

REGIONE PUGLIA

PROVINCIA DI BRINDISI
COMUNE DI BRINDISI

Parco Eolico "152 BRINDISI"
composto da 8 turbine da 6.2 MW ciascuna

R13

**CALCOLI PRELIMINARI
DELLE STRUTTURE**

Note:

Rev. 0 - Prima emissione, elaborato da ACS/MG, approvato da MG, data: 30/11/2023



INTERPLAN

Progettista: INTERPLAN s.r.l.
via Papa Giovanni Paolo I, n. 12 - 70124 Bari
c.f. 04767360722
info@interplan.it

Progettista:
Ing. Axel Ceglie Swoboda
via Messina n. 4
721017 Brindisi
c.f. CGLXLA63B16Z102C

Progettista: Ing. Marcello Gatto
Ord. Ing. Bari n. 3965
via Papa Giovanni Paolo I, n. 12 - 70124 Bari
c.f. GTTMCL63A27A662K
marcello.gatto@interplan.it

Committente: Cubico Lidia s.r.l.
Via Alessandro Manzoni, 43 - 20100 Milano
P.IVA e Codice Fiscale 12943230966
pec: cubicolidia@legalmail.it

Sommario

1	Introduzione	3
2	Ubicazione degli aerogeneratori	4
3	Fondazioni per gli aerogeneratori	5
4	Normativa tecnica di riferimento	6
5	Elementi per il calcolo	7
5.1	Classificazione sismica	7
5.2	Categoria di sottosuolo e categoria topografica	7
5.3	Parametri sismici	8
5.4	Modello matematico	8
6	Analisi strutturale	9
6.1	Caratteristiche dei materiali	9
6.1.1	<i>Prescrizioni per il calcestruzzo</i>	9
6.1.2	<i>Prescrizioni per l'acciaio</i>	10
6.2	Classe di esposizione	11
6.3	Azioni di progetto	12
6.4	Combinazioni di carico	12
6.5	Verifica allo stato limite	14
7	Allegato 1 – Dati e risultati dei calcoli strutturali	16
7.1	Materiali	16
7.2	Geometria	16
7.2.1	<i>Contorno</i>	16
7.2.2	<i>Pali</i>	16
7.3	Terreni e stratigrafia	17
7.3.1	<i>Caratteristiche fisico meccaniche condizioni drenate</i>	17
7.3.2	<i>Caratteristiche fisico meccaniche condizioni non drenate</i>	17
7.3.3	<i>Stratigrafia</i>	17
7.4	Carichi	18
7.4.1	<i>Condizione 1 – carichi permanenti torre</i>	18
7.4.2	<i>Condizione n° 2 - RNSP 17</i>	19
7.4.3	<i>Coefficienti di sicurezza</i>	21
7.4.4	<i>Combinazioni di carico</i>	22
7.5	Elaborazioni	22
7.5.1	<i>Portanza pali in condizioni drenate</i>	22
7.5.2	<i>Portanza pali in condizioni non drenate</i>	23
7.5.3	<i>Verifiche geotecniche sui pali in condizioni drenate</i>	24
7.5.4	<i>Verifiche geotecniche sui pali in condizioni non drenate</i>	24

Indice delle figure

Figura 1 - Inquadramento a scala 1:100.000 dell'area di intervento, con limiti comunali.....	4
Figura 2 - Dimensioni della fondazione per l'aerogeneratore.....	5

Indice delle tabelle

Tabella 1 - Coordinate degli Aerogeneratori	4
---	---

1 Introduzione

La presente relazione illustra i calcoli delle strutture e degli impianti per la realizzazione di un **parco eolico** per la produzione industriale di energia elettrica da fonte rinnovabile eolica, costituito da **8 aerogeneratori** tripala ad asse orizzontale, ciascuno di potenza nominale pari a **6,2 MW**, per una potenza elettrica complessiva pari a **49,6 MW**. L'intervento è proposto dalla società Cubico Lidia s.r.l., con sede in Via Alessandro Manzoni, 43 - 20100 Milano, P.IVA e Codice Fiscale 12943230966, del gruppo **Cubico**, che ad oggi ha in Italia **46 impianti operativi**, con una potenza complessiva installata di ben **260 MW**, e molti altri nel mondo.

La presente relazione, secondo quanto previsto dall'art. 29 del D.P.R. 207/2010, consente di determinare tutti gli elementi dimensionali dell'opera, dimostrandone la piena compatibilità con l'aspetto architettonico ed impiantistico e più in generale con tutti gli altri aspetti del progetto.

I calcoli delle strutture comprendono i criteri di impostazione del calcolo, le azioni, i criteri di verifica e la definizione degli elementi strutturali principali che interferiscono con l'aspetto architettonico e con le altre categorie di opere.

I calcoli degli impianti permettono la definizione degli eventuali volumi tecnici necessari e, per quanto riguarda le reti e le apparecchiature degli impianti, anche la specificazione delle caratteristiche.

I calcoli di dimensionamento e verifica delle strutture e degli impianti sono stati sviluppati ad un livello di definizione tale che nella successiva progettazione esecutiva non si abbiano significative differenze tecniche e di costo.

