

“BORGO FAZIO”

Realizzazione parco eolico denominato “Borgo Fazio”

Comune di Trapani (TP)

COMMITTENTE



Edison Rinnovabili S.p.A.

Foro Buonaparte n.31 - Milano (MI)
P.IVA: 12921540154

PROGETTAZIONE



Hydro Engineering s.s.
di Damiano e Mariano Galbo
via Rossotti, 39
91011 Alcamo (TP) Italy



Progettista: Ing. Mariano Galbo

RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA

REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
0	PRIMA EMISSIONE	15/06/2023	MG	VF	MG
Codice commessa: EDIS801		Codifica documento: BOF-PD-R0005_0			

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0005_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGIO FAZIO" RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA	2

1. PREMESSA	3
2. IL SITO.....	4
3. DESCRIZIONE IMPIANTO	7
4. FONDAZIONI AEROGENERATORI	8
5. INQUADRAMENTO GEOLOGICO	11
6. INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO	15
7. INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO	17
8. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA	19
9. CONSIDERAZIONI SULLA SISMICITA' DELL'AREA E VALUTAZIONI SUL RISCHIO SISMICO	21
10. FONDAZIONI INDIRETTE: VERICHE GEOTECNICHE ALLO STATOLIMITE ULTIMO E DI ESERCIZIO	34

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0005_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA	3

1. PREMESSA

La società Hydro Engineering s.s. è stata incaricata di redigere il progetto definitivo dell'impianto eolico di "Borgo Fazio" composto da 8 aerogeneratori, ciascuno di potenza nominale pari a 6,00 MW, per una potenza complessiva di 48,0 MW, ubicato nel Comune di Trapani e proposto dalla società Edison Rinnovabili S.P.A. con sede in Foro Buonaparte n.31 – Milano (MI).

Gli aerogeneratori previsti sono SG170-6.0 MW, caratterizzati da un diametro di 170,0 m, un'altezza al mozzo pari a 115 m, diametro rotore pari a 170 m e altezza massima al top della pala pari a 200 m.

L'impianto è quindi composto da 8 aerogeneratori di potenza unitaria pari a 6 MW, e una potenza complessiva installata di 48 MW.

L'area di impianto si trova nel comune di Trapani, in località Borgo Fazio, in un'area a circa 7,5 Km dall'abitato di Fulgatore frazione del Comune di Trapani., su una superficie a destinazione agricolo/pastorale. I terreni sui quali si intende realizzare l'impianto sono tutti di proprietà privata. Il territorio è caratterizzato da un'orografia prevalentemente di basse colline, le posizioni delle macchine vanno da un'altitudine di 90 m. slm. a 220,00 m. slm.

Il presente documento si propone di fornire i calcoli preliminare delle fondazioni.

Il presente documento si propone di fornire la caratterizzazione geotecnica/sismica del sito ove saranno installati gli aerogeneratori ed una verifica preliminare dei pali di fondazione .

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0005_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA	4

2. IL SITO

Gli aerogeneratori (in numero di otto) dell'impianto sono denominati con le sigle:

- T01, T02, T03, T04, T05, T06, T07, T08.

L'area presa in considerazione ricade, come detto, nel territorio dei Comuni di Trapani, E cartograficamente interessa le Tavole I.G.M.:

L'area presa in considerazione ricade, come detto, nel territorio del Comune di Trapani e cartograficamente interessa le Tavole I.G.M.:

- Foglio n°248 III Quadrante SE Erice
- Foglio n°248 III Quadrante SO Trapani
- Foglio n°257 I Quadrante NO Ummari
- Foglio n° 257 I Quadrante SO Vita
- Foglio n° 257 II Quadrante NO Salemi
- Foglio n° 257 III Quadrante NE Baglio Chitarra
- Foglio n° 257 III Quadrante NO Paolini
- Foglio n° 257 IV Quadrante NE Dattilo.
- Foglio n°257 IV Quadrante SE Borgo Fazio
- Foglio n° 257 IV Quadrante SO Birgi Novo

Di seguito le coordinate assolute nel sistema UTM 33 WGS84

TABELLA AEROGENERATORI					
WTG	COMUNE	FOGLIO	PARTICELLA	COORDINATE UTM WGS84	
				E	N
T01	TRAPANI	290	56	293224,00	4192463,00
T02	TRAPANI	286	43-55	294233,00	4193137,00
T03	TRAPANI	277	55	293100,00	4194102,32
T04	TRAPANI	296	1	294948,12	4192878,72
T05	TRAPANI	277	388	292478,54	4194757,94
T06	TRAPANI	278	34	294276,84	4194851,66
T07	TRAPANI	297	108	296482,00	4194803,00
T08	TRAPANI	292	180-181	290528,20	4191407,65

Tabella 1 - Coordinate aerogeneratori nel sistema UTM 33 WGS84

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0005_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA	5

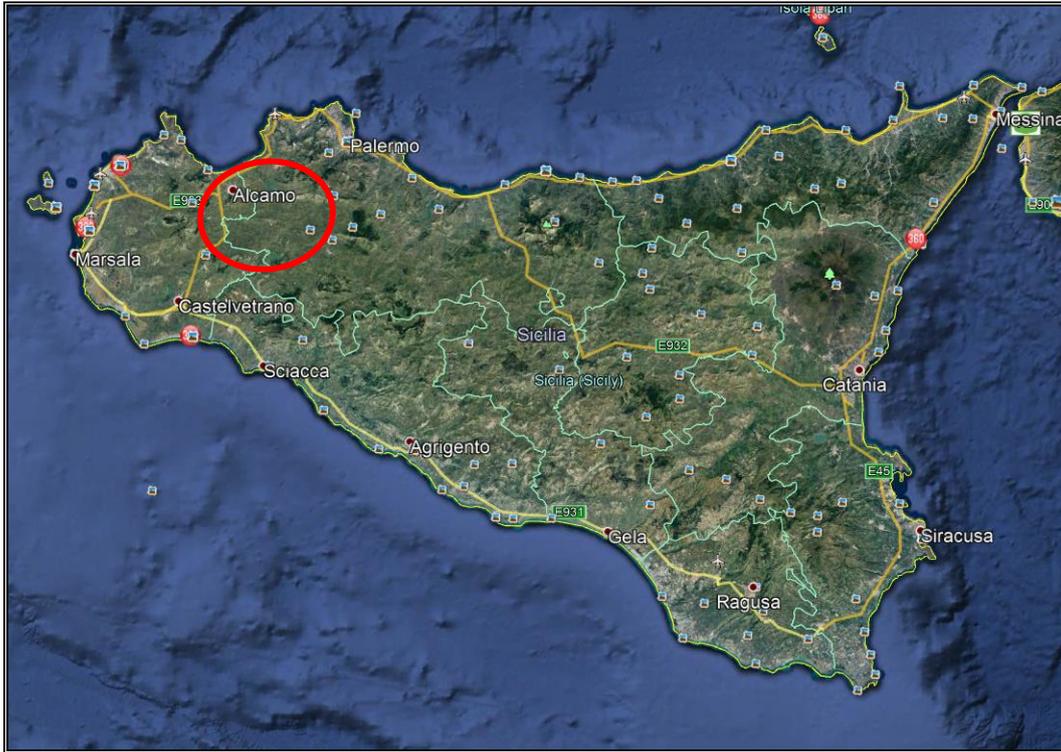


Figura 1 – Ubicazione area di impianto da satellite

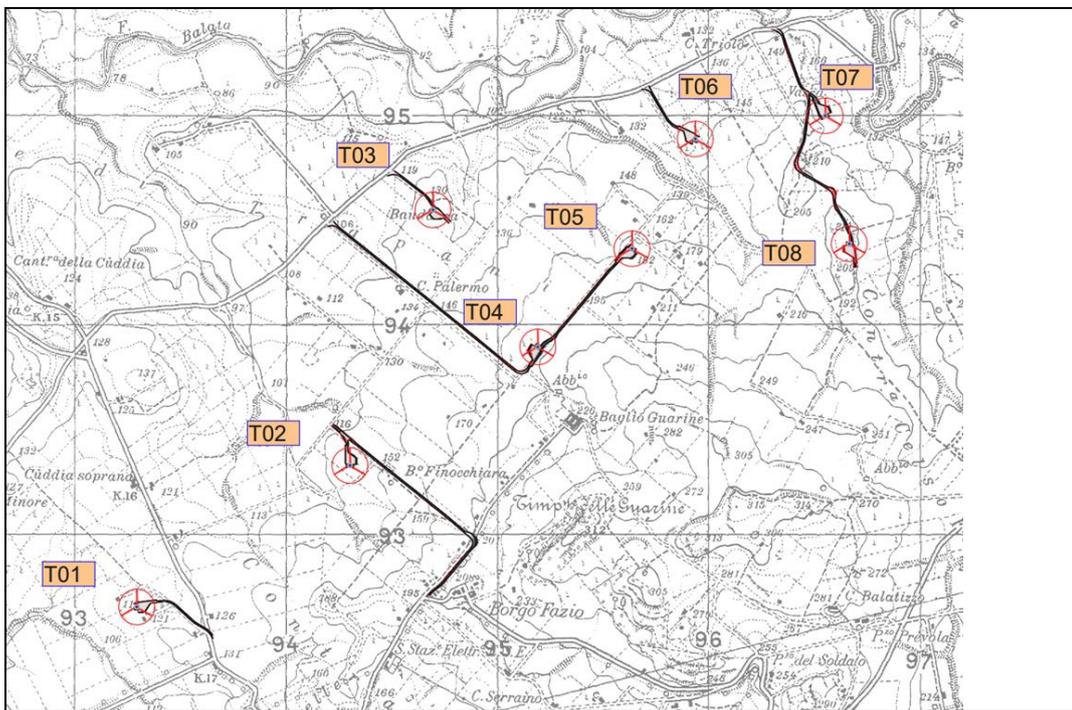


Figura 2 - Inquadramento impianto su IGM 1:25.000

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0005_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA	6

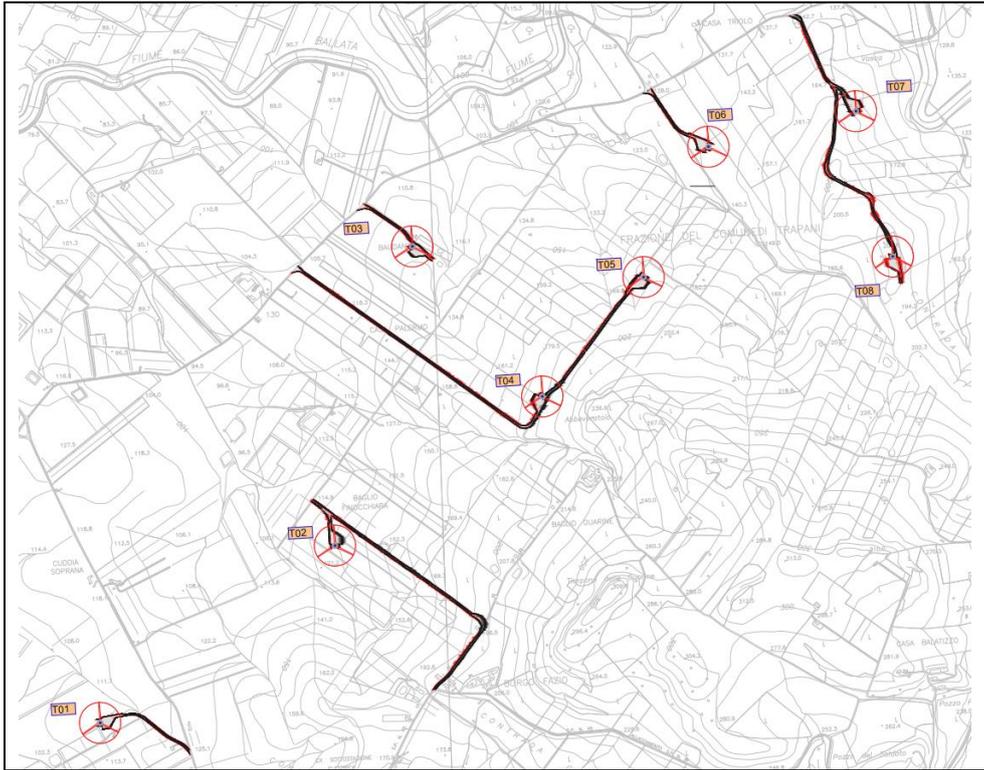


Figura 3 -- Inquadramento impianto su CTR 1:10.000

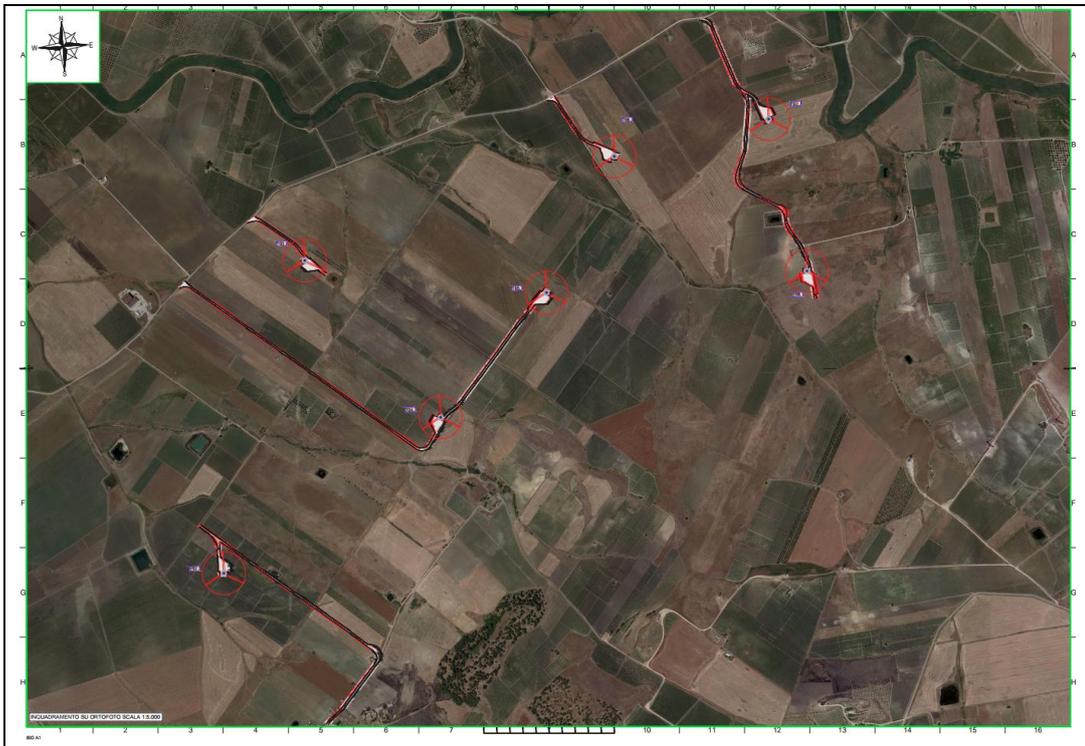


Figura 4- Inquadramento impianto su Ortofoto

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0005_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA	7

3. DESCRIZIONE IMPIANTO

L'impianto eolico si sviluppa su circa 4308 m di strade sterrate di cui 2892 m sono strade esistenti da adeguare.

