

INDICE

	Pag.	
1		PREMESSA
2		DESCRIZIONE DEL SITO
3		STRATIGRAFIA DELL'AREA IN ESAME
4		INDAGINE GEOGNOSTICA SVOLTA
5		PERMEABILITA' DELLE LITOLOGIE INDAGATE
6		QUADRO DEI RISULTATI OTTENUTI
7		CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA DEGLI AMMASSI ROCCIOSI
8		CALCOLO DELLA CAPACITA' PORTANTE
8.1		Calcolo della capacità portante per la pala eolica
8.2		Calcolo della capacità portante per la stazione di smistamento
9		PREVISIONE DEI CEDIMENTI
10		CONCLUSIONI

ALLEGATI

Elaborati stratigrafici;
Schema delle distribuzione delle tensioni nel sottosuolo.

RELAZIONE GEOTECNICA SULLE INDAGINI

1 – PREMESSA

La presente relazione geologica, commissionata dallo Studio Berlinguer per conto della FW POWER S.r.L., con sede in Corsico (MI) Via S. Caboto, 1, nasce dall'esigenza di accorpate in un unico elaborato gli studi e le campagne d'indagini geognostiche effettuate nei periodi Febbraio 2009 ed Aprile 2011 e finalizzati inizialmente alla caratterizzazione preliminare del sito interessato dal progetto di “CENTRALE PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA DA FONTE EOLICA – COMUNE DI PORTO TORRES” ed alla successiva richiesta di integrazione da parte dell'ente verificatore della Procedura di Valutazione di Impatto Ambientale ai sensi del D.lgs. 152/06 e ss.mm.ii. E della D.G.R. n. 24/23 del 23/04/2008, per il progetto denominato “Progetto di un parco eolico della potenza massima di 45 MW, costituito da 18 aerogeneratori di taglia massima pari a 2,5 MW ciascuno, nel Comune di Porto Torres”.

Gli studi geologico-tecnici, sono stati eseguiti in ottemperanza al:

- D.M. 11/03/88 “*Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione*”;
- alla circolare LL.PP. 24/09/88 n. 30483;
- alle raccomandazioni sulle indagini A.G.I., 1977;
- Delib. G.R. 30 marzo 2004 n. 15/31 *pubblicata nel B.U. Sardegna, 21 agosto 2004 n. 23 – disposizioni preliminari in attuazione dell'O.P.C.M. 20 marzo 2003, n. 3274 recante “ Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica ”*;
- Piano Stralcio per l'assetto idrogeologico - *Interventi sulla rete idrografica e sui versanti. Legge 18 maggio 1989, n. 183, art. 17, comma 6, ter D.L. 180/98 e successive modifiche ed integrazioni*;

ed hanno compreso:

- Il sopralluogo dell'area in esame al fine di valutare la modalità di studio più appropriata;
- lo studio del terreno interessato dalle opere in progetto;
- la programmazione e l'esecuzione di una opportuna indagine geognostica con l'esecuzione di n. 3 fori di sondaggio a carotaggio continuo della profondità di 20 m dal p.c. Nella campagna d'indagini dell'anno 2009 e di n. 4 fori di sondaggio a carotaggio continuo della profondità di 20 m dal p.c. Nella campagna d'indagini anno 2011;
- Campionamento ed esecuzione di prove di laboratorio geotecnico per la caratterizzazione geotecnica dei terreni di fondazione;
- esame dei problemi geologici-tecnici connessi con le opere in progetto;
- calcolo della capacità portante del terreno di fondazione e previsione dei cedimenti.

Lo studio ha permesso di fornire informazioni utili alla caratterizzazione geotecnica del sottosuolo con lo scopo di fornire un primo dimensionamento delle strutture di fondazione.

2 – DESCRIZIONE DEL SITO E DELLE STRUTTURE IN PROGETTO

Geograficamente il sito è inquadrabile nel F° 459 sez. IV “SASSARI”, F° 441 Sez. III “PORTO TORRES”, F° 440 Sez. II “POZZO SAN NICOLA” e F° 458 Sez. I “PALMADULA” in scala 1:25.000 (IGM) e nella Carta Tecnica Regionale nelle Sezioni 440160, 441130, 459010 e 458040 in scala 1:10.000.

Il settore in esame è raggiungibile da est, se si percorre la strada provinciale N° 34 Porto Torres - frazione di Pozzo San Nicola, da nord dalla nuova strada di collegamento Porto Torres – Stintino e da ovest dalla S.P. 57.

Il profilo topografico risulta debolmente acclive e pianeggiante per la zona centrale e settentrionale (loc. Biunisi, Margoneddu e Terra Bianca), con forme degradanti dolcemente verso il mare; collinare per il settore orientale (loc. Monte delle Case) e di “piccolo rilievo” per il settore meridionale, in prossimità del Monte Alvaro. Tutta l'area risulta scarsamente urbanizzata. Dal punto di vista altimetrico, l'area è compresa tra la quota media di circa 25 m s.l.m. (settore nord), in direzione della costa e la quota di circa 340 m s.l.m. nel settore sud, in prossimità del Monte Alvaro.

3 - STRATIGRAFICA DELL'AREA IN ESAME

La descrizione litologica dell'area, dal basso verso l'alto, può essere così riassunta:

- **depositi mesozoici**; sono caratterizzati da calcari e calcari dolomitici di colore variabile dal bianco al grigio all'azzurrognolo, con grado di fratturazione medio alto.

Lo spessore del basamento calcareo non è conosciuto con precisione, ma si stima sia superiore al centinaio di metri. Tali depositi sono riscontrabili in tutto il settore in studio. In affioramento possono essere osservati facilmente in prossimità dei fronti di cava di Monte Rosè e lungo i diversi tagli stradali, ben rappresentati sulla nuova strada di collegamento Porto Torres Stintino.

- **I depositi cenozoici**; interessano il settore settentrionale dell'area in esame e sono rappresentati da calcari, calcareniti e calcari marnosi. Con l'aumentare della profondità diminuisce la componente marnosa ed il calcare risulta più puro e tenace; caratteristica di questa roccia è la presenza di modeste cavità di natura carsica, generalmente riempite dagli stessi prodotti di alterazione dei calcari (argille). Limitatamente all'area in esame, questa litologia si rinviene con spessori non superiori ai 10-15 m.

- **Depositi neozoici**; rappresentati da depositi di copertura recenti ed attuali, genericamente individuabili nelle zone topograficamente depresse, con depositi conglomeratici medio grossolani, prevalentemente di origine alluvionale, quarzosi, con clasti più o meno arrotondati, eterometrici, associati ad elementi di calcare dolomitico mesozoico grigio-nocciola, anch'essi generalmente arrotondati, delle dimensioni centimetriche e decimetriche; la matrice è di tipo argillosa di colorazione rossastra; intercalati, depositi sabbiosi e sabbioso limosi a matrice argillosa con stato di consistenza generalmente da sciolto a scarsamente addensato. sono localizzati lungo le vallecole e i solchi di ruscellamento. La potenza della coltre alluvionale è variabile, ma mediamente nell'area in esame non supera il metro di spessore.

4 – INDAGINE GEOGNOSTICA SVOLTA

Lo studio geologico-geotecnico deve essere esteso alla parte del sottosuolo (volume significativo) influenzata direttamente o indirettamente dalla costruzione dei manufatti e che influenza il comportamento dei manufatti stessi. L'ampiezza della indagine deve perciò essere proporzionata alle dimensioni, al tipo, alle caratteristiche strutturali ed all'importanza dell'opera, alla complessità del sottosuolo ed allo stato delle conoscenze sulla zona in esame. Per le opere previste in progetto, si è

proceduto alla caratterizzazione dei terreni di fondazione con indagini in sito, prove di laboratorio geotecnico e facendo riferimento a dati e notizie raccolte da indagini precedenti, eseguite su terreni simili ed in aree adiacenti.

La prima campagna d'indagine eseguita nell'anno 2009 ha visto la realizzazione preliminare di n° 3 sondaggi verticali a carotaggio continuo diam. 101 mm, spinti ad una profondità massima di 20 m. dal p.c. (vd. Carta Geolitologica – Tavola 01); la profondità scelta, oltre a rappresentare quella presunta alla quale si ritiene si abbia l'esaurimento delle tensioni indotte in seguito all'applicazione dei carichi, aveva permesso una buona ed esaustiva ricostruzione stratigrafica iniziale del sottosuolo.

Per l'esecuzione dell'indagine è stata utilizzata una sonda cingolata a rotazione, ad avanzamento idraulico.

La campagna di indagine integrativa effettuata nell'anno 2011, ha visto la realizzazione di n° 4 sondaggi verticali a carotaggio continuo diam. 101 mm, spinti ad una profondità massima di 20 m. dal p.c. La profondità scelta, ha permesso di predisporre, per gli aerogeneratori ubicati lungo i pendii, l'analisi di stabilità dei versanti.

Nel dettaglio, i sondaggi eseguiti nella campagna d'indagine del 2009 sono indicati sulla carta geolitologica e di seguito con il **colore nero**, i sondaggi eseguiti nella campagna d'indagini del 2011 sono indicati sulla carte geolitologica e di seguito con il **colore rosso**:

- **Sondaggio S1**: ubicato nelle vicinanze della Stazione di smistamento in progetto, al piede del Monte Alvaro (341,62 m s.l.m.), lungo un compluvio poco pronunciato con direzione sud-est nord-ovest, ad una quota di circa 100 m s.l.m. (vd. Carta geolitologica), è stato eseguito con il metodo a carotaggio continuo, con l'utilizzo del carotiere doppio del diam. 101 mm e corone diamantate, fino ad una profondità di 20 m dal piano di calpestio. Il substrato mesozoico è stato intercettato a partire da una profondità di circa 0,50 m, al di sotto di una copertura terrigena bruna in scheletro argilloso con ghiaie e ciottoli calcareo dolomitici. Dapprima si presenta sotto forma di un regolite eterometrico (prodotto di alterazione della roccia madre) dello spessore di circa 1 m, per passare poi ad una alternanza di calcari dolomitici giallastri, caratterizzati da venature riempite da calcite, fortemente fratturati in superficie, con calcari grigi scuri nerastri poco fratturati. L'indice di fratturazione (RQD) risulta piuttosto basso per i primi metri di perforazione, poi mediamente superiore al 50 %; la percentuale di recupero del campione è stata sempre alta (vd. Stratigrafie in

allegato). Non si è riscontrata la presenza di falda superficiale. Sui campioni prelevati nel corso del sondaggio sono state condotte una serie di prove di laboratorio geotecnico per la determinazione del peso di volume e della resistenza allo schiacciamento. I risultati ottenuti sono stati corroborati da numerosi dati in nostro possesso estrapolati da indagini geognostiche e prove di laboratorio eseguite su terreni simili in aree limitrofe.

- **Sondaggio S2:** ubicato nel settore settentrionale in loc. “Biunisi”, ad una quota di circa 40 m s.l.m., in un'area morfologicamente pianeggiante (vd. Carta geolitologica) è stato eseguito con il metodo a carotaggio continuo, con l'utilizzo di carotiere semplice e doppio del diam. 101 mm e corone diamantate, fino alla profondità di 20 m dal piano di calpestio. Il substrato mesozoico è stato intercettato a partire da una profondità di circa 1,50 m, al di sotto di una copertura terrigena bruna in scheletro argilloso, con ghiaie e ciottoli calcareo dolomitici. Il substrato è rappresentato da calcari dolomitici giallastri, fortemente fratturati, stratificati, con interposti livelli argillosi decimetrici color giallo ocra, non campionabili perché dilavati dall'acqua di perforazione. Alla profondità compresa tra 3,0 m e 3,8 m e 7,8 e 10 m dal p.c. è stata individuata la presenza di inclusioni argillose di modesto spessore.

L'indice di fratturazione (RQD) risulta piuttosto basso per tutto il sondaggio; la percentuale di recupero del campione non è generalmente elevata a causa della stratificazione (vd. Stratigrafie in allegato), che vede l'alternanza continua di livelli argillosi decimetrici con calcari dolomitici. Si è riscontrata la presenza di falda superficiale ad una quota di circa 10 m dal piano campagna. Le prove di laboratorio geotecnico eseguite su campioni prelevati nel corso del sondaggio, hanno permesso di caratterizzare i livelli argillosi intercalati. Per la caratterizzazione dell'ammasso roccioso, si farà riferimento ai risultati ottenuti dalle prove di laboratorio geotecnico effettuate sul foro di sondaggio S1, su campioni della stessa tipologia.

- **Sondaggio S3:** ubicato nel settore orientale in loc. “Monte Delle Case”, ad una quota di circa 57,5 m s.l.m., in un'area morfologicamente collinare, (vd. Carta geolitologica) è stato eseguito con il metodo a carotaggio continuo, con l'utilizzo di carotiere doppio del diam. 101 mm e corone diamantate, fino alla profondità di 20 m dal piano di calpestio. Il terreno vegetale bruno in scheletro argilloso, con ghiaie e ciottoli calcareo dolomitici raggiunge lo spessore di circa 0,70 m.