2 Ubicazione degli aerogeneratori

Il progetto prevede l'installazione di 8 aerogeneratori, tutti nel territorio del **Comune di Brindisi**, nei punti di seguito indicati e rappresentati:

Aerogeneratore	Coordinate UTM33N	Coordinate WGS84	Foglio	Particella
10	737287.4; 4506008.7	40.67084, 17.80735	17	871
20	738786.1; 4505408.2	40.66501, 17.82483	18	292
30	739906.5; 4505324.0	40.66392, 17.83804	19	299
40	736745.5; 4505106.8	40.66288, 17.80060	17	184
50	738000.2; 4505189.9	40.66327, 17.81546	17	258
60	738147.7; 4504572.9	40.65768, 17.81697	17	284
70	739647.4; 4504379.3	40.65550, 17.83462	19	35
80	739836.7, 4506301,0	40.67274, 17.83759	19	359

Tabella 1 - Coordinate degli Aerogeneratori



Figura 1 - Inquadramento a scala 1:100.000 dell'area di intervento, con limiti comunali

3 Fondazioni per gli aerogeneratori

L'aerogeneratore impiegato nel presente progetto (Vestas V162 da 6,2 MW) è costituito da una torre di sostegno tubolare metallica con sovrastante navicella, rotore con asse posto a 119 m dal piano campagna e diametro di 162 m. L'altezza massima complessiva del sistema torre/pale è di 200 m.

L'ancoraggio alle fondazioni, fornito insieme all'aerogeneratore, sarà costituito da 92+92 tirafondi preassemblati su due flange, superiore ed inferiore.

La struttura di fondazione è pertanto costituita da una piastra circolare in c.a. del diametro $D=24,00$ m, con un'altezza variabile da m 1,00 a m 3,10 fino ad una circonferenza concentrica del diametro di m 6,60. A partire da detta circonferenza, si avrà uno spessore costante della platea fino al centro pari a m 3,90.

La piastra sarà interrata per circa 3,50 mt rispetto al piano di campagna al finito e sarà collegata ad un gruppo di 30 pali di diametro 1200 mm trivellati in c.a., profondi 14,00 m in funzione della stratigrafia del terreno esistente e disposti opportunamente lungo circonferenze concentriche del diametro di 21,80 m e di 14,60 m.

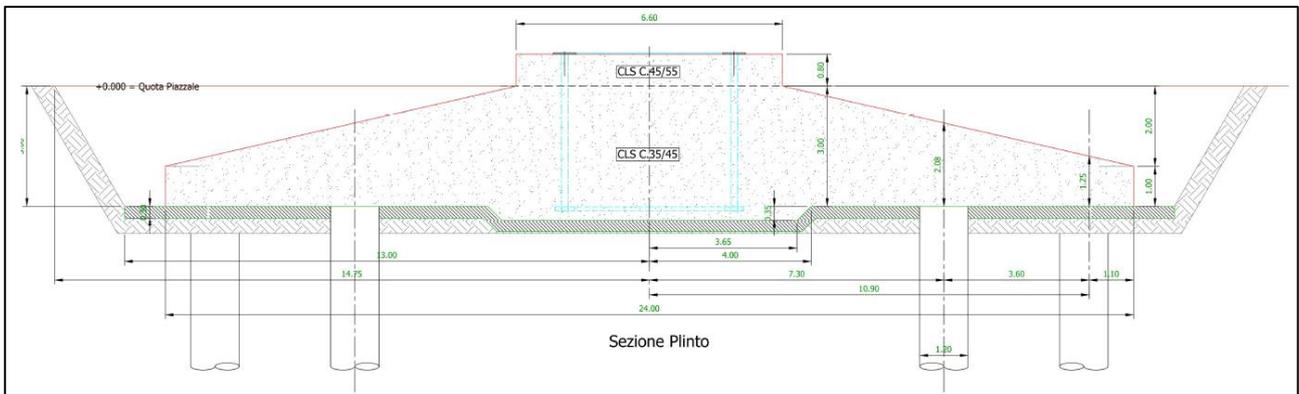


Figura 2 - Dimensioni della fondazione per l'aerogeneratore

4 Normativa tecnica di riferimento

- Legge n. 1086 05.11.1971 “Norme per la disciplina delle opere di conglomerato cementizio armato, normale e precompresso ed a struttura metallica”;
- Legge 02/02/1974 n. 64, Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche;
- 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;
- 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;
- D.P.C.M. n° 3685 del 21/10/03, G.U. n° 252, del 29/10/03;
- 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);
- 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);
- del G.R. n° 597 del 27/04/2004, B.U.R. n°56 del 06/05/04;
- del G.R. n° 260 del 07/03/2005, B.U.R. n°50 del 16/04/05;
- O.P.C.M. n° 3519 del 28/04/06, G.U. n° 108, del 11/05/06;
- D.M. 17 gennaio 2018. Aggiornamento delle Norme Tecniche delle Costruzioni. Circolare del 21/01/2019 n. 7 del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, Istruzioni per l’applicazione dell’aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. 17 gennaio 2018.
- CEI EN 61400-1 (2007). Turbine eoliche, parte 1: prescrizioni di progettazione.

5 Elementi per il calcolo

5.1 Classificazione sismica

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, 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, che ha suddiviso l'intero territorio nazionale in quattro zone sismiche sulla base del valore dell'accelerazione orizzontale massima su suolo rigido o pianeggiante ag (PGA), che ha una probabilità del 10% di essere superata in 50 anni.

