



CODE

SCS.DES.R.CIV.ITA.W.5631.025.00

PAGE

1 di/of 33

AVAILABLE LANGUAGE: IT

**IMPIANTO EOLICO COPERTINO**  
**COMUNI DI**  
**COPERTINO-CARMIANO-LEVERANO (LE)**  
  
**RELAZIONE GEOTECNICA E INDICAZIONI**  
**PRELIMINARI SULLE STRUTTURE DI**  
**FONDAZIONE**

File name: SCS.DES.R.CIV.ITA.W.5631.025.00\_Relazione geotecnica e indicazioni preliminari sulle strutture di  
fondazione.docx

<b>00</b>	<b>08/05/2023</b>	<b>EMISSIONE</b>	<b>SCS INGEGNERIA</b>	<b>SCS INGEGNERIA</b>	<b>SCS INGEGNERIA</b>
			<b>A. Calò</b>	<b>F. de Castro</b>	<b>A.Sergi</b>
<b>REV</b>	<b>DATE</b>	<b>DESCRIPTION</b>	<b>PREPARED</b>	<b>VERIFIED</b>	<b>APPROVED</b>
<b>IMPIANTO / Plant</b>		<b>CODE</b>			
<b>IMPIANTO EOLICO COPERTINO</b>		<b>GROUP</b>	<b>FUNCION</b>	<b>TYPE</b>	<b>DISCIPLINE</b>
		<b>SCS</b>	<b>DES</b>	<b>R</b>	<b>C I V I T A W</b>
					<b>5 6 3 1 0 2 5 0 0</b>
<b>CLASSIFICATION:</b>			<b>UTILIZATION SCOPE : PROGETTO DEFINITIVO</b>		

**INDICE**

1	PREMESSA .....	5
2	NORME DI RIFERIMENTO .....	6
3	CRITERI DI CALCOLO .....	6
4	INQUADRAMENTO GEOGRAFICO .....	6
5	CONTESTO GEOLOGICO DI RIFERIMENTO .....	7
5.1	CARATTERI GEOLOGICI e stratigrafici LOCALI.....	8
6	INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO.....	12
7	INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE .....	13
8	MODELLO GEOLOGICO E GEOTECNICO .....	16
9	CRITERI DI VERIFICA .....	22
9.1	MODELLAZIONE .....	22
9.2	VERIFICHE ESEGUITE .....	22
9.3	APPROCCI DI PROGETTO E COMBINAZIONI DI CARICO .....	23
9.4	ANALISI DEI CARICHI.....	24
9.4.1	AZIONI DERIVANTI DALLA SOVRASTRUTTURA .....	24
10	FONDAZIONE DIRETTA .....	26
10.1	PESO PROPRIO DELLA FONDAZIONE .....	27
10.2	PESO PROPRIO DEL RIEMPIMENTO.....	27
10.3	RIEPILOGO CONDIZIONI DI CARICO .....	27
10.4	VERIFICHE GEOTECNICHE.....	27
10.4.1	COMBINAZIONI DI CARICO E FATTORI DI SICUREZZA .....	27
10.4.2	GAPPING .....	28
10.4.3	RIBALTAMENTO .....	29
10.4.4	CARICO LIMITE .....	29
10.4.5	SLITTAMENTO .....	30
10.4.6	VALUTAZIONE MODULO DI REAZIONE (WINKLER) .....	31
10.4.7	VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI.....	32
10.4.8	VALUTAZIONE DELLA RIGIDEZZA ROTAZIONALE DINAMICA .....	33

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 4.1: Localizzazione dell'area di impianto nel contesto nazionale .....	6
Figura 4.2: Localizzazione dell'impianto a livello regionale .....	7
Figura 4.3: Individuazione su ortofoto dell'impianto in progetto .....	7
Figura 5.1: Carta tettonica della Penisola Salentina .....	8
Figura 5.2: Estratto della carta geologica di Tavola 2 con indicazione delle litologie affioranti.....	12
Figura 7.1: Ubicazione indagini geofisiche area 1 .....	13
Figura 7.2: Ubicazione indagini geofisiche area 2 (figura sopra), area 3 (figura sotto).....	14
Figura 8.1: Modello geologico-geotecnico di riferimento .....	18
Figura 9.1: Simboli e segni adottati nelle successive tabelle fornite dal fabbricante degli aerogeneratori .....	25
Figura 9.2: Simbologia adottata nell'analisi dei carichi e nelle verifiche .....	26
Figura 10.1: Geometria della fondazione diretta dell'aerogeneratore.....	26

## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1-1: Coordinate aerogeneratori e relativa ubicazione catastale .....	5
Tabella 9-1.....	23
Tabella 9-2.....	23
Tabella 9-3: Possibili valori dei coefficienti parziali delle azioni adottati nel presente progetto .....	24
Tabella 9-4: Coefficienti parziali delle azioni utilizzati ai fini del presente progetto .....	24
Tabella 9-5: Scarichi in fondazione secondo [5] - Condizioni di carico estreme (N, A, T) .....	25
Tabella 9-6: Scarichi in fondazione secondo [5] - Condizione di carico caratteristica .....	25
Tabella 10-1: Geometria del plinto .....	27
Tabella 10-2: Carico del riempimento .....	27
Tabella 10-3: Riepilogo delle condizioni di carico secondo la convenzione di cui alla Figura 9.1 .....	27
Tabella 10-4: Riepilogo delle verifiche geotecniche e globali e relativi coefficienti di sicurezza (F.S.) .....	28
Tabella 10-5: Analisi scarichi in fondazione ad estradosso e intradosso plinto .....	28
Tabella 10-6: Coefficienti parziali e verifica di Gapping .....	29
Tabella 10-7: Coefficienti di combinazione per la verifica a ribaltamento .....	29
Tabella 10-8: Verifica a ribaltamento .....	29
Tabella 10-9: Analisi scarichi in fondazione .....	29
Tabella 10-10: Verifica a carico limite in condizioni drenate - Per tutte le combinazioni .....	30
Tabella 10-11: Analisi scarichi in fondazione.....	30
Tabella 10-12: Verifica a slittamento - Combinazione Normal SLU2.....	30
Tabella 10-13: Verifica a slittamento - Combinazione Abnormal SLU2 .....	31
Tabella 10-14: Valutazione della costante di Winkler .....	31
Tabella 10-15: Valutazione del cedimento massimo differenziale (rotazione) in combinazione SLE rara .....	32

## 1 PREMESSA

Oggetto della presente relazione è il calcolo preliminare delle opere di fondazione degli aerogeneratori del proposto parco eolico denominato "Copertino".

L'area di progetto, oggetto di indagine, comprende n. 8 aerogeneratori (nel seguito WTG) e ricade nell'ambito del territorio comunale di Copertino, Carmiano e Leverano.

Gli aerogeneratori verranno opportunamente disposti nell'area di interesse e installati su torri tubolari di altezza al mozzo pari a 82 m. In aggiunta, la potenza nominale delle turbine previste nel nuovo impianto di Copertino sarà pari a massimo 4,5 MW.

Ai soli fini della determinazione della geometria delle opere di fondazione, è stato considerato un aerogeneratore tipo Vestas V136. Il tipo e la taglia esatta dell'aerogeneratore saranno comunque individuati in fase di acquisto della macchina e verranno descritti in dettaglio in fase di progettazione esecutiva.

Gli aerogeneratori, sono localizzati nel Catasto Terreni dei Comuni di Copertino, Carmiano e Leverano, come riportato in Tabella 1-1.

SISTEMA DI RIFERIMENTO UTM WGS 84 - FUSO 34N			RIFERIMENTI CATASTALI		
Posizioni Aerogeneratori					
WTG	EST [m]	NORD [m]	COMUNE	FG	P.LLA
A1	246859,65	4467827,49	CARMIANO	27	263
A2	247410,55	4467093,61	COPERTINO	2	73 41
A3	246206,32	4466790,49	LEVERANO	13	45
A4	248068,30	4466378,01	COPERTINO	7	45
A5	247518,72	4465797,47	COPERTINO	6	325 326
A6	248030,58	4465567,96	COPERTINO	6	262 366
A7	248483,97	4465284,86	COPERTINO	7	157
A8	247718,67	4465003,81	COPERTINO	10	12 14

**Tabella 1-1: Coordinate aerogeneratori e relativa ubicazione catastale**

## 2 NORME DI RIFERIMENTO

[1] DM 17/01/2018 - Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»

[2] Circ. 21 gennaio 2019, n. 7/C.S.LL.PP.

[3] Eurocodice 2 - "Progettazione delle strutture in calcestruzzo. 1-1: Regole generali e regole per gli edifici"

[4] Eurocodice 7 - "Progettazione geotecnica. Parte 1 - Regole generali"

[5] CEI EN 61400-1

## 3 CRITERI DI CALCOLO

Le analisi sono state condotte per mezzo di un foglio di calcolo e sono quelle previste dalla normativa citata.

## 4 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

L'intervento, nella sua totalità, si localizza nel territorio comunale di Copertino, Carmiano e Leverano, per quanto concerne gli aerogeneratori, mentre le relative opere di connessione ricadono nei territori comunali di Copertino, Carmiano, Leverano e Nardò, tutti Comuni appartenenti alla Provincia di Lecce. Tutti gli interventi progettuali ricadono in zone agricole.

