementa tre motori di ricerca diversi per la ricerca delle superfici con minor F_s , come l'originale "Sniff Random Search" e l'algoritmo di ricerca con "range dinamico", tutti sviluppati in modo originale dall'autore. I motori di ricerca sono:

- RANDOM SEARCH ottimizzato, derivato da Siegel et al. (1981)
- CONVEX RANDOM SEARCH, derivato da Chen (1992)
- SNIFF RANDOM SEARCH. È il metodo più innovativo ma anche il più versatile ed il più potente tra quelli implementati nel programma. Sviluppato in maniera originale dall'autore, il metodo si basa sulla strategia che tende a massimizzare, durante la generazione di superfici random, il passaggio negli strati che hanno le caratteristiche di resistenza più scadenti.

Progettazione:  via Clodoveo Bonazzi, 2 40013 Castel Maggiore (BO)	Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore	Committente:  ENERGIA PULITA TRE S.r.l. via della Chimica, 103 85100 Potenza (PZ)
--	---	--

16.2 Analisi allo stato di progetto

La verifica della stabilità globale è effettuata secondo la combinazione A2+M2+R2, secondo quanto previsto dal D.M. 17/01/2018 /1/. I parametri di resistenza del terreno sono ridotti tramite i coefficienti parziali del gruppo M2 in condizioni statiche, mentre in condizioni sismiche si considerano i valori caratteristici sia delle azioni che dei parametri geotecnici. Il coefficiente γ_R sulla resistenza globale (R2) è pari a 1.1 in condizioni statiche e a 1.2 in condizioni sismiche. Le azioni variabili sono amplificate con i coefficienti del gruppo A2 in condizioni statiche, mentre si fa riferimento ai valori caratteristici in condizioni sismiche.

Nello specifico in condizioni sismiche è stato utilizzato lo stesso approccio delle condizioni statiche ponendo pari all'unità i coefficienti parziali sulle azioni e sui parametri geotecnici (§ 7.11.1 del D.M. 17/01/2018).

Le analisi di stabilità condotte impiegando modelli basati sulla teoria dell'equilibrio limite, fanno riferimento al codice di calcolo SSAP2010, descritto al § 16.1.

Le verifiche sono state eseguite cercando tra le superfici di scorrimento cinematicamente possibili quella critica alla quale compete il grado di sicurezza più basso, espresso come rapporto tra la resistenza al taglio disponibile e quella effettivamente mobilitata dal volume di terreno coinvolto nel movimento.

Con il codice di calcolo SSAP2010 il metodo di calcolo è quello delle strisce; in particolare si farà riferimento al metodo di Morgenstern & Price.

Per i terreni è stato assunto un legame costitutivo rigido-plastico con criterio di rottura di Mohr-Coulomb.

L'analisi tiene conto della presenza delle opere in oggetto e delle relative fondazioni, costituite da pali trivellati $\phi = 1200\text{mm}$ e lunghezza 28.0m.

Nella seguente tabella sono riassunti i risultati ottenuti delle analisi di stabilità allo stato di progetto in termini di coefficienti di sicurezza mentre, nelle figure che seguono, è rappresentato il modello geometrico della sezione analizzata con indicazione del cinematismo di scorrimento più critico.

Condizioni	FS SSAP2010
Statiche	3.897 *
Sismiche	2.091

*: Parametrizzazione con fattori parziali M2

Riscontrandosi valori del coeff. di sicurezza maggiori di quelli previsti dalle Norme NTC2018 /1/ si rileva come il pendio, nella configurazione di progetto, risulti in uno stato compatibile con la sicurezza del versante esistente.

Seguono le immagini relative ai cinematismi critici rilevati dalle analisi condotte, i cui risultati sono riepilogati nella precedente tabella.

Progettazione:

via Clodoveo Bonazzi, 2
40013 Castel Maggiore (BO)

Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore

Committente:

ENERGIA PULITA TRE S.r.l.
via della Chimica, 103
85100 Potenza (PZ)

Parametri Geotecnici degli strati Ridotti ai sensi NTC2018/EC-7 #Per Rocce vedasi Report di verifica, per dettagli -----

N.	phi' deg	C' kPa	Cu kPa	Gamm kN/m3	GammSat kN/m3	sgci MPa	GSI	mi	D
1	19.61	5.60	0	19.00	19.00	0	0	0	0
2	19.61	11.20	0	20.00	20.00	0	0	0	0
3	19.61	16.00	0	20.00	20.00	0	0	0	0
4	19.61	24.00	0	20.00	20.00	0	0	0	0
5	38.66	1600.00	0	25.00	25.00	0	0	0	0
6	38.66	1600.00	0	25.00	25.00	0	0	0	0
7	38.66	1600.00	0	25.00	25.00	0	0	0	0

SSAP 5.2 (2023) - Slope Stability Analysis Program
Software by Dr.Geo. L. Borselli - www.lorenzo-borselli.eu
SSAP/DXF generator rel. 2.4 (2023)

Data: 27/2/2024
Localita':
Descrizione:
[n] = N. strato o lente

Sn -> Sovraccarico

Presenza Palificate (Per i dati vedi il report)

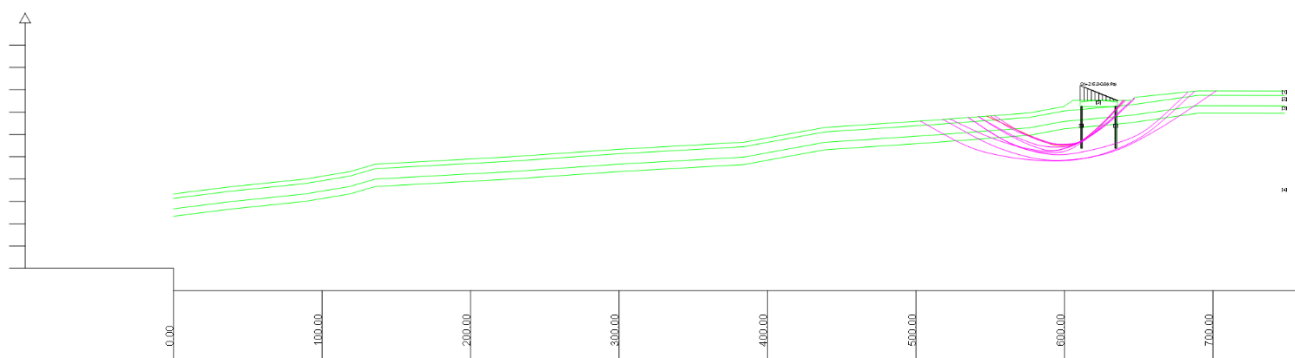
Modello di calcolo : Morgenstern - Price (1965)

DATI 10 SUP. CON MINOR Fs

Fs minimo : 3.8970
Range Fs : 3.8970 - 4.1789
Differenza % Range Fs : 6.75
Coefficiente Sismico orizzontale - Kh: 0.0000
Coefficiente Sismico verticale - Kv: 0.0000

GENERAZIONE SUPERFICI RANDOM

Campione Superfici - N.: 15000
Lunghezza media segmenti (m) : 5.0
Range X inizio generazione : 15.0 - 605.7
Range X termine generazione : 625.8 - 733.3
Livello Y minimo considerato : 0.0



Condizioni statiche – cinematismi critici di instabilità versante – Analisi SSAP2010: Stato di progetto

Parametri Geotecnici degli strati

N.	phi' deg	C' kPa	Cu kPa	Gamm kN/m3	GammSat kN/m3	sgci MPa	GSI	mi	D
1	24.00	7.00	0	19.00	19.00	0	0	0	0
2	24.00	14.00	0	20.00	20.00	0	0	0	0
3	24.00	20.00	0	20.00	20.00	0	0	0	0
4	24.00	30.00	0	20.00	20.00	0	0	0	0
5	45.00	2000.00	0	25.00	25.00	0	0	0	0
6	45.00	2000.00	0	25.00	25.00	0	0	0	0
7	45.00	2000.00	0	25.00	25.00	0	0	0	0

SSAP 5.2 (2023) - Slope Stability Analysis Program
Software by Dr.Geo. L. Borselli - www.lorenzo-borselli.eu
SSAP/DXF generator rel. 2.4 (2023)

Data: 27/2/2024
Localita':
Descrizione:
[n] = N. strato o lente

Sn -> Sovraccarico

Presenza Palificate (Per i dati vedi il report)

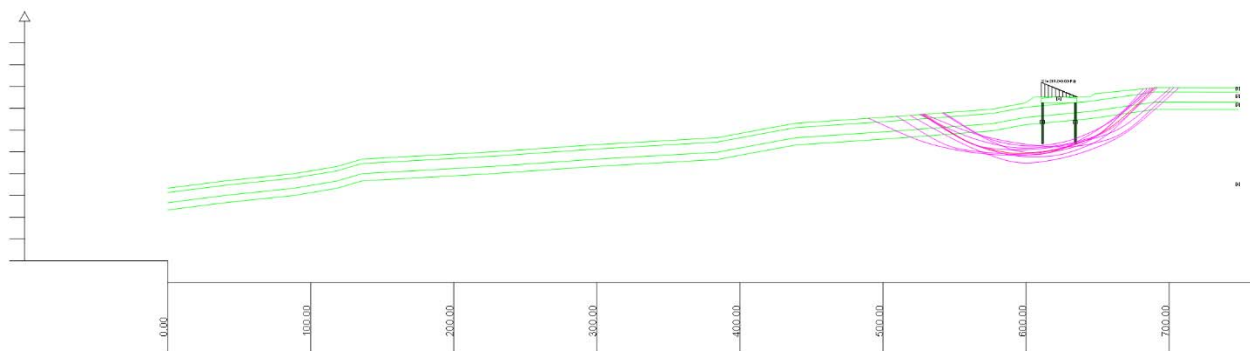
Modello di calcolo : Morgenstern - Price (1965)

DATI 10 SUP. CON MINOR Fs



Fs minimo : 2.0917
Range Fs : 2.0917 - 2.2836
Differenza % Range Fs : 8.41
Coefficiente Sismico orizzontale - Kh: 0.1610
Coefficiente Sismico verticale - Kv: 0.0805

GENERAZIONE SUPERFICI RANDOM

Campione Superfici - N.: 15000
Lunghezza media segmenti (m) : 5.0
Range X inizio generazione : 15.0 - 605.7
Range X termine generazione : 625.8 - 733.3
Livello Y minimo considerato : 0.0



Condizioni sismiche – cinematismi critici di instabilità versante – Analisi SSAP2010: Stato di progetto

Progettazione:  via Clodoveo Bonazzi, 2 40013 Castel Maggiore (BO)	Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore	Committente:  ENERGIA PULITA TRE S.r.l. via della Chimica, 103 85100 Potenza (PZ)
--	---	--

17 VERIFICHE STRUTTURALI DEI PALI DI FONDAZIONE

Per la verifica a flessione delle sezioni in c.c.a. delle fondazioni, si è operato in campo sismico, in accordo con il § 7.2.2 delle NTC2018 /1/, nel quale si afferma che *“Le strutture di fondazione e i relativi elementi strutturali devono essere progettati sulla base della domanda ad essi trasmessa dalla struttura sovrastante (si veda § 7.2.5) attribuendo loro comportamento strutturale non dissipativo, indipendentemente dal comportamento attribuito alla struttura su di essi gravante”*.

Pertanto, si farà riferimento ad un comportamento sostanzialmente lineare dei materiali, facendo sì che i valori tensionali massimi raggiungibili dai materiali (calcestruzzo ed acciaio) risultino inferiori a quelli massimi di progetto (f_{cd} lato calcestruzzo e f_{yd} lato acciaio).

In particolare, allo scopo di garantire che gli elementi in c.c.a. costituenti le fondazioni rimangano in *“campo sostanzialmente elastico”* (cfr. NTC2018 /1/ § 4.1.2.3.4.2), non solo si limiteranno le tensioni ai valori massimi sopra citati ma, con riferimento ai legami costitutivi dei materiali (calcestruzzo ed acciaio) riportati al § 4.1 delle NTC, si limiteranno le deformazioni consentite ai valori:

- $\epsilon_{c2} = 0.20 \%$ per quanto riguarda il calcestruzzo;
- $\epsilon_{yd} = f_{yd} / E_s$ per quanto riguarda l'acciaio da armatura.

In tal modo si garantisce che la sezione sia analizzata con i materiali costituenti che rimangono nel ramo sostanzialmente elastico di comportamento.

Tale strategia è adottata anche per quanto riguarda le verifiche in campo statico.

17.1 Verifica di resistenza a flessione e taglio dei pali

I pali prevedono la seguente armatura, con caratteristiche meccaniche come descritte al capitolo 3:

- Armature correnti: n.ro 20 barre ϕ 20mm
- Armature a taglio: Spirale ϕ 10 mm passo 20 cm

Verifica a flessione

La verifica della sezione viene condotta assumendo un comportamento sostanzialmente elastico dei materiali.

Anche se i pali risultano sempre compressi in tutte le condizioni di carico, la verifica a flessione viene condotta trascurando il contributo – benefico - dello sforzo assiale di compressione.

