



PROGETTO PER LA COSTRUZIONE E L'ESERCIZIO DI UN
IMPIANTO EOLICO DELLA POTENZA DI 92,4 MW
DENOMINATO "MONTESECCO" DA REALIZZARSI NEI
COMUNI DI CHIEUTI E SERRACAPRIOLA (FG) CON LE
RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE ELETTRICHE

CALCOLI PRELIMINARI PLINTO

Rev. 0.0

Data: 28 dicembre 2023

QQR-WND-025.REL045

Committente:

Repsol Montepuccio 1 S.r.l
via Michele Mercati n. 39
00197 Roma (RM)
C. F. e P. IVA 17293391003
PEC: repsolmontepuccio1@pec.it

Progetto e sviluppo:

Queequeg Renewables, Ltd
2nd Floor, the Works,
14 Turnham Green Terrace Mews,
W41QU London (UK)
Company number: 11780524
email: mail@quren.co.uk

SOMMARIO

1	Premessa.....	4
2	Normativa	5
3	Dati generali.....	6
4	Inquadramento generale progetto	7
5	Inquadramento geologico.....	9
6	Inquadramento geomorfologico	11
7	Inquadramento geotecnico.....	13
8	Descrizione dell'aerogeneratore	14
9	Analisi dei carichi	16
9.1.1	Materiali utilizzati.....	16
9.1.2	Pesi propri.....	17
9.1.3	Analisi del vento	17
9.1.4	Azione sismica.....	22
9.1.5	Combinazione di carico	25
10	Verifica plinti	26
10.1	Verifica a ribaltamento	27
10.2	Verifica a scorrimento.....	27
10.3	Schemi fondazione.....	28
	Tabella 1 – Altitudine aereogeneratori	8
	Tabella 2 – Pesi dell'unità di volume dei principali materiali	16
	Tabella 3 – Proprietà degli acciai di progetto.....	16
	Tabella 4 – Classe di esposizione calcestruzzo	16
	Tabella 5 – Tabella di zonizzazione	17
	Tabella 6 – Valori dei parametri $v_{b,0}$, a_0 , k_s	18
	Tabella 7 – Pressione cinetica di riferimento	18
	Tabella 8 – Forze e momenti applicati alla torre.....	20
	Tabella 9 – Forze del vento sulla Pala 1	20
	Tabella 10 – Forze del vento sulle pale 2-3	21
	Tabella 11 – Coordinate reticolo di riferimento	22
	Tabella 12 – Parametri sismici di base	22
	Tabella 13 – Categoria di sottosuolo.....	23
	Tabella 14 – Coefficienti di stratigrafia	23
	Tabella 15 – categoria topografica e coefficiente S_T	24
	Tabella 16 - Extreme loads 170-H 135	25
	Tabella 17 – Combinazione di carico di progetto.....	25

Tabella 18 – Sistema di riferimento	25
Tabella 19 - Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni.....	26
Tabella 20 - Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno	26
Figura 1 – Inquadramento generale.....	7
Figura 2 – Inquadramento satellitare.....	8
Figura 3 - Stralcio della Carta Geologica d'Italia in scala 1:100.000, Foglio n. 155 – San Severo	9
Figura 4 – Schemi geomorfologici	11
Figura 5 - Vista laterale dell'aerogeneratore a progetto.....	14
Figura 6 – Prospetti dell'aerogeneratore	15
Figura 7 – Denominazione pale.....	19
Figura 8 - Spettri di risposta e parametri sismici di base.....	23
Figura 9 – Spettro di risposta per lo stato limite SLV	24

1 Premessa

L'impianto, di potenza pari a 92,4 MW, verrà allacciato alla Rete Elettrica Nazionale di Alta Tensione attraverso la stazione elettrica di proprietà di Terna S.p.A. le opere da realizzare riguardano i comuni di Chieuti, Serracapriola, San Paolo di Civitate, Torremaggiore, nonché i comuni di Rotello e San Martino in Pensilis in ove è previsto il potenziamento/rifacimento di direttrici RTN 150kV esistenti e la realizzazione di due nuovi elettrodotti RTN a 150kV. Nello scenario progettuale prospettato, l'elettrodotto in antenna a 36 kV per il collegamento della centrale alla citata stazione RTN costituisce impianto di utenza per la connessione, mentre lo stallo arrivo produttore a 36 kV nella medesima stazione costituisce impianto di rete per la connessione.

2 Normativa

Le fasi di analisi e verifica della struttura sono state condotte in accordo alle seguenti disposizioni normative, per quanto applicabili in relazione al criterio di calcolo adottato dal progettista:

- **Legge 5 novembre 1971 n. 1086** (G.U. 21 dicembre 1971 n. 321) "Norme per la disciplina delle opere di conglomerato cementizio armato, normale e precompresso ed a struttura metallica".
- **Legge 2 febbraio 1974 n. 64** (G.U. 21 marzo 1974 n. 76). "Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche".
- **D. M. Infrastrutture Trasporti 17/01/2018** (G.U. 20/02/2018 n. 42 - Suppl. Ord. n. 8) "Aggiornamento delle Norme tecniche per le Costruzioni".
- **Circolare gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP.** (G.U. Serie Generale n. 35 del 11/02/2019 Suppl. Ord. n.5)
- Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni"» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018.
- **Eurocodice 2** - "Progettazione delle strutture in calcestruzzo" - EN 1992.
- **Eurocodice 3** - "Progettazione delle strutture in acciaio" - EN 1993
- **Eurocodice 7** - "Progettazione geotecnica" - EN 1997.
- **Eurocodice 8** - Indicazioni progettuali per la resistenza sismica delle strutture – Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici.
- **Istruzioni per la valutazione delle Azioni sulle Costruzioni.** (C.N.R. 10012/85);
- **UNI-EN 206/2021** "Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità"
- **IEC 61400-1**, 2° edition, Februar 1999: Wind turbine generator system – Part1: Safety requirements;

3 Dati generali

NOME PROGETTO	"Progetto per la costruzione e l'esercizio di un impianto eolico della potenza di 92,4 Mw denominato "Montesecco" da realizzarsi nei comuni di Chieuti e Serracapriola (FG) con le relative opere di connessione elettriche"
NAZIONE	Italia
LOCALITA'	Serracapriola - Chieuti (FG)
SCOPO	Regione Puglia Calcoli preliminare del Plinto di fondazione della torre eolica
TURBINE	Vestas
METODOLOGIA DI TRASPORTO	Autoarticolato per trasporti eccezionali, Blade Litfer
LUOGO DI PARTENZA	Porto di Manfredonia

4 Inquadramento generale progetto

Il progetto prevede la costruzione di 14 aerogeneratori di potenza nominale 6,6 MW altezza al mozzo pari a 134 m, lunghezza della pala di 84,35 m, per le specifiche tecniche si rimanda alla rispettiva scheda tecnica del generatore scelto. L'impianto è disposto tra i comuni di Serracapriola (FG) e Chieuti (FG).

