

REGIONE: PUGLIA

PROVINCIA: FOGGIA

COMUNE di SAN SEVERO

ELABORATO:

4.2
11B

OGGETTO:

PARCO EOLICO SAN SEVERO LA PENNA
composto da 14 WTG da 3,40MW/cad.

PROGETTO DEFINITIVO

CALCOLI PRELIMINARI STRUTTURE EDILI:
2a PARTE

PROPONENTE:

TOZZIgreen

TOZZI Green S.p.A.

Via Brigata Ebraica, 50

48123 Mezzano (RA) Italia

tozzi.re@legalmail.it

tel. +39 0544 525311

fax +39 0544 525319

PROGETTISTA:

ing. Massimo CANDEO

Ordine Ing. Bari n° 3755

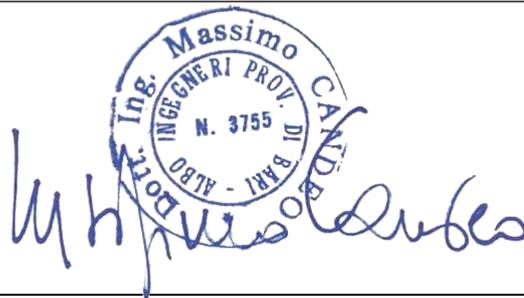
Via Canello Rotto, 3

70125 Bari

m.candeo@pec.it

tel. +39 328 9569922

fax +39 080 2140950



Collaborazione:

ing. Marco Evangelista

Ord. Ing.ri Bari n° 4245

Note:

DATA	REV	DESCRIZIONE	ELABORATO da:	APPROVATO da:
08.12.2017	0	Emissione	ing. Massimo Candeo e Gabriele Conversano	ing. Massimo Candeo

PROPRIETÀ ESCLUSIVA DELLE SOCIETÀ SOPRA INDICATE,
UTILIZZO E DUPLICAZIONE VIETATE SENZA AUTORIZZAZIONE SCRITTA

SOMMARIO

1	PREMESSA	2
2	DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO	4
2.1	FASI DI LAVORO PER LA REALIZZAZIONE DELL'INTERVENTO.....	4
2.2	DATI STRUTTURALI DI PROGETTO	8
3	NORMATIVA TECNICA DI RIFERIMENTO	10
4	INPUT DI MODELLAZIONE NUMERICA FEM	11
4.1	CLASSIFICAZIONE SISMICA DEL COMUNE	11
4.2	CATEGORIA DI SOTTOSUOLO E CONDIZIONI TOPOGRAFICHE	11
4.3	IPOTESI DI PROGETTO E PARAMETRI SISMICI	12
4.4	CRITERI DI CONCEZIONE E DI SCHEMATIZZAZIONE STRUTTURALE: EFFICACIA DEL MODELLO	13
5	ANALISI STRUTTURALE	15
5.1	VALORI DI PROGETTO DELLA RESISTENZA DEI MATERIALI STRUTTURALI	15
5.2	PRESCRIZIONI SUL CALCESTRUZZO DI FONDAZIONE.....	15
5.3	PRESCRIZIONI ACCIAIO PER OPERE IN C.A.	16
5.4	CLASSE DI ESPOSIZIONE	17
5.5	AZIONI DI PROGETTO	17
5.6	COMBINAZIONI DI CARICO.....	18
5.7	VERIFICA ALLO STATO LIMITE ULTIMO (SLU)	20
6	DATI	23
6.1	MATERIALI	23
6.2	GEOMETRIA	23
6.3	SPESSORI PIASTRA	24
6.4	TIPOLOGIE PALI	24
6.5	CARATTERISTICHE PALI	25
6.6	DESCRIZIONE TERRENI.....	26
6.7	DESCRIZIONE STRATIGRAFIA E FALDA	26
6.8	DETTAGLI CALCOLO PORTANZA VERTICALE.....	27
6.9	SCARICHI IN TESTA AI PALI	27
6.10	VERIFICHE GEOTECNICHE	29
6.11	VERIFICA ALLO STATO LIMITE DI ESERCIZIO (SLE).....	31
7	METODOLOGIE DI CALCOLO, TIPO DI ANALISI E STRUMENTI UTILIZZATI.	32

1 PREMESSA

Alle OPERE EDILI sono dedicate specificatamente:

- la relazione 4.2.11A nella quale dette opere vengono genericamente descritte;
- la relazione 4.2.11B nella quale vengono riportati i Calcoli Preliminari per le fondazioni delle WTG;
- alcune Tavole progettuali.

Le OPERE EDILI sono descritte quantitativamente e qualitativamente in parte della relazione 4.2.14 (computo Metrico).

2 DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO

La presente proposta progettuale è finalizzata alla realizzazione di un impianto eolico per la produzione industriale di energia elettrica da fonte rinnovabile eolica, costituito da:

- **14 aerogeneratori** tripala (WTG) ad asse orizzontale, **ciascuno di potenza nominale pari a 3,4 MW**, per una potenza elettrica complessiva pari a **47,6MW**,

da realizzarsi in agro del Comune di San Severo La Penna (FG).

La società proponente è la TOZZI GREEN S.p.A. con sede in Mezzano (Ravenna), 48123, Via Brigata Ebraica , 50.

L'impianto in scala ampia è posizionato come indicato nella seguente ortofoto. Di seguito alla stessa il layout d'impianto in scala più ristretta.

Il Layout dell'impianto è schematicamente indicato nella precedente figura, ma meglio dettagliato nelle **Tavole di Progetto**.

L'aerogeneratore impiegato nel presente progetto è costituito da una torre di sostegno tubolare metallica a tronco di cono, sulla cui sommità è installata la navicella il cui asse è a 110mt dal piano campagna con annesso il rotore di diametro pari a 130m (lunghezza pala 62,5mt circa), per un'altezza massima complessiva del sistema torre-pala di 175mt slt.

Sarà impiegata la turbina eolica GENERAL ELECTRIC GE 3,4-130 da 3,4 MW, ritenuta fra le macchine più performanti ad oggi disponibili sul mercato stando le caratteristiche anemometriche proprie del sito e le esigenze di impianto.

A seguito di apposita richiesta di connessione, la TOZZI Green S.p.A. ha ottenuto e successivamente accettato la Soluzione Tecnica Minima Generale (STMG) Codice Pratica n. 201700239 di cui all'ALLEGATO A1 alla comunicazione prot. n. TE/P2017 0007703 del 01/12/2017 di TERNA S.p.A., la quale prevede che l'impianto eolico sarà collegato in antenna a 150 kV su uno stallo approntato nella futura sezione a 150 kV della Stazione Elettrica RTN a 380 kV denominata "SAN SEVERO" di TERNA S.p.A. previa trasformazione della tensione, in idonea Sottostazione Elettrica Utente (SSEU) di proprietà del Proponente, dalla M.T. a 30 kV (tensione di esercizio dell'impianto di produzione) alla A.T. a 150 kV (tensione di consegna lato TERNA).

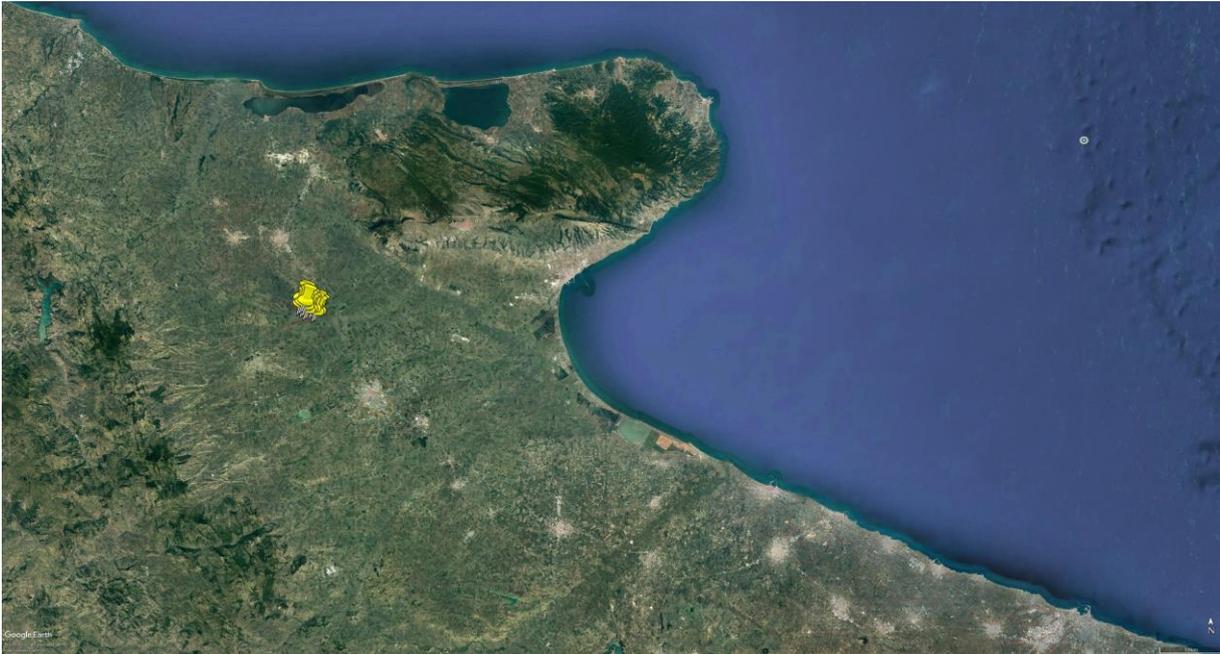


Fig. 1.1 – Inquadramento Impianto su scala ampia

I dati catastali e le coordinate geografiche per ogni punto macchina sono i seguenti:

