
PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA
MEDIANTE LO SFRUTTAMENTO DEL VENTO NEI TERRITORI COMUNALI
DI CANINO E MONTALTO DI CASTRO (VT) LOC. SUGARELLA
POTENZA NOMINALE 93,6 MW

PROGETTO DEFINITIVO - SIA

PROGETTAZIONE E SIA

ing. Fabio PACCAPELO

ing. Andrea ANGELINI

ing. Antonella Laura GIORDANO

ing. Francesca SACCAROLA

COLLABORATORI

dr.ssa Anastasia AGNOLI

ing. Giulia MONTRONE

STUDI SPECIALISTICI

IMPIANTI ELETTRICI

ing. Roberto DI MONTE

GEOLOGIA

geol. Matteo DI CARLO

ACUSTICA

ing. Antonio FALCONE

NATURA E BIODIVERSITÀ

BIOPHILIA - dr. Gianni PALUMBO dr. Michele BUX

STUDIO PEDO-AGRONOMICO

dr. Gianfranco GIUFFRIDA

ARCHEOLOGIA

ARSARCHEO - dr. archeol. Andrea RICCHIONI dr. archeol. Gabriele MONASTERO

INTERVENTI DI COMPENSAZIONE E VALORIZZAZIONE

arch. Gaetano FORNARELLI

arch. Andrea GIUFFRIDA

PD.R. ELABORATI DESCRITTIVI

R.5 Relazione geotecnica e sismica

REV.	DATA	DESCRIZIONE
------	------	-------------



INDICE

1. PREMESSE	1
2. CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICA	2
2.1. ASSETTO GEOLOGICO E STRUTTURALE	2
2.2. INQUADRAMENTO SISMICO DELL'AREA	5
2.3. USO DEL SUOLO	7
3. STRATIGRAFIA E CARATTERI FISICO-MECCANICI DEI TERRENI	9
4. CENNI TEORICI SULLE VERIFICHE GEOTECNICHE	13
4.1. CARICO LIMITE VERTICALE DEI PALI DI FONDAZIONE	13
4.1.1. <i>Resistenza alla punta</i>	13
4.1.2. <i>Resistenza laterale del fusto</i>	14
4.2. CAPACITÀ PORTANTE DELLE FONDAZIONI SUPERFICIALI	14
5. COMBINAZIONI DI CALCOLO E VERIFICA AGLI STATI LIMITE ULTIMI (SLU)	18
6. VERIFICHE AGLI STATI LIMITE DI ESERCIZIO (SLE)	20



1. PREMESSE

Nella presente relazione vengono esaminati gli aspetti geotecnici di un'area interessata dalla costruzione di un Parco Eolico da realizzarsi all'interno del territorio comunale di Canino e Montalto di Castro (VT) per la produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile (vento) e l'immissione dell'energia prodotta, attraverso un'opportuna connessione, nella Rete di Trasmissione Nazionale (RTN).

Lo studio ha avuto lo scopo, attraverso indagini indirette, di identificare, classificare e definire puntualmente le caratteristiche geotecniche delle unità litostratigrafiche delle aree di sedime interessate dalle opere in progetto.

Nello specifico sono state eseguite:

- n. 5 tomografie sismiche;
- n. 5 prospezioni sismiche a rifrazione di superficie secondo la tecnica MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves).

Il progetto prevede la costruzione di n. 13 aerogeneratori della potenza unitaria di 7.2 MW (per una potenza complessiva di 93.6 MW) sorrette da una platea di fondazione circolare in calcestruzzo armato gettato in opera del diametro di 29 m (altezza variabile da 130 cm a 260 cm) su n. 16 pali trivellati di profondità di circa 25 m e diametro pari a 120 cm. È inoltre prevista la realizzazione di tutte le opere accessorie alla connessione della centrale eolica alla RTN.

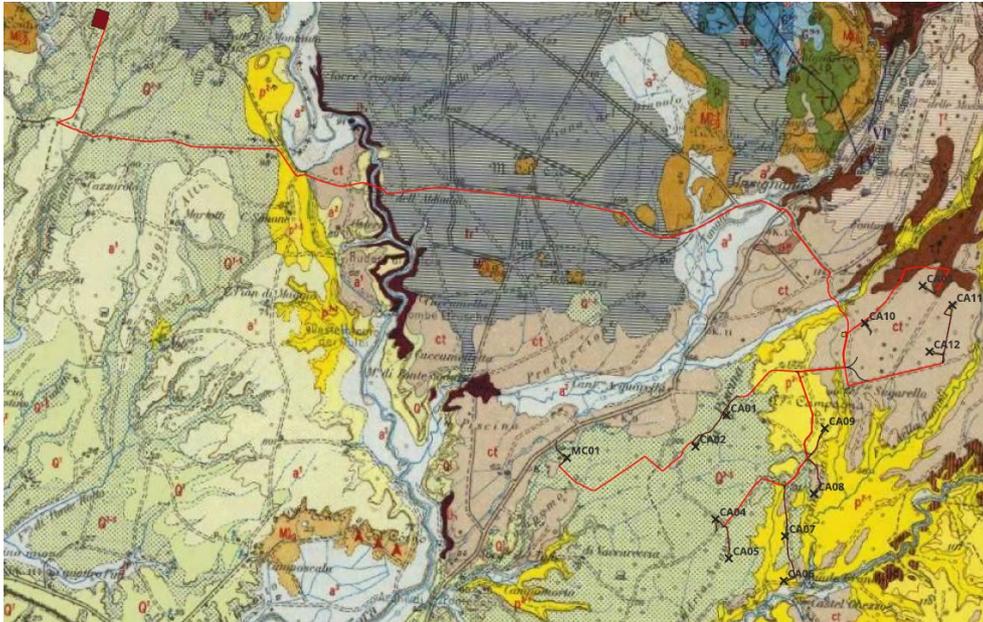
Per definire la caratterizzazione geotecnica del sottosuolo e la scelta ottimale del tipo di fondazione delle opere del progetto sono stati utilizzati i dati geologici, geotecnici ed idrogeologici rilevabili anche dalla bibliografia disponibile per il territorio in esame.



2. CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICA

2.1. ASSETTO GEOLOGICO E STRUTTURALE

L'impianto di progetto, ivi compresa la Sottostazione Elettrica, ricade interamente nel **Foglio 136 "Tuscania"** della carta geologica in scala 1:100.000



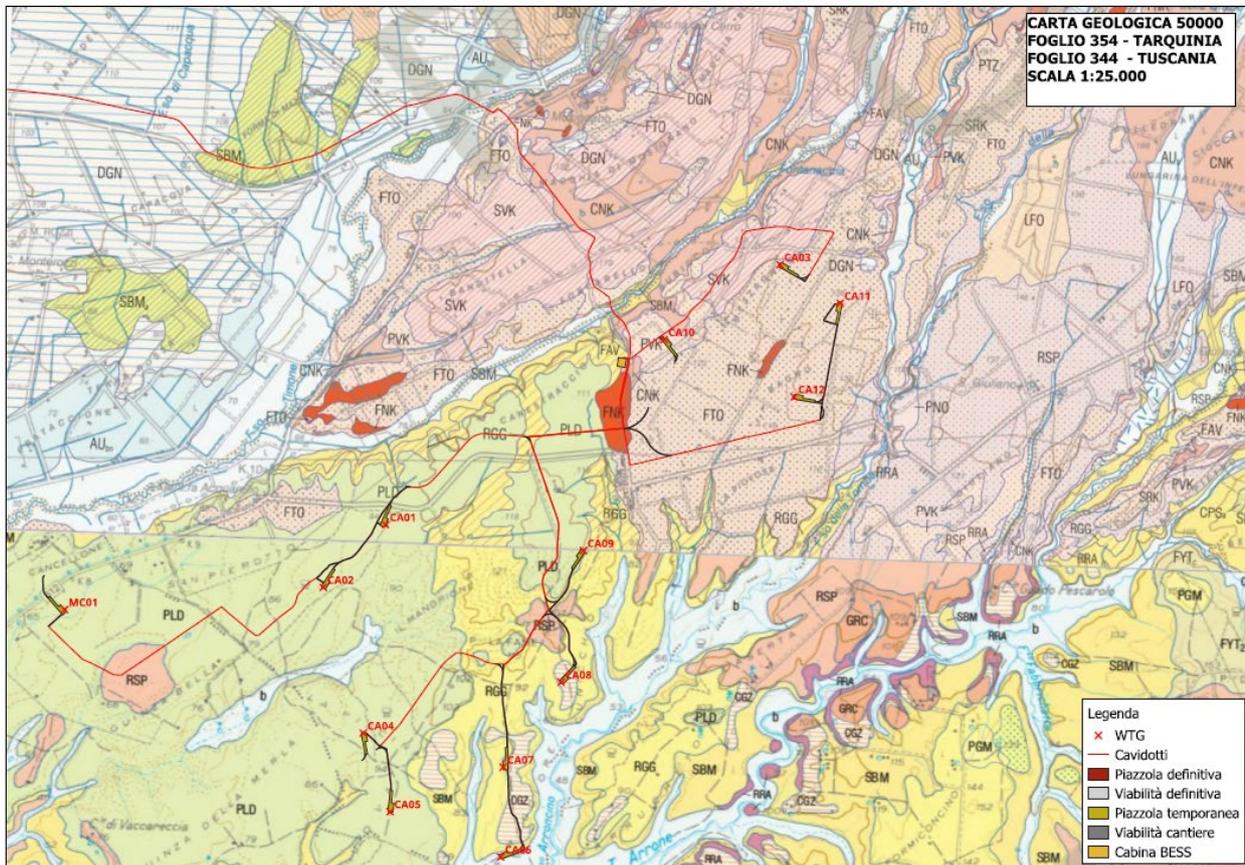
Legenda Carta Geologica 1:100.000



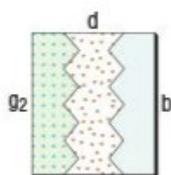
Inquadramento Impianto sul foglio 136 "TUSCANIA" della carta geologica d'Italia in scala 1:100.000



La zona oggetto di studio, **Area Aerogeneratori**, sita in agro dei comuni di Canino (VT) e Montalto di Castro (VT), ricade anche nella parte sud-occidentale del **FOGLIO 344 “Tuscania”** e nella parte nord-occidentale del **Foglio 354 Tarquinia”** della **carta geologica d’Italia in scala 1.50.000**, per cui la geologia dell’impianto Area Aerogeneratori, area cavidotto interno e parte del cavidotto esterno, si è preferito riferirsi a quest’ultima in quanto più dettagliata



*Inquadramento impianto su carta geologica 1: 50.000 Foglio 344 “TUSCANIA e Foglio 354 “TARQUINIA”
 Aerogeneratore MC01 sito nel comune di MONTALTO di CASTRO, tutti gli altri nel comune di CANINO*

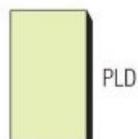


Depositi di spiaggia (g₂). Depositi eolici (d). Depositi alluvionali, colluviali e di piana costiera: conglomerati, ghiaie, sabbie, sabbie limose e argille a luoghi con materiale organico (b).
OLOCENE

L’Aerogeneratore **CA06** ricade su terreni alluvionali (b) depositi alluvionali, colluviali e di piana costiera, costituiti essenzialmente da conglomerati, ghiaie, sabbie, sabbie limose e argille, a volte, con orizzonti torbosi.

SUPERSINTEMA ACQUATRAVERSA (AE)

La superficie di base, a carattere erosivo, è riconoscibile solo localmente nel Foglio. A tetto il supersintema è delimitato da una superficie a basso profilo che individua l’inizio della franca continentalizzazione delle aree precedentemente occupate dal mare in corrispondenza del limite Pleistocene inferiore-medio (stadio isotopico 22 della curva del δ¹⁸O).

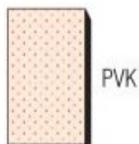


UNITÀ DI MANDRIA POLIDORI

Sabbie silicee con rare intercalazioni limose; ghiaie e conglomerati ad elementi quarzitici, provenienti dal basamento paleozoico e calcareo-marnosi della Successione Toscana e delle formazioni flyschoidi, da poco a moderatamente evoluti. Ambiente salmastro-continentale. Spessore massimo in affioramento di circa 20 m.
PLEISTOCENE INFERIORE p.p.



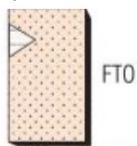
Gli aerogeneratori **CA01, CA02, CA04, CA05, CA09 e CM01**, ricadono su terreni appartenenti **all'UNITA' DI MANDRIA POLIDORI (PLD)** costituiti essenzialmente da sabbie silicee con rare intercalazioni limose; ghiaie e conglomerati ad elementi quarzatici provenienti dal basamento paleozoico e calcereo-marnosi della Successione Toscana e delle formazioni flyschoidi. Spessore maggiore di 20 metri.



UNITÀ DI PIAN DI VICO

Depositi vulcanoclastici secondari, poco coerenti, a laminazione piano-parallela e incrociata, a granulometria sabbiosa più o meno grossolana, costituiti da clasti scoriacei, pomicei e lavici, cristalli di clinopirosseno e leucite analcimizzata; derivanti da correnti fluviali e flussi iperconcentrati (spessori massimi 2-3 m); localmente sono presenti livelli limoso-sabbiosi di ambiente lacustre o sono associati a banchi travertinosi.

L'aerogeneratore **CA10** ricade su terreni appartenenti **all'UNITA' DI PIAN DI VICO (PVK)** costituiti essenzialmente da depositi vulcanoclasti secondari, poco coerenti, a laminazione piano-parallela e incrociata, a granulometria sabbiosa più o meno grossolana, costituiti da clasti scoriacei, pomicei e lavici, localmente sono presenti livelli limoso-sabbiosi di ambiente lacustre o sono associati a banchi travertinosi. Spessore maggiore 2-3 metri.