Stratigraficamente verso il basso si riscontra un conglomerato costituito da elementi calcarei dolomitici, giallastri, a spigoli vivi, talora con dimensioni superiori ai 10 cm, in matrice argillosa, molto addensato oltre la profondità di 6,50 m dal p.c.; fino a questa quota non è stato possibile campionare la matrice argillosa; il recupero di campione ha visto soltanto la presenza degli elementi litici. Non si è riscontrata la presenza di falda superficiale.

L'esecuzione del sondaggio geognostico, corroborato da dati ottenuti da ricerche idriche condotte nella zona, vede un'area tettonicamente fortemente disturbata, di transizione tra le litologie mesozoiche e quelle cenozoiche, con rigetti di faglia anche notevoli.

Le prove di laboratorio geotecnico eseguite su campioni prelevati nel corso del sondaggio, hanno permesso di caratterizzare la litologia conglomeratica.

- sondaggio S1: ubicato in prossimità della precedente posizione dell'aerogeneratore T12 (rilocato più a nord con il nuovo layout presentato); il foro di sondaggio è stato eseguito con il metodo a carotaggio continuo con l'utilizzo del carotiere doppio del diam. 101 mm e corone diamantate, fino ad una profondità di 19,50 m dal piano di calpestio. Il substrato mesozoico è stato intercettato a partire da una profondità di circa 0,50 m, al di sotto di una copertura terrigena bruna in scheletro argilloso con ghiaie e ciottoli calcareo dolomitici. Dapprima si presenta sotto forma di un regolite eterometrico (prodotto di alterazione della roccia madre) dello spessore di circa 1,5 m, per passare poi ad un calcare debolmente dolomitico giallastro, caratterizzato da mineralizzazioni di calcite a riempimento delle fratture. L'indice di fratturazione (RQD) risulta piuttosto basso; la percentuale di recupero del campione è stata mediocre. Per l'elevata fratturazione si sono avute non poche difficoltà in fase di prelievo del campione con il dilavamento della matrice fine a riempimento delle fratture (non presente in cassetta catalogatrice).

Non si è riscontrata la presenza di falda superficiale. Sui campioni prelevati nel corso del sondaggio sono state condotte una serie di prove di laboratorio geotecnico per la determinazione del peso di volume e della resistenza allo schiacciamento (vd. Stratigrafie in allegato).

- Sondaggio S2: ubicato in prossimità dello aerogeneratore T07; l'area si presenta debolmente acclive verso est. E' stato eseguito con il metodo a carotaggio continuo, con l'utilizzo di carotiere

semplice e doppio del diam. 101 mm e corone diamantate, fino alla profondità di 20 m dal piano di calpestio. Il substrato mesozoico è stato intercettato a partire da una profondità di circa 1,40 m, al di sotto di una copertura terrigena bruna in scheletro argilloso, con ghiaie e ciottoli calcarei. Il substrato è rappresentato da un calcare grigio, fratturato ma tenace, passante verso il basso oltre alla profondità di 6,6 m dal p.c., ad un calcare marnoso tenero, poco fratturato, caratterizzato da una marcata fissilità sviluppata lungo i piani di strato con livelli carboniosi di spessore millimetrico. Oltre la profondità di 11,3 m dal p.c., calcare giallo ocra, fratturato ma tenace, cariato, debolmente alterato lungo le diaclasi e riempimento di mineralizzazioni calcitiche.

L'indice di fratturazione (RQD) risulta buono, la percentuale di recupero del campione elevata. Non si è riscontrata la presenza di falda superficiale per la profondità di 20,0 m dal p.c. Per la caratterizzazione dell'ammasso roccioso, si sono realizzate una serie di prove di compressione monoassiale libera (vd. Stratigrafie in allegato).

- Sondaggio S3: ubicato in prossimità dello aerogeneratore T17, l'area si presenta sub pianeggiante; il foro di sondaggio è stato eseguito con il metodo a carotaggio continuo, con l'utilizzo di carotiere doppio del diam. 101 mm e corone al widia, fino alla profondità di 20 m dal piano di calpestio. La stratigrafia evidenzia la presenza di depositi continentali di copertura per uno spessore di circa 12 m dal p.c., rappresentati da una alternanza di strati argillo sabbiosi plastici, sabbie argillose e sabbie limose, con livelli prettamente clastici di ghiaie e ciottoli calcarei. Stratigraficamente verso il basso s'intercettano le marne gessifere e argilliti gessifere, tenere di età triassica (Keuper) con fissilità ad alto angolo che marcano i piani di strato.

Le prove di laboratorio geotecnico eseguite su campioni prelevati nel corso del sondaggio, hanno permesso di caratterizzare gli strati argillosi di testa ed i depositi gessiferi di base, al fine di poter predisporre nella fase esecutiva l'opportuno dimensionamento della fondazione.

Si è riscontrata la presenza di falda superficiale alla profondità di 1,5 m dal p.c., con buona probabilità soggetta a variazioni sostanziali stagionali (vd. Stratigrafie in allegato).

- Sondaggio S4: ubicato in prossimità dello aerogeneratore T04 su un area debolmente acclive verso est e morfologicamente collinare, è stato eseguito con il metodo a carotaggio continuo, con l'utilizzo di carotiere doppio del diam. 101 mm e corone diamantate, fino alla profondità di 20 m

dal piano di calpestio. Il terreno vegetale bruno è praticamente assente; si è intercettato un terreno di riporto di spessore alquanto limitato, utilizzato per la realizzazione della strada; segue verso il basso un regolite eterometrico, prodotto di disaggregazione della roccia madre per passare ad un calcare giallastro debolmente dolomitico, fortemente alterato e facilmente disaggregabile. Il deposito litoide si intercetta nuovamente a partire dalla profondità di 3,3 m dal p.c. con il calcare giallastro, passante alla profondità di poco più di 8,0 m dal p.c., ad un calcare grigio debolmente marnoso, caratterizzato dalla presenza di lenti carboniose di spessore millimetrico con fissilità a bassissimo grado (sub orizzontale), alternati a calcari gialli tenaci ricchi in mineralizzazioni di calcite.

L'indice di fratturazione (RQD) risulta buono, la percentuale di recupero del campione elevata. Non si è riscontrata la presenza di falda superficiale per la profondità di 20,0 m dal p.c.

Per la caratterizzazione dell'ammasso roccioso, si sono realizzate una serie di prove di compressione monoassiale libera (vd. Stratigrafie in allegato).

Le indagini in laboratorio sono state eseguite mediante specifiche prove geotecniche su campioni semidisturbati (classe di qualità Q4) e disturbati (classe di qualità Q3).

Le prove di laboratorio hanno consentito di determinare le proprietà e le caratteristiche fisiche generali dei terreni e delle rocce. Gli strumenti utilizzati sono di recente costruzione e corredati dai relativi certificati di taratura.

In particolare è stato utilizzato:

- N°2 Macchine di taglio per scatole di Casagande;
- N° 1 bilancia con precisione al centesimo di grammo;
- N°1 Stufa essiccatrice da 300 l;
- N. 1 pressa da 2000 kN con acquisitore digitale.

Per le prove di taglio sono state utilizzate celle a sezione circolare da 20 cmq e comparatori digitali collegati ad un sistema di acquisizione ed elaborazione Datalog Controls. Il rilevamento delle tensioni di carico è stato effettuato mediante celle di carico collegate al sistema di acquisizione.

Le prove sono state realizzate in modalità consolidata e drenata (velocità mm/min 0,001).

Nella seguente tabella vengono elencate le prove eseguite per ciascun campione rispettivamente per la campagna d'indagini dell'anno 2009 (indicate con il **colore nero**) e per la campagna d'indagini dell'anno 2011 (indicate con il **colore rosso**); con la lettera S seguita da un numero crescente viene indicato il nome del foro di sondaggio a carotaggio, con la lettera C seguita da un numero crescente, viene indicato il campione su cui è stata condotta la prova:

Tabella 1
 (campagna d'indagini anno 2009)

<i>N. campione</i>	<i>Prof. prelievo (m)</i>	<i>Prova di taglio</i>	<i>Limiti e indici di consistenza</i>	<i>Carico di Rottura</i>	<i>Peso di volume nat. Reale, Sat. Sec. %H₂O</i>
S1C2	2,60 – 2,90			X	X
S1C3	5,00 – 5,30			X	X
S1C4	6,50 – 7,00			X	X
S1C5	7,00 – 7,70			X	X
S1C6	7,70 – 8,00			X	X
S1C9	10,10 – 10,40			X	X
S1C10	12,50 – 12,80			X	X
S1C12	14,50 – 15,00			X	X
S2C8	3,50– 3,75	X	X		X
S2C9	8,50 – 8,70	X	X		X
S3C1	6,60 – 6,80	X	X		X
S3C2	8,40 – 8,70	X	X		X
S3C6	18,45 – 18,70			X	X
S3C7	18,70 – 19,00			X	X

Tabella 2
 (campagna d'indagini anno 2011)

<i>N. campione</i>	<i>Prof. prelievo (m)</i>	<i>Prova di taglio</i>	<i>classificazione</i>	<i>Carico di Rottura</i>	<i>Peso di volume nat. Reale, Sat. Sec. %H₂O</i>
S1C1	5,00 – 5,30			X	X
S1C2	7,00 – 7,30			X	X
S1C3	7,70 – 7,90			X	X
S1C4	8,30 – 8,50			X	X
S1C5	13,60 – 13,80			X	X
S1C7	14,70 – 15,00			X	X
S1C9	18,40 – 19,00			X	X
S2C2	3,10 – 3,50			X	X
S2C5	5,20 – 5,90			X	X
S2C6	5,50 – 5,70			X	X
S2C7	7,10 – 7,50			X	X
S2C8	8,08 – 8,40			X	X
S2C9	9,50 – 10,00			X	X
S2C12	12,10 – 12,50			X	X
S2C13	14,10 – 14,60			X	X
S3C1	3,00 – 3,30	X	X		
S3C2	6,30 – 6,50	X	X		
S3C3	7,70 – 8,00	X	X		
S3C4	10,50 – 10,70	X	X		
S3C5	14,20 – 14,50			X	X
S3C6	15,50 – 15,80			X	X
S3C7	17,30 – 18,00			X	X
S3C8	18,30 – 18,90			X	X
S3C9	19,10 – 19,60			X	X
S4C1	3,30 – 4,00			X	X
S4C2	5,00 – 5,50			X	X
S4C3	5,50 – 5,70			X	X

<i>N. campione</i>	<i>Prof. prelievo (m)</i>	<i>Prova di taglio</i>	<i>classificazione</i>	<i>Carico di Rottura</i>	<i>Peso di volume nat. Reale, Sat. Sec. %H₂O</i>
S4C4	8,50 – 9,00			X	X
S4C5	14,00 – 14,30			X	X
S4C6	10,50 – 10,80			X	X
S4C7	15,30 – 15,60			X	X
S4C8	18,00 – 18,35			X	X

L'indice di qualità degli ammassi rocciosi (Rock Quality Designation) riscontrato lungo il corso delle perforazioni, è stato inserito direttamente in ogni stratigrafia. Questo parametro, a differenza della sola resistenza a compressione, esprime un giudizio qualitativo dell'ammasso roccioso, comprensivo delle discontinuità (Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche, A.G.I., 1977).

5 - PERMEABILITA' DELLE LITOLOGIE INDAGATE

I depositi calcarei e calcarei dolomitici, riscontrabili nella totalità del territorio esaminato, presentano una permeabilità varia, funzione essenzialmente della loro struttura e della fessurazione, quest'ultima dovuta sia ai fenomeni fisici e tettonici, sia alla degradazione fisica superficiale. In generale si può dire che queste rocce presentano una permeabilità superficiale medio alta, consentendo una buona circolazione sotterranea che avviene prevalentemente lungo le discontinuità: da un lato le dislocazioni tettoniche hanno determinato la formazione all'interno della compagine carbonatica, di vie preferenziali per la circolazione idrica sotterranea; dall'altro, gli eventi geomorfologici hanno contribuito ad approfondire e carsificare le fratture tettoniche, ampliando il sistema idrico sotterraneo. I calcari, calcari dolomitici, dolomie, calcari oolitici, calcari bioclastici, calcari marnosi, calcari micritici, gessi e argille presentano una permeabilità complessivamente alta per fessurazione e carsismo nei termini carbonatici e localmente bassa nei termini marnoso argillosi.

6 – QUADRO DEI RISULTATI OTTENUTI

Lo studio realizzato, ha comportato la raccolta di tutte le informazioni indispensabili alla caratterizzazione geologica e geotecnica del sottosuolo.

