

TITOLARE DEL DOCUMENTO:

AREN Green S.r.l.

Società soggetta alla direzione e coordinamento di AREN Electric Power S.p.A.

Sede legale e amministrativa: Via dell'Arrigoni n. 308 | 47522 Cesena (FC) | Ph. +39 0547 415245

Iscritta nel Registro delle Imprese della Romagna – Forlì-Cesena e Rimini | REA 326908 | C.F./P.Iva 04032170401

COMUNI DI CONTESSA ENTELLINA (PA), SANTA MARGHERITA
DI BELICE (AG), SAMBUCA DI SICILIA (AG) E MENFI (AG)
LOCALITÀ “CONTRADA DUCHESSA”

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI **IMPIANTO EOLICO** **“DUCHESSA”**

REDAZIONE / PROGETTISTA:



AREN Electric Power S.p.A.
Società per Azioni con Unico Socio
Via dell'Arrigoni n. 308 - 47522 Cesena (FC)
Ph. +39 0547 415245 - Fax +39 0547 415274
Web: www.aren-ep.com

TIMBRO E FIRMA PROGETTISTA:

Ing. Samuele Ulivi
Ordine degli Ingegneri di Forlì-
Cesena – matr. 2866

TITOLO ELABORATO:

RELAZIONE SULLE STRUTTURE

CODICE ELABORATO:

DUCDS_F00R00100_00

FORMATO:

A4

Nr. EL.:

/

FASE:

**PROGETTO
DEFINITIVO**

REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
00	Prima emissione	05/04/2024	D. Zampa	S. Ulivi	S. Ulivi
01					
02					
03					
04					

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Duchessa”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
		Data: 05/04/2024
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Revisione: 00
		Pagina: 1 di 46

1	SOMMARIO	
2	PREMESSA	3
2.1	Inquadramento del progetto	3
3	DESCRIZIONE GENERALE DELL’OPERA E DEI CRITERI DI ANALISI E VERIFICA	5
3.1	Tipologia di intervento	5
3.2	Scelte progettuali e di modellazione	5
3.3	Criteri generali di progettazione	6
3.4	Descrizione generale dell’opera	7
4	QUADRO NORMATIVO DI RIFERIMENTO ADOTTATO	9
4.1	Norme di riferimento	9
4.2	Altre norme e documenti tecnici integrativi	9
5	CARATTERIZZAZIONE SISMICA DELL’AREA	10
5.1	Zona sismica	10
5.2	Periodo di riferimento dell’azione sismica di base	11
5.3	Pericolosità sismica di base	11
5.4	Azione sismica di base	11
5.5	Parametri sismici aerogeneratori	12
5.6	Risposta Sismica Locale	12
5.6.1	Amplificazione Topografica	12
5.6.2	Amplificazione Stratigrafica	12
6	MATERIALI IMPIEGATI	13
6.1	Calcestruzzo	13
6.2	Acciaio per il Calcestruzzo	14
7	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DELL’AREA	15
7.1	Parametri geotecnici	15
8	MODELLO NUMERICO	17
8.1	Criteri principali di modellazione	17
8.2	Vincoli strutturali	18
8.3	Metodologia di modellazione ed analisi	18
8.4	Criteri di verifica agli stati limite indagati	20
8.5	Modellazione della fondazione superficiale e profonda	20
8.6	Modellazione dei vincoli interni ed esterni	24
9	AZIONI SULLA STRUTTURA	25
9.1	Azioni di progetto	25

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Duchessa”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
		Data: 05/04/2024
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Revisione: 00
		Pagina: 2 di 46

9.2	a – pesi propri ($G\gamma$)	26
9.3	b – carichi permanenti (G)	26
9.4	c – carichi accidentali.....	27
9.5	Modellazione delle azioni.....	28
9.6	Combinazioni delle azioni	28
9.7	Schematizzazione dei casi di carico e dei carichi applicati.....	29
9.8	Definizione delle combinazioni di carico.....	33
9.9	Informazioni su coprifermo e ricoprimento delle armature	35
10	CRITERI DI VERIFICA AGLI STATI LIMITE	36
11	PRINCIPALI RISULTATI.....	37
11.1	Inviluppo delle sollecitazioni maggiormente significative	37
11.2	Deformate	42
12	VERIFICHE AGLI STATI LIMITE ULTIMI E DI ESERCIZIO	43
12.1	Verifiche SLU	43
12.2	Verifiche SLE	44

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Duchessa”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
		Data: 05/04/2024
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Revisione: 00
		Pagina: 3 di 46

2 PREMESSA

La presente Relazione si riferisce al Progetto Definitivo di un impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica, denominato “Duchessa”, e sito nel Comune di Contessa Entellina (PA), alla località “Contrada Duchessa” (nel seguito: il “**Progetto**”).

