

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO PER LA  
PRODUZIONE DI ENERGIA MEDIANTE LO SFRUTTAMENTO DEL VENTO  
NEL TERRITORIO COMUNALE DI CAMUGNANO (BO) LOC. TRASSERRA  
POTENZA NOMINALE 27 MW

**PROGETTO DEFINITIVO - SIA**

PROGETTAZIONE E SIA

ing. Fabio PACCAPELO

ing. Andrea ANGELINI

ing. Antonella Laura GIORDANO

ing. Francesca SACCAROLA

COLLABORATORI

ing. Giulia MONTRONE

geom. Rosa Contini

dr. Pietro Paolo Lopetuso

STUDI SPECIALISTICI

GEOLOGIA

geol. Matteo DI CARLO

ACUSTICA

ing. Sabrina SCARAMUZZI

VINCA E STUDIO FAUNISTICO

dr. Luigi Raffaele LUPO

STUDIO BOTANICO VEGETAZIONALE E

PEDO-AGRONOMICO

dr. Gianfranco GIUFFRIDA

ARCHEOLOGIA

NÒSTOI S.R.L.

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	10
2.3. USO DEL SUOLO	11
3. STRATIGRAFIA E CARATTERI FISICO-MECCANICI DEI TERRENI	13
4. CENNI TEORICI SULLE VERIFICHE GEOTECNICHE	15
4.1. CARICO LIMITE VERTICALE DEI PALI DI FONDAZIONE	15
4.1.1. <i>Resistenza alla punta</i>	15
4.1.2. <i>Resistenza laterale del fusto</i>	16
4.2. CAPACITÀ PORTANTE DELLE FONDAZIONI SUPERFICIALI	16
5. COMBINAZIONI DI CALCOLO E VERIFICA AGLI STATI LIMITE ULTIMI (SLU)	20
6. VERIFICHE AGLI STATI LIMITE DI ESERCIZIO (SLE)	22



## 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 Camugnano (BO) 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.

Il progetto prevede la costruzione di n. 6 aerogeneratori della potenza unitaria di 4.5 MW (per una potenza complessiva di 27,0 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.

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

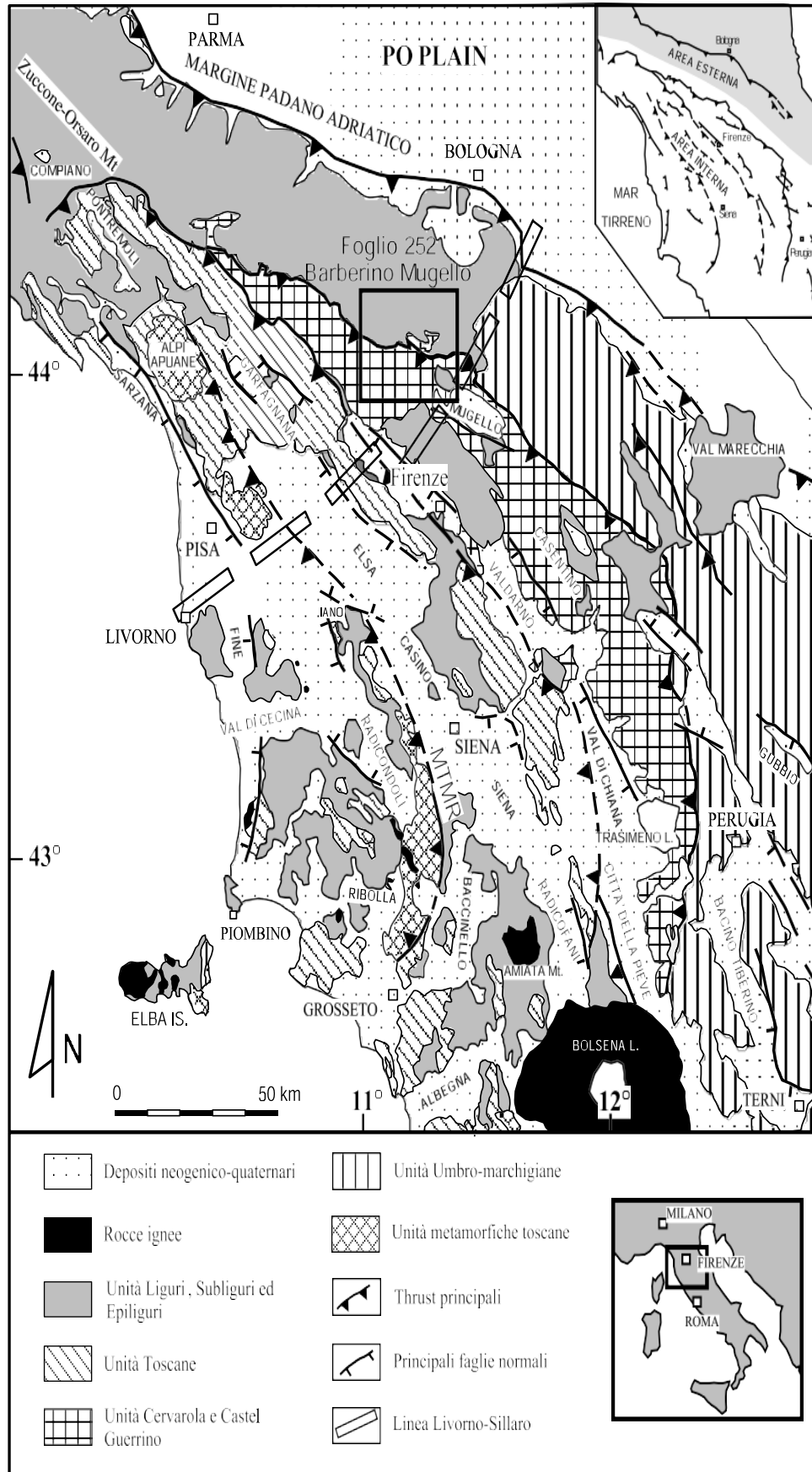
### 2.1. ASSETTO GEOLOGICO E STRUTTURALE

L'Appennino settentrionale è una catena a falde sviluppatesi principalmente nel terziario in seguito alla collisione tra due blocchi continentali rappresentati dalla zolla europea, o sarda-corsa, e dalla micro-placca Adriatico-Padana. Il processo di collisione tra queste due zolle continentali è stato preceduto dalla chiusura di un'area oceanica: il paleo-oceano ligure-piemontese, parte della Tedita.

Il settore investigato ricade nella Provincia di Bologna a cavallo del crinale principale della catena dell'Appennino Settentrionale.