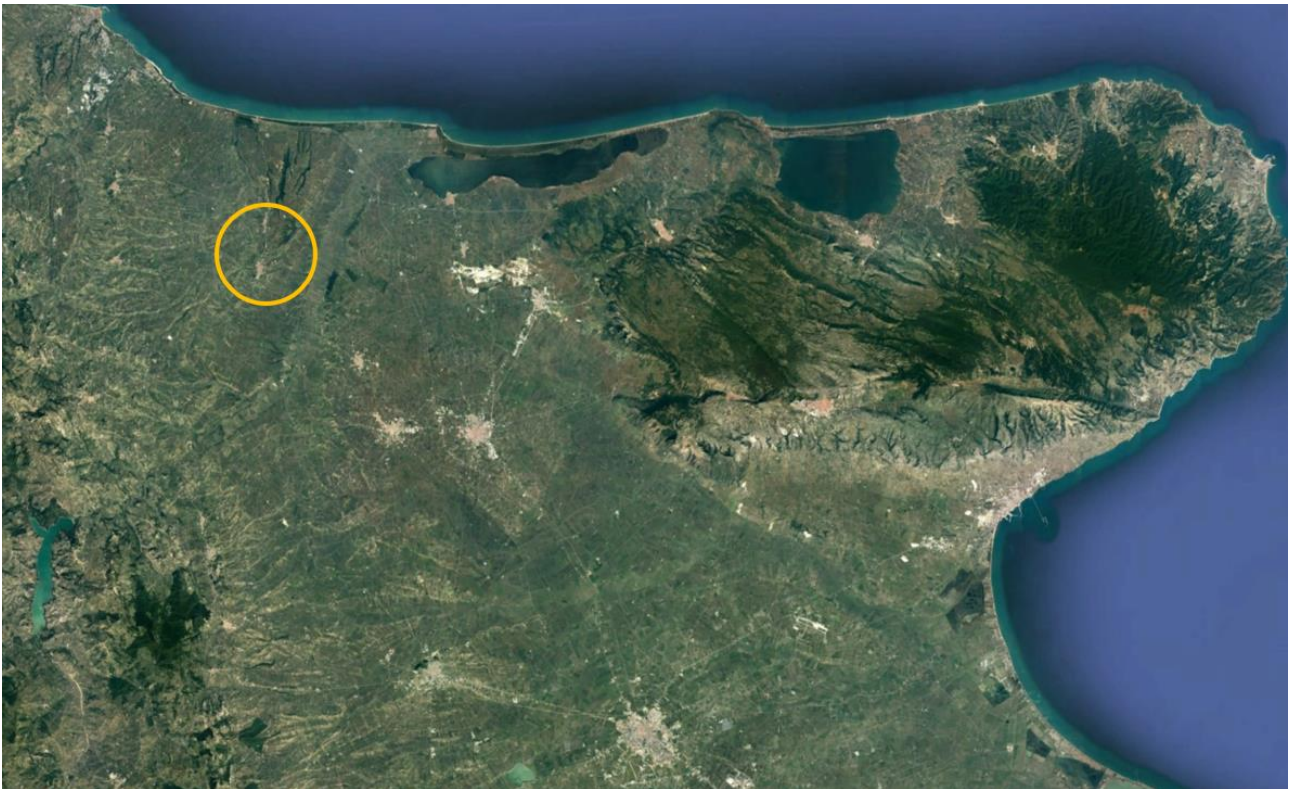


Figura 1 – Inquadramento generale

Gli aerogeneratori verranno costruiti ad altitudini differenti variabili tra 107 m e 226 m (s.l.m.):

Codice Aerogeneratore	Altitudine (s.l.m.)	Coordinate N	Coordinate E
Aerogeneratore (WTG-A)	168 m	41°50'3.14"N	15° 6'39.94"E
Aerogeneratore (WTG-B)	181 m	41°50'11.66"N	15° 6'59.68"E
Aerogeneratore (WTG-C)	137 m	41°49'21.35"N	15° 7'2.40"E
Aerogeneratore (WTG-D)	177 m	41°48'28.42"N	15° 7'46.93"E
Aerogeneratore (WTG-E)	133 m	41°50'15.73"N	15° 8'5.18"E
Aerogeneratore (WTG-F)	137 m	41°49'33.98"N	15° 8'18.62"E
Aerogeneratore (WTG-G)	226 m	41°48'49.05"N	15°10'22.35"E
Aerogeneratore (WTG-H)	199 m	41°50'41.00"N	15°10'40.35"E
Aerogeneratore (WTG-I)	212 m	41°50'15.99"N	15°10'42.49"E
Aerogeneratore (WTG-L)	217 m	41°49'39.26"N	15°10'43.41"E
Aerogeneratore (WTG-M)	183 m	41°48'55.11"N	15°10'52.68"E

Aerogeneratore (WTG-N)	201 m	41°49'39.17"N	15°11'18.74"E
Aerogeneratore (WTG-O)	186 m	41°50'35.77"N	15°11'18.61"
Aerogeneratore (WTG-P)	135 m	41°50'35.09"N	15°11'55.88"E

Tabella 1 – Altitudine aerogeneratori

In ragione del posizionamento reciproco possono individuarsi i seguenti due raggruppamenti di aerogeneratori:

- Area Ovest rispetto agli insediamenti di Chieuti e Serracapriola, sono posizionati 6 aerogeneratori (WTG-A, WTG-B, WTG-C, WTG-D, WTG-E, WTG-F)
- Area Est rispetto agli insediamenti di Chieuti e Serracapriola, sono posizionati 8 aerogeneratori (WTG-G, WTG-H, WTG-I, WTG-L, WTG-M, WTG-N, WTG-O, WTG-P)

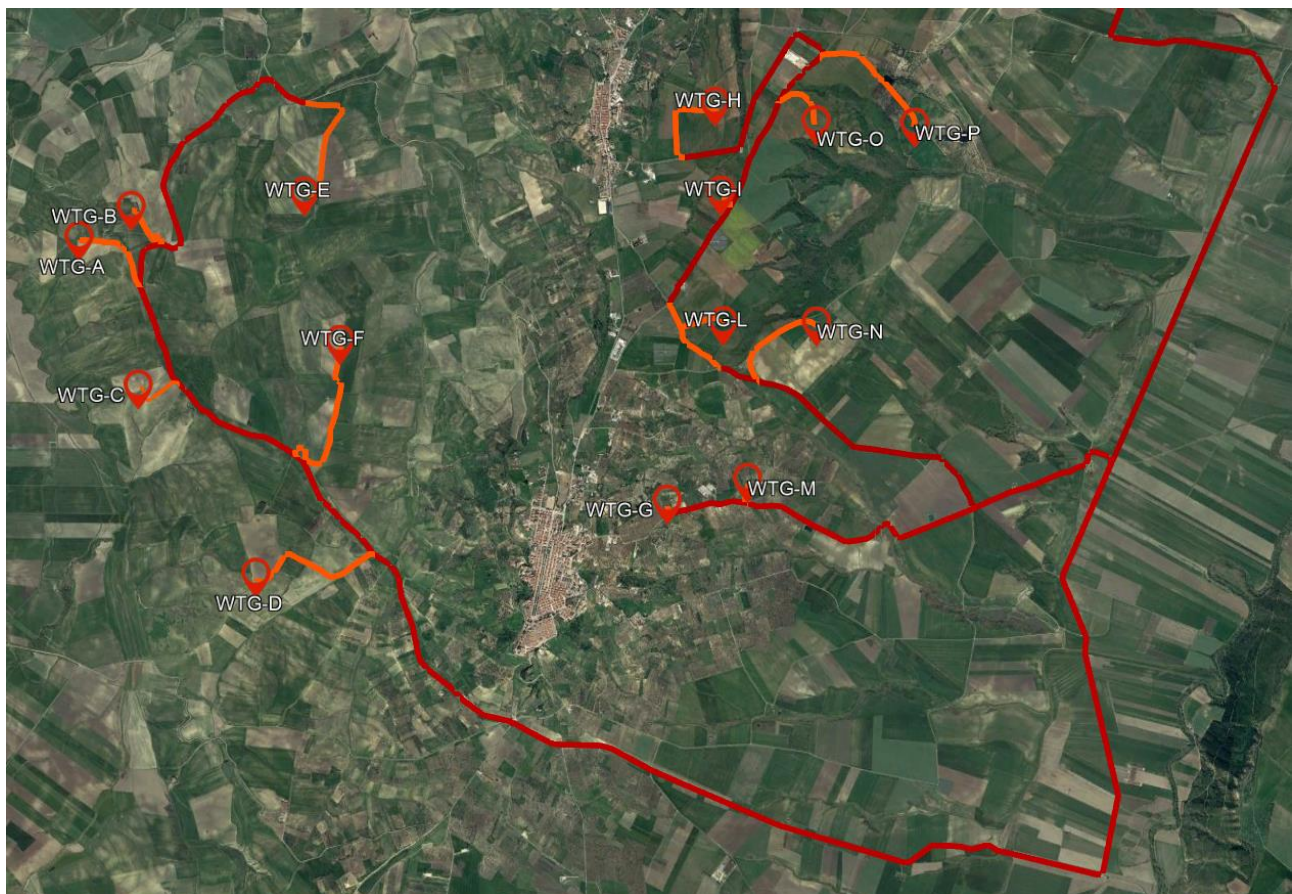


Figura 2 – Inquadramento satellitare

5 Inquadramento geologico

L'area di studio denominata "Montesecco" nel territorio dei comuni di Chiueti (FG) e Serracapriola (FG) ricade nel distretto geologico del Subappennino dauno e del Tavoliere di Puglia, rispetto al quale si trova nell'estrema porzione nord-occidentale. Le unità litostratigrafiche che affiorano nell'area di studio, sono costituite da terreni prevalentemente di età Pliocenica e Pleistocenica. L'area ricade nel Foglio San Severo n. 155 della Carta Geologica d'Italia in scala 1:100.000 e la successione stratigrafica, dal basso verso l'alto, risulta la seguente:

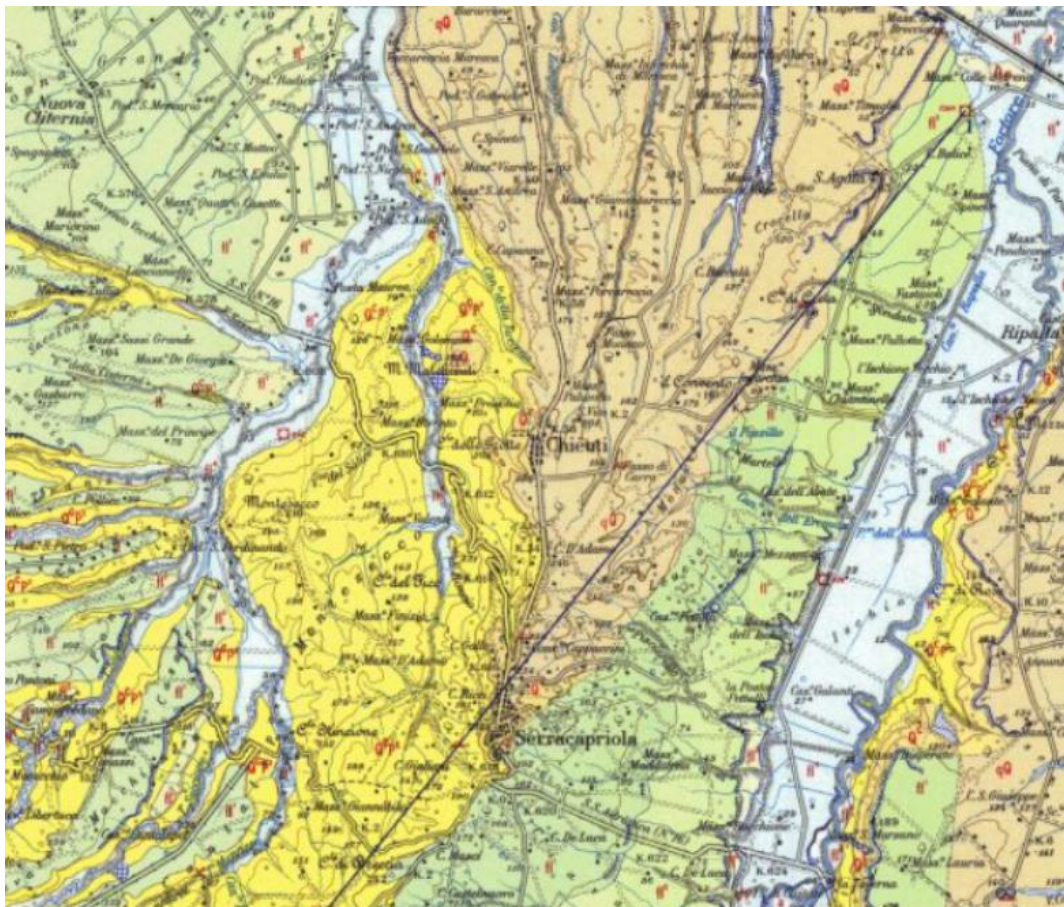


Figura 3 - Stralcio della Carta Geologica d'Italia in scala 1:100.000, Foglio n. 155 – San Severo

- (Qcp2) Argille di Montesecco
- Argille marnose, siltoso-sabbiose, grigio-azzurre, di genesi marina. In superficie possono presentarsi alterate dagli agenti meteorici, di colore giallastro. Presentano intercalazioni sabbiose che procedendo verso l'alto diventano più frequenti, per poi passare alle sovrastanti Sabbie di Serracapriola. Possono assumere tipiche forme erosive a calanchi. (Pliocene medio);
- (Qc) Sabbie di Serracapriola
- Dalle argille sottostanti si passa gradualmente a delle sabbie giallastre, a grana più o meno grossa, più o meno cementate, a stratificazione spesso indistinta con intercalazioni lentiformi

di conglomerati grossolani e di argille a grana più o meno grossolana con lenti di conglomerati ed argille. (Pliocene Superiore);

- (qQ) Conglomerati di Campomarino
- Ghiaie e conglomerati di facies marina o continentale più o meno cementati, talvolta con livelli di conglomerati compatti. Si compongono di lenti e letti di ghiaie, più o meno cementate, talvolta con livelli di conglomerati compatti, mentre a luoghi sono presenti sabbie a stratificazione incrociata ed intercalazioni di argille verdastre. I conglomerati presentano clasti arrotondati ed appiattiti. (Pleistocene medio);
- (FI1) Coperture Fluvio-Lacustri dei Pianalti e del I° Ordine di Terrazzi:
- ghiaie più o meno cementate, livelli lentiformi travertinosi con impronte di piante e di gasteropodi, argille sabbiose, sabbie, calcari pulverulenti bianchi, ricoperti in generale da "terre nere" ad alto tenore humico. (Pleistocene medio);
- (FI2) Coperture fluviali (e lacustri?) del II° Ordine di Terrazzi:
- ghiaie più o meno cementate, sabbie, argille sabbiose, spesso ricoperte da "terre nere" ad alto tenore humico. (Pleistocene -medio – Pleistocene Superiore);
- (FI3) Alluvioni ghiaioso-sabbioso-argillose del III° Ordine di Terrazzi (Pleistocene Superiore);
- (FI4) Alluvioni prevalentemente limoso-argillose del VI° Ordine di Terrazzi (Pleistocene Sup. - Olocene).

Le perforazioni profonde eseguite a scopo di ricerca petrolifera hanno evidenziato che la formazione delle Argille di Montesacco ha uno spessore massimo affiorante per la parte autoctona sino ad oltre 1.000 metri e uno spessore massimo per la parte alloctona di c.a 300 metri (Moretti et al., 2011). Lo spessore delle Sabbie di Serracapriola è valutato in c.a. 30 m mentre lo spessore della formazione dei Conglomerati di Campomarino è valutato in c.a. 20 m.

6 Inquadramento geomorfologico

Il territorio si sviluppa al margine settentrionale del Tavoliere della Puglia, in un'area compresa tra il Sub-Appennino Dauno ed il Promontorio del Gargano. Il Tavoliere di Puglia rappresenta un'estesa pianura alluvionale avente una estensione di c.a. 3.500 kmq solcata da numerosi corsi d'acqua a carattere torrentizio, limitata a nord dal Fiume Fortore ed a sud dal Fiume Ofanto. Dal punto di vista morfologico, l'area di studio è caratterizzata da strette ed allungate colline a tetto piatto cui si interpongono larghe valli solcate da numerosi corsi d'acqua che scorrono da ovest verso est, con tracciati paralleli fra loro.

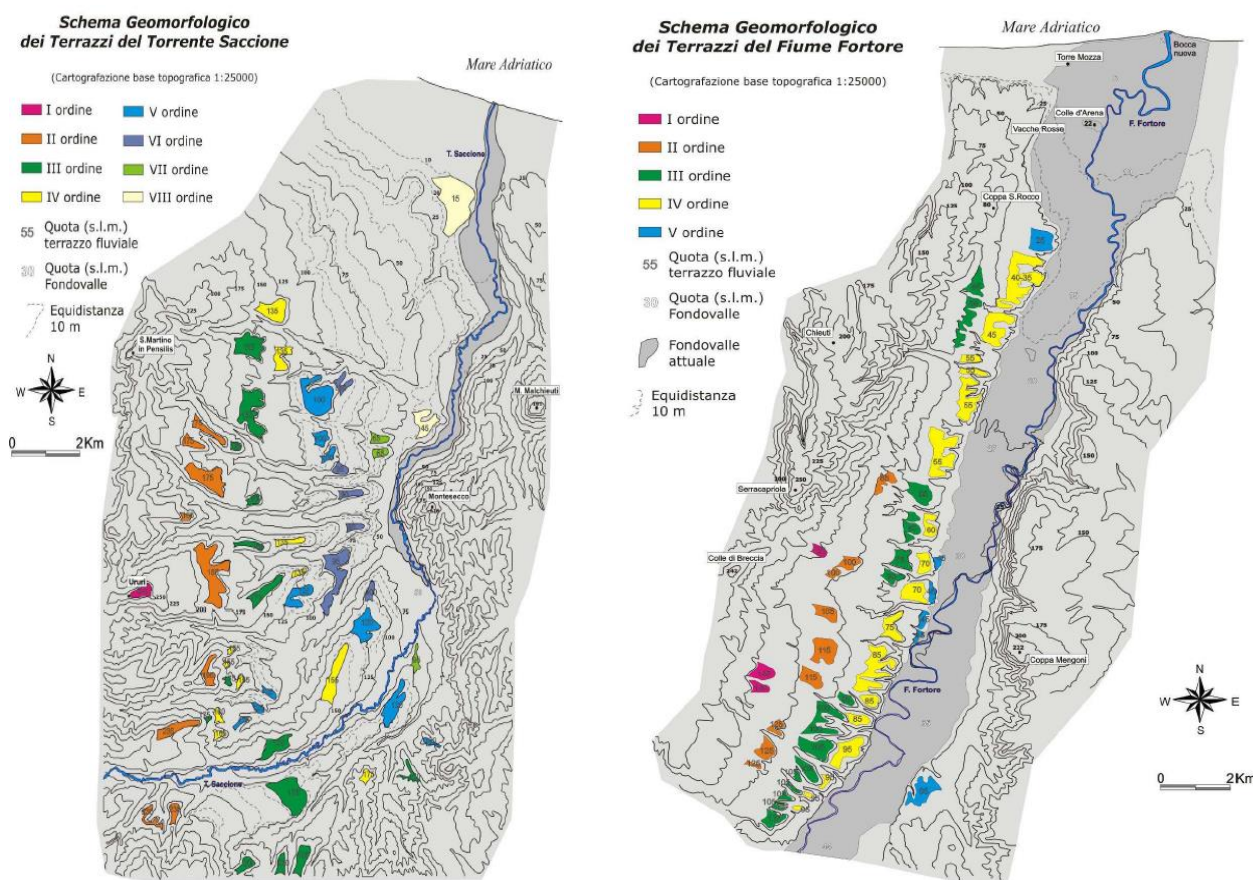


Figura 4 – Schemi geomorfologici

Il territorio, dal punto di vista geomorfologico, è caratterizzato da una conformazione di bassa collina degradante, a partire dall'alto morfologico costituito dal rilievo dove sorge l'abitato di Serracapriola che raggiunge la quota di 269 m s.l.m., verso il Mare Adriatico posto a Nord e verso il fondovalle del F. Fortore e T. Saccione posti rispettivamente a Est, Sud ed Ovest. Come noto, la conformazione del paesaggio è fortemente influenzata dalla litologia dei terreni affioranti, dove il substrato è composto da terreni pelitici-argillosi prevalgono le forme addolcite e basso pendenti, rispetto a terreni sabbio-conglomeratici che possono pure presentare salti di pendenza. Il territorio è inciso, come detto, da due assi fluviali principali ad andamento SW-NE e sub-parallelo tra loro: il Fiume Saccione a Ovest ed il Fortore a Est. I loro affluenti sono