Nello specifico, il territorio del Comune di Brindisi è classificato come appartenente alla Zona Sismica 4, possedendo valori della PGA (picco di accelerazione al suolo) inferiori a 0,05g.

Pertanto, per tale motivo, è stata eseguita una progettazione delle opere strutturali in oggetto per singolo aerogeneratore, effettuando verifiche numeriche per Zona Sismica di 4a Categoria, ai sensi delle Norme Tecniche per le Costruzioni del 17/01/2018.

5.2 Categoria di sottosuolo e categoria topografica

Ai sensi della normativa tecnica attualmente in vigore 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.

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 m del sottosuolo 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 "C" di cui alla Tab.3.2. II del D.M. 17 gennaio 2018, 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 $V_{s,30}$ 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 "C" 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 planoaltimetrico 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 $i \leq 15^\circ$ ".

5.3 Parametri sismici

Con riferimento alle Norme Tecniche per le Costruzioni DM 2018, 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 C).

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 , FO, T*C) - Tabella 1, [XI] - e da prescelte probabilità di superamento PVR e vite di riferimento VR.

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 2018:

- Tipo di costruzione: **2¹**
- Vita nominale: **VN = 50** [anni]
- Classe d'uso: **II²**
- Periodo di riferimento: **VR = 50** [anni]

5.4 Modello matematico

La progettazione e la verifica delle opere strutturali in oggetto sono state eseguite con codice di calcolo numerico ad elementi finiti. Il calcolo è stato condotto mediante analisi lineare. Sono stati valutati tutti i possibili effetti o le azioni che possano essere significative e avere implicazione per la struttura in esame.

¹ "Opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni contenute o di importanza normale

² "Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali

La platea di fondazione 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. Nello specifico, è stata generata una mesh triangolare strutturata su una maglia stabilita a priori.

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

Infine, il comportamento del terreno è stato 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 rigidezza 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.

6 Analisi strutturale

6.1 Caratteristiche dei materiali

I materiali da costruzione da impiegare per la realizzazione delle strutture di fondazione degli aerogeneratori sono:

- tondini in acciaio per armatura
- conglomerato cementizio

con specifiche caratteristiche prestazionali dettagliate.

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

6.1.1 Prescrizioni per il calcestruzzo

- Controllo di accettazione: tipo A
- Classe di resistenza del calcestruzzo: C35/45
- Resistenza a compressione sui cubetti $R_{ck} > 45$ N/mm²
- 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

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
ΔC_{ST}	0
$\Delta C_{DUR,ADD}$	0
ΔC_{DEV}	0 mm
Copriferro minimo	$C_{minb} = 32 \text{ mm}$
Copriferro nominale	$32 + 10 = 42 \text{ mm}$
Copriferro nominale scelto	50 mm

6.1.2 Prescrizioni per l'acciaio

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

6.2 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 copriferro di 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.

6.3 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 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, il fattore di sicurezza per le combinazioni sismiche è 1.00 mentre è 1.50 per il vento.

6.4 Combinazioni di carico

La progettazione strutturale per singolo aerogeneratore è stata eseguita, ai sensi del D.M. 2008, verificando che l'opera soddisfi i requisiti di sicurezza nei confronti degli Stati Limite Ultimi SLU (da Tabulato di calcolo Combinazione 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):

$$\gamma G1 \cdot G1 + \gamma G2 \cdot G2 + \gamma P \cdot P + \gamma Q1 \cdot Qk1 + \gamma Q2 \cdot \psi 02 \cdot Qk2 + \gamma Q3 \cdot \psi 03 \cdot Qk3 + \dots \text{ (Combinazione n° 1)}$$

dove:

- G1 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);

- G2 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;
- γ_g, γ_q, γ_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:

$G1 + G2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$ Combinazione n° 2 (quasi permanente)

$G1 + G2 + P + \psi_{11} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$ Combinazione n° 3 (frequente)

$G1 + G2 + P + Q_{k1} + \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$ Combinazione caratteristica (rara) n° 4

dove:

- G1 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);
- G2 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;
- ψ_{0j}, ψ_{1j}, ψ_{2j} sono i coefficienti di combinazione per tenere conto della ridotta probabilità di concomitanza delle azioni variabili con i rispettivi valori caratteristici.

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

$E + G1 + G2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots$ (Sisma X+, Sisma Y+)

- E è l'azione sismica per lo stato limite e per la classe di importanza in esame;
- G1 rappresenta il peso proprio di tutti gli elementi strutturali;
- G2 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
- γ_E, γ_G, γ_P, γ_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.

6.5 Verifica allo stato limite

Le Norme Tecniche per le Costruzioni, nel Capitolo 'Sesto' relativo alla 'Progettazione Geotecnica', impongono la effettuazione di verifiche geotecniche nei confronti degli Stati Limite Ultimi (SLU) secondo due approcci che prescrivono 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.

La citata normativa (§ 6.4.3.1. NTC) 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 delle NTC).

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

$$QLIM = QP + QL - WP$$

dove:

- QT portanza totale del palo
- QP portanza di base del palo
- QL portanza per attrito laterale del palo
- WP peso proprio del palo al netto di quello del terreno asportato

e le due componenti QP e QL sono state calcolate in modo indipendente fra loro.