WTG	mE	mN	COMUNE	FG	P.LLA
1	536.949	4.601.798	San Severo	131	82
2	536.593	4.601.599	San Severo	131	18
3	536.496	4.602.364	San Severo	130	160
4	536.160	4.602.145	San Severo	130	150
5	535.643	4.602.136	San Severo	129	1
6	535.289	4.601.930	San Severo	129	51
7	535.446	4.602.765	San Severo	127	136
8	535.107	4.602.559	San Severo	127	32
9	534.769	4.602.336	San Severo	127	37
10	534.272	4.602.718	San Severo	127	15
11	534.637	4.602.961	San Severo	127	66
12	534.998	4.603.180	San Severo	127	73
13	534.689	4.603.784	San Severo	126	214
14	534.334	4.603.578	San Severo	127	98

La Sotto Stazione Elettrica Utente è collocata come di seguito indicato:

- Fg. 126, p.lla 106 parziale;
- Centro areale: coordinate UTM Fuso 33: 532.116mN 4.604.61mE



Fig. 1.2 - Layout impianto su Ortofoto

A servizio degli aerogeneratori saranno realizzate le seguenti OPERE EDILI:

- realizzazione di viabilità di accesso all'area, di accesso ai punti macchina, delle piazzole di cantiere e definitive;
- posa dei cavidotti di impianto;
- fondazioni per gli aerogeneratori;
- sistemazione dell'area Sotto Stazione Elettrica Utente;
- fondazioni per componenti elettromeccaniche nella stessa;
- ripristini nell'area a fine cantiere.

Per lo stesso scopo saranno realizzate le seguenti OPERE ELETTRICHE:

OPERE DI UTENZA:

- realizzazione di una SOTTO STAZIONE UTENTE di connessione e consegna AT/MT, ubicata anch'essa all'interno dei confini amministrativi del Comune di San Severo, in prossimità della citata stazione elettrica TERNA;
- posa in opera di cavi interrati MT per il trasporto dell'energia elettrica prodotta dagli aerogeneratori d'impianto alla SOTTO STAZIONE UTENTE di connessione e consegna AT/MT.

Il collegamento elettrico tra l'area d'installazione degli aerogeneratori e la stazione MT/AT per l'innalzamento della tensione dell'energia elettrica prodotta dal parco eolico a 150kV, per la successiva connessione alla rete di trasmissione nazionale, gestita da TERNA SpA, sarà realizzato mediante la messa in opera, all'interno del medesimo scavo a sezione ristretta, dei cavidotti (in numero variabile in funzione della tratta considerata) a 30 kV afferenti a sottocampi in cui è stato elettricamente suddiviso l'impianto.

OPERE DI RETE:

- posa in opera di cavo AT 150kV per il trasporto dell'energia elettrica dalla SOTTO STAZIONE UTENTE di connessione e consegna AT/MT allo stallo dedicato della stazione TERNA Spa.

Si rimanda agli elaborati grafici di riferimento per la visualizzazione del tracciato di posa in opera dei cavidotti interrati e la posizione geografica delle sopra citate stazioni elettriche.

2.1 FASI DI LAVORO PER LA REALIZZAZIONE DELL'INTERVENTO

La realizzazione dell'intervento proposto riguarderà le seguenti AREE non necessariamente contemporaneamente attivate:

- apertura a predisposizione cantiere;
- interventi sulla viabilità esistente, al fine di rendere possibile il transito dei mezzi speciali per il trasporto degli elementi degli aerogeneratori;
- realizzazione delle piste d'accesso alla piazzole, che dalla viabilità interpodereale esistente consentano il transito dei mezzi di cantiere, per il raggiungimento dell'area d'installazione di ciascun aerogeneratore;
- realizzazione delle piazzole per l'installazione degli aerogeneratori;
- scavi a sezione larga per la realizzazione della fondazione di macchina e scavi a sezione ristretta per la messa in opera dei cavidotti;
- realizzazione delle fondazioni di macchina;
- installazione degli aerogeneratori;
- realizzazione della stazione elettrica di connessione e consegna;
- installazione cabina di sezionamento/parallelo;
- messa in opera dei cavidotti interrati;
- realizzazione della connessione elettrica d'impianto alla rete di trasmissione gestita da TERNA.

Qui di seguito una possibile suddivisione delle FASI DI LAVORO:

- predisposizione del cantiere attraverso i rilievi sull'area e picchettamento delle aree di intervento;
- apprestamento delle aree di cantiere;
- realizzazione delle piste d'accesso all'area di intervento dei mezzi di cantiere;
- livellamento e preparazione delle piazzole;
- modifica della viabilità esistente fino alla finitura per consentire l'accesso dei mezzi di trasporto delle componenti degli aerogeneratori;
- realizzazione delle fondazioni in ciascuna piazzola (scavi, casseforme, armature, getto cls, disarmi, riempimenti);

- montaggio aerogeneratori;
- montaggio impianto elettrico aerogeneratori;
- posa cavidotto in area piazzola e pista di accesso;
- finitura piazzola e pista;
- posa cavidotti di collegamento tra gli aerogeneratori; posa cavidotti di collegamento alla stazione elettrica di connessione e consegna MT/AT (scavi, posa cavidotti, riempimenti, finitura) compresa la risoluzione di eventuali interferenze; posa cavidotto di collegamento tra la stazione elettrica MT/AT lo stallo dedicato della stazione RTN esistente;
- preparazione area stazione elettrica MT/AT (livellamento, scavi e rilevati);
- fondazioni stazione elettrica MT/AT;
- montaggio stazione elettrica MT/AT;
- cavidotti interrati interni: opere edili;
- cavidotti interrati interni: opere elettriche;
- impianto elettrico MT/AT di connessione e consegna;
- collaudi impianto elettrico generazione e trasformazione;
- opere di ripristino e mitigazione ambientale;
- conferimento inerti provenienti dagli scavi e dai movimenti terra;
- posa terreno vegetale per favorire recupero situazione preesistente.

2.2 DATI STRUTTURALI DI PROGETTO

L'aerogeneratore impiegato nel presente progetto è costituito da una torre di sostegno tubolare metallica a tronco di cono, sulla cui sommità è installata la navicella il cui asse è a 110mt dal piano campagna con annesso il rotore di diametro pari a 130m (lunghezza pala 62,5mt circa), per un'altezza massima complessiva del sistema torre-pale di 175mt slt.

Sarà impiegata la turbina eolica GENERAL ELECTRIC GE 3,4-130 da 3,4 MW, ritenuta fra le macchine più performanti ad oggi disponibili sul mercato stando le caratteristiche anemometriche proprie del sito e le esigenze di impianto.

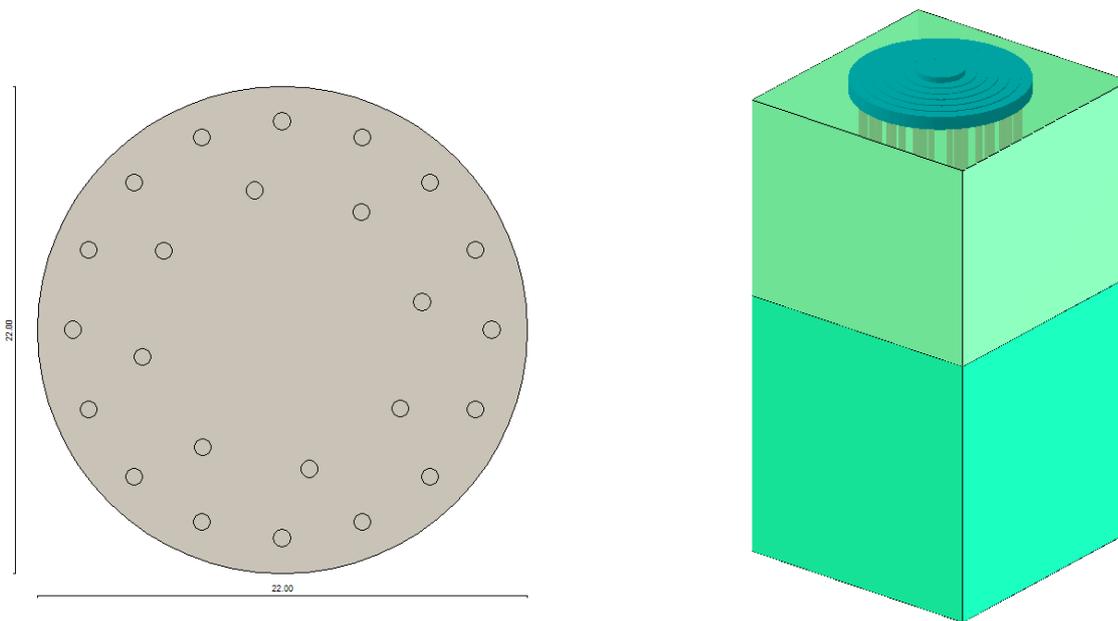
L'ancoraggio alle fondazioni in oggetto avverrà tramite opportuno sistema di ancoraggio fornito dal costruttore delle turbine.