Questa catena, che fa parte del sistema alpino-himalaiano, è il risultato della chiusura di un originario oceano e della successiva deformazione del suo margine continentale passivo (placca Adria Auctt.). L'evoluzione tettonica che ha portato all'attuale assetto è avvenuta in varie fasi deformative a partire dal Triassico ed è strettamente connessa all'evoluzione della catena alpina prima, e successivamente all'evoluzione del Mediterraneo centrale. Nel Triassico medio le prime fasi sono riconducibili al rifting di una crosta continentale a cui segue, dal Giurassico inferiore-medio, la formazione di un oceano (Oceano Ligure-Piemontese). Dal Cretaceo superiore iniziano le fasi di convergenza con la creazione di una zona di subduzione che porta, nell'Eocene superiore-Oligocene, alla collisione continentale a seguito della completa consunzione dell'Oceano Ligure-Piemontese. Dal punto di vista paleogeografico è dunque possibile distinguere un dominio oceanico ed un dominio continentale. Nel dominio oceanico si imposta, a partire dal Giurassico superiore, la sedimentazione pelagica sia calcarea che silicea che darà origine alle Unità Liguri s.l. Nel dominio continentale, fin dal Triassico medio, si depositano successioni che ricalcano l'evoluzione di un margine passivo; questo margine diventa attivo negli ultimi stadi della sua evoluzione in età oligo-miocenica. Tali successioni vengono generalmente denominate "toscani" e "umbro-marchigiane" sulla base della loro attuale distribuzione geografica. Durante le fasi collisionali le Unità Liguri si impilano le une sulle altre e successivamente sovra scorrono sulle unità più esterne toscane ed umbro-marchigiane.





Esse costituiscono una coltre alloctona relativamente continua nel settore settentrionale dell'Appennino, dalla Liguria, a NW, fino al T. Sillaro, in corrispondenza del versante emiliano. Durante le fasi di avanzamento verso est e nord-est sulle Unità Liguri si depongono in discordanza i depositi epiliguri prevalentemente affioranti sul versante padano dell'Appennino Settentrionale. Più a sud, in Toscana ed in Umbria, gli affioramenti delle Unità Liguri e della Successione epiligure sono molto discontinui e sporadici. Il fronte della catena, deformato da sistemi di pieghe e thrusts strutturati in una serie di archi (PIERI & GROPPi, 1981; CASTELLARIN et alii, 1986) e sepolto dai sedimenti quaternari padano-adriatici, si sviluppa prevalentemente nel Pliocene e nel Pleistocene con l'incorporazione di parte dei sedimenti coevi entro la catena stessa. Nella porzione più interna della catena, già a partire dal Tortoniano superiore-Messiniano inferiore, dopo una fase di sollevamento ed erosione, inizia la sedimentazione di potenti successioni prevalentemente terrigene di ambiente da continentale a lacustre e marino, deposte sia sulla coltre alloctona ligure che sulle sottostanti unità toscane. Questi depositi attualmente si rinvergono in bacini allungati in senso longitudinale separati tra loro da "dorsali" costituite dal substrato toso-ligure. In parziale sovrapposizione con la sedimentazione nei bacini, si è sviluppato un magmatismo a vario chimismo a partire dal Miocene superiore (SERRI et alii, 1993 con bibliografia).

L'area in esame, ricade nel Foglio 252 della Carta Geologica 1:50.000 "Barberino del Mugello".

Da un punto di vista strutturale si individua una serie di strutture con andamento circa E-W che mettono a contatto queste differenti unità (Unità tettoniche Toscane s.s., Unità tettonica Sestola-Vidiciatico, Unità tettoniche Liguri). Più ad est si hanno strutture dislocative complesse ad andamento NNE-SSW riconducibili alla così detta "Linea Livorno-Sillaro" (BORTOLOTTI, 1966; BRUNI, 1973; DE JAGER, 1979; BETTELLI & PANINI, 1992b), lungo le quali le unità citate vengono a contatto nuovamente. Altra vistosa caratteristica strutturale del Foglio in esame è la presenza della grande struttura di Castiglione dei Pepoli nota da tempo come un'aticlinale nella quale affiorano le Unità tettoniche Toscane più esterne.

Le Unità tettoniche Liguri nel settore settentrionale del Foglio costituiscono una coltre continua, mentre nel settore meridionale esse affiorano sottoforma di klippen, sovrapposte alle Unità tettoniche Toscane o ad esse giustapposte da dislocazioni ad alto angolo connesse alla tettonica più recente. Le Unità tettoniche Liguri sono rappresentate dalle seguenti unità: Unità tettonica Monghidoro, Unità tettonica Leo e Unità tettonica Morello. L'Unità tettonica Leo è a sua volta suddivisa in Sottunità tettonica Camugnano e Sottunità tettonica di base. I rapporti tra le formazioni all'interno di ciascuna unità, pur presentandosi spesso di natura tettonica, è presumibile che fossero stati originariamente di natura stratigrafica o sono stati osservati come tali in altre aree dell'Appennino settentrionale.

Le Unità tettoniche Toscane sono rappresentate da due unità tettoniche principali, l'Unità tettonica Sestola-Vidiciatico e l'Unità tettonica Cervarola, quest'ultima suddivisa al suo interno in quattro sottunità tettoniche separate tra loro da superfici di sovrascorrimento: Sottunità tettonica Acquerino, Sottunità tettonica T. Carigiola, Sottunità tettonica Granaglione e Sottunità tettonica Castiglione dei Pepoli.

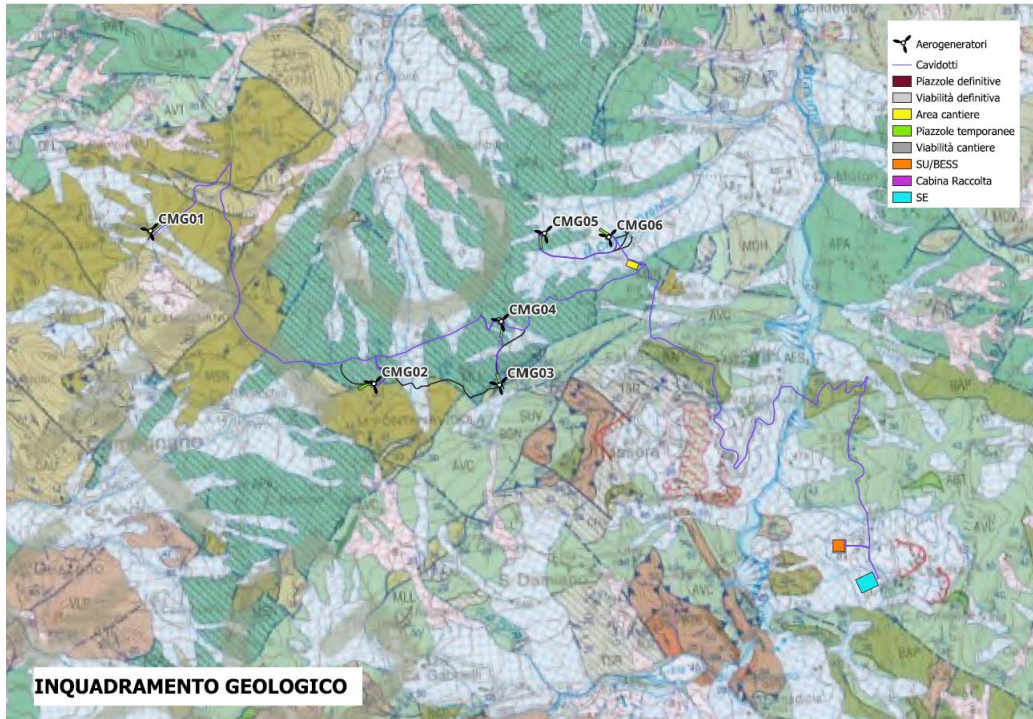
In discordanza sulle Unità tettoniche Liguri (prevalentemente sull'Unità tettonica Monghidoro) si sono depositi i terreni appartenenti alla Successione epiligure, affioranti molto limitatamente nella porzione nord-occidentale di questo Foglio e attualmente anch'essi in contatto prevalentemente tettonico (attraverso faglie ad alto angolo) con le Unità tettoniche Liguri.