Gli aerogeneratori verranno scelti tra diversi fornitori ed in grado di sviluppare ciascuno 6,0 MW di potenza massima. Essi avranno un'altezza del mozzo pari a 115,00 m e raggio del rotore pari a 85,00 m. L'altezza dell'aerogeneratore misurata dal piano di imposta sarà, pertanto, pari a 200,00 m. Le fondazioni saranno presumibilmente di tipo indiretto (la scelta finale tra indiretta e diretta sarà fatta a valle delle indagini in fase di progettazione esecutiva) composte come segue:

- pali di fondazione di diametro non inferiore a 1,00 m, di profondità variabili in numero da definire nella successiva fase di progettazione esecutiva;
- plinto di fondazione interamente interrato le cui dimensioni esemplificativamente (le dimensioni finali si potranno avere solo nella successiva fase di progettazione esecutiva) saranno: forma tronco conica di diametro massimo 21,4 m e con altezza variabile da 1,60 m a 2,40 m. All'interno del plinto è annegato un elemento in acciaio denominato anchor cage, cui collegare la prima sezione del sostegno di cui al punto successivo. Le dimensioni sopra riportate sono da interpretarsi come orientative;
- sostegno dell'aerogeneratore costituito da una struttura in acciaio di forma troncoconica, di altezza pari a 115,00 m.

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0005_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA	8

4. FONDAZIONI AEROGENERATORI

Nella attuale fase di progettazione definitiva, si eseguiranno dei calcoli basati sullo studio geologico del dott. Carlo Cibella, elaborato BOF-PD-R0004_R0.

Il dimensionamento finale delle fondazioni sarà effettuato sulla base dei parametri geotecnici derivanti dalle prove in sito e di laboratorio su campioni indisturbati prelevati nel corso di appositi sondaggi in fase di progettazione esecutiva. Durante la fase di progettazione esecutiva a seguito di indagini geologiche più approfondite saranno valutate eventuali alternative alle fondazioni indirette.

L'analisi dei terreni e il predimensionamento delle fondazioni (cfr relazione di calcolo preliminare delle strutture BOF-PD-R0006 e relazione geotecnica/sismica BOF-PD-R0005_R0.) suggeriscono l'adozione di una fondazione su pali.

La fondazione indiretta sarà ipotizzata costituita da un plinto circolare, avente diametro pari a 20,00 m, posto su un numero di pali ipotizzato pari a 26 di diametro $\Phi 1000$ e lunghezza variabile.

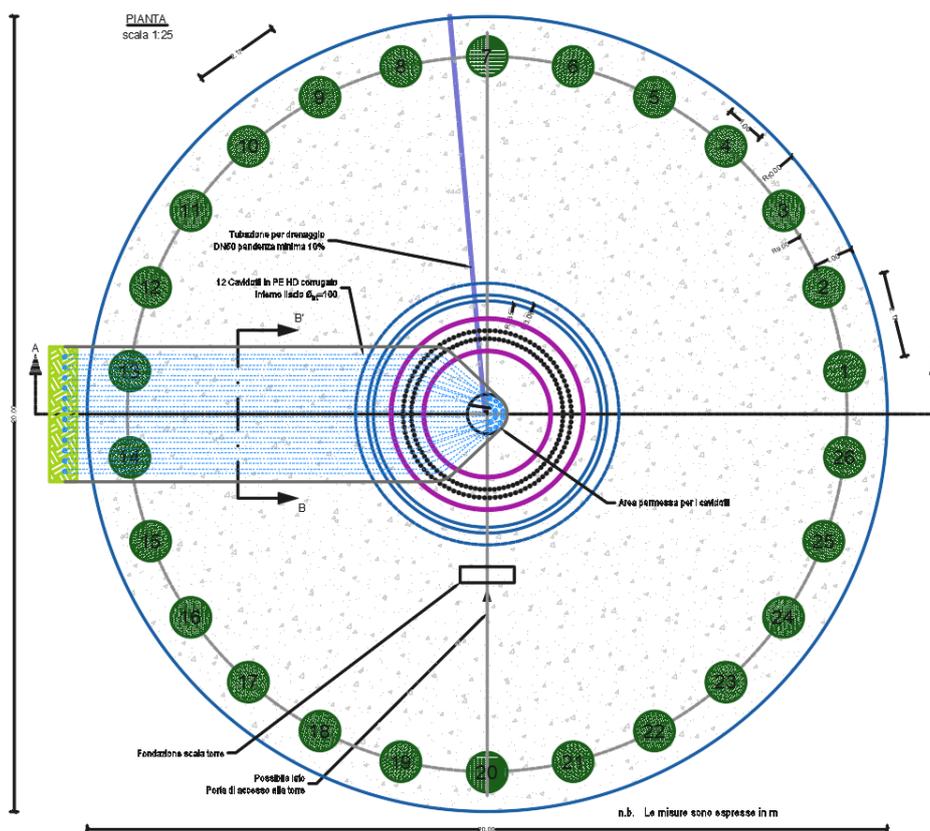


Figura 5 Pianta del plinto con indicazione dei pali di fondazione (n.26 del diametro 100 cm)

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0005_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA	9

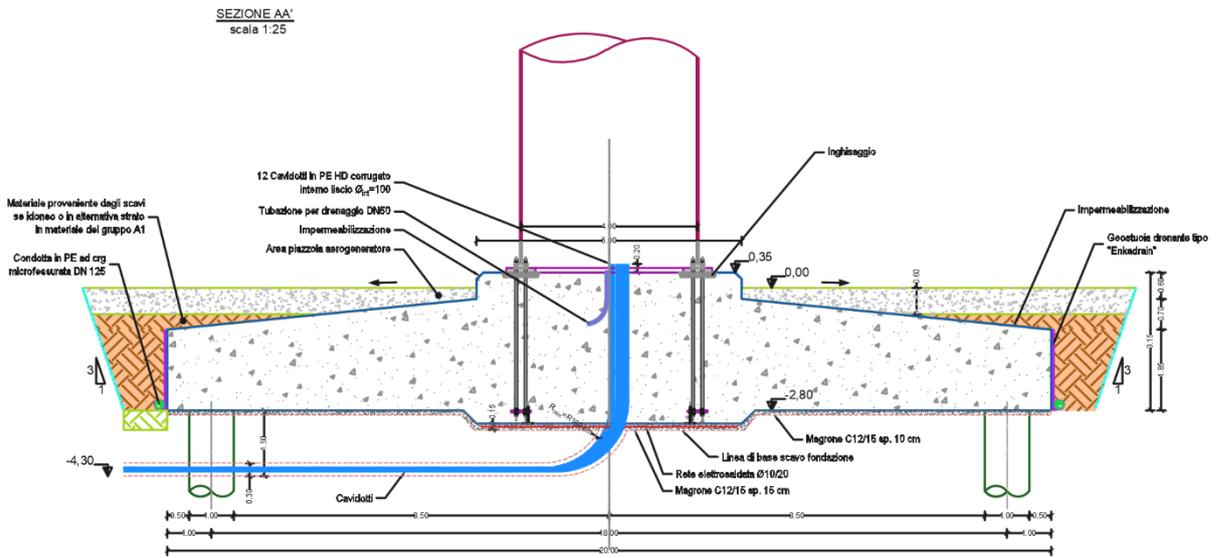


Figura 6 Sezione del plinto

Come risulta dal calcolo di pre-dimensionamento, la fondazione indiretta proposta sarà costituita da un plinto circolare.

Il plinto presenta una suola di forma troncoconica, con altezza pari a 1,85 m al bordo esterno e pari a 2,55 m in corrispondenza della parte centrale, ad un raggio di 3,00 m, ove è presente un colletto cilindrico che si eleva sulla suola di ulteriori 0,60 m. Il colletto presenta quindi un'altezza complessiva pari a 3,15 m.

All'interno del plinto di fondazione, al fine di collegare la torre metallica di sostegno dell'aerogeneratore alla fondazione, sarà annegata una gabbia metallica di tirafondi di ancoraggio di forma cilindrica dotata di una piastra superiore ed una piastra inferiore: la piastra superiore, che fungerà da piastra di distribuzione del carico proveniente dalla torre, presenta uno spessore di 100 mm e larghezza di 650 mm, mentre la piastra inferiore presenta spessore di 50 mm e larghezza 450 mm.

Sotto la piastra di distribuzione, incassata nella fondazione, sarà eseguito un getto di inghisaggio con malta ad alta resistenza dello spessore pari a 11cm e larghezza minima pari a 77cm che ne permetterà il perfetto livellamento.

Entrambe le piastre sono dotate di n°2 serie concentriche di n°100 fori che consentiranno il passaggio di altrettante barre filettate ad alta resistenza di tipo M42 classe 10.9, che, tramite dadi, garantiscono il corretto collegamento delle due piastre alla Torre in elevazione.

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0005_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA	10

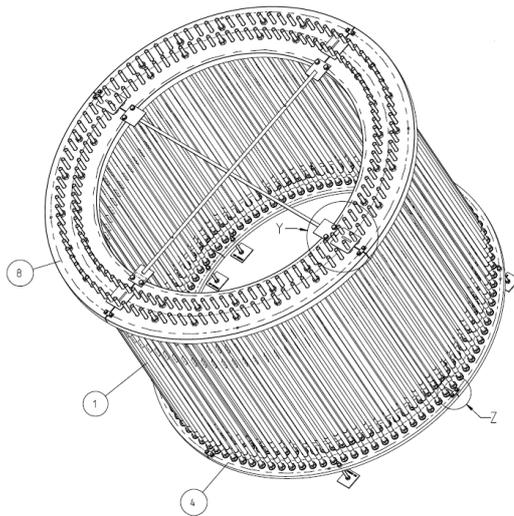


Figura 7 Vista isometrica
d'insieme

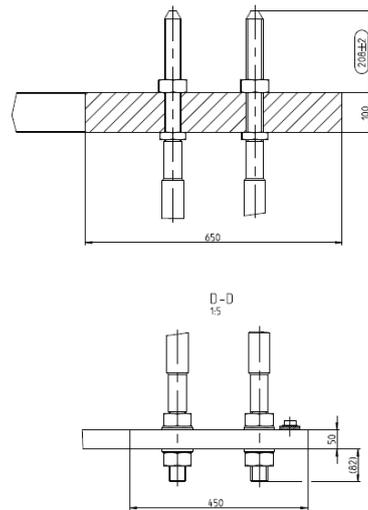


Figura 8 Sezione
verticale

Figura 9 Assieme dell'anchor cage

A tergo dei lati del manufatto dovrà essere realizzato uno strato di drenaggio dello spessore di 60 cm, munito di tubazione di drenaggio forata per l'allontanamento delle acque dalla fondazione. Nella fondazione, oltre al sistema di ancoraggio della torre, saranno posizionate le tubazioni passacavo in PVC corrugato, nonché gli idonei collegamenti alla rete di terra.

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0005_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGIO FAZIO" RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA	11

5. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Il rilevamento geologico di superficie, opportunamente esteso ad un'ampia fascia perimetrale esterna rispetto ai siti di progetto, e successivamente integrato con le indagini geognostiche e geofisiche eseguite, ha permesso di ricostruire in modo soddisfacente la successione dei terreni presenti nell'area studiata.

L'area in esame costituisce un settore della "catena siciliana" e ne presenta quindi buona parte delle caratteristiche litologiche e strutturali; il settore di catena si sviluppa lungo la costa settentrionale dell'Isola ed è caratterizzato da una serie di unità embriciate. Nel territorio studiato sono presenti corpi geologici sovrascorsi e coperture più recenti, costituenti più unità tettoniche impilatesi con vergenza meridionale e derivanti dalla deformazione di domini paleogeografici mesozoico-terziari; queste unità si sono messe in posto durante il Neogene e, successivamente, sono state prima parzialmente ricoperte dai terreni tardorogeni e poi ulteriormente deformate dalla tettonica plio-quadernaria responsabile dell'attuale assetto strutturale.

In particolare, la Sicilia occidentale è caratterizzata da estesi affioramenti di depositi pleistocenici e le sequenze dei terreni affioranti nell'area in esame sono rappresentate sia da questi depositi che da più antiche rocce carbonatiche e, a partire dall'Oligocene inferiore, e da depositi prevalentemente terrigeni.