UNITÀ DI FOSSO LA TOMBA

Depositi vulcanoclastici secondari sabbiosi e sabbioso-conglomeratici, stratificati e a laminazione incrociata, da incoerenti a cementati, ad elementi pomicei, lavici ed arenitici (spessore almeno 3 m), di ambiente fluviale, a luoghi travertinizati o eteropici con DGN.

Gli aerogeneratori **CA03, CA11 e CM12**, ricadono su terreni appartenenti **all'UNITA' DI FOSSO LA TOMBA (FTO)** costituiti da depositi vulcanoclasti secondari sabbiosi e sabbioso-conglomeratici, stratificati e a laminazione incrociata, da incoerenti a cementati, ad elementi pomicei, lavici ed arenitici di ambiente fluviale. Spessore maggiore di 3 metri.

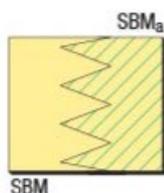


UNITÀ DEL SANGUINARIO

Ghiaie, ghiaie sabbiose e sabbie ad elementi vulcanici contenenti livelli cineritici pedogenizzati (cfr. *Membro del Sanguinario, BOSI et alii*, 1990) (GUN). L'ambiente di sedimentazione è fluviale, con locali depositi da flussi iperconcentrati. Affiora alla base dell'unità di Pian d'Arcione e verso l'alto è in parziale eteropia con questa. Potenza massima di circa 50 m. La presenza in questa unità di *Elephas antiquus*, *Bos primigenius*, *Stephanorhinus sp.* consente la sua attribuzione al Galeriano superiore-Aureliano.

PLEISTOCENE MEDIO p.p.

L'aerogeneratore **CA08** ricade su terreni appartenenti **all'UNITA' DEL SANGUINARIO (CGZ)** costituiti essenzialmente da ghiaie, ghiaie sabbiose e sabbie ad elementi vulcanici contenenti livelli cineritici pedogenizzati. L'ambiente di sedimentazione è del tipo fluviale. Spessore max 50 metri.



UNITÀ DEL FOSSO DI SAN SAVINO

Argille e argille limose e sabbiose grigie con intercalazioni di conglomerati ad elementi eterometrici calcereo marnosi evoluti, in abbondante matrice sabbiosa, appartenenti alla successione calcereo-marnosa di Monte Romano. L'ambiente di sedimentazione è marino circalitorale. (SBM). Localmente, in rapporti di eteropia, affiora una microbreccia calcarea, massiva, con rara matrice limoso-argillosa e cemento calcareo. I clasti, poco evoluti, sono eterometrici ed eterogenei. L'ambiente di sedimentazione è marino litorale. (SBM_a). Spessore massimo stimato inferiore ai 100 m. Biozona a *Uvigerina rutila* (COLALONGO & SARTORI, 1979; SPROVIERI & HASEGAWA, 1990); biozona a *Globorotalia margaritae* (IACCARINO & SALVATORINI, 1982). Biozone a nannofossili calcarei MNN12, MNN13 e MNN14-15.

PLIOCENE INFERIORE p.p.

L'aerogeneratore **CA07** ricade su terreni appartenenti **all'UNITA' DEL FOSSO SAN SAVINO (SBM)** costituiti essenzialmente da argille e argille limose e sabbiose di colore grigiastro con intercalazioni di conglomerati eterometrici di natura calcereo-marnosa. L'ambiente di sedimentazione è marino circalitorale. Spessore massimo dell'ordine dei 100 metri.

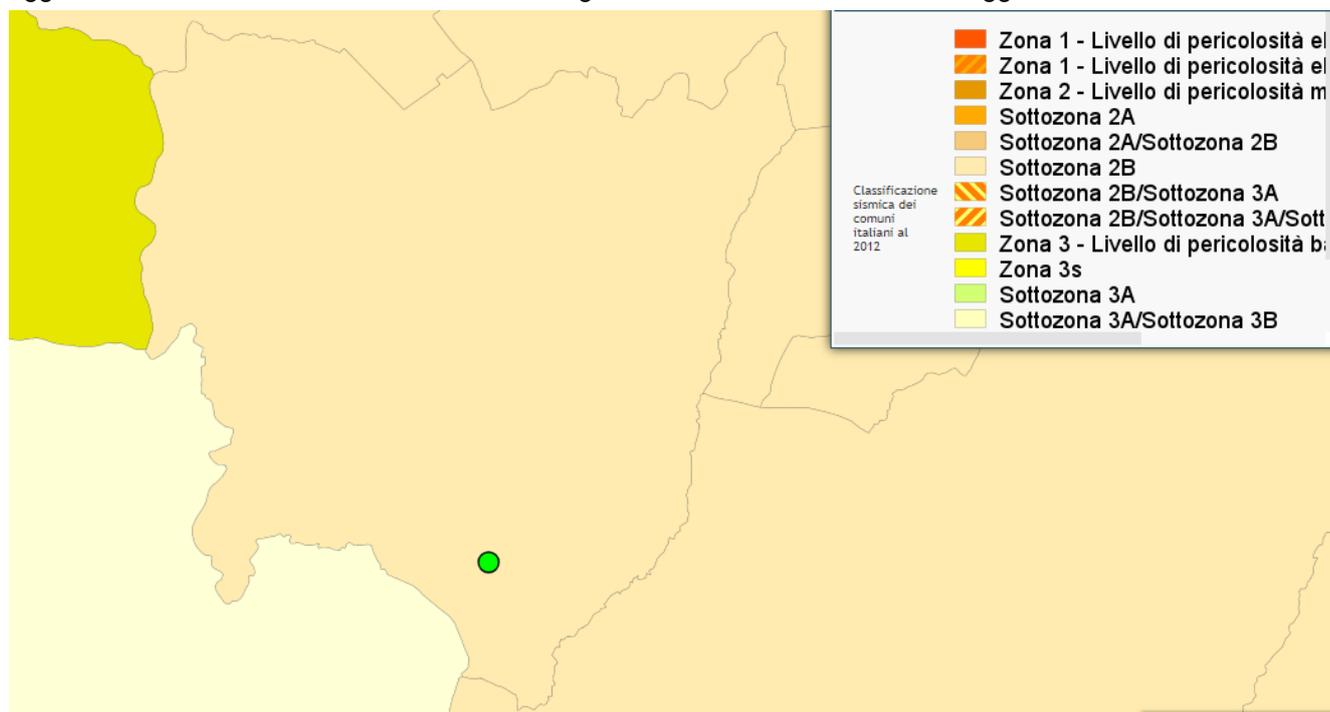
Localmente la parte sommitale delle aree dove insistono gli aerogeneratori è profondamente pedogenizzata e tutte queste unità sopra descritte poggiano sulla UNITA' di PIETRAFORTE (PTF) costituita da marne,



marne argillose beige e grigie, a scaglie, argille scure ed ocracee, argilliti verdognole e rossicce, con sottili intercalazioni di calcari verdastri e nerastri. che rappresenta il substrato profondo dell'intera area oggetto di studio di base.