La società proponente è Aren Green S.r.l. Unipersonale, con sede in Via dell'Arrigoni 308 – 47522 Cesena (FC), P.IVA 04032170401 (nel seguito: il “**Soggetto proponente**”).

Il Soggetto proponente ha intrapreso l'iniziativa imprenditoriale di realizzare un impianto di produzione di energia elettrica mediante lo sfruttamento del vento, composto da n. 15 aerogeneratori mod. Vestas V150, ciascuno della potenza di 6.0 MW, per una potenza di immissione complessiva dell'impianto eolico pari a 90.0 MW.

Gli aerogeneratori si trovano nel Comune di Contessa Entellina (PA). Il tracciato del cavidotto di collegamento alla Stazione Utente attraversa i Comuni di Menfi, Sambuca di Sicilia, Santa Margherita di Belice, tutti in provincia di Agrigento (AG), ed infine il comune di Contessa Entellina in provincia di Palermo (PA) e sarà allacciato alla Stazione Elettrica Terna di nuova realizzazione, tramite connessione a 36 kV.

La presente relazione di calcolo strutturale, in conformità con il DM 17/01/18, è comprensiva di una descrizione generale dell'opera e dei criteri generali di analisi e verifica.

2.1 Inquadramento del progetto

Oggetto della presente relazione è il progetto preliminare di fondazioni per torri eoliche da realizzarsi nel Comune di Contessa Entellina (PA). Il progetto prevede l'installazione di n. 15 aerogeneratori Vestas V150 da 6.0 MW (potenza complessiva = 90.0 MW), con altezza al mozzo pari a 105 metri e diametro delle pale di 150 metri.

Nella seguente **Tabella 1** si elencano le posizioni degli aerogeneratori che costituiscono il Progetto, espresse in coordinate WGS 84, fuso UTM 33:

WTG	X [m]	Y [m]
DU01	328201	4176503
DU02	328210	4177082
DU03	328484	4179856
DU04	327973	4179490
DU05	327619	4178979
DU06	329512	4178618
DU07	328738	4180400
DU08	329996	4178809
DU09	329216	4179889
DU10	329379	4179400
DU11	328642	4177492
DU12	327763	4177227
DU13	327924	4178388
DU14	328839	4178493
DU15	329134	4178110

Tabella 1: Posizione aerogeneratori (WGS 84 UTM 33)

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico "Duchessa"	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
		Data: 05/04/2024
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Revisione: 00
		Pagina: 4 di 46

I 15 aerogeneratori si trovano ubicati, al Catasto terreni, ai seguenti Fogli:

WTG	Provincia	Comune	Foglio	Particella
DU01	Palermo	Contessa Entellina	27	369
DU02	Palermo	Contessa Entellina	15	93
DU03	Palermo	Contessa Entellina	9	316
DU04	Palermo	Contessa Entellina	8	71
DU05	Palermo	Contessa Entellina	8	272
DU06	Palermo	Contessa Entellina	15	420
DU07	Palermo	Contessa Entellina	9	27
DU08	Palermo	Contessa Entellina	15	445
DU09	Palermo	Contessa Entellina	9	40
DU10	Palermo	Contessa Entellina	9	69
DU11	Palermo	Contessa Entellina	15	254
DU12	Palermo	Contessa Entellina	15	222
DU13	Palermo	Contessa Entellina	15	621
DU14	Palermo	Contessa Entellina	15	372
DU15	Palermo	Contessa Entellina	15	64

Tabella 2: Inquadramento catastale aerogeneratori

L'area interessata dal campo eolico, più nello specifico dagli aerogeneratori, è posta a un'altitudine compresa circa fra 170 e 380 metri s.l.m. Nella seguente figura è riportato un inquadramento territoriale del parco eolico.