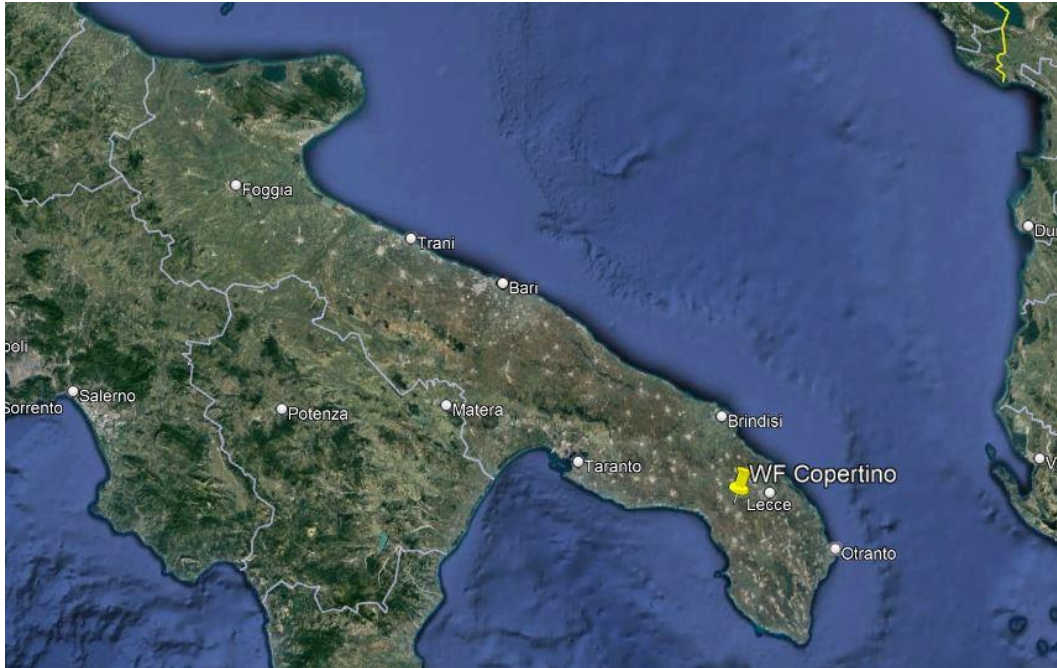
Per quanto concerne le quote topografiche, variano da un massimo di circa 50 m s.l.m. ad un minimo di circa 30 m s.l.m.. In generale l'area si presenta pianeggiante; non si rilevano salti e accidenti morfologici degni di nota.

L'area interessata dal progetto impegna la zona agricola nell'intorno delle strade provinciali SP 117, SP 119 e SP 124, che collegano rispettivamente i comuni di Leverano e Carmiano, Leverano e Arnesano, Carmiano e Copertino.

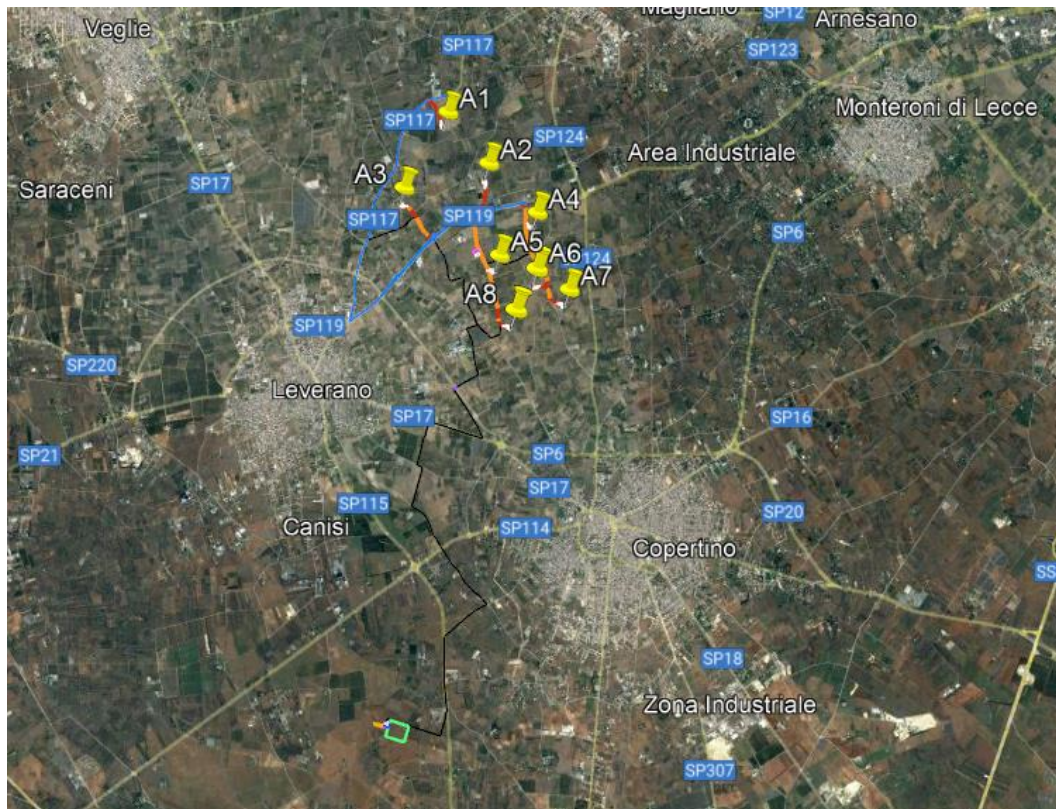


**Figura 4.1: Localizzazione dell'area di impianto nel contesto nazionale**





**Figura 4.2: Localizzazione dell'impianto a livello regionale**



**Figura 4.3: Individuazione su ortofoto dell'impianto in progetto**

## 5 CONTESTO GEOLOGICO DI RIFERIMENTO

Il Salento leccese è il settore emerso più meridionale dell'avampese apulo ed è costituito da un potente substrato carbonatico, rappresentato dalla successione calcareo-dolomitica mesozoica della Piattaforma Apula ricoperta discontinuamente da diverse unità carbonatiche neogeniche. Su questo



substrato poggiano estese ma sottili coperture marine prevalentemente terrigene (sabbie, limi ed argille) riferibili al Pleistocene medio – superiore.

Da un punto di vista strutturale la parte leccese della penisola è caratterizzata dalla presenza di basse dorsali, allungate in direzione NW-SE o NNW-SSE, corrispondenti ad "alti" morfostrutturali dove affiorano le rocce più antiche, che delimitano strette depressioni tettoniche e morfologiche dove invece affiorano le unità più recenti.

Il territorio ricade proprio in una di queste depressioni tettoniche; essa ha una scarsa evidenza morfologica ed altimetrica ma è chiaramente riconoscibile sotto l'aspetto tettonico per la presenza di due alti strutturali e di una zona centrale corrispondente ad un basso strutturale, contraddistinta dall'affioramento di unità molto recenti (del Pleistocene inferiore e medio). In ragione di questo particolare assetto la serie geologica affiorante nei limiti del territorio comunale è rappresentata da distinte unità ascrivibili globalmente ad un intervallo temporale compreso tra il Cretaceo superiore ed il Pleistocene medio durante il qual si sono succedute distinte fasi di sedimentazione e tettoniche.



**Figura 5.1: Carta tettonica della Penisola Salentina**

**5.1 CARATTERI GEOLOGICI E STRATIGRAFICI LOCALI**

Per la definizione dello scenario territoriale di riferimento, alla scala del progetto in epigrafe, è stato effettuato un rilievo geologico e strutturale all'intorno dell'area di intervento.

La geologia del territorio dell'area del parco eolico, è caratterizzata da un potente basamento carbonatico cretaceo (riferibile al "Calcare di Altamura") sovrastato, in trasgressione, dai termini



miocenici della Pietra leccese e/o della sequenza sedimentaria marina plio-pleistocenica della "Fossa Bradanica" (Calcarenite di Gravina e Argille subappennine) su cui, durante le fasi di ritiro del mare presso le attuali linee di costa, si sono accumulati, ai vari livelli, depositi terrazzati marini e/o, depositi continentali.

Dalla più antica alla più recente le unità che si rinvengono in affioramento od anche solo nel sottosuolo sono rappresentate da:

#### DEPOSITI MARINI

- "Calcarea di Altamura" (Cretaceo superiore)
- "Pietra leccese" (Miocene medio - superiore)
- "Calcarenite di Gravina" (Pleistocene inferiore)
- "Argille subappennine" (Pleistocene inf.)
- "Depositoli Marini Terrazzati" - DMT (Pleistocene medio - sup.)

#### DEPOSITI CONTINENTALI

- "Depositoli colluviali ed eluviali" - (Olocene)

Le aree di affioramento di queste unità litostratigrafiche sono state perimetrare in Tav. 2 - Carta geologica e geomorfologica.

#### **Depositoli Marini Terrazzati**

L'unità pleistocenica dei Depositoli di Terrazzo è litologicamente costituita da calcareniti giallastre a grana grossa ben cementate con intercalati livelli sabbiosi ed altri costituiti da calcari organogeni in strati di spessore variabile da qualche centimetro a 10÷15 cm; a luoghi, nell'ambito della successione, in particolare nel tratto basale della stessa, a diretto contatto con le Argille Subappennine, sono presenti strati decimetrici di calcari molto compatti e tenaci.

La facies sabbiosa è costituita da prevalenti granelli di quarzo, feldspati, materiale carbonatico di origine detritica e bioclastica nonché da subordinati cristalli di mica. I fossili rappresentati da prevalenti lamellibranchi ed alghe, sono frequenti tanto da costituire a luoghi vere lumachelle; le osservazioni al microscopio hanno messo in evidenza che sono frequenti anche i microrganismi rappresentati da foraminiferi. Da quanto sopra esposto se ne deduce che, dal punto di vista granulometrico, per quanto riguarda la facies sabbiosa, i contenuti in ghiaia (0%÷28%), in sabbia (3%÷84%) e limo (2%÷75%) sono estremamente variabili in funzione degli intervalli stratigrafici presi in considerazione.

Il contenuto naturale d'acqua oscilla intorno ad un valore medio del 20,79% con indice dei vuoti variabile e compreso tra 0,49 e 0,87.

Per quanto riguarda l'estensione areale di questa unità si può supporre che sia totale per tutta l'area oggetto di studio. Il passaggio alle sottostanti Argille subappennine può avvenire in maniera diretta o tramite dei termini di passaggio rappresentati da sabbie e limi sabbiosi che si descrivono nel successivo paragrafo.

I Depositoli Marini Terrazzati (DMT), costituiscono il sedime di fondazione della totalità dell'area del parco eolico.

#### **Argille Subappennine**

La formazione infrapleistocenica che si descrive è caratterizzata da argille e argille sabbiose grigio

azzurre, fossilifere. Dal punto di vista granulometrico, questi depositi possono essere definiti come limi sabbiosi con argilla; ciò nonostante notevoli sono le variazioni relativamente alla dimensione dei granuli. La percentuale in sabbia varia dal 2% al 55%, quella in limo dal 11%; il contenuto medio in carbonati è del 31%, valore quest'ultimo che tende ad aumentare man mano che ci si avvicina alle sottostanti Calcareniti di Gravina. All'interno della successione, il cui spessore è di difficile valutazione ma sempre perlomeno decametrico, si possono individuare livelli sabbiosi, anch'essi di colore grigio azzurro, la cui estensione laterale e verticale non è ben definibile. Il passaggio stratigrafico con le sottostanti Calcareniti di Gravina avviene mediante un livello continuo sabbioso limoso particolarmente ricco in fossili. Il contenuto naturale d'acqua varia passando da un valore minimo del 14,05% al 43,5% ed il grado di saturazione è anch'esso estremamente variabile passando dal 71,84% al valore limite pari al 100%.