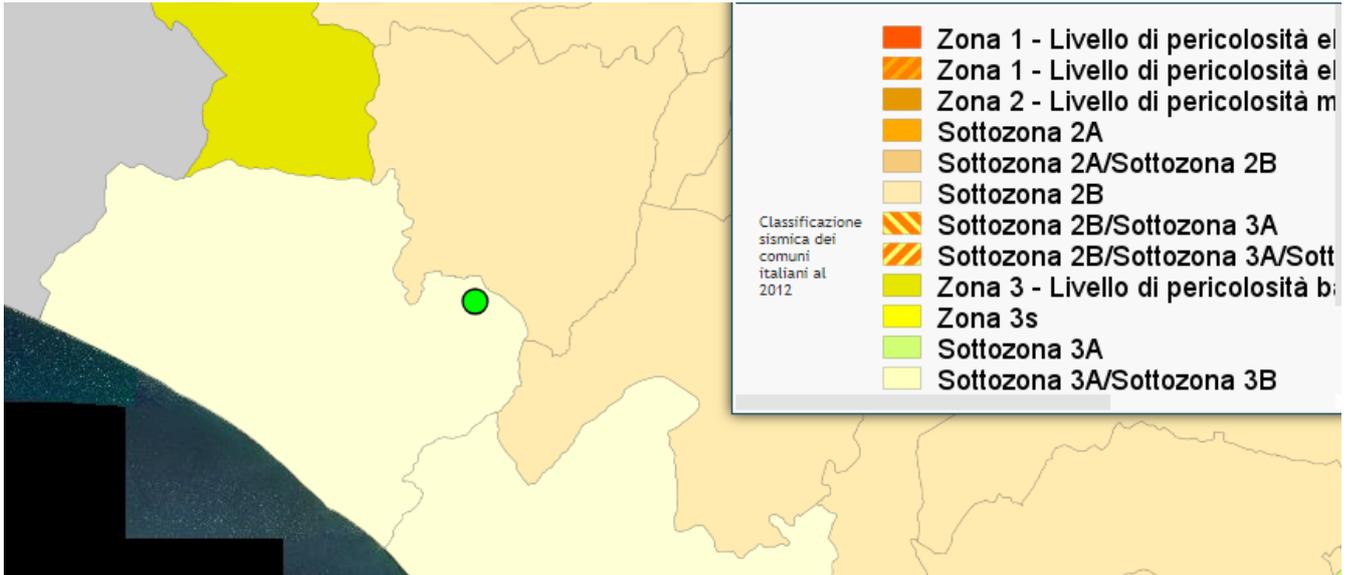
2.2. INQUADRAMENTO SISMICO DELL'AREA

Si illustra di seguito la Classificazione sismica dei comuni di Canino (VT), Montalto di Castro (VT), secondo l'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274/2003, aggiornata con la Delibera della Giunta Regionale del Lazio n. 387 del 22 maggio 2009, successivamente modificata con la D.G.R. n. 571 del 2 agosto 2019, e del comune di Manciano (GR) classificato sismico con l'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 rilasciata il 20 marzo 2003 sulla Gazzetta Ufficiale n. 105 dell'8 maggio 2003, aggiornata con la Deliberazione della Giunta Regionale Toscana n. 421 del 26 maggio 2014.



*Individuazione del comune di Canino - Area Aerogeneratori classificazione sismica
Sottozona 2B Livello di pericolosità sismica medio/alto*





Individuazione del comune di Montalto di Castro - Area Aerogeneratore classificazione sismica
Sottozona 3B Livello di pericolosità sismica medio



Individuazione del comun di Manciano (GR) in funzione della classificazione sismica **Zona 3** Livello di pericolosità basso

Area Aerogeneratori Comune di Canino Zona sismica 2B	Zona con pericolosità sismica bassa, che può essere soggetta a scuotimenti modesti. La sottozona 3B indica un valore di $ag < 0,20g$.
Area Aerogeneratori Comune di Montalto di Castro Zona sismica 3B	Zona con pericolosità sismica bassa, che può essere soggetta a scuotimenti modesti. La sottozona 3B indica un valore di $ag < 0,10g$.
Area Sottostazione Comune di Manciano Zona sismica 3	Zona con pericolosità sismica media, dove possono verificarsi forti terremoti con valori $0.05 < ag < 0,15 g$

Nell'ambito del presente studio, sono state eseguiti n. 5 profili MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*). Sulla base dell'indagine sismica è stato possibile stimare la categoria di suolo per il sito in esame. Dalle risultanze della prospezione sismica, è emerso che:



- Per gli aerogeneratori CA01; CA02; CA04; CA5; CA06; CA07; CA08; CA09, l'area in studio è classificata come Categoria "B" Depositi di ghiaia e sabbia molto addensate o di argille molto consistenti con Vs30 compreso tra 400.8 m/s e 433.4 m/s, con pericolosità sismica del sito compresa $0.075g < Ag < 0.100g$
- L'aerogeneratore CA03, l'area in studio è classificata come Categoria "B" Depositi di ghiaia e sabbia molto addensate o di argille molto consistenti con Vs30 uguale a 481.3 m/s, con pericolosità sismica del sito compresa tra $0.100g < Ag < 0.125g$
- L'aerogeneratore CA12, l'area in studio è classificata come Categoria "C" Depositi di ghiaia e sabbia mediamente addensata o di argille mediamente consistenti con Vs30 uguale a 347.4 m/s, con pericolosità sismica del sito $0.100g < Ag < 0.125g$
- L'aerogeneratore MC01, l'area in studio è classificata come Categoria "B" Depositi di ghiaia e sabbia molto addensata o di argille molto consistenti con Vs30 uguale a 400.8 m/s, con pericolosità sismica del sito compresa tra $0.075g < Ag < 0.100g$
- La Sottostazione di Trasformazione Elettrica (SSE), l'area in studio è sempre classificata come Categoria "C" Depositi di ghiaia e sabbia mediamente addensate o di argille di media consistenza con Vs30 pari a 329.6 m/s con pericolosità sismica del sito compresa tra $0.075g < Ag < 0.100g$.

Categoria	Descrizione
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Si rimanda all'allegato *PD.R.4 Relazione geologica, morfologica e idrogeologica* per i necessari approfondimenti.

2.3. USO DEL SUOLO

Per quanto riguarda l'uso del suolo, si è fatto riferimento alla banca dati georeferenziata costituita dalla "Carta Corine Land Cover" elaborata, nella sua prima versione, nel 1990 ed oggetto di successive modifiche ed integrazioni finalizzate ad assicurare l'aggiornamento continuo delle informazioni contenute.