Un esempio di ancoraggio alle fondazioni potrebbe avvenire tramite 64+64 tirafondi precaricati M36x3495 mmq 10.9 pre assemblati su due flange, una superiore di diametro esterno pari a 4.464 m della sezione di 380x25 mmq ed una inferiore di diametro esterno 4.370 m e della sezione di 470x100 mmq.

La struttura di fondazione è descritta come di seguito:

- piastra circolare in c.a. del diametro $D=22,00$ ml, con un'altezza variabile da mt 1.70 a mt 2.40 ml fino ad una circonferenza concentrica del diametro di mt 6,00.

- A partire da detta circonferenza, si avrà uno spessore costante della platea fino al centro pari a mt 3,11.
- La piastra sarà interrata di circa 2,80 ml rispetto al piano di campagna al finito.
- Sarà collegata ad un gruppo di 24 pali di grande diametro ϕ 120 trivellati in c.a., profondi 32,00 ml in funzione della stratigrafia del terreno esistente e disposti opportunamente lungo circonferenze concentriche del diametro di 18,80 ml e di 11,60 ml.



Geometria della fondazione

3 **NORMATIVA TECNICA DI RIFERIMENTO**

- I. **Legge n. 1086 05.11.1971** "Norme per la disciplina delle opere di conglomerato cementizio armato, normale e precompresso ed a struttura metallica";
- II. **Legge 02/02/1974 n. 64**, Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche;
- III. **D.M. LL.PP. 11.03.1988** "Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione" e relativa **Circ. Min. LL.PP. n° 30483 del 24.09.1988**;
- IV. **ORDINANZA P.C.M. N: 3274 del 02/05/2003** (G.U. 08/05/2003, n. 105 suppl.) modificata ed integrata ai sensi della ORDINANZA P.C.M. N. 3316 del 02/10/2003 (G.U. 10/10//2003, n. 236) e della ORDINANZA P.C.M. N. 3431 del 03/05/2005 (G.U. 10-5-2005, n. 107 -suppl.): Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica;
- V. **D.P.C.M. n° 3685 del 21/10/03**, G.U. n° 252, del 29/10/03;
- VI. **Presidenza del Consiglio dei Ministri, Dipartimento della Protezione Civile, Ufficio Servizio Sismico Nazionale, 29/03/04**: Elementi informativi sull'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003, recante "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica" (G.U. n. 105 del 8.5.2003);
- VII. **DELIBERAZIONE DELLA GIUNTA REGIONE PUGLIA 2 marzo 2004, n. 153**: "L.R. Puglia 20/00 - O.P.C.M. 3274/03 - Individuazione delle zone sismiche del territorio regionale e delle tipologie di edifici ed opere strategici e rilevanti - Approvazione del programma temporale e delle indicazioni per le verifiche tecniche da effettuarsi sugli stessi." (B.U.R. Puglia n. 33 del 18.03.2004);
- VIII. del **G.R. n° 597 del 27/04/2004, B.U.R. n°56 del 06/05/04**;
- IX. del **G.R. n° 260 del 07/03/2005, B.U.R. n°50 del 16/04/05**;
- X. **O.P.C.M. n° 3519 del 28/04/06, G.U. n° 108, del 11/05/06**;
- XI. **D.M. 14 gennaio 2008**. Norme Tecniche delle Costruzioni.
- XII. **Circolare del 02-02-2009 n. 617 del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici**, Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. 14 gennaio 2008.
- XIII. **CEI EN 61400-1** (2007). Turbine eoliche, parte 1: prescrizioni di progettazione.

4 INPUT DI MODELLAZIONE NUMERICA FEM

4.1 CLASSIFICAZIONE SISMICA DEL COMUNE

Sulla Gazzetta Ufficiale n. 105 (suppl.) del 08.05.2003 è stata pubblicata l'O.P.C.M. n. 3274 del 20.03.2003 [IV], recante "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica".

La citata O.P.C.M ha, fra l'altro, sancito che la potestà regionale di individuazione, formazione ed aggiornamento dell'elenco delle zone sismiche ricadenti nel territorio regionale doveva essere esercitata sulla base dei criteri approvati e contenuti nell'Allegato 1 all'O.P.C.M..

La Regione Puglia, in applicazione del citato O.P.C.M. 3274, con deliberazione della G.R. n° 153 del 02/03/04 [VII], stabiliva fra l'altro di "provvedere alla prima, ancorché temporanea, riclassificazione sismica del territorio regionale pugliese, così come individuata nell'Allegato 1 alla presente deliberazione per farne parte integrante, riservandosi di provvedere definitivamente alla predetta riclassificazione sismica, successivamente all'intervenuta elaborazione della nuova mappa nazionale del rischio sismico a cura della competente Amministrazione statale" e confermava la zonizzazione sismica proposta dalla citata O.P.C.M..

Infine, i criteri per l'aggiornamento della mappa di pericolosità sismica sono stati definiti nell'Ordinanza del PCM n. 3519/2006 [X], che ha suddiviso l'intero territorio nazionale in quattro zone sismiche sulla base del valore dell'accelerazione orizzontale massima su suolo rigido o pianeggiante a_g (PGA), che ha una probabilità del 10% di essere superata in 50 anni.

Nello specifico, il territorio del Comune di San Severo è classificato come appartenente alla Zona Sismica 2, possedendo valori della PGA (picco di accelerazione al suolo) compresi tra 0,15g e 0,25g.

Pertanto, per tale motivo, è stata eseguita una progettazione delle opere strutturali in oggetto per singolo aerogeneratore, effettuando verifiche numeriche per Zona Sismica di 2° Categoria, ai sensi delle Norme Tecniche per le Costruzioni del 14/01/2008 [XI].

4.2 CATEGORIA DI SOTTOSUOLO E CONDIZIONI TOPOGRAFICHE

Ai sensi della normativa tecnica attualmente in vigore [XI] l'azione sismica dipende strettamente, oltre che dalla Classe Sismica di appartenenza del territorio, anche da condizioni locali, quali la Categoria di Sottosuolo e la Categoria Topografica (& 3.2.2., [XI])

In particolare, la normativa indica Categorie di Sottosuolo di riferimento, che sono individuate in funzione della velocità di propagazione delle onde di taglio entro i primi 30,00 ml del sottosuolo ($V_{s,30}$) in esame, riferiti a partire dal piano di posa delle fondazioni, ovvero dalla testa dei pali.

Con riferimento ad analisi geologiche redatte in occasione della realizzazione di parchi eolici in aree prossime a quella in esame - sulla base degli esiti dell'indagine sismica eseguite (prove down hole) i valori sperimentalmente ottenuti della $V_{s,30}$ permettono di ipotizzare per il suolo in esame la **Categoria di Sottosuolo "B"** di cui alla Tab.3.2. II del D.M. 14 gennaio 2008, comprendente "Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina

mediamente consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{s30} compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 < NSPT_{,30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < c_{u,30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina).

In considerazione dell'assetto litostratigrafico e geotecnico dell'area, apparentemente omogeneo, la classe "B" di sottosuolo determinata in corrispondenza degli aerogeneratori è da considerarsi caratteristica per tutti i siti di ubicazione delle turbine.

Per ciò che attiene la classificazione delle condizioni topografiche secondo quanto previsto nelle tabelle 3.2.IV e 3.2.VI delle NTC, considerato l'assetto planoaltimetrico della porzione di territorio in esame, l'area d'intervento può essere classificata come appartenente alla categoria 'T1': "Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$ ".

Analogamente, per quanto riguarda la Categoria Topografica - considerato l'assetto plano-altimetrico delle zone di terreno in esame si classifica l'area di intervento, per tutti gli aerogeneratori del progetto in esame, come appartenente alla **Categoria Topografica 'T1'** "Superficie pianeggiante, pendii e rilievi *isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$* ".

4.3 IPOTESI DI PROGETTO E PARAMETRI SISMICI

SLD	63	50	0.061	2.524	0.294	1	1	1
SLV	10	475	0.192	2.468	0.392	1	1	1

Tabella 1. Parametri sismici per il Comune di San Severo

Con riferimento alle Norme Tecniche per le Costruzioni DM 2008 [XI], l'azione sismica sull'opera in esame è stata valutata a partire da una "pericolosità sismica di base" in condizioni ideali di sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale (di categoria B).

Ad oggi, la pericolosità sismica su reticolo di riferimento nell'intervallo di riferimento è fornita dai dati pubblicati sul sito <http://esse1.mi.ingv.it/>.

Nello specifico, le azioni di progetto sono ricavate, ai sensi del DM 2008, a partire dalle accelerazioni a_g e dalle relative forme spettrali; quest'ultime sono definite, secondo norma, su sito di riferimento rigido orizzontale in funzione dei tre parametri p (a_g, F_o, T^*_c) - Tabella 1, [XI] - e da prescelte probabilità di superamento P_{VR} e vite di riferimento V_R .