Si ottiene, con riferimento ai valori di sollecitazione in campo statico riportati al precedente capitolo 11:

Progettazione:



via Clodoveo Bonazzi, 2
40013 Castel Maggiore (BO)

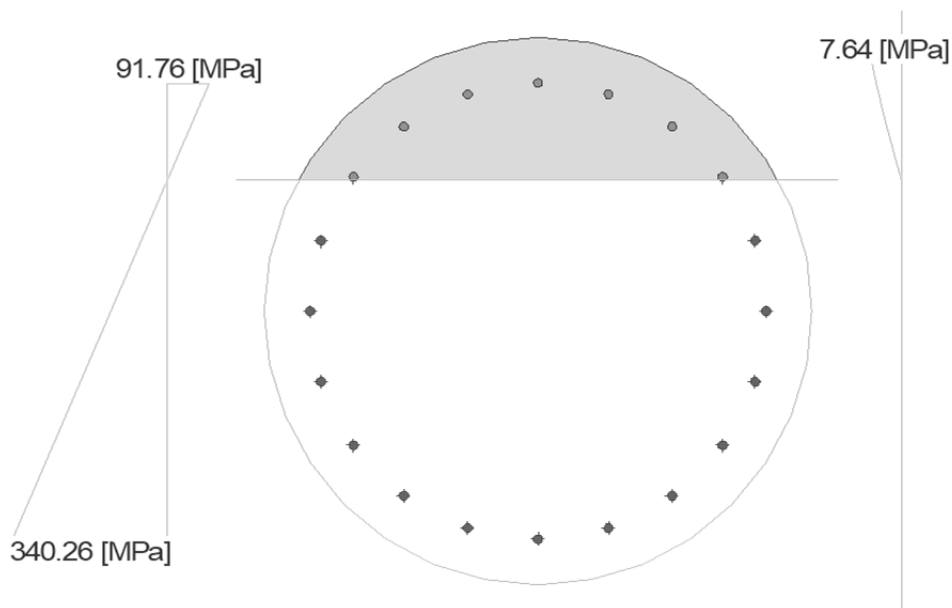
**Relazione di calcolo fondazione
aerogeneratore**

Committente:



ENERGIA PULITA TRE S.r.l.
via della Chimica, 103
85100 Potenza (PZ)

Condizione di sola flessione



Sd			Sr			Sd/Sr
N [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	N [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	
0.00	300.00	0.00	-0.00	701.98	-0.00	0.43

$M_{Rd} = 702 \text{ kNm} > M_{Sd} = 297 \text{ kNm} \Rightarrow \text{verificato}$

Le verifiche sono positivamente soddisfatte.

Verifica a taglio

Metodo di Clarke & Birjandi

r	Raggio della sezione circolare.
r_s	Raggio della parte confinata dall'armatura trasversale. $r_s = r - \text{copr.}$
$\sin \alpha$	$\sin \alpha = (2 r_s) / (\pi r)$.
α	$\alpha = \arcsin(\sin \alpha)$.
A_{tot}	Area totale della sezione circolare. $A = \pi r^2$.
A	Area della sezione rettangolare equivalente. $A = r^2 (\pi/2 + \alpha + \sin \alpha \cos \alpha)$.

Parametri della sezione rettangolare equivalente

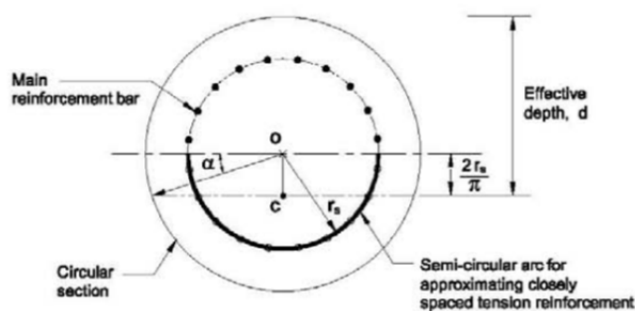
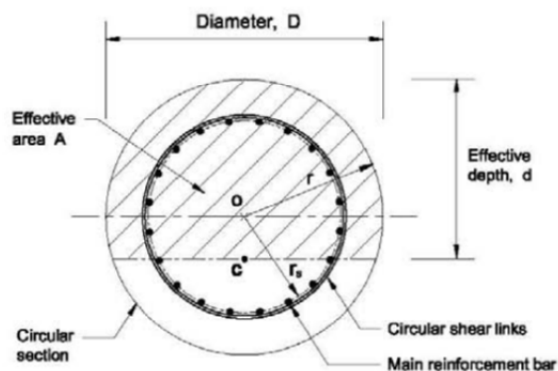
b	Larghezza equivalente. $b = A/d$.
h	Altezza equivalente. $h = A_{\text{tot}}/b$
d	Altezza utile equivalente. $d = r (1 + \sin \alpha)$.



Diametro palo	$D = 1200$ mm
Raggio palo	$r = 600$ mm
Copriferro	$c = 80,00$ mm
Raggio porzione confinata	$r_s = 520,00$ mm
Angolo α	$\sin \alpha = 0,55$ ° $\alpha = 33,49$ °
Area sezione circolare	$A_{\text{tot}} = 1130973$ mm ²
Area sezione rettangolare equival	$A = 941544,3$ mm ²

PARAMETRI SEZIONE RETTANGOLARE EQUIVALENTE

Larghezza	$b = 1011$ mm
Altezza	$h = 1118$ mm
Altezza utile	$d = 931$ mm

Taglio sezione circolare



Progettazione:  via Clodoveo Bonazzi, 2 40013 Castel Maggiore (BO)	Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore	Committente:  ENERGIA PULITA TRE S.r.l. via della Chimica, 103 85100 Potenza (PZ)
--	---	--

Verifica per azioni combinate taglio - torsione secondo D.M. 17-01-2018 e UNI EN 1992-1-1-2005

1. Caratteristiche dei materiali

Classe di resistenza calcestruzzo:

Resistenza caratteristica cilindrica a compressione:	fck =	25,00	MPa
Resistenza caratteristica cubica a compressione:	Rck =	30,00	MPa
Coefficiente parziale di sicurezza per cls:	γ_c =	1,5	
Coefficiente riduttivo per resistenze di lunga durata	α_{cc} =	0,85	
Resistenza di calcolo a compressione ($f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_c$)	fcd =	14,17	MPa
Resistenza caratteristica a trazione	fctk =	1,80	MPa

Dove: $f_{ctk} = 0.7 \times 0.3 \times f_{ck}^{(2/3)}$

Resistenza di calcolo a trazione (classe <C50/60):	fctd =	1,20	MPa
Modulo elastico cls:	Ecm =	31476	MPa
Resistenza caratteristica di aderenza	fbk =	4,04	MPa

Dove: $fbk = 2.25 \times f_{ctk}$ (per barre con diam. <32mm)

Resistenza caratteristica di aderenza ($f_{bd} = f_{bk} / \gamma_c$)	fbd =	2,69	MPa
Resistenza di aderenza ridotta	f'bd =	1,80	MPa

Dove: $f'bd = f_{bd} / 1.5$ - In presenza di cls teso o armature molto addensate

Tipo di Acciaio:

Tensione caratteristica di snervamento	fyk =	450	MPa
Coefficiente parziale di sicurezza per acciaio:	γ_s =	1,15	
Tensione di calcolo dell'acciaio	fyd =	391,30	MPa
Distanza bordo - centro armatura longitudinale	c =	80,00	mm

Verifiche a taglio

Verifica a taglio senza armatura (par. 4.1.2.3.5.1 NTC2018)

B (mm)	H (mm)	Ac (mmq)	bw (mm)	c (mm)	d (mm)	n.b.long.	ϕ sl (mm)	Asl (mmq)	psl	k	vmin
1011	1118	1130973,4	1011	80,00	931	20	20	6283,2	0,0067	1,463	0,310
V _{ED} (kN)	N _{ED} (kN)	σ_{cp} (MPa)	V _{rdc} (kN)	V _{rdcmin} (kN)	V _{rdc} (kN)	Verifica 1		Verifica 2			
220,00	0,00	0,00	422,51	291,71	422,51	V _{rdc} > V _{rdcmin} , Ok		V _{ed} , armature a taglio non nece			



0,52

Verifica a taglio con armatura (par. 4.1.2.3.5.2 NTC2018)

ϕ sw (mm)	n.br.sw	Asw (mmq)	sv (mm)	θ (ses dec)	α (ses dec)	cotg θ	α_c^*	V _{adott.}	V _{adott.}
10	2	157,08	200	21,8	90	2,50	1,00	v = § 4.1.2.3.5.2 NTC2018	0,500
V _{rd,s} (kN)		V _{rd,c} (kN)		V _{rd} (kN)		Verifica			As _{lapp} (mmq)
643,81		2069,77		643,81		V _{rd} > V _{ed} ; Sezione verificata			562,22

$V_{Rd} = 643 \text{ kN/m} > V_{sd} = 220 \text{ kN/m} \Rightarrow$ verificato

Le verifiche sono positivamente soddisfatte.

Progettazione:  via Clodoveo Bonazzi, 2 40013 Castel Maggiore (BO)	Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore	Committente:  ENERGIA PULITA TRE S.r.l. via della Chimica, 103 85100 Potenza (PZ)
--	---	--

17.2 Verifica dell'ancoraggio dei pali alla fondazione

Si verifica nel presente paragrafo l'adeguato ancoraggio tra i pali di fondazione e gli elementi in c.a. che li collegano tra loro ed li unisce solidarmente alle strutture in elevazione.

Caratteristiche meccaniche dei materiali: **SLU**

Calcestruzzo:		$\gamma_{CLS} =$	25,00	kN/m ³
Classe di resistenza			C25/30	
Resistenza cilindrica caratteristica compressione		$f_{ck} =$	25,00	MPa
Modulo elastico medio		$E_{cm} =$	31475,81	MPa
Coeff parziale sicurezza CLS		$\gamma_C =$	1,50	
Eff lungo termine sulla resistenza		$\sigma_{cc} =$	0,85	
Valore di progetto resistenza cilindrica a compressione		$f_{cd} =$	14,17	MPa
Valore di progetto resistenza cilindrica a trazione		$f_{ctd} =$	1,20	MPa
Acciaio armatura lenta:			B450C	
Tensione caratteristica snervamento armature lente		$f_{yk} =$	450,00	MPa
Modulo elastico armature lente		$E_s =$	200000,00	MPa
Coeff parziale sicurezza acciaio		$\gamma_S =$	1,15	
Valore di progetto tensione snervamento armature lente		$f_{yd} =$	391,30	MPa

Tensione ultima di aderenza acciaio/calcestruzzo

$$f_{bd} = 2,25 \eta_1 \eta_2 f_{ctd} \quad f_{bd} = 1,89 \text{ MPa}$$

$\eta_1 = 1,0$ in condizione di "buona" aderenza

$\eta_1 = 0,7$ in tutti gli altri casi e per barre in elementi strutturali realizzati con casseforme scorrevoli, a meno che non si possa dimostrare che esistono "buone" condizioni di aderenza;

Condizioni di aderenza: Scarse

$\eta_1 = 0,7$

$\eta_2 = 1$

Progettazione:

via Clodoveo Bonazzi, 2
40013 Castel Maggiore (BO)

Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore

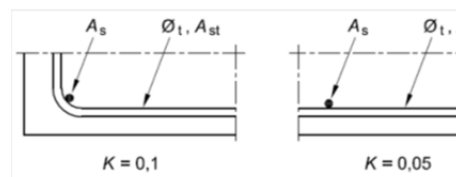
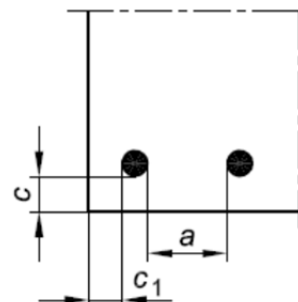
Committente:

ENERGIA PULITA TRE S.r.l.
via della Chimica, 103
85100 Potenza (PZ)

ANCORAGGIO BARRE DI ARMATURA

EN 1992-1-1 Capitolo 8 - § 8.4

Diametro barra maggiore longitudinale: ϕ =	20	mm
Distanza netta tra barre: a =	166	mm
Distanza esterno barra da bordo laterale: c_1 =	60	mm
Distanza esterno barra da bordo inferiore: c =	60	mm
$\sigma_{sd} = f_{yd}$	391,30	MPa
f_{bd}	1,89	MPa
Barra	Dritta	
c_d	60	mm
k (vedi immagine)	0,05	
p pressione trasversale allo SLU	0	MPa
ΣA_{st} area staffe lungo ancoraggio: $\Sigma A_{st} =$	0	mm ²
Astaffe minima: $\Sigma A_{st,min} =$	78,54	mm ²
Area barra longitudinale: $A_s =$	314,16	mm ²
$\lambda = (\Sigma A_{st} - \Sigma A_{st,min}) / A_s$	0,00	
Ci sono barre saldate?	No	Si o No

**Coefficienti riduttori lunghezza ancoraggio richiesta**

FORMA BARRA	α_1
RICOPRIMENTO CLS	$\alpha_2 > 0.7 < 1.0$
CONFINAMENTO BARRE TRASVERSALI NON SALDATE	$\alpha_3 > 0.7 < 1.0$
CONFINAMENTO BARRE TRASVERSALI SALDATE	α_4
CONFINAMENTO PRESSIONE TRASVERSALE	$\alpha_5 > 0.7 < 1.0$



Barra in trazione		Barra in compressione	
Da calcolo	Scelti	Da calcolo	Scelti
1,00	1,00	1,00	1,00
0,70	1,00	1,00	1,00
1,00	1,00	1,00	1,00
1,00	1,00	1,00	1,00
1,00	1,00	1,00	1,00

Lunghezza ancoraggio base: $l_{b,rqd} = \frac{\phi}{4} \left(\frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}} \right)$	1038	mm
Lunghezza minima in trazione: $l_{b,min} =$	311	mm
Lunghezza minima in compressione: $l_{b,min} =$	623	mm

$$l_{bd} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 l_{b,rqd} \geq l_{b,min}$$

Lunghezza ancoraggio progetto trazione: $l_{bd} =$	1038	mm	OK
Lunghezza ancoraggio progetto compressione: $l_{bd} =$	1038	mm	OK

Le verifiche sono positivamente soddisfatte.