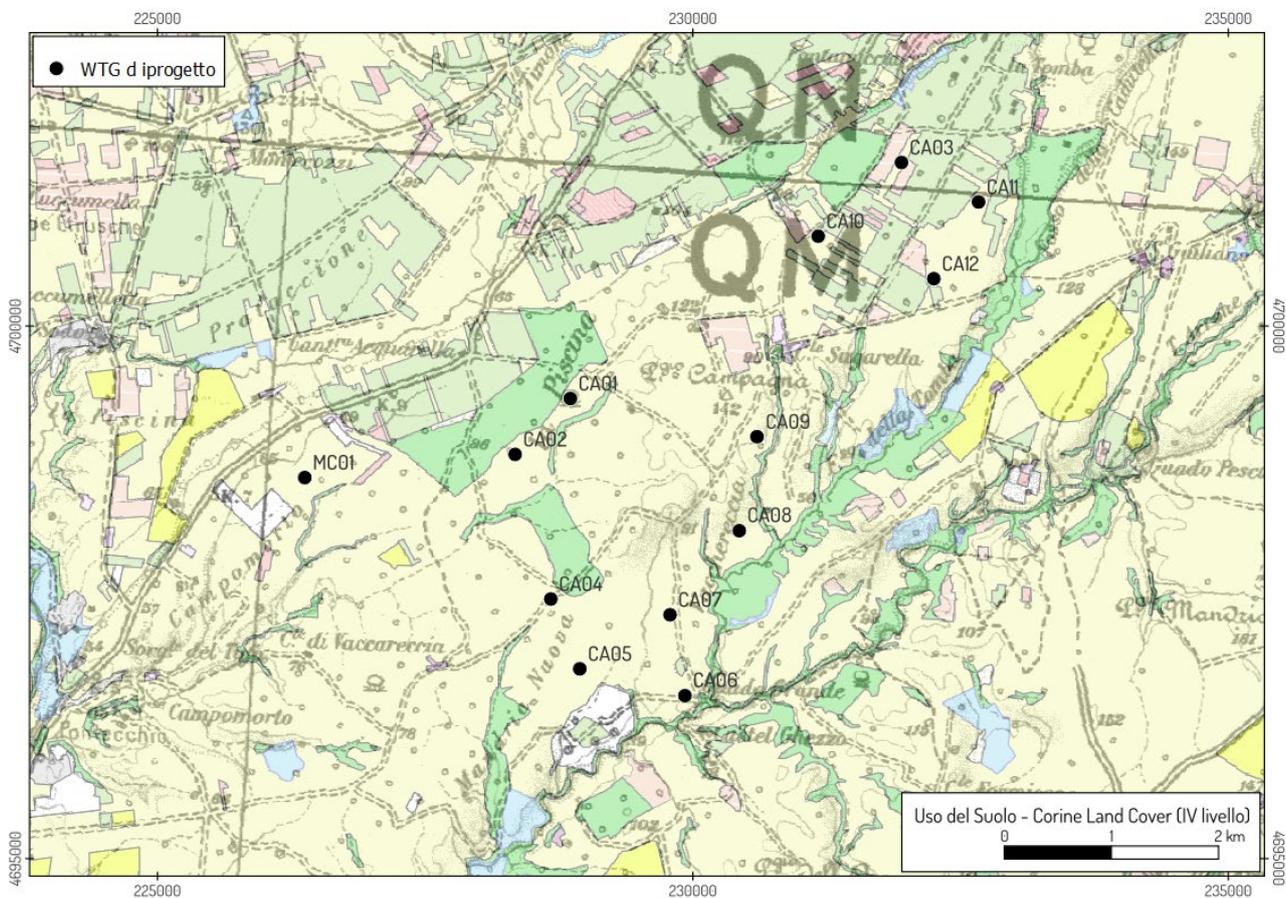
La carta Corine Land Cover suddivide il territorio in sottosistemi, particolareggiando sempre più nel dettaglio le diverse tipologie di paesaggi urbani, agrari, naturali e delle relative attività svolte dall'uomo:

- i territori modellati artificialmente sono suddivisi in zone: urbano, industriali, commerciali, estrattive e aree verdi urbane e agricole.



- i territori agricoli sono articolati in: seminativi, colture permanenti, prati stabili, zone agricole eterogenee;
- i territori boscati e ambienti semi-naturali sono classificati come: zone boscate, zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e erbacea, zone aperte con vegetazione rada o assente;
- le zone umide in interne e marittime;
- i corpi idrici in acque continentali e marittime.

Le aree in cui rientra il progetto sono caratterizzate da un elevato utilizzo del suolo a **seminativo semplice** in aree non irrigue. Nell'area è distribuito qualche terreno coltivato a vigneto, a uliveto e sporadiche presenze di naturalità, perlopiù boschi di latifoglie. È comunque da notare che la carta dell'uso del suolo rappresentata in stralcio risale al 2003 (ultimo aggiornamento del 2016), pertanto alcune destinazioni d'uso possono essere mutate nel corso. Per le aree in cui ricadono le opere di impianto è stato confermato da ortofoto-interpretazione e da sopralluogo in campo l'utilizzo a seminato semplice.



- 2121 - Seminativi in aree irrigue
- 2111 - Seminativi in aree non irrigue
- 221 - Vigneti
- 223 - Uliveti
- 311 - Boschi di latifoglie
- 231 - Superfici a copertura erbacea densa a composizione floristica rappresentata principalmente da graminacee

Uso del Suolo



3. STRATIGRAFIA E CARATTERI FISICO-MECCANICI DEI TERRENI

Il modello geologico locale è stato ricostruito attraverso le attività di rilevamento geologico, l'analisi dei dati pregressi disponibili e i risultati delle indagini geofisiche effettuate in situ.

Il sottosuolo investigato è stato contraddistinto in un unico sismostrato caratterizzato da un determinato valore di velocità delle onde di compressione. Generalmente, data la lunghezza dello stendimento eseguito, è stato possibile investigare il sottosuolo fino alla profondità di 30 m a partire dalla superficie topografica. Di seguito si riportano le risultanze di questa base sismica eseguita:

- ✓ Aerogeneratori CA01, CA02, CA04, CA05, CA06, CA07, CA08, CA09: si individua un sismostrato

	Velocità Onde S in m/s	Intervallo di profondità (m)	Descrizione
1	445	1,5 ÷ 4,0	<i>Sabbie limose con livelli di limo e ghiaia Possibilità di intercettare la falda a modeste profondità</i>
2	408	4,0 ÷ 20,0	<i>Sabbie</i>
3	491	20,0 ÷ 30,0	<i>Argille, argille limose, a luoghi con cristalli di gesso</i>

- ✓ Aerogeneratori CA03: si individua un sismostrato

	Velocità Onde S in m/s	Intervallo di profondità (m)	Descrizione
1	509	2,0 ÷ 12,0	<i>Cineriti e sabbie con livelli di limo e ghiaia Possibilità di intercettare una modesta falda a 11,5 m p.c.</i>
2	449	12,0 ÷ 30,0	<i>Ignimbriti Possibilità di intercettare una discreta falda a 25 m</i>