di carattere tipicamente stagionale con portate che si riducono molto nella stagione secca fino ad annullarsi quasi completamente. Il pattern è di tipo dendritico per i terreni argillosi mentre assume forme parallele per i settori sabbio-conglomeratici ed infine una conformazione a meandri nel fondovalle come ben evidenziato nella valle del Fortore.

7 Inquadramento geotecnico

Non essendo eseguita al momento alcuna campagna di indagine diretta, la caratterizzazione litotecnica è stata effettuata, in via preliminare e del tutto indicativa, sulla base di dati provenienti da letteratura tecnica coadiuvate da informazioni estrapolate da indagini pregresse condotte in contesti geologici analoghi e da indagine in situ condotte da una ditta specializzata con l'ausilio di macchinari idonei al saggio in profondità degli strati sotterranei.

8 Descrizione dell'aerogeneratore

Diametro rotore:	172 m
Area spazzata:	23.235 m ²
Direzione di rotazione:	senso orario (clockwise)
Temperatura di esercizio:	-20°C / +40°C
Velocità del vento all'avviamento:	minimo 3 m/s
Arresto per eccesso di velocità del vento:	25 m/s
Freni aerodinamici:	messa in bandiera totale
Velocità di rotazione massima:	12 rotazioni al minuto
Massima pressione acustica:	106.9dB(A)



Figura 5 - Vista laterale dell'aerogeneratore a progetto.

Ai fini degli approfondimenti progettuali e dei relativi studi specialistici, si è assunto come riferimento il modello commerciale di aerogeneratore Vestas "Enventus" 172, potenza 6,6 MW HHUB 134 m. Gli aerogeneratori previsti in progetto, coerentemente con i più diffusi standard costruttivi, saranno del tipo a tripala in materiale composito, con disposizione *upwind* (ossia con il rotore sopravento rispetto alla navicella), e regolazione attiva sia del passo della pala che dell'angolo di imbardata della navicella.

La torre di sostegno della navicella sarà in acciaio tubolare, dimensionata per resistere alle oscillazioni ed alle vibrazioni causate dalla pressione del vento e dal moto rotatorio del gruppo rotore, ed ancorata al terreno mediante fondazioni dirette.

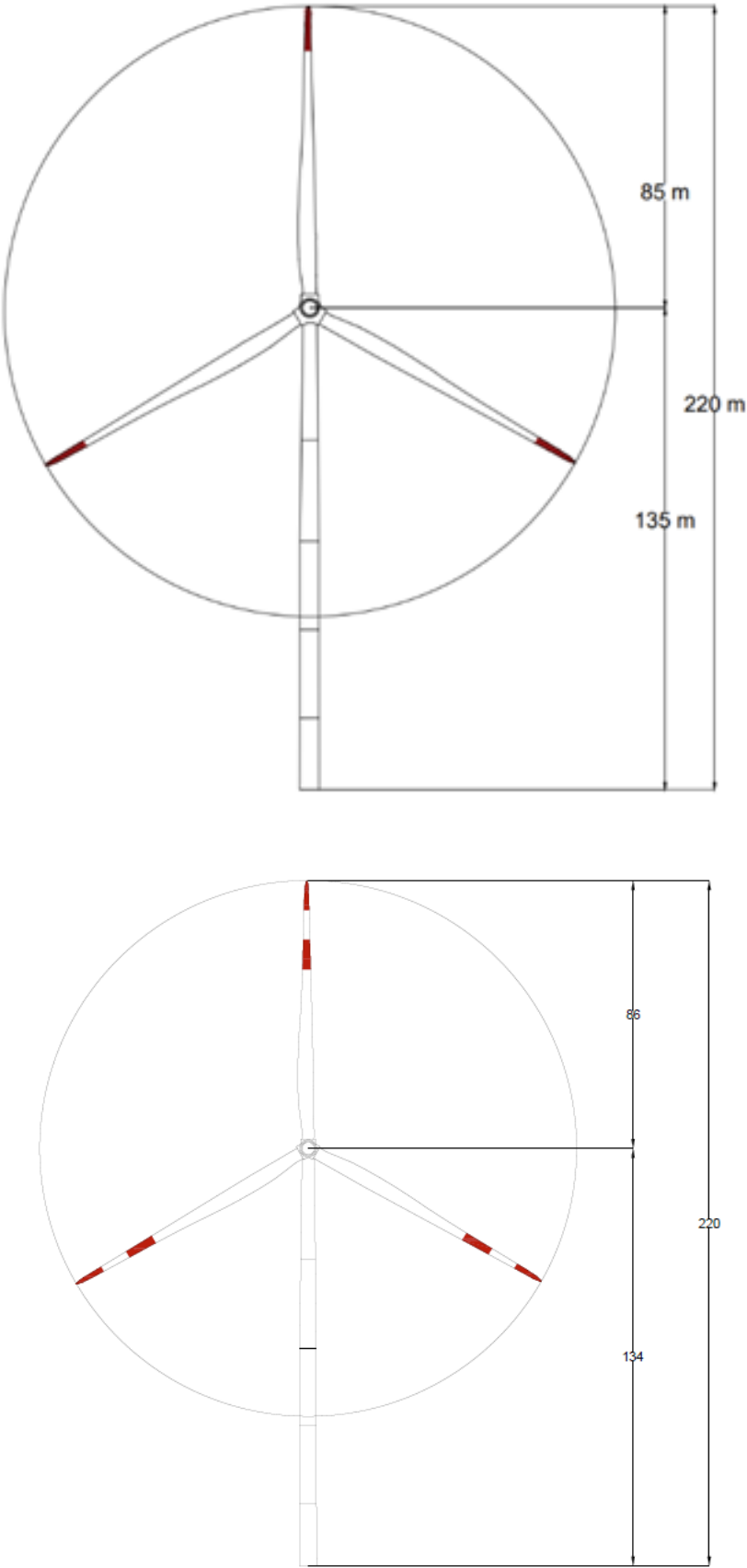


Figura 6 – Prospetti dell’aerogeneratore

9 Analisi dei carichi

9.1.1 Materiali utilizzati

Il peso proprio degli elementi strutturali è stato valutato come prodotto del volume dell'elemento strutturale stesso per il proprio peso specifico. In particolare, sono stati utilizzate come base la tabella Tab. 3.1.I delle NTC 2018.

Per la realizzazione dell'opera in oggetto saranno impiegati i seguenti materiali:

MATERIALI	PESO UNITA DI VOLUME
	(kN/m ³)
Calcestruzzo armato	25,0
Acciaio	78,5

Tabella 2 – Pesì dell'unità di volume dei principali materiali

Le strutture in acciaio sono progettate con elementi strutturali con le seguenti caratteristiche:

ACCIAIO									
γ_k	$\alpha T, i$	E	G	f_{yk}	f_{tk}	f_{yd}	γ_s	γ_{m1}	γ_{m2}
[N/m ³]	[1/°C]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]			[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
B450C									
78 500	0,00001	210 000	80 769	450	540	391	1,05	1,05	1,25

Tabella 3 – Proprietà degli acciai di progetto

Si prevede una fondazione superficiale con plinto armato con classe di esposizione **XC4** (Ciclicamente asciutto e bagnato):

XC2			
Descrizione ambiente	Max a/c	Minimo contenuto di cemento [kg/m3]	Minima classe di [N/mm2]
Ciclicamente asciutto e bagnato	0,5	340 (UNI 11104) 300 (UNI EN 206-1)	C32/40 (UNI 11104) C30/37 (UNI EN 206-1)
CALCESTRUZZO ARMATO			
Magrone di sottofondo (cls non strutturale)	Classe di resistenza		C16/20
	Classe di consistenza		S4
Piastra di fondazione	Classe di resistenza		C35/45
	Classe di consistenza		S4
Colleto di fondazione	Classe di resistenza		C50/60
	Classe di consistenza		S4
Malta ad alta resistenza	Classe di resistenza		C90/105
	Classe di consistenza		S4
Copriferro			5 cm
Dim. Massima nominale aggregati			< 25 mm

Tabella 4 – Classe di esposizione calcestruzzo

9.1.2 Pesì propri

Peso proprio plintodi fondazione Wp	Peso proprio terrenodi riempimento Wt
kN	kN
26.111,61	14.004,12

9.1.3 Analisi del vento

Le azioni del vento sono state determinate in conformità al par. 3.3 del D.M. 17/01/18 e della Circolare del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 21 gennaio 2019 n. 7. Il vento, la cui direzione si considera generalmente orizzontale, esercita sulle costruzioni azioni che variano nel tempo e nello spazio provocando, in generale, effetti dinamici. Per le costruzioni usuali tali azioni sono convenzionalmente ricondotte a delle forze statiche equivalenti.