Per il calcolo dei parametri sismici locali e delle accelerazioni e tempi di ritorno riferiti ai differenti stati limite considerati sono state assunte le seguenti IPOTESI DI PROGETTO ai sensi del Par. 2.4. delle NTC 2008 [XI]:

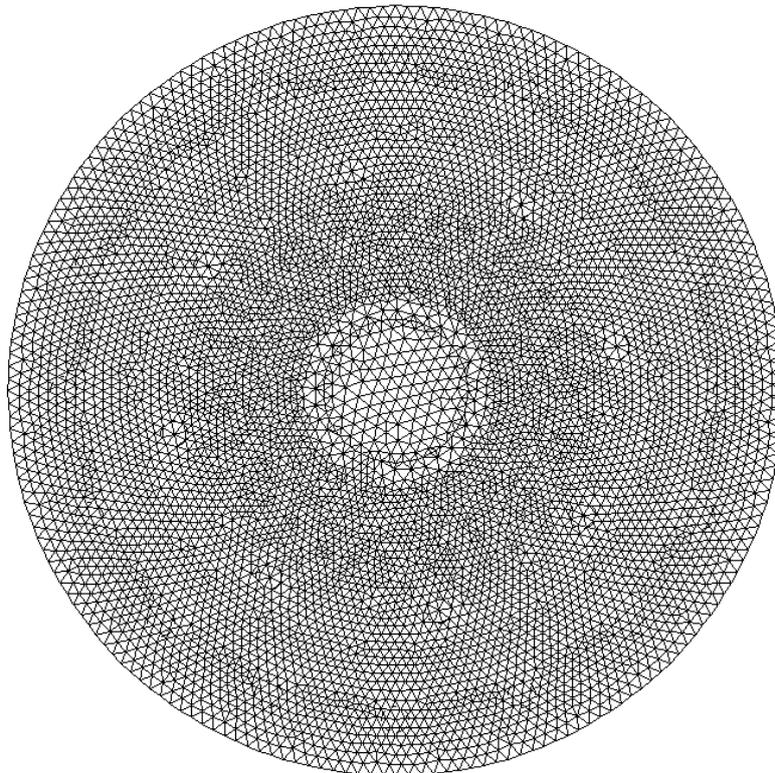
- Tipo di costruzione: **2** "Opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni contenute o di importanza normale"
- Vita nominale: **$V_N = 50$ [anni]**

- Classe d'uso: **II** "Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali..."
- Periodo di riferimento: **$V_R = 50$ [anni]**

4.4 CRITERI DI CONCEZIONE E DI SCHEMATIZZAZIONE STRUTTURALE: EFFICACIA DEL MODELLO

La progettazione e la verifica delle opere strutturali in oggetto sono state eseguite con il codice di calcolo numerico ad elementi finiti denominato "**API++Platee e Graticci 12.0**" e sviluppato dall'Aztec Informatica. Per la descrizione completa del software e per approfondimenti sui criteri di calcolo, si faccia riferimento a quanto dettagliatamente riportato nei tabulati di calcoli .

La struttura di fondazione e il suo comportamento sotto le azioni statiche è stato adeguatamente valutato, interpretato e trasferito nel modello tridimensionale realizzato (Figura 1) e descritto in premessa al fine di eseguire una corretta analisi ad elementi finiti FEA.



Mesh Modello: n. elementi = 12868; n. nodi = 6531

Il calcolo è stato condotto mediante analisi lineare.

Si ritiene che il modello utilizzato sia rappresentativo del comportamento reale della struttura. Sono stati, inoltre, valutati tutti i possibili effetti o le azioni che possano essere significative e avere implicazione per la struttura in esame.

Per l'analisi della platea di fondazione è stato utilizzato il metodo degli elementi finiti (FEM).

La struttura è stata suddivisa in elementi connessi fra di loro in corrispondenza dei nodi. Il campo degli spostamenti, interno all'elemento, viene approssimato in funzione degli spostamenti nodali mediante le funzioni di forma. Il programma ha utilizzato, per l'analisi tipo piastra, elementi triangolari. Nello specifico, è stata generata una mesh triangolare non strutturata su una maglia stabilita a priori.

Per ciò che riguarda i pali di fondazione, questi sono stati modellati con molle verticali aventi rigidità pari alla rigidità verticale del palo.

Infine, il comportamento del terreno è stato sostanzialmente modellato tramite una schematizzazione lineare alla Winkler (una serie di molle non reagenti a trazione disposte in corrispondenza dei nodi), principalmente caratterizzabile attraverso una opportuna rigidità laterale, che è funzione delle caratteristiche del terreno .

In considerazione dell'assetto litostratigrafico e geotecnico dell'area, rivelatasi nell'insieme omogenea, la caratterizzazione stratigrafica determinata è da considerarsi caratteristica di tutti i siti ove è prevista la realizzazione delle macchine.

5 ANALISI STRUTTURALE

5.1 VALORI DI PROGETTO DELLA RESISTENZA DEI MATERIALI STRUTTURALI

- I materiali da costruzione da impiegare per la realizzazione delle strutture di fondazione per singolo aerogeneratore sono rappresentati, rispettivamente, da tondini in acciaio per armatura e da conglomerato cementizio con specifiche caratteristiche prestazionali dettagliate.

In generale, detti materiali rientrano fra i tipi previsti dalla normativa tecnica vigente in materia.

- Nello specifico, per le opere in fondazione (piastra e pali), l'acciaio per armatura consiste in barre ad aderenza migliorata per cemento armato del tipo "**B450C**", mentre il calcestruzzo è di Classe "**C35/45**".

Per i valori di progetto della resistenza dei materiali si è fatto riferimento ai seguenti coefficienti parziali di sicurezza γ_M .

SLU:	$\gamma_M=1,50$ per il Calcestruzzo	$\gamma_M=1,15$ per l'Acciaio
SLE:	$\gamma_M=1,00$ per il Calcestruzzo	$\gamma_M=1,00$ per l'Acciaio

5.2 PRESCRIZIONI SUL CALCESTRUZZO DI FONDAZIONE

–	Controllo di accettazione:	tipo A
–	Classe di resistenza del calcestruzzo:	C35/45
–	Resistenza a compressione sui cubetti	$R_{ck} > 45 \text{ N/mm}^2$
–	Copriferro minimo nominale:	5 cm
–	Classe di esposizione:	XC2
–	Classe di consistenza	S4 (fluida)
–	Massimo rapporto A/C:	0,55
–	Tipo/classe di cemento:	CEM II/AL 42,5 R
–	Diametro massimo inerte:	16-20 mm
–	Impiego di additive di tipo	"superfluidificante".

Le suddette caratteristiche saranno conformi alle seguenti norme:

- D.M. 2008
- UNI EN 206-1:2001
- UNI EN 11104:2004
- UNI 8987
- UNI 8520-2:2005

- UNI EN 1744
- UNI EN 1367
- UNI EN 197-1:2007
- UNI EN 934-2:2009

DEFINIZIONE DEL COPRIFERRO

Classe di esposizione XC2

Classe strutturale S4

Copriferro nominale=Copriferro minimo + ΔC_{DEV}

Copriferro minimo= $\max(C_{minb}; C_{min,dur} + \Delta C_{DUR\gamma} - \Delta C_{ST} + \Delta C_{DUR,ADD}; 10 \text{ mm})$

C_{minb} = diametro barra isolata 32 mm

$C_{min,dur}$ =25 mm

$\Delta C_{DUR\gamma} = 0$

$\Delta C_{ST} = 0$

$\Delta C_{DUR,ADD} = 0$

$\Delta C_{DEV} = 10 \text{ mm}$

Copriferro minimo= C_{minb} = 32 mm

Copriferro nominale = 32 +10 = 42 mm

Copriferro nominale scelto= 50 mm

5.3 PRESCRIZIONI ACCIAIO PER OPERE IN C.A.

Acciaio dolce da Carpenteria del tipo Fe B 450 C qualificati secondo le procedure D.M. 14/01/2008 cap.11.3.1.2 e cap 11.3.3.5 nel seguente formato:

- Barre tonde ad aderenza migliorata di diametri pari, rispettivamente, a 32, 25, 22, 20, 16, 12 mm e rispondente alle seguenti caratteristiche:
- $f_{y \text{ nom}} > 450 \text{ N/mm}^2$
- $f_{t \text{ nom}} > 540 \text{ N/mm}^2$
- $A_s > 7,5\%$
- $1,15 < (f_t / f_y)k < 1,35$
- $(f_t / f_{y \text{ nom}})k < 1,25$

Le suddette caratteristiche saranno conformi alle seguenti norme:

- D.M. 2008
- UNI EN 10020 :2001

- UNI EN 10021 :2007
- UNI EN 10080 :2005

Il campionamento e le prove saranno condotte secondo:

- D.M. 2008
- UNI EN ISO 7438 : 2005

5.4 CLASSE DI ESPOSIZIONE

La classe di esposizione ambientale prevista per la struttura in oggetto è siglata XC sia nelle Linee Guida sia nelle UNI 11104 ed è relativa al rischio di corrosione dei ferri di armatura per carbonatazione del calcestruzzo.

In particolare, l'ossidazione dei ferri di armatura causa la formazione di sostanze chimiche aventi un volume ben superiore al ferro stesso; la matrice cementizia, di conseguenza, viene sollecitata a trazione, con successive espulsioni di porzioni di calcestruzzo (fenomeni "spalling" in corrispondenza degli spigoli, fenomeni di "delaminazione" in corrispondenza delle superfici piane).

La prevenzione di tale fenomeno è stato circoscritto alla qualità del calcestruzzo prescritto, quindi idonea resistenza caratteristica conforme alle reali condizioni ambientali, ad una corretta posa del materiale, unitamente al rispetto del copriferrodi progetto.

In generale, la XC presenta in tutto 4 sottoclassi, connesse con le condizioni di umidità dell'ambiente ed, in particolare, passando dalla XC1 alla XC4, l'ambiente aumenta la propria umidità relativa e di conseguenza il pericolo da corrosione.