Progettazione:  via Clodoveo Bonazzi, 2 40013 Castel Maggiore (BO)	Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore	Committente:  ENERGIA PULITA TRE S.r.l. via della Chimica, 103 85100 Potenza (PZ)
--	---	--

18 CRITERI GENERALI DI VERIFICA STRUTTURALE DEL PLINTO

Si descrivono nel presente capitolo i criteri generali impiegati nelle verifiche strutturali del plinto di fondazione della struttura in oggetto.

Seguiranno poi al capitolo successivo le verifiche quantitative di dettaglio.

Il codice di calcolo utilizzato nelle analisi strutturali delle fondazioni è denominato Win-Strand Versione 2023-066 prodotto dalla ENEXSYS S.r.L. Via Tizzano 46/2 Casalecchio di Reno (Bologna), licenza d'uso numero 92320000ST, installato su personal computer con processore Intel-Core-i7-2600K CPU a 3.40Ghz/3.40GHz, memoria RAM da 8GB, sistema operativo Windows 10 Professional a 64 bit. Il codice di calcolo utilizzato presenta un elevato grado di affidabilità, possiede un risolutore sviluppato dalla stessa casa Software (non importato da altre case). Il programma è entrato sul mercato nel 1984 e con esso sono stati realizzati progetti strutturali di notevole valenza in tutto il mondo (si veda sito www.enexsys.com). Lo scrivente progettista utilizza il programma dai primi anni '90 ed a corredo dello stesso è disponibile il manuale d'uso ed i test di validazione effettuati dalla casa produttrice (Benchmark), documentazione largamente visionata e valutata dallo scrivente progettista strutturale anche attraverso l'assistenza on line ed il relativo forum tecnico.

Ove necessario si impiegherà l'applicativo Preflex del software Win-Strand, specifico per l'analisi sezionale, avvalendosi anche dell'ausilio di fogli di calcolo sviluppati dagli scriventi.

18.1 Verifica a flessione

Per la verifica a flessione delle sezioni in c.c.a. delle fondazioni, quindi in particolare delle platee di collegamento tra i pali, si è operato in campo sismico, in accordo con il § 7.2.2 delle NTC2018 /1/, nel quale si afferma che *“Le strutture di fondazione e i relativi elementi strutturali devono essere progettati sulla base della domanda ad essi trasmessa dalla struttura sovrastante (si veda § 7.2.5) attribuendo loro comportamento strutturale non dissipativo, indipendentemente dal comportamento attribuito alla struttura su di essi gravante”*.

Pertanto, si farà riferimento ad un comportamento sostanzialmente lineare dei materiali, facendo sì che i valori tensionali massimi raggiungibili dai materiali (calcestruzzo ed acciaio) risultino inferiori a quelli massimi di progetto (f_{cd} lato calcestruzzo e f_{yd} lato acciaio).

In particolare, allo scopo di garantire che gli elementi in c.c.a. costituenti le fondazioni rimangano in *“campo sostanzialmente elastico”* (cfr. NTC2018 /1/ § 4.1.2.3.4.2), non solo si limiteranno le tensioni ai valori massimi sopra citati ma, con riferimento ai legami costitutivi dei materiali (calcestruzzo ed acciaio) riportati al § 4.1 delle NTC, si limiteranno le deformazioni consentite ai valori:

- $\epsilon_{c2} = 0.20 \%$ per quanto riguarda il calcestruzzo;
- $\epsilon_{c yd} = f_{yd} / E_s$ per quanto riguarda l'acciaio da armatura.

In tal modo si garantisce che la sezione sia analizzata con i materiali costituenti che rimangono nel ramo sostanzialmente elastico di comportamento.

A titolo cautelativo, tale approccio è applicato anche alle verifiche in campo statico.

In merito alle verifiche di resistenza SLU degli elementi in c.c.a. della fondazione, si adotta a favore di sicurezza la classe di calcestruzzo C25/30, mentre la classe realizzativa corrisponderà a C32/40, come riportato al capitolo 3 del presente elaborato.

A chiarimento di quanto appena esposto si riportano delle immagini, tratte dal codice di verifica delle sezioni, in cui è possibile vedere le impostazioni impiegate per descrivere, come sopra, le caratteristiche meccaniche dei materiali (calcestruzzo ed acciaio per armature).

Progettazione:

via Clodoveo Bonazzi, 2
40013 Castel Maggiore (BO)

**Relazione di calcolo fondazione
aerogeneratore**

Committente:

ENERGIA PULITA TRE S.r.l.
via della Chimica, 103
85100 Potenza (PZ)

Materiali Lastre

Lastra

Caratteristiche Generali

Calcestruzzo: **Altro tipo di Calcestruzzo** Rbk: 30.0 [MPa]

Identificativo: **C 25/30 elastic**

Salva XML... Carica da XML...

Verifiche agli Stati Limite Ultimi

$f_{ck} = R_{bk} \times$ 0.833333 = 25 [MPa]

γ_{Cis} 1.5 Fattore di Confidenza 1

$f_{cd,Max} = f_{ck} / (\gamma_{F.C.}) =$ 16.7 [MPa]

γ_{cc} 0.85 f_{cd} 14.2 [MPa]

Deformazione alla Tensione di Picco $f_{c, ec1}$ (0.002 = 0.2%) **0.002**

Deformazione di Compressione Ultima ecu (0.0035 = 0.35%) **0.002**

f_{ctm} 2.6 [MPa] $f_{ctk,0.05}$ 1.8 [MPa]

Resistenza unitaria a Taglio di Rif. $\tau_{u,rd}$ 0.3 [MPa]

Tensione di aderenza Barre Liscie 1.2 [MPa]

Tensione di aderenza Barre Nervate 2.69321 [MPa]

Verifica agli Stati Limite di Esercizio

	Combinazioni di Carico	Fattore Parziale di Sicurezza	Tensione Max [MPa]
1	Rare	0.600	15.0
2	Frequenti	1.000	25.0
3	Quasi permanenti	0.450	11.3

Crea Cancelli OK Annulla Applica

Progettazione:

via Clodoveo Bonazzi, 2
40013 Castel Maggiore (BO)

**Relazione di calcolo fondazione
aerogeneratore****Committente:**

ENERGIA PULITA TRE S.r.l.
via della Chimica, 103
85100 Potenza (PZ)

Materiali Lastre

Lastra

Caratteristiche Generali

Acciaio: Altro tipo di Acciaio E: 210000 [MPa]

Commento: B 450 C elastic

Barre: ☐ Liscie ☒ Aderenza Migliorata

Salva XML... Carica da XML...

Verifiche agli Stati Limite Ultimi

Tensione Caratteristica di Snervamento f_{yk} : 450 [MPa]

Fattore Parziale di Sicurezza (Gamma): 1.15

Fattore di Confidenza: 1

Resistenza di Calcolo f_{yd} : 391.3 [MPa]

Deformazione al Limite Elastico [$\epsilon_{u1} = f_{yd} / E$]: 0.0018633

Deformazione a rottura di progetto [ϵ_{ud}]: 0.0019

Verifica agli Stati Limite di Esercizio

	Combinazioni di Carico	Fattore Parziale di Sicurezza	Tensione Max [MPa]
1	Rare	0.800	360.0
2	Frequenti	1.000	450.0
3	Quasi permanenti	1.000	450.0

Verifiche alle Tensioni Ammissibili

Tensione Ammissibile: 260 [MPa]

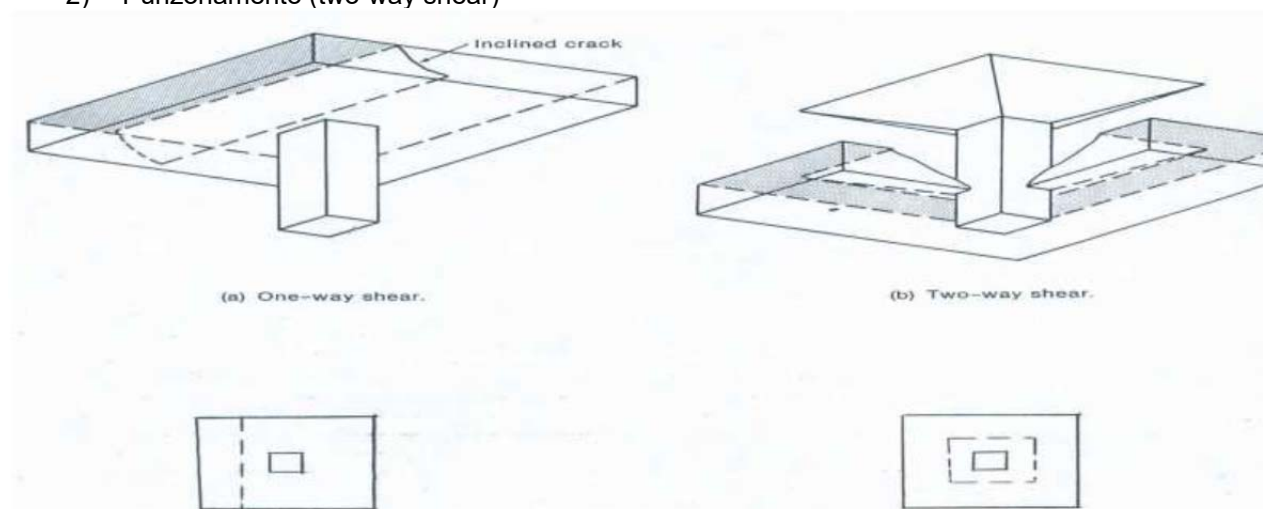
Crea Cancelli OK Annulla Applica

18.2 Verifica a taglio e punzonamento.

La resistenza a taglio di elementi in calcestruzzo ad armatura lenta è condotta con le espressioni previste al § 4.1.2.3.5 delle NTC2018 /1/, mentre per quanto riguarda le verifiche a punzonamento il riferimento è il § 6.4 dell'Eurocodice 2 UNI EN 1992-1 /5/.

Nelle fondazioni in oggetto, in virtù della loro geometria, sono da considerarsi due condizioni:

- 1) Taglio 1D (one-way shear)
- 2) Punzonamento (two-way shear)



In corrispondenza dei pilastri o dei setti eventualmente gravanti sulla fondazione, e dall'altro lato, in corrispondenza dei pali, si eseguiranno le verifiche a punzonamento mentre la verifica a taglio interesserà le rimanenti porzioni dell'elemento strutturale di collegamento tra i pali.

18.3 Modellazione delle fondazioni su pali

Per quanto riguarda le fondazioni delle torri degli aerogeneratori in oggetto la determinazione dello stato sollecitativo sarà effettuato mediante modellazione numerica agli elementi finiti, impiegando il software di calcolo citato nell'introduzione del presente capitolo.

Le sollecitazioni gravanti dalle strutture in elevazione sulle fondazioni saranno introdotte mediante carichi nodali applicati in corrispondenza dei centri delle torri.

Il vincolamento esterno della mesh di calcolo sarà effettuato impiegando elementi tipo mollo elastiche. Sono elementi finiti definiti per mezzo di 3 valori di rigidità: quella assiale e quella nelle due direzioni del piano trasversale. Viste le sezioni della soletta rispetto a quella trasversale dei pali, la scelta è stata quella di considerare nulle le componenti di rigidità rotazionali offerta dai pali nei punti di vincolo, disposti secondo la geometria prevista in progetto (si vedano a tal proposito i disegni esecutivi delle fondazioni).

I valori di rigidità sono stati determinati rapportando le azioni agenti sui pali (carichi assiali e di taglio) ed i relativi cedimenti indotti, come valutati al precedente capitolo 11.

Si è fatto riferimento ai seguenti valori di rigidità dei pali:

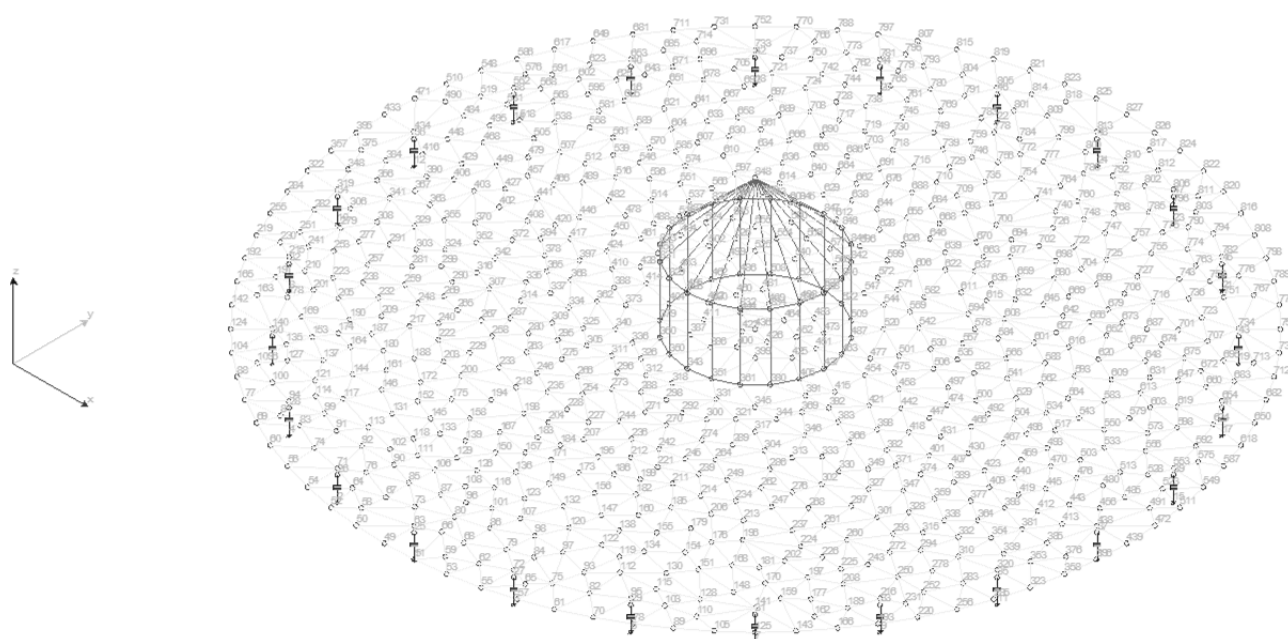
$K_{xy} =$	200 000	kN/m
$K_z =$	500 000	kN/m

19 VERIFICA STRUTTURALE PLINTO FONDAZIONE

Si presentano nel presente capitolo le verifiche strutturali relative al plinto di collegamento pali della fondazione in oggetto.