Di seguito, sono riportati i risultati ottenuti dalle prove di laboratorio geotecnico:

Tabella 3

(prove di laboratorio geotecnico campagna d'indagini anno 2009)

N. camp.	Prof. prelievo (m)	φ (°)	C (kg/cm²)	Il -Ip -Ip	% H2O	G (g/cm³)	Y_n (g/cm³)	Y_s (g/cm³)	σ (kg/cm²)
S1C2	2,60 – 2,90	-	-	-	-	2,75	2,73	-	238,89
S1C3	5,00 – 5,30	-	-	-	-	2,73	2,73	-	102,29
S1C4	6,50 – 7,00	-	-	-	-	2,79	2,79	-	455,46
S1C5	7,00 – 7,70	-	-	-	-	2,75	2,73	-	361,08
S1C6	7,70 – 8,00	-	-	-	-	2,87	2,85	-	204,59
S1C9	10,10 – 10,40	-	-	-	-	2,71	2,46	-	104,73
S1C10	12,50 – 12,80	-	-	-	-	2,68	2,52	-	424,18
S1C12	14,50 – 15,00	-	-	-	-	2,47	2,68	-	383,40
S2C8	3,50 – 3,75	14,01	0,48	44-18-26	16,89	2,71	1,59	1,36	-
S2C9	8,50 – 8,70	28,01	0,15	41-23-18	5,16	2,72	1,48	1,40	-
S3C1	6,60 – 6,80	28,94	0,22	32-17-15	8,62	2,68	1,50	1,38	-
S3C2	8,40 – 8,70	32,37	0,07	37-24-13	4,87	2,71	1,43	1,37	-
S3C6	18,45 – 18,70	-	-	-	-	2,67	2,57	-	696,18
S3C7	18,70 – 19,00	-	-	-	-	2,64	2,5	-	464,59

Tabella 4

(prove di laboratorio geotecnico campagna d'indagini anno 2011)

N. camp.	Prof. prelievo (m)	φ (°)	C (kg/cm²)	Il -Ip -Ip	% H2O	G (g/cm³)	Y_n (g/cm³)	Y_s (g/cm³)	σ (kg/cm²)
S1C2	5,00 – 5,30	-	-	-	-	-	2,79	-	964
S1C2	7,00 – 7,30	-	-	-	-	-	2,73	-	933
S1C3	7,70 – 7,90	-	-	-	-	-	2,7	-	925

N. camp.	Prof. prelievo (m)	φ (°)	C (kg/cm²)	ll -lp -Ip	% H2O	G (g/cm³)	Y_n (g/cm³)	Y_s (g/cm³)	σ (kg/cm²)
S1C4	8,30 – 8,50	-	-	-	-	-	2,73	-	972
S1C5	13,60 – 13,80	-	-	-	-	-	2,78	-	1098
S1C7	14,70 – 15,00	-	-	-	-	-	2,79	-	1121
S1C9	18,40 – 19,00	-	-	-	-	-	2,82	-	1148
S2C2	3,10 – 3,50	-	-	-	-	-	2,71	-	637
S2C5	5,20 – 5,90	-	-	-	-	-	2,61	-	549
S2C7	7,10 – 7,50	-	-	-	-	-	2,68	-	1175
S2C8	8,08 – 8,40	-	-	-	-	-	2,53	-	710
S2C9	9,50 – 10,00	-	-	-	-	-	2,59	-	991
S2C12	12,10 – 12,50	-	-	-	-	-	2,64	-	795
S2C13	14,10 – 14,60	-	-	-	-	-	2,66	-	712
S3C1	3,00 – 3,30	23,65	0,38	48-25-23	11,72	2,67	-	1,64	-
S3C2	6,30 – 6,50	20,13	0,47	57-29-28	12,49	2,71	-	1,65	-
S3C3	7,70 – 8,00	25,2	0,3	45-31-14	8,47	2,61	-	1,63	-
S3C4	10,50 – 10,70	22,49	0,42	51-30-21	16,98	2,68	-	1,57	-
S3C5	14,20 – 14,50	-	-	-	-	-	2,02	-	153
S3C6	15,50 – 15,80	-	-	-	-	-	2,09	-	248
S3C7	17,30 – 18,00	-	-	-	-	-	2,27	-	312
S3C8	18,30 – 18,90	-	-	-	-	-	2,22	-	268
S3C9	19,10 – 19,60	-	-	-	-	-	2,39	-	295
S4C1	3,30 – 4,00	-	-	-	-	-	2,6	-	845
S4C2	5,00 – 5,50	-	-	-	-	-	2,54	-	768
S4C3	5,50 – 5,70	-	-	-	-	-	2,67	-	787
S4C4	8,50 – 9,00	-	-	-	-	-	2,69	-	960
S4C5	14,00 – 14,30	-	-	-	-	-	2,75	-	1075
S4C6	10,50 – 10,80	-	-	-	-	-	2,65	-	710
S4C7	15,30 – 15,60	-	-	-	-	-	2,57	-	622
S4C8	18,00 – 18,35	-	-	-	-	-	2,7	-	1164

Con:

φ :	angolo di attrito interno del terreno;
C:	coesione;
ll -lp -Ip:	limite liquido, plastico e indice di plasticità;
% H ₂ O:	contenuto di umidità naturale;
G:	Peso di volume reale;
Y _n :	Peso di volume naturale;
Y _s :	Peso di volume secco;
σ :	carico di rottura.

Sulla base del diagramma di Casagrande (per argille e limi), basato sui valori del limite liquido e limite plastico e indici di consistenza I_c , è stata eseguita la classificazione dei terreni.

Tutti i campioni a grana fine analizzati della tabella 11 (campagna d'indagini 2009) sono classificati secondo il sistema unificato di classificazione delle terre (USCS Unified Soil Classification System) come CL-OL “**argille inorganiche di plasticità da bassa a media, argille ghiaiose o sabbiose o siltose, silt e silt argillosi organici di bassa plasticità**” con $LL < 50$.

Sulla base dell'indice di consistenza ottenuto con la seguente formula:

$$I_c = LL - W_n / IP$$

con:

LL = limite liquido;
W_n = umidità naturale;
Ip = indice plastico.

presentano un comportamento **semisolido** e **solido**.

Per quanto riguarda i campioni di roccia analizzati, i calcari dolomitici giallastri ed i calcari grigi nerastri hanno mostrato una differente resistenza a compressione. Alcuni campioni di calcare dolomitico giallastro prelevati dal foro di sondaggio S1 hanno fornito valori di compressione a rottura abbastanza bassi, con valori di carico di rottura di 102,29 e 104,73 Kg/cm². Valori di rottura decisamente più elevati si sono ottenuti su campioni della stessa litologia prelevati sia dal sondaggio S1 che in aree limitrofe nel corso di campagne di indagini geognostiche precedenti, con valori fino a 424 kg/cm².

Maggiore resistenza a compressione forniscono invece, in generale, i calcari grigi (foro di sondaggio S1).

I campioni a grana fine analizzati della tabella 4 (campagna d'indagini 2011), ed individuati con il foro di sondaggio **S3** fino alla profondità di 12,5 m dal p.c., sono classificati secondo il sistema unificato di classificazione delle terre (USCS Unified Soil Classification System) come CL-OL

“argille inorganiche di plasticità da bassa a media, argille ghiaiose o sabbiose o siltose, silt e silt argillosi organici di bassa plasticità” con $LL < 50$ per una profondità di 6,50 m da p.c. (foro di sondaggio **S3**) ed come ML-OL **“silt inorganici e sabbia finissima, sabbia fine siltosa o argillosa, silt e silt argillosi organici di bassa plasticità”**. Per i campioni analizzati fino alla profondità di 6,5 m dal p.c., la componente argillosa e siltosa è elevata, con l'aumentare della profondità, diminuisce il contenuto fine ed aumenta la componente sabbiosa medio grossolana, ghiaietto e ghiaie.

Per i campioni di roccia analizzati, i valori forniti allo schiacciamento sui calcari sono in generale elevati, valori meno elevati ma comunque cautelativi per il calcare marnoso grigio scuro intercettato con il foro di sondaggio **S2** (campagna d'indagini 2011) alla profondità di 6,6 m dal p.c. (vd. Tabella 4). I campioni di marna gessifera e argilliti gessifere individuate con il foro di sondaggio **S3** a partire dalla profondità di 12,5 m dal p.c., presentano una resistenza allo schiacciamento ad espansione laterale libera molto più bassa rispetto ai calcari ma con valori comunque non inferiori ad 150 kg/cmq.

La campagna d'indagine integrativa eseguita nell'anno 2011, ha caratterizzato, con il foro di sondaggio **S1**, un settore non indagato precedentemente, compreso tra una morfologia di “piccolo rilievo” del settore meridionale in prossimità del Monte Alvaro con il settore pianeggiante settentrionale, in loc. Biunisi. La litologia in esame è la stessa indagata nell'anno 2009 con il foro di sondaggio **S1** con un più basso indice di fratturazione (vd. Stratigrafie in allegato). Il foro di sondaggio **S2** richiama ancora il foro di sondaggio **S1** dell'indagine 2009 fino alla profondità di 6,60 m dal p.c. e oltre la profondità di 11,3 m al p.c. Alla profondità intermedia di 6,60 m dal p.c. si differenzia per la presenza di un calcare marnoso tenero poco fratturato caratterizzato da una marcata fissilità con livelli carboniosi. Il foro di sondaggio **S4** richiama in parte il foro di sondaggio **S2** ma con un buon indice di fratturazione (scarsamente fratturato).

Il foro di sondaggio **S3** individua geotecnicamente un terreno: la stratigrafia evidenzia la presenza di depositi continentali di copertura per uno spessore di 12 m dal p.c., rappresentati da una alternanza di strati argillo sabbiosi plastici, sabbia argillose e sabbie limose con livelli prettamente clastici di ghiaie e ciottoli calcarei.

Riassumendo, si rileva come come la maggior parte degli aerogeneratori saranno fondati sul substrato calcareo con un indice di fratturazione variabile e con eventuali intercalazioni di livelli marnosi poco fratturati; solo l'aerogeneratore T17 (indagato con il foro di sondaggio **S3**) e T16 (dal solo rilievo geologico superficiale) dovranno necessariamente essere fondati su pali di fondazione per

la presenza di depositi alluvionali di copertura dello spessore di circa 12 m (riferimento al foro di sondaggio **S3**).

Sulla stessa linea della settorializzazione morfologica di cui al paragrafo 7 della relazione geologica, l'area in studio può essere parametrizzata dal punto di vista geotecnico-geomeccanico secondo:

- una morfologia di “piccolo rilievo” per il settore meridionale compreso tra la cava di monte Rosè e quella di Monte Alvaro, identificato dai fori di sondaggio **S1** (indagine 2009) ed **S4, S2 ed S1** (indagine 2011);
- una morfologia collinare per il settore orientale (loc. “Monte delle Case”) identificato dal foro di sondaggio **S3** (indagine 2009);
un settore debolmente acclive e pianeggiante settentrionale, in località “Biunisi, identificato con il foro di sondaggio **S2** (indagine 2009);
- un quarto settore, pianeggiante, in loc. Margoneddu-Biunisi individuato con il foro di sondaggio **S3** (indagine 2011).

In definitiva, I risultati ottenuti dalle prove di laboratorio, permettono di classificare le rocce fino ad ora analizzate (per i soli punti indagati), come roccia dura (> 120 kg/cmq). Il foro di sondaggio **S3** ha individuato la presenza di un conglomerato costituito da elementi calcarei dolomitici, giallastri, a spigoli vivi, in matrice argillosa, molto addensato. Tale deposito presenta un resistenza allo schiacciamento inferiore ai 120 kg/cmq; per la realizzazione dello scavo in sezione sarà comunque necessario l'utilizzo del martellone. I fronti di scavo, per una profondità non superiore a 3 m dall'attuale p.c. e per i soli punti indagati risultano stabili ed autosostenuti a medio-lungo termine per le fondazioni su roccia; si possono verificare localmente dei distacchi di piccoli cunei di roccia (a riguardo si veda il paragrafo 7).

Sulla base dei dati ottenuti dalle campagne d'indagini eseguite, (limitatamente ai punti direttamente indagati) corroborati con dati riferiti a terreni simili in aree limitrofe e sulla base delle considerazioni sopra esposte, si può fornire un quadro generale non troppo dispersivo dei risultati per i quattro settori sopra descritti, riassunti nelle seguenti tabelle:

- per il substrato calcareo dolomitico fratturato (foro di sondaggio **S1** - indagine 2009 ed **S4**, **S2** e **S1** indagine 2011 – settore loc. Monte Rosè – Monte Alvaro):

Tabella 5
Sintesi dei parametri geomeccanici

γ (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)	c (kN/m ²)	Φ°	RQD%	E (kN/m ²)	v
25.50	-	0	45	30-50	98066.50	0.15

Con:

- γ : peso unità di volume naturale;
- γ_s : peso unità di volume saturo;
- Φ : angolo di attrito
- c: coesione;
- Ed: modulo Elastico;
- v: modulo di Poisson;
- RQD: indice di fratturazione.

L'indice di fratturazione variabile da un foro all'altro; la zona più disturbata è risultata quella identificata dal foro di sondaggio **S1** (campagna d'indagini 2011).

- per il substrato calcareo dolomitico fortemente fratturato (substrato calcareo dolomitico fortemente fratturato; foro di sondaggio **S2** - indagine 2009 – settore Loc. Biunisi):

Tabella 6
Sintesi dei parametri geomeccanici
(foro di sondaggio S2)

γ (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)	c (kN/m ²)	Φ°	RQD%	E (kN/m ²)	v
24.40	-	0	45	25	49033.25	0.20

Il settore settentrionale sub pianeggiante (foro di sondaggio S2) con la presenza del substrato calcareo dolomitico fortemente fratturato e stratificato con presenza continua di livelli argillosi.