Nel settore sud-orientale del Foglio affiorano infine i terreni continentali appartenenti alla Successione del Mugello, depositi in discordanza sia sull'Unità tettonica Cervarola sia sull'Unità tettonica Morello. Alla Successione neogenico-quaternaria del margine padano-adriatico sono invece stati attribuiti i depositi terrazzati presenti lungo le più importanti aste vallive del settore emiliano. I rapporti tra le varie unità tettoniche, evidenziate nel Foglio e nello schema tettonico allegato, sono piuttosto complessi poiché siamo in presenza di terreni che hanno avuto una storia deformativa lunga ed articolata durante la strutturazione della catena appenninica, dalla "fase ligure" o da altre più precoci, alla tettonica più recente, quaternaria.

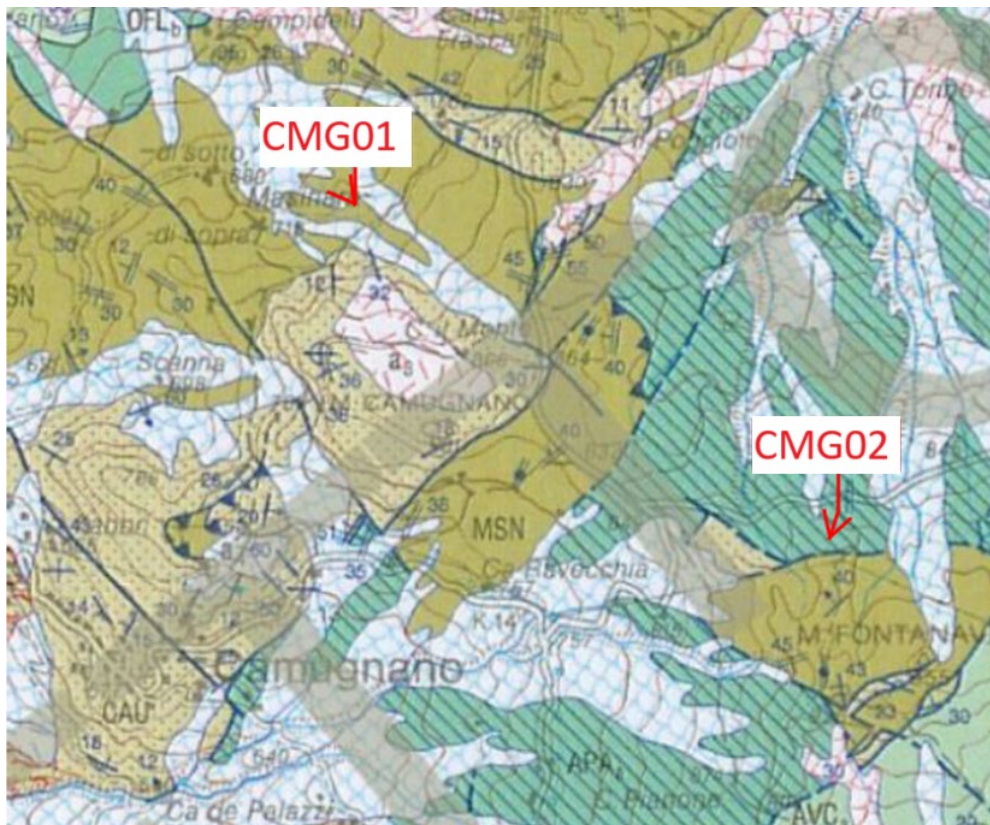
Si illustrano di seguito inquadramenti di dettaglio dell'area di impianto sulla carta geologica.







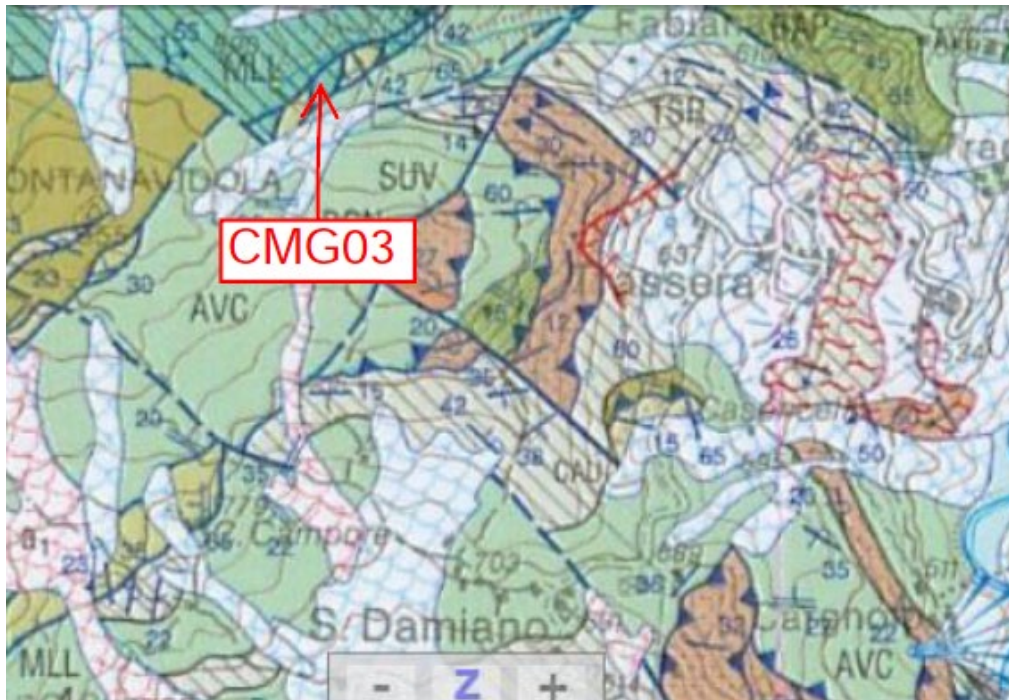
*Inquadramento impianto su carta geologica 1: 50.000 Foglio 252  
Aerogeneratori e cavidotto nel comune di Camugnano (BO), SSE nel comune di Castiglione dei Pepoli (BO)*