In allegato 1 sono riportati i risultati delle elaborazioni condotte.

7 Allegato 1 – Dati e risultati dei calcoli strutturali

7.1 Materiali

Simbolo	Descrizione	Valore
TC	Tipo calcestruzzo	C35/45
γ_{cls}	Peso specifico calcestruzzo, espresso in [kN/mc]	45
E	Modulo elastico calcestruzzo, espresso in [N/mm ²]	24,52
Rck	Resistenza cubica caratteristica, espresso in [N/mm ²]	34625,349
ν	Coeff. di Poisson [kN/mc]	0,2
n	Coeff. di omogeneizzazione	15
TA	Tipo acciaio	B450C

7.2 Geometria

7.2.1 Contorno

n°	X	Y									
	[m]	[m]									
1	24,00	12,00	2	23,94	13,18	3	23,77	14,34	4	23,48	15,48
5	23,09	16,59	6	22,58	17,66	7	21,98	18,67	8	21,28	19,61
9	20,49	20,49	10	19,61	21,28	11	18,67	21,98	12	17,66	22,58
13	16,59	23,09	14	15,48	23,48	15	14,34	23,77	16	13,18	23,94
17	12,00	24,00	18	10,82	23,94	19	9,66	23,77	20	8,52	23,48
21	7,41	23,09	22	6,34	22,58	23	5,33	21,98	24	4,39	21,28
25	3,51	20,49	26	2,72	19,61	27	2,02	18,67	28	1,42	17,66
29	0,91	16,59	30	0,52	15,48	31	0,23	14,34	32	0,06	13,18
33	0,00	12,00	34	0,06	10,82	35	0,23	9,66	36	0,52	8,52
37	0,91	7,41	38	1,42	6,34	39	2,02	5,33	40	2,72	4,39
41	3,51	3,51	42	4,39	2,72	43	5,33	2,02	44	6,34	1,42
45	7,41	0,91	46	8,52	0,52	47	9,66	0,23	48	10,82	0,06
49	12,00	0,00	50	13,18	0,06	51	14,34	0,23	52	15,48	0,52
53	16,59	0,91	54	17,66	1,42	55	18,67	2,02	56	19,61	2,72
57	20,49	3,51	58	21,28	4,39	59	21,98	5,33	60	22,58	6,34
61	23,09	7,41	62	23,48	8,52	63	23,77	9,66	64	23,94	10,82

7.2.2 Pali

n°	X	Y	D	L	Nodo
	[m]	[m]	[mm]	[m]	
1	22,77	13,68	1200,0	14,00	617
2	21,71	16,89	1200,0	14,00	628
3	19,71	19,61	1200,0	14,00	644
4	16,95	21,59	1200,0	14,00	626
5	13,71	22,63	1200,0	14,00	604
6	10,29	22,63	1200,0	14,00	569
7	7,05	21,59	1200,0	14,00	503
8	4,29	19,69	1200,0	14,00	419
9	2,29	16,89	1200,0	14,00	274
10	1,23	13,68	1200,0	14,00	166
11	1,23	10,32	1200,0	14,00	82
12	2,29	7,11	1200,0	14,00	23
13	4,29	4,39	1200,0	14,00	3
14	7,05	2,41	1200,0	14,00	42
15	10,29	1,37	1200,0	14,00	116
16	13,71	1,37	1200,0	14,00	218
17	16,95	2,41	1200,0	14,00	326
18	19,71	4,39	1200,0	14,00	474
19	21,71	7,11	1200,0	14,00	537
20	22,77	10,32	1200,0	14,00	584
21	19,30	12,00	1200,0	14,00	497
22	17,91	16,29	1200,0	14,00	559
23	14,26	18,94	1200,0	14,00	526
24	9,74	18,94	1200,0	14,00	424
25	6,09	16,29	1200,0	14,00	261
26	4,70	12,00	1200,0	14,00	112
27	6,09	7,71	1200,0	14,00	43
28	9,74	5,06	1200,0	14,00	81
29	14,26	5,06	1200,0	14,00	221
30	17,91	7,71	1200,0	14,00	413

7.3 Terreni e stratigrafia

7.3.1 Caratteristiche fisico meccaniche condizioni drenate

Descrizione	γ [kN/mc]	γ [kN/mc]	ϕ [°]	δ [°]	c [N/mm ²]	ca [N/mm ²]	α
Sabbia	17,000	21,250	27,0	27,0	0,0175	0,0088	0,50
Argilla primi 2 m in falda	11.250	21,250	27,0	27,0	0,0175	0,0088	0,50
Argilla	17,000	21,250	27,0	27,0	0,0175	0,0088	0,50

7.3.2 Caratteristiche fisico meccaniche condizioni non drenate

Descrizione	γ [kN/mc]	γ [kN/mc]	ϕ [°]	δ [°]	cu [N/mm ²]	ca [N/mm ²]	α
Argilla primi 2 m in falda	11.250	21,250	0	0	0,15	0,075	0,50
Argilla	17,000	21,250	0	0	0,15	0,075	0,50

in cui:

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/mm²]

ca Adesione del terreno espressa in [N/mm²]