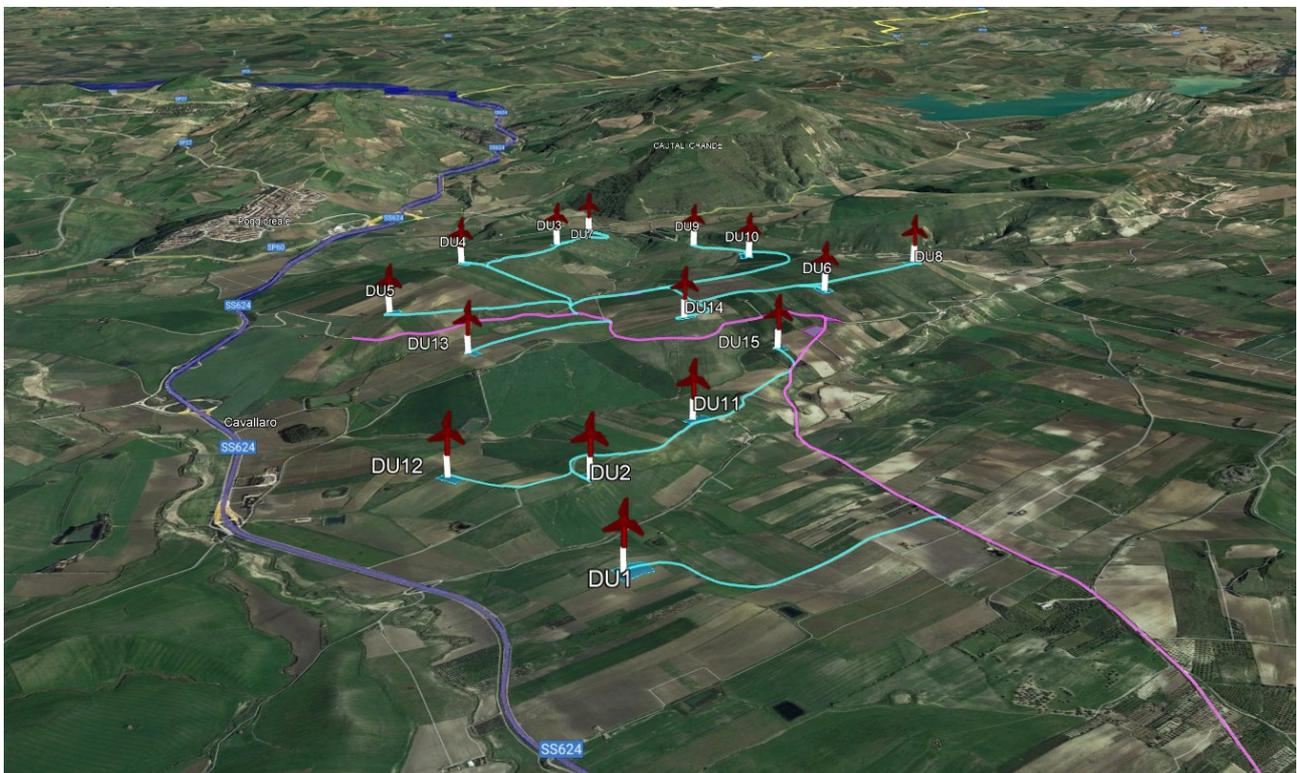


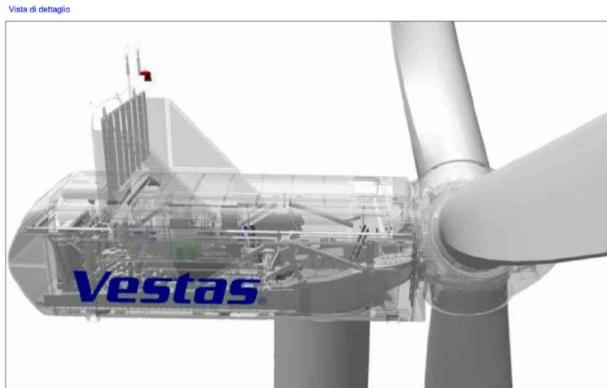
Figura 1: Inquadramento territoriale impianto

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico "Duchessa"	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
		Data: 05/04/2024
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Revisione: 00
		Pagina: 5 di 46

3 DESCRIZIONE GENERALE DELL'OPERA E DEI CRITERI DI ANALISI E VERIFICA

3.1 Tipologia di intervento

L'intervento riguarda la nuova costruzione di fondazioni di tipo indiretto (fondazioni su pali) a sostegno di torri eoliche modello Vestas V150-6.0 MW. Nella figura seguente è riportata una rappresentazione tecnica dell'elemento al di sopra del terreno di fondazione.



Dati tecnici Aerogeneratori	
Modello	Vestas V150 - 6.0 MW
Potenza	6.0 mW
Diametro rotore	150 m
Altezza mozzo	105 m
Regolazione potenza	Pitch
Caratteristiche torre	Torre conica tubolare in acciaio
Area spazzata	17.671 m ²
Numero pale	3
Lunghezza pale	73.66 m
Materiale pale	Vetroresina rinforzata, fibre di carbonio e punta in metallo solido
Tensione generatore	720 V
Tipo generatore	Asincrono con rotore a gabbia
Frequenza generatore	50 Hz