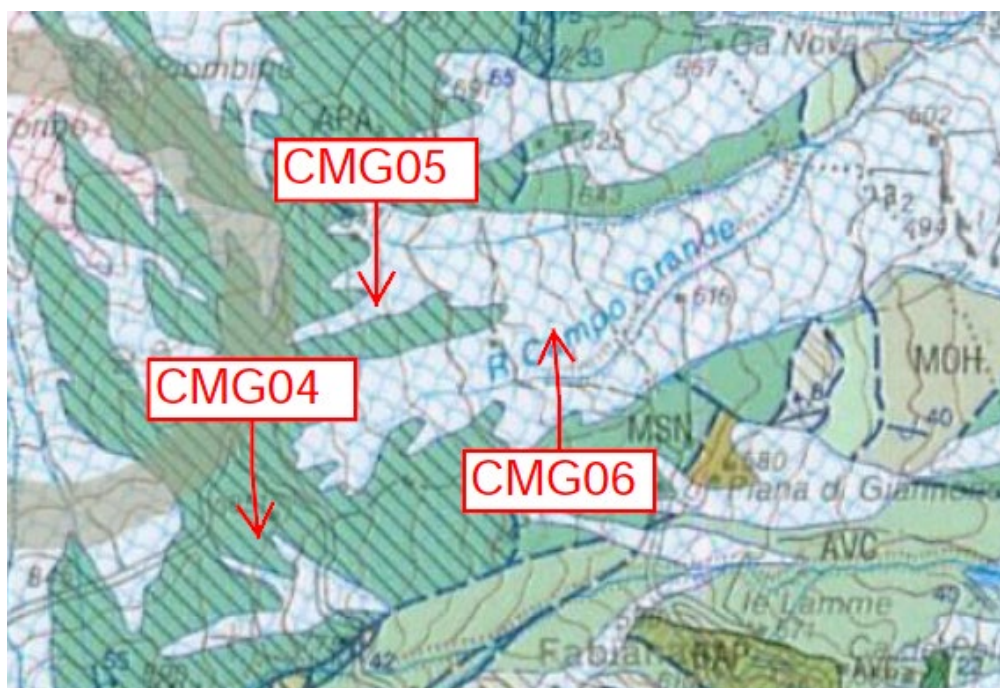
*Inquadramento geologico Aerogeneratori CMG01 e CMG02 Carta geologica 1:50.000 Foglio 252 –“Barberino del Mugello”*







*Inquadramento geologico Aerogeneratori CMG03 Carta geologica 1:50.000 Foglio 252 –“Barberino del Mugello”*



*Inquadramento geologico Aerogeneratori CMG04, CMG05 e CMG06 Carta geologica 1:50.000 Foglio 252 –“Barberino del Mugello”*









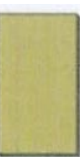








*Inquadramento geologico Area Sottostazione Elettrica Carta geologica 1:50.000 Foglio 252 –“Barberino del Mugello”*



**LEGENDA CARTA GEOLOGICA (FOGLIO 252 della carta geologica in scala 1:50.000)**

	<b>a<sub>3</sub></b> <b>Depositi di versante s.l.</b> Materiale eterogeneo ed eterometrico accumulato lungo i versanti per gravità e ruscellamento.
	<b>a<sub>4</sub></b> <b>Depositi eluvio-colluviali</b> Sabbie, limi ed argille, talora pedogenizzati, derivanti dall'alterazione della roccia del substrato ed accumulati in posto o dopo un breve trasporto per ruscellamento.
	<b>a<sub>6</sub></b> <b>Detrito di falda</b> Materiale eterogeneo ed eterometrico accumulato per gravità ai piedi di scarpate, costituito da frammenti litoidi e spigolosi, non cementati, generalmente privi di matrice.
	<b>b<sub>1</sub></b> <b>Depositi alluvionali in evoluzione</b> Depositi prevalentemente ghiaiosi, talora embriciati, localmente con blocchi e/o materiali fini, affioranti in alveo o in aree adiacenti stagionalmente interessate dalle piene.
	<b>b<sub>2</sub></b> <b>Depositi alluvionali terrazzati</b> Depositi ghiaiosi, sabbiosi e limosi talora embriciati, attualmente posti a quote più elevate rispetto all'alveo (bacino idrografico del F. Bisenzio).
	<b>f<sub>1</sub></b> <b>Depositi lacustri attuali</b> Depositi sabbioso-limosi, subordinatamente ghiaiosi, di origine lacustre.
	<b>MSN</b> <b>ARGILLITI DI MASINARA</b> Argilliti fissili con intercalazioni di siltiti e areniti finissime gradate in strati sottili e medi. Il colore è verde, grigio-nerastro e rossastro in superficie fresca e viola ocraceo in superficie alterata. La foliazione è molto sviluppata; è presente una silicizzazione diffusa con ricristallizzazione delle siltiti ed i carbonati sono assenti. I livelli più competenti sono spesso budinati o interessati da pieghe isoclinali e trasposizione. Potenza geometrica massima di 300-400 metri. Contatto stratigrafico inferiore non preservato. Depositi pelagici (?) e torbiditici distali. <b>CENOMANIANO-TURONIANO</b>
	<b>SUV</b> <b>ARENARIE DI SUVIANA</b> Alternanze arenaceo-pelitiche in strati gradati prevalentemente spessi e molto spessi. Le areniti alla base degli strati sono da medie a grossolane (localmente molto grossolane) con composizione feldspatolitica. A/P variabile da > a >> 1. Paleocorrenti dai quadranti occidentali. Potenza massima 150 metri. Contatto inferiore netto su BGN <sub>1</sub> , BGN e, localmente, su BLD. Depositi torbiditici di lobo arenaceo (e di riempimento di canale?). <b>BURDIGALIANO-LANGHIANO (MN<sub>3-4</sub>)</b>
	<b>BAP</b> <b>BRECCIE ARGILLOSE POLIGENICHE</b> Breccie poligeniche a matrice argillosa, grigie in superficie fresca e nocciola in superficie alterata. All'interno sono inclusi clasti argillitici di dimensione millimetrica e di calcari micritici, di età cretacea, grigi in superficie fresca e bianco-giallastri in superficie alterata, di dimensioni centimetriche, decimetriche o più raramente metriche. Occasionalmente sono anche presenti clasti decimetrici di siltiti, areniti e marne calcaree, queste ultime di età oligo-miocenica, ed inclusi costituiti da grossi lembi di successioni stratigrafiche (metrici o decametrici) riferibili a MMA e AVC. Potenza stimata massima 150 metri. Questa unità affiora in vari lembi con contatti attualmente tettonizzati con AVC. Depositi di colata sottomarina di fango e detrito grossolano. <b>EOCENE-MIOCENE INF</b>
	<b>MLL</b> <b>FORMAZIONE DI MONTE MORELLO</b> Calcareniti e calcilutiti gradate passanti al tetto a calcari marnosi e marne biancastre, in strati da medi a molto spessi, fino a banchi. Localmente areniti fini in strati da medi a spessi di colore grigio, marrone all'alterazione. Potenza parziale affiorante circa 600 metri. Contatti stratigrafici inferiore e superiore non preservati. Depositi torbiditici di piana bacinale con megatorbiditici carbonatiche. <b>EOCENE INF-MEDIO</b>
	<b>AVC<sub>a</sub></b> <b>AVC</b> <b>UNITÀ ARGILLOSO-CALCAREA</b> Argilliti, talora marnose, in bande blu, verdi, grigie e nerastre in superficie fresca e nocciola piuttosto uniforme in superficie alterata, in strati sottili, con intercalate calcilutiti grigie (bianco-giallastre in superficie alterata), talora marnose al tetto prevalentemente in strati medi e spessi. Talora sono presenti anche strati gradati sottili di siltiti e areniti. Rapporto Argilla/Calcare > 1 o >> 1; a luoghi le calcilutiti e le siltiti sono assenti. Deformazione tettonica molto intensa che dà origine ad una foliazione ben marcata estremamente pervasiva nelle argilliti, mentre i livelli più competenti si presentano sottoforma di boudins e cemiere sradicate; solo molto raramente la stratificazione originale è preservata. Sono presenti inclusi ofiolitici rappresentati da basalti, gabbri, serpentiniti e peridotiti e inclusi di breccie poligeniche ad elementi ofiolitici, talora di dimensioni cartografabili; queste sono rappresentate da breccie mono o poligeniche che presentano clasti da millimetrici a decimetrici di rocce ofiolitiche, arenarie ofiolitiche, calcilutiti e diaspri (AVC <sub>a</sub> ). Potenza geometrica massima fino a 700-800 metri. Contatti stratigrafici inferiore e superiore non preservati. Depositi pelagici e torbiditici di piana bacinale. <b>AURIANO-EOCENE?</b>