Le formazioni geologiche che affiorano all'interno dell'area di impianto (si veda la TAV.1, carta geologica allegata), procedendo da quelle di deposizione più antica verso quelle più recenti, sono le seguenti:

- Depositi terrigeni pelitico-arenacei. Argilliti siltose grigiastre, passanti ad arenarie quarzose a grana medio-fine. **Flysch Numidico**. (Oligocene superiore - Miocene inferiore)
- Depositi terrigeni, costituiti da argille sabbiose, sabbie e conglomerati. **Formazione Terravecchia**. (Tortoniano superiore - messiniano inferiore)
- **Alluvioni** attuali e recenti.

Il Flysch Numidico è composto da una potente formazione costituita da un'alternanza di peliti brune, quarzareniti e quarzosiltiti grigio-giallastre nella quale si possono distinguere due diverse litofacies:

- Litofacies arenacea: si presenta costituita da banchi di quarzareniti e subordinatamente di quarzosiltiti bruno-giallastre, i cui granuli, costituiti prevalentemente

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0005_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA	12

da quarzo (indicando così una elevata maturità mineralogica), appaiono sub-arrotondati o a spigoli vivi, mal classati, e cementati da un cemento siliceo, durissimo e compatto; in alternanza sono presenti dei sottili livelli pelitici, grigi o verdastri ad alterazione bruna. La stratificazione è più o meno evidente e presenta una discreta continuità laterale; lungo gli strati è possibile individuare localmente una sedimentazione gradata dei granuli che compongono la roccia, anche se generalmente quest'ultimi mostrano disposizioni caotiche. Nell'area in studio affiora in prossimità del Timpone delle Guarine e Serra delle Rocche con spessori minimi compresi tra 2 e 4 metri.

- Litofacies pelitica: è costituita da argille siltose o marnose, generalmente brune o color tabacco, ricche in ossidi di ferro, con sottili intercalazioni di quarzoareniti o quarzosiltiti e lenti sabbiose costituite anch'esse prevalentemente da quarzo.

Mineralogicamente sono costituite da fillosilicati quali clorite, caolinite, montmorillonite ed illite; inoltre sono presenti minerali di ferro quale siderite e pirite. La struttura si presenta scagliettata secondo delle scaglie millimetriche, caotiche, talora lucide per effetti di striature legate agli stress tettonici che si sono avvicendati nel corso degli eventi geologici. La litofacies pelitica si presenta a luoghi superficialmente a struttura rimaneggiata a causa di lenti movimenti gravitativi che si sono succeduti nel corso dei secoli; si riscontrano inglobati nella matrice argillosa frammenti e blocchi di natura prevalentemente quarzarenitica. Nell'area in esame i depositi del Flysch Numidico sono caratterizzati prevalentemente da argilliti siltose, con colorazione variabile dal grigio al giallo-ocra, passanti ad arenarie quarzose a grana medio-fine. La messa in posto attraverso flussi gravitativi ha dato origine a successioni torbiditiche con strutture sedimentaria da "slump". Sono presenti, inoltre, addizioni di biocalcareni intraclastiche a nummuliti e lepydociline. Le quarzareniti risultano classate in grossi banchi e presentano intercalazioni di argille ed argilliti color tabacco e grigio-verdastre, con rare intercalazioni di brecciole e calcareniti gradate talora glauconitiche.

Su tali depositi verrà realizzata la torre denominata T07.

La Formazione Terravecchia è stata introdotta da Schmidt di Friedberg nel 1962 e prende il nome dalla località tipo: il fianco settentrionale di Cozzo Terravecchia, circa 2 km a nord di S. Caterina Villaerrosa.

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0005_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA	13

I depositi, di età compresa tra il Tortoniano sup. ed il Messiniano inf. (Miocene superiore), si sono depositi in un ambiente lagunare-deltizio e pertanto sono caratterizzati da una forte eteropia di facies sia laterale che verticale. Tale formazione è costituita in basso da una sequenza conglomeratica più o meno potente, passante verso l'alto a sabbie, arenarie, molasse calcaree, molasse dolomitiche, quindi ad argille ed argille marnose, spesso siltose, ricche di livelli sabbiosi di potenza variabile, talora anche con lenti conglomeratiche.

Tali sedimenti si presentano sotto due litofacies tipiche:

- la Litofacies sabbioso-arenacea-conglomeratica, comprende le sequenze prevalentemente sabbiose, arenacee e conglomeratiche presenti nella formazione. Il membro conglomeratico non affiora nell'area in studio, bensì verso l'alto questi depositi terrigeni passano ad argille sabbiose miste a ghiaia. I conglomerati rappresentano la parte inferiore della Fm. Terravecchia e sono costituiti da conglomerati poligenici con elementi a spigoli arrotondati di natura arenacea, carbonatica, metamorfica per lo più di alto grado e, in subordine, ignea. Tali elementi si presentano variamente cementati e talvolta lo sono maggiormente assumendo caratteristiche di materiali semilapidei; sono generalmente embriciati ed hanno dimensioni variabili da pochi centimetri a circa un metro, immersi in una matrice sabbiosa generalmente abbondante. Verso la sommità aumentano le intercalazioni di sabbia ed i ciottoli sono sempre più piccoli e sempre meno embriciati, fino a passare ad una zona costituita da arenarie con sporadiche intercalazioni argillose. La sequenza sabbioso-arenacea è costituita da una potente serie di sabbie, sabbie siltose, arenarie, arenarie molassiche, molasse calcaree di colore da giallastro a grigio, talora con sottili livelli pelitici. La giacitura è in genere lenticolare con stratificazione evidente, spesso incrociata e sono presenti laminazioni incrociate, piane ed a lisca di pesce, con inclinazione spesso variabile delle lamine. La tessitura è clastica con elementi in genere quarzosi, la matrice pelitica ed il grado di cementazione variabile. Il cemento è generalmente di natura argillosa e le sabbie passano a vere e proprie molasse. Quando le sabbie sono cementate da silice si presentano durissime e passano a vere e proprie quarziti. Il grado di erodibilità va da scarso ad elevato in relazione al grado di cementazione.

Su tali depositi verrà realizzata la torre denominata T08.

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0005_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA	14

- Litofacies argilloso-marnosa-sabbiosa, si tratta di argille, argille sabbiose, siltose o marnose di colore grigio-azzurro e grigio-verdastro, spesso con cristalli di gesso, dure e compatte, a frattura concoide e con intercalati sottili livelli sabbiosi che ne marcano la stratificazione.

Dal punto di vista mineralogico sono costituite da un abbondante scheletro sabbioso in cui prevalgono quarzo, gesso, calcite, tracce di dolomite, feldspati, pirite, ossidi di ferro, mentre la frazione argillosa è costituita da kaolinite, illite, montmorillonite e scarsa clorite, cui si aggiungono in minori quantità interlaminazioni illitiche-montmorillonitiche.

La tessitura è brecciata e talora a scaglie; la stratificazione è marcata dai sottili livelli sabbiosi intercalati. Le argille spesso si presentano piuttosto tettonizzate con giunti variamente orientati caratterizzati da superfici lucide. Il grado di erodibilità è elevato.

Su tali depositi verranno realizzate le torri denominate T01, T02, T03, T04.

I Depositi alluvionali, comprendono i depositi alluvionali attuali e recenti, presenti in prossimità degli impluvi che ricadono all'interno del bacino del Fiume Birgi e del Fiume Lenzi - Baiata. Si tratta di rocce prevalentemente sciolte costituite da limo, limo sabbioso, sabbia, sabbia limosa e ghiaia con giacitura sub orizzontale ed assetto lenticolare embriciato. I limi sono costituiti in prevalenza da minerali argillosi e sono privi di tessitura; le sabbie, che presentano granulometria variabile da fine a grossa, sono costituite per la maggior parte da elementi quarzosi e calcarei. Le ghiaie sono caratterizzate da clasti arrotondati immersi in una matrice sabbioso-limosa. Il grado di arrotondamento dei clasti è variabile a seconda del materiale di provenienza, la composizione litologica è anch'essa diversa in funzione delle formazioni litologiche affioranti nel bacino, il deposito è privo di cementazione.

Su tali depositi verranno realizzate le torri denominate T05, T06.

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0005_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA	15

6. INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

La delineazione delle caratteristiche geomorfologiche dell'area è avvenuta secondo una serie di passaggi che hanno consentito di cartografare sulla carta geomorfologica in allegato, le principali forme di versante presenti all'interno del parco eolico. Lo studio è stato condotto tramite il rilievo di campagna, l'analisi aerofotogrammetrica delle ortofoto che ricoprono l'intero territorio e la determinazione delle caratteristiche fisiografiche dell'area.

Il parco eolico ricade nel settore più occidentale della catena siciliana, all'interno dei bacini idrografici del Fiume Birgi e del Fiume Lenzi Baiata.

Domina l'area la presenza del Fiume della Cuddia-Fiume Ballata, posto nel settore settentrionale del parco, con andamento est-ovest prevalentemente meandriforme. L'assetto geomorfologico dell'area in esame è frutto dell'interazione tra diversi fattori, in particolare delle caratteristiche fisiografiche (distribuzione delle altimetrie, esposizione e pendenza dei versanti), pluviometriche (distribuzione ed intensità delle precipitazioni) e lito-strutturali (litologie affioranti e loro assetto strutturale) del territorio.

Il territorio in studio rientra nel sistema morfoclimatico temperato a clima mediterraneo. Si tratta di una zona contraddistinta da inverni miti ed umidi, gelo raro e poco intenso ed estati calde, generalmente asciutte.

La distribuzione della piovosità all'interno dell'area di studio è stata ricostruita, sulla base dei dati pluviometrici di 3 stazioni (Borgo Fazio 208 m s.l.m., Diga Rubino 180 m s.l.m. e Salemi 430 m s.l.m.) gestite dall'Ufficio Idrografico Regionale, applicando il metodo dei topoieti (Thiessen, 1911). L'analisi dei dati registrati nelle stazioni pluviometriche, ha permesso di calcolare le precipitazioni medie annue pari a circa 700 mm.

La natura litologica dei terreni qui affioranti, in concomitanza alle caratteristiche sopra descritte, determina la morfologia dell'area; sulla quasi totalità del settore, affiorano litologie di tipo pseudocoerente, rappresentate dai terreni delle litofacies argilloso-arenacee del Flysch e dei depositi terrigeni della Formazione Terravecchia, costituiti in prevalenza da argille, argille sabbiose e arenarie di taglia fine.

Il paesaggio che caratterizza questi affioramenti è costituito essenzialmente da rilievi dolcemente ondulati con versanti generalmente a debole pendenza, intervallati da depressioni sub pianeggianti e con forme tipiche di una evoluzione geomorfologica dominata prevalentemente dall'erosione areale dovuta al ruscellamento diffuso.

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0005_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA	16

In percentuali più ridotte affiorano rocce lapidee, sia di natura arenacea, afferibili alle arenarie quarzose della litofacies arenacea del Flysch.

Ad interrompere la regolarità morfologica è la presenza del Fiume Ballata che dalla diga Rubino si dirige verso il mare, nell'area in esame, secondo una direzione Est-Ovest. Tale fiume presenta un alveo poco inciso con un andamento meandriforme, caratterizzato da un fondo piatto e sponde non troppo pronunciate.

Le litologie affioranti nell'area in esame sono sottoposte, anche se in maniera blanda, sia all'azione degli agenti esogeni che alla forza di gravità. I processi morfogenetici che agiscono principalmente sul territorio sono legati all'azione delle acque correnti superficiali. Le acque diffuse e incanalate, in corrispondenza dei copiosi affioramenti argillosi, hanno modellato i rilievi addolcendone i versanti e l'incisione fluviale si è sviluppata secondo un reticolo prevalentemente dendritico, disegnando una rete a bassa densità di drenaggio.

Dallo studio geomorfologico di dettaglio, così eseguito, si è evinto che i siti interessati dalla installazione degli aerogeneratori si presentano sub pianeggianti ad andamento collinare e non risultano essere interessati da fenomeni franosi, così come confermato dalla cartografia del P.A.I. della Regione Sicilia (carte dei dissesti, della pericolosità e del rischio geomorfologico ed idraulico), relativa al *Bacino Idrografico del Fiume Birgi e Area territoriale tra il bacino del Fiume Birgi ed il bacino Idrografico del Fiume Lenzi -Baiata (050)*, in cui dette aree non rientrano tra quelle interessate da vincoli di tipo geomorfologico. Si segnala la presenza di un dissesto attivo, censito nelle cartografie dell'Autorità di Bacino come area a franosità diffusa caratterizzata da Pericolosità P2, distante circa 80 metri dall'aerogeneratore T07. La distanza è tale che non creerà alcuna interferenza con la fondazione della torre, tuttavia si rimanda alla progettazione definitiva per accertare con maggiore dettaglio le caratteristiche fisico-meccaniche del sottosuolo con lo scopo di definire al meglio la fondazione da adottare.

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0005_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA	17

7. INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO

L'assetto generale del territorio, legato non soltanto alla permeabilità dei terreni affioranti, ma anche ai loro rapporti giacitureali, nonché all'apporto pluviometrico, non presenta acquiferi di notevole entità che potrebbero dare origine a scaturigini di portata ragguardevole.

Le caratteristiche idrogeologiche dei termini presenti nell'area in studio sono diversificate in funzione delle caratteristiche intrinseche del litotipo.

Possiamo così schematizzare in breve:

- dove prevale la componente sabbiosa, la permeabilità è del tipo primario e la porosità risulta essere medio-elevata, mentre si riduce a bassa con la prevalenza della frazione limosa e l'assenza di ghiaie;
- dove prevale la componente argillosa su quella sabbio-limosa si ha una permeabilità primaria con porosità estremamente ridotta;
- dove prevale la componente sabbiosa-arenaceo-conglomeratica si ha una permeabilità primaria elevata per porosità cui si aggiunge talvolta un'altrettanta elevata permeabilità secondaria per fatturazione;
- dove si ha commistione di facies, la permeabilità risulta di natura complessa per la forte eterogeneità dei termini;
- Nelle rocce lapidee di natura carbonatica o arenitica la permeabilità primaria risulta bassa o nulla invece ha una notevole incidenza la permeabilità secondaria, per fratturazione, che può risultare talora elevata;

Nei locali orizzonti litologici si possono individuare terreni di natura prevalentemente argillosa, riferibili alle litofacies argillose del Flysch Numidico e della F.ne Terravecchia.