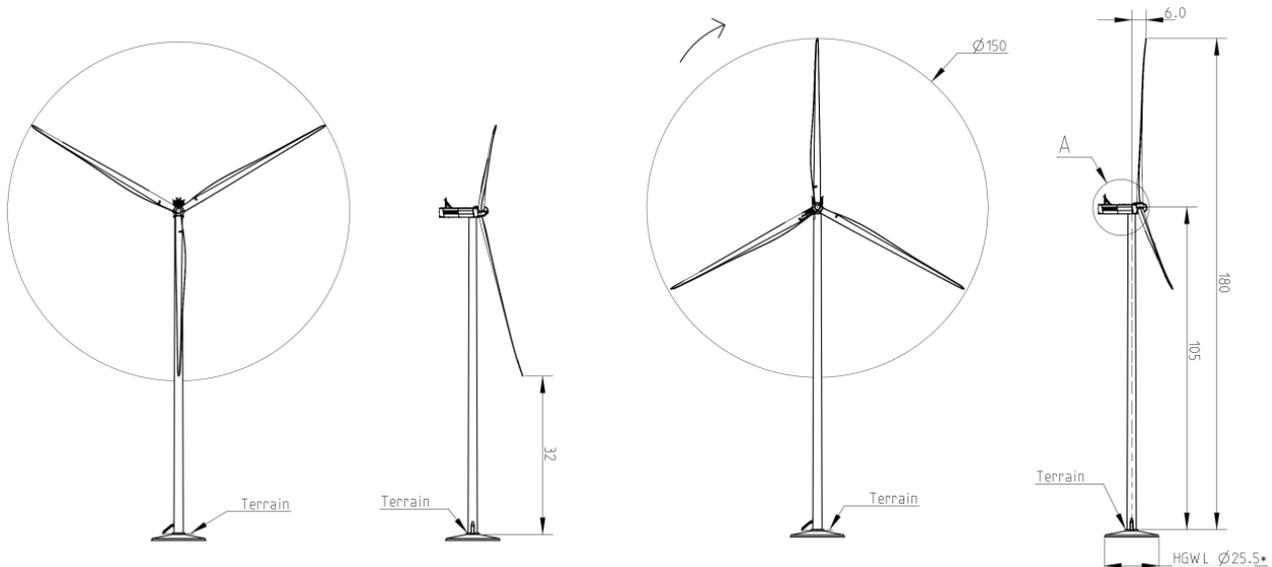


Figura 2: Architettoneco Aerogeneratore Vestas V150-6.0 MW

3.2 Scelte progettuali e di modellazione

I dimensionamenti della platea e dei pali sono stati eseguiti con il codice di calcolo automatico meglio identificato nel proseguito. La sicurezza e le prestazioni delle opere si sono valutate in relazione agli stati limite ultimi (S.L.U.) e agli stati limite di esercizio (S.L.E.) conseguenti ai carichi applicati dagli impianti.

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Duchessa”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
		Data: 05/04/2024
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Revisione: 00
		Pagina: 6 di 46

Per le condizioni non sismiche, le analisi si sono condotte, nei confronti degli stati limite ultimi (S.L.U.) e stati limite di esercizio (S.L.E.), in accordo ai punti 4.1.2.1 e 4.1.2.2 del D.M.17/01/2018, verificando le strutture rispetto alle combinazioni delle azioni definite al punto 2.5.3 dello stesso.

La platea, in conformità alle ipotesi di verifica, poggia su pali trivellati nel terreno simulato con molle orizzontali e verticali determinate automaticamente con il programma di calcolo utilizzato per i dimensionamenti, correlando pressioni sul terreno e deformazioni e verificando i risultati con considerazioni sulle deformazioni attese.

3.3 Criteri generali di progettazione

Le geometrie strutturali della platea, nell'ottica di eseguire correttamente i dimensionamenti, sono state implementate nel modello di calcolo meglio identificato nel proseguo nel rispetto della posizione altimetrica riferita al piano 0.00 di campagna, a cui si riferisce la stratigrafia riportata nel modello geotecnico proposto dalla Relazione Geologica preliminare dedicata.

Per le azioni sulla platea, in riferimento al Capitolo 3 del D.M. 17/01/2018 ed alle indicazioni ricevute dal Fornitore della parte in elevazione, si sono considerati carichi nominali e caratteristici (pesi propri, permanenti, variabili di vento per i diversi casi di carico), così come in riferimento al Capitolo 2 dello stesso D.M. si sono definite le loro combinazioni.

Si è impiegato inoltre quanto descritto nel Capitolo 4.1 del D.M. 17/01/2018, in termini di sicurezza, metodi di analisi, resistenza di materiali e sezioni, metodi di verifica e dettagli costruttivi nonché quanto previsto dalle specifiche normative di settore per quanto concerne le valutazioni del comportamento delle fondazioni ai fenomeni ciclici di esercizio e limite.

La determinazione della rigidezza rotazionale e traslazionale delle fondazioni si opera con le teorie e le formulazioni contenute nel “Canadian Foundation Manual IVth ed.”, di riferimento per i dimensionamenti delle fondazioni di Aerogeneratori.

In aderenza al Capitolo 6 del D.M. 17/01/2018, la verifica geotecnica delle fondazioni si è eseguita adottando l'Approccio 2, per cui è prevista un'unica combinazione di gruppi di coefficienti sia nelle verifiche strutturali che in quelle geotecniche.