### FORMAZIONE DI CASTIGLIONE DEI PEPOLI (CDP)

Alternanze arenaceo-pelitiche in strati gradati con areniti da nettamente prevalenti a leggermente subordinate. Le areniti hanno colore grigio, composizione litofeldspatica e sono ben cementate. Le peliti sono anch'esse grigie e moderatamente indurite. Paleocorrenti con provenienza dei flussi da W-NW. La formazione è stata interamente suddivisa in due membri parzialmente eteropici. Potenza presumata oltre 1000 metri. Contatto inferiore netto su STA<sub>3</sub>. Depositi di un singolo sistema torbiditico interrotto da un ricoprimento tettonico e da depositi gravitativi associati.

**BURDIGALIANO? - LANGHIANO (MNN<sub>4a</sub>? - MNN<sub>5a</sub>)**

**CDP<sub>2</sub>** membro arenaceo-pelitico  
Alternanze arenaceo-pelitiche in strati gradati da spessi e molto spessi (prevalenti) a sottili e medi (subordinati), con geometria piano-parallela. Gli strati variano da arenaceo-pelitici a pelitico-arenacei. La grana alla base degli strati arenitici varia da media a molto fine. Il rapporto A/P complessivo varia da poco > 1 a poco < 1. Contatto stratigrafico inferiore non affiorante. Potenza parziale affiorante 600-700 metri. Depositi torbiditici di lobo arenaceo e di frangia di lobo.  
**LANGHIANO (MNN<sub>4b</sub> - MNN<sub>5a</sub>)**

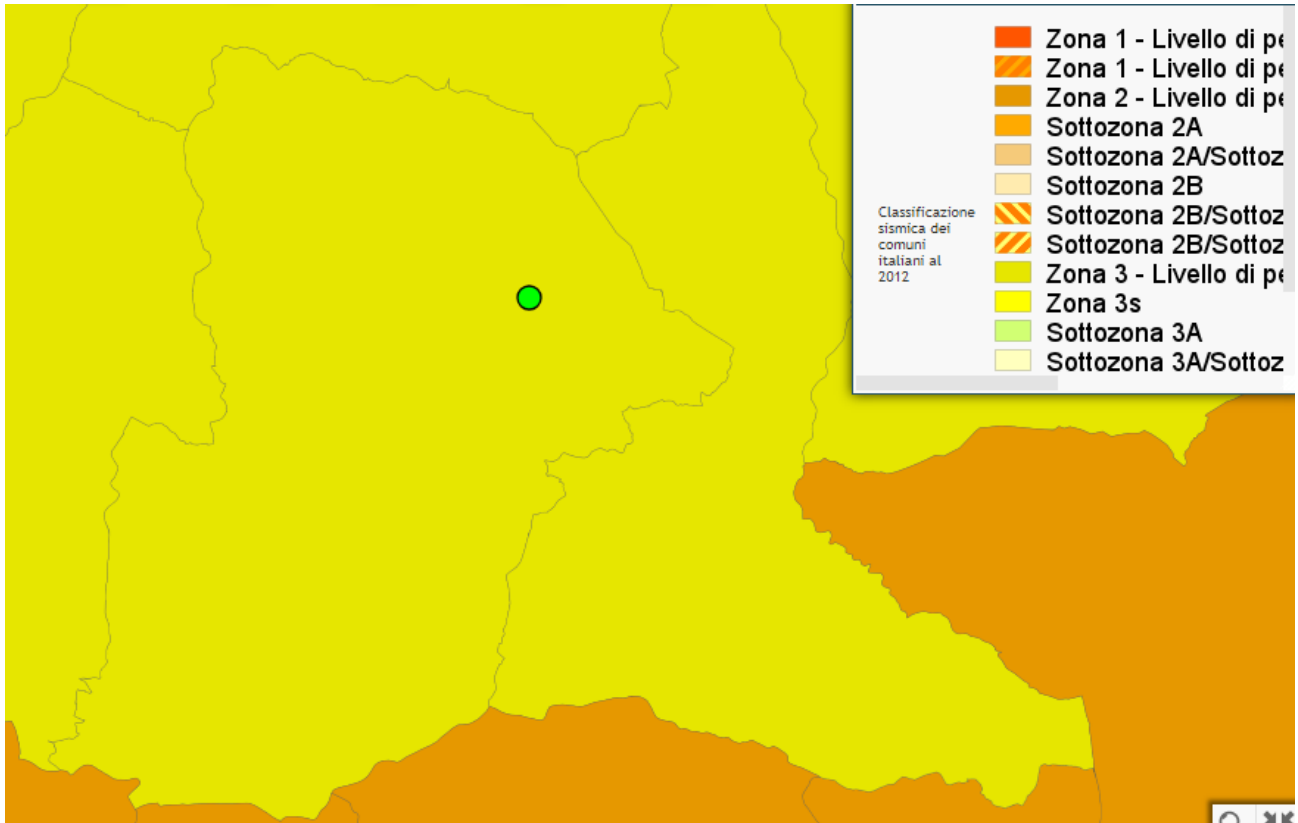
**CDP<sub>1</sub>** membro arenaceo  
Alternanze arenaceo-pelitiche in strati gradati da molto spessi (nettamente prevalenti) a sottili e medi (da nettamente subordinati a quasi assenti), con geometria piano-parallela. Gli strati più spessi sono quasi esclusivamente arenacei con base a grana media e con tetto costituito da pochi centimetri o decimetri di pelite; gli strati sottili e medi variano da prevalentemente pelitici a pelitico-arenacei. Il rapporto A/P complessivo è comunemente >> 1. Potenza parziale affiorante circa 500 metri. Contatto inferiore stratigrafico netto su STA<sub>3</sub>. Depositi torbiditici di lobo arenaceo.  
**BURDIGALIANO? - LANGHIANO (MNN<sub>4a</sub>? - MNN<sub>5a</sub>)**