α Frazione ca/c,cu

7.3.3 Stratigrafia

Strato	Z1	Z2	Z3	Terreno	Ks	Kw
1	-3,0	-3,0	-3,0	Sabbia	0,59	1,0
2	-5,0	-5,0	-5,0	Argilla primi 2 m in falda	0,59	2,5
3	-38,0	-38,0	-38,0	Argilla	0,59	5,0

In cui:

Ks Coefficiente di spinta

Kw Costante di Winkler orizzontale espressa in [Kg/cm²/cm]

7.4 Carichi

7.4.1 Condizione 1 – carichi permanenti torre

Carichi concentrati

Oggetto	X	Y	N	Mx	My	Tx	Ty
[m]	[m]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]	
Piastra	14,00	12,00	216,272	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	14,00	12,14	226,252	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	13,98	12,27	235,479	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	13,96	12,41	243,911	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	13,93	12,54	251,508	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	13,88	12,67	258,234	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	13,83	12,80	264,060	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	13,78	12,92	268,956	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	13,71	13,04	272,901	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	13,63	13,15	275,876	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	13,55	13,26	277,866	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	13,46	13,37	278,864	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	13,37	13,46	278,864	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	13,26	13,55	277,866	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	13,15	13,63	275,876	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	13,04	13,71	272,901	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	12,92	13,78	268,956	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	12,80	13,83	264,060	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	12,67	13,88	258,234	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	12,54	13,93	251,508	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	12,41	13,96	243,911	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	12,27	13,98	235,479	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	12,14	14,00	226,252	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	12,00	14,00	216,272	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	11,86	14,00	205,586	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	11,73	13,98	194,244	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	11,59	13,96	182,299	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	11,46	13,93	169,806	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	11,33	13,88	156,824	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	11,20	13,83	143,413	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	11,08	13,78	129,636	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	10,96	13,71	115,557	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	10,85	13,63	101,242	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	10,74	13,55	86,757	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	10,63	13,46	72,169	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	10,54	13,37	57,548	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	10,45	13,26	42,961	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	10,37	13,15	28,476	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	10,29	13,04	14,160	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	10,22	12,92	0,081	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	10,17	12,80	-13,696	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	10,12	12,67	-27,107	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	10,07	12,54	-40,089	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	10,04	12,41	-52,582	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	10,02	12,27	-64,527	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	10,00	12,14	-75,869	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	10,00	12,00	-86,554	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	10,00	11,86	-96,534	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	10,02	11,73	-105,761	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	10,04	11,59	-114,193	0,000	0,000	0,000	0,000

Oggetto	X	Y	N	Mx	My	Tx	Ty
[m]	[m]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]	
Piastra	10,07	11,46	-121,790	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	10,12	11,33	-128,517	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	10,17	11,20	-134,342	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	10,22	11,08	-139,239	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	10,29	10,96	-143,183	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	10,37	10,85	-146,158	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	10,45	10,74	-148,149	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	10,54	10,63	-149,147	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	10,63	10,54	-149,147	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	10,74	10,45	-148,149	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	10,85	10,37	-146,158	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	10,96	10,29	-143,183	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	11,08	10,22	-139,239	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	11,20	10,17	-134,342	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	11,33	10,12	-128,517	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	11,46	10,07	-121,790	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	11,59	10,04	-114,193	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	11,73	10,02	-105,761	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	11,86	10,00	-96,534	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	12,00	10,00	-86,554	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	12,14	10,00	-75,869	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	12,27	10,02	-64,527	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	12,41	10,04	-52,582	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	12,54	10,07	-40,089	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	12,67	10,12	-27,107	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	12,80	10,17	-13,696	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	12,92	10,22	0,081	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	13,04	10,29	14,160	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	13,15	10,37	28,476	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	13,26	10,45	42,961	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	13,37	10,54	57,548	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	13,46	10,63	72,169	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	13,55	10,74	86,757	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	13,63	10,85	101,242	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	13,71	10,96	115,557	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	13,78	11,08	129,636	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	13,83	11,20	143,413	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	13,88	11,33	156,824	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	13,93	11,46	169,806	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	13,96	11,59	182,299	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	13,98	11,73	194,244	0,000	0,000	0,000	0,000
Piastra	14,00	11,86	205,586	0,000	0,000	0,000	0,000

7.4.2 Condizione n° 2 - RNSP 17

Carichi concentrati

Oggetto	X	Y	N	Mx	My	Tx	Ty
[m]	[m]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]	
Piastra	14,00	12,00	875,174	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	14,00	12,14	932,166	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	13,98	12,27	984,860	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	13,96	12,41	1033,012	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	13,93	12,54	1076,396	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	13,88	12,67	1114,810	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	13,83	12,80	1148,076	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	13,78	12,92	1176,037	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	13,71	13,04	1198,565	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	13,63	13,15	1215,553	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	13,55	13,26	1226,923	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	13,46	13,37	1232,621	0,000	0,000	8,967	8,967