Per i metodi di verifica e gli aspetti costruttivi di opere di fondazione profonde si è fatto riferimento al punto dedicato del Cap. 6 del D.M. 17/01/2018.

In considerazione delle tipologie di struttura in progetto, che sono di fatto elementi di fondazione, si seguono le indicazioni del D.M. 17/01/2018 sulle modalità di calcolo in termini di comportamento delle fondazioni in campo elastico. La sicurezza e le prestazioni delle fondazioni si sono valutate in relazione agli stati limite ultimi (S.L.U.) e agli stati limite di esercizio (S.L.E.).

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Duchessa”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
		Data: 05/04/2024
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Revisione: 00
		Pagina: 7 di 46

3.4 Descrizione generale dell'opera

Il progetto prevede la costruzione di n. 15 plinti di fondazione su pali a servizio dell'installazione di n. 15 aerogeneratori, identificati nel progetto dell'impianto eolico come “DU” seguito da numerazione a doppia cifra come “01”.

Le fondazioni sono del tutto identiche dal punto di vista dimensionale e sono state calcolate in base ai dati più gravosi (anche tenuto conto delle indagini geologiche preliminari in sito) che massimizzano l'effetto delle azioni di progetto.

Il plinto di fondazione calcolato presenta una forma assimilabile a un tronco di cono con base maggiore avente diametro pari a 22.5 m e base minore avente diametro pari a 5.35 m, con quota d'imposta a circa -3.00 m rispetto al piano medio di campagna. L'altezza massima della fondazione misurata al centro della stessa (sul colletto) è di 3.15 m, mentre l'altezza minima misurata sull'estremità è di 1.80 m. Al centro della fondazione viene realizzato un accrescimento di 0.60 m al fine di consentire l'alloggio dell'anchor cage per l'installazione della torre eolica.

Nella figura seguente è riportata una sezione di dettaglio della fondazione superficiale.

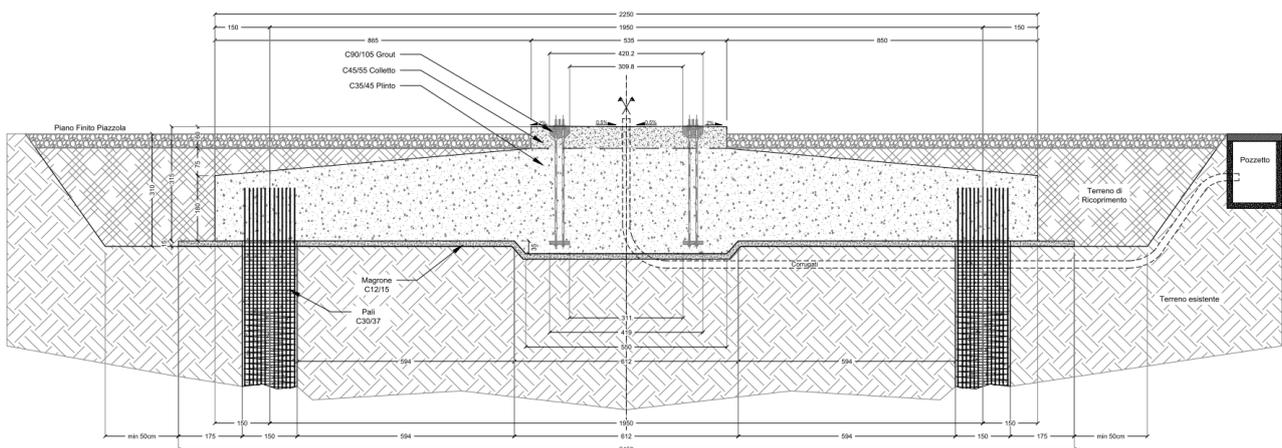


Figura 3: Dettaglio sezione fondazione

Viste le caratteristiche geologiche e gli enti sollecitanti, la fondazione è del tipo indiretto fondata su n.16 pali di diametro 150 cm e lunghezza pari a 30.00 m, disposti radialmente ad una distanza dal centro pari a 9.75 m. Le due congiungenti degli assi di due generici pali contigui con il centro della fondazione formano un angolo al centro pari a 22.50°.