Le analisi geotecniche di laboratorio, eseguite sui campioni indisturbati prelevati in corrispondenza dello strato argilloso, indicano una bassa permeabilità, che si attesta intorno a valori compresi tra 10-10 e 10-11 m/s (media 1,81E -10 m/s).

Localmente, tale formazione non è stata rilevata in affioramento.

### **Calcareniti di Gravina**

L'unità della Calcarenite di Gravina rappresenta la più antica delle unità pleistoceniche presenti nell'area. La formazione, caratterizzata da calcareniti a grana grossa di colore giallastro e ben diagenizzata, con frequenti macro e microfossili (foraminiferi bentonici, briozoi, lamellibranchi, gasteropodi, echinodermi, alghe calcaree e serpulidi), poggia con contatto discontinuo e discordante sul basamento carbonatico cretaceo.

Dal punto di vista chimico questi depositi sono costituiti da calcite normale con un basso contenuto in magnesio. Costituenti minori sono la kaolinite, l'illite, la clorite, la smectite, la gibsite e la goethite che si trovano dispersi nel sedimento mentre quarzo e feldspati si rinvencono come singoli grani. La matrice micritica è più o meno completamente assente.

Lo spessore di questa formazione è molto variabile e raggiunge valori massimi superiori alla trentina di metri. Il grado di porosità è variabile tra il 42,90% ed il 49,40%.

Le calcareniti di Gravina affiorano in lembi di limitate estensioni nell'area est del parco eolico e lungo un breve tratto del cavidotto di connessione.

### **Pietra leccese**

La Pietra leccese è ben nota in letteratura geologica per il suo ricco contenuto paleontologico (molluschi, coralli isolati, denti di Elasmobranchi, ossa di vertebrati) e perché da tempi immemorabili è utilizzata in tutto il Salento leccese come materiale da costruzione. Alla scala dell'affioramento si presenta come una roccia carbonatica debolmente marnosa, di granulometria in genere fine e di colore prevalentemente avana con tonalità da chiare fino al bruno-tabacco, non stratificata o mal stratificata in banchi, con dispersi rari o rarissimi macrofossili. Da un punto di vista petrografico è costituita da biomicriti e biospariti a foraminiferi planctonici con piccoli granuli apatitici e gusci di foraminiferi fosfatizzati. Verso l'alto le biomicriti divengono con gradualità glauconitiche ed assumono un colore verdastro. All'interno di questo intervallo che è indicato dai cavaatori col nome di "piromafo" è evidente una maggiore

concentrazione di noduletti apatitici e di fossili. Tra i fossili più comuni si possono ricordare Pycnodonte, Flabellipecten ed Amusium. Localmente la potenza della Pietra Leccese è di pochi metri.

La Pietra leccese affiora a sud del parco eolico lungo un tratto del cavidotto di connessione.

### **Calcarei di Altamura**

L'intervallo stratigrafico, è costituito da un'alternanza tra calcari e calcari dolomitici, micritici, compatti e tenaci di colore biancastro, grigio chiaro o nocciola, in strati di spessore variabile da qualche centimetro a circa un metro. A luoghi gli strati si presentano fittamente laminati e sono facilmente riducibili in lastre. Gli affioramenti sono limitati a qualche metro di spessore, a luoghi coperti da terreno agrario; spessori maggiori, sino a 30÷40 m, sono esposti nelle pareti delle cave, attive e no, in alcuni casi utilizzate come discariche, ubicate nell'entroterra brindisino. In più luoghi gli strati risultano fratturati e disarticolati. I macrofossili sono in genere scarsi, caratterizzati da frammenti di rudiste e subordinati coralli e pettinidi.

Il tetto del basamento carbonatico cretacico si trova a quote molto differenti tra loro anche in aree relativamente vicine, in ciò evidenziando la probabile presenza di faglie che presentano rigetto decametrico.

La formazione è rappresentata dai seguenti tipi litologici:

1. dolomie e calcari dolomitici, grigi, talora bituminosi; in alcuni livelli la dolomitizzazione si è compiuta durante la prima diagenesi (dolomitizzazione penecontemporanea, dimostrata dalla grana assai minuta, dalla porosità scarsa, dalle strutture originarie ben conservate), mentre in altri livelli, più frequenti, la dolomitizzazione è di diagenesi tardiva (grana più grossa, porosità notevole, strutture originarie praticamente scomparse);
2. calcari micritici, chiari, spesso laminari;
3. calcari ad intraclasti;
4. calcari a pellets;
5. calcari a bioclasti;
6. breccie calcaree.

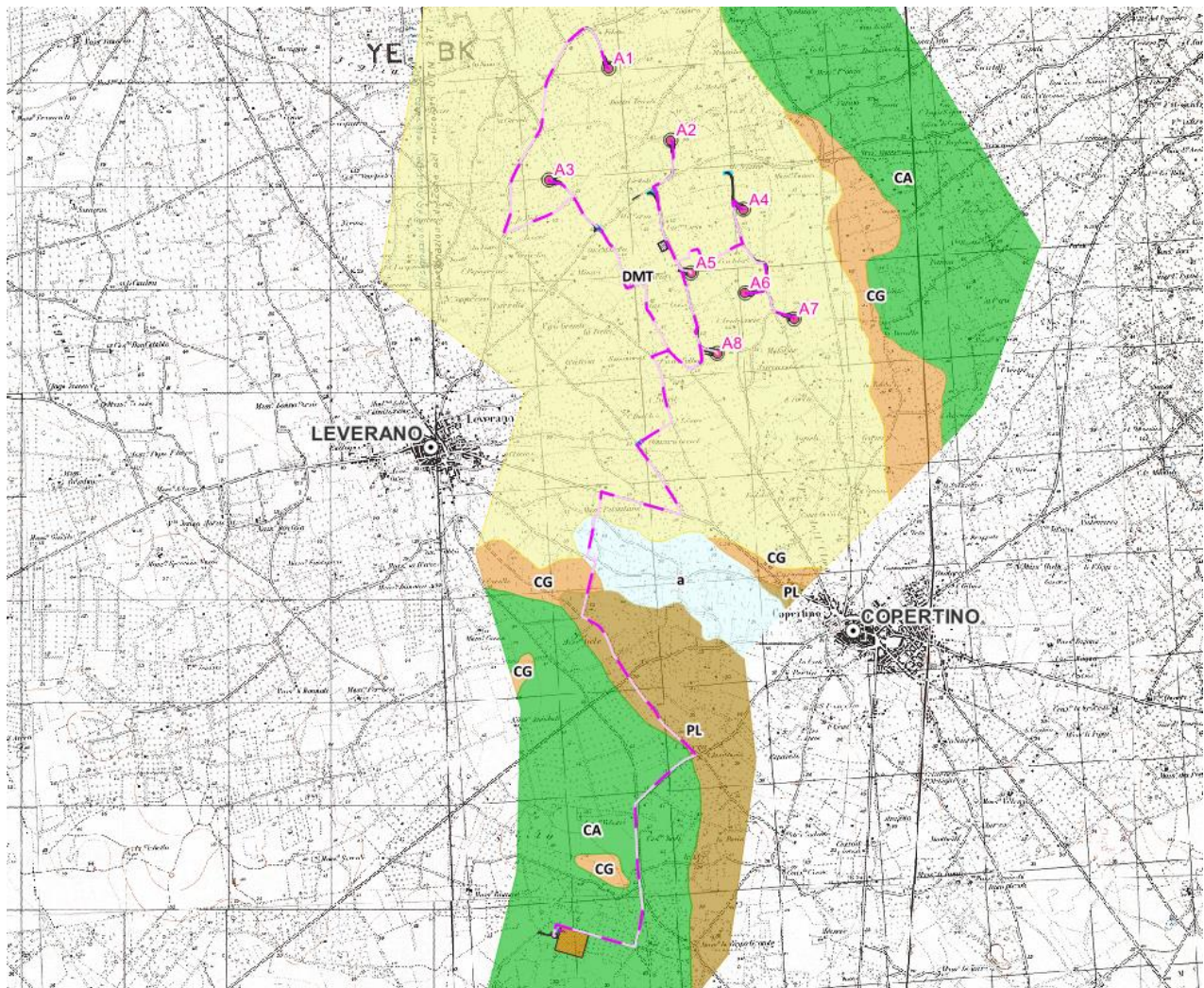
Le breccie sono particolarmente frequenti a nord dell'area in studio, soprattutto in prossimità di S. Vito dei Normanni, dove sembrano rappresentare un livello abbastanza continuo, di qualche metro di potenza, che potrebbe segnare un episodio regressivo.

I frammenti, calcarei, sono angolosi, di dimensioni variabili (che talora superano i 30 cm di diametro) e derivano chiaramente dagli strati cretacici sottostanti.

La stratificazione è molto spesso evidente, con periodo da 5 a 40 cm. Sono pure spesso presenti, nei singoli strati, laminazioni e suddivisioni ritmiche.

I calcari cretacei appartenenti alla formazione sopra descritta non affiorano direttamente all'interno dell'area del parco: estesi affioramenti si rilevano a est e a sud nel tratto terminale del cavidotto di connessione.





a- coperture eluvio-colluviale (Olocene); DMT - Complesso dei depositi marini terrazzati (Pleistocene medio - sup.); CG - Calcareni di Gravina (Pliocene sup. - Pleistocene inf.); PL - Pietra Leccese (Miocene medio - superiore); CA - Calcari di Altamura (Cretaceo superiore).

**Figura 5.2: Estratto della carta geologica di Tavola 2 con indicazione delle litologie affioranti**

## 6 INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

Il paesaggio fisico è sostanzialmente piatto e caratterizzato nella porzione centrale e meridionale da una morfologia carsica poco articolata; in questi settori sono, infatti, presenti diverse blande depressioni chiuse, dal perimetro irregolare ed in genere poco profonde perché riempite fin quasi alla soglia dai sedimenti colluviali di colore rossastro, dove si raccolgono le acque di pioggia.

Il reticolo idrografico è poco articolato e sviluppato e contraddistinto dalla presenza di forti condizionamenti antropici che si manifestano sia come sbarramenti che impediscono alle acque di pioggia di defluire liberamente che come linee di impluvio non naturali.

Nei limiti di questo territorio in esame, la dinamica dei processi geomorfologici è controllata dal particolare assetto geomorfologico - stratigrafico e dalle trasformazioni che l'uomo ha prodotto sull'ambiente naturale.