Piastra	13,37	13,46	1232,621	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	13,26	13,55	1226,923	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	13,15	13,63	1215,553	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	13,04	13,71	1198,565	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	12,92	13,78	1176,037	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	12,80	13,83	1148,076	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	12,67	13,88	1114,810	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	12,54	13,93	1076,396	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	12,41	13,96	1033,012	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	12,27	13,98	984,860	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	12,14	14,00	932,166	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	12,00	14,00	875,174	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	11,86	14,00	814,151	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	11,73	13,98	749,381	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	11,59	13,96	681,165	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	11,46	13,93	609,823	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	11,33	13,88	535,687	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	11,20	13,83	459,102	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	11,08	13,78	380,425	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	10,96	13,71	300,023	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	10,85	13,63	218,272	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	10,74	13,55	135,552	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	10,63	13,46	52,249	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	10,54	13,37	-31,249	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	10,45	13,26	-114,552	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	10,37	13,15	-197,272	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	10,29	13,04	-279,023	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	10,22	12,92	-359,425	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	10,17	12,80	-438,102	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	10,12	12,67	-514,687	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	10,07	12,54	-588,823	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	10,04	12,41	-660,165	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	10,02	12,27	-728,381	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	10,00	12,14	-793,151	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	10,00	12,00	-854,174	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	10,00	11,86	-911,166	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	10,02	11,73	-963,860	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	10,04	11,59	-1012,012	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	10,07	11,46	-1055,396	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	10,12	11,33	-1093,810	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	10,17	11,20	-1127,076	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	10,22	11,08	-1155,037	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	10,29	10,96	-1177,565	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	10,37	10,85	-1194,553	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	10,45	10,74	-1205,923	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	10,54	10,63	-1211,621	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	10,63	10,54	-1211,621	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	10,74	10,45	-1205,923	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	10,85	10,37	-1194,553	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	10,96	10,29	-1177,565	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	11,08	10,22	-1155,037	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	11,20	10,17	-1127,076	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	11,33	10,12	-1093,810	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	11,46	10,07	-1055,396	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	11,59	10,04	-1012,012	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	11,73	10,02	-963,860	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	11,86	10,00	-911,166	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	12,00	10,00	-854,174	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	12,14	10,00	-793,151	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	12,27	10,02	-728,381	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	12,41	10,04	-660,165	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	12,54	10,07	-588,823	0,000	0,000	8,967	8,967

Piastra	12,67	10,12	-514,687	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	12,80	10,17	-438,102	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	12,92	10,22	-359,425	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	13,04	10,29	-279,023	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	13,15	10,37	-197,272	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	13,26	10,45	-114,552	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	13,37	10,54	-31,249	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	13,46	10,63	52,249	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	13,55	10,74	135,552	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	13,63	10,85	218,272	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	13,71	10,96	300,023	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	13,78	11,08	380,425	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	13,83	11,20	459,102	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	13,88	11,33	535,687	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	13,93	11,46	609,823	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	13,96	11,59	681,165	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	13,98	11,73	749,381	0,000	0,000	8,967	8,967
Piastra	14,00	11,86	814,151	0,000	0,000	8,967	8,967

7.4.3 Coefficienti di sicurezza

per le azioni:

Carichi	Effetto	Coefficiente	A1
Permanenti	Sfavorevole	Y_{G1}	1,30
Variabili	Sfavorevole	Y_{Qi}	1,30

per i parametri geotecnici del terreno:

PARAMETRO	Grandezza	Effetto	Coefficiente	M1
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \phi'_k$	$Y_{\phi'}$	Y_{G1}	1,00
Coesione efficace	c'_k	$Y_{c'}$	Y_{Qi}	1,00
Resistenza non drenata	c_{uk}	Y_{cu}		1,00

per le resistenze caratteristiche dei pali trivellati:

Resistenza	Y_R	R1	R2	R3
Base	Y_b	1,00	1,70	1,35
Laterale in compressione	Y_s	1,00	1,45	1,15
Totale	Y_t	1,00	1,60	1,30
Laterale in trazione	Γ_{st}	1,00	1,60	1,25

per le verifiche di stati limite ultimi di pali soggetti a carichi trasversali:

Y_T	R1	R2	R3
Y_T	1,00	1,60	1,30

7.4.4 Combinazioni di carico

Combinazione n. 1: A1-M1-R3

Condizione	CP
Peso proprio	1,30
Carichi permanenti torre	1,30
RNSP	1,50

Combinazione n. 2: SLEQ

Condizione	CP
Peso proprio	1,00
Carichi permanenti torre	1,00
RNSP	0,80

Combinazione n. 3: SLEF

Condizione	CP
Peso proprio	1,00
Carichi permanenti torre	1,00
RNSP	0,90

Combinazione n. 4: SLER

Condizione	CP
Peso proprio	1,00
Carichi permanenti torre	1,00
RNSP	1,00

7.5 Elaborazioni

7.5.1 Portanza pali in condizioni drenate

Palo	Oggetto	N _c	N' _c	N _q	N' _q	Z _c [m]	P _p [kN]	PI [kN]	A [kN]
1	Piastra	19.324	46.706	9.603	10.370	-	6234,89	12171,07	0
2	Piastra	19.324	46.706	9.603	10.370	-	6234,89	12171,07	0
3	Piastra	19.324	46.706	9.603	10.370	-	6234,89	12171,07	0