Si tratta di litotipi classificabili con permeabilità bassa o nulla. In tale classe di permeabilità vengono inclusi tutti i tipi litologici che presentano una permeabilità così bassa da essere, ai fini del presente studio, considerati praticamente impermeabili. Sono, però, generalmente sovrastati da uno strato di alterazione a permeabilità medio-bassa dello spessore massimo di circa 5-7 metri dove possono essere presenti accumuli idrici superficiali con prevalente carattere stagionale che in periodo di piogge copiose possono anche raggiungere il piano di campagna.

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0005_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA	18

All'interno delle formazioni del Flysch Numidico e della Terravecchia sono presenti anche litotipi di natura prevalentemente sabbiosa-arenaceo-conglomeratica nei quali si registra una permeabilità primaria elevata per porosità a cui si aggiunge talvolta un'altrettanta elevata permeabilità secondaria per fatturazione. All'interno di tali litotipi si possono rinvenire livelli idrici sospesi, privi di continuità laterale.

Le alluvioni presentano una permeabilità variabile da medio-bassa ad elevata in funzione del prevalere della classe granulometrica più fine su quella grossolana. Tali depositi, considerata la loro composizione, presentano un comportamento idraulico piuttosto discontinuo, pertanto difficili da classificare dal punto di vista idraulico. Nell'area in esame soprattutto in prossimità della piana alluvionale del Fiume Ballata la falda freatica è presente e piuttosto superficiale, interessando i primi metri del sottosuolo. In occasione delle abbondanti precipitazioni invernali non è raro che essa possa raggiungere il piano di campagna.

L'area interessata dal parco eolico non risulta essere sede di falde idriche significative, tuttavia negli strati superficiali del sottosuolo composti da depositi argillosi alterati oppure all'interno di litotipi permeabili per fratturazione o per porosità, quali le areniti e le sabbie, si possono avere accumuli idrici confinati che risentono dell'apporto idrico meteorico. Fanno eccezione i terreni su cui verranno realizzati gli aerogeneratori T05 e T06 che, come riferito, ricadono sulla piana alluvionale del Fiume Ballata. In quest'area, soprattutto nel periodo invernale la falda può raggiungere il piano di campagna.

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0005_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGIO FAZIO" RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA	19

8. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

Gli aerogeneratori in progetto verranno realizzati essenzialmente su tre diverse tipologie litologiche: Le torri T01, 02, 03, 04 e 07 ricadranno su depositi argilloso-sabbiosi afferenti alla formazione Terravecchia e Flysch numidico. Le torri T05 e T06 sui depositi alluvionali e la torre T08 su depositi arenitici afferenti alla formazione Terravecchia.

In assenza di opportune indagini geognostiche, in questa fase progettuale ci limiteremo

Gli aerogeneratori in progetto verranno realizzati essenzialmente su tre diverse tipologie litologiche: Le torri T01, 02, 03, 04 e 07 ricadranno su depositi argilloso-sabbiosi afferenti alla formazione Terravecchia e Flysch numidico. Le torri T05 e T06 sui depositi alluvionali e la torre T08 su depositi arenitici afferenti alla formazione Terravecchia.

In assenza di opportune indagini geognostiche, in questa fase progettuale ci limiteremo a descrivere il sottosuolo sulla base delle conoscenze stratigrafiche locali.

Aerogeneratori T01, T02, T03, T04 e T07.

Verranno realizzati su aree sub pianeggianti oppure a debole pendenza composte litologicamente da terreni prevalentemente argillosi caratterizzati da una coltre superficiale piuttosto alterata, di colore marrone-giallastro, al di sotto della quale è presente il substrato argilloso inalterato di colore grigio.

La coltre superficiale di alterazione presenta uno spessore generalmente non superiore ai 5-6 metri. E' composta da argille limose e sabbiose, di colore variabile dal nocciola al beige, con una plasticità variabile da bassa a media e con una consistenza variabile da bassa a media. La struttura è omogenea. I parametri fisico-meccanici della coltre alterata sono i seguenti:

$$\gamma = 18-19 \text{ KN/m}^3 \quad c' = 8-15 \text{ KPa} \quad \phi' = 18^\circ - 22^\circ \quad C_u = 60-65 \text{ KPa}$$

Dove:

γ = peso dell'unità di volume; c' e ϕ' = coesione ed angolo di attrito in condizioni drenate; C_u = Coesione non drenata

Il substrato inalterato si presenta di colore grigio, da consistente a molto consistente, con una struttura che generalmente è scagliettata, la plasticità è bassa. I parametri fisico-meccanici dei depositi argillosi inalterati sono i seguenti:

$$\gamma = 19-20.5 \text{ KN/m}^3 \quad c' = 15-28 \text{ KPa} \quad \phi' = 22^\circ - 26^\circ \quad C_u = 120-170 \text{ KPa}$$

Aerogeneratori T05 e T06.

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0005_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA	20

Verranno realizzati su aree pianeggianti ricadenti nella piana alluvionale del fiume Ballata.

Tali depositi presentano uno spessore variabile da 3 a circa 6 metri e sono composti da limi, limi sabbiosi, sabbie, sabbie limose e ghiaie con giacitura sub orizzontale. Si tratta di terreni solitamente saturati, umidi e compressibili, sedi della falda acquifera. La consistenza è bassa e la plasticità è alta.

I parametri fisico-meccanici delle alluvioni, in via del tutto cautelativa, sono i seguenti:

$$\gamma = 17.2-18 \text{ KN/m}^3 \quad c' = 0-8 \text{ KPa} \quad \varphi' = 16^\circ - 19^\circ \quad Cu = 30-50 \text{ KPa}$$

Aerogeneratore T08.

Verrà realizzato sui depositi terrigeni costituiti da argille sabbiose miste ad arenarie e ghiaie afferenti alla Formazione geologica nota in letteratura come Terravecchia.

Si tratta di depositi eterogenei composti da alternanze di limi-sabbiosi, sabbie e ghiaie. Superficialmente dal punto di vista granulometrico prevalgono le classi più grossolane, per cui al di sotto del terreno vegetale la coltre di alterazione risulta composta da sabbie limose di colore marrone-giallastro con rare ghiaie e blocchi. Nell'area in esame lo spessore non dovrebbe superare in quattro-cinque metri. Al di sotto di tale profondità è presente il substrato argillo-sabbioso e sabbio-argilloso di colore grigio, consistente e poco plastico, contenente rari blocchi di arenarie a spigoli sub arrotondati. I parametri fisico-meccanici della coltre alterata sono i seguenti:

Coltre di alterazione:

$$\gamma = 18-19 \text{ KN/m}^3 \quad c' = 5-10 \text{ KPa} \quad \varphi' = 25^\circ - 30^\circ \quad Cu = 60-75 \text{ KPa}$$

Substrato:

$$\gamma = 19.5-21 \text{ KN/m}^3 \quad c' = 15-30 \text{ KPa} \quad \varphi' = 28^\circ - 35^\circ \quad Cu = 135-200 \text{ KPa}$$

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0005_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA	21

9. CONSIDERAZIONI SULLA SISMICITA' DELL'AREA E VALUTAZIONI SUL RISCHIO SISMICO

Per ridurre gli effetti del terremoto, l'azione dello Stato si è concentrata sulla classificazione del territorio, in base all'intensità e frequenza dei terremoti del passato, e sull'applicazione di speciali norme per le costruzioni nelle zone classificate sismiche.

La legislazione antisismica italiana, allineata alle più moderne normative a livello internazionale prescrive norme tecniche in base alle quali un edificio debba sopportare senza gravi danni i terremoti meno forti e senza crollare i terremoti più forti, salvaguardando prima di tutto le vite umane. Sino al 2003 il territorio nazionale era classificato in tre categorie sismiche a diversa severità. I Decreti Ministeriali emanati dal Ministero dei Lavori Pubblici tra il 1981 ed il 1984 avevano classificato complessivamente 2.965 comuni italiani su di un totale di 8.102, che corrispondono al 45% della superficie del territorio nazionale, nel quale risiede il 40% della popolazione.

Nel 2003 sono stati emanati i criteri di nuova classificazione sismica del territorio nazionale, basati sugli studi e le elaborazioni più recenti relative alla pericolosità sismica del territorio, ossia sull'analisi della probabilità che il territorio venga interessato in un certo intervallo di tempo (generalmente 50 anni) da un evento che superi una determinata soglia di intensità o magnitudo. A tal fine è stata pubblicata [l'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003](#), sulla Gazzetta Ufficiale n. 105 dell'8 maggio 2003.

Il provvedimento detta i principi generali sulla base dei quali le Regioni, a cui lo Stato ha delegato l'adozione della classificazione sismica del territorio (Decreto Legislativo n. 112 del 1998 e Decreto del Presidente della Repubblica n. 380 del 2001 - "Testo Unico delle Norme per l'Edilizia"), hanno compilato l'elenco dei comuni con la relativa attribuzione ad una delle quattro zone, a pericolosità decrescente, nelle quali è stato riclassificato il territorio nazionale.

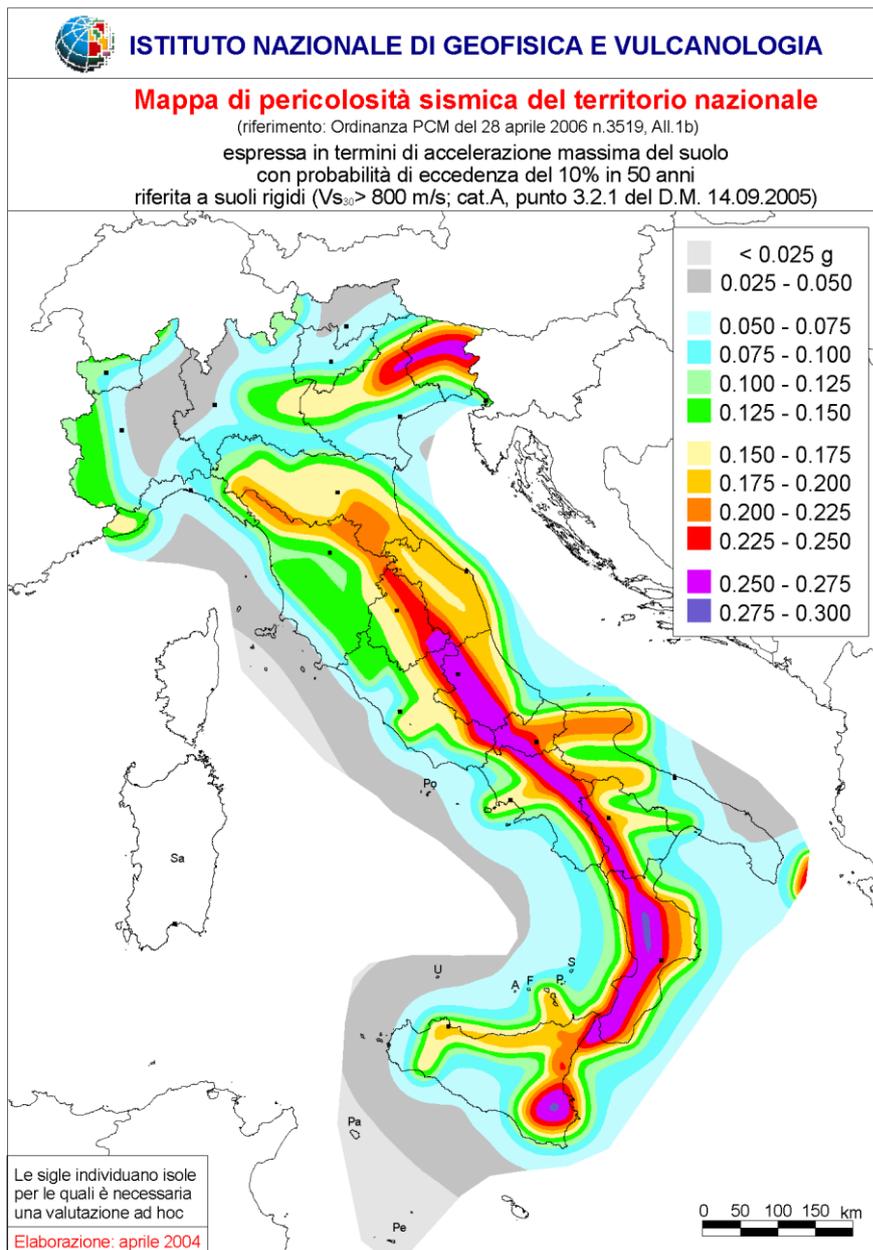
In virtù della normativa vigente (Definizione dei terreni secondo l'Ordinanza 3519/06 – Categoria sismica), il territorio nazionale è suddiviso, sotto il profilo sismico, in quattro diverse categorie alle quali è associata un'accelerazione orizzontale massima:

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0005_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA	22

Zona Sismica	Accelerazione con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni (ag)
1	$ag > 0,25 \text{ g}$
2	$0,15 < ag \leq 0,25 \text{ g}$
3	$0,05 < ag \leq 0,15 \text{ g}$
4	$ag \leq 0,05 \text{ g}$

Tabella 2

Figura 10 Suddivisione delle zone sismiche in relazione all'accelerazione di picco su terreno rigido



Secondo il predetto O.P.C.M., il territorio del Comune di Trapani viene classificato come "Zona 2", a cui corrisponde un valore dell'accelerazione orizzontale di picco "ag" compreso tra 0,15 e 0,25 g.