La falda, è stata individuata ad una profondità di 10 m dall'attuale p.c., all'interno del substrato calcareo dolomitico (vd. stratigrafie).

- Per il deposito conglomeratico (depositi conglomeratici; foro di sondaggio **S3** - indagine 2009 – Loc. Monte delle Case):

Tabella 7
Sintesi dei parametri geomeccanici
(foro di sondaggio S3)

γ (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)	c (kN/m ²)	Φ°	RQD%	E (kN/m ²)	v
17.65	15.69	6.86	36	-	49033.20	0.25

La presenza per tutto il foro di sondaggio S3 di una litologia conglomeratica, suggerisce il trattamento geotecnico come **“terreno” piuttosto che come roccia.**

Alla luce dell'indagine geognostica integrativa eseguita nell'anno 2011, si aggiunge un ulteriore settore (4° settore) a morfologia pianeggiante in loc. Margoneddu – Biunisi individuato con il foro di sondaggio **S3**. La stratigrafia indica la presenza di depositi coesivi in generale fino alla profondità di 12,5 m dal p.c. (vd. Tabella 8) e di depositi rocciosi dalla profondità di 12,5 m dal p.c. Fino a fondo foro (vd. Tabella 9):

- Per il deposito argilloso (depositi argillosi; foro di sondaggio **S3** - indagine 2011 – loc. Margoneddu-Biunisi):

Tabella 8

γ (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)	c (kN/m ²)	Φ°	RQD%	E (kN/m ²)	v
-	15.88	6.86	22,9	-	7360	0.5

- Per le marne gessifere e argilliti gessifere (foro di sondaggio **S3** - indagine 2011 – loc. Margoneddu-Biunisi):

Tabella 9

γ (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)	c (kN/m ²)	Φ°	RQD%	E (kN/m ²)	v
21.57	-	0	41-45	-	49050	0.2

La falda è stata individuata ad una profondità di 1,5 m dal p.c., all'interno dei depositi sabbiosi argillosi.

I depositi terrigeni, rappresentati per i punti direttamente indagati da una copertura pedogenetica passante con continuità ad un deposito continentale argillo sabbioso brunastro, ha uno spessore massimo di 1,50 m dall'attuale p.c., e quindi geotecnicamente non interessante perché da asportare nella realizzazione dell'incastro delle fondazioni degli aerogeneratori.

7 – CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA GLI AMMASSI ROCCIOSI

La caratterizzazione geomeccanica eseguita con il metodo di Bieniawski (si veda la relazione geologica) effettuata in parete di scavo (cava di Monte Rosè), ha permesso di poter caratterizzare l'ammasso roccioso che verrà interessato nello scavo della fondazione per gli aerogeneratori e definire la stabilità dello scavo a sezione obbligata, per una altezza del fronte di circa 3 m dal p.c.

Per la caratterizzazione dell'ammasso, è stata utilizzata la classificazione RMR (Rock Mass Rating) di Bieniawski (1989) che prevede di assegnare un punteggio all'ammasso roccioso sulla base di 5 parametri.

R1 – resistenza a compressione uniassiale della roccia;

R2 – RQD (Rock Quality Designation);

R3 – spaziatura delle discontinuità;

R4 – condizioni delle discontinuità;

R5 – condizioni idrauliche.

I parametri sono raggruppati in cinque intervalli di valori la cui somma permette di suddividere gli ammassi rocciosi in cinque classi di qualità e di definirne il rispettivo indice di classificazione RMR:

$$RMR = R1+R2+R3+R4+R5$$

L'indice RMR viene utilizzato per ricavare i parametri di resistenza e deformabilità dell'ammasso roccioso (coesione, angolo di attrito e modulo di deformabilità).

L'ammasso roccioso in esame presenta caratteristiche litologiche e strutturali abbastanza omogenee sull'intera area d'intervento per cui è possibile classificarlo con un unico indice. Si utilizzeranno i valori medi dei dati ottenuti dai fori di sondaggio **S1**, **S2** ed **S4** per una profondità non superiore a 3 m dal p.c. (profondità d'incastro della fondazione dello aerogeneratore). I valori attribuiti a ciascun parametro dell'ammasso sono elencati di seguito.

$$\mathbf{RMR = R1+R2+R3+R4+R5 = 53.6}$$

Questo valore classifica l'ammasso come discreto (classe III)

I parametri di resistenza e deformabilità attribuibili sono:

coesione **C = 268 KPa**

angolo d'attrito **$\rho = 32^\circ$**

modulo di deformabilità **Ed = 7 GPa**

Le classi di qualità ottenute dalle classificazioni geomeccaniche consentono una stima solo approssimativa dei parametri di resistenza dell'ammasso.

Per valutare la stabilità dell'ammasso in relazione al possibile distacco di blocchi di roccia, è stata effettuata un'analisi delle condizioni di potenziale instabilità sulla base delle giaciture delle discontinuità rilevate nelle tre stazioni (vd. Relazione geologica) e dell'angolo di attrito determinato con l'analisi di Bieniawski sull'insieme dell'ammasso roccioso, pari a 32° . Per l'analisi della possibilità di distacchi di masse rocciose per scivolamento planare (strati a franapoggio) si è utilizzato un angolo di attrito inferiore (15°) che contempla la presenza dei livelli argillosi che separano gli strati carbonatici.

Ciò che è emerso, è che sarà necessario prevedere le dovute precauzioni nella fase di scavo a sezione obbligata delle fondazioni degli aerogeneratori (profondità d'incastro prevista 3 m); l'analisi strutturale ha infatti evidenziato che se in parete dello scavo (a monte o a valle in funzione della orientazione del versante) ci si troverà nelle condizioni di discontinuità orientate a reggipoggio (p.e. lato di monte per gli aerogeneratori T03, T04), il lato opposto le discontinuità risulteranno necessariamente a franapoggio con possibilità di scivolamento planare, mentre è sempre presente il potenziale scivolamento dei cunei (anche se di dimensioni alquanto limitate per la spaziatura abbastanza ravvicinata delle fratture) per l'intersezione di diverse famiglie di fratture.

8 – CALCOLO DELLA CAPACITÀ PORTANTE

Per fondazione s'intende una struttura adatta a trasmettere il peso del fabbricato e le altre forze agenti sulla sovrastruttura al terreno. I carichi trasmessi non devono superare la massima resistenza al taglio mobilitabile dal terreno stesso. Nel caso ciò avvenisse la conseguenza sarebbe la rottura degli strati portanti, che si manifesterebbe con ampie deformazioni non tollerabili dalla struttura. Il valore della resistenza al taglio massima mobilitabile viene definita capacità portante limite del terreno di fondazione.

Il carico limite viene calcolato in funzione delle caratteristiche fisico-meccaniche e del tipo di fondazione scelto. Con riferimento ai dati **puntuali** ottenuti con i fori di sondaggio, il carico limite può essere calcolato con le seguenti formule:

Formula di Terzaghi:

$$q_{ult} = c \times N_c \times s_c + \gamma \times D \times N_q + 0.5 \times \gamma \times B \times N_\gamma \times s_\gamma$$

dove:

$$N_q = \frac{a^2}{2 \cos^2 (45 + \varphi / 2)}$$

$$a = e^{(0.75\pi - \varphi / 2) \tan \varphi}$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \varphi$$

$$N_\gamma = \frac{\tan \varphi}{2} \left(\frac{K p \gamma}{\cos^2 \varphi} - 1 \right)$$

Il metodo proposto viene normalmente utilizzato per il calcolo della Qlim su terreni; le fondazioni impostate su formazioni rocciose lapidee o semilapidee sono generalmente più sicure a parità di condizioni di quelle sui terreni data la grande resistenza alla compressione di molte formazioni rocciose (se si esclude la possibilità della presenza di depositi argillosi o di vuoti franchi che ridurrebbero drasticamente la portanza del terreno di fondazione), naturalmente in correlazione con il grado di fratturazione. Nella capacità portante delle rocce si utilizzano normalmente fattori di sicurezza molto alti e legati in qualche modo al valore del coefficiente RQD.

Per la determinazione della capacità portante di una roccia si possono usare le formule di Terzaghi, usando angolo d'attrito e coesione della roccia, o quelle proposte da **Stagg e Zienkiewicz** (1968) in cui i coefficienti della formula della capacità portante valgono:

$$N_q = Tg^6 (45 + \varphi/2);$$

$$N_c = 5 \times Tg^4 (45 + \varphi/2);$$

$$N_\gamma = N_q + 1.$$

Con tali coefficienti vanno usati i fattori di forma impiegati nella formula di Terzaghi; il valore della Qlim ottenuto va poi ridotto in base al valore del parametro RQD (indice di fratturazione).

- formula Meyerhof:

Carico verticale:

$$q_{ult} = c' N_c' s_c' d_c + g' D' N_q' s_q' d_q + 0.5' g' B' N_\gamma' s_\gamma' d_\gamma$$

Carico inclinato:

$$q_{ult} = c' N_c' i_c' d_c + g' D' N_q' i_q' d_q + 0.5' g' B' N_\gamma' i_\gamma' d_\gamma$$

Dove:

fattori adimensionali di capacità portante:

$$N_q = e^{\pi \tan \varphi} \tan^2 (45 + \varphi/2)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \varphi$$

$$N_\gamma = (N_q - 1) \tan(1.4\varphi)$$

fattore di forma:

$$s_c = 1 + 0.2k_p \frac{B}{L} \quad \text{per } \varphi > 10$$

$$s_q = s_\gamma = 1 + 0.1k_p \frac{B}{L} \quad \text{per } \varphi = 0$$

fattore di profondità:

$$d_c = 1 + 0.2\sqrt{k_p} \frac{D}{B}$$

$$d_q = d_\gamma = 1 + 0.1\sqrt{k_p} \frac{D}{B} \quad \text{per } \varphi > 10$$

$$d_q = d_\gamma = 1 \quad \text{per } \varphi = 0$$

inclinazione:

$$i_c = i_\gamma = \left(1 - \frac{\theta}{90}\right)^2$$

$$i_\gamma = \left(1 - \frac{\theta}{\varphi}\right)^2 \quad \text{per } \varphi > 0$$

$$i_\gamma = 0 \quad \text{per } \varphi = 0$$

con :

$$K_p = \tan^2(45^\circ + \varphi/2)$$

θ = Inclinazione della risultante sulla verticale.

C = coesione del terreno;

B = larghezza della fondazione;

D = profondità di posa;

γ_1, γ_2 = peso di volume del terreno al disopra e al disotto del piano di posa.

- Formula di Hansen (1970):

E' una ulteriore estensione della formula di *Meyerhof*, le estensioni consistono nell'introduzione di i che tiene conto della eventuale inclinazione sull'orizzontale del piano di posa e un fattore g_i per terreno in pendenza.

La formula di Hansen vale per qualsiasi rapporto D/B , quindi sia per fondazioni superficiali che profonde, ma lo stesso autore introdusse dei coefficienti per meglio interpretare il comportamento reale della fondazione, senza di essi, infatti, si avrebbe un aumento troppo forte del carico limite con la profondità.

Per valori di $D/B < 1$

$$d_c = 1 + 0.4 \frac{D}{B}$$

$$d_q = 1 + 2 \tan \varphi (1 - \sin \varphi)^2 \frac{D}{B}$$

Per valori $D/B > 1$:

$$d_c = 1 + 0.4 \tan^{-1} \frac{D}{B}$$

$$d_q = 1 + 2 \tan \varphi (1 - \sin \varphi)^2 \tan^{-1} \frac{D}{B}$$

Nel caso $\varphi = 0$

D/B	0	1	1.1	2	5	10	20	100
d'_c	0	0.40	0.33	0.44	0.55	0.59	0.61	0.62

Nei fattori seguenti le espressioni con apici (') valgono quando $\varphi = 0$.
Fattore di forma:

$$s'_c = 0.2 \frac{B}{L}$$

$$s_c = 1 + \frac{N_q}{N_c} \frac{B}{L}$$

$s_c = 1$ per fondazioni nastriformi

$$s_q = 1 + \frac{B}{L} \tan \varphi$$

$$s_\gamma = 1 - 0.4 \frac{B}{L}$$

Fattore di profondità:

$$\begin{aligned}d'_c &= 0.4k \\d_c &= 1 + 0.4k \\d_q &= 1 + 2 \tan \varphi (1 - \sin \varphi) k \\d_\gamma &= 1 \quad \text{per qualsiasi } \varphi \\k &= \frac{D}{B} \quad \text{se } \frac{D}{B} \leq 1 \\k &= \tan^{-1} \frac{D}{B} \quad \text{se } \frac{D}{B} > 1\end{aligned}$$

Fattori di inclinazione del carico

$$\begin{aligned}i'_c &= 0.5 - 0.5 \sqrt{1 - \frac{H}{A_f c_a}} \\i_c &= i_q - \frac{1 - i_q}{N_q - 1} \\i_q &= \left(1 - \frac{0.5H}{V + A_f c_a \cot \varphi} \right)^5 \\i_\gamma &= \left(1 - \frac{0.7H}{V + A_f c_a \cot \varphi} \right)^5 \quad (\eta = 0) \\i_\gamma &= \left(1 - \frac{(0.7 - \eta / 450)H}{V + A_f c_a \cot \varphi} \right)^5 \quad (\eta > 0)\end{aligned}$$

Fattori di inclinazione del terreno (fondazione su pendio):

$$\begin{aligned}g'_c &= \frac{\beta}{147} \\g_c &= 1 - \frac{\beta}{147} \\g_q &= g_\gamma = (1 - 0.5 \tan \beta)^5\end{aligned}$$

Fattori di inclinazione del piano di fondazione (base inclinata)

$$b'_c = \frac{\eta^\circ}{147^\circ}$$
$$b_c = 1 - \frac{\eta^\circ}{147^\circ}$$
$$b_q = \exp(-2\eta \tan \varphi)$$
$$b_q = \exp(-2.7\eta \tan \varphi)$$

Una volta determinata la capacità portante ultima, sarà possibile definire il coefficiente di Winkler (metodo di Bowles).