Palo	Oggetto	Nc	N'c	Nq	N'q	Zc [m]	Pp [kN]	PI [kN]	A [kN]
4	Piastra	19.324	46.706	9.603	10.370	-	6234,89	12171,07	0
5	Piastra	19.324	46.706	9.603	10.370	-	6234,89	12171,07	0
6	Piastra	19.324	46.706	9.603	10.370	-	6234,89	12171,07	0
7	Piastra	19.324	46.706	9.603	10.370	-	6234,89	12171,07	0
8	Piastra	19.324	46.706	9.603	10.370	-	6234,89	12171,07	0
9	Piastra	19.324	46.706	9.603	10.370	-	6234,89	12171,07	0
10	Piastra	19.324	46.706	9.603	10.370	-	6234,89	12171,07	0
11	Piastra	19.324	46.706	9.603	10.370	-	6234,89	12171,07	0
12	Piastra	19.324	46.706	9.603	10.370	-	6234,89	12171,07	0
13	Piastra	19.324	46.706	9.603	10.370	-	6234,89	12171,07	0
14	Piastra	19.324	46.706	9.603	10.370	-	6234,89	12171,07	0
15	Piastra	19.324	46.706	9.603	10.370	-	6234,89	12171,07	0
16	Piastra	19.324	46.706	9.603	10.370	-	6234,89	12171,07	0
17	Piastra	19.324	46.706	9.603	10.370	-	6234,89	12171,07	0
18	Piastra	19.324	46.706	9.603	10.370	-	6234,89	12171,07	0
19	Piastra	19.324	46.706	9.603	10.370	-	6234,89	12171,07	0
20	Piastra	19.324	46.706	9.603	10.370	-	6234,89	12171,07	0
21	Piastra	19.324	46.706	9.603	10.370	-	6234,89	12171,07	0
22	Piastra	19.324	46.706	9.603	10.370	-	6234,89	12171,07	0
23	Piastra	19.324	46.706	9.603	10.370	-	6234,89	12171,07	0
24	Piastra	19.324	46.706	9.603	10.370	-	6234,89	12171,07	0
25	Piastra	19.324	46.706	9.603	10.370	-	6234,89	12171,07	0
26	Piastra	19.324	46.706	9.603	10.370	-	6234,89	12171,07	0
27	Piastra	19.324	46.706	9.603	10.370	-	6234,89	12171,07	0
28	Piastra	19.324	46.706	9.603	10.370	-	6234,89	12171,07	0
29	Piastra	19.324	46.706	9.603	10.370	-	6234,89	12171,07	0
30	Piastra	19.324	46.706	9.603	10.370	-	6234,89	12171,07	0

7.5.2 Portanza pali in condizioni non drenate

Palo	Oggetto	Nc	N'c	Nq	N'q	Zc [m]	Pp [kN]	PI [kN]	A [kN]
1	Piastra	9.000	13.766	1.000	1.000	-	1975,24	9896,02	0
2	Piastra	9.000	13.766	1.000	1.000	-	1975,24	9896,02	0
3	Piastra	9.000	13.766	1.000	1.000	-	1975,24	9896,02	0
4	Piastra	9.000	13.766	1.000	1.000	-	1975,24	9896,02	0
5	Piastra	9.000	13.766	1.000	1.000	-	1975,24	9896,02	0
6	Piastra	9.000	13.766	1.000	1.000	-	1975,24	9896,02	0
7	Piastra	9.000	13.766	1.000	1.000	-	1975,24	9896,02	0
8	Piastra	9.000	13.766	1.000	1.000	-	1975,24	9896,02	0
9	Piastra	9.000	13.766	1.000	1.000	-	1975,24	9896,02	0
10	Piastra	9.000	13.766	1.000	1.000	-	1975,24	9896,02	0
11	Piastra	9.000	13.766	1.000	1.000	-	1975,24	9896,02	0
12	Piastra	9.000	13.766	1.000	1.000	-	1975,24	9896,02	0
13	Piastra	9.000	13.766	1.000	1.000	-	1975,24	9896,02	0
14	Piastra	9.000	13.766	1.000	1.000	-	1975,24	9896,02	0
15	Piastra	9.000	13.766	1.000	1.000	-	1975,24	9896,02	0
16	Piastra	9.000	13.766	1.000	1.000	-	1975,24	9896,02	0
17	Piastra	9.000	13.766	1.000	1.000	-	1975,24	9896,02	0
18	Piastra	9.000	13.766	1.000	1.000	-	1975,24	9896,02	0
19	Piastra	9.000	13.766	1.000	1.000	-	1975,24	9896,02	0
20	Piastra	9.000	13.766	1.000	1.000	-	1975,24	9896,02	0
21	Piastra	9.000	13.766	1.000	1.000	-	1975,24	9896,02	0
22	Piastra	9.000	13.766	1.000	1.000	-	1975,24	9896,02	0
23	Piastra	9.000	13.766	1.000	1.000	-	1975,24	9896,02	0
24	Piastra	9.000	13.766	1.000	1.000	-	1975,24	9896,02	0
25	Piastra	9.000	13.766	1.000	1.000	-	1975,24	9896,02	0
26	Piastra	9.000	13.766	1.000	1.000	-	1975,24	9896,02	0
27	Piastra	9.000	13.766	1.000	1.000	-	1975,24	9896,02	0
28	Piastra	9.000	13.766	1.000	1.000	-	1975,24	9896,02	0
29	Piastra	9.000	13.766	1.000	1.000	-	1975,24	9896,02	0
30	Piastra	9.000	13.766	1.000	1.000	-	1975,24	9896,02	0