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Duchessa”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
		Data: 05/04/2024
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Revisione: 00
		Pagina: 8 di 46

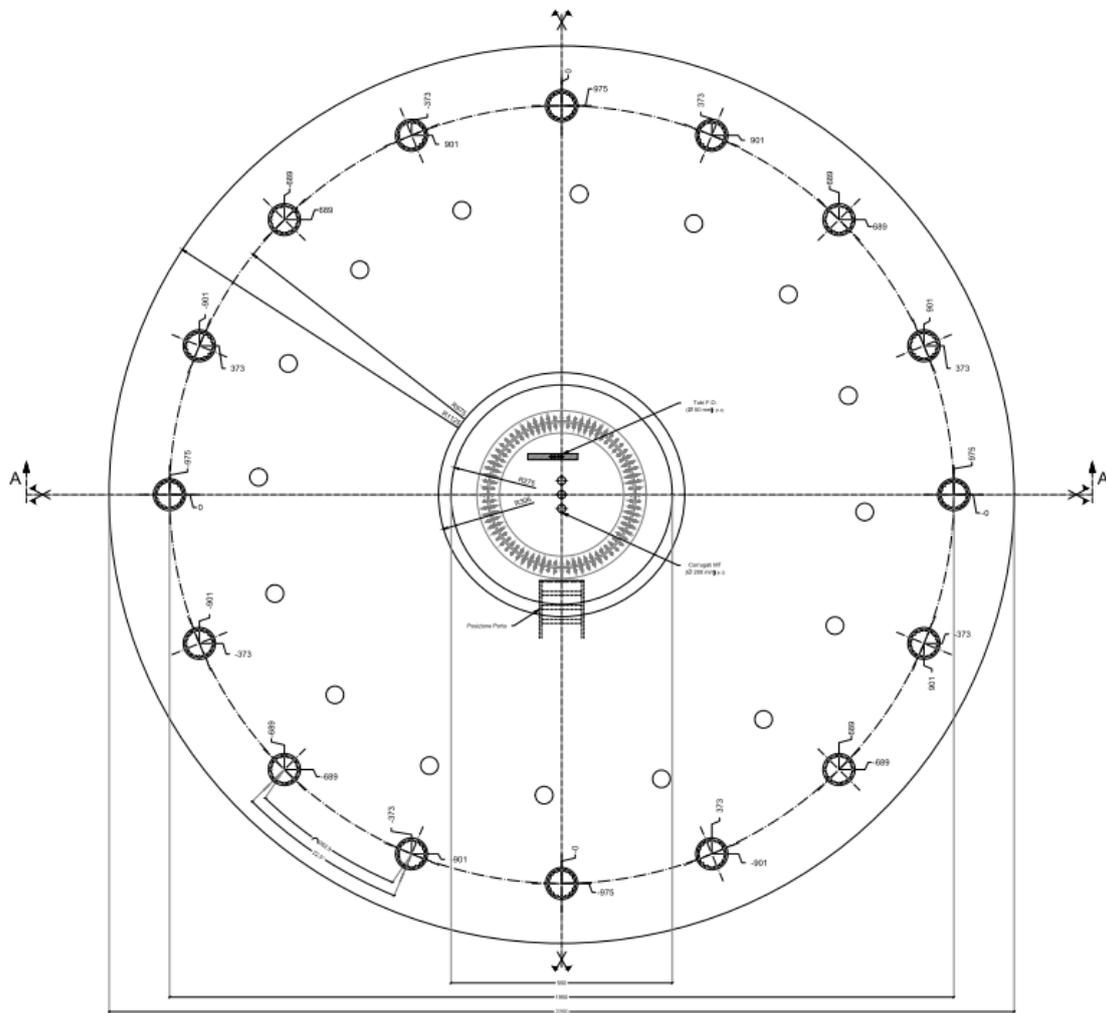


Figura 4: Dettaglio pianta fondazione

L'installazione delle torri eoliche sul plinto di fondazione avviene tramite collegamento meccanico a mezzo di bulloni su barre filettate provvedute dal fornitore degli aerogeneratori. Le barre, da assemblare su struttura circolare a doppio anello (inferiore e superiore), costituiscono la cosiddetta “Anchor Cage” che interessa tutta la parte centrale della fondazione e che viene annegata nelle fasi di getto.

Il punto di contatto tra la flangia di base dell'aerogeneratore e le fondazioni viene lasciato vuoto, in modo tale da essere riempito (una volta posizionata la torre ed a serraggio dei bulloni completato) con una malta ad alta resistenza.

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Duchessa”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
		Data: 05/04/2024
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Revisione: 00
		Pagina: 9 di 46

4 QUADRO NORMATIVO DI RIFERIMENTO ADOTTATO

4.1 Norme di riferimento

Le fasi di analisi e verifica delle strutture saranno condotte in accordo alle seguenti disposizioni normative:

- Norme tecniche per le costruzioni DM 17/01/2018 (“Aggiornamento delle Norme tecniche per le Costruzioni”);
- Istruzioni per l'applicazione dell'” Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni” di cui al decreto ministeriale del 17 gennaio 2018 (Circolare 7 del 19/01/2019).

4.2 Altre norme e documenti tecnici integrativi

Nel presente progetto si è fatto ricorso al seguente documento tecnico integrativo:

- “Canadian Foundation Manual IVth ed.”.