Il coefficiente di reazione del terreno, detto anche costante di sottofondo o coefficiente di Winkler, rappresenta una forza esercitata sul *suolo elastico alla Winkler*, su un'area di 1 cmq che provoca l'abbassamento di 1 cm. Per *suolo alla winkler* si intende un suolo puramente ideale, paragonabile ad un letto di molle, un terreno perfettamente elastico, che ha la comodità di essere usato con facilità nei calcoli e presenta sufficienti attinenze alla maggioranza dei casi reali. Tale costante non è affatto una proprietà intrinseca del terreno, ma dipende da forma e dimensioni della fondazione, dalla distribuzione dei carichi agenti, dalla stratigrafia e dalla composizione fisica del suolo. Emerge quindi come questa grandezza **K_r** sia molto spesso tutt'altro che costante per una fondazione ampia, che coinvolge una volumetria di terreno poco omogenea. Ci si accontenta spesso di valori cautelativi, utilizzando dei coefficienti di sicurezza appropriati per il calcolo progettuale e le verifiche strutturali delle fondazioni e della sovrastruttura.

Per i coefficienti di sicurezza F_s si dovrà tener conto dei seguenti fattori:

- grado di conoscenza della costituzione del sottosuolo e sulle proprietà dei terreni;
- grado di approssimazione dei metodi di calcolo;
- verifica della rispondenza tra la caratterizzazione geotecnica assunta in progetto e l'effettiva situazione dei luoghi;
- la variazione dello stato tensionale del terreno a causa dello sbancamento da effettuare.

Il valore della Q_{lim} verrà determinato con il metodo della teoria classica (DM LL.PP. 11/03/1988) e sulla base dell'Eurocodice-7 in cui viene adottato l'approccio agli stati limite ultimo e di servizio unitamente all'impiego di coefficienti di sicurezza parziali. Le verifiche di sicurezza rispetto agli stati limite ultimi (SLU) e le analisi relative alle condizioni di esercizio (SLE), devono essere effettuate nel rispetto dei principi e delle procedure seguenti:

- verifiche nei confronti degli stati limite ultimi SLU: per ogni stato limite deve essere rispettata la condizione E_d minore o uguale a R_d ossia che l'effetto delle azioni di progetto sia non superiore alle resistenze di progetto.
- La verifica della suddetta condizione deve essere effettuata impiegando diverse combinazioni di gruppi di coefficienti parziali, rispettivamente definiti per azioni (A1 e A2), per i parametri geotecnici (M1 e M2) e per le resistenze (R1, R2 e R3).

Nella tabella esplicativa che segue, alla luce dei risultati ottenuti della campagna d'indagine geognostica integrativa dell'anno 2011, viene indicata la tipologia fondale (diretta o indiretta) prevista per ogni aerogeneratore, i parametri geomeccanici con riferimento alle tabelle di cui al paragrafo 6 sulla base della settorializzazione effettuata e l'indicazione dei coefficienti sismici:

Tabella 10

<i>N° Aerogeneratore</i>	<i>Tipologia fondale</i>	<i>Parametri geomeccanici</i>	<i>Coefficienti sismici</i>
T01	Superficiale isolata	γ (kN/m ³): 25.50 γ_s (kN/m ³): - c (kN/m ²): - Φ° : 45 RQD (%): 30–50 E (kN/m ²): 98066 ν : 0.15	Zona sismica: 4 Suolo di tipo: A Categoria topografica: T1
T02	Superficiale isolata	γ (kN/m ³): 25.50 γ_s (kN/m ³): - c (kN/m ²): - Φ° : 45 RQD (%): 30–50 E (kN/m ²): 98066 ν : 0.15	Zona sismica: 4 Suolo di tipo: A Categoria topografica: T1

<i>N° Aerogeneratore</i>	<i>Tipologia fondale</i>	<i>Parametri geomeccanici</i>	<i>Coefficienti sismici</i>
T03	Superficiale isolata	γ (kN/m ³): 25.50 γ_s (kN/m ³): - c (kN/m ²): - Φ° : 45 RQD (%): 30–50 E (kN/m ²): 98066 ν : 0.15	Zona sismica: 4 Suolo di tipo: A Categoria topografica: T1
T04	Superficiale isolata	γ (kN/m ³): 25.50 γ_s (kN/m ³): - c (kN/m ²): - Φ° : 45 RQD (%): 30–50 E (kN/m ²): 98066 ν : 0.15	Zona sismica: 4 Suolo di tipo: A Categoria topografica: T1
T05	Superficiale isolata	γ (kN/m ³): 25.50 γ_s (kN/m ³): - c (kN/m ²): - Φ° : 45 RQD (%): 30–50 E (kN/m ²): 98066 ν : 0.15	Zona sismica: 4 Suolo di tipo: A Categoria topografica: T1
T06	Superficiale isolata	γ (kN/m ³): 25.50 γ_s (kN/m ³): - c (kN/m ²): - Φ° : 45 RQD (%): 30–50 E (kN/m ²): 98066 ν : 0.15	Zona sismica: 4 Suolo di tipo: A Categoria topografica: T1
T07	Superficiale isolata	γ (kN/m ³): 25.50 γ_s (kN/m ³): - c (kN/m ²): - Φ° : 45 RQD (%): 30–50 E (kN/m ²): 98066 ν : 0.15	Zona sismica: 4 Suolo di tipo: A Categoria topografica: T1
T08	Superficiale isolata	γ (kN/m ³): 25.50 γ_s (kN/m ³): - c (kN/m ²): - Φ° : 45 RQD (%): 30–50 E (kN/m ²): 98066 ν : 0.15	Zona sismica: 4 Suolo di tipo: A Categoria topografica: T1

N° Aerogeneratore	Tipologia fondale	Parametri geomeccanici	Coefficienti sismici
T09	Superficiale isolata	γ (kN/m ³): 25.50 γ_s (kN/m ³): - c (kN/m ²): - Φ° : 45 RQD (%): 30–50 E (kN/m ²): 98066 ν : 0.15	Zona sismica: 4 Suolo di tipo: A Categoria topografica: T1
T10	Superficiale isolata	γ (kN/m ³): 25.50 γ_s (kN/m ³): - c (kN/m ²): - Φ° : 45 RQD (%): 30–50 E (kN/m ²): 98066 ν : 0.15	Zona sismica: 4 Suolo di tipo: A Categoria topografica: T1
T11	Superficiale isolata	γ (kN/m ³): 25.50 γ_s (kN/m ³): - c (kN/m ²): - Φ° : 45 RQD (%): 30–50 E (kN/m ²): 98066 ν : 0.15	Zona sismica: 4 Suolo di tipo: A Categoria topografica: T1
T12	Superficiale isolata	γ (kN/m ³): 25.50 γ_s (kN/m ³): - c (kN/m ²): - Φ° : 45 RQD (%): 30–50 E (kN/m ²): 98066 ν : 0.15	Zona sismica: 4 Suolo di tipo: A Categoria topografica: T1
T13	Superficiale isolata	γ (kN/m ³): 17.65 γ_s (kN/m ³): 15.69 c (kN/m ²): 6.86 Φ° : 36 RQD (%): – E (kN/m ²): 49033 ν : 0.25	Zona sismica: 4 Suolo di tipo: B Categoria topografica: T1
T14	Superficiale isolata	γ (kN/m ³): 25.50 γ_s (kN/m ³): - c (kN/m ²): - Φ° : 45 RQD (%): 30–50 E (kN/m ²): 98066 ν : 0.15	Zona sismica: 4 Suolo di tipo: A Categoria topografica: T1

<i>N° Aerogeneratore</i>	<i>Tipologia fondale</i>	<i>Parametri geomeccanici</i>	<i>Coefficienti sismici</i>
T15	Superficiale isolata	γ (kN/m ³): 17.65 γ_s (kN/m ³): 15.69 c (kN/m ²): 6.86 Φ° : 36 RQD (%): – E (kN/m ²): 49033 ν : 0.25	Zona sismica: 4 Suolo di tipo: B Categoria topografica: T1
T16	profonda	γ (kN/m ³): 21.57 γ_s (kN/m ³): - c (kN/m ²): 0 Φ° : 41–45 RQD (%): – E (kN/m ²): 49050 ν : 0.2	Zona sismica: 4 Suolo di tipo: B Categoria topografica: T1
T17	profonda	γ (kN/m ³): 21.57 γ_s (kN/m ³): - c (kN/m ²): 0 Φ° : 41–45 RQD (%): – E (kN/m ²): 49050 ν : 0.2	Zona sismica: 4 Suolo di tipo: B Categoria topografica: T1
T18	Superficiale isolata	γ (kN/m ³): 24.40 γ_s (kN/m ³): - c (kN/m ²): - Φ° : 45° RQD (%): 25 E (kN/m ²): 49033 ν : 0.20	Zona sismica: 4 Suolo di tipo: A Categoria topografica: T1
Stazione di smistamento	Superficiale continua	γ (kN/m ³): 25.50 γ_s (kN/m ³): - c (kN/m ²): - Φ° : 45 RQD (%): 30–50 E (kN/m ²): 98066 ν : 0.15	Zona sismica: 4 Suolo di tipo: A Categoria topografica: T1

Per l'aerogeneratore T09, posto in prossimità del fronte di cava di Monte Rosè, si manterrà la soluzione fondale di tipo superficiale isolata; sarà successivamente effettuata una verifica di stabilità del fronte di cava in condizioni ex post (con la presenza dello aerogeneratore) a seguito di sondaggi geognostici specifici, per definire la necessità o meno di trasferire i carichi in profondità ad una quota inferiore al fronte di scavo, se pur la litologia di fondazione risulti di tipo lapidea.

Al fine di una prima verifica della capacità portante del terreno di fondazione, sulla base della indagine geognostica effettuata, s'ipotizzerà per gli aerogeneratori, l'utilizzo di fondazioni superficiali di **tipo isolato** e per la stazione di smistamento fondazioni superficiali di **tipo continuo**, tutte incastrate necessariamente nel substrato.

8.1. - Calcolo della capacità portante per la pala eolica

S'ipotizzerà un plinto di fondazione delle dimensioni $B=L=15$ m, incastrato nel substrato (rif. Tabelle 5,6 e 7) per una profondità non inferiore $D=3$ m, Il piano di posa è considerato orizzontale; il peso di volume della fondazione è considerato pari a 0.0025 daN/cm³.

La torre eolica sarà interessata dal carico dovuto al peso proprio, dal peso proprio della fondazione, del terreno di copertura del basamento e dalle azioni imputate al vento in condizioni operative, dal vento in condizioni estreme. Allo stato attuale della progettazione, non si conoscono le azioni dovute al vento.

Sollecitazioni:

- p.p. della fondazione: 16875 kN;
- peso terr. di copertura per uno spessore di 0,50 m (S1 e S3): 2025 kN;
- peso terreno di copertura per uno spessore di 1,50 m (S2): 6075 kN;
- p.p. Torre+navicella (ipotizzato): 3069 kN;
- Mx (ipotizzato): 7800 kN m;
- My (ipotizzato): 65000kN m.

- sondaggio S1:

Il calcolo è stato eseguito considerando le seguenti condizioni di carico applicate alla fondazione, nel punto di coordinata $x=0$ cm, in corrispondenza alla sommità della fondazione:

Tabella 11

Nome	N _d [kN]	M _x [kN*m]	M _y [kN*m]
Cond. 1	-5094	7800	65000

Le sollecitazioni sono trasportate nel punto centrale del piano di posa, si somma peso proprio della fondazione (16875 kN). La tabella seguente riassume la condizione di carico e l'eventuale eccentricità e base ridotta.