Le azioni statiche del vento sono costituite da pressioni e depressioni agenti normalmente alle superfici, sia esterne che interne, degli elementi che compongono la costruzione. L'azione del vento sul singolo elemento viene determinata considerando la combinazione più gravosa della pressione agente sulla superficie esterna e della pressione agente sulla superficie interna dell'elemento.

L'azione d'insieme esercitata dal vento su una costruzione è data dalla risultante delle azioni sui singoli elementi, considerando come direzione del vento, quella corrispondente ad uno degli assi principali della pianta della costruzione. La pressione del vento è data dalla seguente espressione:

Per il sito in esame:

Zona	Descrizione	$v_{b,0}$ [m/s]	a_0 [m]	k_s
1	Valle d'Aosta, Piemonte, Lombardia, Trentino Alto Adige, Veneto, Friuli Venezia Giulia (con l'eccezione della provincia di Trieste)	25	1000	0,40
2	Emilia Romagna	25	750	0,45
3	Toscana, Marche, Umbria, Lazio, Abruzzo, Molise, Puglia, Campania, Basilicata, Calabria (esclusa la provincia di Reggio Calabria)	27	500	0,37
4	Sicilia e provincia di Reggio Calabria	28	500	0,36
5	Sardegna (zona a oriente della retta congiungente Capo Teulada con l'Isola di Maddalena)	28	750	0,40
6	Sardegna (zona a occidente della retta congiungente Capo Teulada con l'Isola di Maddalena)	28	500	0,36
7	Liguria	28	1000	0,54
8	Provincia di Trieste	30	1500	0,50
9	Isole (con l'eccezione di Sicilia e Sardegna) e mare aperto	31	500	0,32

Tabella 5 – Tabella di zonizzazione

La zona di riferimento è la 3 si sceglie un un'altitudine a_s pari a circa 226 m s.l.m. (WTG-H) relativa alla pala con altitudine maggiore, per cui risulta:

Valori dei parametri del sito $V_{b,0}$, a_0 , k_s			
Zona 3	$V_{b,0}$	27	[m/s]
	a_0	500	[m]
	k_s	0,37	-

Tabella 6 – Valori dei parametri $v_{b,0}$, a_0 , k_s

Inseguito si calcola V_b la velocità base di riferimento valore medio del vento su 10 minuti ad un'altezza di 10 m su terreno pianeggiante ed omogeneo di Categoria di esposizione II mentre C_a è il coefficiente di altitudine dipendente da a_s .

$$V_b = v_{b,0} \cdot C_a$$

La velocità di riferimento V_r è il valore medio su 10 minuti, a 10 m di altezza dal suolo su un terreno pianeggiante e omogeneo di categoria di esposizione II riferito al periodo di ritorno di progetto T_r . Tale velocità è definita dalla relazione:

$$V_r = v_b \cdot C_r$$

La pressione cinetica di riferimento q_r è data dall'espressione:

$$q_r = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_r^2$$

- ρ densità dell'aria (assunta pari a 1,25 kg/m³);

Di seguito si riportano i valori numerici sito specifici appena descritti per il calcolo della pressione cinetica di riferimento.

Pressione cinetica di riferimento					
Categoria di esposizione					
a _s	C. rugosità	Distanza costa	T _r	Cat. Esposizione	
[m]		[Km]	[anni]		
226	D	10	50	II	
Calcolo velocità di riferimento V _r					
a _s <a ₀	V _{b,0}	C _a	V _b	C _r	V _r
[m]	[m/s]		[m/s]		[m/s]
227 < 500	27	1,0	27,00	1,00	27,00
Pressione cinetica di riferimento					
q _r					
[N/m2]					
455.63					

Tabella 7 – Pressione cinetica di riferimento

La pressione del vento è data dall'espressione:

$$p = q_r \cdot C_e \cdot C_p \cdot C_d$$

- q_r è la pressione cinetica di riferimento, valutata secondo il punto 3.3.6 del D.M. 17/01/2018;
- C_e è il coefficiente di esposizione, valutata secondo il punto 3.3.7 del D.M. 17/01/2018; dipendente da C_t è posto generalmente pari a 1, sia per le zone pianeggianti sia per quelle ondulate, collinose e montane in questo caso verrà valutata per le condizioni più gravose di aerogeneratore posto su altipiano isolato.
- C_p è il coefficiente di pressione, funzione della tipologia e della geometria della costruzione e del suo orientamento rispetto alla direzione del vento. Il suo valore può essere ricavato da dati suffragati da opportuna documentazione o da prove sperimentali in galleria del vento;
- C_d è il coefficiente dinamico con cui si tiene conto degli effetti riduttivi associati alla non contemporaneità delle massime pressioni locali e degli effetti amplificativi dovuti alle vibrazioni strutturali, in questa fase di progetto verrà preso pari a 1 per semplicità e verrà approfondito nelle fasi successive di progettazione in quanto la struttura risulta avere una forma non regolare.

I coefficienti variabili in funzione dell'altezza saranno il coefficiente di esposizione C_e e C_p per cui in seguito si propone una tabella delle forze applicati sulla pala in funzione dell'altezza e della forma dell'area su cui è applicata la forza del vento.

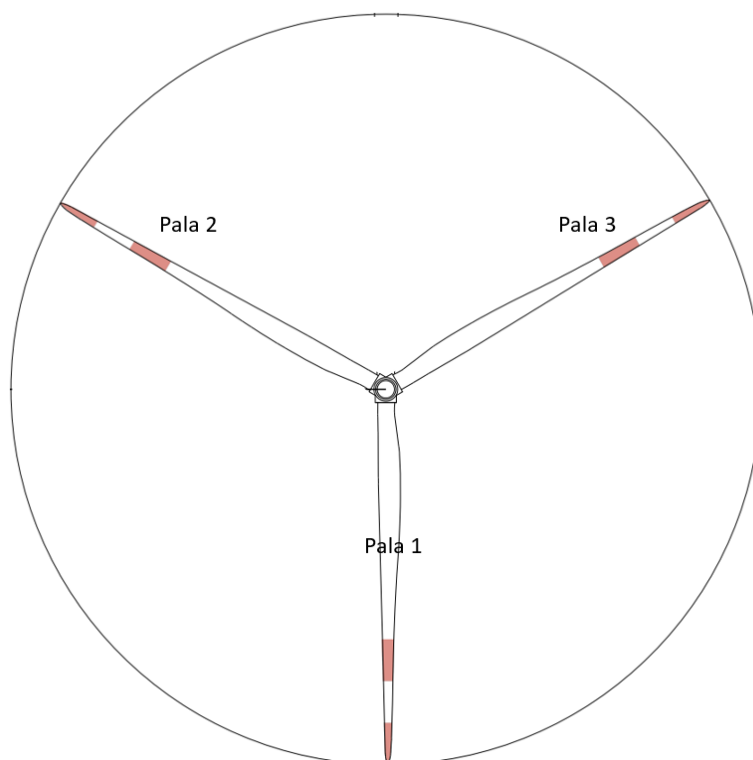


Figura 7 – Denominazione pale

Forze e momenti applicati sulla torre								
z	Δz	d	$C_e(C_t, Z)$	C_p	p	q	F	M
[m]	[m]	[m]	[-]	[-]	[kN/m ²]	[kN/m]	[kN]	[kNm]
5	10	14	1,80	0,7	0,57	8,04	80,37	401,86
15	10	12	2,62	0,7	0,83	10,01	100,11	1501,69
25	10	11	2,96	0,7	0,95	10,40	104,01	2600,24
35	10	9,9	3,20	0,7	1,02	10,12	101,19	3541,63
45	10	8,8	3,39	0,7	1,08	9,51	95,13	4280,79
55	10	8,1	3,54	0,7	1,13	9,15	91,46	5030,04
65	10	7,5	3,67	0,7	1,17	8,77	87,74	5702,79
75	10	6,9	3,78	0,7	1,21	8,32	83,16	6236,91
85	10	6,3	3,88	0,7	1,24	7,79	77,90	6621,70
95	10	5,9	3,97	0,7	1,26	7,46	74,62	7088,66
105	10	5,3	4,05	0,7	1,29	6,84	68,39	7180,43
115	10	4,9	4,12	0,7	1,31	6,44	64,37	7402,90
125	10	4,5	4,19	0,7	1,34	6,01	60,09	7511,62
135	10	4,2	4,25	0,7	1,36	5,69	56,93	7685,89
145	10	4	4,31	0,7	1,37	5,50	54,97	7971,26
TOTALE							1200,44	80758,41

Tabella 8 – Forze e momenti applicati alla torre

Di seguito le forze e i momenti applicati sulle pale definite come riportate in figura 7.