Tale elemento è geometricamente descritto al capitolo 4, mentre le azioni gravanti sono descritte al capitolo 5.

Modello di calcolo



Modello di calcolo – vista unifilare

Progettazione:



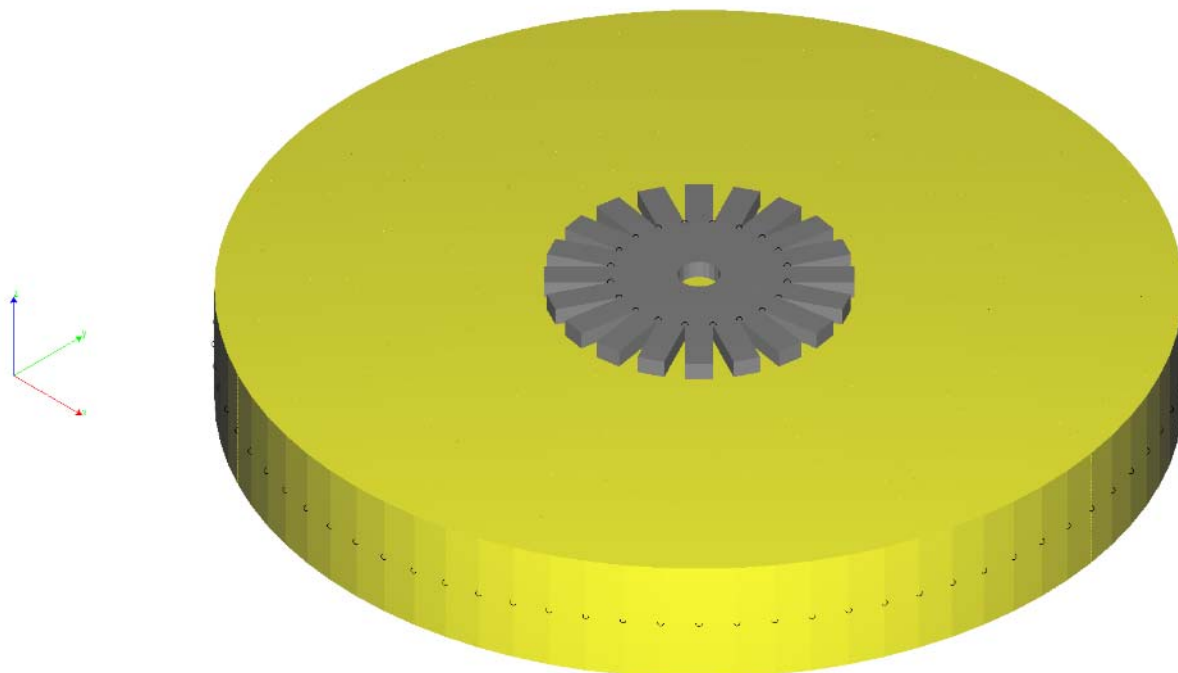
via Clodoveo Bonazzi, 2
40013 Castel Maggiore (BO)

**Relazione di calcolo fondazione
aerogeneratore**



Committente:



ENERGIA PULITA TRE S.r.l.
via della Chimica, 103
85100 Potenza (PZ)



Modello di calcolo – vista solida

Progettazione:  via Clodoveo Bonazzi, 2 40013 Castel Maggiore (BO)	Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore	Committente:  ENERGIA PULITA TRE S.r.l. via della Chimica, 103 85100 Potenza (PZ)
--	---	--

Proprietà dei materiali e delle sezioni impiegate

Caratteristiche dei Materiali:

Tipo	Modulo Elastico [MPa]	ν	alfa [1/°C]	Peso Specifico [kg/m³]	Commento
1	30000.00	0.120	0.000012	2500.0	Calcestruzzo
2	210000.00	0.330	0.000012	7850.0	Acciaio
3	210000.00	0.330	0.000010	0.0	Acciaio NO peso
4	30000.00	0.120	0.000010	0.0	Calcestruzzo NO peso

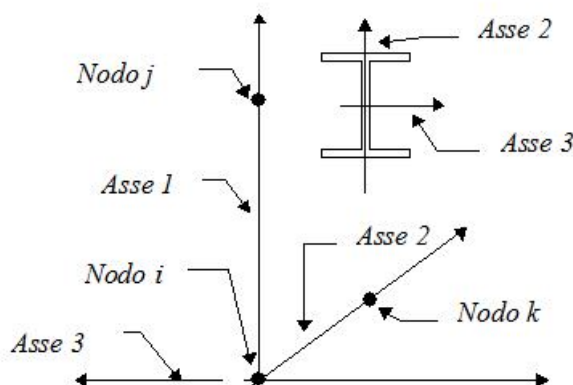
Elementi tipo pilastro

Convenzioni adottate

Ogni elemento tipo pilastro viene identificato da:

- Il nodo iniziale **i**;
- Il nodo finale **j**;
- Il nodo **k** che definisce l'orientamento nello spazio della terna riferimento locale dell'elemento.

La terna di riferimento locale del pilastro risulta quindi essere così disposta:



Sistema di riferimento locale

Vengono riportati i valori di efficacia dei vincoli flessionali alle estremità dell'elemento (variabili fra lo **0%** e il **100%**), nei due piani **1-2** e **1-3** del pilastro in corrispondenza dei nodi, dando quindi la possibilità di considerare aste non perfettamente incastrate alle estremità (coefficienti **Vi12 - Vj12 - Vi13 - Vj13**).

In generale, se non diversamente disposto, l'asse 2 coincide, per i pilastri, con l'asse **y** globale e pertanto la disposizione della sezione coincide con quella che si avrebbe in una vista in pianta.

Sezioni Impiegate:

Sezione	Materiale	Tipo di Sezione	Parametri Dimensionali Commenti
1	1	Circolare	R= 60 [cm]

Caratteristiche Inerziali:

Sezione	Materiale	Area [mm²]	Jt [mm⁴]	J2 [mm⁴]	J3 [mm⁴]	J23 [mm⁴]	Xx	Xy
1	1	1130972	203575164080	101787582040	101787582040	0	1.0	1.0

Elementi tipo biella (truss)

Convenzioni adottate

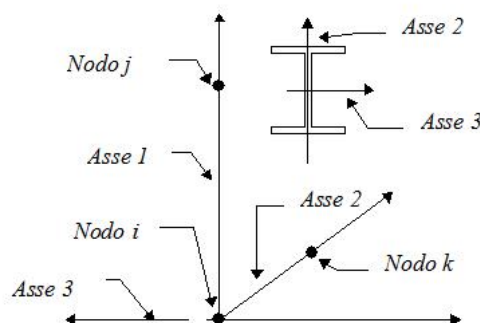
Ogni elemento tipo pilastro viene identificato da:

Il nodo iniziale **i**;

Il nodo finale **j**;

Il nodo **k** che definisce l'orientamento nello spazio della terna riferimento locale dell'elemento.

La terna di riferimento locale del pilastro risulta quindi essere così disposta:



- Il valore di S_0 ovvero l'azione assiale cui si suppone soggetto l'elemento.
- Il tipo di materiale di cui è costituito l'elemento.
- Il tipo di sezione che ne definisce le caratteristiche inerziali.
- La lunghezza.

Va rilevato che:

- Il valore di S_0 interviene (se diverso da zero) esclusivamente nella definizione della matrice di rigidezza dell'elemento (secondo la nota formulazione della matrice di rigidezza geometrica K_G) e non fornisce alcun contributo all'equilibrio globale dei nodi terminali dell'elemento.
- Il correlativo carico viceversa può, a discrezione dell'operatore, intervenire nell'equilibrio strutturale secondo i coefficienti di interazione specificati nelle combinazioni di carico.

Sezioni Impiegate:

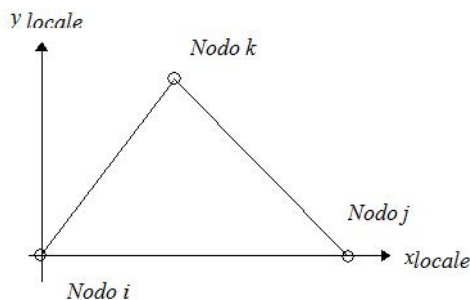
Sezione	Materiale	Tipo di Sezione	Parametri Dimensionali Commenti
1		Boundary	Pali D1200
		KN 499999.99 [kN/m]	
		KVx 200000.00 [kN/m]	
		KVy 200000.00 [kN/m]	

Elementi triangolari - Convenzioni adottate

Convenzioni adottate

L'elemento triangolare è individuato tramite il numero dei nodi di vertice dello stesso.

Gli assi del sistema di riferimento locale risultano così disposti:



- L'asse x_{locale} ha direzione parallela alla retta congiungente i nodi i e j , è passante per i medesimi nodi ed ha verso positivo da i a j .
- L'asse y_{locale} è ortogonale all'asse x_{locale} , passa per il nodo i ed ha verso positivo dalla parte del nodo k .
- L'asse z_{locale} è ottenuto per prodotto vettoriale fra x_{locale} e y_{locale} .

Sezioni Impiegate:

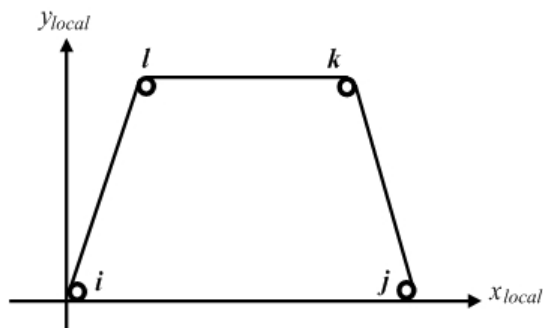
Sezione	Materiale	Tipo di Sezione	Parametri Dimensionali Commenti
1	4	Mesh isotropa	$s = 345$ [cm] Platea_AUX
2	1	Mesh isotropa	$s = 345$ [cm] Platea

Elementi a 4 nodi

Convenzioni adottate

L'elemento a 4 nodi è individuato tramite il numero dei quattro nodi di vertice dello stesso.

Gli assi del sistema di riferimento locale risultano così disposti:



- L'asse x_{locale} ha direzione parallela alla retta congiungente i nodi i e j , è passante per i medesimi nodi ed ha verso positivo da i a j .
- L'asse y_{locale} è ortogonale all'asse x_{locale} , passa per il nodo i ed ha verso positivo dalla parte del nodo l .
- L'asse z_{locale} è ottenuto per prodotto vettoriale fra x_{locale} e y_{locale} .

Progettazione:



via Clodoveo Bonazzi, 2
40013 Castel Maggiore (BO)

Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore

Committente:

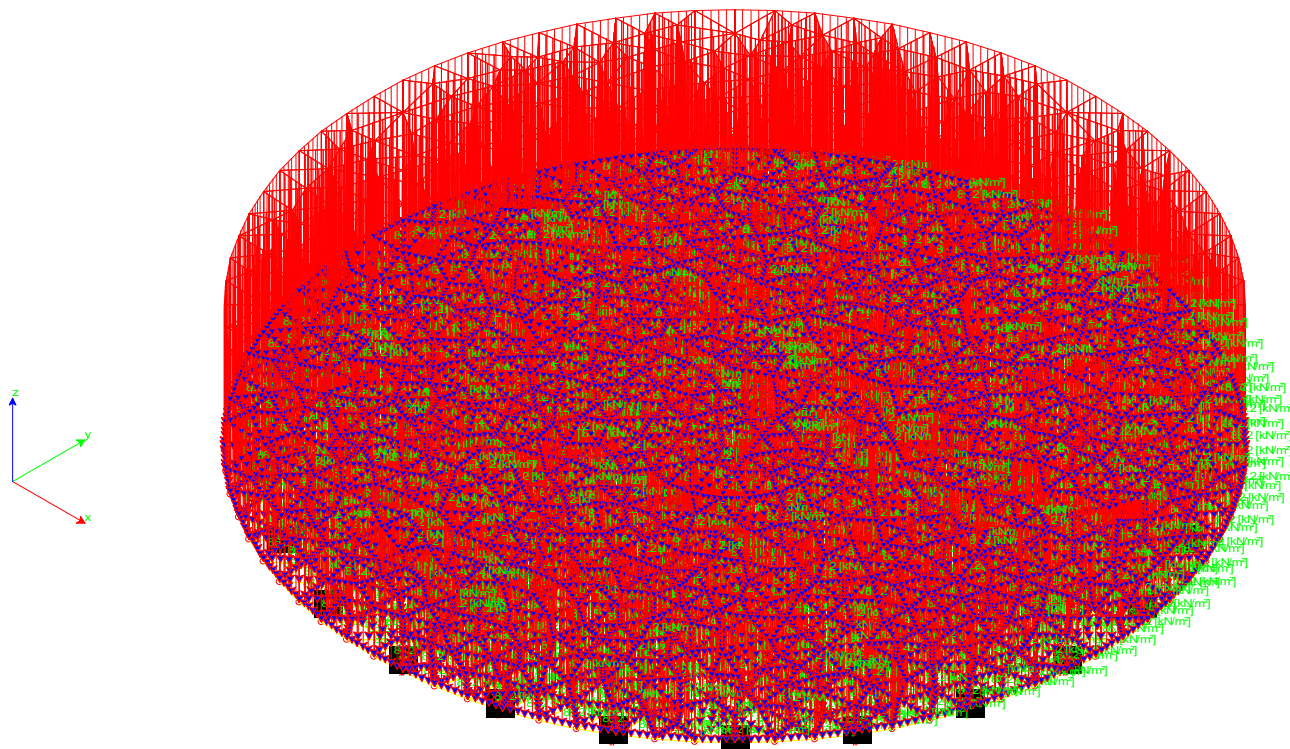


ENERGIA PULITA TRE S.r.l.
via della Chimica, 103
85100 Potenza (PZ)