Le attuali Norme Tecniche per le Costruzioni (Decreto Ministeriale del 17/01/2018) hanno modificato il ruolo che la classificazione sismica aveva ai fini progettuali: per ciascuna zona – e quindi territorio

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0005_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGIO FAZIO" RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA	23

comunale – precedentemente veniva fornito un valore di [accelerazione di picco](#) e quindi di [spettro di risposta elastico](#) da utilizzare per il calcolo delle azioni sismiche.

Dal Gennaio 2018, con l'entrata in vigore delle Norme Tecniche per le Costruzioni del 2018, per ogni costruzione ci si deve riferire ad una accelerazione di riferimento "propria" individuata sulla base delle coordinate geografiche dell'area di progetto e in funzione della [vita nominale](#) dell'opera. Un valore di pericolosità di base, dunque, definito per ogni punto del territorio nazionale, su una maglia quadrata di 5 km di lato, indipendentemente dai confini amministrativi comunali.

La classificazione sismica (zona sismica di appartenenza del comune) rimane utile solo per la gestione della pianificazione e per il controllo del territorio da parte degli enti preposti (Regione, Genio civile, ecc.).

Il territorio comunale di Trapani è incluso nell'elenco delle località sismiche di II categoria, a cui si attribuisce un grado di sismicità $S = 9$ ed un valore di accelerazione con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni (ag) compreso tra 0,15 e 0,25 ([Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3519 del 28 aprile 2006](#)).

La sismicità dell'area in esame, va interpretata nell'ambito della sismicità dei Monti di Palermo, prossimi alla "Valle del Belice".

Esiste nella letteratura (Baratta 1934, De Panfilis 1959) tutta una serie di notizie relative ad eventi sismici che hanno avuto i loro epicentri in zone più occidentali rispetto all'area in esame.

Le prime notizie risalgono al 1593 e ricordano un terremoto che interessa il paese di Corleone, successivamente nel 1724 e 1740 scosse sismiche furono avvertite a Sciacca, Menfi e Sambuca di Sicilia.

Nel 1897 una nuova scossa sismica interessa Corleone e fu avvertita fino a Ustica e a Palermo. Nel Dicembre 1909 una forte scossa con intensità pari al VII grado si verificò con epicentro nella zona di Camporeale.

Un'intensa attività sismica si è verificata tra il 18 ed il 20 novembre 1954 con area epicentrale localizzata nei pressi dell'abitato di Grisi, la scossa principale, valutata del VI grado della scala Mercalli, fu registrata negli osservatori di Palermo e Messina e fu risentita con intensità valutata del V grado a Camporeale, di IV grado a Partinico, Borgetto, Pioppo, Alcamo, Poggioreale e Roccamena, di III grado a Gibellina, Giardinello e Montelepre, e di II grado a Calatafimi, S. Ninfa, Sambuca di Sicilia, Bisacchino, Piana degli Albanesi, Carini e Balestrate;

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0005_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGIO FAZIO" RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA	24

successivamente al 1956 un movimento sismico a carattere locale ha interessato nuovamente il territorio di Grisi.

Nel 1957 alcune scosse sismiche, prevalentemente a carattere strumentale furono avvertite con intensità pari al V grado a S. Margherita Belice e Sambuca di Sicilia, del IV grado a Caltabellotta, del III grado a Sciacca, S. Anna, Montevago e Salaparuta e del II grado a Menfi.

Nel 1968, infine, una vasta area situata a cavallo della valle del Belice fu interessata da una serie di forti scosse sismiche che provocarono gravissimi danni e vittime specialmente negli abitati di Gibellina, Salaparuta, Montevago, Poggioreale, S. Margherita Belice, Salemi, Partanna, Menfi, mentre danni minori si ebbero a Camporeale, Bisacquino, Calatafimi e Alcamo.

Dei suddetti sismi quello che ha determinato effetti più intensi, per l'area oggetto del presente studio, fu quello che interessò la valle del Belice nel 1968. In particolare la scossa di maggiore intensità che si verificò il 15 gennaio alle ore 2,30 circa con Magnitudo 6 e con intensità epicentrale di grado IX nella Valle del Belice e che rase al suolo diversi centri abitati, provocò anche danni seppur limitati nell'ambito dell'abitato di Monreale.

Relativamente all'interpretazione geotettonica degli eventi sismici che hanno interessato la valle del Belice, vari autori hanno cercato di fornire valide spiegazioni all'improvvisa attivazione sismica di questa area.

In un lavoro preliminare (Bosi, Cavallo e Manfredini, 1968) gli autori identificano nella regione interessata dagli eventi sismici due zone che almeno durante l'intervallo Miocene medio-Calabriano, hanno avuto una evoluzione geologica sensibilmente diversa.

A Sud e a Sud-Est dell'allineamento Montevago-Contessa Entellina-Corleone, i Monti Sicani e le loro propaggini occidentali (M. Magaggiaro) costituiscono una zona in massima parte emersa durante il Miocene ed il Pliocene. A Nord e a Nord-Ovest dell'allineamento precedentemente indicato, la Valle di Mazara e probabilmente la massima parte della valle del Belice sono state interessate da una notevole subsidenza che ha portato il tetto della serie prevalentemente calcarea (Eocene – Oligocene) ad oltre 1000 m di profondità, come dimostrato da sondaggi per ricerche petrolifere e da studi geofisici.

Il bacino subsidente è stato colmato da depositi argilloso arenacei, attribuibili al Miocene Medio, e dai terreni della serie gessoso-solfifera, che rappresenta la fine del riempimento del bacino subsidente ed il termine del relativo ciclo sedimentario.

I sedimenti del successivo ciclo pliocenico, almeno dalla parte alta del Pliocene inferiore, si sono depositati in due bacini distinti, separati da una dorsale orientata circa NE-SO, disposta

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0005_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGIO FAZIO" RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA	25

grosso modo lungo la direttrice Castelvetro-M.te Finestrelle, e corrispondenti dal punto di vista paleogeografico a due golfi del mare pliocenico che si aprivano verso Sud.

La notevole inclinazione degli strati Miocenici e Pliocenici verso i quadranti meridionali e l'andamento della linea di costa del mare Calabro, che presenta una marcata insenatura nella zona di Partanna (Goggi 1965), sono forse una conferma del prolungarsi della subsidenza durante il Calabro in corrispondenza della zona compresa fra le due linee strutturali precedentemente illustrate, e cioè la linea Montevago-Bisacchino-Corleone e la linea Castelvetro M.te Finestrelle. Dall'esame delle notizie raccolte sembra che, della lunga serie degli eventi sismici che hanno distrutto gli abitati di Gibellina, Salaparuta e Montevago, le zone di Contessa Entellina, Bisacchino e Corleone potrebbero essere indicate come aree epicentrali di queste scosse. Sulla base di queste risultanze il terremoto della Valle del Belice potrebbe essere inquadrato in uno schema geologico abbastanza preciso: l'area sismica, infatti verrebbe a coincidere con la zona compresa fra due linee sub-parallele che hanno separato per lunghi periodi zone a differente evoluzione geologica e che potrebbero rivestire pertanto carattere di giunzioni, sismicamente attive, tra zolle crostali a diversa mobilità.

Un'ultima citazione doverosa, per concludere il quadro sismico dell'area, è quella che riguarda il sisma del 6 settembre 2002 e dello sciame sismico che a tutt'oggi è in corso d'esaurimento. Nella fattispecie si è trattato di una scossa che si è manifestata con Magnitudo pari a circa 5 e con intensità epicentrale di grado VII nell'area compresa fra Ustica Alicudi e Filicudi, nel basso Tirreno, che è stata vistosamente avvertita ma ha, fortunatamente, prodotto danni modesti nell'ambito dell'abitato di Monreale.

Nell'abitato di Palermo i danni sono stati più consistenti specie nel settore cittadino Sud-orientale.

E' opportuno soffermarsi su alcuni aspetti di carattere generale utili all'inquadramento del "problema sismico".

La propagazione delle onde sismiche verso la superficie è influenzata dalla deformabilità dei terreni attraversati. Per tale ragione gli accelerogrammi registrati sui terreni di superficie possono differire notevolmente da quelli registrati al tetto della formazione di base, convenzionalmente definita come substrato, nel quale le onde di taglio, che rappresentano la principale causa di trasmissione degli effetti delle azioni sismiche verso la superficie, si propagano con velocità maggiori o uguali a 800 m/sec.

Si può osservare in generale che nel caso in cui la "formazione di base" sia ricoperta da materiali poco deformabili e approssimativamente omogenei (es. calcari e calcareniti) gli

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0005_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA	26

accelerogrammi che si registrano al tetto della formazione di base non differiscono notevolmente da quelli registrati in superficie: inoltre in tale caso lo spessore dei terreni superficiali non influenza significativamente la risposta dinamica locale.

Nel caso in cui la formazione di base è ricoperta da materiali deformabili, gli accelerogrammi registrati sulla formazione in superficie possono differire notevolmente, in particolare le caratteristiche delle onde sismiche vengono modificate in misura maggiore all'aumentare della deformabilità dei terreni.

La trasmissione di energia dal bed rock verso la superficie subisce trasformazioni tanto più accentuate quanto più deformabili sono i terreni attraversati; all'aumentare della deformabilità alle alte frequenze di propagazione corrispondono livelli di energia più bassi e viceversa a frequenze più basse corrispondono livelli di energia più alti.

Il valore del periodo corrispondente alla massima accelerazione cresce quanto la rigidità dei terreni diminuisce; nel caso di rocce sciolte tale valore aumenta anche all'aumentare della potenza dello strato di terreno.

In particolare l'esame della risposta sismica locale consente di affermare che nell'area interessata dal progetto, di cui al presente studio, si può escludere "la presenza di aree soggette a fenomeni di liquefazione".

In definitiva si osserva che l'area strettamente oggetto di interventi risulta sismicamente stabile in relazione alle caratteristiche geomorfologiche, litologiche, stratigrafiche e sismiche. Si precisa inoltre, che si riscontrano due ristrette aree interessate da fenomeni gravitativi di versante nelle quali, in occasione di un evento sismico, si potrebbero creare fenomeni di amplificazione sismica locale.

Caratterizzazione sismica del sottosuolo ai sensi del DM 17.01.2018

Per la caratterizzazione sismica del sottosuolo in questa fase progettuale sono stati acquisiti i risultati di indagini sismiche tipo Masw effettuate in aree limitrofe a quelle in esame, nell'ambito di progetti relativi ad impianti fotovoltaici.

L'indagine sismica tipo Masw ha lo scopo di individuare le velocità di propagazione delle onde sismiche secondarie (onde S) all'interno dei terreni che costituiscono i primi 30 metri di sottosuolo, secondo la normativa vigente (D.M. 17/01/2018).

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0005_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA	27

Metodo d'indagine e risultati ottenuti

Quando un terreno viene sollecitato elasticamente, lungo l'interfaccia terreno-aria, si generano onde di Rayleigh attraverso l'interazione tra le onde di compressione P e le onde di taglio S. E' noto che la propagazione delle onde superficiali, nel caso di mezzi stratificati e trasversalmente isotropi, avviene in maniera diversa rispetto al caso di mezzi omogenei; non esiste più una unica velocità ma ogni frequenza è caratterizzata da una diversa velocità di propagazione a sua volta legata alle varie lunghezze d'onda. Queste interessano il terreno a diverse profondità e risultano influenzate dalle caratteristiche elastiche, appunto variabili con la profondità. Questo comportamento è fondamentale nello sviluppo dei metodi sismici che utilizzano le onde di superficie.

L'elaborazione e l'interpretazione dei dati sismici consente di analizzare i dati acquisiti in campagna in modo tale da poter ricavare il profilo verticale della VS (velocità delle onde di taglio) ed effettuare la classificazione del suolo ($V_{s,30}$ e $V_{s,eq}$) secondo le normative tecniche nazionali ed internazionali e la stima dei principali parametri geotecnici.

Tale risultato viene ottenuto tramite inversione delle curve di dispersione delle onde di Rayleigh, determinate tramite la tecnica MASW.

Le analisi dei profili sismici MASW hanno permesso la definizione di modelli 1D di velocità delle onde di taglio, localizzabili nei baricentri dello stendimento. I dati ottenuti dal processo di elaborazione dei sondaggi acquisiti hanno fornito valore di $V_{s,eq(30)}$ tutti che rientrano nella categoria sismica del sottosuolo **C** ovvero: *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.*

Il coefficiente topografico è il T1.

Azioni secondo le NTC2018

L'azione del vento che agisce sulla torre determinata secondo quanto disposto dalle NTC 2018 è stata calcolata dal produttore delle torri con le modalità indicate nella "Relazione illustrativa e analisi dei carichi" utilizzando i seguenti parametri per il sito in esame:

Zona		4
Altitudine sul livello del mare di riferimento regionale	$a_0=$	500 m
Altitudine sul livello del mare del sito	$a_s=$	244 m
Valore caratteristico della velocità del vento per $a_s < a_0$	$V_b=V_{b,0}=$	28,00 m/s
Parametro K_s	$K_a=$	0,36
Coefficiente di altitudine c_a	$c_a=1+ks(as/a_0-1)=$	1,00
Velocità base di riferimento per $a_s > a_0$	$V_b=V_{b,0} \cdot c_a=$	28,00 m/s
Densità convenzionale dell'aria	$\rho=$	1,25 kg/

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0005_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGIO FAZIO" RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA	28

Coefficiente di ritorno	$c_r =$	1,00
Velocità di riferimento	$v_r = v_b \cdot c_r =$	28,00 m/s
Pressione cinetica di riferimento	$q_r = 1/2 \cdot \rho \cdot v_r^2 =$	490,00 N/
Classe di rugosità del terreno		D
Categoria di esposizione		II

Parametri per la definizione del coefficiente di esposizione		
	$k_r =$	0,19
	$z_0 =$	0,05 m
	$z_{min} =$	4,00 m
Coefficiente di	$c_t =$	1,00

Coefficiente di esposizione		
per $z < z_{min}$	$c_e(z) = c_e(z_{min}) =$	1,801
per $z \geq z_{min}$	$c_e(z) = k_r^2 \cdot c_t \cdot \ln(z/z_0) [7 + c_t]$	
Coefficiente di pressione	$c_p =$	0,70
Coefficiente dinamico	$c_d =$	1,00

Tabella 3

Le azioni risultanti caratteristiche a +0.20m dalla base della torre sono riassunte nella seguente tabella:

Azione del vento risultante			
M_{res}	M_z	F_{res}	F_z
[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]
113.478	-286	1.229	-5.885

Tabella 4

Azione sismica

Nei riguardi dell'azione sismica, l'obiettivo è il controllo del livello di danneggiamento della costruzione a fronte dei terremoti che possono verificarsi nel sito in esame.