direzione ed immersione degli strati	10	strati diritti		faglia inversa certa, incerta i triangoli indicano la parte rialzata
	+	strati orizzontali		sovrascorrimento certo, incerto i triangoli indicano la parte sovrascorsa
	+	strati rovesciati orizzontali		orlo di terrazzo
	10	strati rovesciati		orlo di scarpata di frana
	•	strati verticali (il pallino indica la base)		superficie assiale di sinclinale certa, incerta
	10	strati a polarità sconosciuta		superficie assiale di anticlinale certa, incerta
	+	strati verticali a polarità sconosciuta		superficie assiale di antiforme certa, incerta
	+	superficie di clivaggio o scistosità orizzontale		superficie assiale di sinforme certa, incerta
	10	superficie di clivaggio o scistosità inclinata		zona cataclastica
	+	superficie di clivaggio o scistosità verticale		crollo e scivolamento in blocco
	10	asse di piega		conoide alluvionale attivo
	→	direzione e verso di paleocorrente		discarica
	~	slumping		cava attiva, inattiva
	---	contatto stratigrafico certo, incerto		pozzo per ricerca mineraria
	---	contatto stratigrafico inconforme certo, incerto		sondaggio per ricerca di idrocarburi
	---	contatto tettonico indifferenziato certo, incerto		struttura antropica
	.....	orizzonte e strato guida		traccia di sezione geologica
	---	faglia certa, incerta		
	---	faglia diretta certa, incerta i trattini indicano la parte ribassata		

L'Aerogeneratore **CMG01** insiste su terreni costituiti da argilliti con intercalazioni di siltiti e areniti finissime in strati sottili e medi, il colore è grigio-verdastro con sfumature rossastre e nerastre (**MSN**). Gli aerogeneratori **CGM02**, **CGM03** e **CGM04** insistono su terreni costituiti da argilliti grigie e verdognole. Gli aerogeneratori **CMG05** e **CMG06** e l'Area della Sottostazione Elettrica **SSE** ricadono su terreni costituiti da depositi di versante, limi e argille con pietrisco talora pedogenizzati.