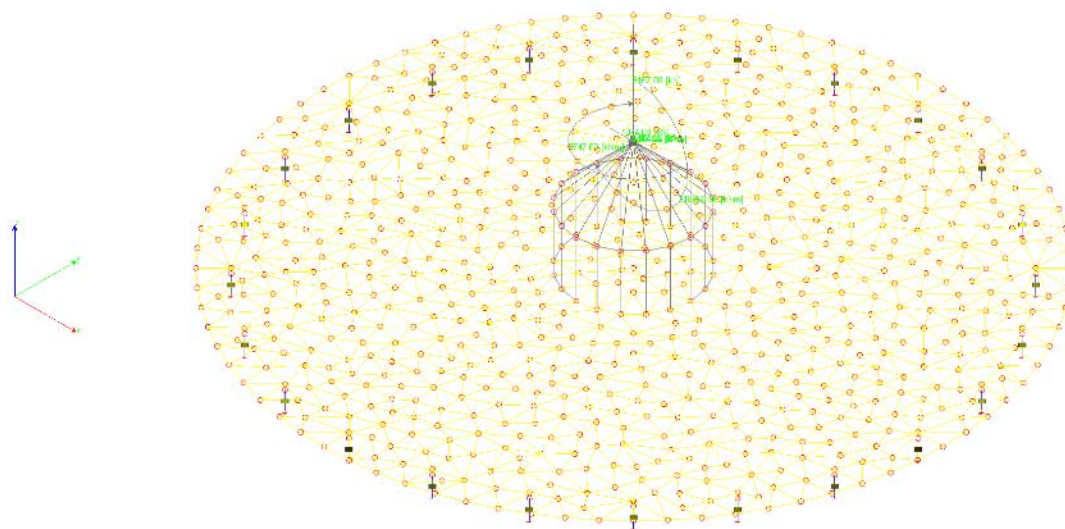
Sezioni Impiegate:

Sezione	Materiale	Tipo di Sezione	Parametri Dimensionali Commenti
1	4	Mesh isotropa	s= 345 [cm] Platea_AUX

Immagini esplicative delle condizioni di carico



Peso proprio e azioni permanenti e variabili applicate direttamente alla fondazione



Azioni scaricate sulla fondazione dalla sovrastruttura (esempio di una condizione di carico)

Progettazione:

via Clodoveo Bonazzi, 2
40013 Castel Maggiore (BO)

Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore

Committente:

ENERGIA PULITA TRE S.r.l.
via della Chimica, 103
85100 Potenza (PZ)

Condizioni di carico definite:

Condizione	
1	pp fondazione
2	Mxy comp
3	Mxy traz
4	Fxy comp
5	Fxy traz
6	SLE Rara
7	SLE QP

Combinazioni agli Stati Limite Ultimi

Combinazione di carico numero	
1	SLU Mxy comp
2	SLU Mxy traz
3	SLU Fxy comp
4	SLU Fxy traz

Comb.\Cond	1	2	3	4	5
1	1.3	1			
2	1		1		
3	1.3			1	
4	1				1

Combinazioni RARE Stati Limite di Esercizio

Combinazione di carico numero	
5	SLE R

Comb.\Cond	1	6
5	1	1

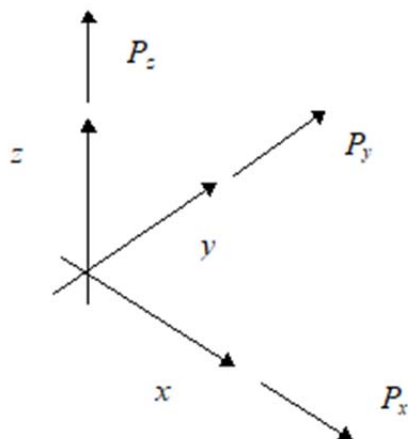
Combinazioni QUASI PERMANENTI Stati Limite di Esercizio

Combinazione di carico numero	
6	SLE QP

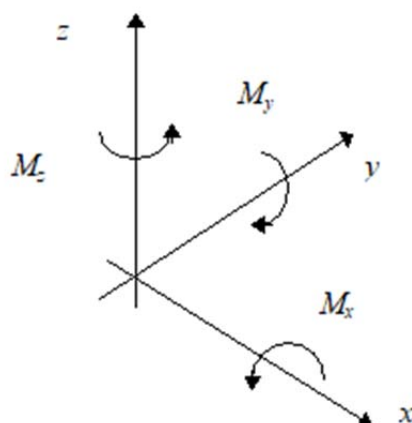
Comb.\Cond	1	7
6	1	1

Carichi e coppie applicati ai nodi**Convenzioni adottate**

La terna di riferimento generale è destrorsa per cui si hanno i seguenti segni positivi per i carichi o per le coppie direttamente applicati ai nodi:



Versi positivi delle forze concentrate applicate ai nodi.



Versi positivi delle coppie concentrate applicate ai nodi.

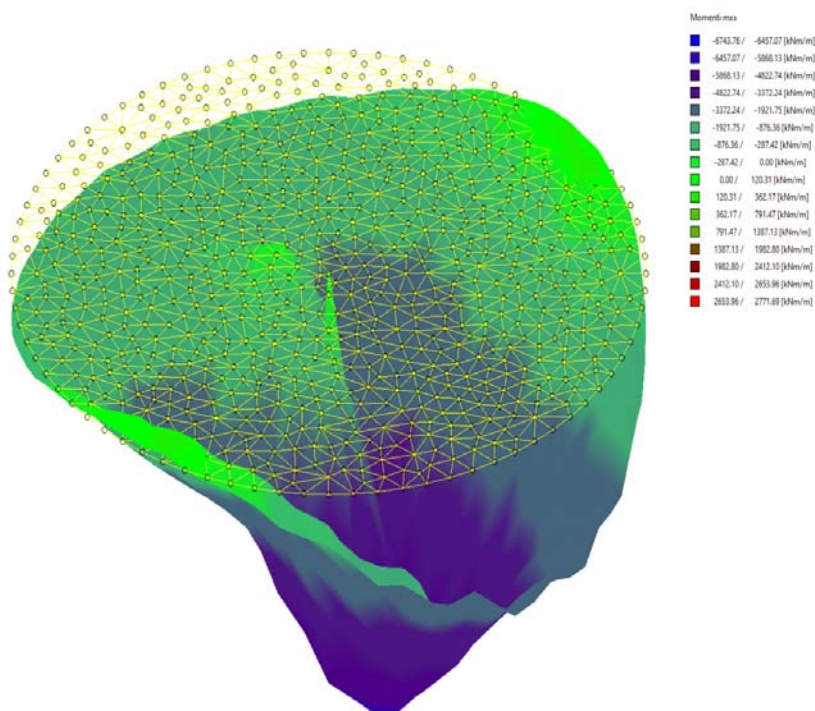
Nel seguito vengono riportati per ogni nodo, su cui agiscono carichi concentrati, le componenti del carico (P_x , P_y , P_z , M_x , M_y , M_z) e la condizione di carico cui esse fanno riferimento.

Nodo	Cond.	P_x [kN]	P_y [kN]	P_z [kN]	M_x [kNm]	M_y [kNm]	M_z [kNm]
848	2	1874.00	0.00	-8167.00	0.00	218961.00	-3747.00
	3	1874.00	0.00	-6282.00	0.00	218961.00	-3747.00
	4	1941.00	0.00	-8258.00	0.00	219066.00	-128.00
	5	1941.00	0.00	-6352.00	0.00	219066.00	-128.00
	6	1035.00	0.00	-6386.00	0.00	124454.00	-444.00
	7	960.40	0.00	-6692.60	0.00	102531.10	-2864.40

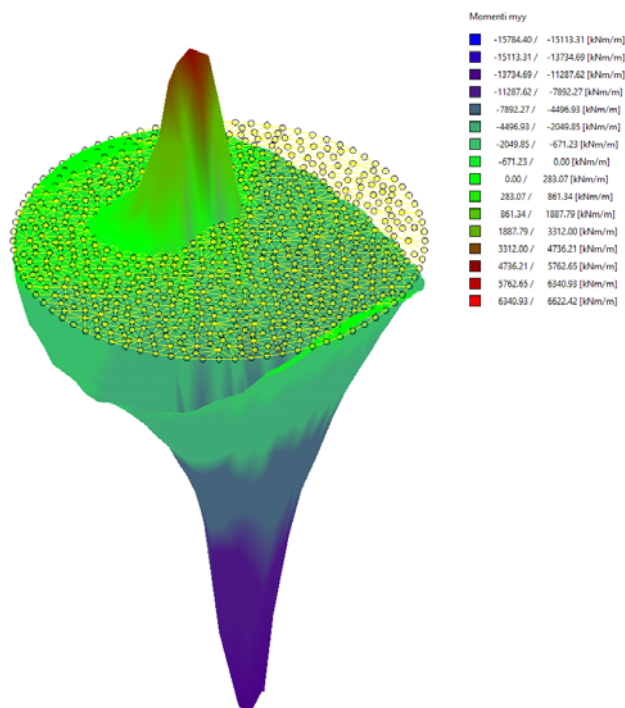
Principali risultati in termini di sollecitazioni nella soletta.

Si fa riferimento, quale esempio, alla combinazione di carico SLU n.ro 1

Momenti Mxx



Momenti Myy



Progettazione:



via Clodoveo Bonazzi, 2
40013 Castel Maggiore (BO)

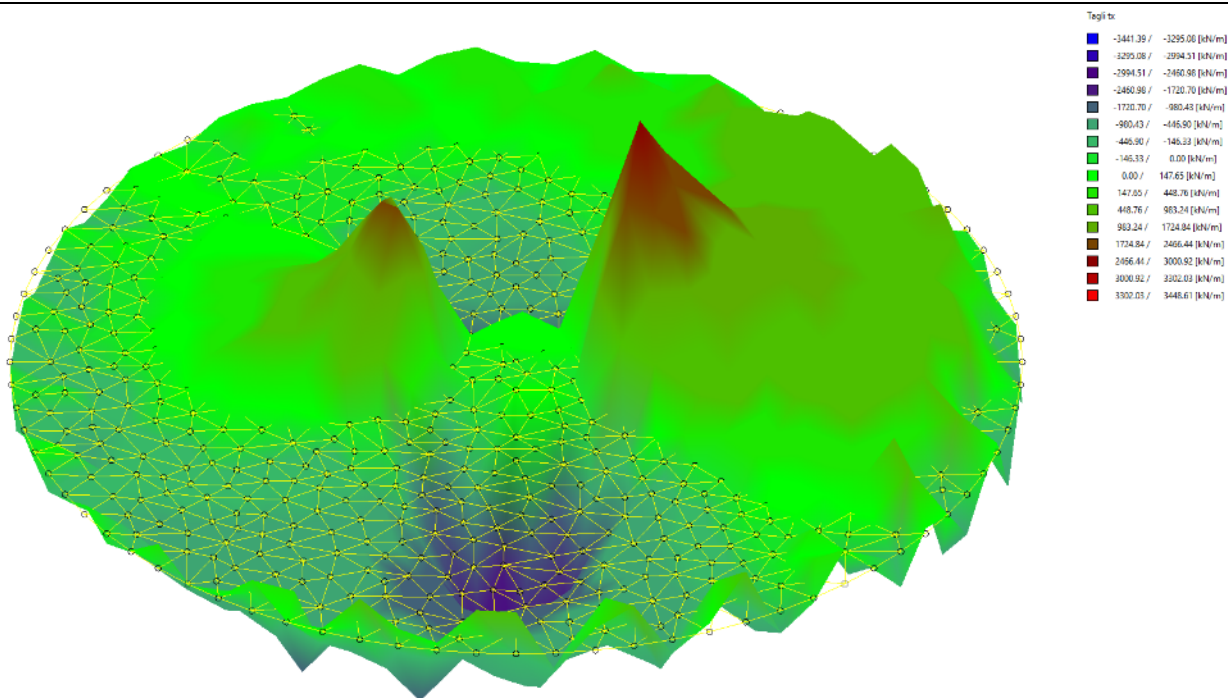
Relazione di calcolo fondazione
aerogeneratore

Committente:

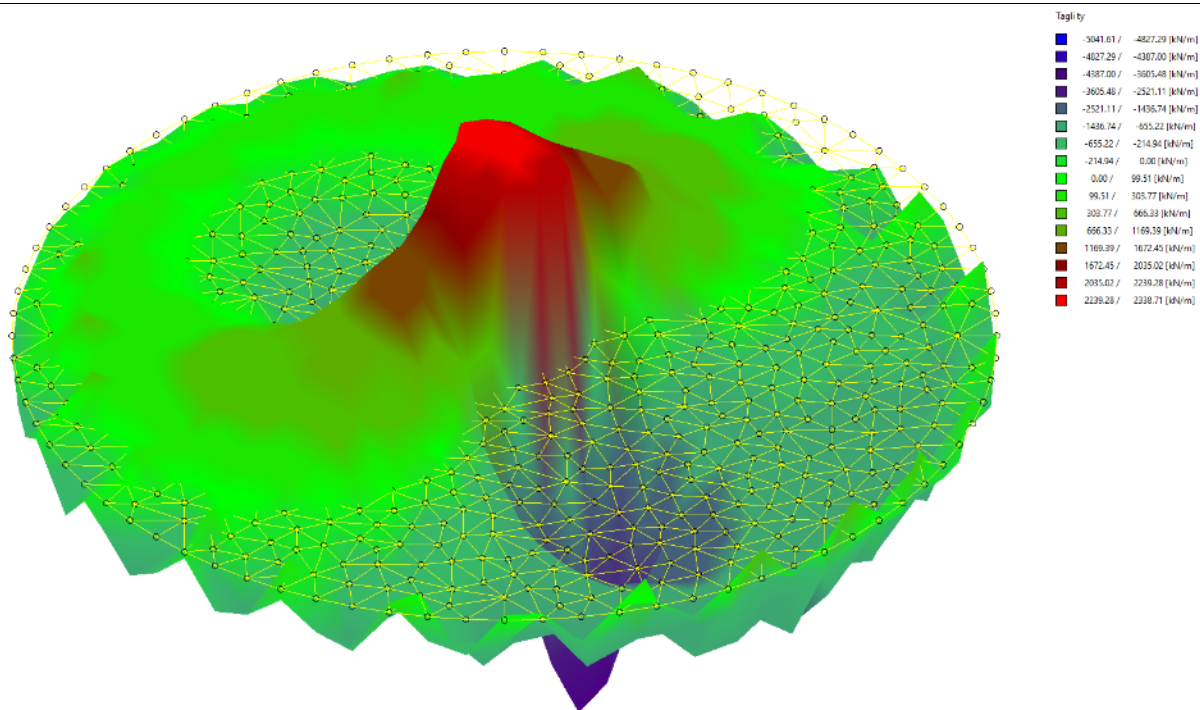


ENERGIA PULITA TRE S.r.l.
via della Chimica, 103
85100 Potenza (PZ)

Taglio Tx



Taglio Ty



Progettazione:

via Clodoveo Bonazzi, 2
40013 Castel Maggiore (BO)

**Relazione di calcolo fondazione
aerogeneratore**

Committente:

ENERGIA PULITA TRE S.r.l.
via della Chimica, 103
85100 Potenza (PZ)

La fondazione viene armata con armature tipiche diametro $\phi = 30\text{mm}$.

Disposte all'intradosso in un primo strato secondo una maglia rettangolare con passo di $100 \times 100\text{ mm}$.

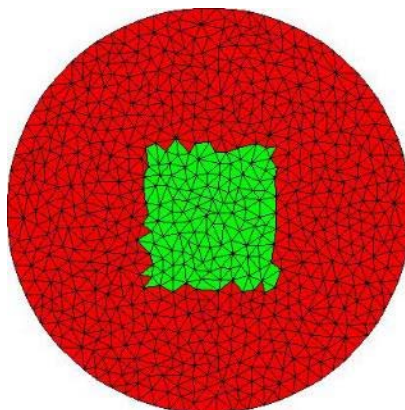
All'intradosso è presente anche un secondo strato di raffittimento costituito sempre da armature diametro $\phi = 30\text{mm}$ secondo una maglia rettangolare con passo di $200 \times 200\text{ mm}$ che interessa la porzione centrale del plinto.

Disposte all'estradosso secondo una maglia radiale/circonferenziale con passo di $200 \times 200\text{ mm}$.

Si prevedono quali armature a taglio, ed anche con la funzione di armature "di frettaggio" e di introduzione dei carichi trasmessi dai tirafondi al blocco di fondazione, cavallotti del diametro di 20mm disposti con passo di $300 \times 300\text{ mm}$.

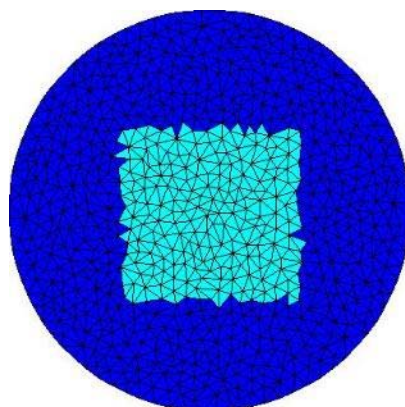
Il tutto è riepilogato nelle seguenti immagini.

Mappa armature di Estradosso





Colore	Armature
Red	top $\phi 24/20'$ X c=65.00 [mm] + $\phi 24/20'$ Y c=95.00 [mm]
Green	top $\phi 24/20'$ X c=65.00 [mm] + $\phi 24/20'$ Y c=95.00 [mm] top $\phi 30/20'$ X c=125.00 [mm] + $\phi 30/20'$ Y c=155.00 [mm]

Mappa armature di Intradosso



Colore	Armature
Blue	bottom $\phi 30/10'$ X c=65.00 [mm] + $\phi 30/10'$ Y c=95.00 [mm] + Stf. $\phi 20$ passo 30.0/passo 30.0 [cm]
Cyan	bottom $\phi 30/10'$ X c=65.00 [mm] + $\phi 30/10'$ Y c=95.00 [mm] + Stf. $\phi 20$ passo 30.0/passo 30.0 [cm] bottom $\phi 30/20'$ X c=125.00 [mm] + $\phi 30/20'$ Y c=155.00 [mm]

Progettazione:  via Clodoveo Bonazzi, 2 40013 Castel Maggiore (BO)	Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore	Committente:  ENERGIA PULITA TRE S.r.l. via della Chimica, 103 85100 Potenza (PZ)
--	---	--

Verifiche a flessione:

Verifiche SLU Flessione

Proprietà dei materiali

Acciaio B 450 C elastic

f_{yd} [MPa]	$\epsilon_{yd}\%$	$\epsilon_{ud}\%$	$\epsilon_{ud,Elastic}\%$
391.30	1.86	1.90	1.87

Calcestruzzo C 25/30 elastic

f_{cd} [MPa]	$\epsilon_{c2}\%$	$\epsilon_{cu}\%$	f_{ctd} [MPa]	$\epsilon_{ctd}\%$	E_{cm} [MPa]	$\epsilon_{cu,Elastic}\%$
14.17	-2.00	-2.00	1.20	0.08	14166.70	-2.00

N.B. Verifiche condotte in campo elastico

Quantitativo armature e copriferro

- sezione 2 H=3450.0 [mm]

Estradosso				Intradosso			
Af_x [mm ²] / m	$cf_{x,Eq}$ [mm]	Af_y [mm ²] / m	$cf_{y,Eq}$ [mm]	Af_x [mm ²] / m	$cf_{x,Eq}$ [mm]	Af_y [mm ²] / m	$cf_{y,Eq}$ [mm]
2262	65.00	2262	95.00	7069	65.00	7069	95.00

Azioni di verifica

N_x	-134.64	[kN/m]	N_{11}	155.88	[kN/m]
N_y	123.46	[kN/m]	N_{22}	-167.06	[kN/m]
N_{xy}	97.04	[kN/m]	α	-36.66	[°]
M_{xx}	-6064.38	[kNm/m]	M_{11}	-4775.33	[kNm/m]
M_y	-5016.06	[kNm/m]	M_{22}	-6305.11	[kNm/m]
M_{xy}	-557.06	[kNm/m]	α	5.18	[°]

Check

Cr=S/R	Posizione	Acciaio		Calcestruzzo		θ [°]
		$\epsilon_x\%$	$\epsilon_y\%$	$\epsilon_{min}\%$	$\epsilon_{max}\%$	
0.72	Estradosso	-0.396	-0.310	-0.134	-0.646	-50.17
	Intradosso	1.865	1.664	3.578	0.030	43.33

Progettazione:

via Clodoveo Bonazzi, 2
40013 Castel Maggiore (BO)

**Relazione di calcolo fondazione
aerogeneratore**

Committente:

ENERGIA PULITA TRE S.r.l.
via della Chimica, 103
85100 Potenza (PZ)

- sezione 2 H=3450.0 [mm]

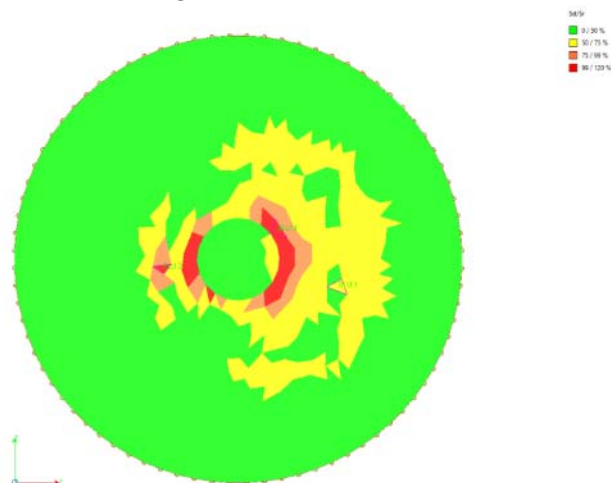
Estradosso				Intradosso			
Af_x [mm ²] / m	$cf_{x,Eq}$ [mm]	Af_y [mm ²] / m	$cf_{y,Eq}$ [mm]	Af_x [mm ²] / m	$cf_{x,Eq}$ [mm]	Af_y [mm ²] / m	$cf_{y,Eq}$ [mm]
2262	65.00	2262	95.00	10603	85.00	10603	115.00

Azioni di verifica

N_x	96.46	[kN/m]	N_{11}	117.24	[kN/m]
N_y	-14.06	[kN/m]	N_{22}	-34.83	[kN/m]
N_{xy}	52.23	[kN/m]	α	13.81	[°]
M_{xx}	3032.41	[kNm/m]	M_{11}	3070.17	[kNm/m]
M_y	374.04	[kNm/m]	M_{22}	336.28	[kNm/m]
M_{xy}	319.08	[kNm/m]	α	-1.13	[°]

Check

Cr=S/R	Posizione	Acciaio		Calcestruzzo		θ [°]
		ϵ_x ‰	ϵ_y ‰	ϵ_{min} ‰	ϵ_{max} ‰	
1.00	Estradosso	1.865	0.325	2.239	-0.006	22.80
	Intradosso	-0.202	-0.028	-0.001	-0.274	-69.49

Mappa di riepilogo dell'esito delle verifiche SLU:



Come si vede dalla mappa sintetica sopra riportata, la verifica è soddisfatta in tutta la fondazione a meno di ristrette zone concentrate attorno ai punti in cui gli sforzi sono trasmessi dalle torre alla fondazione per mezzo della gabbia di tirafondi.

Chiaramente queste sono zone diffusive in cui si manifestano risposte localizzate non del tipo a flessione pura, come quelle qui considerate.

La modellazione è stata condotta con elementi finiti bidimensionali, che mal si prestano a ricevere forze concentrate applicate nei nodi soprattutto se di intensità elevata come quelle del caso in oggetto.

Ed inoltre gli spessori del plinto di collegamento dei pali sono elevati, per cui tutti i meccanismi resistenti diffusivi che possono svilupparsi nello spessore dell'elemento non possono essere colti dalle verifiche conseguenti alla modellazione eseguita.

Tutto ciò premesso, si ritiene che quanto riscontrato non è da considerarsi elemento a detrimento del soddisfacimento delle verifiche, che risultano nel loro complesso positive.

Progettazione:  via Clodoveo Bonazzi, 2 40013 Castel Maggiore (BO)	Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore	Committente:  ENERGIA PULITA TRE S.r.l. via della Chimica, 103 85100 Potenza (PZ)
--	---	--

Verifiche SLE Rare Flessione

Proprietà dei materiali

Acciaio B 450 C elastic

f_{yd} [MPa]	$\epsilon_{yd}\%$	$\epsilon_{ud}\%$	σ [MPa]
391.30	1.86	1.90	360.00

Calcestruzzo C 25/30 elastic

f_{cd} [MPa]	$\epsilon_{c2}\%$	$\epsilon_{cu}\%$	f_{ctd} [MPa]	$\epsilon_{ctd}\%$	E_{cm} [MPa]	σ [MPa]
14.17	-2.00	-2.00	2.56	0.18	14166.70	15.00

Quantitativo armature e copriferro

- sezione 2 H=3450.0 [mm]



Estradosso				Intradosso			
Af_x [mm ²] / m	$cf_{x,Eq}$ [mm]	Af_y [mm ²] / m	$cf_{y,Eq}$ [mm]	Af_x [mm ²] / m	$cf_{x,Eq}$ [mm]	Af_y [mm ²] / m	$cf_{y,Eq}$ [mm]
2262	65.00	2262	95.00	7069	65.00	7069	95.00

Azioni di verifica

N_x	-90.78	[kN/m]	N_{11}	103.23	[kN/m]
N_y	87.43	[kN/m]	N_{22}	-106.58	[kN/m]
N_{xy}	55.37	[kN/m]	α	-34.12	[°]
M_{xx}	-3984.06	[kNm/m]	M_{11}	-3288.80	[kNm/m]
M_{yy}	-3468.54	[kNm/m]	M_{22}	-4163.80	[kNm/m]
M_{xy}	-353.50	[kNm/m]	α	8.76	[°]

Check

Cr=S/R	Posizione	Acciaio		Calcestruzzo		Stato	Ampiezza Fessure mm
		σ_x [MPa]	σ_y [MPa]	$\sigma_{c,Max}$ [MPa]	θ [°]		
0.42	Estradosso	-26.08	-22.54	-2.33	-61.46	NON Fessurato	0.000
	Intradosso	23.16	23.46	0.00	45.80	NON Fessurato	0.000

Progettazione:  via Clodoveo Bonazzi, 2 40013 Castel Maggiore (BO)	Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore	Committente:  ENERGIA PULITA TRE S.r.l. via della Chimica, 103 85100 Potenza (PZ)
--	---	--

- sezione 2 H=3450.0 [mm]