Forze e momenti applicati sulla pala 1								
z	Δz	d	$C_e(C_t, Z)$	C_p	p	q	F	M
[m]	[m]	[m]	[-]	[-]	[kN/m ²]	[kN/m]	[kN]	[kNm]
55	10	1,2	3,54	1,2	1,94	2,32	23,23	1277,47
65	10	2	3,67	1,2	2,01	4,01	40,11	2606,99
75	10	3	3,78	1,2	2,07	6,20	61,98	4648,63
85	10	4	3,88	1,2	2,12	8,48	84,79	7207,29
95	10	5	3,97	1,2	2,17	10,84	108,40	10298,30
105	10	4	4,05	1,2	2,21	8,85	88,48	9290,04
115	10	4	4,12	1,2	2,25	9,01	90,08	10359,75
125	10	3	4,19	1,2	2,29	6,87	68,68	8584,71
TOTALE							565,75	54273,17

Tabella 9 – Forze del vento sulla Pala 1

Forze e momenti applicati sulla pala 2 e 3								
z	Δz	d	$C_e(C_t, Z)$	C_p	p	q	F	M
[m]	[m]	[m]	[-]	[-]	[kN/m ²]	[kN/m]	[kN]	[kNm]
145	10	1,2	4,31	1,2	2,36	2,83	28,27	4099,50
155	10	2	4,36	1,2	2,39	4,77	47,73	7397,61
165	10	3	4,42	1,2	2,41	7,24	72,45	11953,67
175	10	4	4,47	1,2	2,44	9,77	97,68	17093,30
182,5	5	3	4,50	1,2	2,46	7,38	36,92	6737,67
TOTALE singola pala							283,04	47281,76
TOTALE							566,08	94563,52

Tabella 10 – Forze del vento sulle pale 2-3

Le somme delle azioni statiche e dei momenti risultanti applicati saranno di: $F_{xy}=2'518.17$ kN e $M_{xy} = 254'691,87$ kNm che forniscono un parametro di confronto con le sollecitazioni proposte dalla norma IEC 61400-1 Ed.4, tra le due opzioni verrà scelta la combinazione di carico più sfavorevole per le verifiche.

9.1.4 Azione sismica

L'azione sismica è stata valutata in conformità alle indicazioni riportate al §3.2 del D.M. 2018 tramite un'analisi dinamica solo orizzontale. In particolare, il procedimento per la definizione degli spettri di progetto per i vari Stati Limite per cui sono state effettuate le verifiche è stato il seguente:

- Definizione della Vita Nominale e della Classe d'Uso della struttura, il cui uso combinato ha portato alla definizione del Periodo di Riferimento dell'azione sismica V_R e del periodo di ritorno T_R ;
- Individuazione, tramite latitudine e longitudine, dei parametri sismici di base a_g , F_0 e T_c per tutti e quattro gli Stati Limite previsti (SLO, SLD, SLV e SLC);
- Determinazione dei coefficienti di amplificazione stratigrafica e topografica;
- Calcolo del periodo T_c corrispondente all'inizio del tratto a velocità costante dello Spettro;
- Calcolo dei parametri di categoria stratigrafica e topografica per determinare la risposta sismica locale;

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

coordinate del reticolo di riferimento scelto (ED50) de comune di Serracapriola (FG):

Coordinate del sito di interesse ED50		
	Lat.	Lng.
Reticolo Chieuti	41.809562	15.160764

Tabella 11 – Coordinate reticolo di riferimento

Per le strutture progettate si considera:

- Vita nominale V_N : 50 anni (Punto 2.4.2 del D.M. 17/01/2018);
- Classe d'uso C_U : II

Da cui risulta V_R Periodo di Riferimento per l'azione sismica di 50 anni funzione della classe d'uso C_U e della vita nominale V_N ($V_R = C_U \cdot V_N$) sulla base di questo arco temporale verranno valutate le azioni sismiche. Le forme spettrali sono riferite ad una serie prestabilita di probabilità di superamento P_{VR} in funzione della V_R precedentemente stabilita, per individuare le corrispondenti azioni sismiche si determina il periodo di ritorno T_R associato ad ogni stato limite. Nella tabella seguente vengono riportati i parametri sismici di base (a_g , F_0 e T_c) che definiscono la pericolosità sismica del sito considerato come rigido ed orizzontale.

Stato Limite	V_R	P_{VR}	T_R	a_g/g	F_0	T_c^*
	[anni]	[%]	[anni]	[g]	[]	[s]
SLO	50	81	30	0.055	2.447	0.282
SLD		63	50	0.073	2.465	0.299
SLV		10	475	0.202	2.460	0.335
SLC		5	975	0.267	2.267	0.343

Tabella 12 – Parametri sismici di base

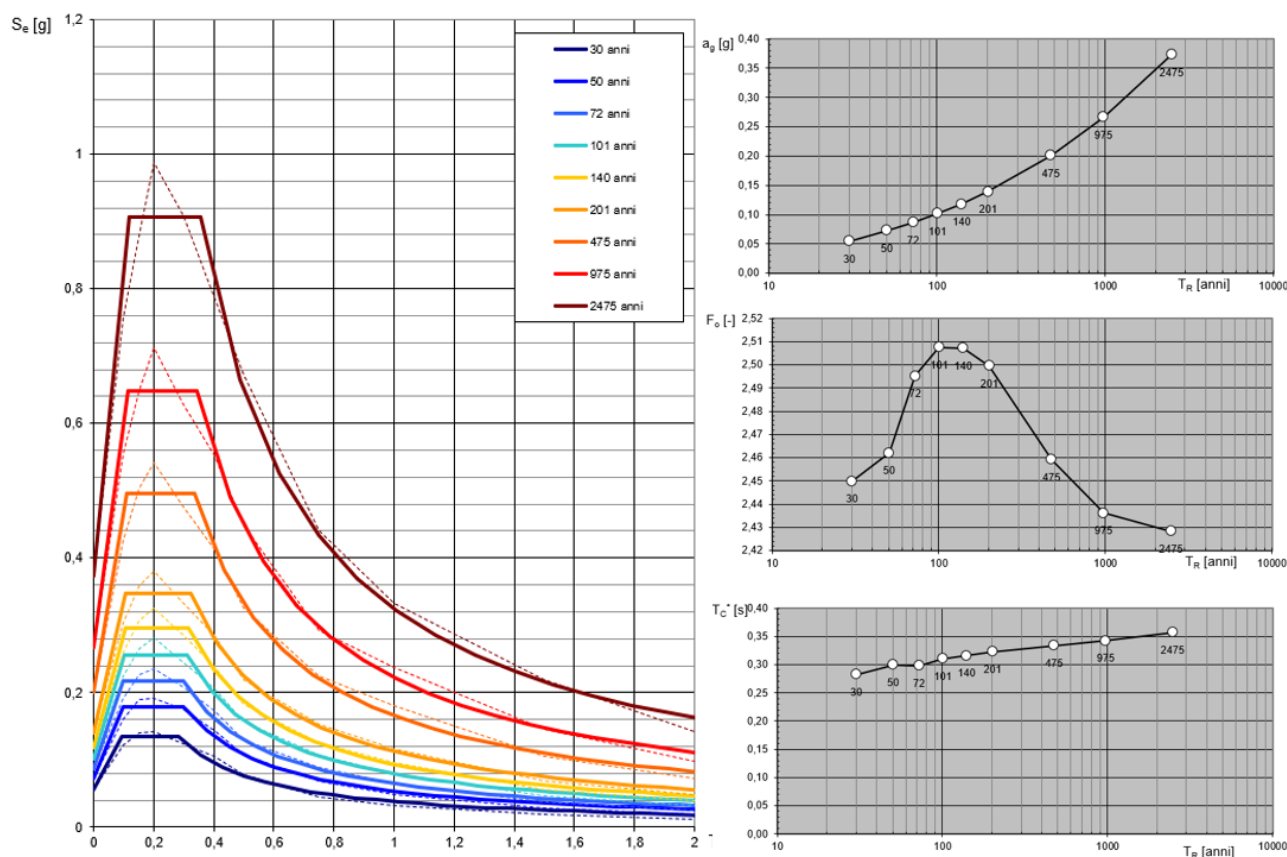


Figura 8 - Spettri di risposta e parametri sismici di base

Le condizioni trovate in precedenza fanno riferimento ad una risposta *sismica teorica* che occorre modificare andando a considerare gli effetti stratigrafici e topografici per ottenere la risposta *sismica locale*.