Tabella 12

Nr.	Nome combinazione	N _d (kN)	M _x (kN·m)	M _y (kN)·m	e (cm)	B rid (cm)
1	A1+M1+R3	-21969	7800	65000	295,87	908,26
2	SLU (DM 11/03/1988)	-21969	7800	65000	295,87	908,26

La seguente tabella indica i coefficienti parziali dei parametri geotecnici del terreno:

Tabella 13

Nr	Correzione Sismica	Tangente angolo di resistenza al taglio	Coesione efficace	Peso Unità volume in fondazione	Peso unità volume copertura	Coef. Rid. Capacità portante verticale
1	No	1	1	1	1	2.3
2	No	1	1	1	1	3

Fattore [Nq]	198.0
Fattore [Nc]	169.85
Fattore [Ng]	199.0
Fattore forma [Sc]	1.0
Fattore forma [Sg]	0.8

$$q'_{limd} = 8559 \text{ kN/m}^2$$

$$Kr^1 = 34.91 \text{ daN/cm}^3$$

$$Q'_{limd} = (q'_{limd} \times B \times L) / 2.3 = 482513 \text{ kN (A1+M1+R3)}$$

$$Q'_{limd} = (q'_{limd} \times B \times L) / 3 = 369927 \text{ kN (SLU)}$$

$$N_d < Q'_{limd} \quad \text{verificato}$$

la pressione applicata in fondazione (su base ridotta) con le sollecitazioni sopra ipotizzate risulta essere: $q_n = 173 \text{ kN/m}^2$;

– **sondaggio S2:**

Il calcolo è stato eseguito considerando le seguenti condizioni di carico applicate alla fondazione, nel punto di coordinata $x = 0 \text{ cm}$, in corrispondenza alla sommità della fondazione:

¹ Il substrato roccioso è assimilato ad un deposito sabbioso molto addensato.

Tabella 14

Nome	N _d [kN]	M _x [kN*m]	M _y [kN*m]
Cond. 2	-9144	7800	65000

Le sollecitazioni sono trasportate nel punto centrale del piano di posa, si somma peso proprio della fondazione (16875 kN). La tabella seguente riassume la condizione di carico e l'eventuale eccentricità e base ridotta.

Tabella 15

Nr.	Nome combinazione	N _d (kN)	M _x (kN·m)	M _y (kN·m)	e (cm)	B rid (cm)
1	A1+M1+R3	-26019	7800	65000	249,82	1000,36
2	SLU (DM 11/03/1988)	-26019	7800	65000	249,82	1000,36

La seguente tabella indica i coefficienti parziali dei parametri getecnici del terreno:

Tabella 16

Nr	Correzione Sismica	Tangente angolo di resistenza al taglio	Coesione efficace	Peso Unità volume in fondazione	Peso unità volume copertura	Coef. Rid. Capacità portante verticale
1	No	1	1	1	1	2.3
2	No	1	1	1	1	3

Fattore [N _q]	198.0
Fattore [N _c]	169.85
Fattore [N _g]	199.0
Fattore forma [S _c]	1.0
Fattore forma [S _g]	0.8

$$q'_{limd} = 3077 \text{ kN/m}^2$$

$$Kr^2 = 12.07 \text{ daN/cm}^3$$

$$Q'_{limd} = (q'_{limd} \times B \times L) / 2.3 = 192647 \text{ kN (A1+M1+R3)}$$

$$Q'_{limd} = (q'_{limd} \times B \times L) / 3 = 147696 \text{ kN (SLU)}$$

$$N_d < Q'_{limd} \quad \text{verificato}$$

² Il substrato roccioso è assimilato ad un deposito sabbioso molto addensato.

la pressione applicata in fondazione (su base ridotta) con le sollecitazioni sopra ipotizzate risulta essere: $q_n = 180 \text{ kN/m}^2$;

– sondaggio S3:

Il calcolo è stato eseguito considerando le seguenti condizioni di carico applicate alla fondazione, nel punto di coordinata $x = 0 \text{ cm}$, in corrispondenza alla sommità della fondazione:

Tabella 17

Nome	N_d [kN]	M_x [kN*m]	M_y [kN*m]
Cond. 3	-5094	7800	65000

Le sollecitazioni sono trasportate nel punto centrale del piano di posa, si somma peso proprio della fondazione (16875 kN). La tabella seguente riassume la condizione di carico e l'eventuale eccentricità e base ridotta.

Tabella 18

Nr.	Nome combinazione	N_d (kN)	M_x (kN·m)	M_y (kN·m)	e (cm)	B rid (cm)
1	A1+M1+R3	-21969	7800	65000	295,87	908,26
2	SLU (DM 11/03/1988)	-21969	7800	65000	295,87	908,26

La seguente tabella indica i coefficienti parziali dei parametri getecnici del terreno:

Tabella 19

Nr	Correzione Sismica	Tangente angolo di resistenza al taglio	Coesione efficace	Peso Unità volume in fondazione	Peso unità volume copertura	Coef. Rid. Capacità portante verticale
1	No	1	1	1	1	2.3
2	No	1	1	1	1	3

HANSEN (1970) (Condizione drenata)

Fattore [Nq]	37.75
Fattore [Nc]	50.59
Fattore [Ng]	40.05
Fattore forma [Sc]	1.47
Fattore profondità [Dc]	1.13
Fattore inclinazione carichi [Ic]	1.0
Fattore inclinazione pendio [Gc]	1.0
Fattore inclinazione base [Bc]	1.0
Fattore forma [Sq]	1.46

Fattore profondità [Dq]	1.08
Fattore inclinazione carichi [Iq]	1.0
Fattore inclinazione pendio [Gq]	1.0
Fattore inclinazione base [Bq]	1.0
Fattore forma [Sg]	0.75
Fattore profondità [Dg]	1.0
Fattore inclinazione carichi [Ig]	1.0
Fattore inclinazione pendio [Gg]	1.0
Fattore inclinazione base [Bg]	1.0
Fattore correzione sismico inerziale [zq]	1.0
Fattore correzione sismico inerziale [zg]	1.0
Fattore correzione sismico inerziale [zc]	1.0

$$q'_{limd} = 6134.66 \text{ kN/m}^2$$

$$K_r^3 = 25.02 \text{ daN/cm}^3$$

$$Q'_{limd} = (q'_{limd} \times B \times L) / 2.3 = 345807 \text{ kN (A1+M1+R3)}$$

$$Q'_{limd} = (q'_{limd} \times B \times L) / 3 = 265119 \text{ kN (SLU)}$$

$$N_d < Q'_{limd} \quad \text{verificato}$$

la pressione applicata in fondazione (su base ridotta) con le sollecitazioni sopra ipotizzate risulta essere: $q_n = 173 \text{ kN/m}^2$;

8.2. - Calcolo della capacità portante per la Stazione di smistamento:

Per quanto riguarda il sistema fondale della sottostazione, il sondaggio S1 è attualmente quello di riferimento ed individua uno spessore del deposito terrigeno e del regolite complessivamente non superiore a 1,50 m che dovrà quindi essere necessariamente asportato. Con riferimento ai parametri geomeccanici ottenuti dal foro di sondaggio S1, viene valutata la capacità portante di una fondazione superficiale nastriforme su suolo omogeneo, di larghezza $B = 1,0 \text{ m}$ incastrata nel substrato calcareo dolomitico per la profondità di $D = 1,0 \text{ m}$. Il piano di posa è orizzontale, la fondazione è centrata alla coordinata $x = 0 \text{ [cm]}$. Il peso di volume della fondazione è pari a $0.0025 \text{ [daN/cm}^3]$. Il calcolo viene eseguito secondo il metodo di Terzaghi modificato da Zienkiewicz.

Fattore [Nq]	198.0
Fattore [Nc]	169.85
Fattore [Ng]	199.0
Fattore forma [Sc]	1.0

³ Il substrato roccioso è assimilato ad un deposito sabbioso molto addensato.

Fattore forma [Sg] 1.0

$$q'_{limd} = 1896.51 \text{ kN/m}^2$$

$$Kr^4 = 7.73 \text{ daN/cm}^3$$

$$Q'_{limd} = (q'_{limd} \times B \times L) / 2.3 = 824.5 \text{ kN (A1+M1+R3)}$$

$$Q'_{limd} = (q'_{limd} \times B \times L) / 3 = 632,2 \text{ kN (SLU)}$$

L'andamento delle tensioni nel sottosuolo, valutate al centro della fondazione della pala eolica, in funzione della profondità z , è stata stimata con il metodo di Boussinesq che considera il terreno come mezzo isotropo, omogeneo ed elastico con risposta di tipo lineare alle sollecitazioni e che propone per la soluzione della misura del campo tensionale indotto la seguente relazione:

$$\sigma = 3P / (2 \pi t^2) [1 / (1 + (r/t)^2)]$$

con:

σ = sovraccarico alla profondità t ;

P = sovraccarico centrato verticale applicato al terreno;

t = profondità considerata tra la base della fondazione ed il punto considerato;

r = distanza orizzontale tra la verticale del punto di applicazione del carico ed il punto considerato.

Se si considera il campo tensionale indotto dal sovraccarico nel terreno e lo si visualizza per mezzo di tracce indicanti superfici con uguali valori di sovraccarico, si ottengono rappresentazioni di campi equipotenziali (vd. fig. 1 e 2).

Al fine di una prima indicazione dei pali di fondazione da utilizzarsi per gli aerogeneratori T16 e T17, si può ipotizzare l'utilizzo di palo di grosso diametro (1000 mm) da incastrarsi direttamente sul substrato marnoso (con incastro da determinarsi), con armatura spiralata circolare e barre dritte.

9 – PREVISIONE DEI CEDIMENTI

Anche se la pressione esercitata sul terreno di fondazione non supera il valore calcolato, si possono, in alcuni casi, manifestare delle deformazioni del terreno non tollerabili dall'opera. Poiché le caratteristiche geotecniche del terreno variano da punto a punto, così come spesso variano da punto a punto anche le condizioni di carico, i cedimenti possono assumere localmente valori differenti. Il

⁴ Il substrato roccioso è assimilato ad un deposito sabbioso molto addensato.

cedimento calcolato in un punto prende il nome di cedimento assoluto; la differenza fra i cedimenti assoluti misurati in due o più punti prende il nome di cedimento differenziale. I procedimenti più utilizzati per il calcolo dei cedimenti nella pratica progettuale sono quelli che si avvalgono della teoria della elasticità. Secondo la teoria di Skempton, per terreni **omogenei**, può essere utilizzata la seguente formula:

$$W_s = q \times B \times (1 - \nu^2) / E \times I_w$$

con:

B = lato minore della fondazione;

E = modulo elastico del terreno;

ν = coeff. di Poisson;

I_w = coeff. D'influenza

Il cedimento assoluto a breve termine per fondazione rigida, allo spigolo, al centro e al bordo, per la dimensione della tipologia fondale a plinto ipotizzata, per le litologie riscontrate, calcolato per i differenti carichi applicati in fondazione, è riportato nella seguente tabella:

Tabella 15

Nr. combinazione	qn (kN/m ²)	S _{fond. Rig} (cm)	S _{centro} (cm)	S _{spigolo} (cm)
1	173	1,87	2,33	1,17
1	211	2,28	2,85	1,42
2	180	3,83	4,77	2,38
2	227	4,83	6,02	3,01
3	173	3,53	4,44	2,20
3	211	4,38	5,46	2,73

Tutte le equazioni per il calcolo della capacità portante si basano sul presupposto che il terreno di fondazione abbia un comportamento descrivibile dalla legge di Coulomb.

È inoltre importante nei confronti del cedimento, mettere in evidenza che la variazione del contenuto di umidità naturale del terreno è determinante per una riduzione dei parametri geotecnici dello stesso.

I dati ottenuti con lo studio riportato sono il risultato di una analisi puntuale, limitatamente ai punti direttamente indagati.

10 - CONCLUSIONI

I calcoli sopra esposti sono stati condotti sulla base del rilievo geotecnico eseguito che, per la maggior parte dei casi, in terreni conosciuti ed ampiamente studiati, può essere sufficiente per rappresentare una modellazione geotecnica preliminare, ma che non può in alcun modo garantire l'omogeneità delle litologie indagate.

L'esecuzione di una seconda campagna d'indagini (anno 2011) ha permesso di discrezionare il territorio in esame da n. 3 settori individuati con l'indagine preliminare del 2009 a n. 4 settori e precisamente:

- una morfologia di “piccolo rilievo” per il settore meridionale compreso tra la cava di monte Rosè e quella di Monte Alvaro, identificato dai fori di sondaggio **S1** (indagine 2009) ed **S4, S2 ed S1** (indagine 2011);
- una morfologia collinare per il settore orientale (loc. “Monte delle Case”) identificato dal foro di sondaggio **S3** (indagine 2009);
- il settore debolmente acclive e pianeggiante settentrionale, in località “Biunisi, identificato con il foro di sondaggio **S2** (indagine 2009);
- un quarto settore, pianeggiante, in loc. Margoneddu-Biunisi individuato con il foro di sondaggio **S3** (indagine 2011).

I calcoli geotecnici geomeccanici preliminari sono stati condotti su n. 3 fori di sondaggio eseguiti nella campagna d'indagine del 2009. Si rimanda alla fase definitiva esecutiva il completamento delle indagini e la verifica su ogni singola pala anche in condizioni sismiche.