7.5.3 Verifiche geotecniche sui pali in condizioni drenate

n°	Oggetto	N	Pd	FSV	T	Td	FSO
1	Piastra	2123,28	7971,86	3.755	58,32	599,47	10.279
2	Piastra	2312,74	7971,86	3.447	58,53	599,47	10.242
3	Piastra	2402,63	7971,86	3.318	58,62	599,47	10.226
4	Piastra	2383,78	7971,86	3.344	58,54	599,47	10.240
5	Piastra	2225,46	7971,86	3.582	58,33	599,47	10.277
6	Piastra	1952,97	7971,86	4.082	58,07	599,47	10.324
7	Piastra	1589,63	7971,86	5.015	57,85	599,47	10.363
8	Piastra	1182,92	7971,86	6.739	57,75	599,47	10.380
9	Piastra	822,50	7971,86	9.692	57,83	599,47	10.365
10	Piastra	491,41	7971,86	16.222	58,04	599,47	10.328
11	Piastra	233,59	7971,86	34.128	58,30	599,47	10.282
12	Piastra	69,78	7971,86	114.236	58,52	599,47	10.243
13	Piastra	9,09	7971,86	876.734	58,62	599,47	10.226
14	Piastra	68,33	7971,86	116.669	58,55	599,47	10.239
15	Piastra	246,83	7971,86	32.297	58,35	599,47	10.274
16	Piastra	518,47	7971,86	15.376	58,09	599,47	10.320
17	Piastra	858,93	7971,86	9.281	57,87	599,47	10.358
18	Piastra	1213,67	7971,86	6.568	57,79	599,47	10.374
19	Piastra	1563,48	7971,86	5.099	57,86	599,47	10.361
20	Piastra	1866,84	7971,86	4.270	58,06	599,47	10.325
21	Piastra	3659,07	7971,86	2.179	58,63	599,47	10.225
22	Piastra	4188,89	7971,86	1.903	58,88	599,47	10.182
23	Piastra	4000,11	7971,86	1.993	58,78	599,47	10.198
24	Piastra	3166,95	7971,86	2.517	58,46	599,47	10.255
25	Piastra	2006,40	7971,86	3.973	58,35	599,47	10.273
26	Piastra	961,36	7971,86	8.292	58,62	599,47	10.227
27	Piastra	426,12	7971,86	18.708	58,87	599,47	10.182
28	Piastra	609,32	7971,86	13.083	58,79	599,47	10.197
29	Piastra	1442,48	7971,86	5.526	58,47	599,47	10.252
30	Piastra	2610,28	7971,86	3.054	58,37	599,47	10.271

7.5.4 Verifiche geotecniche sui pali in condizioni non drenate

n°	Oggetto	N	Pd	FSV	T	Td	FSO
1	Piastra	2104,71	4952,09	2.353	58,32	600,06	10.290
2	Piastra	2292,85	4952,09	2.160	58,53	600,06	10.252
3	Piastra	2382,32	4952,09	2.079	58,62	600,06	10.237
4	Piastra	2364,36	4952,09	2.094	58,54	600,06	10.250
5	Piastra	2207,44	4952,09	2.243	58,33	600,06	10.287
6	Piastra	1937,28	4952,09	2.556	58,07	600,06	10.334
7	Piastra	1576,49	4952,09	3.141	57,85	600,06	10.373
8	Piastra	1172,39	4952,09	4.224	57,75	600,06	10.390
9	Piastra	815,66	4952,09	6.071	57,83	600,06	10.376
10	Piastra	487,51	4952,09	10.158	58,04	600,06	10.338
11	Piastra	231,91	4952,09	21.354	58,30	600,06	10.292
12	Piastra	69,60	4952,09	71.152	58,52	600,06	10.253
13	Piastra	9,21	4952,09	537.545	58,62	600,06	10.237
14	Piastra	67,83	4952,09	73.006	58,55	600,06	10.249
15	Piastra	244,99	4952,09	20.213	58,35	600,06	10.285
16	Piastra	514,33	4952,09	9.628	58,09	600,06	10.331
17	Piastra	852,22	4952,09	5.811	57,87	600,06	10.369
18	Piastra	1203,66	4952,09	4.114	57,79	600,06	10.384
19	Piastra	1550,43	4952,09	3.194	57,86	600,06	10.372
20	Piastra	1850,54	4952,09	2.676	58,06	600,06	10.335
21	Piastra	3701,22	4952,09	1.338	58,63	600,06	10.235
22	Piastra	4238,99	4952,09	1.168	58,88	600,06	10.192

n°	Oggetto	N	Pd	FSV	T	Td	FSO
23	Piastra	4046,56	4952,09	1.224	58,78	600,06	10.208
24	Piastra	3200,19	4952,09	1.547	58,46	600,06	10.265
25	Piastra	2021,57	4952,09	2.450	58,35	600,06	10.284
26	Piastra	960,04	4952,09	5.158	58,62	600,06	10.237
27	Piastra	416,28	4952,09	11.896	58,87	600,06	10.192
28	Piastra	602,40	4952,09	8.221	58,79	600,06	10.207
29	Piastra	1448,81	4952,09	3.418	58,47	600,06	10.263
30	Piastra	2635,48	4952,09	1.879	58,37	600,06	10.281