Sul sito si sono condotte due tipologie di prove per la determinazione della tipologia di sottosuolo, indagini **MASV** e **HVSR** (si rimanda alla relazione alla "REL003a-Relazione geologica" per maggiori dettagli sulle prove in situ) dalla quale risulta prevalente una categoria di sottosuolo di **tipo C** (Tab. 3.2.II):

Categoria sottosuolo	Caratteristiche stratigrafiche
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s;

Tabella 13 – Categoria di sottosuolo

Si determinano i coefficienti S_s (amplificazione stratigrafica) e C_c (categoria stratigrafica) rispetto la Tab. 3.2.IV in funzione della categoria di sottosuolo e dei parametri sismici di base.

Coefficienti di stratigrafia S_s e C_c				
	SLO	SLD	SLV	SLC
S_s	1,50	1,50	1,35	1,25
C_c	1,57	1,56	1,50	1,49

Tabella 14 – Coefficienti di stratigrafia

Per la determinazione della categoria topografica sono stati analizzati gli aerogeneratori con posizionamenti più sfavorevoli secondo la normativa: dislivello maggiore di 30 m e inclinazione media del pendio maggiore di 15°. Gli aerogeneratori WTG-A, WTG-B, WTG-C ricadono in categoria topografica **T2** secondo la Tab. 3.2.III si determina quindi il coefficiente di amplificazione topografica S_T considerando la posizione in prossimità della cresta a favore di sicurezza si utilizzerà $h/H = 1$.

Categoria topografica	Caratteristiche della superficie topografica	h/H	Valori S_T
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$	1,00	1,20

Tabella 15 – categoria topografica e coefficiente S_T

Per la definizione degli spettri di risposta di progetto, occorre determinare il Fattore di Comportamento (q). Il Fattore di comportamento q è un fattore riduttivo delle forze elastiche introdotto per tenere conto delle capacità dissipative della struttura che dipende dal **sistema costruttivo** adottato, dalla **Classe di Duttilità** e dalla **regolarità in altezza**. Considerando tali valori si ottengono i seguenti spettri di risposta elastici di progetto.

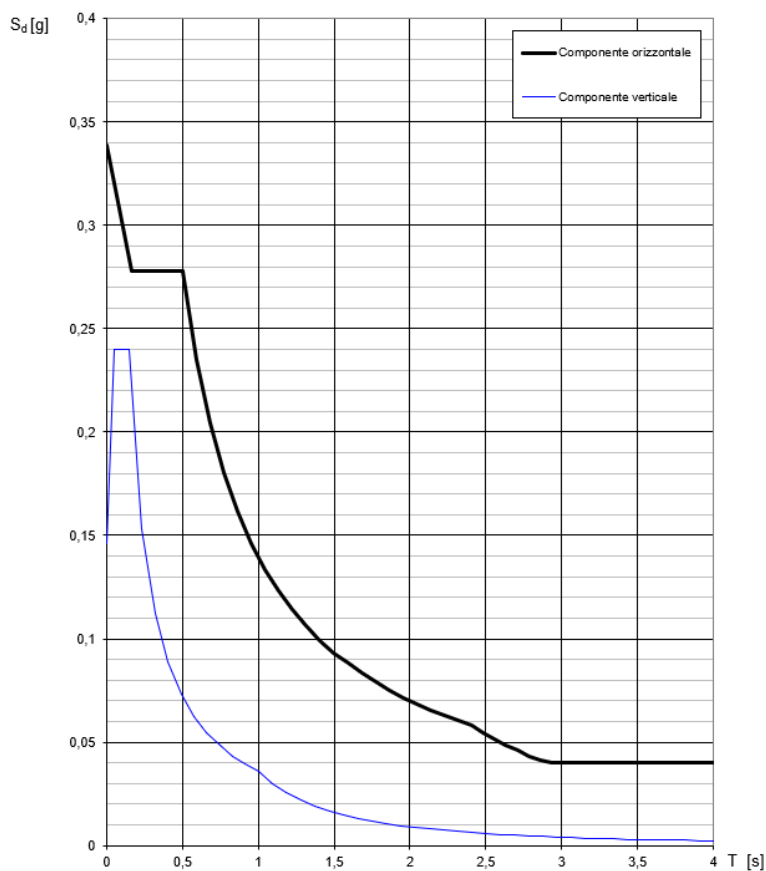


Figura 9 – Spettro di risposta per lo stato limite SLV

Parametri indipendenti	
Stato limite	SLV
a_g	0,201
F_0	2,459
T^*_c	0,334
S_s	1,403
C_c	1,508
S_T	1,200
q	3,000

Parametri dipendenti	
S	1,684
η	0,333
T_B	0,168
T_C	0,504
T_D	2,405

Le azioni dell'analisi sismica verranno inglobate in termini di domanda nelle combinazioni di carico riportate dalla normativa IEC 61400-1 Ed.4 in quanta già combinate con i pesi propri dell'aerogeneratore.

9.1.5 Combinazione di carico

In questa fase progettuale, come già precedentemente anticipato, verranno prese in esame le condizioni di carico riportate dalla norma IEC 61400-1 Ed.4, definiti per condizioni normali di funzionamento e in condizioni estreme ossia:

I carichi "Extreme loads" sono i carichi statici massimi calcolati per qualsiasi condizione. Includono il comportamento dinamico della struttura e corrispondono al caso più sfavorevole alla base dell'aerogeneratore tra i diversi casi di carico, secondo la norma IEC 61400-1. I carichi "Extreme loads" sono i carichi di progetto della fondazione e non devono essere divisi o combinati con altri carichi.

Load factor	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)	Mx (kNm)	My (kNm)	Mz (kNm)
1,0	1316,18	54,14	-7707,99	2463,44	186812,5	5 294,48

Tabella 16 - Extreme loads 170-H 135

Da un rapido confronto con le forze applicate risultanti dall'analisi del vento si può notare come quest'ultime presentino un maggior margine di sicurezza, perciò, in questa fase saranno quelle utilizzate per le verifiche preliminari. Per quanto riguarda il carico verticale Fz negativo diretto verso il basso e il momento Mz torcente rispetto l'asse dell'aerogeneratore si prendono in considerazioni i valori da norma. Nella tabella seguente vengono riportati i carichi massimi di progetto.

Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)	Mx (kNm)	My (kNm)	Mz (kNm)
2'518.17	2'518.17	-7707,99	254'691,87	254'691,87	5 294,48

Tabella 17 – Combinazione di carico di progetto

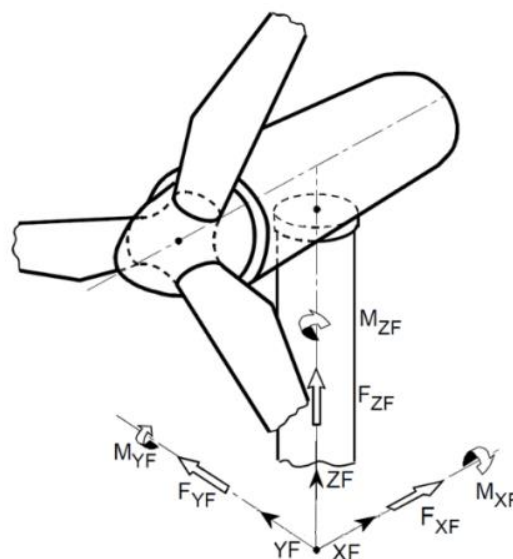


Tabella 18 – Sistema di riferimento

10 Verifica plinti

Nelle verifiche allo stato limite ultimo deve essere rispettata la condizione:

$$Ed \leq Rd$$

dove:

Ed è il valore di progetto dell'azione o dell'effetto dell'azione;

Rd è il valore di progetto della resistenza del sistema geotecnico.

Le verifiche strutturali e geotecniche delle fondazioni saranno effettuate con l'**Approccio 2** come definito al §2.6.1 del D.M. 2018, attraverso la combinazione **A1+M1+R3**. Le azioni sono state amplificate tramite i coefficienti della colonna A1 (STR) definiti nella tabella 6.2.I del D.M. 2018.

CARICHI	EFFETTO	Coefficiente parziale g_F (o g_E)	A1 (STR)	A2 (GEO)
Carichi permanenti G_1	Favorevole	g_{G1}	1,00	1,00
	Sfavorevole		1,30	1,00
Carichi permanenti $G_2^{(1)}$	Favorevole	g_{G2}	0,80	0,80
	Sfavorevole		1,50	1,30
Azioni variabili Q	Favorevole	g_{Qi}	0,00	0,00
	Sfavorevole		1,50	1,30

Tabella 19 - Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni

I valori di resistenza del terreno saranno ridotti tramite i coefficienti della colonna M1 definiti nella tabella 6.2.II del D.M. 2018.