L'assetto geologico, idrogeologico e geomorfologico è quello tipico del cosiddetto carsismo di contatto (Border Karst), contraddistinto dalla presenza di un contatto stratigrafico suborizzontale o verticale tra



rocce con differenti caratteri di permeabilità.

## 7 INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE

La campagna di indagini geofisiche, pianificata per il presente progetto ha indagato aree in cui l'accesso era consentito, cercando di investigare le litologie caratteristiche del sedime di fondazione degli aerogeneratori. Le indagini eseguite, rappresentano una prima caratterizzazione di massima dei litotipi affioranti all'interno dell'area di progetto, che dovranno necessariamente essere integrate in fase di progettazione esecutiva, andando ad investigare puntualmente ogni postazione in cui è prevista l'ubicazione degli aerogeneratori, nonché di ogni struttura interagente con il sottosuolo.

Nello specifico la campagna di indagini è consistita in:

- ✓ esecuzione di n. 3 indagini sismiche a rifrazione con restituzione tomografica in onde P;
- ✓ esecuzione di n. 3 indagini sismiche MASW, al fine di definire la  $V_{s,eq}$  e di conseguenza la categoria del suolo di fondazione (NTC18);
- ✓ esecuzione di n. 3 tomografie elettriche di resistività.

L'ubicazione, le metodologie di indagine e i report dettagliati sono riportati all'elaborato *SCS.DES.R.GEO.ITA.W.5631.003.00 - Indagini Geofisiche Preliminari*.

Le indagini sono state commissionate da SCS Ingegneria srl ed eseguite dalla ditta GeoSGRO'.



Indagini in sito




- Sismica a Rifrazione in onde P (SRT)
- Tomografia Elettrica (ERT)
- Sismica MASW

**Figura 7.1: Ubicazione indagini geofisiche area 1**





Indagini in sito

-  Sismica a Rifrazione in onde P (SRT)
-  Tomografia Elettrica (ERT)
-  Sismica MASW

**Figura 7.2: Ubicazione indagini geofisiche area 2 (figura sopra), area 3 (figura sotto)**

Con l'Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni (DM 17.01.2018), per quanto riguarda le categorie di sottosuolo, vengono eliminate le categorie S1 ed S2, mentre con l'utilizzo della  $V_{s,eq}$ , le categorie di sottosuolo B, C e D vengono ampliate inglobando alcune configurazioni che rientravano in S2, quando il bedrock sismico si posizionava tra i 3 e i 25 metri dal piano di riferimento. Inoltre, la Categoria di sottosuolo D (che nelle NTC08 erano definite con  $V_{s,30} < 180$  m/sec) viene classificata con valori di  $V_{s,eq}$  compresi tra 100 e 180 m/sec.

La classificazione del sottosuolo viene fatta sulla base delle condizione stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio  $V_{s,eq}$  (espressa in m/s) definita dall'espressione:

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{s,i}}}$$

con

$h_i$  = spessore dello stato i-esimo;

$V_{s,i}$  = velocità delle onde di taglio nell'i-esimo strato;

N = numero di strati;

H = profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da  $V_s$  non inferiore a 800 m/sec.

Per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato viene riferita al piano di imposta delle stesse. Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio  $V_{s,eq}$  è definita dal parametro  $V_{s,30}$ , ottenuto ponendo  $H=30$  m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Il valore della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio ( $V_{s,eq}$ ), ottenuto dal Modello Medio dell'elaborazione dei dati acquisiti attraverso la base sismica, è risultato essere in riferimento al piano campagna:

### MASW 1

N. STRATO	SPESSORE (Thickness) (m)	$V_s$ (m/s)	DENSITA' (gr/cm <sup>3</sup> )	MODULO di TAGLIO (MPa)	$V_p$ (m/s)	POISSON
1	1.8	187	1.87	65	458	0.40
2	5.6	221	1.88	92	487	0.37
3	4.8	328	1.96	211	683	0.35
4	6.2	496	2.06	506	1007	0.34
5	5.7	584	2.08	709	1113	0.31
6	Semi-Spazio	702	2.12	1045	1313	0.30

**$V_{s,eq} = (0.00 - 30.00) = 374$  m/s**



**MASW 2**

N. STRATO	SPESSORE (Thickness) (m)	Vs (m/s)	DENSITA' (gr/cm <sup>3</sup> )	MODULO di TAGLIO (MPa)	Vp (m/s)	POISSON
1	2.9	163	1.83	49	399	0.40
2	5.5	214	1.88	86	486	0.38
3	5.2	412	2.02	343	881	0.36
4	4.3	496	2.05	504	985	0.33
5	5.2	627	2.10	826	1219	0.32
6	Semi-Spazio	697	2.12	1029	1304	0.30

$$V_{s,eq} = (0.00 - 30.00) = 362 \text{ m/s}$$

**MASW 3**

N. STRATO	SPESSORE (Thickness) (m)	Vs (m/s)	DENSITA' (gr/cm <sup>3</sup> )	MODULO di TAGLIO (MPa)	Vp (m/s)	POISSON
1	2.3	185	1.86	64	453	0.40
2	6.8	275	1.94	147	625	0.38
3	5.2	412	2.02	343	881	0.36
4	4.3	496	2.05	504	985	0.33
5	5.2	574	2.08	685	1116	0.32
6	Semi-Spazio	697	2.12	1029	1304	0.30

$$V_{s,eq} = (0.00 - 30.00) = 393 \text{ m/s}$$

Per l'interpretazione di dettaglio delle indagini si rimanda all'elaborato "SCS.DES.R.GEO.ITA.W.5631.002.00 - Relazione Geologica, geomorfologica e sismica".

**8 MODELLO GEOLOGICO E GEOTECNICO**

Sulla scorta degli studi delle risultanze delle indagini geognostiche effettuate è stato possibile elaborare per l'area di progetto un modello geologico di riferimento, il quale tiene conto di tutte le informazioni acquisite durante il presente studio, che viene nel seguito esplicitato.

All'interno dell'area è possibile definire un modello geologico-geotecnico uniforme per l'intera area. In particolare, l'assetto stratigrafico è definito come segue: il potente basamento carbonatico cretaceo (riferibile al "Calcare di Altamura") è sovrastato, in trasgressione, dai termini basali della sequenza sedimentaria marina pilo-pleistocenica della "Fossa Bradanica" (Calcarene di Gravina e Argille subappennine) su cui, si rilevano, ai vari livelli, i depositi terrazzati marini e/o, depositi continentali.

La falda idrica superficiale si rileva a una quota media di circa 4,0-5,0 m dal p.c.; tale falda si presenta non continua e di limitata estensione. La falda profonda, che circola all'interno della massa carbonatica è localizzata a quote di circa ai 35-40 m dal p.c.. La presenza della falda idrica superficiale fa sì che vi sia interazione diretta fra le opere di fondazione e la stessa.

Alla luce di quanto detto è possibile distinguere all'interno dell'area interessata dal parco eolico le



seguenti unità litologiche [U.L.]:

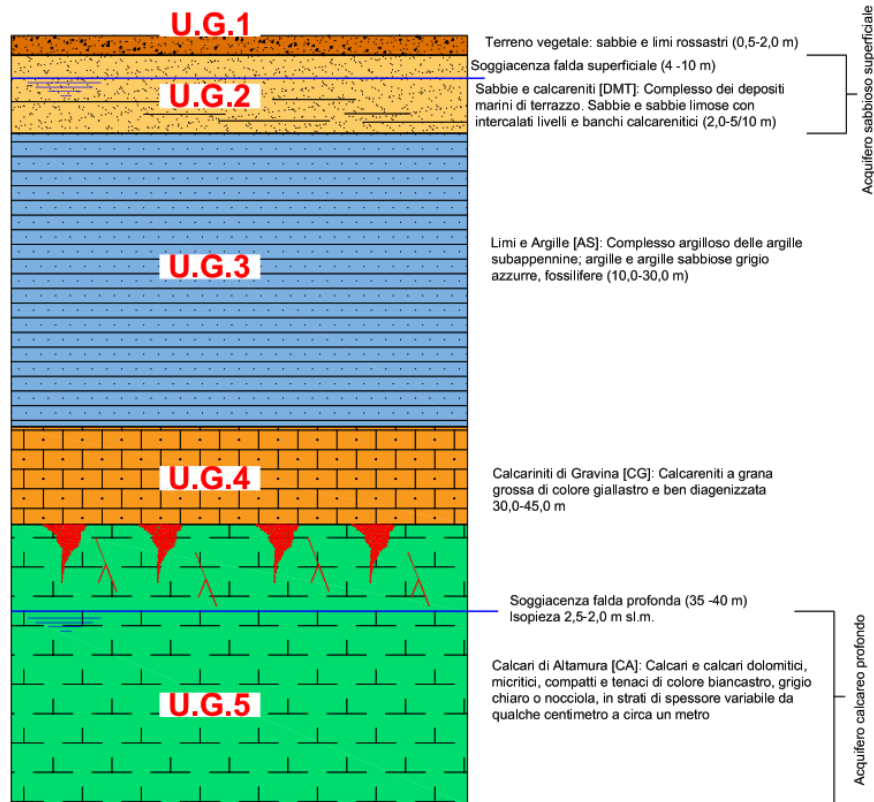
- Unità Litologica 1: Unità dei depositi eluvio colluviali;
- Unità Litologica 2: Unità dei depositi di terrazzo;
  - Unità 2a: Facies limoso-sabbiosa
  - Unità 2b: Facies sabbioso calcarenitica
- Unità Litologica 3: Unità delle argille grigio-azzurre;
- Unità Litologica 4: Unità delle calcareniti bioclastiche;
- Unità Litologica 5: Unità dei calcari cratacei.

Sulla base del modello geologico di riferimento è possibile inoltre considerare i seguenti aspetti, valevoli per tutta l'area progettuale:

Categoria di sottosuolo	B
Categoria topografica	T1
Rischio liquefazione dei terreni	Nullo
Rischio instabilità dei terreni	Situazione stabile
Pericolosità geo-sismica del sito	Molto Bassa

In accordo con il modello geologico, sintetizzando le risultanze delle indagini geognostiche effettuate unitamente ai dati bibliografici in possesso dello scrivente, è stato elaborato il modello geotecnico dell'area di studio, il quale è formato dalle seguenti unità geotecniche:

Unità Geotecnica	Descrizione
U.G. 1)	TERRENO VEGETALE
U.G. 2a)	LIMI SABBIOSI
U.G. 2b)	SABBIE CALCARENITICHE GHIAIOSE A LUOGHI BEN CEMENTATE
U.G. 3)	SABBIE FINI LIMOSE E ARGILLE
U.G. 4)	CALCARENITI BIOCLASTICHE
U.G. 5)	CALCARI MICRITICI



**Figura 8.1: Modello geologico-geotecnico di riferimento**

I valori delle principali caratteristiche fisiche e meccaniche sono stati ricavati dall'elaborazione di tutte le prove eseguite oltre che dai dati bibliografici in possesso dello scrivente riguardanti indagini pregresse su terreni similari a quelli in studio.