- ✓ Aerogeneratori CA12: si individua un sismostrato

	Velocità Onde S in m/s	Intervallo di profondità (m)	Descrizione
1	347	2,0 ÷ 12,0	<i>Cineriti e sabbie con livelli di limo e ghiaia</i>
2	449	12,0 ÷ 30,0	<i>Ignimbriti Da 30 a 48 m si intercettano depositi di lava con abbondante falda acquifera e successivamente tra 48 e 52 m seguono depositi ghiaiosi con un'altra abbondante falda acquifera, a 52 m si intercetta il substrato delle argille sabbiose con cristalli di gesso</i>

- ✓ Aerogeneratori MC01: si individua un sismostrato

	Velocità Onde S in m/s	Intervallo di profondità (m)	Descrizione
1	429	1,5 ÷ 20,0	<i>Sabbie limose con livelli di limo e ghiaia, possibilità di intercettare la falda a 15-20 m</i>
2	560	20,0 ÷ 30,0	<i>Argille, argille limose, a luoghi con cristalli di gesso</i>



✓ SSE: si individua un sismostrato

	Velocità Onde S in m/s	Intervallo di profondità (m)	Descrizione
1	214	1,2 ÷ 4,0	Sabbie limose

Sulla base delle indagini geognostiche eseguite è possibile asserire che in corrispondenza delle opere in progetto, sono presenti i seguenti terreni:

- Area Aerogeneratori CA01, CA02, CA04, CA05, CA06, CA07, CA08, CA09
 Sabbie limose con livelli di limo e ghiaia (Tab. 1a)
 Sabbie (Tab. 2)
 Argille, argille limose, a luoghi con cristalli di gesso (Tab. 3a)
- Area Aerogeneratori CA03
 Cineriti e sabbie con livelli di limo e ghiaia (Tab. 4a)
 Ignimbriti (Tab. 5)
- Area Aerogeneratori CA12
 Cineriti e sabbie con livelli di limo e ghiaia (Tab. 4b)
 Ignimbriti (Tab. 5)
- Area Aerogeneratori MC01
 Sabbie limose con livelli di limo e ghiaia (Tab. 1b)
 Argille, argille limose, a luoghi con cristalli di gesso (Tab. 3b)
- Area SSE
 Sabbie limose (Tab.6).

Tab. 1a - Sabbie limose con livelli di limo e ghiaia

<u>Parametri fisici</u>	
p.v. naturale	18.50 kN/mc
p.v. saturo	18.95 kN/mc
poisson	0.31
angolo di attrito	22.0°

Tab. 1b - Sabbie limose con livelli di limo e ghiaia

<u>Parametri fisici</u>	
p.v. naturale	18.50 kN/mc
p.v. saturo	18.90 kN/mc
poisson	0.47
angolo di attrito	24-26°

Tab. 2 - Sabbie

<u>Parametri fisici</u>	
p.v. naturale	19.0 kN/mc
p.v. saturo	19.45 kN/mc
poisson	0.34
angolo di attrito	28.0°



Tab. 3a - Argille, argille limose, a luoghi con cristalli di gesso

Parametri fisici	
p.v. naturale	19.0 kN/mc
p.v. saturo	19.56 kN/mc
poisson	0.47
angolo di attrito	26.0°

Tab. 3b - Argille, argille limose, a luoghi con cristalli di gesso

Parametri fisici	
p.v. naturale	20.0 kN/mc
p.v. saturo	20.50 kN/mc
poisson	0.45
angolo di attrito	27.0°

Tab. 4a - Cineriti e sabbie con livelli di limo e ghiaia

Parametri fisici	
p.v. naturale	18.0 kN/mc
p.v. saturo	18.65 kN/mc
poisson	0.46
angolo di attrito	26.0°

Tab. 4b - Cineriti e sabbie con livelli di limo e ghiaia

Parametri fisici	
p.v. naturale	18.0 kN/mc
p.v. saturo	18.65 kN/mc
poisson	0.48
angolo di attrito	26.0°

Tab. 5 - Ignimbriti

Parametri fisici	
p.v. naturale	18.5 kN/mc
p.v. saturo	18.77 kN/mc
poisson	0.47
angolo di attrito	33.0°



Tab. 6 - Sabbie limose

Parametri fisici	
p.v. naturale	18.0 kN/mc
p.v. saturo	18.5 kN/mc
poisson	0.33
angolo di attrito	24.0°

I valori di cui sopra saranno validati in sede di progettazione esecutiva, mediante esecuzione di specifiche indagini geognostiche funzionali a una più dettagliata caratterizzazione stratigrafica e geotecnica di ogni singolo sito di installazione degli aerogeneratori.



4. CENNI TEORICI SULLE VERIFICHE GEOTECNICHE

Si riportano nel seguito le formulazioni teoriche che saranno adottate per le verifiche geotecniche del progetto esecutivo.

4.1. CARICO LIMITE VERTICALE DEI PALI DI FONDAZIONE

È prevista la realizzazione di strutture di fondazione di tipo profondo quali pali trivellati del diametro ϕ 1200 e lunghezza pari a 25 m.

La valutazione del carico limite verticale a **compressione** del palo viene effettuata facendo riferimento alle condizioni drenate per i materiali incoerenti ed alle condizioni non drenate per i materiali coerenti.

La portanza è espressa come somma di due contributi indipendenti:

- resistenza alla punta (alla base) Q_P ;
- resistenza lungo il fusto per attrito laterale Q_L ;

ovvero dalla formula:

$$Q_{lim} = Q_P + Q_L$$

Anche la valutazione del carico limite verticale a **trazione** del palo viene effettuata facendo riferimento alle condizioni drenate per i materiali incoerenti ed alle condizioni non drenate per i materiali coerenti.

La portanza è espressa come somma di due contributi indipendenti:

- peso proprio del palo W_P ;
- resistenza lungo il fusto per attrito laterale Q_L ;

ovvero dalla formula:

$$Q_{lim} = W_P + Q_L$$

4.1.1. Resistenza alla punta

La resistenza alla punta del palo è fornita dall'espressione:

$$P_{pu} = A_p(cN'_c + \eta\bar{q}N'_q + \frac{1}{2}\gamma BN'_\gamma s_\gamma)$$

dove

A_p (superficie della punta del palo) = $(\pi * D^2/4)$

γ = peso di volume del terreno

c = coesione

B = larghezza della punta del palo

L = lunghezza del palo

D = diametro del palo

q = sforzo verticale efficace agente (pressione geostatica) alla profondità a cui è posta la punta del palo

N_q, N_c = fattori di capacità portante

η = coefficiente che assume la seguente formulazione (Vesic)

$$\eta = \frac{1 + 2k_0}{3}$$

nella quale k_0 è il coefficiente di spinta a riposo.