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Duchessa”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
		Data: 05/04/2024
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Revisione: 00
		Pagina: 10 di 46

5 CARATTERIZZAZIONE SISMICA DELL'AREA

5.1 Zona sismica

La Mappa di Pericolosità Sismica suddivide il territorio nazionale in zone sismiche ognuna contrassegnata da un diverso valore di “ a_g ” (accelerazione orizzontale massima su suolo rigido e pianeggiante) riferito ad una probabilità di superamento del 10% in 50 anni. I valori che assumo tali accelerazioni sono riportati nella tabella che segue:

Zona Sismica “1”	“ a_g ” $\geq 0,25$ g
Zona Sismica “2”	$0,15$ g \leq “ a_g ” $< 0,25$ g
Zona Sismica “3”	$0,05$ g \leq “ a_g ” $< 0,15$ g
Zona Sismica “4”	“ a_g ” $< 0,15$ g

Tabella 3: Zona sismicità di base

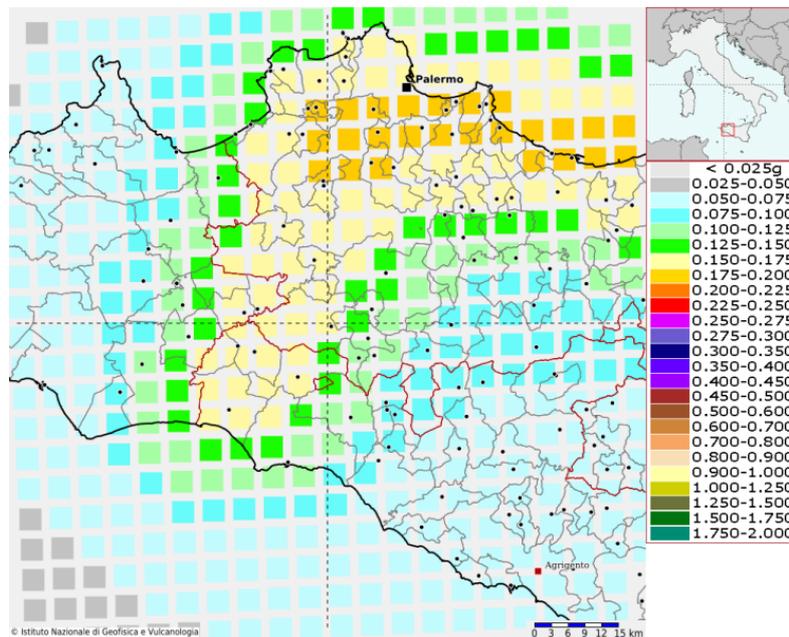


Figura 5: Zona sismicità di base comune di progetto

Nella classificazione sismica del territorio italiano (O.P.C.M. n. 3274 20/03/2003, Delibera della Giunta regionale n.408 19/12/2003 e ss.mm.ii), che definisce quattro zone a diverso grado di sismicità, i territori comunali di Santa Margherita Di Belice (AG), Gibellina (TP) e Contessa Entellina (PA) sono stati dichiarati sismici e classificati come zona sismica I, corrispondente ad una PGA > 0.25 g.

L'azione sismica sulle costruzioni viene valutata in relazione ai seguenti parametri:

- Vita nominale V_N pari a **50 anni** (costruzioni con livelli prestazionali ordinari);
- Classe d'uso **II**;
- Categoria Topografica **T1**;
- Categoria Stratigrafica;
- Coefficiente d'uso C_u pari a **1**;

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Duchessa”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Data: 05/04/2024
		Revisione: 00
		Pagina: 11 di 46

5.2 Periodo di riferimento dell'azione sismica di base

Noti i parametri precedentemente riportati, è possibile calcolare il periodo di riferimento definito come segue:

$$V_R = V_N \cdot C_U$$

Per cui sostituendo i valori precedenti si ottiene:

$$V_R = 50 * 1 = 50 \text{ anni}$$

5.3 Pericolosità sismica di base

L'azione sismica sulle costruzioni viene valutata a partire dalla Pericolosità Sismica di Base, in condizioni ideali di sito di riferimento rigido, con superficie topografica orizzontale (Categoria A nelle NTC2018). La pericolosità sismica di base costituisce l'elemento di conoscenza primario per la determinazione delle azioni sismiche e viene descritta in termini di valori di accelerazione orizzontale massima “ a_g ” e dei parametri che permettono di definire gli spettri di risposta ai sensi delle NTC, nelle condizioni di sito di riferimento rigido orizzontale, come sopra definito, in corrispondenza dei punti di un reticolo (reticolo di riferimento) i cui nodi sono sufficientemente vicini fra loro, per diverse probabilità di superamento in 50 anni e/o diversi periodi di ritorno T_R ricadenti in un intervallo di riferimento compreso almeno tra 30 e 2475 anni, estremi inclusi.