In particolare sono state parametrizzate le unità geotecniche 2 (2a e 2b), 3, 4 e 5; l'Unità 1, costituita da terreno vegetale, date le scadenti caratteristiche meccaniche non viene presa in considerazione, e dovrà necessariamente essere asportata.

Di seguito, viene esplicitata la parametrizzazione geotecnica di massima delle singole Unità precedentemente individuate.

**Si precisa che in fase di progettazione esecutiva dovranno essere svolte specifiche indagini geognostiche e geofisiche su ogni WTG, al fine di definire con esattezza il modello litologico e geotecnico di dettaglio caratteristico.**

**UNITA' GEOTECNICA : Complesso sabbioso-limoso-arenitico dei Depositi di Terrazzo**

**U.G.2a – Facies limoso-sabbiosa**

Formazione geologica: Depositi Marini Terrazzati

Descrizione litologica: alternanza di sabbie, limi sabbiosi e sabbie con limo.

Caratteristiche geotecniche generali: terreni a comportamento geotecnico da discreto a mediocre, prevalentemente incoerente, a consistenza generalmente medio-bassa.

Comportamento Strato: Granulare sciolto.

Stato di addensamento: da poco a mediamente addensato.

**Parametri geotecnici caratteristici:**

	MIN	MAX	BEST FIT
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) Peso per unità di volume naturale	14,7	19,5	18,7
$\gamma_{sec}$ (kN/m <sup>3</sup> ) Peso per unità di volume secco	---	---	16,3
$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> ) Peso per unità di volume saturo	---	---	19,0
$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> ) Peso specifico	---	---	25,1
$\phi$ (°) Angolo di attrito di picco	25,9	33,5	27,0
$\phi'$ (°) Angolo di attrito efficace	24,7	27,9	26,0
$c'$ (kPa) Coesione efficace	---	---	9,0
$E_y$ (Mpa) Modulo Elastico	10	30	20
$C_u$ (Mpa) Coesione non drenata	20,3	82,9	40,0

**U.G.2b - Facies sabbioso-ghiaiosa-arenitica**

Formazione geologica: Depositi Marini Terrazzati

Descrizione litologica: alternanza di sabbie e strati arenitici da mediamente a ben cementati.

Caratteristiche geotecniche generali: terreni a comportamento geotecnico da discreto a buono, prevalentemente incoerente, a consistenza generalmente elevata.

Comportamento Strato: Granulare sciolto.

Stato di addensamento: da addensato a semicoerente.

**Parametri geotecnici caratteristici:**

	MIN	MAX	BEST FIT
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) Peso per unità di volume naturale	17,5	21,0	20,0
$\gamma_{sec}$ (kN/m <sup>3</sup> ) Peso per unità di volume secco	16,8	18	17,5
$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> ) Peso per unità di volume saturo	19,5	21,8	20,5
$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> ) Peso specifico	---	---	24,0
$\phi$ (°) Angolo di attrito di picco	28,0	32,0	30,0
$\phi'$ (°) Angolo di attrito efficace	26,0	31,0	29,0
$c'$ (kPa) Coesione efficace	0,0	9,0	4,0
$E_y$ (Mpa) Modulo Elastico	30	60	45

I parametri geotecnici caratteristici dell'unità U.G.2 sono i valori mediati delle unità U.G.2a - Facies limoso-sabbiosa e U.G.2b - Facies sabbioso-ghiaiosa-arenitica.

### Parametri geotecnici caratteristici

$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) Peso per unità di volume naturale	19,35
$\gamma_{\text{sec}}$ (kN/m <sup>3</sup> ) Peso per unità di volume secco	16,9
$\gamma_{\text{sat}}$ (kN/m <sup>3</sup> ) Peso per unità di volume saturo	19,75
$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> ) Peso specifico	24,55
$\phi'$ (°) Angolo di attrito di picco	29,0
$\phi'$ (°) Angolo di attrito efficace	27,5
$c'$ (kPa) Coesione efficace	6,5
<b>E</b> (Mpa) Modulo Elastico Statico	30,0

### UNITA' GEOTECNICA 3 – Depositi sabbioso-limo-argillosi e argillosi

Formazione geologica: Argille Subappennine

Descrizione litologica: Sabbie fini con limo e argilla passanti ad argille propriamente dette

Caratteristiche geotecniche generali: terreni a comportamento geotecnico da discreto a buono, a comportamento coesivo.

Comportamento Strato: Coesivo

Stato di Consistenza: da mediamente consistente a duro.

### Parametri geotecnici caratteristici:

	MIN	MAX	BEST FIT
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) Peso per unità di volume naturale	---	---	19,3
$\gamma_{\text{sec}}$ (kN/m <sup>3</sup> ) Peso per unità di volume secco	---	---	15,4
$\gamma_{\text{sat}}$ (kN/m <sup>3</sup> ) Peso per unità di volume saturo	---	---	19,4
$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> ) Peso specifico	---	---	26,1
$\phi'$ (°) Angolo di attrito di picco	---	---	25,6
$\phi'$ (°) Angolo di attrito efficace	---	---	25,0
$c'$ (kPa) Coesione efficace	---	---	8,0
<b>Cu</b> (Mpa) Coesione non drenata	70,0	100,0	90,0



#### UNITA' GEOTECNICA 4– Depositi Calcarenitici

Formazione geologica: Calcareniti di Gravina

Descrizione litologica: Calcareniti bioclastiche a grana grossolana di colore bianco giallastro da mediamente a scarsamente cementate

Caratteristiche geotecniche generali: terreni a comportamento geotecnico da discreto a buono, con comportamento assibilabile ad un ammasso roccioso dalle discrete qualità.

Comportamento Strato: Roccioso

Stato di addensamento: Da mediamente a ben cementato

##### Parametri geotecnici caratteristici:

	MIN	MAX	BEST FIT
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) Peso per unità di volume naturale	19,5	22,0	21,0
$\gamma_{sec}$ (kN/m <sup>3</sup> ) Peso per unità di volume secco	18,0	19,5	18,5
$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> ) Peso per unità di volume saturo	20,0	22,0	21,0
$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> ) Peso specifico	---	---	22,0
$\phi'$ (°) Angolo di attrito	30,0	34,0	32,0
$c'$ (kPa) Coesione efficace	0,0	10,0	5,0
<b>E</b> (Mpa) Modulo elastico statico	50	80	70
$\eta$ Coefficiente di Poisson	---	---	0,40
<b>R.Q.D</b> (%)	30	60	50

#### UNITA' GEOTECNICA 5 – Depositi calcarei

Formazione geologica: Calcari di Altamura

Descrizione litologica: Calcari micritici biancastri da fratturati ed alterati a compatti.

Caratteristiche geotecniche generali: terreni a comportamento geotecnico in genere buono, con comportamento assibilabile ad un ammasso roccioso dalle buone qualità. La qualità dell'ammasso e le caratteristiche geotecniche tendono ad aumentare al diminuire del grado di alterazione e fratturazione dell'ammasso. Per tale motivo l'unità geotecnica viene distinta in due sottounità: quella più superficiale, costituita dai calcari alterati e fratturati e quella più profonda costituita dai calcari da poco fratturati a compatti.

##### Parametri geotecnici caratteristici:

	MIN	MAX	BEST FIT
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) Peso per unità di volume naturale	21,5	24,0	22,5

$\gamma_{\text{sec}}$ (kN/m <sup>3</sup> ) Peso per unità di volume secco	20,0	21,5	20,5
$\gamma_{\text{sat}}$ (kN/m <sup>3</sup> ) Peso per unità di volume saturo	23,0	24,5	24,0
$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> ) Peso specifico	---	---	24,0
$\phi'$ (°) Angolo di attrito	37,0	40,0	38,0
$c'$ (kPa) Coesione efficace	150,0	180,0	160,0
<b>E</b> (Mpa) Modulo elastico statico	200	500	300
$\eta$ Coefficiente di Poisson	---	---	0,32
<b>R.Q.D</b> (%)	80	100	90

## 9 CRITERI DI VERIFICA

### 9.1 MODELLAZIONE

La fondazione è stata analizzata considerando i carichi dovuti alle seguenti azioni:

- 1) il peso proprio;
- 2) il peso del terreno di rinterro (sovraccarico permanente non compiutamente definito);
- 3) carichi provenienti dalla struttura in elevazione ( $F_z$ ,  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $M_z$ ,  $M_x$ ,  $M_y$ ) e applicati a 20 cm dal piedistallo;

Nell'ambito della valutazione geotecnica della fondazione si è proceduto alla determinazione della rigidità equivalente verticale alla **Winkler** del terreno di fondazione, adottata nell'ambito della modellazione strutturale: tale parametro è riportato al §10.4.6.

Il modello geotecnico ipotizzato è il seguente:

SPESORE STRATO	UNITÀ GEOTECNICA	PARAMETRI GEOTECNICI CARATTERISTICI
10 m	U.G. 2	$Z_w$ (m) Profondità falda superficiale: 4 m $\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> ) Peso specifico: 19,35 $\gamma_{\text{sat}}$ (kN/m <sup>3</sup> ) Peso specifico: 19,75 $\Phi'$ (°) Angolo di attrito di picco: 29 $c'$ (kPa) Coesione efficace: 6,5 <b>E</b> (Mpa) Modulo Elastico Statico: 30 $\eta$ Coefficiente di Poisson: 0,40
30 m	U.G. 3	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> ) Peso specifico: 19,30 $\gamma_{\text{sat}}$ (kN/m <sup>3</sup> ) Peso specifico: 19,40 $\Phi'$ (°) Angolo di attrito di picco: 25,6 $c'$ (kPa) Coesione efficace: 8,0 $C_u$ (kPa) Coesione non drenata: 90,0

### 9.2 VERIFICHE ESEGUITE

Le verifiche riguardanti la sicurezza globale e geotecnica sono state eseguite in accordo con il metodo degli stati limite di cui al cap. 2, 4 e 6 di [1], tenendo conto delle ulteriori richieste prestazionali previste

nella normativa di settore [5]. In particolare sono state eseguite le:

- 1) verifiche globali di ribaltamento;
- 2) verifiche globali di gapping (parzializzazione delle pressioni sul piano di appoggio);
- 3) verifiche geotecniche di resistenza a slittamento e carico limite;
- 4) valutazione della costante di Winkler;
- 5) valutazione dei cedimenti massimi assoluti e differenziali;
- 6) valutazione della rigidità rotazionale dinamica.