Sia la UNI 11104 sia le Linee Guida hanno operato un accorpamento della XC1 e XC2, con rapporto $a/c = 0,6$ e stessa resistenza caratteristica. In realtà, trattandosi di due ambienti diversi, è opportuno operare con due miscele diverse per migliorare il calcestruzzo dal punto di vista qualitativo.

In particolare per le strutture di fondazioni, la miscela dovrà essere formulata in modo da migliorare la sua "impermeabilità" mediante un rapporto a/c inferiore, trattandosi di un calcestruzzo destinato ad opere prevalentemente a contatto con acqua.

5.5 AZIONI DI PROGETTO

La progettazione strutturale delle opere in fondazione, è stata eseguita partendo dai carichi di progetto "*Extreme Wind Loads*".

Le azioni di progetto prese in considerazione sono:

- azioni dovute a peso proprio e carichi permanenti
- azioni del vento estremo da CEI IEC 61400-1

Per la geometria delle macchine installate sopra la torre non sono stati considerati carichi da neve.

In particolare, i carichi di progetto includono il comportamento dinamico della struttura e

corrispondono alla condizione di carico più sfavorevole alla base della torre metallica.

Generalmente dalle Relazioni di Calcolo della Torre emerge che di fatto sarà considerata come dimensionante la condizione di carico da vento estremo amplificata di 1.5, in quanto è quella che fornisce le maggiori sollecitazioni di progetto sulla torre.

Per la geometria delle macchine installate sopra la torre non sono stati considerati carichi neve sia quanto influenti ai fini della verifica, sia perché non esistono in pratica possibilità di accumulo neve sia sulle pale che sulla navicella.

Dal valore complessivo dell'azione flettente ($M_{xy} = V(M_x^2 + M_y^2 + V(T_x^2 + T_y^2)) \times H_{fond}$) alla base per sisma, sensibilmente inferiore a quella derivante da vento estremo (in rapporto di 1 a 10 circa) in SLV, possiamo sicuramente concludere che tale azione non è dimensionante per le verifiche strutturali che seguono, anche se sommata a sollecitazioni dovute a vento in esercizio della macchina riportate in seguito.

A tal proposito è bene ricordare che per la norma italiana di riferimento, DM 14/01/2008 (8), il fattore di sicurezza per le combinazioni sismiche è 1.00 mentre è 1.50 per il vento.

5.6 COMBINAZIONI DI CARICO

La progettazione strutturale per singolo aerogeneratore è stata eseguita, ai sensi del D.M. 2008 [XI], verificando che l'opera soddisfi i requisiti di sicurezza nei confronti degli Stati Limite Ultimi SLU (da Tabulato di calcolo Combinazioni n° 1), degli Stati Limite di Esercizio SLE (da Tabulato di calcolo: Combinazioni n° 3,4,5).

Pertanto, sono state considerate combinazioni di carico per azioni verticali e orizzontali, tali da risultare più sfavorevoli ai fini delle singole verifiche, tenendo conto sia della probabilità ridotta di intervento simultaneo di tutte le azioni con i rispettivi valori più sfavorevoli sia della probabilità che l'azione si verifichi con specifica intensità in relazione alle diverse situazioni analizzate.

- Per gli Stati Limite Ultimi è stata adottata la combinazione fondamentale per soli carichi statici, affinché siano soddisfatte le verifiche allo Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV):

$$\gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \gamma_{Q3} \cdot \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots \quad \text{Combinazione n° 1}$$

dove:

G_1 rappresenta il peso proprio di tutti gli elementi strutturali; peso proprio del terreno, quando pertinente; forze indotte dal terreno (esclusi gli effetti di carichi variabili applicati al terreno); forze risultanti dalla pressione dell'acqua (quando si configurino costanti nel tempo);

G_2 rappresenta il peso proprio di tutti gli elementi non strutturali;

P rappresenta pretensione e precompressione;

Q azioni sulla struttura o sull'elemento strutturale con valori istantanei che possono risultare

sensibilmente diversi fra loro nel tempo

Q_{ki} rappresenta il valore caratteristico della i-esima azione variabile;

Y_{gr}, Y_{qr}, Y_p coefficienti parziali come definiti nella tabella 6.2.I delle NTC;

ψ_{0j} sono i coefficienti di combinazione per tenere conto della ridotta probabilità di concomitanza delle azioni variabili con i rispettivi valori caratteristici, come definiti nella tabella 2.5.I. delle NTC

- Per gli Stati Limite di Esercizio degli elementi strutturali, degli elementi non strutturali e degli impianti le verifiche sono state condotte facendo riferimento alle seguenti combinazioni di carico:

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$$

Combinazione quasi permanente n° 2

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{11} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$$

Combinazione frequente n° 3

$$G_1 + G_2 + P + Q_{k1} + \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$$

Combinazione caratteristica (rara) n° 4

dove:

G_1 rappresenta il peso proprio di tutti gli elementi strutturali; peso proprio del terreno, quando pertinente; forze indotte dal terreno (esclusi gli effetti di carichi variabili applicati al terreno); forze risultanti dalla pressione dell'acqua (quando si configurino costanti nel tempo);

G_2 rappresenta il peso proprio di tutti gli elementi non strutturali;

P rappresenta pretensione e precompressione;

Q azioni sulla struttura o sull'elemento strutturale con valori istantanei che possono risultare sensibilmente diversi fra loro nel tempo

Q_{ki} rappresenta il valore caratteristico della i-esima azione variabile;

$\psi_{0j}, \psi_{1j}, \psi_{2j}$ sono i coefficienti di combinazione per tenere conto della ridotta probabilità di concomitanza delle azioni variabili con i rispettivi valori caratteristici, come definiti nella tabella 2.5.I.

- In zona sismica, le sollecitazioni derivanti dalle sole azioni sismiche sono combinate con quelle derivanti dai soli carichi statici secondo un'opportuna combinazione sismica,

$$E + G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots \text{ (Sisma X+, Sisma Y+)}$$

E è l'azione sismica per lo stato limite e per la classe di importanza in esame;

G_1 rappresenta il peso proprio di tutti gli elementi strutturali;

G_2 rappresenta il peso proprio di tutti gli elementi non strutturali;

P rappresenta pretensione e precompressione;

ψ_{2i} coefficiente di combinazione delle azioni variabili Q_i come definiti in tab. 2.5.I. delle NTC

Q_{ki} valore caratteristico dell'azione variabile Q_i

$\gamma_E, \gamma_G, \gamma_P, \gamma_Q$ coefficienti parziali pari ad 1,

con le due serie di coefficienti parziali $A1+M1+R1$ e $A2+M2+R2$ dell'approccio 1.

Non si sono considerate alternanze di segno data la particolare conformazione di simmetria della fondazione.

5.7 VERIFICA ALLO STATO LIMITE ULTIMO (SLU)

La progettazione strutturale è stata condotta in conformità a quanto stabilito nella normativa strutturale attualmente in vigore. In particolare le Norme Tecniche per le Costruzioni [XI], nel Capitolo 'Sesto' relativo alla 'Progettazione Geotecnica', impongono la effettuazione di verifiche geotecniche nei confronti degli Stati Limite Ultimi (SLU) secondo due approcci che impongono nelle combinazioni differenti coefficienti parziali nei confronti delle azioni (A), dei parametri geotecnici del terreno (M) e delle resistenze caratteristiche (R):

- Approccio 1: sono previste due combinazioni di gruppi di coefficienti, di cui la prima ($A1+M1+R1$) più cautelativa nei confronti delle verifiche strutturali (STR) e la seconda ($A2+M1+R2$) più cautelativa nei confronti delle verifiche geotecniche (GEO).
- Approccio 2: è prevista una unica combinazione di gruppi di coefficienti ($A1+M1+R3$), da adottare sia nelle verifiche geotecniche, sia nelle verifiche strutturali.

Nello specifico, trattandosi di una fondazione su pali, la progettazione ha comportato, oltre alla scelta del tipo di palo (con relative tecniche costruttive e modalità di esecuzione), il dimensionamento dei pali e delle relative strutture di collegamento, tenendo conto degli effetti di gruppo tanto nelle verifiche allo SLU quanto nelle verifiche allo SLE.

In generale, le verifiche dovrebbero partire da un'analisi di interazione tra il terreno e la fondazione costituita dai pali e dalla struttura di collegamento - fondazione mista a platea su pali - al fine di determinare l'aliquota dell'azione di progetto trasferita al terreno direttamente dalla struttura di collegamento (platea in c.a.) e di quella trasmessa dai pali.

In particolare, con riferimento ai pali di fondazione, le verifiche SLU e SLE sono state condotte soddisfacendo i requisiti riportati, rispettivamente, nel § 6.4.3.1. e § 6.4.3.2 del DM 2008 [XI].

La citata normativa (§ 6.4.3.1. di [XI]) impone le seguenti verifiche SLU:

- SLU di tipo geotecnico (GEO)
 - Collasso per carico limite della palificata nei riguardi degli sforzi assiali
 - Collasso per carico limite della palificata nei riguardi dei carichi trasversali
 - Collasso per carico limite di sfilamento nei riguardi dei carichi assiali di trazione
 - Stabilità globale

- SLU di tipo strutturale (STR)
 - Raggiungimento della resistenza dei pali
 - Raggiungimento della resistenza della struttura di collegamento dei pali.