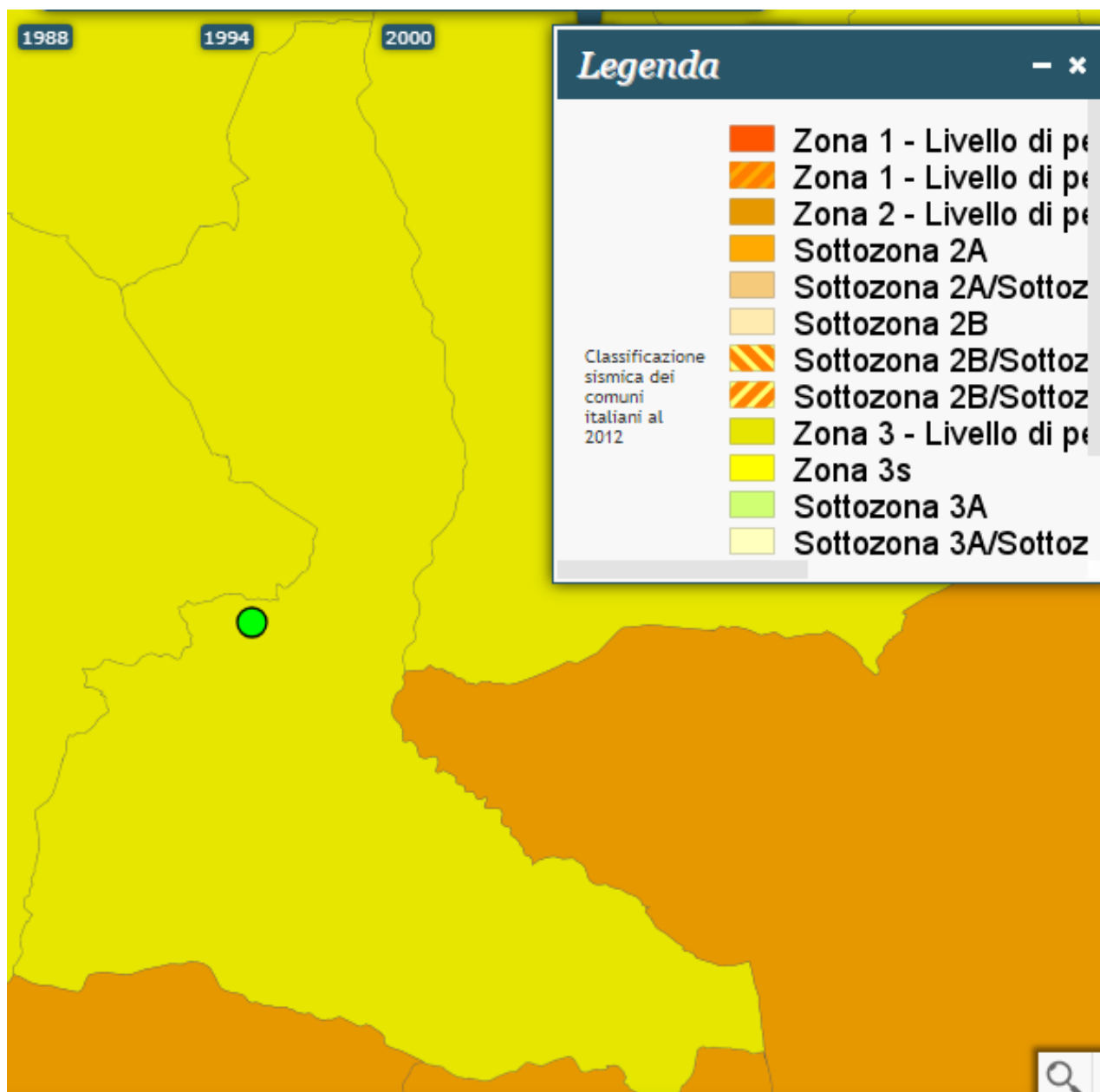


## 2.2. INQUADRAMENTO SISMICO DELL'AREA



Classificazione sismica area Aerogeneratori sta nel comune di Camugnano (BO)





Classificazione sismica Area Sottostazione Elettrica sita nel comune di Castiglione dei Pepoli (BO)

	Classificazione 2003	PGA (g)
Comune di Camugnano (BO)	<b>Zona 3</b>	0.05 g < PGA < 0.15 g
Comune di Castiglione dei Pepoli (BO)	<b>Zona 3</b>	0.05 g < PGA < 0.15 g

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

### 2.3. USO DEL SUOLO

La trasformazione del suolo da uno stato naturale o agricolo, quindi comunque libero da copertura, ad uno artificiale (coperto da cemento o asfalto), prende il nome di consumo di suolo. Il consumo è una delle



diverse pressioni che l'uomo esplica sulla matrice suolo, dovute all'urbanizzazione e alle infrastrutture, all'agricoltura industriale, allo stoccaggio e trattamento dei rifiuti, alla desertificazione e alla progressiva scomparsa di paesaggi naturali.

Il Programma europeo CORINE (Coordination of Information on the Environment) è stato approvato il 27 giugno 1985, come programma sperimentale per la raccolta, il coordinamento e la messa a punto delle informazioni sullo stato dell'ambiente e delle risorse naturali della Comunità. All'interno dei progetti che compongono la totalità del programma CORINE (Biotopi, Emissioni atmosferiche, Vegetazione naturale, Erosione costiera, etc.) il Land Cover costituisce il livello di indagine sull'occupazione del suolo. Obiettivo primario è la creazione di una base dati vettoriale omogenea, relativa alla copertura del suolo classificato sulla base di una nomenclatura unitaria per tutti i Paesi della Unione Europea.

Il rilievo, effettuato all'inizio degli anni Novanta dalla UE sul territorio di tutti gli stati membri (rappresentato alla scala 1:100.000), ha prodotto una classificazione secondo una Legenda di 44 classi suddivisa in 3 livelli gerarchici con una unità minima cartografata di 25 ettari.

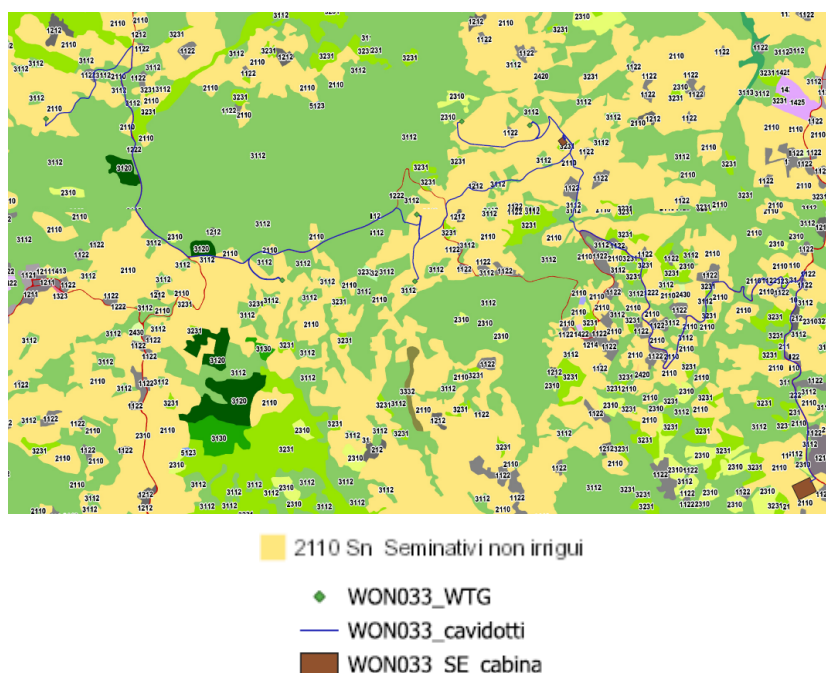
Per analizzare l'uso del suolo dell'area in esame si è consultato il geoportale Emilia Romagna in cui sono presenti i tematismi ottenuti dal progetto CORINE LAND COVER dell'anno 2020.

Osservando l'inquadramento del layout, le aree d'installazione ricadono nelle seguenti categorie di uso del suolo:

## 2.1 Seminativi

Superfici coltivate, regolarmente arate e generalmente sottoposte ad un sistema di rotazione (cereali, leguminose, foraggiere e colture erbacee in genere).

**2.1.1.0 Seminativi in aree non irrigue (Sn)** Sono da considerare perimetri non irrigui quelli situati in aree collinari e montane dove non è praticata l'irrigazione.