Pertanto la resistenza alla punta del palo è fornita dalla seguente espressione:

$$P_{pu} = A_p(cN'_c + \eta\bar{q}(N'_q - 1))$$



Secondo Vesic, i fattori di capacità portante assumono le seguenti formulazioni:

$$N'_q = \frac{3}{3 - \sin \phi} \left\{ \exp \left[\left(\frac{\pi}{2} - \phi \right) \tan \phi \right] \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) I_{rr}^{(4 \sin \phi) / [3(1 + \sin \phi)]} \right\}$$

nella quale l'indice di rigidezza ridotto I_{rr} è pari a:

$$I_{rr} = \frac{I_r}{1 + \epsilon_v I_r}$$

l'indice di rigidezza I_r è pari a:

$$I_r = \frac{G}{c + \bar{q} \tan \phi} = \frac{G}{s}$$

ed ϵ_v è pari a:

$$\epsilon_v = \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)\sigma_z}{E(1 - \nu)}$$

e

$$N'_c = (N_q - 1) \cot \phi$$

4.1.2. Resistenza laterale del fusto

Il valore della capacità portante laterale del fusto del palo si ricava tramite la formula:

$$Q_L = \sum A_s * f_s$$

nella quale:

A_s = area della superficie laterale efficace del palo

f_s = resistenza che si sviluppa sulla superficie laterale del palo

\sum = sommatoria dei contributi dovuti ai diversi strati geotecnici in cui è suddiviso il palo.

La resistenza laterale f_s si calcola con il metodo α proposto da Tomlinson (1971), ovvero attraverso la formula:

$$f_s = \alpha c + K q \tan \delta$$

dove

α = coefficiente di adesione terreno-pali (pari a 0,40 per i terreni coesivi ed a 1,25 per i terreni incoerenti)

q = pressione efficace agente al centro dello strato di terreno considerato = γH_{med}

H_{med} = quota in mezzeria del tratto considerato rispetto alla sommità del palo

γ = peso di volume del terreno

δ = angolo di attrito efficace calcestruzzo-terreno di fondazione = ϕ

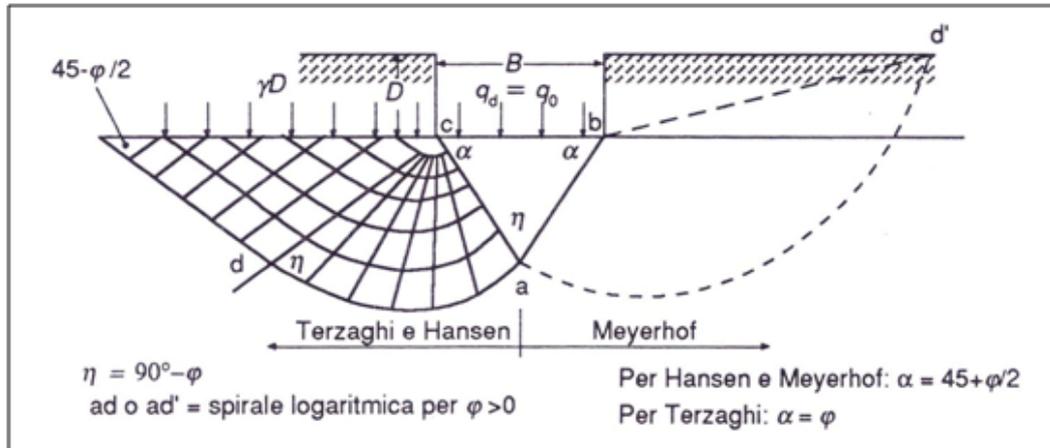
K = coefficiente empirico dipendente dalla natura del terreno e dalle modalità costruttive del palo = k_0 (coefficiente di spinta a riposo) (Ireland, 1957, Flates e Selnes, 1977, Tavenas, 1971)

4.2. CAPACITÀ PORTANTE DELLE FONDAZIONI SUPERFICIALI

Per il calcolo della capacità portante dei terreni di fondazione è stata utilizzata la relazione di **Meyerhof** (1951, 1963), per le piastre di base con carico verticale, che riprende la formulazione di Terzaghi opportunamente modificata mediante l'introduzione di coefficienti correttivi dipendenti dalla forma, profondità ed inclinazione della fondazione:



$$q_{lim} = c \cdot N_c \cdot s_c \cdot d_c + \gamma_1 \cdot D \cdot N_q \cdot s_q \cdot d_q + 0,5 \cdot \gamma_2 \cdot B \cdot N_y \cdot s_y \cdot d_y \quad (1)$$



dove:

c = coesione

γ_1 = peso volume del terreno posto al disopra del piano di fondazione;

γ_2 = peso volume del terreno di fondazione;

D = profondità di incasso della fondazione;

B = lato minore della fondazione

N_c , N_q e N_y = fattori di capacità portante, pari, nel caso di terreni:

$$N_q = e^{\pi \cdot \tan \varphi} \cdot \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)$$

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

$$N_y = (N_q - 1) \cdot \tan(1,4 \cdot \varphi)$$

N_c , N_q e N_y = fattori di capacità portante, pari, nel caso di roccia:

$$N_q = \tan^6 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)$$

$$N_c = 5 \cdot \tan^4 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)$$

$$N_y = N_q + 1$$

s_c , s_q e s_y , d_c , d_q e d_y = fattori di forma, pari a:

$$s_c = 1 + 0,2 \cdot K_p \cdot \frac{B}{L}$$

$$s_q = s_y = 1 + 0,1 \cdot K_p \cdot \frac{B}{L}$$

$$d_c = 1 + 0,2 \cdot \sqrt{K_p} \cdot \frac{D}{B}$$

$$d_q = d_y = 1 + 0,1 \cdot \sqrt{K_p} \cdot \frac{D}{B}$$

i_c , i_q e i_y = fattori di inclinazione dei carichi dovuti alle forze orizzontali indotte dal sisma, pari a:



$$i_c = i_q = 1 - \frac{\theta}{90}$$

$$i_y = \left(1 - \frac{\theta}{\varphi}\right)^2$$

nelle quali θ è l'angolo di inclinazione del carico = arctang(Khi) ove Khi nello spettro di progetto orizzontale corrisponde al valore delle ordinate al periodo T1 lungo l'asse delle ascisse, pari a

$$K_{hi} = S_S \cdot S_T \cdot \frac{a_g}{g}$$

z_c , z_q e z_y = fattori che tengono conto degli effetti cinematici sul terreno di fondazione secondo il criterio di Paolucci e Pecker, pari a:

$$z_q = z_y = \left(1 - \frac{K_{hk}}{\tan g \varphi}\right)^{0,35}$$

$$z_c = 1 - 0,32 \cdot K_{hk}$$

nelle quali k_{hk} è il coefficiente sismico orizzontale pari a:

$$K_{hk} = \beta_m \cdot S_S \cdot S_T \cdot \frac{a_g}{g}$$

dove β_m è il coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito, come indicato dalla tabella 7.11.I del D.M. 14.01.2008, di seguito riportata:

	Categoria di sottosuolo	
	A	B, C, D, E
	β_s	β_s
$0,2 < a_g(g) \leq 0,4$	0,30	0,28
$0,1 < a_g(g) \leq 0,2$	0,27	0,24
$a_g(g) \leq 0,1$	0,20	0,20

Nel caso di fondazioni su roccia il valore del q_{lim} è moltiplicato per R.Q.D.².