Nel caso in esame è stato adottato l'**Approccio 2**, pertanto le azioni di progetto in fondazione derivano da un'analisi strutturale svolta impiegando un'**unica combinazione di gruppi di coefficienti parziali A1+M1+R3 (Tabb. 6.2.I, 6.2.II, 6.4.II di [XI])**.

In particolare, la resistenza dei pali soggetti a carichi assiali è stata eseguita ai sensi di quanto indicato dalla normativa DM 2008 [XI] nel § 6.4.3.1.1.:

- Il valore di progetto della resistenza R_d del singolo palo è stato determinato in modo analitico, con riferimento al valore caratteristico dei parametri geotecnici del terreno, diviso per il valore del coefficiente parziale γ_M specificato nella Tab. 6.2.II e tenendo conto, ove necessario, dei coefficienti parziali γ_R specificato nella Tab. 6.4.II per ciascun tipo di opera (metodo b);
- Il valore della resistenza caratteristica R_k è stato determinato, facendo riferimento alle procedure analitiche che prevedano l'utilizzo dei parametri geotecnici o dei risultati di prove in sito, il valore caratteristico della resistenza $R_{co,k}$ (o $R_{tr,k}$) è dato dal minore dei valori ottenuti applicando alle resistenze calcolate $R_{co,cal}$ ($R_{tr,cal}$) i fattori di correlazione ξ riportati nella Tab. 6.4.IV, in funzione del numero n di prove verticali di indagine (metodo b).

In generale, nell'analisi del comportamento dei pali rispetto ai carichi assiali e orizzontali occorre innanzitutto considerare che la risposta strutturale è fortemente influenzata dalla struttura fisica delle particelle, rappresentative dei terreni inglobanti, conducendo infine a distinguere l'interazione a breve termine (condizioni non drenate) da quelle a lungo termine (condizioni drenate).

Pertanto, ai fini dell'analisi della capacità portante dei pali è stato necessario determinare alcune caratteristiche significative del terreno in cui si va ad operare, quali angolo d'attrito ϕ e coesione c' , modulo elastico laterale (per pali soggetti a carichi trasversali).

Per la completa caratterizzazione del terreno di fondazione si farà riferimento alla Relazione Geologica che sarà predisposta in fase di Progetto Esecutivo.

La capacità portante di un palo è stata così valutata come somma di due contributi: portata di base (o di punta) e portata per attrito laterale lungo il fusto, assumendo l'equazione di validità generale [Broms, 1996; Poulos e Davis, 1987]:

$$Q_{LIM} = Q_P + Q_L - W_P$$

dove:

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

W_p peso proprio del palo al netto di quello del terreno asportato

e le due componenti Q_p e Q_L sono state calcolate in modo indipendente fra loro.

In particolare, con riferimento alle fondazioni degli aerogeneratori, si riportano qui di seguito, gli scarichi in testa ai pali per la Combinazione n°1 (SLU coefficienti A1-M1-R3) ed i relativi valori di portanza di punta e laterale.

6 DATI

6.1 MATERIALI

Simbologia adottata

n°	Indice materiale
Descrizione	Descrizione materiale
TC	Tipo calcestruzzo
Rck	Resistenza cubica caratteristica, espresso in [N/mm ²]
γ _{cls}	Peso specifico calcestruzzo, espresso in [kN/mc]
E	Modulo elastico calcestruzzo, espresso in [N/mm ²]
ν	Coeff. di Poisson
n	Coeff. di omogeneizzazione
TA	Tipo acciaio

n°	Descrizione	TC	Rck [N/mm ²]	γ _{cls} [kN/mc]	E [N/mm ²]	ν	n	TA
1	Materiale 1	C35/45	45,000	24,52	34625,349	0.200	15.00	B450C

6.2 GEOMETRIA

Coordinate contorno esterno

n°	X [m]	Y [m]									
1	11,00	0,00	2	10,95	1,08	3	10,79	2,15	4	10,53	3,19
5	10,16	4,21	6	9,70	5,19	7	9,15	6,11	8	8,50	6,98
9	7,78	7,78	10	6,98	8,50	11	6,11	9,15	12	5,19	9,70
13	4,21	10,16	14	3,19	10,53	15	2,15	10,79	16	1,08	10,95
17	0,00	11,00	18	-1,08	10,95	19	-2,15	10,79	20	-3,19	10,53
21	-4,21	10,16	22	-5,19	9,70	23	-6,11	9,15	24	-6,98	8,50
25	-7,78	7,78	26	-8,50	6,98	27	-9,15	6,11	28	-9,70	5,19
29	-10,16	4,21	30	-10,53	3,19	31	-10,79	2,15	32	-10,95	1,08
33	-11,00	0,00	34	-10,95	-1,08	35	-10,79	-2,15	36	-10,53	-3,19
37	-10,16	-4,21	38	-9,70	-5,19	39	-9,15	-6,11	40	-8,50	-6,98
41	-7,78	-7,78	42	-6,98	-8,50	43	-6,11	-9,15	44	-5,19	-9,70
45	-4,21	-10,16	46	-3,19	-10,53	47	-2,15	-10,79	48	-1,08	-10,95
49	0,00	-11,00	50	1,08	-10,95	51	2,15	-10,79	52	3,19	-10,53
53	4,21	-10,16	54	5,19	-9,70	55	6,11	-9,15	56	6,98	-8,50
57	7,78	-7,78	58	8,50	-6,98	59	9,15	-6,11	60	9,70	-5,19
61	10,16	-4,21	62	10,53	-3,19	63	10,79	-2,15	64	10,95	-1,08

6.3 SPESSORI PIASTRA

Simbologia adottata

Sp	Spessore, espresso in [mm]
n°	Indice del punto
X, Y	Ascissa e ordinata del punto, espresso in [mm]

Sp	n°	X	Y	n°	X	Y	n°	X	Y	n°	X	Y
[Kg/cm ² /cm]		[m]	[m]		[m]	[m]		[m]	[m]		[m]	[m]
1700,0	1	-11,00	-11,00	2	11,00	-11,00	3	11,00	11,00	4	-11,00	11,00

6.4 TIPOLOGIE PALI

Simbologia adottata

n°	Indice tipologia
Descrizione	Descrizione tipologia
Geometria	Geometria tipologia (Pali in c.a o Pali in acciaio)
Armatura	Tipologia armatura per pali in c.a.
Portanza	Aliquote contributi portanza (solo Punta, solo Laterale, Entrambe)
Vincolo	Grado di vincolo alla testa del palo (Incastro o Cerniera)
TC	Tipologia costruttiva del palo (Trivellato o Infisso)
Mat	Indice materiale tipologia palo
Pt	Pressione quota testa palo, espressa in [N/mm ²]

n°	Descrizione	Geometria	Armatura	Portanza	Vincolo	TC	Mat	Pt
								[N/mm ²]
1	Pali diam 1200 mm L=32 mt	Pali circolari in c.a.	Ferri longitudinali + spirale	Entrambe	Incastro	Trivellato	1	0,000

6.5 CARATTERISTICHE PALI

Simbologia adottata

n°	Indice palo
X	Ascissa palo, espressa in [m]
Y	Ordinata palo, espressa in [m]
d	Diametro palo, espresso in [mm]
l	Lunghezza palo, espressa in [m]
nodo	Indice nodo su cui è posizionato il palo
It	Indice tipologia palo

n°	X	Y	D	L	Nodo	It
	[m]	[m]	[mm]	[m]		
1	9,40	0,00	1200,0	32,00	142	1
2	8,68	3,60	1200,0	32,00	752	1
3	6,65	6,65	1200,0	32,00	1863	1
4	3,60	8,68	1200,0	32,00	3209	1
5	0,00	9,40	1200,0	32,00	4538	1
6	-3,60	8,68	1200,0	32,00	5594	1
7	-6,65	6,65	1200,0	32,00	6104	1
8	-8,68	3,60	1200,0	32,00	6151	1
9	-9,40	0,00	1200,0	32,00	6127	1
10	-8,68	-3,60	1200,0	32,00	6072	1
11	-6,65	-6,65	1200,0	32,00	5632	1
12	-3,60	-8,68	1200,0	32,00	4523	1
13	0,00	-9,40	1200,0	32,00	3211	1
14	3,60	-8,68	1200,0	32,00	1858	1
15	6,65	-6,65	1200,0	32,00	750	1
16	8,68	-3,60	1200,0	32,00	149	1
17	4,82	-3,22	1200,0	32,00	903	1
18	5,69	1,13	1200,0	32,00	863	1
19	3,22	4,82	1200,0	32,00	2277	1
20	-1,13	5,69	1200,0	32,00	4506	1
21	-4,82	3,22	1200,0	32,00	4968	1
22	-5,69	-1,13	1200,0	32,00	4916	1
23	-3,22	-4,82	1200,0	32,00	4561	1
24	1,13	-5,69	1200,0	32,00	2313	1

6.6 DESCRIZIONE TERRENI

Caratteristiche fisico meccaniche

Simbologia adottata

Descrizione	Descrizione terreno
γ	Peso di volume del terreno espresso in [kN/mc]
γ_{sat}	Peso di volume saturo del terreno espresso in [kN/mc]
ϕ	Angolo di attrito interno del terreno espresso in gradi
δ	Angolo di attrito palo-terreno espresso in gradi
c	Coesione del terreno espressa in [N/mm ^q]
ca	Adesione del terreno espressa in [N/mm ^q]
τ_1 [N/mm ^q]	Tensione tangenziale, per calcolo portanza micropali con il metodo di Bustamante-Doix, espressa in [N/mm ^q]
α	Coeff. di espansione laterale