Le verifiche esposte nel seguito si fondano sui dati di calcolo forniti dal progettista della parte in elevazione, e che sono riassunti nelle successive tabelle (§9.4).

### 9.3 APPROCCI DI PROGETTO E COMBINAZIONI DI CARICO

Per le verifiche geotecniche si fa riferimento all'approccio 2, in accordo con la combinazione A1+M1+R3 e le tabelle seguenti:

		Coefficiente	EQU	A1	A2
		$\gamma_F$			
Carichi permanenti $G_1$	Favorevoli	$\gamma_{G1}$	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevoli		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti non strutturali $G_2^{(1)}$	Favorevoli	$\gamma_{G2}$	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevoli		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevoli	$\gamma_Q$	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevoli		1,5	1,5	1,3

<sup>(1)</sup> Nel caso in cui l'intensità dei carichi permanenti non strutturali o di una parte di essi (ad es. carichi permanenti portati) sia ben definita in fase di progetto, per detti carichi o per la parte di essi nota si potranno adottare gli stessi coefficienti parziali validi per le azioni permanenti.

**Tabella 9-1**

Verifica	Coefficiente parziale
	<b>(R3)</b>
Carico limite	$\gamma_R = 2,3$
Scorrimento	$\gamma_R = 1,1$

**Tabella 9-2**

Nella logica del metodo degli Stati Limite ogni azione è stata classificata in base alla "sorgente" (cioè alla norma di riferimento, [1] e [5]) e al tipo di carico. Ciò anche nell'ottica di operare una corretta applicazione della norma [5], specifica per gli aerogeneratori, assieme con i criteri di progettazione previsti dalla norma [1] valida per tutte le costruzioni civili ed industriali. La tabella seguente riassume, pertanto, i coefficienti parziali da applicare, che differiscono in caso di azione "Abnormal" o "Normal" in accordo con le precedenti tabelle (9.1 e 9.2) estratte da [1] e la tabella 3 di [5].

AZIONE	TIPO DI CARICO	NORMA DI RIFERIMENTO	COEFFICIENTI PARZIALI $\gamma_F$	
			GEO	EQU
Peso proprio fondazione	Permanente fondazione	[1]	1,00 / 1,30	0,90

Peso terreno riempimento	Permanente fondazione	[1]	0,80 / 1,50	0,80
Peso aerogeneratore	Permanente aerogener.	[1] [5]	0,90 / 1,10 1,35	0,90 / 1,00
Vento aerogen.	Variabile aerogeneratore	[1] [5]	/ 1,10 1,35	1,00 / 1,10 1,35

**Tabella 9-3: Possibili valori dei coefficienti parziali delle azioni adottati nel presente progetto**

Nella tabella a seguire si riporta l'elenco completo delle combinazioni di carico adottate nelle verifiche della fondazione dell'aerogeneratore in oggetto, esplicitate al successivo §9.4; i coefficienti adottati sono in accordo con quanto riportato nella tabella precedente.

Tipo di combinazione				CdC N.	Coefficienti parziali delle azioni $\gamma_r$				
					Peso proprio	Riempimento	Fz	H	M
<b>GEO (abnormal)</b>	Approccio 2	A1+M1+R3	Abnormal SLU2	1	1,00	0,80	0,90	1,10	1,10
	Approccio 2	A1+M1+R3	Abnormal SLU1	2	1,30	1,50	1,10	1,10	1,10
	Approccio 2	A1+M1+R3	Abnormal SLU2	3	1,00	0,80	0,90	1,10	1,10
<b>GEO (normal)</b>	Approccio 2	A1+M1+R3	Normal SLU2	4	1,00	0,80	0,90	1,35	1,35
	Approccio 2	A1+M1+R3	Normal SLU1	5	1,30	1,50	1,35	1,35	1,35
	Approccio 2	A1+M1+R3	Normal SLU2	6	1,00	0,80	0,90	1,35	1,35
<b>EQU</b>	IEC	normal case	Normal EQU	7	0,90	0,80	0,90	1,35	1,35
	IEC	abnormal case	Abnormal EQU	8	0,90	0,80	0,90	1,10	1,10
	IEC	normal case	Normal	9	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	IEC	abnormal case	Abnormal	10	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	IEC		Operational	11	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

**Tabella 9-4: Coefficienti parziali delle azioni utilizzati ai fini del presente progetto**

L'azione della neve, che presenta un coefficiente di combinazione  $\psi_2 = 0$  in accordo con [1], non è stata mai assunta come azione variabile dominante e, pertanto, non compare in tabella.

La combinazione 7 è assunta come Caratteristica (Rare) e, pertanto a essa sono state riferite le valutazioni delle tensioni (SLE R) su calcestruzzo e armatura (si veda la relazione di calcolo strutturale delle fondazioni), oltre che per la valutazione dei cedimenti di fondazione. La combinazione 9 è utilizzata per le verifiche relative alla superficie di contatto (area d'impronta) terreno - plinto di fondazione (assieme alle combinazioni 7 e 8). Le combinazioni 10 e 11 fanno riferimento agli stati limite di esercizio strutturali (tensioni, fessurazione) e, pertanto, non sono prese in considerazione nell'ambito di questa relazione, ma saranno oggetto di successive fasi di progetto.

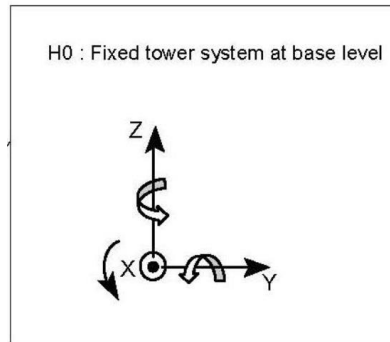
## 9.4 ANALISI DEI CARICHI

### 9.4.1 AZIONI DERIVANTI DALLA SOVRASTRUTTURA

Ai soli fini della valutazione dei carichi, è stato considerato un aerogeneratore tipo Vestas V136. Il documento « 0068-8557\_V02 - Foundation load V136-3.453.64.04.2 MW HH105 US IECS.pdf » - preparato dal costruttore delle WTG - riporta gli scarichi in fondazione derivanti dall'aerogeneratore, in accordo con le indicazioni delle norma [5]. I valori dei carichi, non fattorizzati, sono riportati nelle successive tabelle e, pertanto a essi sono da applicare i "Partial Load Factor" in accordo con quanto



riportato nella tabella 3 al § 7.6.2.1 della norma [5].



**Figura 9.1: Simboli e segni adottati nelle successive tabelle fornite dal fabbricante degli aerogeneratori**

Characteristic Extreme							
Lead	LC/Family	PLF	Type	Mbt1	Mzt1	FndFr	Fzt1
Sensor	[-]	[-]	[-]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]
Mbt1	62E50b06000(fam313)	1.10	Abs	<b>123000</b>	3160	1295	-5004
Mzt1	22VOGHWO300(fam174)	1.10	Abs	25810	<b>-10300</b>	244.4	-5074
FndFr	62E50b06000(fam313)	1.10	Abs	122900	3167	<b>1296</b>	-5002
Fzt1	22VOGHWO300(fam174)	1.10	Abs	33780	1956	341.4	<b>-5372</b>

Table 2-3 Characteristic Extreme (excl. PLF). Only load cases with PLF = 1.10.

Characteristic Extreme							
Lead	LC/Family	PLF	Type	Mbt1	Mzt1	FndFr	Fzt1
Sensor	[-]	[-]	[-]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]
Mbt1	32PREogVrp11(fam249)	1.35	Abs	<b>101300</b>	-232.8	926.2	-5208
Mzt1	21RPY10HWO2a00(fam126)	1.35	Abs	24800	<b>-10370</b>	247.2	-5081
FndFr	14EcdVrpa00(fam60)	1.35	Abs	99000	1774	<b>984.2</b>	-5231
Fzt1	12lceUVo100(fam30)	1.35	Abs	39550	1590	366.2	<b>-5375</b>

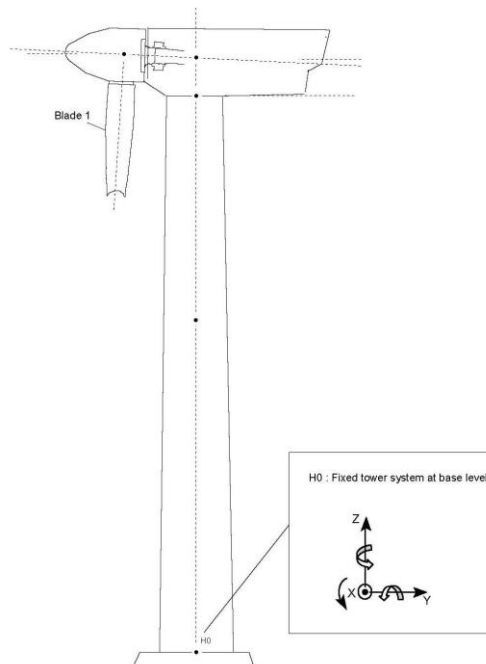
Table 2-4 Characteristic Extreme (excl. PLF). Only load cases with PLF = 1.35.

**Tabella 9-5: Scarichi in fondazione secondo [5] – Condizioni di carico estreme (N, A, T)**

Production loads				
		Char. load	Prob.:1e-2	Prob.:1e-4
M <sub>res</sub>	[kNm]	101300.00	74542.30	82976.75
M <sub>z</sub>	[kNm]	-10369.89	-4063.95	-6907.19
F <sub>res</sub>	[kN]	984.23	690.23	792.10
F <sub>z</sub>	[kN]	-5375.20	-5262.19	-5292.51

Table 3-1 Service Limit State (SLS) loads, in accordance with DiBt 2012.