In base al D.M. 17/01/2018, l'azione sismica sulle costruzioni è valutata a partire dalla "pericolosità sismica di base". La pericolosità sismica in un generico sito è definita in termini di accelerazione orizzontale massima attesa a_g nelle condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido orizzontale e di ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione ad essa corrispondente $S_e(I)$.

Le NTC 2018 definiscono, in corrispondenza dei punti di un reticolo (reticolo di riferimento) i cui nodi sono sufficientemente vicini fra loro, la distribuzione su tutto il territorio nazionale dei parametri necessari alla definizione dello spettro:

a_g accelerazione orizzontale massima del terreno;

F_0 valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;

T_C^* periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0005_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA	29

Le forme spettrali sono caratterizzate anche dal periodo di ritorno a cui si riferiscono e delle caratteristiche del tipo di costruzione da analizzare. In particolare, in funzione dello stato limite che di volta in volta verrà analizzato, cambierà la probabilità di superamento richiesta, mentre al variare del tipo di costruzione cambierà il periodo di riferimento.

Quindi occorre fissare:

- il periodo di riferimento V_R della costruzione,
- le probabilità di superamento P_{VR} associate a ciascuno degli stati limite considerati.

L'azione sismica così individuata viene successivamente variata per tener conto delle modifiche prodotte dalle condizioni locali stratigrafiche del sottosuolo effettivamente presente nel sito di costruzione e dalla morfologia della superficie. Tali modifiche caratterizzano la risposta sismica locale.

I parametri che caratterizzano la struttura in esame sono i seguenti:

- classe d'uso: Quarta (Punto 2.4.2 del D.M. 17/01/2018);
- vita nominale ≥ 100 anni (Punto 2.4.1 del D.M. 17/01/2018);
- categoria di suolo: C (Punto 3.2.2 del D.M. 17/01/2018);
- categoria topografica: T1 (Tabella 3.2.III del D.M. 17/01/2018);
- coefficiente di condizione topografica: 1,0 (Tabella 3.2.V del D.M. 17/01/2018).

Tali parametri, per la torre EL16N con coordinate lat. 37,813476 e long. 12,690469, hanno portato alla determinazione dei coefficienti caratterizzanti l'azione sismica riportati nella seguente tabella:

	TR	ag	Fo	TC*	CC	TB	TC	TD	SS	ST	S
SLO	120	0,041	2,492	0,255	1,6474	0,1403	0,4208	1,7653	1,5000	1,0000	1,5000
SLD	201	0,051	2,502	0,278	1,6020	0,1485	0,4454	1,8046	1,5000	1,0000	1,5000
SLV	1898	0,115	2,620	0,347	1,4896	0,1721	0,5162	2,0604	1,5000	1,0000	1,5000
SLC	2475	0,126	2,630	0,353	1,4812	0,1740	0,5221	2,1033	1,5000	1,0000	1,5000

Tabella 5

Tali coefficienti portano all'elaborazione degli spettri di risposta ed all'azione sismica risultante alla base della torre riportata, per ogni stato limite considerato, nelle seguenti tabelle:

S.L.C. Seismic Loads					
F_x [kN]	F_y [kN]	F_z [kN]	M_x [kNm]	M_y [kNm]	M_z [kNm]
26,95	89,85	-	-8294,60	2488,38	48,61

Tabella 6

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0005_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA	30

S.L.V. Seismic Loads					
F _x [kN]	F _y [kN]	F _z [kN]	M _x [kNm]	M _y [kNm]	M _z [kNm]
23,79	79,32	-5946,12	-7322,20	2196,66	42,91

Tabella 7

S.L.D. Seismic Loads					
F _x [kN]	F _y [kN]	F _z [kN]	M _x [kNm]	M _y [kNm]	M _z [kNm]
11,44	38,15	-	-3521,58	1056,47	20,64

Tabella 8

S.L.O. Seismic Loads					
F _x [kN]	F _y [kN]	F _z [kN]	M _x [kNm]	M _y [kNm]	M _z [kNm]
8,51	28,37	-5946,12	-2619,20	785,76	15,35

Tabella 9

Azioni secondo le IEC 61400

Azione estrema del vento

L'azione estrema del vento che agisce sulla torre secondo quanto disposto dalla norma IEC 61400 è stata calcolata dal produttore delle torri ed è riassunta nelle seguenti tabelle in cui è anche riportato il codice di riferimento della combinazione considerata ed il coefficiente di sicurezza relativo alla tipologia di combinazione (normale o anormale).

Characteristic Extreme							
Lead	LC/Family	PLF	Type	Mbt1	Mzt1	FndFr	Fzt1
Sensor	[-]	[-]	[-]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]
M _{bt1}	32PREogHWO111(fam250)	1,35	Abs	108.600	-286	984	-5.885
M _{zt1}	21VOGV0100(fam148)	1,35	Abs	29.490	-8.533	255	-5.763
F _{zt1}	12IceUvout100(fam30)	1,35	Abs	39.850	2.067	376	-6.070

Tabella 10

Azione del vento in esercizio

L'azione in esercizio del vento che agisce sulla torre secondo quanto disposto dalla norma IEC 61400 è stata calcolata dal produttore delle torri ed è riassunta nella seguente tabella.

Production loads				
		Char. load	Prob.:1e-2	Prob.:1e-4
M _{res}	[kNm]	108.600	66.170	74.365
M _z	[kNm]	-8.742	-3.522	-5.395
F _{res}	[kN]	987	603	721
F _z	[kN]	-6.070	-5.946	-5.981

Tabella 11

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0005_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA	31

Azioni equivalenti a fatica

Le azioni equivalenti a fatica che agiscono sulla torre secondo quanto disposto dalla norma IEC 61400 sono state calcolate dal produttore delle torri ed è riassunta nella seguente tabella.

Equivalent and Mean Fatigue Foundation Loads				
		Mean load	Range m = 4	Range m = 7
F _y	[kN]	297	572	498
M _x	[kNm]	-32.618	31.529	33.856
M _z	[kNm]	-283	7.342	7.124

Tabella 12

Combinazioni di calcolo

Per la verifica degli elementi strutturali del nodo torre/plinto di fondazione e per la verifica delle fondazioni, le combinazioni di calcolo considerate sono quelle previste dal D.M. 17/01/2018 per i vari stati limite e per le varie azioni e tipologie costruttive.

In particolare, sono state analizzate le seguenti combinazioni delle azioni:

- Combinazione fondamentale, impiegata per gli stati limite ultimi (S.L.U.) (2.5.1):

$$\gamma_{G1}G_1 + \gamma_{G2}G_2 + \gamma_P P + \gamma_{Q1}Q_{k1} + \gamma_{Q2}\psi_{02}Q_{k2} + \dots$$

- Combinazione caratteristica per gli stati limite di esercizio (S.L.E.), impiegata per le analisi nelle condizioni di esercizio (2.5.2):

$$G_1 + G_2 + P + Q_{k1} + \psi_{02}Q_{k2} + \dots$$

- Combinazione quasi permanente per gli stati limite di esercizio (S.L.E.), impiegata per le analisi nelle condizioni di esercizio (2.5.4):

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{21}Q_{k1} + \psi_{22}Q_{k2} + \dots$$

- Combinazione sismica, impiegata per gli stati limite ultimi e di esercizio connessi all'azione sismica E (2.5.5):

$$E + G_1 + G_2 + P + \psi_{21}Q_{k1} + \psi_{22}Q_{k2} + \dots$$

Le verifiche a fatica sono state eseguite considerando le due combinazioni di carico a fatica che forniscono rispettivamente le sollecitazioni massime e minime sui singoli componenti della struttura. Tali combinazioni di carico sono state ricavate utilizzando i carichi a fatica corrispondenti a 10^7 cicli con $m=7$ ed i carichi a fatica medi e determinando le sollecitazioni nel seguente modo:

- Combinazione a fatica che definisce le azioni massime:

$$G_1 + G_2 + P + (Q_{k1} + \psi_{02}Q_{k2} + \dots)_{medi} + \Delta(Q_{k1} + \psi_{02}Q_{k2} + \dots)_{fatica} / 2$$

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0005_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA	32

- Combinazione a fatica che definisce le azioni minime:

$$G_1 + G_2 + P + (Q_{k1} + \psi_{02}Q_{k2} + \dots)_{medi} - \Delta(Q_{k1} + \psi_{02}Q_{k2} + \dots)_{fatica} / 2$$

Nelle espressioni precedenti i simboli utilizzati hanno il seguente significato:

- G sono le azioni permanenti, azioni che agiscono durante tutta la vita nominale della costruzione, la cui variazione di intensità nel tempo è così piccola e lenta da poterle considerare con sufficiente approssimazione costanti nel tempo. Esse sono:

- peso proprio di tutti gli elementi strutturali; peso proprio del terreno, forze indotte dal terreno (esclusi gli effetti di carichi variabili applicati al terreno); forze risultanti dalla pressione dell'acqua (quando si configurino costanti nel tempo) (G1);

- peso proprio di tutti gli elementi non strutturali (G2);

- spostamenti e deformazioni imposti, previsti dal progetto e realizzati all'atto della costruzione;

- pretensione e precompressione (P);

- spostamenti differenziali;

- Q sono le azioni variabili, azioni agenti sulla struttura o sull'elemento strutturale con valori istantanei che possono risultare sensibilmente diversi fra loro nel tempo, suddivise come:

- di lunga durata: agiscono con un'intensità significativa, anche non continuativamente, per un tempo non trascurabile rispetto alla vita nominale della struttura;

- di breve durata: azioni che agiscono per un periodo di tempo breve rispetto alla vita nominale della struttura.

Per le analisi agli SLU, alle sollecitazioni sopra riportate sono stati applicati, ove applicabile, i fattori parziali di sicurezza sotto elencati, riportati nella tabella 6.2.I del D.M. 17 gennaio 2018.

Carichi	Effetto	Coefficiente parziale γ_f	EQU	A1	A2
Permanenti	Favorevole	γ_{g1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Permanenti non strutturali	Favorevole	γ_{g2}	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Variabili	Favorevole	γ_{Qi}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

Tabella 13

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0005_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA	33

In tali equazioni, le azioni orizzontali ed i momenti flettenti provenienti dalla torre sono stati considerati come azioni variabili, applicando quindi un coefficiente moltiplicativo pari a 1,50 così come previsto al punto 6.2.4.1.1 del D.M. 17/01/2018. Come si evincerà nel proseguo del presente lavoro, le azioni dimensionanti per la presente tipologia di strutture sono costituite dalle sollecitazioni derivanti dall'azione del vento, risultando queste ultime molto più gravose delle sollecitazioni ricavate dall'azione sismica. Questa considerazione vale per le azioni calcolate allo SLU così come per le azioni calcolate allo SLE e quindi anche per le combinazioni sismiche ed in particolare per le combinazioni allo SLO e SLE che producono sollecitazioni inferiori a quelle dovute al normale funzionamento della turbina.

Applicazione dei carichi

Le sollecitazioni trasmesse dalla torre alla fondazione sono state trasportate all'estradosso superiore del colpetto traslando opportunamente le sollecitazioni agenti e, qualora queste siano state riportate scomposte lungo le due direzioni ortogonali X e Y, sono state sommate vettorialmente al fine di ottenere l'azione massima agente lungo la direzione dell'azione risultante.

$$F_{ris} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad M_{ris} = \sqrt{M_x^2 + M_y^2}$$

AZIONI ALLA SOMMITA' DELLA FONDAZIONE (-0,20m rispetto alla base della torre) comprehensive del peso proprio della torre									
	U.L.S._IEC max Mbt 32PREogHWO111	U.L.S._IEC max Mzt 21VOGV0100	U.L.S._IEC max Fzt 12IceUvout100	U.L.S._DM wind	U.L.S._DM SLC seismic	S.L.S._CH IEC production Characteristic	S.L.S._QP IEC production Prob. 1e-2	Fatigue Load Min	Fatigue Load Max
F _{ris} (KN m)	984,30	255,10	376,10	1.229,00	121,95	986,63	720,52	47,28	296,49
M _{ris} (KN m)	108.796,8 6	29.541,0 2	39.925,2 2	113.723,8 0	11.282,1 5	108.797,3 3	74.509,3 1	15.699,6 6	32.677,3 2
M _z (KN)	-285,80	8.533,00	2.067,00	-285,80	63,19	-8.741,73	5.395,24	3.845,25	-283,23
F _z (KN)	-5.885,00	- 5.763,00	- 6.070,00	-5.885,00	- 7.729,96	-6.069,65	- 5.980,73	- 5.885,00	- 5.885,00

Tabella 14

Tali azioni sono comprensive del peso proprio della turbina e della torre metallica che risulta pari a circa 5.885,00 KN.