Estradosso				Intradosso			
Af_x [mm ²] / m	$cf_{x,Eq}$ [mm]	Af_y [mm ²] / m	$cf_{y,Eq}$ [mm]	Af_x [mm ²] / m	$cf_{x,Eq}$ [mm]	Af_y [mm ²] / m	$cf_{y,Eq}$ [mm]
2262	65.00	2262	95.00	10603	85.00	10603	115.00

Azioni di verifica

N_x	122.80	[kN/m]	N_{11}	133.98	[kN/m]
N_y	-146.72	[kN/m]	N_{22}	-157.91	[kN/m]
N_{xy}	-56.03	[kN/m]	α	21.52	[°]
M_{xx}	-4072.54	[kNm/m]	M_{11}	-1970.92	[kNm/m]
M_y	-2944.80	[kNm/m]	M_{22}	-5046.41	[kNm/m]
M_{xy}	-1430.63	[kNm/m]	α	-22.94	[°]

Check

Cr=S/R	Posizione	Acciaio		Calcestruzzo		Stato	Ampiezza Fessure mm
		σ_x [MPa]	σ_y [MPa]	$\sigma_{c,Max}$ [MPa]	θ [°]		
0.38	Estradosso	-24.58	-20.45	-2.90	-50.04	NON Fessurato	0.000
	Intradosso	21.33	20.53	0.00	44.11	NON Fessurato	0.000

- sezione 2 H=3450.0 [mm]

Estradosso				Intradosso			
Af_x [mm ²] / m	$cf_{x,Eq}$ [mm]	Af_y [mm ²] / m	$cf_{y,Eq}$ [mm]	Af_x [mm ²] / m	$cf_{x,Eq}$ [mm]	Af_y [mm ²] / m	$cf_{y,Eq}$ [mm]
5796	101.59	5796	131.59	10603	85.00	10603	115.00

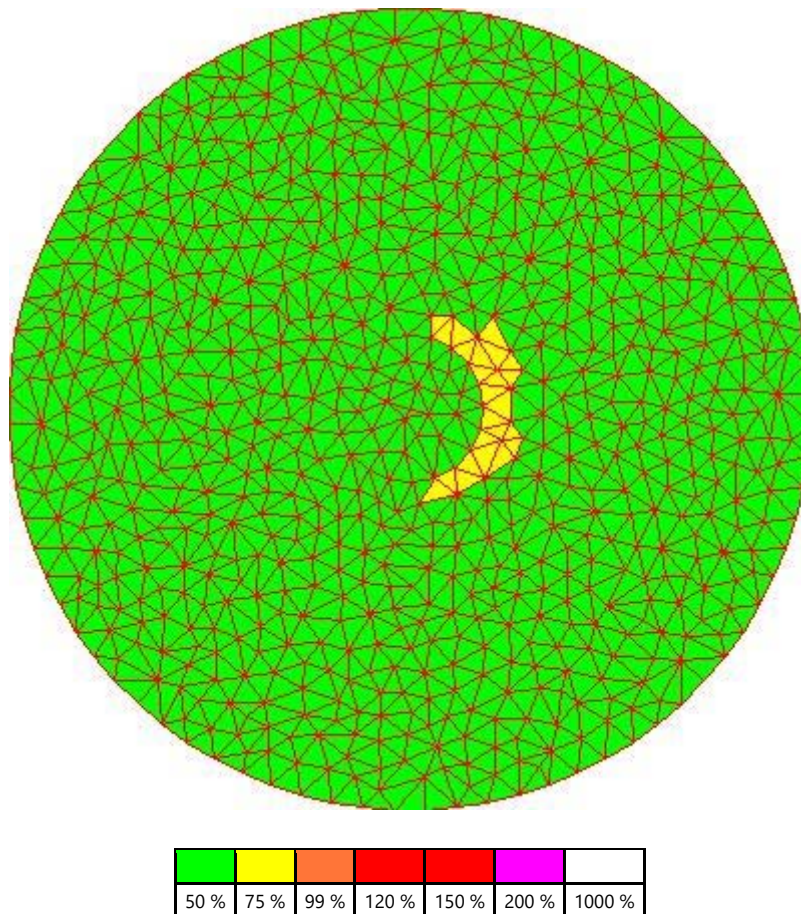
Azioni di verifica

N_x	-175.57	[kN/m]	N_{11}	-583.92	[kN/m]
N_y	-71.18	[kN/m]	N_{22}	337.17	[kN/m]
N_{xy}	-457.58	[kN/m]	α	-30.65	[°]
M_{xx}	-8843.10	[kNm/m]	M_{11}	-3799.84	[kNm/m]
M_y	-4480.36	[kNm/m]	M_{22}	-9523.62	[kNm/m]
M_{xy}	-1852.57	[kNm/m]	α	37.77	[°]



Check

Cr=S/R	Posizione	Acciaio		Calcestruzzo		Stato	Ampiezza Fessure mm
		σ_x [MPa]	σ_y [MPa]	$\sigma_{c,Max}$ [MPa]	θ [°]		
0.66	Estradosso	-81.65	-38.92	-7.72	-58.69	NON Fessurato	0.000
	Intradosso	192.82	87.29	0.00	33.15	Fessurato	0.231

Mappa di riepilogo dell'esito delle verifiche SLE:



Come si vede dalla mappa sintetica sopra riportata, la verifica è soddisfatta in tutta la fondazione.

Progettazione:  via Clodoveo Bonazzi, 2 40013 Castel Maggiore (BO)	Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore	Committente:  ENERGIA PULITA TRE S.r.l. via della Chimica, 103 85100 Potenza (PZ)
--	---	--

Verifiche SLE Quasi Permanente Flessione

Proprietà dei materiali

Acciaio B 450 C elastic

f_{yd} [MPa]	$\epsilon_{yd}\%$	$\epsilon_{ud}\%$	σ [MPa]
391.30	1.86	1.90	450.00

Calcestruzzo C 25/30 elastic

f_{cd} [MPa]	$\epsilon_{c2}\%$	$\epsilon_{cu}\%$	f_{ctd} [MPa]	$\epsilon_{ctd}\%$	E_{cm} [MPa]	σ [MPa]	w_{Max} mm
14.17	-2.00	-2.00	2.56	0.18	14166.70	11.25	0.30

Quantitativo armature e copriferro

- sezione 2 H=3450.0 [mm]



Estradosso				Intradosso			
Af_x [mm ²] / m	$cf_{x,Eq}$ [mm]	Af_y [mm ²] / m	$cf_{y,Eq}$ [mm]	Af_x [mm ²] / m	$cf_{x,Eq}$ [mm]	Af_y [mm ²] / m	$cf_{y,Eq}$ [mm]
2262	65.00	2262	95.00	7069	65.00	7069	95.00

Azioni di verifica

N_x	-79.17	[kN/m]	N_{11}	100.75	[kN/m]
N_y	79.39	[kN/m]	N_{22}	-100.53	[kN/m]
N_{xy}	61.99	[kN/m]	α	-37.20	[°]
M_{xx}	-3670.71	[kNm/m]	M_{11}	-3119.86	[kNm/m]
M_{yy}	-3305.58	[kNm/m]	M_{22}	-3856.43	[kNm/m]
M_{xy}	-319.85	[kNm/m]	α	11.95	[°]

Check

Cr=S/R	Posizione	Acciaio		Calcestruzzo		Stato	Ampiezza Fessure mm
		σ_x [MPa]	σ_y [MPa]	$\sigma_{c,Max}$ [MPa]	θ [°]		
0.39	Estradosso	-24.00	-21.50	-2.14	-58.78	NON Fessurato	0.000
	Intradosso	21.27	22.39	0.00	49.01	NON Fessurato	0.000

Progettazione:  via Clodoveo Bonazzi, 2 40013 Castel Maggiore (BO)	Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore	Committente:  ENERGIA PULITA TRE S.r.l. via della Chimica, 103 85100 Potenza (PZ)
--	---	--

- sezione 2 H=3450.0 [mm]

Estradosso				Intradosso			
Af_x [mm ²] / m	$cf_{x,Eq}$ [mm]	Af_y [mm ²] / m	$cf_{y,Eq}$ [mm]	Af_x [mm ²] / m	$cf_{x,Eq}$ [mm]	Af_y [mm ²] / m	$cf_{y,Eq}$ [mm]
2262	65.00	2262	95.00	10603	85.00	10603	115.00

Azioni di verifica

N_x	101.33	[kN/m]	N_{11}	126.57	[kN/m]
N_y	-127.27	[kN/m]	N_{22}	-152.50	[kN/m]
N_{xy}	-80.03	[kN/m]	α	15.31	[°]
M_{xx}	-3852.24	[kNm/m]	M_{11}	-2110.94	[kNm/m]
M_y	-2928.49	[kNm/m]	M_{22}	-4669.78	[kNm/m]
M_{xy}	-1193.14	[kNm/m]	α	-22.77	[°]

Check

Cr=S/R	Posizione	Acciaio		Calcestruzzo		Stato	Ampiezza Fessure mm
		σ_x [MPa]	σ_y [MPa]	$\sigma_{c,Max}$ [MPa]	θ [°]		
0.35	Estradosso	-23.42	-20.11	-2.72	-49.77	NON Fessurato	0.000
	Intradosso	20.50	19.93	0.00	44.24	NON Fessurato	0.000

- sezione 2 H=3450.0 [mm]

Estradosso				Intradosso			
Af_x [mm ²] / m	$cf_{x,Eq}$ [mm]	Af_y [mm ²] / m	$cf_{y,Eq}$ [mm]	Af_x [mm ²] / m	$cf_{x,Eq}$ [mm]	Af_y [mm ²] / m	$cf_{y,Eq}$ [mm]
5796	101.59	5796	131.59	10603	85.00	10603	115.00

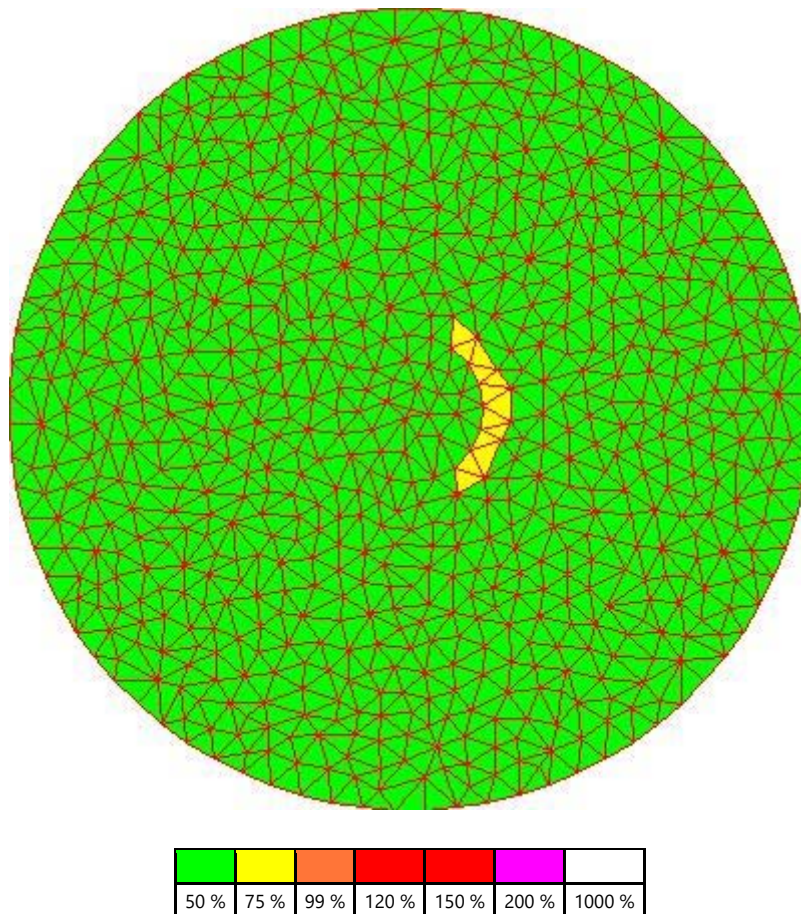
Azioni di verifica

N_x	-221.99	[kN/m]	N_{11}	-532.91	[kN/m]
N_y	-4.12	[kN/m]	N_{22}	306.80	[kN/m]
N_{xy}	-405.47	[kN/m]	α	-34.92	[°]
M_{xx}	-7935.72	[kNm/m]	M_{11}	-3631.47	[kNm/m]
M_y	-4249.45	[kNm/m]	M_{22}	-8553.70	[kNm/m]
M_{xy}	-1630.93	[kNm/m]	α	38.36	[°]

Check

Cr=S/R	Posizione	Acciaio		Calcestruzzo		Stato	Ampiezza Fessure mm
		σ_x [MPa]	σ_y [MPa]	$\sigma_{c,Max}$ [MPa]	θ [°]		
0.59	Estradosso	-62.02	-28.92	-5.80	-63.87	NON Fessurato	0.000
	Intradosso	85.69	34.29	0.00	25.88	Fessurato	0.078

Mappa di riepilogo dell'esito delle verifiche SLE Quasi Permanente:



Come si vede dalla mappa sintetica sopra riportata, la verifica è soddisfatta in tutta la fondazione.