**Tabella 9-6: Scarichi in fondazione secondo [5] - Condizione di carico caratteristica**

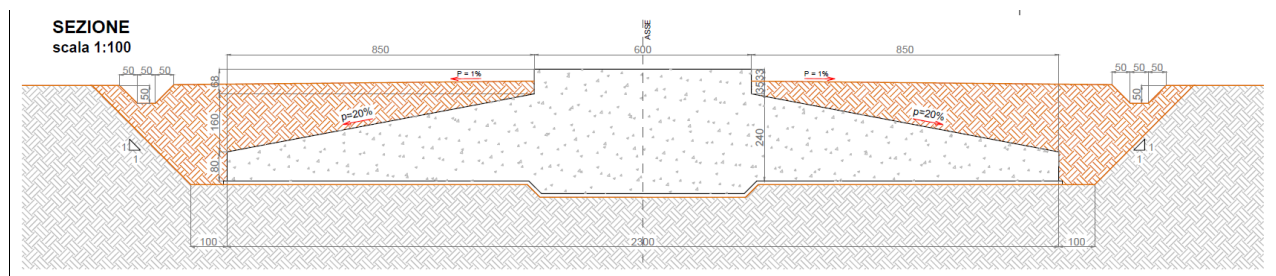


**Figura 9.2: Simbologia adottata nell'analisi dei carichi e nelle verifiche**

Oltre a queste azioni si sono considerate quelle derivanti dal peso proprio della struttura di fondazione e dal peso del terreno di riempimento.

## 10 FONDAZIONE DIRETTA

La fondazione tipica dell'aerogeneratore sarà in calcestruzzo armato, con pianta di forma circolare di diametro  $D_e = 23,00$  m, spessore variabile da un minimo (sul bordo esterno) a un massimo in corrispondenza della zona centrale di attacco della parte di elevazione della torre.



**Figura 10.1: Geometria della fondazione diretta dell'aerogeneratore**

GEOMETRIA FONDAZIONE DIRETTA	
Diametro esterno fondazione	23.00 m
Diametro esterno piedistallo	6.00 m
Spessore fondazione al bordo esterno	0.80 m
Spessore massimo della suola di fondazione	2.40 m
Scalino esterno del piedistallo	0.68 m
Altezza massima piedistallo	3.08 m
Ringrosso inferiore plinto	0.35 m
Spessore minimo di ricoprimento fondazione	0.35 m
Pendenza profilo terra di ricoprimento	1.00 %

Pendenza estradosso fondazione

18.82 %

**Tabella 10-1: Geometria del plinto**

La parte più alta del plinto, cioè la zona centrale indicata come piedistallo, emerge dal terreno post-sistemazione di 33 cm (tenuto conto della pendenza del riempimento). Lo spessore minimo del plinto, sul perimetro, è di 80 cm.

### 10.1 PESO PROPRIO DELLA FONDAZIONE

Il peso del plinto di fondazione è pari a 16.423,18 kN.

### 10.2 PESO PROPRIO DEL RIEMPIMENTO

È previsto un ritombamento al di sopra e a fianco del plinto di fondazione, da realizzarsi con materiale drenato di buone caratteristiche meccaniche. Si assume un peso di volume pari a 18 kN/m<sup>3</sup>, e si assegna questo peso come pressione verticale secondo quanto riportato nella figura seguente.

Raggio Interno	Raggio Esterno	Area Corona	Peso ricoprimento su singolo anello	q ricoprimento
[m]	[m]	[m <sup>2</sup> ]	[kN]	[kN/m <sup>2</sup> ]
3,00	4,70	41,12	380	9,23
4,70	6,40	59,28	867	14,62
6,40	8,10	77,44	1'552	20,04
8,10	9,80	95,60	2'436	25,48
9,80	11,50	113,76	3'518	30,92

**Tabella 10-2: Carico del riempimento**

La risultante del peso del riempimento vale 8.512,2 kN.

### 10.3 RIEPILOGO CONDIZIONI DI CARICO

SCARICHI IN CONDIZIONI ESTREME (IEC 64100)	Fx [kN]	Fy [kN]	Fz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
Normal [Fc=1,35]	1.250,37	0,00	-7.030,80	0,00	136.755,00	-314,28
Abnormal [Fc=1,1]	1.424,50	0,00	-5.504,40	0,00	135.300,00	3.476,00

SCARICHI IN CONDIZIONI NORMAL (IEC 64100)	Fx [kN]	Fy [kN]	Fz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
Normal	926,20	0,00	-5.208,00	0,00	101.300,00	-232,80
Abnormal	1.295,00	0,00	-5.004,00	0,00	123.000,00	3.160,00

SCARICHI COND. OPERAZIONALI (IEC 64100)	Fxy [kN]	Fz [kN]	Mxy [kNm]	Mz [kNm]
Operational	690,23	-5.262,19	74.542,30	-4.063,95

**Tabella 10-3: Riepilogo delle condizioni di carico secondo la convenzione di cui alla Figura 9.1**

### 10.4 VERIFICHE GEOTECNICHE

#### 10.4.1 COMBINAZIONI DI CARICO E FATTORI DI SICUREZZA

Nella tabelle a seguire si riporta un riepilogo dei fattori parziali, dei coefficienti e fattori di sicurezza.

Verifica		CdC N.	Tipo di combinazione			Fattore di Sicurezza
GEO (abnormal)	Carico limite	1	Approccio 2	A1+M1+R3	Abnormal SLU2	5,34
	Carico limite	2	Approccio 2	A1+M1+R3	Abnormal SLU1	5,70
	Scorrimento	3	Approccio 2	A1+M1+R3	Abnormal SLU2	7,30
GEO (normal)	Carico limite	4	Approccio 2	A1+M1+R3	Normal SLU2	5,53
	Carico limite	5	Approccio 2	A1+M1+R3	Normal SLU1	5,79
	Scorrimento	6	Approccio 2	A1+M1+R3	Normal SLU2	10,71
EQU	Ribaltamento	7	IEC	Normal case	Normal EQU	2,15
		8	IEC	Abnormal case	Abnorm. EQU	2,15
	Sollevamento	9	IEC	Normal case	Normal	1,96
		10	IEC	Abnormal case	Abnormal	1,59
		11	IEC		Operational	1,13

**Tabella 10-4: Riepilogo delle verifiche geotecniche e globali e relativi coefficienti di sicurezza (F.S.)**

#### 10.4.2 GAPPING

La verifica di GAPPING è condotta assumendo che in combinazione 11 si abbia un'impronta sul terreno pari al 100% dell'area di sedime del plinto. Per le combinazioni 9 e 10 si assume, invece, che l'impronta possa ridursi fino al 50% dell'area. Per garantire il 100% di sezione reagente occorre che la risultante abbia un'eccentricità massima e non superiore a  $0,1255 D_e$  – essendo  $D_e$  pari al diametro del plinto – mentre per garantire che la porzione compressa sia non inferiore al 50% dell'area di base del plinto occorre limitare l'eccentricità a  $0,294 D_e$ . Di seguito si riportano le verifiche di GAPPING rispetto alla combinazione 11 – GAP 9 – Normal e 10 – Abnormal, tutte non fattorizzate <sup>(1)</sup>.

SCARICHI AEROGENERATORE – NON FATTORIZZATI			
Azione	Operational	Normal	Abnormal
<b>Fz</b>	5.262,19	5.208,00	5.004,00
<b>Fxy</b>	690,23	926,20	1.295,00
<b>Mxy</b>	74.542,30	101.300,00	123.000,00
AZIONI RISULTANTI INTRADOSSO FONDAZIONE – NON FATTORIZZATE			
Azione	Operational	Normal	Abnormal
<b>Fz</b>	30.197,52	30.143,33	29.939,33
<b>Fxy</b>	690,23	926,20	1.295,00
<b>Mxy</b>	76.669,59	104.154,55	126.991,19

**Tabella 10-5: Analisi scarichi in fondazione ad estradosso e intradosso plinto**

COEFFICIENTI PARZIALI					
CdC	Peso Proprio	Riempimento	Fz	H	M
<b>Operational</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>Normal</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>Abnormal</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

<sup>(1)</sup> Così come richiesto dalle linee guida [6]

VERIFICA DI PARZIALIZZAZIONE DELLA FONDAZIONE			
Eccentricity	Operational	Normal	Abnormal
e [m]	2,54	3,46	4,24
(e/D)	0,110	0,150	0,184
(e/D) <sub>max</sub>	0,125	0,294	0,294
Checks			
FS	1,132	1,957	1,594

Tabella 10-6: Coefficienti parziali e verifica di Gapping

### 10.4.3 RIBALTAMENTO

La verifica a ribaltamento è dettagliata nelle seguenti tabelle.

CdC	Peso Proprio	Riempimento	Fz	H	M
Normal EQU	0,90	0,80	0,90	1,35	1,35
Abnormal EQU	0,90	0,80	0,90	1,10	1,10

Tabella 10-7: Coefficienti di combinazione per la verifica a ribaltamento

	Normal EQU	Abnormal EQU
<b>Mo (overturning) [kNm]</b>	140.608,64	139.690,31
<b>Ms (stabilizing) [kNm]</b>	302.194,47	300.083,07
<b>FS = Ms / Mo</b>	2,149	2,148

Tabella 10-8: Verifica a ribaltamento

### 10.4.4 CARICO LIMITE

Le verifiche a carico limite sono dettagliate nelle successive tabelle. Si è adottato il metodo di verifica di cui all'appendice D di [4] (Eurocodice 7).

SCARICHI DI PROGETTO PER VERIFICHE DI PORTANZA					
	Peso proprio	Riempimento	Fz	H	M
Normal SLU2	1,00	0,80	0,90	1,35	1,35
Normal SLU1	1,30	1,50	1,35	1,35	1,35
Abnormal SLU2	1,00	0,80	0,90	1,10	1,10
Abnormal SLU1	1,30	1,50	1,10	1,10	1,10
FOUNDATION BOTTOM					
	Normal SLU2	Normal SLU1	Abnormal SLU2	Abnormal SLU1	
Fz	27.920,10	41.149,16	27.736,50	39.622,76	
Fxy	1.250,37	1.250,37	1.424,50	1.424,50	
Mxy	140.608,64	140.608,64	139.690,31	139.690,31	

Tabella 10-9: Analisi scarichi in fondazione

Si effettuano le verifiche per le sole condizioni drenate, in considerazione del fatto che all'interno dello strato UG2 sono le uniche verificabili, in virtù della natura granulare del terreno.