Descrizione	γ [kN/mc]	γ_{sat} [kN/mc]	Parametri	ϕ [°]	δ [°]	c [N/mm ^q]	ca [N/mm ^q]	τ_1 [N/mm ^q]	α
Sabbie	20,000	20,000	Caratteristici	28.00	18.67	0,0000	0,0000	0,0000	1.00
			Minimi	28.00	18.67	0,0000	0,0000	0,0000	
			Medi	28.00	18.67	0,0000	0,0000	0,0000	
Argille subappenniniche	20,000	20,000	Caratteristici	25.00	16.67	0,0260	0,0130	0,0000	1.00
			Minimi	25.00	16.67	0,0260	0,0130	0,0000	
			Medi	25.00	16.67	0,0260	0,0130	0,0000	

6.7 DESCRIZIONE STRATIGRAFIA E FALDA

Simbologia adottata

N	Identificativo strato
Z1	Quota dello strato in corrispondenza del punto di sondaggio n°1 espressa in [m]
Z2	Quota dello strato in corrispondenza del punto di sondaggio n°2 espressa in [m]
Z3	Quota dello strato in corrispondenza del punto di sondaggio n°3 espressa in [m]
Terreno	Terreno associato allo strato
Ks	Coefficiente di spinta
Kw	Costante di Winkler orizzontale espressa in [Kg/cm ² /cm]
α	Coeff. di sbulbatura

N	Z1 [m]	Z2 [m]	Z3 [m]	Terreno	Ks	Kw [Kg/cm ² /cm]	α
1	-26,0	-26,0	-26,0	Sabbie	0.530	5.000	1.000
2	-60,0	-60,0	-60,0	Argille subappenniniche	0.570	10.000	1.000

Falda

Falda a – 6.00 mt da p.c.

6.8 DETTAGLI CALCOLO PORTANZA VERTICALE

Simbologia adottata

n°	Indice palo
Oggetto	Oggetto di appartenenza del palo (Piastra, Plinto o Trave)
Nc, Nq	Coeff. di capacità portante
N'c, N'q	Coeff. di capacità portante corretti
Zc	Profondità andamento pressione geostatica, espressa in [m]
Pp, PI	Portanza di punta e laterale caratteristica, espresse in [kN]
A	Attrito negativo, espresso in [kN]

n°	Oggetto	Nc	N'c	Nq	N'q	Zc	Pp	PI	A
						[m]	[kN]	[kN]	[kN]
1	Piastra 1	16.883	39.856	7.821	8.711	--	1960,16 1960,16	4902,22 4902,22	0,00
2	Piastra 1	16.883	39.856	7.821	8.711	--	1960,16 1960,16	4902,22 4902,22	0,00
3	Piastra 1	16.883	39.856	7.821	8.711	--	1960,16 1960,16	4902,22 4902,22	0,00
4	Piastra 1	16.883	39.856	7.821	8.711	--	1960,16 1960,16	4902,22 4902,22	0,00
5	Piastra 1	16.883	39.856	7.821	8.711	--	1960,16 1960,16	4902,22 4902,22	0,00
6	Piastra 1	16.883	39.856	7.821	8.711	--	1960,16 1960,16	4902,22 4902,22	0,00
7	Piastra 1	16.883	39.856	7.821	8.711	--	1960,16 1960,16	4902,22 4902,22	0,00
8	Piastra 1	16.883	39.856	7.821	8.711	--	1960,16 1960,16	4902,22 4902,22	0,00
9	Piastra 1	16.883	39.856	7.821	8.711	--	1960,16 1960,16	4902,22 4902,22	0,00
10	Piastra 1	16.883	39.856	7.821	8.711	--	1960,16 1960,16	4902,22 4902,22	0,00
11	Piastra 1	16.883	39.856	7.821	8.711	--	1960,16 1960,16	4902,22 4902,22	0,00
12	Piastra 1	16.883	39.856	7.821	8.711	--	1960,16 1960,16	4902,22 4902,22	0,00
13	Piastra 1	16.883	39.856	7.821	8.711	--	1960,16 1960,16	4902,22 4902,22	0,00
14	Piastra 1	16.883	39.856	7.821	8.711	--	1960,16 1960,16	4902,22 4902,22	0,00
15	Piastra 1	16.883	39.856	7.821	8.711	--	1960,16 1960,16	4902,22 4902,22	0,00
16	Piastra 1	16.883	39.856	7.821	8.711	--	1960,16 1960,16	4902,22 4902,22	0,00
17	Piastra 1	16.883	39.856	7.821	8.711	--	1960,16 1960,16	4902,22 4902,22	0,00
18	Piastra 1	16.883	39.856	7.821	8.711	--	1960,16 1960,16	4902,22 4902,22	0,00
19	Piastra 1	16.883	39.856	7.821	8.711	--	1960,16 1960,16	4902,22 4902,22	0,00
20	Piastra 1	16.883	39.856	7.821	8.711	--	1960,16 1960,16	4902,22 4902,22	0,00
21	Piastra 1	16.883	39.856	7.821	8.711	--	1960,16 1960,16	4902,22 4902,22	0,00
22	Piastra 1	16.883	39.856	7.821	8.711	--	1960,16 1960,16	4902,22 4902,22	0,00
23	Piastra 1	16.883	39.856	7.821	8.711	--	1960,16 1960,16	4902,22 4902,22	0,00
24	Piastra 1	16.883	39.856	7.821	8.711	--	1960,16 1960,16	4902,22 4902,22	0,00

6.9 SCARICHI IN TESTA AI PALI

Combinazione n° 1

n°	N	M _x	M _y	T _x	T _y
	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]
1	1145,71	-111,49	0,00	54,38	0,00
2	716,12	-111,26	0,56	54,28	0,27
3	348,17	-110,70	0,80	54,01	0,39
4	96,11	-110,14	0,57	53,75	0,28
5	-0,43	-109,91	0,00	53,64	0,00
6	72,66	-110,14	-0,56	53,74	-0,27
7	304,10	-110,70	-0,80	54,01	-0,39
8	659,51	-111,26	-0,57	54,27	-0,28
9	1083,35	-111,49	0,00	54,38	0,00
10	1512,98	-111,26	0,56	54,28	0,27
11	1880,99	-110,70	0,80	54,01	0,39
12	2133,01	-110,14	0,57	53,75	0,28
13	2229,48	-109,91	0,00	53,64	0,00
14	2156,42	-110,14	-0,56	53,74	-0,27
15	1925,06	-110,70	-0,80	54,01	-0,39
16	1569,61	-111,26	-0,57	54,27	-0,28
17	1945,76	-111,91	-0,51	54,58	-0,25
18	1201,28	-112,20	0,21	54,72	0,10
19	562,05	-111,49	0,51	54,38	0,25
20	401,94	-111,19	-0,21	54,24	-0,10
21	816,23	-111,91	-0,51	54,58	-0,25
22	1560,07	-112,20	0,21	54,72	0,10
23	2199,94	-111,49	0,51	54,38	0,25
24	2359,41	-111,19	-0,21	54,24	-0,10

6.10 VERIFICHE GEOTECNICHE

Carico limite

Simbologia adottata

n°	Indice palo
Oggetto	Oggetto di appartenenza del palo (Piastra, Plinto o Trave)
N	Carico verticale agente alla testa del palo, espresso in [kN]
Pd	Portanza di progetto, espresso in [kN]
FS _v	Fattore di sicurezza (Pd/N)
T	Carico orizzontale agente alla testa del palo, espresso in [kN]
Td	Portanza trasversale di progetto, espresso in [kN]
FS _o	Fattore di sicurezza (Vd/V)