Sassari, Aprile 2012

Il Professionista
(Dott. Geol. Domenico Praticò)



ELABORATI STRATIGRAFICI

Riferimento: CENTRALE PER LA PROD. DI ENERGIA ELETTRICA DA FONTE EOLICA	Sondaggio: S1
Località: Porto Torres	Quota:
Impresa esecutrice: ArchInGeo S.r.L.	Data: 19 Gennaio 2009
Coordinate:	Redattore: Dott. Geol. Domenico Praticò
Perforazione: Carotaggio continuo	

Ø mm	R v	A r	Pz s	metri batt.	LITOLOGIA	Campioni	RP	VT	Prel. % 0 --- 100	S.P.T.		RQD % 0 --- 100	prof. m	DESCRIZIONE
										S.P.T.	N			
				0	Terreno vegetale bruno in scheletro argilloso con ghiaie e ciottoli calcareo dolomitici.								0,5	
				1	Regolite.									1,5
				2	1) SDi < 2,00 2,30									
				3	2) SDi < 2,60 2,90									
				4										
				5	3) SDi < 5,00 5,30									
				6										6,1
				7	4) SDi < 6,50 7,00									
				8	5) SDi < 7,00 7,70									
				9	6) SDi < 7,70 8,00									
				10	7) SDi < 8,10 9,00									
				11	8) SDi < 9,00 9,60									
				12	9) SDi < 10,10 10,40									10,0
				13	Dolomie e calcari dolomitici giallastri fortemente fratturati con intercalati livelli calcarei grigio nerastri.									
				14	10) SDi < 12,50 12,80									
				15	11) SDi < 13,30 13,70									
				16	12) SDi < 14,50 15,00									14,3
				17	Calcarei grigi nerastri, fratturati.									
				18	13) SDi < 15,60 16,00									
				19	Dolomie e calcari dolomitici giallastri fratturati.									17,0
				20	14) SDi < 18,00 18,30									20,0

NOTE: non si sono verificati problemi di perforazione. Utilizzo di carotiere doppio e corone diamantate per tutta la lunghezza del foro di sondaggio.

Riferimento: CENTRALE PER LA PROD. DI ENERGIA ELETTRICA DA FONTE EOLICA	Sondaggio: S2
Località: Porto Torres	Quota:
Impresa esecutrice: ArchInGeo S.r.L.	Data: 28 Gennaio 2009
Coordinate:	Redattore: Dott. Geol. Domenico Praticò

Ø mm	R v	A r	S s	Pz	metri batt.	LITOLOGIA	Campioni	RP	VT	Prel. % 0 --- 100	S.P.T.		RQD % 0 --- 100	prof. m	DESCRIZIONE
											S.P.T.	N			
					1	Terreno vegetale bruno in scheletro argilloso con ghiaie e ciottoli calcareo dolomitici.								1.5	
					2	Calcarei dolomitici giallastri fortemente fratturati (attribuibile alla stratificazione) con interposti livelli argillosi decimetrici color ocra.									
					3	Argille color ocra, semisolide.									
					4	Calcarei dolomitici giallastri fortemente fratturati (attribuibile alla stratificazione) con interposti livelli argillosi decimetrici color ocra.	1) Dis < 3,50 3,75								
					5										
					6										
					7										
					8	Argille color ocra, semisolide.	2) Dis < 8,50 3) Dis < 8,70 9,00								
					9										
					10	Calcarei dolomitici giallastri fratturati (attribuibile alla stratificazione) con interposti livelli argillosi decimetrici color ocra.									
					11										
					12										
					13										
					14										
					15										
					16										
					17										
					18										
					19										
					20										

NOTE: Problematiche nel campionamento dei livelli argillosi di spessore centimetrico e decimetrico intercalati nel substrato, dilavati con l'utilizzo di acqua per la perforazione. Utilizzo di carotiere doppio e corone diamantate per tutta la lunghezza del foro di sondaggio; i depositi argillosi sono stati campionati con l'utilizzo di carotiere semplice.

STRATIGRAFIA - S3

SCALA 1 : 100

Pagina 1/1

Riferimento: CENTRALE PER LA PROD. DI ENERGIA ELETTRICA DA FONTE EOLICA	Sondaggio: S3
Località: Porto Torres	Quota:
Impresa esecutrice: ArchInGeo S.r.L.	Data: 30 Gennaio 2009
Coordinate:	Redattore: Dott. Geol. Domenico Praticò
Perforazione: Carotaggio continuo	

Ø mm	R v	A r	Pz	metri batt.	LITOLOGIA	Campioni	RP	VT	Prel. % 0 --- 100	S.P.T.		RQD % 0 --- 100	prof. m	DESCRIZIONE
										S.P.T.	N			
				0									0.7	Terreno vegetale bruno in scheletro argilloso con ghiaie e ciottoli calcareo dolomitici.
				1										Conglomerato costituito da calcari dolomitici giallastri a spigoli vivi, talora di dimensioni superiori ai 10 cm, in matrice argillo sabbiosa, fortemente addensato oltre la profondità di 6.50 m da p.c.
				2										
				3										
				4										
				5										
				6										
				7	1) SDi <	6,60 6,80								
				8										
				9	2) SDi <	8,40 8,70								
				10										
				11	3) SDi <	9,30 9,60								
				12										
				13	4) SDi <	13,30 13,70								
				14										
				15										
				16										
				17										
				18	5) SDi <	18,45 18,70								
				19	6) SDi <	18,70 19,00								
				20									20.0	

NOTE: Problematiche nel campionamento dei livelli argillosi fino alla profondità di 6,50 m dal p.c. Successivamente si è perforato con una spinta di 60 bar con l'utilizzo di carotiere doppio e corone diamantate per tutta la lunghezza del foro di sondaggio.

Riferimento: CENTRALE EOLICA DI PORTO TORRES	Sondaggio: S1
Località: Porto Torres	Quota:
Impresa esecutrice: ArchInGeo S.r.L.	Data: 31 Marzo 2011
Coordinate:	Redattore: Dott. Geol. Domenico Praticò
Perforazione: Carotaggio continuo	

Ø mm	R v	A r	Pz	metri batt.	LITOLOGIA	Campioni	RP	VT	Prel. % 0 --- 100	S.P.T.		RQD % 0 --- 100	prof. m	DESCRIZIONE
										S.P.T.	N			
					Terreno vegetale								0.5	Terreno vegetale bruno in scheletro argilloso con ghiaie e ciottoli calcarei.
				1	Regolite eterometrico									Regolite eterometrico, prodotto di disgregazione della roccia madre.
				2	Calcari dolomitici giallastri								2.0	Calcari debolmente dolomitici giallastri, caratterizzati da mineralizzazioni di calcite a formare delle venature a riempimento delle diaclasi, fortemente fratturati ed alterati con inclusioni argillose (parzialmente dilavate dall'azione della perforatrice), fino alla profondità di circa 6,50 m dal p.c.,
				3										
				4										
				5		1) SDi < 5,00 5,30								
				6										
				7		2) SDi < 7,00 7,30								
				8		3) SDi < 7,70 7,90								
				9		4) SDi < 8,30 8,50								
				10										
				11										
				12										
				13										
				14		5) SDi < 13,60 6) SDi < 13,80 14,00								
				15		7) SDi < 14,70 15,00								
				16										
				17		8) SDi < 16,50 17,00								
				18									17.3	Calcere giallastro fortemente alterato, facilmente disgregabile con la semplice azione della mano, con inclusioni argillose plastiche giallastre.
				19		9) SDi < 18,40 19,00							18.3	Calcere bianco grigio, tenace, poco fratturato.
													19.5	

NOTE: non si sono verificati problemi di perforazione. Utilizzo di carotiere semplice e doppio alternati e corone diamantate per tutta la lunghezza del foro di sondaggio.

Riferimento: CENTRALE EOLICA DI PORTO TORRES	Sondaggio: S2
Località: Porto Torres	Quota:
Impresa esecutrice: ArchInGeo S.r.L.	Data: 04 Aprile 2011
Coordinate:	Redattore: Dott. Geol. Domenico Praticò
Perforazione: Carotaggio continuo	

Ø mm	R v	A r	S	Pz	metri batt.	LITOLOGIA	Campioni	RP	VT	Prel. % 0 --- 100	S.P.T.		RQD % 0 --- 100	prof. m	DESCRIZIONE	
											S.P.T.	N				
					1	Terreno vegetale bruno in scheletro argilloso con ghiaie e ciottoli calcarei.								1.4		
					2	Calcare bianco grigio, fratturato ma tenace.										
					3	1) SDi < 2,80 2) SDi < 3,00 3) SDi < 3,50								2.5	Calcare grigio, con mineralizzazioni di calcite a riempimento delle diaclasi, fratturato ma tenace; inclusioni argillose alla prof. compresa tra 4,50-4,80 m dal p.c. e 6,50-6,60 m dal p.c.	
					4	4) SDi < 4,00 5) SDi < 4,50										
					5	5) SDi < 5,20 6) SDi < 5,90										
					6	6) SDi < 6,60 7) SDi < 7,00									6.6	Calcare marnoso grigio scuro, tenero, poco fratturato, con intercalate lenti carboniose di spessore millimetrico con fissilità sviluppata lungo i piani di strato.
					7	7) SDi < 7,10 8) SDi < 7,50										
					8	8) SDi < 8,05 9) SDi < 8,40										
					9	9) SDi < 9,50 10) SDi < 10,00										
					10	10) SDi < 10,10 11) SDi < 10,60									11.3	Calcare giallo ocra, fratturato ma tenace, cariato, debolmente alterato lungo le diaclasi; presenza di mineralizzazioni di calcite.
					11	11) SDi < 11,70 12) SDi < 12,00										
					12	12) SDi < 12,10 13) SDi < 12,50										
					13	13) SDi < 14,10 14) SDi < 14,60										
					14	14) SDi < 15,00 15) SDi < 15,35										
					15	15) SDi < 17,45 16) SDi < 17,70										
					16	16) SDi < 19,50 17) SDi < 19,70										
					17	17) SDi < 19,50 18) SDi < 19,70										
					18	18) SDi < 19,50 19) SDi < 19,70										
					19	19) SDi < 19,50 20) SDi < 19,70									20.0	

NOTE: non si sono verificati problemi di perforazione. Utilizzo di carotiere doppio e corona diamantata per tutta la lunghezza del foro di sondaggio.

Riferimento: CENTRALE EOLICA DI PORTO TORRES	Sondaggio: S3
Località: Porto Torres	Quota:
Impresa esecutrice: ArchInGeo S.r.L.	Data: 05 Aprile 2011
Coordinate:	Redattore: Dott. Geol. Domenico Praticò
Perforazione: Carotaggio continuo	

Ø mm	R v	A r	S	Pz	metri batt.	LITOLOGIA	Campioni	RP	VT	Prel. % 0 --- 100	S.P.T.		RQD % 0 --- 100	prof. m	DESCRIZIONE
											S.P.T.	N			
					1	Terreno vegetale bruno in scheletro argilloso con ghiaie e ciottoli calcarei.								0,8	
					2	Argille sabbiose marroni, plastiche, con intercalati livelli centimetrici prettamente sabbiosi.									
					3	1) SDi < 3,00 3,30									
					4										
					5	Livello argillo clastico, con ghiaie e ciottoli calcarei.									4,5
					6	2) SDi < 6,30 6,60									5,5
					7	Sabbie argillose marroni, mediamente addensate, con granuli di quarzo.									7,0
					8	Livello clastico in matrice argillosa.									7,3
					9	3) SDi < 7,70 8,00									8,0
					10	Sabbie argillose verdastre, addensate.									8,0
					11	Livello clastico ghiaioso in matrice argillosa.									9,0
					12	Sabbie limose argillose, con granuli di quarzo.									10,0
					13	4) SDi < 10,50 10,70									10,8
					14	Sabbie argillose, addensate, marroni.									11,8
					15	Sabbie debolmente limose, con presenza di gessi.									11,8
					16	Livello clastico ciottoloso in matrice argillosa (dilavato dall'azione della perforatrice).									12,5
					17	Marne gessifere e argilliti gessifere, tenere, con fissilità ad alto angolo lungo i piani di strato.									12,5
					18	5) SDi < 14,20 14,50									14,20
					19	6) SDi < 15,50 15,80									15,50
					20	7) SDi < 17,30 18,00									17,30
					21	8) SDi < 18,30 18,90									18,30
					22	9) SDi < 19,10 19,60									19,10
					23										20,0

NOTE: non si sono verificati problemi di perforazione. Utilizzo di carotiere doppio e corona al widia e diamantata per tutta la lunghezza del foro di sondaggio.