Per quanto concerne il valore del **coefficiente di sottofondo** (K di Winkler), è stata utilizzata la relazione proposta dal Vesic (1961) che correla K con il modulo di elasticità del terreno e della fondazione:

$$k'_s = 0,65 \cdot \sqrt[12]{\frac{E_d \cdot B^4}{E_f \cdot I_f}} \cdot \frac{E_s}{1 - \nu^2} \quad (2)$$

dove:

E_d (daN/cm²) = modulo elastico del terreno (Young);

E_f (daN / cm²) = modulo elastico della fondazione;

I_f (cm⁴) = momento d'inerzia della fondazione;

B (cm) = larghezza della fondazione;

ν = rapporto di Poisson.

Poiché il prodotto dei primi due fattori della (2) ha generalmente un valore prossimo all'unità, l'espressione può essere semplificata come segue:



$$k'_s = \frac{E_d}{B \cdot (1 - \nu^2)} \quad (3)$$

Nel caso di fondazione unitaria ($B = 1,00$ m) la costante elastica di sottofondo può essere assunta pari a:

$$k'_s = \frac{E_d}{(1 - \nu^2)} \quad (4)$$



5. COMBINAZIONI DI CALCOLO E VERIFICA AGLI STATI LIMITE ULTIMI (SLU)

In accordo con quanto stabilito dal D.M. 17/01/2018, per ogni stato limite ultimo deve essere rispettata la condizione:

$$E_d \leq R_d$$

dove E_d è il valore di progetto dell'azione o dell'effetto dell'azione

$$E_d = E \left[\gamma_F F_k; \frac{X_k}{\gamma_M}; a_d \right]$$

ovvero

$$E_d = \gamma_E \cdot E \left[F_k; \frac{X_k}{\gamma_M}; a_d \right]$$

con $\gamma_E = \gamma_F$, e dove R_d è il valore di progetto della resistenza del sistema geotecnico:

$$R_d = \frac{1}{\gamma_R} R \left[\gamma_F F_k; \frac{X_k}{\gamma_M}; a_d \right]$$

Effetto delle azioni e resistenza sono espresse in funzione delle azioni di progetto $\gamma_F F_k$, dei parametri di progetto X_k/γ_M e della geometria di progetto a_d . L'effetto delle azioni può anche essere valutato direttamente come $E_d = E_k \cdot \gamma_E$. Nella formulazione della resistenza R_d , compare esplicitamente un coefficiente γ_R che opera direttamente sulla resistenza del sistema.

La verifica della suddetta condizione deve essere effettuata impiegando diverse combinazioni di gruppi di coefficienti parziali, rispettivamente definiti per le azioni (A1 e A2), per i parametri geotecnici (M1 e M2) e per le resistenze (R1, R2 e R3). I diversi gruppi di coefficienti di sicurezza parziali sono scelti nell'ambito di due approcci progettuali distinti e alternativi.

Nel primo approccio progettuale (Approccio 1) sono previste due diverse combinazioni di gruppi di coefficienti: la prima combinazione è generalmente più severa nei confronti del dimensionamento strutturale delle opere a contatto con il terreno, mentre la seconda combinazione è generalmente più severa nei riguardi del dimensionamento geotecnico.

Nel secondo approccio progettuale (Approccio 2) è prevista un'unica combinazione di gruppi di coefficienti, da adottare sia nelle verifiche strutturali sia nelle verifiche geotecniche.

Nelle verifiche agli stati limite ultimi per il dimensionamento geotecnico delle fondazioni (GEO), si considera lo sviluppo di meccanismi di collasso determinati dal raggiungimento della resistenza del terreno interagente con le fondazioni. L'analisi può essere condotta:

- con l'**approccio 1** attraverso la **Combinazione 2 (A2+M2+R2)**, nella quale i parametri di resistenza del terreno sono ridotti tramite i coefficienti del gruppo M2 e la resistenza globale del sistema tramite i coefficienti γ_R del gruppo R2. Nell'uso di questa combinazione, le azioni di progetto in fondazione derivano da analisi strutturali che devono essere svolte impiegando i coefficienti parziali del gruppo A2;
- con l'**approccio 2** attraverso la **Combinazione unica (A1+M1+R3)**, nella quale i coefficienti parziali sui parametri di resistenza del terreno (M1) sono unitari e la resistenza globale del sistema è ridotta tramite i coefficienti γ_R del gruppo R3. Tali coefficienti si applicano solo alla resistenza globale del terreno, che è costituita, a seconda dello stato limite considerato, dalla forza normale alla fondazione che produce il



collasso per carico limite, o dalla forza parallela al piano di scorrimento della fondazione che ne produce il collasso per scorrimento.

La verifica agli stati limite ultimi (SLU) sarà effettuata tenendo conto dei valori dei coefficienti parziali riportati nelle Tab. 6.2.I, 6.2.II e 6.4.I di cui al D.M. 17/01/2018

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

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

PARAMETRO	GRANDEZZA ALLA QUALE APPLICARE IL COEFFICIENTE PARZIALE	COEFFICIENTE PARZIALE γ_M	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \phi'_k$	$\gamma_{\phi'}$	1,0	1,25
Coesione efficace	c'_k	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
Resistenza non drenata	c_{uk}	γ_{cu}	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	γ	γ_γ	1,0	1,0

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

La verifica di stabilità globale deve essere effettuata, analogamente a quanto previsto nel § 6.8, secondo la Combinazione 2 (A2+M2+R2) dell'Approccio 1, tenendo conto dei coefficienti parziali riportati nelle Tabelle 6.2.I e 6.2.II per le azioni e i parametri geotecnici e nella Tab. 6.8.I per le resistenze globali. **Le rimanenti verifiche devono essere effettuate applicando la combinazione (A1+M1+R3) di coefficienti parziali prevista dall'Approccio 2**, tenendo conto dei valori dei coefficienti parziali riportati nelle Tabelle 6.2.I, 6.2.II e 6.4.I.

Nelle verifiche nei confronti di SLU di tipo strutturale (STR), il coefficiente γ_R non deve essere portato in conto.

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

Tabella 6.4.I - Coefficienti parziali γ_R per le verifiche agli stati limite ultimi di fondazioni superficiali



6. VERIFICHE AGLI STATI LIMITE DI ESERCIZIO (SLE)

Saranno presi in considerazione almeno i seguenti stati limite di esercizio, quando pertinenti:

- eccessivi cedimenti o sollevamenti;
- eccessivi spostamenti trasversali.

Specificamente, saranno calcolati i valori degli spostamenti e delle distorsioni nelle combinazioni caratteristiche previste per gli stati limite di esercizio di cui al § 2.5.3 del DM 17.01.2018, per verificarne la compatibilità con i requisiti prestazionali della struttura in elevazione, come prescritto dalla condizione [6.2.7]. La geometria della fondazione (numero, lunghezza, diametro e interasse dei pali) sarà stabilita nel rispetto dei summenzionati requisiti prestazionali, tenendo opportunamente conto degli effetti di interazione tra i pali e considerando i diversi meccanismi di mobilitazione della resistenza laterale rispetto alla resistenza alla base, soprattutto in presenza di pali di grande diametro.