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0005_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA	34

10. FONDAZIONI INDIRETTE: VERICHE GEOTECNICHE ALLO STATOLIMITE ULTIMO E DI ESERCIZIO

Nel presente paragrafo vengono riportate le teorie di calcolo e le verifiche geotecniche della fondazione di tipo indiretto che si dovranno realizzare per tutte le postazioni.

Secondo quanto stabilito al punto 6.4.3.1 del D.M. 17/01/2018, nei confronti delle fondazioni di tipo indiretto devono essere condotte le seguenti verifiche:

- SLU di tipo geotecnico (GEO)
 - ✓ collasso per carico limite della palificata nei riguardi dei carichi assiali;
 - ✓ collasso per carico limite della palificata nei riguardi dei carichi trasversali;
 - ✓ collasso per carico limite di sfilamento nei riguardi dei carichi assiali di trazione;
 - ✓ stabilità globale;
- SLU di tipo strutturale (STR)
 - ✓ raggiungimento della resistenza dei pali;
 - ✓ raggiungimento della resistenza della struttura di collegamento dei pali.

La verifica di stabilità globale deve essere effettuata secondo la Combinazione 2 (A2+M2+R2) dell'approccio 1 tenendo conto dei coefficienti parziali riportati nelle Tabelle 6.2.I e 6.2.II per le azioni e i parametri geotecnici e nella Tabella 6.8.I per le resistenze globali.

Le rimanenti verifiche devono essere effettuate, tenendo conto dei valori dei coefficienti parziali riportati nelle Tabelle 6.2.I (coefficienti moltiplicativi per le azioni), 6.2.II (coefficienti moltiplicativi per i parametri geotecnici) e 6.4.II (coefficienti divisori della resistenza caratteristica a carico verticale dei pali) e 6.4.VI (coefficienti per le verifiche agli stati limite ultimi di pali soggetti a carichi trasversali) seguendo l'approccio 2, con la combinazione (A1+M1+R3).

Tab. 6.2.I – Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni

	Effetto	Coefficiente Parziale γ_F (o γ_E)	EQU	(A1)	(A2)
Carichi permanenti G_1	Favorevole	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti G_2 ⁽¹⁾	Favorevole	γ_{G2}	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevole	γ_{Qk}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

⁽¹⁾ Per i carichi permanenti G_2 si applica quanto indicato alla Tabella 2.6.I. Per la spinta delle terre si fa riferimento ai coefficienti γ_{G1}

Tabella 15

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0005_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGIO FAZIO" RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA	35

Tab. 6.2.II – Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno

Parametro	Grandezza alla quale applicare il coefficiente parziale	Coefficiente parziale γ_M	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \varphi'_k$	$\gamma_{\varphi'}$	1,0	1,25
Coesione efficace	c'_k	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
Resistenza non drenata	c_{uk}	γ_{cu}	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	γ_Y	γ_Y	1,0	1,0

Tabella 16

Tab. 6.4.II – Coefficienti parziali γ_R da applicare alle resistenze caratteristiche a carico verticale dei pali

Resistenza	Simbolo	Pali infissi	Pali trivellati	Pali ad elica continua
	γ_R	(R3)	(R3)	(R3)
Base	γ_b	1,15	1,35	1,3
Laterale in compressione	γ_s	1,15	1,15	1,15
Totale ^{o)}	γ	1,15	1,30	1,25
Laterale in trazione	γ_{st}	1,25	1,25	1,25

^{o)} da applicare alle resistenze caratteristiche dedotte dai risultati di prove di carico di progetto.

Tabella 17

Tab. 6.4.VI - Coefficiente parziale γ_T per le verifiche agli stati limite ultimi di pali soggetti a carichi trasversali

Coefficiente parziale (R3)
$\gamma_T = 1,3$

Tabella 18

Per le verifiche agli SLU di tipo strutturale si rimanda alla relazione di calcolo strutturale. **Tutte le verifiche geotecniche sono state eseguite con il software di calcolo strutturale e geotecnico della Software-House Aztec Informatica, API++14, licenza n° AIU3963AI.**

Carico limite dei pali di fondazione (punto 6.4.3 del D.M.17/01/2018)

La capacità portante di un palo viene valutata come somma di due contributi: portata di base (o di punta) e portata per attrito laterale lungo il fusto. Cioè si assume valida l'espressione:

$$Q_T = Q_P + Q_L - W_P$$

dove:

- Q_T : portanza totale del palo;
- Q_P : portanza di base del palo;
- Q_L : portanza per attrito laterale del palo;

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0005_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA	36

- W_p : peso proprio del palo.

Le due componenti Q_p e Q_l sono calcolate in modo indipendente fra loro; la portanza limite per ciascun palo è funzione delle caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni incontrati in profondità lungo il fusto dei pali (Q_l) e sullo strato di base (Q_p).

Secondo quanto previsto al punto 6.4.3.1.1 del D.M. 17/01/2018, a partire dal valore così calcolato della portanza Q_i si ricava il valore caratteristico, dividendo tale valore per i "fattori di correlazione ξ_3 e ξ_4 , per la determinazione della resistenza caratteristica in funzione del numero di verticali indagate", riportati in tabella 6.4.IV:

Tab. 6.4.IV - Fattori di correlazione ξ per la determinazione della resistenza caratteristica in funzione del numero di verticali indagate

Numero di verticali indagate	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

Tabella 19

Nel caso in esame, è stato realizzato un solo sondaggio geognostico in asse a ciascun aerogeneratore e pertanto il coefficiente di riferimento utilizzato nel calcolo è 1.70. A partire dal valore caratteristico così ottenuto, si calcola il valore di progetto applicando i coefficienti γ_R riportati nella tabella 6.4.II:

Tab. 6.4.II - Coefficienti parziali γ_R da applicare alle resistenze caratteristiche a carico verticale dei pali

Resistenza	Simbolo	Pali infissi	Pali trivellati	Pali ad elica continua
	γ_R	(R3)	(R3)	(R3)
Base	γ_b	1,15	1,35	1,3
Laterale in compressione	γ_s	1,15	1,15	1,15
Totale ^o	γ	1,15	1,30	1,25
Laterale in trazione	γ_{st}	1,25	1,25	1,25

^o da applicare alle resistenze caratteristiche dedotte dai risultati di prove di carico di progetto.

Tabella 20

Il valore di progetto così determinato della capacità portante deve risultare non minore del valore caratteristico ottenuto dal calcolo.

La portanza limite per ciascun palo è calcolata in base alle caratteristiche del terreno dei vari strati attraversati dal palo. La portanza per attrito laterale viene calcolata tramite la relazione:

$$Q_l = \pi \cdot \int_0^L D \tau_s dl$$

dove:

- τ_s rappresentano le tensioni tangenziali che si mobilitano all'interfaccia palo-terreno;
- D il diametro del palo.

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0005_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGIO FAZIO" RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA	37

La portanza di base del palo è calcolata come:

$$Q_p = A_p (cN_c + q_b N_q)$$

In particolare, sulla base di quanto riportato nel capitolo sulla modellazione geotecnica e in conformità a quanto si evince dalla relazione geologica si è ritenuto opportuno eseguire le relative verifiche geotecniche per tutte le postazioni facendo riferimento sia a condizioni drenate che a condizioni non drenate.

Pertanto, la portanza di base del palo è calcolata, nel caso delle condizioni drenate, come:

$$Q_p = q_b \cdot A_b$$

dove

q_b , che esprime il valore ultimo della pressione alla base, è stato determinato con l'approccio di Hansen. Nel caso di analisi in condizioni non drenate ($\Phi=0$; $c'=c_u$) si assume il valore N_c pari a 9 (assunzione di Skempton) mentre N_q può essere assunto pari all'unità.

Verifica della palificata

Il carico ammissibile della palificata deve essere determinato tenendo conto del carico ammissibile del singolo palo e della influenza della configurazione geometrica della palificata, del tipo costruttivo di palo, della costituzione del sottosuolo e del tipo di struttura di collegamento orizzontale in testa ai pali. Pertanto, a vantaggio di sicurezza si considera il carico limite della palificata riferito al carico limite del singolo palo ridotto per effetto dell'efficienza di gruppo E_g . Quest'ultimo, viene calcolato secondo la teoria di Feld (cfr Poulos e Davis) che riduce la portanza di ogni singolo palo di un valore pari a 1/16 per ogni palo adiacente.

I risultati del carico limite tengono, quindi, conto della suddetta riduzione. Il carico ammissibile della palificata deve essere stabilito anche in relazione al valore dei cedimenti assoluti e differenziali compatibili con la sicurezza e la funzionalità dell'opera e di quelle adiacenti.

Calcolo delle tensioni e dei cedimenti

La determinazione dei cedimenti è stata condotta con l'ausilio del software agli elementi finiti API ++14 della software house AZTEC Informatica. Dal punto di vista analitico, dopo aver determinato la portanza laterale e di punta del palo, questo viene discretizzato in 100 elementi tipo trave aventi area ed inerzia corrispondenti alla sezione trasversale del palo. Lungo il fusto del palo vengono disposte delle molle (una per ogni elemento), coassiali al palo stesso, aventi rigidità opportuna. Una ulteriore molla viene disposta alla base del palo. Le suddette molle hanno un comportamento elastoplastico. In particolare le molle lungo il fusto saranno in grado di reagire linearmente fino a quando la pressione in corrispondenza di esse non raggiunge il valore limite dell'aderenza palo terreno. Una volta raggiunto tale valore le molle non saranno più in grado di fornire ulteriore resistenza. La molla posta alla base del

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0005_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA	38

palo avrà invece una resistenza limite pari alla portanza di punta del palo stesso. La rigidezza della generica molla, posta a profondità z rispetto al piano campagna sarà data da:

$$R_l = \frac{(c_a + \sigma_h K_s \tan \delta) \pi D l_e}{\Delta Y_l}$$

dove:

- c_a è l'aderenza palo terreno;
- σ_h è la pressione orizzontale alla profondità z ;
- δ è l'angolo d'attrito palo terreno;
- K_s è il coefficiente di spinta;
- D è il diametro del palo.

Indicando con Q_p la portanza alla punta del palo, la rigidezza della molla posta alla base dello stesso è data da:

$$R_p = \frac{Q_p}{\Delta Y_p}$$

Il processo di soluzione è, naturalmente, di tipo iterativo: a partire da un carico iniziale N_0 si determinano gli spostamenti assiali e quindi le reazioni delle molle. La reazione della molla dovrà essere corretta per tenere conto di eventuali plasticizzazioni rispettando le equazioni di equilibrio per ogni passo di carico. Il carico iniziale verrà allora incrementato di un passo opportuno e si ripeterà il procedimento. Il processo iterativo termina quando tutte le molle risultano plasticizzate.

Il calcolo dei cedimenti è basato sulle caratteristiche di deformabilità dei terreni e della struttura sovrastante, tenendo conto dei valori dei carichi permanenti, del tipo e della durata di applicazione dei carichi. Il cedimento massimo riscontrato deve essere inferiore al cedimento limite accettabile per la struttura sovrastante che dipende dalla rotazione massima della flangia di base solidale con il plinto; la suddetta inclinazione non può essere superiore al 3 mm/m. Pertanto, poiché il plinto presenta una distanza massima tra due punti opposti pari a 18,00 m, il cedimento differenziale tra due punti posti a tale distanza può al più essere pari a 5,50 cm.

La scelta progettuale di non realizzare le fondazioni dirette è fortemente vincolata al rispetto del vincolo del cedimento differenziale massimo, pari a 5,50 cm, al fine di garantire le adeguate condizioni di operatività.

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0005_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGIO FAZIO" RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA	39

Capacità portante per i carichi orizzontali

L'analisi del palo soggetto a forze orizzontali non risulta sicuramente più agevole del caso di palo soggetto a forze assiali.

Trattasi di un problema d'interazione parzialmente risolto solo per casi più semplici ed adottando notevoli semplificazioni d'analisi. In particolare, sono stati analizzati da Broms il caso di palo in un mezzo omogeneo puramente coesivo ed in un mezzo omogeneo incoerente, nei casi in cui il palo sia libero di ruotare in testa o sia incastrato. Le soluzioni ottenute da Broms si basano sull'utilizzo dei teoremi dell'analisi limite e sull'ipotesi che si verifichino alcuni meccanismi di rottura (meccanismo di palo corto, meccanismo di palo lungo, etc).

La resistenza limite laterale di un palo è determinata dal minimo valore fra il carico orizzontale, necessario per produrre il collasso del terreno lungo il fusto del palo, ed il carico orizzontale necessario per produrre la plasticizzazione del palo.

Il primo meccanismo (plasticizzazione del terreno) si verifica nel caso di pali molto rigidi in terreni poco resistenti (meccanismo di palo corto), mentre il secondo meccanismo si verifica nel caso di pali aventi rigidità non eccessive rispetto al terreno d'infissione (meccanismo di palo lungo o intermedio).

In aggiunta, i pali di contrasto sono stati verificati nei riguardi del carico limite orizzontale, facendo riferimento al noto metodo proposto da Broms, per pali incastrati in testa. Il calcolo è stato eseguito tramite le formulazioni che fanno riferimento alla presenza di terreni puramente coesivi, come nel caso in esame. Nel caso in esame, i pali non rientrano nella categoria di pali corti poiché il valore del momento in testa è minore al valore massimo M_y . Si presenta necessario verificare se si ricade nella tipologia dei pali "lunghi" o "intermedi".

Il progetto delle fondazioni profonde prevede di adottare n. 22 pali del diametro $\Phi 1000$ mm, con armatura longitudinale costituita da $22\Phi 22$, di lunghezza pari rispettivamente a 25,00 e 32,00 m.

In tutti i casi rientriamo nella casistica di palo lungo, secondo la classificazione di Broms: il momento di plasticizzazione della sezione considerata M_y risulta pari a 1220 kNm (vedi la figura seguente).