PARAMETRO GEOTECNICO	Grandezza alla quale applicare il coefficiente parziale	Coefficiente parziale g_M	M1	M2
Tangente dell'angolo di resistenza a taglio	$\tan\phi_k$	$\gamma_{\phi'}$	1,00	1,25
Coesione efficace	c'_k	$\gamma_{c'}$	1,00	1,25
Resistenza non drenata	c_{uk}	γ_{cu}	1,00	1,40
Peso dell'unità di volume	γ_y	γ_y	1,00	1,00

Tabella 20 - Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno

Le verifiche di sicurezza, con il "Metodo degli Stati Limite" (SLU e SLE) necessarie per il corretto dimensionamento:

- 1) Stati limite ultimi SLU di equilibrio come corpo rigido (EQU);
 - Verifica di stabilità globale;
- 2) Stati limite ultimi SLU di resistenza della struttura di fondazione (STR):
 - Verifica di resistenza a flessione/taglio della piastra di fondazione;
 - Verifica a punzonamento;
- 3) Stati limite ultimi SLU di resistenza del terreno (GEO);
 - Verifica del carico limite dell'insieme fondazione-terreno;
 - Verifica dei cedimenti massimi assoluti e differenziali;

- Verifica a scorrimento sul piano di posa;

4) Stati limite di esercizio SLE:

- Verifica a fessurazione della piastra di fondazione;

Data la fase progettuale e la mancanza di prove in situ a supporto della letteratura tecnica relativa ai parametri geotecnici, si ritiene che il dimensionamento del plinto di fondazione possa essere valutato, almeno in questa fase preliminare, tramite verifiche di stabilità globale:

10.1 Verifica a ribaltamento

La verifica mette a confronto il momento ribaltante totale dato dalla somma del momento M_x e il contributo della forza F_x per il suo braccio coincidente con la distanza dal punto di applicazione della forza alla base della fondazione. Mentre il momento stabilizzante tiene conto della forza in direzione Z del peso proprio della fondazione e del peso proprio del terreno di riempimento.

$M_r \rightarrow$ Momento ribaltante alla base della fondazione ($H_{tot} = 4,00$ m)

$$M_r = YQ \cdot (M_x + F_x \cdot H_{tot}) = 1,5 \cdot (254'691,87 + 2'518,17 \times 4,00) = 397'146,825 \text{ kNm}$$

$$M_s = YG1 \cdot [(F_z + W_p + W_t)] \cdot r = 0,9 \cdot [(7707,99 + 26.111,61 + 14.004,12) \cdot 12,5] = 538'016,85 \text{ kNm}$$

$$\eta = M_s / M_r = 538'016,85 / 397'146,825 = 1,354 > 1$$

VERIFICATO

10.2 Verifica a scorrimento

La verifica confronta la forza orizzontale F_{xy} (F_h) amplificata come da NTC per i carichi variabili (Vento) con la forza di attrito dovuta al peso proprio e al coefficiente di attrito tra terreno e fondazione

$F_h \rightarrow$ Forza agente orizzontale che attiva lo scorrimento:

$$F_h = \gamma Q \cdot F_x = 1,5 \cdot 2'518,17 = 3'777,25 \text{ kN}$$

$F_r \rightarrow$ Forza resistente orizzontale che si oppone allo scorrimento:

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

in cui

- W_{tot} è il peso totale dell'aerogeneratore e della fondazione [kN];

- δ è l'angolo di attrito tra fondazione e terreno ed è assunto pari a 2/3 del valore dell'angolo di attrito del terreno ($\delta \approx 0,67 \phi$);

$$\rightarrow F_r = 0,9 \cdot 33.190,61 \cdot \tan (0,67 \cdot 33) = 12.135,65 \text{ kN}$$

$$\eta = F_r / F_h = 12.135,65 / 3'777,25 = 3.212 > 1$$

VERIFICATO

10.3 Schemi fondazione

Si riportano in seguito gli schemi a seguito del predimensionamento, delle fondazioni degli aerogeneratori.

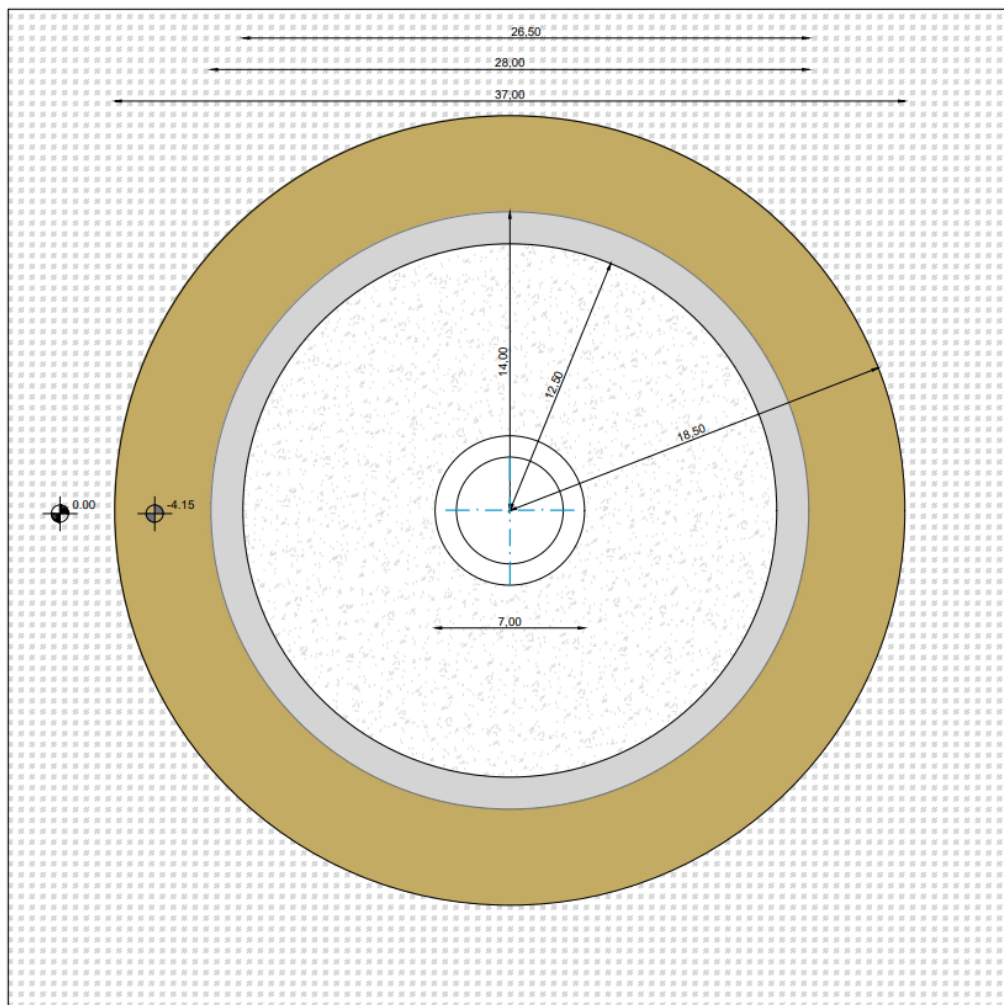
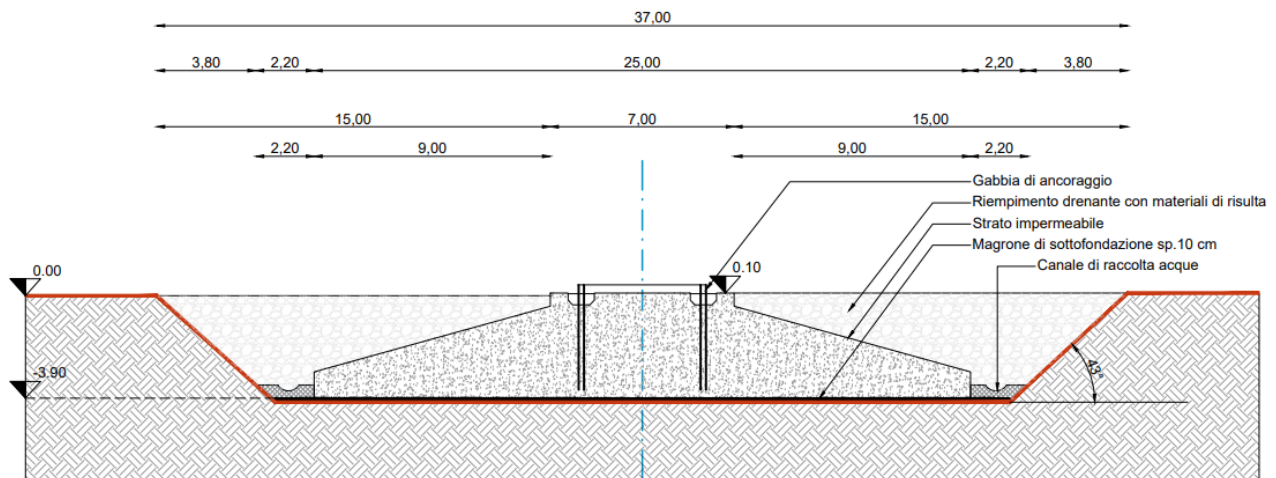


Figura 10 – Schemi plinto