Progettazione:



via Clodoveo Bonazzi, 2
40013 Castel Maggiore (BO)

Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore

Committente:



ENERGIA PULITA TRE S.r.l.
via della Chimica, 103
85100 Potenza (PZ)

Verifiche punzonamento da parte dei pali di fondazione

Proprietà dei materiali

Calcestruzzo				Acciaio
f_{ck}	f_{cd}	$V_{Rd,max}$	$C_{Rd,c}$	f_{yd}
[MPa]	[MPa]	[MPa]		[MPa]
25.00	14.17	3.83	0.12	391.30

Elemento	Perimetro Critico [mm]	H [mm]	Tipo	A_{soil} [m ²]	Comb. Crit.	σ_{soil} [MPa]	N_{Ed} [kN]	N_{soil} [kN]	V_{Ed} [kN]	M_{XEd} [kNm]	M_{YEd} [kNm]	B_x [mm]	B_y [mm]	Estradosso		Intradosso		d [mm]	W_1 [mm ²]	k	β	k_v	ρ	V_{Ed} [MPa]	$V_{Rd,c}$ [MPa]	V_{Ed}/V_{Rd}	u_o [mm]	$V_{Ed,max}$ [MPa]	$V_{Ed,max}/V_{Rd,max}$
														Af [mm ²]/m	cf [mm]	Af [mm ²]/m	cf [mm]												
Pilastro Nodo 813 Sezione 1	13156.96	3450.00	Bordo	0.0	3	0.00	2617.77	0.00	2617.77	-2.42	15.66	1199.10	1199.10	2262	80.00	7069	80.00	3370.00	3418004990	0.600	1.40	1.244	0.0007	0.08	0.24	0.34	3597.29	0.30	0.08
Pilastro Nodo 806 Sezione 1	13150.18	3450.00	Bordo	0.0	3	0.00	3045.23	0.00	3045.23	-2.61	16.18	1199.10	1199.10	2262	80.00	7069	80.00	3370.00	3396019363	0.600	1.40	1.244	0.0007	0.10	0.24	0.40	3597.29	0.35	0.09
Pilastro Nodo 805 Sezione 1	13150.18	3450.00	Bordo	0.0	3	0.00	2188.06	0.00	2188.06	-2.10	15.27	1199.10	1199.10	2262	80.00	7069	80.00	3370.00	3412395859	0.600	1.40	1.244	0.0007	0.07	0.24	0.28	3597.29	0.25	0.07
Pilastro Nodo 782 Sezione 1	13147.85	3450.00	Bordo	0.0	3	0.00	3445.56	0.00	3445.56	-2.63	16.80	1199.10	1199.10	2262	80.00	7069	80.00	3370.00	3361491394	0.600	1.40	1.244	0.0007	0.11	0.24	0.45	3597.29	0.40	0.10
Pilastro Nodo 781 Sezione 1	13147.86	3450.00	Bordo	0.0	3	0.00	1787.63	0.00	1787.63	-1.74	15.03	1199.10	1199.10	2262	80.00	7069	80.00	3370.00	3389011383	0.600	1.40	1.244	0.0007	0.06	0.24	0.23	3597.29	0.21	0.05
Pilastro Nodo 734 Sezione 1	13162.48	3450.00	Bordo	0.0	3	0.00	3790.27	0.00	3790.27	-2.43	17.44	1199.10	1199.10	2262	80.00	7069	80.00	3370.00	3317700195	0.600	1.40	1.244	0.0007	0.12	0.24	0.49	3597.29	0.44	0.11
Pilastro Nodo 733 Sezione 1	13162.48	3450.00	Bordo	0.0	3	0.00	1445.12	0.00	1445.12	-1.40	14.92	1199.10	1199.10	2262	80.00	7069	80.00	3370.00	3348966599	0.600	1.40	1.244	0.0007	0.05	0.24	0.19	3597.29	0.17	0.04
Pilastro Nodo 654 Sezione 1	13147.86	3450.00	Bordo	0.0	3	0.00	4052.51	0.00	4052.51	-1.98	17.99	1199.10	1199.10	2262	80.00	7069	80.00	3370.00	3260236359	0.600	1.40	1.244	0.0007	0.13	0.24	0.53	3597.29	0.47	0.12
Pilastro Nodo 653 Sezione 1	13147.85	3450.00	Bordo	0.0	3	0.00	1181.12	0.00	1181.12	-1.11	14.89	1199.10	1199.10	2262	80.00	7069	80.00	3370.00	3285956573	0.600	1.40	1.244	0.0007	0.04	0.24	0.15	3597.29	0.14	0.04
Pilastro Nodo 553 Sezione 1	13150.18	3450.00	Bordo	0.0	3	0.00	4217.79	0.00	4217.79	-1.36	18.37	1199.10	1199.10	2262	80.00	7069	80.00	3370.00	3201578522	0.600	1.40	1.244	0.0007	0.13	0.24	0.55	3597.29	0.49	0.13
Pilastro Nodo 552 Sezione 1	13150.18	3450.00	Bordo	0.0	3	0.00	1015.27	0.00	1015.27	-0.87	14.89	1199.10	1199.10	2262	80.00	7069	80.00	3370.00	3216185379	0.600	1.40	1.244	0.0007	0.03	0.24	0.13	3597.29	0.12	0.03
Pilastro Nodo 438 Sezione 1	13156.96	3450.00	Bordo	0.0	3	0.00	4275.58	0.00	4275.58	-0.63	18.51	1199.10	1199.10	2262	80.00	7069	80.00	3370.00	3151720810	0.600	1.40	1.244	0.0007	0.14	0.24	0.56	3597.29	0.49	0.13
Pilastro Nodo 434 Sezione 1	13156.96	3450.00	Bordo	0.0	3	0.00	959.45	0.00	959.45	-0.67	14.88	1199.10	1199.10	2262	80.00	7069	80.00	3370.00	3151742172	0.600	1.40	1.244	0.0007	0.03	0.24	0.12	3597.29	0.11	0.03

Progettazione:

via Clodoveo Bonazzi, 2
40013 Castel Maggiore (BO)

Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore

Committente:

ENERGIA PULITA TRE S.r.l.
via della Chimica, 103
85100 Potenza (PZ)

Pilastro Nodo 320 Sezione 1	13150.18	3450.00	Bordo	0.0	3	0.00	4218.17	0.00	4218.17	0.11	18.37	1199.10	1199.10	2262	80.00	7069	80.00	3370.00	3198937798	0.600	1.40	1.244	0.0007	0.13	0.24	0.55	3597.29	0.49	0.13
Pilastro Nodo 319 Sezione 1	13150.18	3450.00	Bordo	0.0	3	0.00	1015.73	0.00	1015.73	-0.46	14.85	1199.10	1199.10	2262	80.00	7069	80.00	3370.00	3212993622	0.600	1.40	1.244	0.0007	0.03	0.24	0.13	3597.29	0.12	0.03
Pilastro Nodo 216 Sezione 1	13147.85	3450.00	Bordo	0.0	3	0.00	4052.65	0.00	4052.65	0.74	18.00	1199.10	1199.10	2262	80.00	7069	80.00	3370.00	3257973480	0.600	1.40	1.244	0.0007	0.13	0.24	0.53	3597.29	0.47	0.12
Pilastro Nodo 215 Sezione 1	13147.85	3450.00	Bordo	0.0	3	0.00	1181.04	0.00	1181.04	-0.21	14.83	1199.10	1199.10	2262	80.00	7069	80.00	3370.00	3283433914	0.600	1.40	1.244	0.0007	0.04	0.24	0.15	3597.29	0.14	0.04
Pilastro Nodo 141 Sezione 1	13162.48	3450.00	Bordo	0.0	3	0.00	3790.11	0.00	3790.11	1.20	17.45	1199.10	1199.10	2262	80.00	7069	80.00	3370.00	3315917587	0.600	1.40	1.244	0.0007	0.12	0.24	0.49	3597.29	0.44	0.11
Pilastro Nodo 140 Sezione 1	13162.48	3450.00	Bordo	0.0	3	0.00	1445.21	0.00	1445.21	0.11	14.84	1199.10	1199.10	2262	80.00	7069	80.00	3370.00	3347377396	0.600	1.40	1.244	0.0007	0.05	0.24	0.19	3597.29	0.17	0.04
Pilastro Nodo 95 Sezione 1	13147.85	3450.00	Bordo	0.0	3	0.00	3446.03	0.00	3446.03	1.42	16.80	1199.10	1199.10	2262	80.00	7069	80.00	3370.00	3360385513	0.600	1.40	1.244	0.0007	0.11	0.24	0.45	3597.29	0.40	0.10
Pilastro Nodo 94 Sezione 1	13147.85	3450.00	Bordo	0.0	3	0.00	1787.98	0.00	1787.98	0.48	14.95	1199.10	1199.10	2262	80.00	7069	80.00	3370.00	3388368607	0.600	1.40	1.244	0.0007	0.06	0.24	0.23	3597.29	0.21	0.05
Pilastro Nodo 72 Sezione 1	13150.18	3450.00	Bordo	0.0	3	0.00	3045.76	0.00	3045.76	1.41	16.16	1199.10	1199.10	2262	80.00	7069	80.00	3370.00	3395547867	0.600	1.40	1.244	0.0007	0.10	0.24	0.40	3597.29	0.35	0.09
Pilastro Nodo 71 Sezione 1	13150.18	3450.00	Bordo	0.0	3	0.00	2188.02	0.00	2188.02	0.87	15.21	1199.10	1199.10	2262	80.00	7069	80.00	3370.00	3412292480	0.600	1.40	1.244	0.0007	0.07	0.24	0.28	3597.29	0.25	0.07
Pilastro Nodo 63 Sezione 1	13156.96	3450.00	Bordo	0.0	3	0.00	2617.49	0.00	2617.49	1.21	15.61	1199.10	1199.10	2262	80.00	7069	80.00	3370.00	3417965317	0.600	1.40	1.244	0.0007	0.08	0.24	0.34	3597.29	0.30	0.08

Si verifica che in corrispondenza di ogni palo risultano soddisfatte le condizioni:

$V_{Ed} < V_{Rd,c}$ sul perimetro di verifica di base u_1

$V_{Ed,max} < V_{Rd,max}$ sul perimetro del palo

La verifica in corrispondenza di tutti i pali è soddisfatta.

Progettazione:



via Clodoveo Bonazzi, 2
40013 Castel Maggiore (BO)

Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore

Committente:



ENERGIA PULITA TRE S.r.l.
via della Chimica, 103
85100 Potenza (PZ)

Verifiche a taglio

Verifiche Verifiche a Taglio SLU

Proprietà dei materiali

Acciaio B 450 C elastic

f_{yd} [MPa]	ϵ_{yd} ‰	ϵ_{ud} ‰	$\epsilon_{ud,elastic}$ ‰
391.30	1.86	1.90	1.87

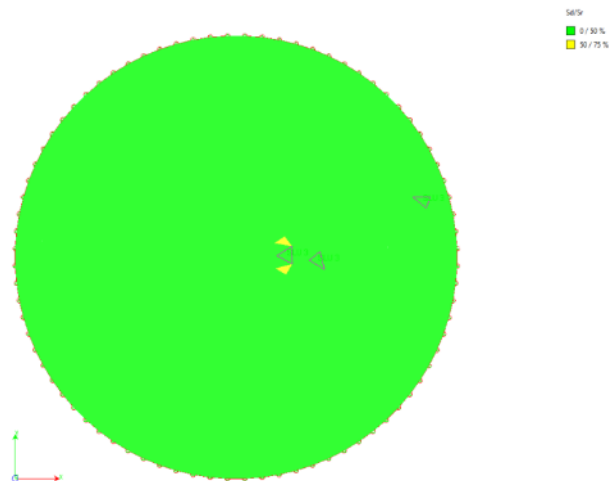
Calcestruzzo C 25/30 elastic

f_{cd} [MPa]	ϵ_{cs} ‰	ϵ_{cu} ‰	f_{ctd} [MPa]	ϵ_{ctd} ‰	E_{cm} [MPa]	$\epsilon_{cu,elastic}$ ‰
14.17	-2.00	-2.00	1.20	0.08	14166.70	-2.00



cotg(θ) di equilibrio

cotg(θ) di equilibrio

Nodi	Sez.	Comb.	Cr=S/R	Sd				Sr						
				V _{Ed,x} [kN/m]	V _{Ed,y} [kN/m]	V _{Ed} [kN/m]	d [mm]	V _{uc,x} [kN/m]	V _{uc,y} [kN/m]	V _{uc} [kN/m]	A _{sw} [mm ²]	s [mm]	V _{Rd,s} [kN/m]	V _{Rd} [kN/m]
elemento nodi 528 553 556	2	3	0.24	1884.89	1201.97	2235.52	3340.00	869.30	869.30	1229.37	3491	300.00	9482.68	9482.68
elemento nodi 398 442 421	2	3	0.27	2536.34	-80.26	2537.60	3320.00	991.71	991.71	1402.49	3491	300.00	9425.90	9425.90
elemento nodi 437 415 454	2	3	0.54	5051.56	184.05	5054.91	3320.00	991.71	991.71	1402.49	3491	300.00	9425.90	9425.90



Come mostrato nell'immagine soprastante le verifiche a taglio risultano soddisfatte in tutte le aree della platea. Anche che in corrispondenza dei pali, dove sono state già effettuate le verifiche a punzonamento.

Progettazione:  via Clodoveo Bonazzi, 2 40013 Castel Maggiore (BO)	Relazione di calcolo fondazione aerogeneratore	Committente:  ENERGIA PULITA TRE S.r.l. via della Chimica, 103 85100 Potenza (PZ)
---	---	---

20 GIUDIZIO MOTIVATO DI ACCETTABILITÀ DEI RISULTATI

Le elaborazioni di carattere geotecnico sono condotte con noti metodi di calcolo analitico, mutuati dalla bibliografia tecnica e scientifica. Risultano tutti di comprovata affidabilità, e sono implementati in semplici fogli di calcolo che da anni sono stati ben validati dagli scriventi progettisti nel corso di numerosi progetti.

I risultati delle elaborazioni numeriche di carattere strutturale sono stati sottoposti a controlli dagli scriventi progettisti delle opere in oggetto. Inoltre sulla base di considerazioni riguardanti gli stati tensionali e deformativi determinati, si è valutata la validità delle scelte operate in sede di schematizzazione e di modellazione della struttura e delle azioni.