CdC	Q <sub>rd</sub> (kPA)	Q <sub>sd</sub> (kPA)	FS
<b>Normal SLU1</b>	914	158	5,791 > 1 OK
<b>Normal SLU2</b>	806	146	5,528 > 1 OK
<b>Abnormal SLU1</b>	883	155	5,701 > 1 OK



**Abnormal SLU2**

773

145

5,339

&gt; 1 OK

**Tabella 10-10: Verifica a carico limite in condizioni drenate – Per tutte le combinazioni**

### 10.4.5 SLITTAMENTO

Di seguito si dettaglia la verifica a slittamento.

SCARICHI DI PROGETTO PER VERIFICHE A SLITTAMENTO					
	Peso proprio	Riempimento	Fz	H	M
<b>Normal SLU2</b>	1,00	0,80	0,90	1,35	1,35
<b>Abnormal 2</b>	1,00	0,80	0,90	1,10	1,10
FOUNDATION BOTTOM					
	Normal SLU2		Abnormal SLU2		
Fz	27.920,10		27.736,50		
Fxy	1.250,37		1.424,50		
Mxy	140.608,64		139.690,31		

**Tabella 10-11: Analisi scarichi in fondazione**

VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA A SLITTAMENTO					
		Condition	Soil parameters	Load comb.	
SLIDING CHECK		drained	WTG - Layer 1	Normal SLU2	
Cohesion	c'			7	kPa
Design bending moment	Mxy			140.609	kNm
Design torque moment	Mz			314,28	kNm
Design vertical load	Fz			27.920	kN
Design tangential load	H			1.250	kN
Radius	R			11,50	m
Eccentricity	e	Mxy/Fz		5,04	m
Ellipse minor axes	Be	2*(R-e)		12,93	m
Ellipse major axes	Le	2 R [1-(1-Be/2R) <sup>2</sup> ] <sup>1/2</sup>		20,68	m
Effective loaded area	Aeff	2*[R <sup>2</sup> arccos(e/R)-e*(R <sup>2</sup> - e <sup>2</sup> ) <sup>1/2</sup> ]		191,45	m <sup>2</sup>
Effective length	Leff	(Aeff*Le/Be) <sup>1/2</sup>		17,50	m
Effective width	Beff	Leff*Be/Le		10,94	m
Horizontal force	H'	2*Mz/Leff+[H <sup>2</sup> +(2*Mz/Leff) <sup>2</sup> ] <sup>1/2</sup>		1.286,81	kN
Friction angle	φ'			28,5°	
Struct.-ground friction	δ'			28,5°	
Adhesion	ca			0	kPa
Resistance factor	γR			1,100	
Design sliding resist.	Rd	[Fz tan(δ) + Aeff ca] / γR =		13.781	kN
Sliding check	FS	13781,25 / 1286,81 =		10,710	> 1 OK

**Tabella 10-12: Verifica a slittamento – Combinazione Normal SLU2**

SLIDING CHECK		Condition	Soil parameters	Load comb.
		drained	WTG - Layer 1	Abnormal SLU
Cohesion	c'			7 kPa
Design bending moment	M <sub>xy</sub>			139.690 kNm
Design torque moment	M <sub>z</sub>			3.476,00 kNm
Design vertical load	F <sub>z</sub>			27.736 kN
Design tangential load	H			1.425 kN
Radius	R			11,50 m
Eccentricity	e	M <sub>xy</sub> /F <sub>z</sub>		5,04 m
Ellipse minor axes	B <sub>e</sub>	2*(R-e)		12,93 m
Ellipse major axes	L <sub>e</sub>	2 R [1-(1-B <sub>e</sub> /2R) <sup>2</sup> ] <sup>1/2</sup>		20,68 m
Effective loaded area	A <sub>eff</sub>	2*[R <sup>2</sup> arccos(e/R)-e*(R <sup>2</sup> - e <sup>2</sup> ) <sup>1/2</sup> ]		191,44 m <sup>2</sup>
Effective length	L <sub>eff</sub>	(A <sub>eff</sub> *L <sub>e</sub> /B <sub>e</sub> ) <sup>1/2</sup>		17,50 m
Effective width	B <sub>eff</sub>	L <sub>eff</sub> *B <sub>e</sub> /L <sub>e</sub>		10,94 m
Horizontal force	H'	2*M <sub>z</sub> /L <sub>eff</sub> + [H <sup>2</sup> +(2*M <sub>z</sub> /L <sub>eff</sub> ) <sup>2</sup> ] <sup>1/2</sup>		1.876,15 kN
Friction angle	φ'			28,5°
Struct.-ground friction	δ'			28,5°
Adhesion	c <sub>a</sub>			0 kPa
Resistance factor	γ <sub>R</sub>			1,100
Design sliding resist.	R <sub>d</sub>	[F <sub>z</sub> tan(δ) + A <sub>eff</sub> c <sub>a</sub> ] / γ <sub>R</sub> =		13.691 kN
Sliding check	FS	13690,63 / 1876,15 =		7,297 > 1 OK

**Tabella 10-13: Verifica a slittamento – Combinazione Abnormal SLU2**

#### 10.4.6 VALUTAZIONE MODULO DI REAZIONE (WINKLER)

##### VALUTAZIONE MODULO DI REAZIONE SOTTOFONDO (WINKLER)

n. stratigraphy 1

- on stratum over bedrock
- on stratum over half-space
- embedded in stratum over bedrock

Parameter	Symbol	Expression / note	Value
Static shear modulus	G		10,71 N/mm <sup>2</sup>
Static Young modulus	E		30,00 N/mm <sup>2</sup>
Poisson ratio	ν		0,40 -
Foundation radius	R		11,50 m
Thickness of layer	H		7,25 m
	α <sub>r</sub>	(for circular rigid foundation)	-
Winkler modulus	K <sub>w</sub>	$\frac{4GR}{1-\nu} \left(1 + 1.28 \frac{R}{H}\right) \frac{1}{\pi R^2}$	5.991,23 kN/m <sup>3</sup>

5991

Survey WTG

 K<sub>w</sub> =

 5.991,00 kN/m<sup>3</sup>
**Tabella 10-14: Valutazione della costante di Winkler**

### 10.4.7 VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI

I cedimenti medio e differenziale in combinazione SLE Rara (Normal) sono valutati attraverso il metodo semplificato. Si assume che il cedimento medio sia pari al rapporto tra la pressione media e la costante di Winkler di cui al punto precedente. La pressione media, sulla base dell'analisi di carichi esposta ai punti precedenti, vale:

$$Q_{MEDIA, SLE R} = 30.143,33 / (3,1416 * 11,50^2) = 72,55 \text{ kN/m}^2$$

Pertanto, il cedimento medio atteso, se si escludono gli effetti legati alle pressioni efficaci litostatiche (dovute, in sostanza, al peso del terreno di scavo rimosso), vale:

$$\text{Cedimento elastico medio atteso} = 100 * 72,55 / 5.991,00 \approx 1,21 \text{ cm.}$$

Questa valutazione si basa, oltre che sul modello di terreno alla Winkler, sull'ipotesi di fondazione deformabile (rispetto al terreno), dunque in grado di trasmettere un campo di pressioni di contatto con andamento quasi lineare.

Il cedimento differenziale massimo atteso, in combinazione rara, è valutato secondo Bowles:

VALUTAZIONE DEL CEDIMENTO DIFFERENZIALE (ROTAZIONE)			
n. stratigraphy 1			
Survey	WTG		
Parameter	Symbol	Expression / note	Value
Poisson ratio	$\nu$		
Static Young modulus	E	(Layer 1)	30,00 N/mm <sup>2</sup>
		(Layer 2)	0,00 N/mm <sup>2</sup>
		(mean value)	30,00 N/mm <sup>2</sup>
Thickness of Layer 1	$t_1$	(Layer 1)	7,25 m
Bending moment	M	(Rare)	104.154,55 kNm
Influence factor	$I_0$	(rigid circular spread foundation)	5,53
Static rotation	$\tan(\theta)$	$\tan(\theta) = \frac{(1-\nu^2)}{E} \frac{M}{B^2 L} I_0$	1,44 mm/m

**Tabella 10-15: Valutazione del cedimento massimo differenziale (rotazione) in combinazione SLE rara**

Pertanto, il cedimento medio vale 12,1 mm mentre la rotazione vale 1,44 mm/m (33,12 mm per D=23,00 m).

Con riferimento alla trattazione di Sowers (1962), si può assumere per strutture assimilabili a WTG (ciminiera e silos), un valore ammissibile del cedimento tra 75 e 130 mm, mentre come cedimento rotazionale, un valore di 0,004D (nel caso in esame 92 mm). L'analisi ha perciò evidenziato che nel caso in esame i valori dei cedimenti sono assolutamente compatibili con la funzionalità delle strutture in elevazione.

### 10.4.8 VALUTAZIONE DELLA RIGIDEZZA ROTAZIONALE DINAMICA

Si riporta a seguire la valutazione della rigidezza rotazionale dinamica e la relativa verifica rispetto al valore minimo richiesto dal fabbricante della torre. La rigidezza rotazionale dinamica è assunta pari a:

$$K_r = 8 G_{dyn} R^3 / [3 (1-\nu)]$$

- $G_{dyn}$  = modulo a taglio dinamico di progetto
- $R$  = raggio del plinto
- $\nu$  = coefficiente di Poisson

Per il calcolo del modulo a taglio dinamico si fa riferimento alla velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) del sottosuolo, mediata sulla profondità significativa in funzione delle pressioni indotte dai carichi.

Si adotta la formula  $G_{dyn} = 0.35 \rho \langle V_s \rangle^2$  in cui  $\langle V_s \rangle$  il valore medio ponderato della velocità delle onde di taglio e  $\rho$  la densità media del sottosuolo. Nel caso in esame la  $\langle V_s \rangle$  è stata assunta conservativamente pari al valore minimo della velocità equivalente delle onde a taglio valutate nell'ambito delle indagini geofisiche esecutive MASW di cui alla relazione geologica.

Soil density	$\rho =$	1,94 kg/dm <sup>3</sup>
Shear wave velocity (design value)	$\langle V_s \rangle =$	246,07 m/s
Poisson ratio	$\nu =$	0,40
Dynamic shear modulus ( $\gamma=0.001$ )	$G_{dyn} =$	$0,35 * 1,94 * 246,07^2 / 1000 =$ 41,01 N/mm <sup>2</sup>
Foundation radius	$R =$	11,50 m
Rotational stiffness	$K_r =$	$8 * 41,01 * 11,5^3 / 3 / (1-0,4) =$ 277.233,51 MNm/rad
Min required $K_r$ (from manufacturer)	$K_{r,min} =$	90.000,00 MNm/rad
CHECK		OK