### 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 distinto, in tre sismostrati ciascuno 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:

✓ Aerogeneratore CMG01: si individuano tre sismostrati

	Velocità Onde S in m/s	Intervallo di profondità (m)	Descrizione
1	229	0,0 ÷ 3,0	<i>Limo argilloso a struttura caotica</i>
2	381	3,0 ÷ 8,5	<i>Argille siltose prevalentemente di colore giallastro con livelletti grigiastri con fenomeni di alterazione</i>
3	748	8,5 ÷ 35,0	<i>Argille grigiastre scure con livelli di calcareniti e calcilutiti</i>

✓ Aerogeneratori CMG02, CMG03 e CMG04: si individuano tre sismostrati

	Velocità Onde S in m/s	Intervallo di profondità (m)	Descrizione
1	192	0,0 ÷ 2,0	<i>Limo argilloso a struttura caotica</i>
2	445	2,0 ÷ 5,5	<i>Argille siltose e limi prevalentemente di colore giallo-grigiastri con fenomeni di alterazione</i>
3	724	5,5 ÷ 35,0	<i>Argille grigiastre scure con livelli di calcilutiti</i>

✓ Aerogeneratori CMG05 e CMG06: si individuano tre sismostrati

	Velocità Onde S in m/s	Intervallo di profondità (m)	Descrizione
1	291	0,0 ÷ 2,0	<i>Limo argilloso a struttura caotica</i>
2	446	2,0 ÷ 5,5	<i>Argille siltose e limi prevalentemente di colore giallo-grigiastri con fenomeni di alterazione</i>
3	583	5,5 ÷ 35,0	<i>Argille grigiastre scure con livelli di calcilutiti</i>

✓ SSE: si individuano tre sismostrati

	Velocità Onde S in m/s	Intervallo di profondità (m)	Descrizione
1	263	0,0 ÷ 3,0	<i>Limo argilloso a struttura caotica</i>
2	308	3,0 ÷ 9,0	<i>Argille siltose e limi prevalentemente di colore giallo-grigiastri</i>
3	506	9,0 ÷ 35,0	<i>Argille grigiastre scure con livelli di calcilutiti</i>

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

- Limo argilloso a struttura caotica (Tab. 1)
- Argille siltose prevalentemente di colore giallastro con livelletti grigiastri con fenomeni di alterazione (Tab. 2)
- Argille grigiastre scure con livelli di calcareniti e calcilutiti (Tab. 3)
- Argille siltose e limi prevalentemente di colore giallo-grigiastri con fenomeni di alterazione (Tab. 4)



- Argille grigiastre scure con livelli di calcilutiti (Tab. 5)
- Argille siltose e limi prevalentemente di colore giallo-grigiastri (Tab. 6)

*Tab. 1 - Limo argilloso a struttura caotica*

<b>Parametri fisici</b>	
p.v. naturale	<b>18.2 kN/mc</b>
p.v. saturo	<b>18.75 kN/mc</b>
poisson	<b>0.49</b>

*Tab. 2 - Argille siltose prevalentemente di colore giallastro con livelletti grigiastri con fenomeni di alterazione*

<b>Parametri fisici</b>	
p.v. naturale	<b>18.55 kN/mc</b>
p.v. saturo	<b>19.15 kN/mc</b>
poisson	<b>0.47</b>

*Tab. 3 - Argille grigiastre scure con livelli di calcareniti e calcilutiti*

<b>Parametri fisici</b>	
p.v. naturale	<b>19.77 kN/mc</b>
p.v. saturo	<b>20.51 kN/mc</b>
poisson	<b>0.43</b>

*Tab. 4 - Argille grigiastre scure con livelli di calcilutiti*

<b>Parametri fisici</b>	
p.v. naturale	<b>19.69 kN/mc</b>
p.v. saturo	<b>20.66 kN/mc</b>
poisson	<b>0.43</b>

*Tab. 5 - Argille siltose e limi prevalentemente di colore giallo-grigiastri*

<b>Parametri fisici</b>	
p.v. naturale	<b>18.30 kN/mc</b>
p.v. saturo	<b>19.23 kN/mc</b>
poisson	<b>0.48</b>

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  $\phi$  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:

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

dove

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

$\gamma$  = 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

$\eta$  = 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:

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

ed  $\epsilon_v$  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  $\alpha$  proposto da Tomlinson (1971), ovvero attraverso la formula:

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

dove

$\alpha$  = 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 =  $\gamma H_{med}$

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

$\gamma$  = peso di volume del terreno

$\delta$  = angolo di attrito efficace calcestruzzo-terreno di fondazione =  $\phi$

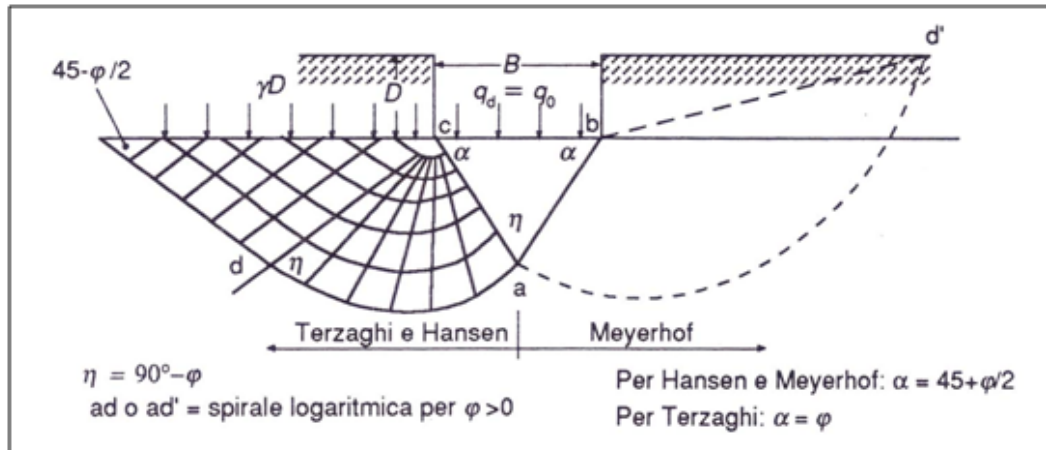
$K$  = coefficiente empirico dipendente dalla natura del terreno e dalle modalità costruttive del palo =  $k_0$  (coefficiente di spinta a riposo) (Ireland, 1957, Flates e Selnes, 1977, Tavenas, 1971)

#### 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

$\gamma_1$  = peso volume del terreno posto al disopra del piano di fondazione;

$\gamma_2$  = 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  $\theta$  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  $\beta_m$  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
	$\beta_s$	$\beta_s$
$0,2 < a_g(g) \leq 0,4$	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.<sup>2</sup>.

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/cm<sup>2</sup>) = modulo elastico del terreno (Young);

$E_f$  (daN / cm<sup>2</sup>) = modulo elastico della fondazione;

$I_f$  (cm<sup>4</sup>) = momento d'inerzia della fondazione;

$B$  (cm) = larghezza della fondazione;

$\nu$  = 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  $X_k/\gamma_M$  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  $\gamma_R$  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  $\gamma_R$  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  $\gamma_R$  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 $\gamma_F$ (o $\gamma_E$ )	EQU	(A1)	(A2)
Carichi permanenti $G_1$	Favorevole	$\gamma_{G1}$	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti $G_2^{(1)}$	Favorevole	$\gamma_{G2}$	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevole	$\gamma_Q$	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 $\gamma_M$	(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	$c_{uk}$	$\gamma_{cu}$	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	$\gamma$	$\gamma_\gamma$	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  $\gamma_R$  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  $\gamma_R$  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.