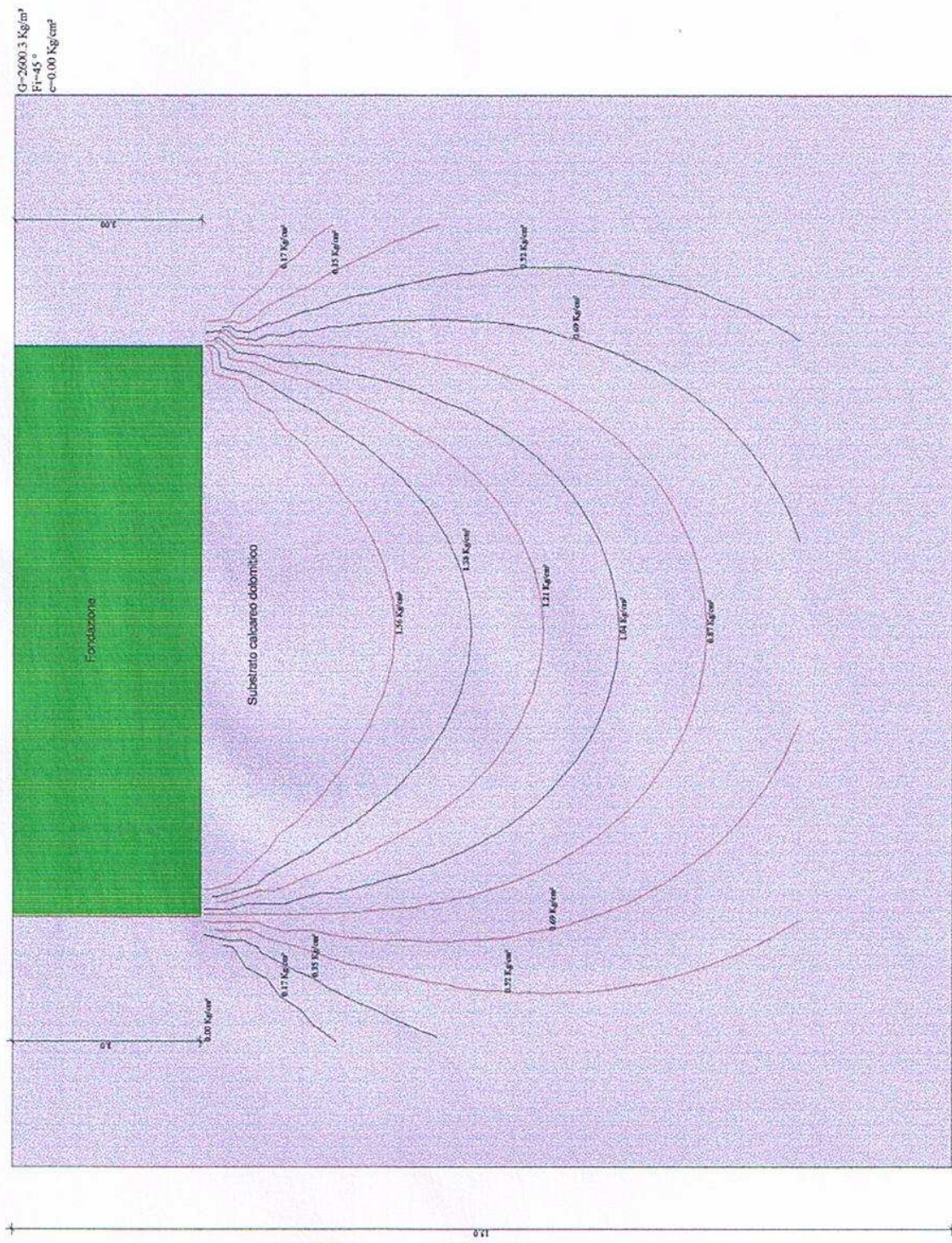
Riferimento: CENTRALE EOLICA DI PORTO TORRES	Sondaggio: S4
Località: Porto Torres	Quota:
Impresa esecutrice: ArchInGeo S.r.L.	Data: 07 Aprile 2011
Coordinate:	Redattore: Dott. Geol. Domenico Praticò
Perforazione: Carotaggio continuo	

Ø mm	R v	A r	S	Pz	metri batt.	LITOLOGIA	Campioni	RP	VT	Prel. % 0 --- 100	S.P.T.		RQD % 0 --- 100	prof. m	DESCRIZIONE
											S.P.T.	N			
														0.3	Terreno di riporto della sede stradale.
					1									0.9	Regolite eterometrico, prodotto di disgregazione della roccia madre.
					2									2.2	Calcare giallastro debolmente dolomitico, fratturato ma tenace.
					3		1) SDi < 3,30 4,00							3.3	Calcare giallastro fortemente alterato, facilmente disgregabile con la semplice azione della mano, con inclusioni argillose giallastre, plastiche.
					4										Calcare giallastro, fratturato ma tenace; inclusione argillosa alla prof. compresa tra 7,90-8,10 m dal p.c.).
					5		2) SDi < 5,00 5,50								
					6		3) SDi < 5,50 5,70								
					7										
					8									8,1	Calcare grigio debolmente marnoso, con intercalate lenti carboniose di spessore millimetrico con fissilità circa sub orizzontale, alternati a calcari gialli caratterizzati da mineralizzazioni di calcite, fratturati, tenaci.
					9		4) SDi < 8,50 9,00								
					10										
					11		5) SDi < 10,50 10,80								
					12										
					13										
					14		6) SDi < 14,00 14,30								
					15		7) SDi < 15,30 15,60								
					16										
					17										
					18		8) SDi < 18,00 18,45								
					19										
					20									20,0	

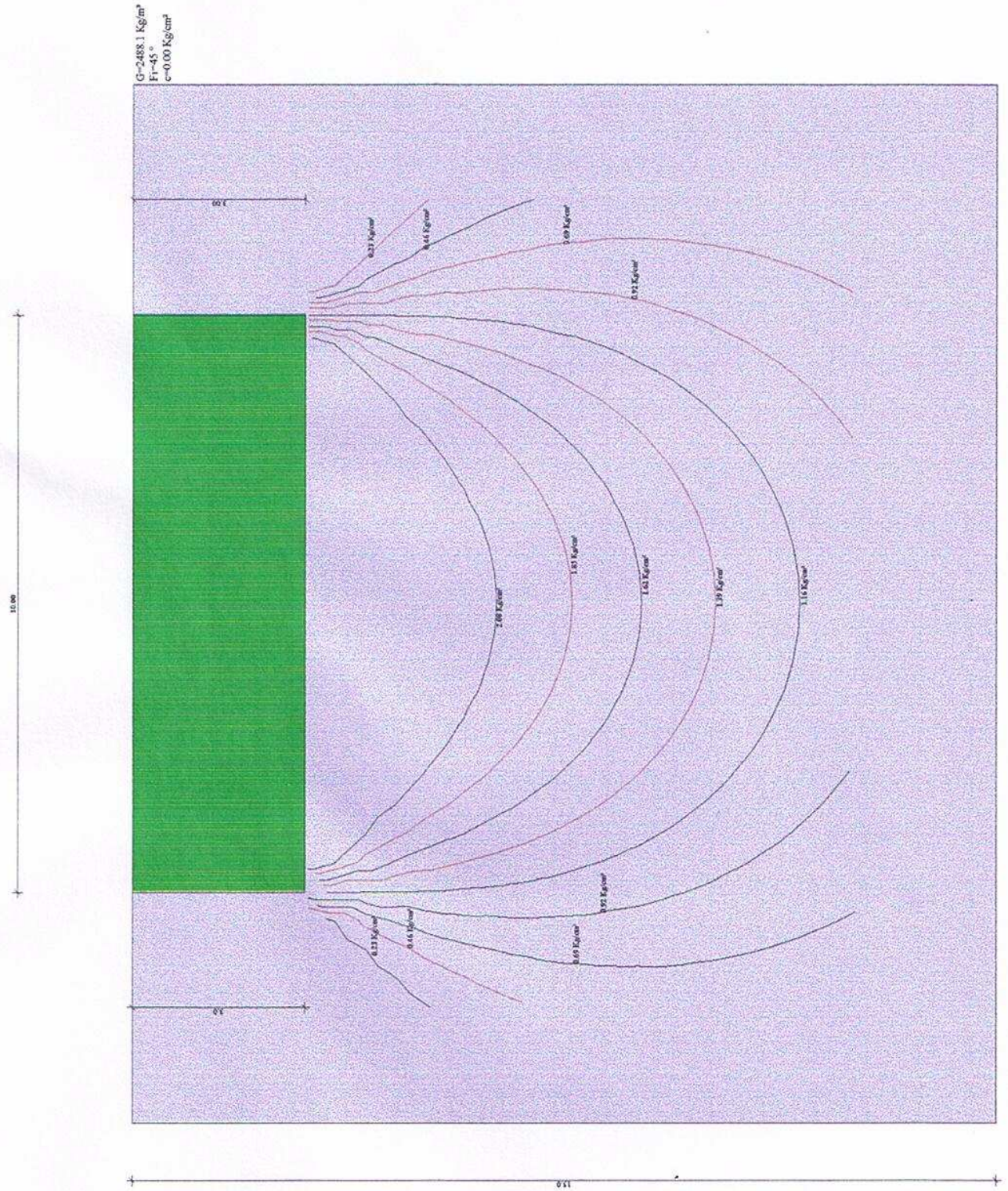
NOTE: non si sono verificati problemi di perforazione. Utilizzo di carotiere doppio e corona diamantata per tutta la lunghezza del foro di sondaggio.

**SCHEMA DELLE DISTRIBUZIONI DELLE TENSIONI
NEL SOTTOSUOLO**

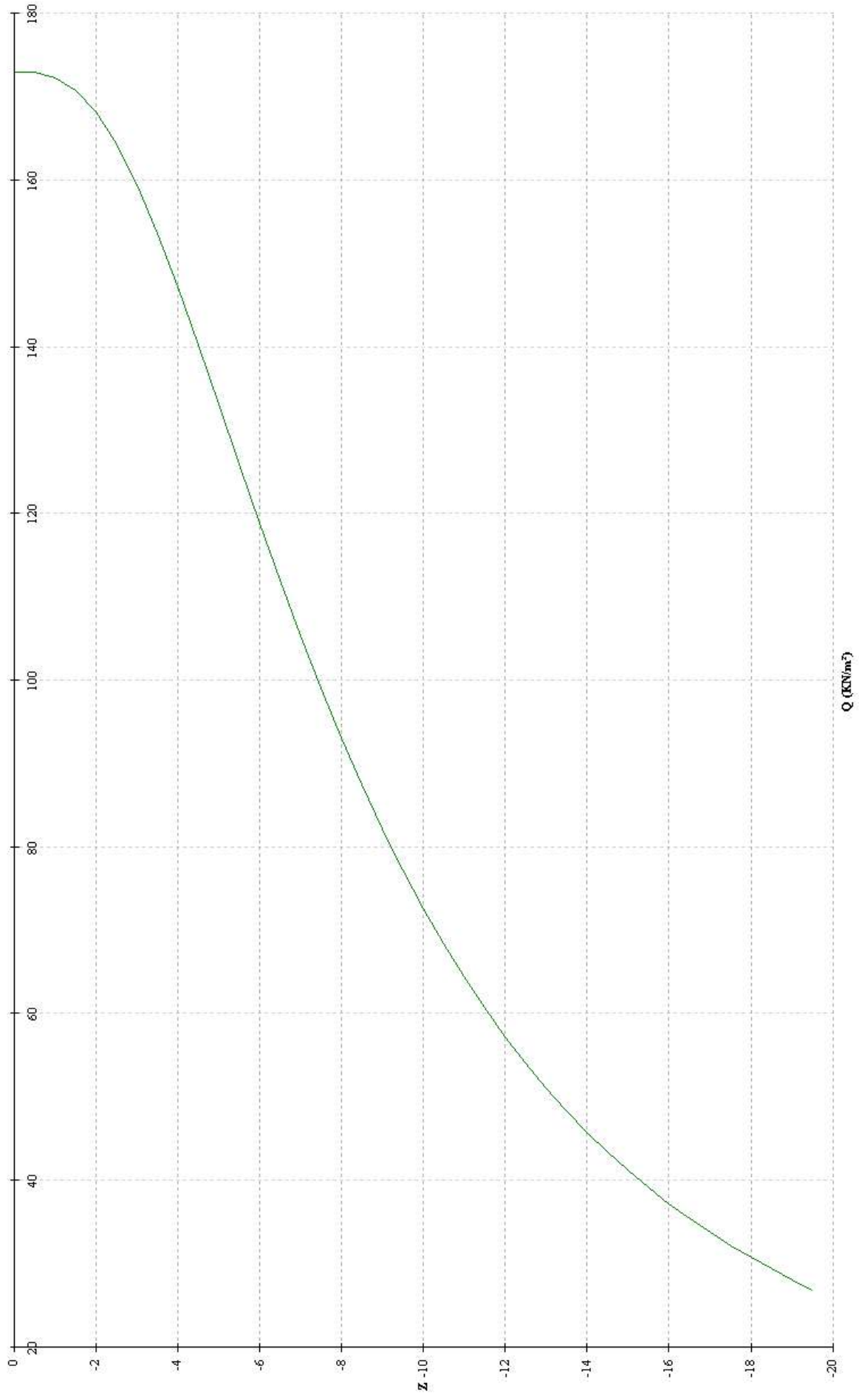
Distribuzione delle tensioni nel sottosuolo (metodo di Boussinesq) – Ipotesi di calcolo foro di sondaggio S1



Distribuzione delle tensioni nel sottosuolo (metodo di Boussinesq) – Ipotesi di calcolo foro di sondaggio S2



Tensioni nel terreno Boussinesq Pressione normale di progetto=173 kPa



Tensioni nel terreno Boussinesq Pressione normale di progetto=180 kPa