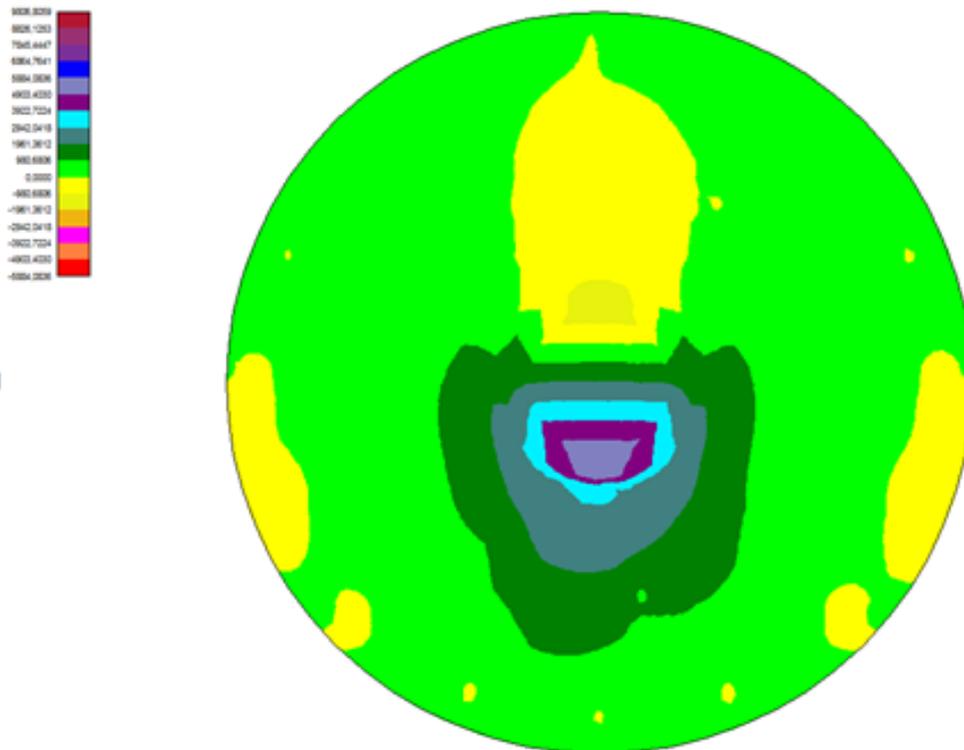
Combinazione n° 1

n°	Oggetto	N [kN]	Pd [kN]	FS _v	T [kN]	Td [kN]	FS _o
1	Piastra 1	1145,71	2474,33	2.160	54,38	732,06	13.461
2	Piastra 1	716,12	2474,33	3.455	54,28	732,06	13.488
3	Piastra 1	348,17	2474,33	7.107	54,01	732,06	13.554
4	Piastra 1	96,11	2474,33	25.743	53,75	732,06	13.620
5	Piastra 1	-0,43	2273,72	5244.972	53,64	732,06	13.648
6	Piastra 1	72,66	2474,33	34.052	53,75	732,06	13.621
7	Piastra 1	304,10	2474,33	8.137	54,01	732,06	13.554
8	Piastra 1	659,51	2474,33	3.752	54,27	732,06	13.488
9	Piastra 1	1083,35	2474,33	2.284	54,38	732,06	13.461
10	Piastra 1	1512,98	2474,33	1.635	54,28	732,06	13.488
11	Piastra 1	1880,99	2474,33	1.315	54,01	732,06	13.554
12	Piastra 1	2133,01	2474,33	1.160	53,75	732,06	13.620
13	Piastra 1	2229,48	2474,33	1.110	53,64	732,06	13.648
14	Piastra 1	2156,42	2474,33	1.147	53,75	732,06	13.621
15	Piastra 1	1925,06	2474,33	1.285	54,01	732,06	13.554
16	Piastra 1	1569,61	2474,33	1.576	54,27	732,06	13.488
17	Piastra 1	1945,76	2474,33	1.272	54,58	732,06	13.412
18	Piastra 1	1201,28	2474,33	2.060	54,72	732,06	13.378
19	Piastra 1	562,05	2474,33	4.402	54,38	732,06	13.462
20	Piastra 1	401,94	2474,33	6.156	54,24	732,06	13.497
21	Piastra 1	816,23	2474,33	3.031	54,58	732,06	13.412
22	Piastra 1	1560,07	2474,33	1.586	54,72	732,06	13.378
23	Piastra 1	2199,94	2474,33	1.125	54,38	732,06	13.462
24	Piastra 1	2359,41	2474,33	1.049	54,24	732,06	13.497

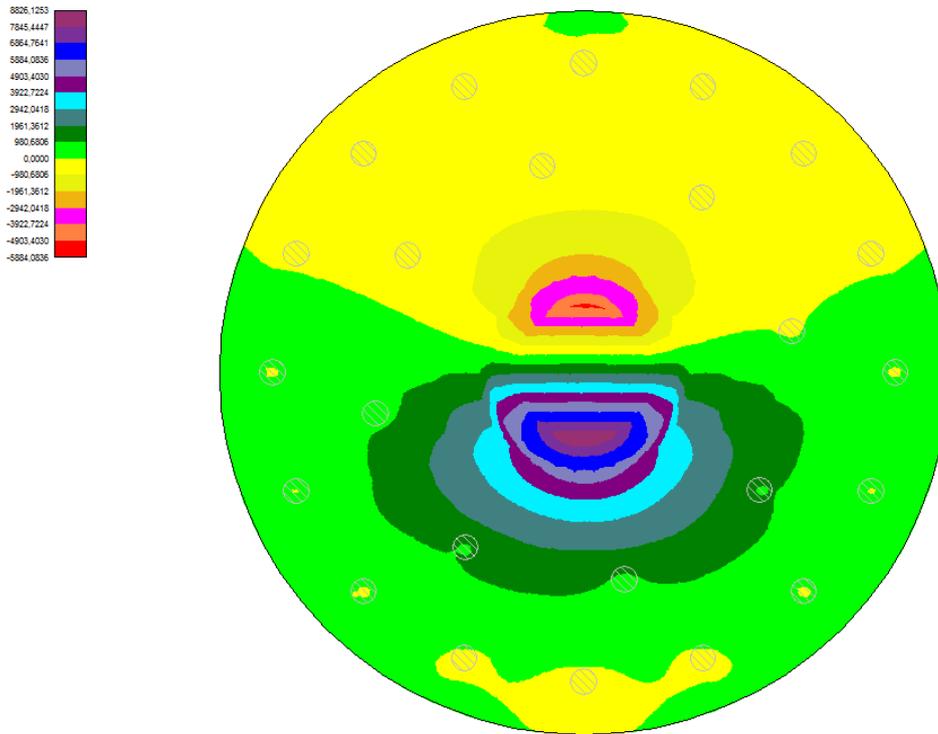
Essendo la fondazione del singolo aerogeneratore costituita da un raggruppamento di pali, è ragionevole attendersi che le distribuzioni delle pressioni indotte nel terreno per effetto della resistenza laterale e di punta dei singoli pali si sovrappongano. L'intensità della pressione risultante dalla sovrapposizione degli effetti dipende sia dall'entità dei carichi gravanti sui pali che dall'interasse fra i pali medesimi. Al fine di evitare interferenze tra i vari bulbi di pressione dei singoli pali e, pertanto, il collasso per rottura a taglio del terreno, è necessario - secondo indicazioni derivanti da normative tecniche [III] - predisporre la distanza tra i singoli pali ad un interasse ottimale non inferiore a 3 volte il diametro D del palo (3·D).

Nel progetto della fondazione si è tenuto conto dell'effetto di gruppo dei pali, rispettando l'interasse minimo pari a 3·D.

In particolare, si riporta qui di seguito l'andamento delle sollecitazioni di flessione, rispettivamente, M_x ed M_y per le piastre di fondazione degli aerogeneratori



Andamento delle sollecitazioni di momento " M_x "



Andamento delle sollecitazioni di momento "M_y"

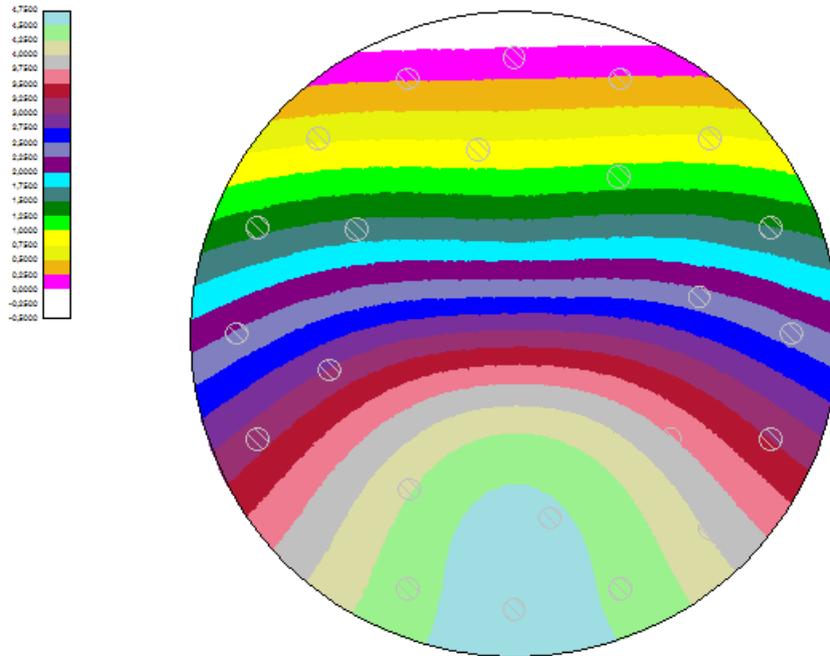
6.11 VERIFICA ALLO STATO LIMITE DI ESERCIZIO (SLE)

Dalla lettura delle specifiche normative tecniche (§ 6.4.3.2. di [XI]) si evince che, completata la verifica agli SLU, occorre analizzare il comportamento dei pali nelle condizioni di esercizio in relazione alle opportune combinazioni di carico evidenziate nel § 4.3 della presente relazione.

Specificamente, "si devono calcolare i valori degli spostamenti e delle distorsioni per verificarne la compatibilità con i requisiti prestazionali della struttura in elevazione".

Pertanto, la struttura della fondazione in oggetto - numero, lunghezza, diametro ed interasse pali - è stata stabilita nel rispetto dei summenzionati requisiti prestazionali, tenendo opportunamente conto degli effetti di interazione tra pali e considerando i diversi meccanismi di attivazione della resistenza laterale rispetto alla resistenza in punta (alla base).

Qui di seguito si riportano gli spostamenti verticali "w" della piastra di fondazione.



Spostamenti verticali "w"

7 METODOLOGIE DI CALCOLO, TIPO DI ANALISI E STRUMENTI UTILIZZATI.

L'analisi di tipo numerico è stata realizzata mediante il Programma di Calcolo **"API++ Platee e Graticci - Analisi fondazione"**, aggiornato alla Versione 12.0 prodotto da Aztec Informatica (Casole Bruzio) con Licenza d'uso n. AIU40280G.