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0005_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA	40

Titolo : _____

Sezione circolare cava

Raggio esterno: 50 [cm]
Raggio interno: _____ [cm]
N° barre uguali: 22
Diametro barre: 2,2 [cm]
Copriferro (baric.): 7,3 [cm]

N° barre: 0 Zoom

Tipo Sezione:
 Rettan.re Trapezi
 a T Circolare
 Rettangoli Coord.

Sollecitazioni
S.L.U. Metodo n

P.to applicazione N
 Centro Baricentro cls
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

Tipo rottura
Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

Metodo di calcolo
 S.L.U.+ S.L.U.-
 Metodo n

Tipo flessione
 Retta Deviata

Vertici: 52 N° rett. 100
Calcola MRd Dominio M-N
L₀ 0 cm Col. modello

Precompresso

Materiali

B450C C25/30

E_{su} 67,5 ‰ E_{c2} 2 ‰
 f_{yd} 391,3 N/mm² E_{cu} 3,5 ‰
 E_s 200.000 N/mm² f_{cd} 14,17 ‰
 E_s/E_c 15 f_{cc}/f_{cd} 0,8
 E_{syd} 1,957 ‰ $\sigma_{c,adm}$ 9,75
 $\sigma_{s,adm}$ 255 N/mm² τ_{co} 0,6
 τ_{c1} 1,829

M_{xRd} 1,220 kN m
 σ_c -14,17 N/mm²
 σ_s 391,3 N/mm²
 ϵ_c 3,5 ‰
 ϵ_s 10,47 ‰
d 92,7 cm
x 23,22 w/d 0,2505
 δ 0,7532

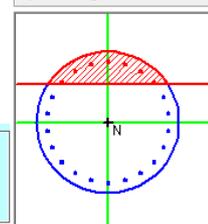


Figura 11

Tramite il seguente grafico si ottiene che nel caso in esame ricade sempre nella tipologia dei pali lunghi.

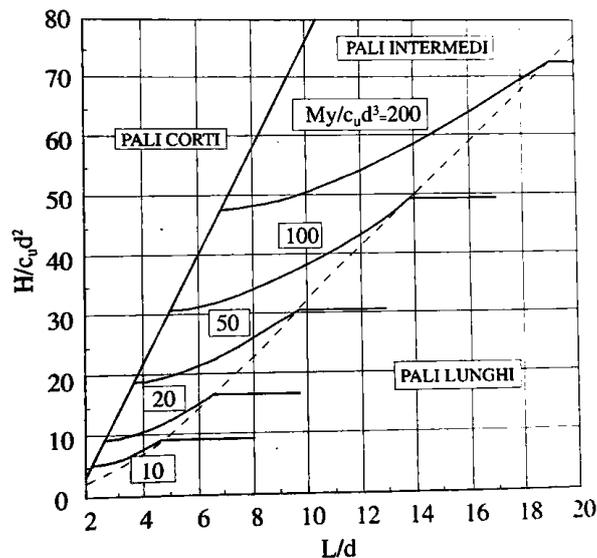


Figura 12

Per pali "lunghi" come quelli in argomento, il valore del carico limite orizzontale dipende solo dalle caratteristiche meccaniche del terreno e dal valore del momento di plasticizzazione della sezione retta del palo (Viggiani – Fondazioni, citato).

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0005_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA	41

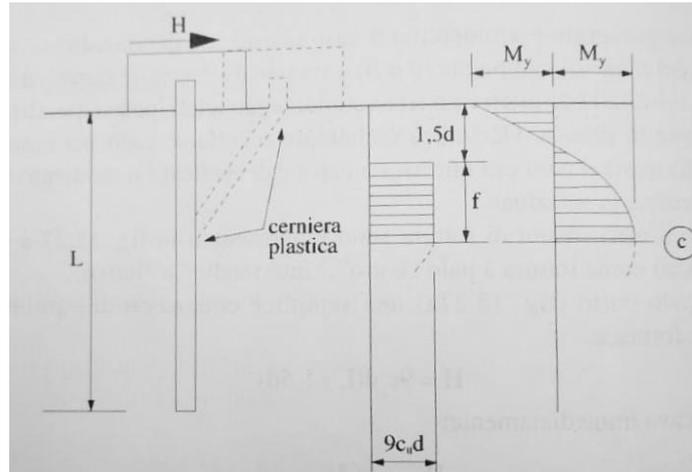


Figura 13

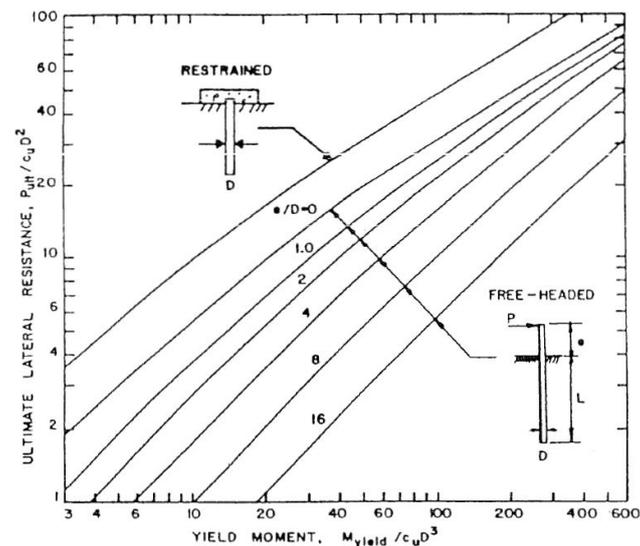
Pertanto nei pali lunghi con la sezione di testa del palo vincolata si potrà raggiungere il momento di plasticizzazione alla sommità incastrata e un'ulteriore cerniera plastica si formerà ad una certa profondità ($1,5d+0,5f$) avendo quindi per le condizioni di equilibrio alla rotazione del tratto del palo compreso fra le due cerniere plastiche:

$$2M_y = h(1,5d + 0,5f)$$

dalla quale si ottiene:

$$H/c_u d^2 = -13,5 + (182,25 + 36M_y/c_u d^3)^{0,5}$$

Le equazioni sopra riportate sono esplicitate per mezzo dei seguenti grafici (Viggiani – Fondazioni, citato):



Valori limite di H per pali lunghi liberi o impediti di ruotare in terreni coesivi

Figura 14

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0005_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA	42

La verifica consisterà nel confronto tra la massima H sollecitante indotta in testa ai pali di fondazione e la H_{ult} resistente della sezione così determinata; nelle analisi di progetto tutte le verifiche risultano positive.

Verifica a liquefazione

Gli effetti dell'interazione cinematica terreno struttura possono non essere valutati e portati in conto se si manifesta anche solo una delle seguenti condizioni secondo quanto previsto dal D.M. 17/01/2018 7.11.3.4.2.:

- accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di 0,1g;
- profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;
- depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata $(N1)_{60} > 30$ oppure $qc_{1N} > 180$;
- distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nelle figure seguenti.

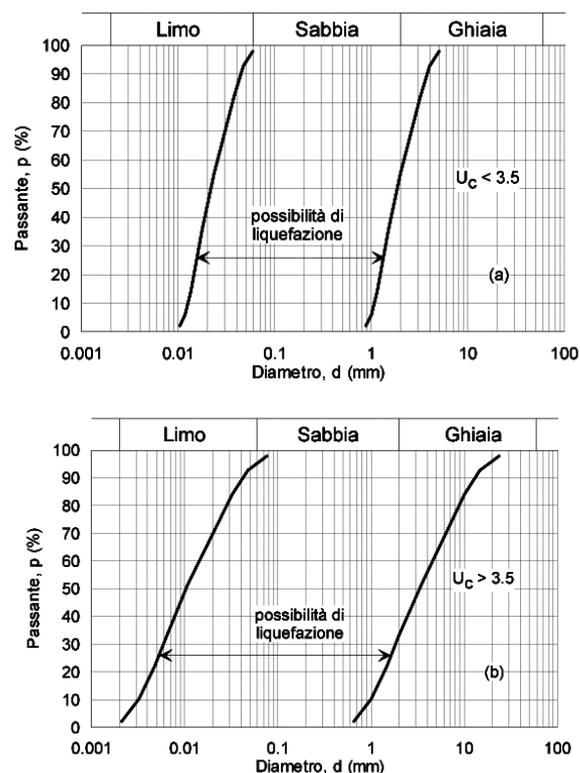


Figura 15

Visto il manifestarsi contemporaneo delle condizioni 3 e 4, si potrà escludere il fenomeno della liquefazione in caso di sisma nei terreni presenti in sito.

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0005_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA	43

Tabulati sintetici verifiche geotecniche

A seguire si riporta, per tutti i modelli di calcolo analizzati in condizioni drenate e non drenate, una sintesi dei Fattori di Sicurezza dei singoli Pali (relativi alle verifiche geotecniche). Le tabelle che seguono sono estratte direttamente dai tabulati di calcolo completi estrapolati dal software AZTEC.

Fondazione Tipo 2 con 26 pali da 30,0 m – Condizioni Non Drenate

n°	Oggetto	N [kN]	Pd [kN]	FSv	T [kN]	Td [kN]	FSo
1	Piastra 1	1326,50	4322,36	3.258 (13)	81,30	571,54	7.030 (3)
2	Piastra 1	1202,73	4322,36	3.594 (13)	81,53	571,54	7.010 (3)
3	Piastra 1	1094,04	4322,36	3.951 (13)	81,96	571,54	6.973 (3)
4	Piastra 1	1009,99	4322,36	4.280 (13)	82,54	571,54	6.924 (3)
5	Piastra 1	956,40	4322,36	4.519 (13)	83,22	571,54	6.868 (3)
6	Piastra 1	940,31	4322,36	4.597 (1)	83,92	571,54	6.811 (3)
7	Piastra 1	956,03	4322,36	4.521 (13)	84,58	571,54	6.757 (3)
8	Piastra 1	1009,39	4322,36	4.282 (13)	85,17	571,54	6.710 (3)
9	Piastra 1	1093,03	4322,36	3.954 (13)	85,64	571,54	6.674 (3)
10	Piastra 1	1201,47	4322,36	3.598 (13)	85,96	571,54	6.649 (3)
11	Piastra 1	1325,30	4322,36	3.261 (13)	86,12	571,54	6.636 (3)
12	Piastra 1	1646,27	4322,36	2.626 (3)	86,12	571,54	6.636 (3)
13	Piastra 1	2183,16	4322,36	1.980 (3)	85,96	571,54	6.649 (3)
14	Piastra 1	2647,47	4322,36	1.633 (3)	85,64	571,54	6.674 (3)
15	Piastra 1	3008,23	4322,36	1.437 (3)	85,17	571,54	6.710 (3)
16	Piastra 1	3238,27	4322,36	1.335 (3)	84,58	571,54	6.757 (3)
17	Piastra 1	3313,43	4322,36	1.304 (3)	83,92	571,54	6.811 (3)
18	Piastra 1	3237,02	4322,36	1.335 (3)	83,22	571,54	6.868 (3)
19	Piastra 1	3006,64	4322,36	1.438 (3)	82,54	571,54	6.924 (3)
20	Piastra 1	2644,80	4322,36	1.634 (3)	81,96	571,54	6.973 (3)
21	Piastra 1	2179,58	4322,36	1.983 (3)	81,53	571,54	7.010 (3)
22	Piastra 1	1651,98	4322,36	2.616 (3)	81,30	571,54	7.030 (3)

Tabella 21

Fondazione Tipo 2 con 26 pali da 30,0 m – Condizioni Drenate

n°	Oggetto	N [kN]	Pd [kN]	FSv	T [kN]	Td [kN]	FSo
1	Piastra 1	1326,46	3632,71	2.739 (13)	81,30	571,54	7.030 (3)
2	Piastra 1	1202,76	3632,71	3.020 (13)	81,53	571,54	7.010 (3)
3	Piastra 1	1094,05	3632,71	3.320 (13)	81,96	571,54	6.973 (3)
4	Piastra 1	1009,89	3632,71	3.597 (13)	82,54	571,54	6.924 (3)
5	Piastra 1	956,22	3632,71	3.799 (13)	83,22	571,54	6.868 (3)
6	Piastra 1	940,29	3632,71	3.863 (1)	83,92	571,54	6.811 (3)
7	Piastra 1	955,91	3632,71	3.800 (13)	84,58	571,54	6.757 (3)
8	Piastra 1	1009,39	3632,71	3.599 (13)	85,17	571,54	6.710 (3)
9	Piastra 1	1093,27	3632,71	3.323 (13)	85,64	571,54	6.674 (3)
10	Piastra 1	1201,86	3632,71	3.023 (13)	85,96	571,54	6.649 (3)
11	Piastra 1	1325,70	3632,71	2.740 (13)	86,12	571,54	6.636 (3)
12	Piastra 1	1649,44	3632,71	2.202 (3)	86,12	571,54	6.636 (3)
13	Piastra 1	2189,80	3632,71	1.659 (3)	85,96	571,54	6.649 (3)
14	Piastra 1	2649,58	3632,71	1.371 (3)	85,64	571,54	6.674 (3)
15	Piastra 1	3005,94	3632,71	1.209 (3)	85,17	571,54	6.710 (3)
16	Piastra 1	3233,41	3632,71	1.123 (3)	84,58	571,54	6.757 (3)
17	Piastra 1	3308,44	3632,71	1.098 (3)	83,92	571,54	6.811 (3)
18	Piastra 1	3232,31	3632,71	1.124 (3)	83,22	571,54	6.868 (3)
19	Piastra 1	3004,40	3632,71	1.209 (3)	82,54	571,54	6.924 (3)
20	Piastra 1	2647,14	3632,71	1.372 (3)	81,96	571,54	6.973 (3)
21	Piastra 1	2186,63	3632,71	1.661 (3)	81,53	571,54	7.010 (3)
22	Piastra 1	1655,80	3632,71	2.194 (3)	81,30	571,54	7.030 (3)

Tabella 22