5.4 Azione sismica di base

I parametri che definiscono l'azione sismica di base sono i seguenti:

- Accelerazione orizzontale massima del terreno a_g ;
- Valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro di risposta in accelerazione orizzontale F_0 ;
- Periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale T^*c .

Detti parametri sismici dipendono dal periodo di ritorno T_R , espresso in anni, e dalla posizione geografica del sito. Il periodo di ritorno per ciascuno degli stati limite è il seguente:

Stato Limite	Probabilità di superamento	Periodo di ritorno
	P_{VR}	T_R
SLO	81%	30
SLD	63%	50
SLV	10%	475
SLC	5%	975

Tabella 4: Periodo di ritorno per gli stati limite

Entrando nel reticolo di riferimento attraverso la posizione del sito di riferimento espressa con latitudine e longitudine e il periodo di ritorno si ricavano i parametri sismici. Nel caso in cui il periodo di ritorno non sia esplicitato nel reticolo, essi sono ricavati per interpolazione.

Di seguito sono indicati per ciascuna posizione della turbina, i parametri necessari alla definizione della pericolosità sismica di base utili alla determinazione degli spettri di risposta elastica come da NTC per i diversi stati limite.

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Duchessa”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
		Data: 05/04/2024
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Revisione: 00
		Pagina: 12 di 46

5.5 Parametri sismici aerogeneratori

I parametri necessari alla definizione della pericolosità sismica di base sono riportati nella seguente tabella. Si sottolinea che per tutte le torri in fase di progettazione verranno considerati i parametri più sfavorevoli.

	Prob. superamento [%]	Tr [anni]	ag [g]	Fo [-]	Tc* [s]
Operatività (SLO)	81	30	0,035	2,312	0,206
Danno (SLD)	63	50	0,051	2,292	0,242
Salvaguardia della vita (SLV)	10	475	0,168	2,420	0,282
Prevenzione dal collasso (SLC)	5	975	0,226	2,470	0,300

Tabella 5: Parametri pericolosità sismica di base

5.6 Risposta Sismica Locale

L'azione sismica di base individuata nella precedente sezione viene successivamente variata, nei modi precisati dalle NTC2018, per tener conto delle modifiche prodotte dalle condizioni locali stratigrafiche del sottosuolo effettivamente presente nel sito di costruzione e dalla morfologia della superficie. Tali modifiche caratterizzano la risposta sismica locale. In particolare, per la caratterizzazione sismica dell'area interessata dalle opere a farsi, sono state prese in considerazione alcune indagini sismiche eseguite in aree prospicienti il sito in esame.

La risposta sismica locale è determinata mediante valutazione della Categoria Topografica e Stratigrafica del suolo di fondazione che determinano a loro volta l'amplificazione Topografica S_T e Stratigrafica S_s .

5.6.1 Amplificazione Topografica

Di seguito è riportata la categoria topografica dell'area in esame:

AEROGENERATORE	CATEGORIA TOPOGRAFICA	DESCRIZIONE
1 - 15	T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$

Tabella 6: Categoria topografica

5.6.2 Amplificazione Stratigrafica

Sulla base delle Categorie Stratigrafiche definite dalle Norme Tecniche per le Costruzioni in zona sismica, i suoli di fondazione sono individuabili all'interno delle Categorie Stratigrafiche “A”, “B”, “C”, “D” ed “E”. Tali categorie sono identificabili mediante specifiche analisi di risposta sismica locale.

La tipologia di sottosuolo delle aree d'interesse degli aerogeneratori risulta ricadere nella Categoria Stratigrafica seguente:

AEROGENERATORE	Categoria di suolo	
1 - 15	C	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s

Tabella 7: Categoria di suolo

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Duchessa”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
		Data: 05/04/2024
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Revisione: 00
		Pagina: 13 di 46

6 MATERIALI IMPIEGATI

6.1 Calcestruzzo

Il calcestruzzo della piastra di fondazione sarà in classe C35/45 ($R_{ck} \geq 45$ MPa) e per i pali di fondazione si utilizzerà un calcestruzzo di classe C30/37 ($R_{ck} \geq 37$ MPa). La resistenza della Malta Speciale sarà invece di classe C90/105 ($R_{ck} \geq 105$ MPa).

Per ciascuna tipologia di calcestruzzo si riportano, di seguito, le rispettive caratteristiche meccaniche:

- **Calcestruzzo per plinti di fondazione: C35/45**

Classe di esposizione: XC2

Copriferro minimo: 5cm (salvo diversamente specificato)

Classe	f_{ck}	α_{cc}	γ_{cls}	E_{cm}	f_{cd}	f_{ctm}	f_{ctd}	f_{cfm}	ϵ_{c2}	ϵ_{cu}
	[MPa]			[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]		
C35/45	35,00	0,85	1,50	34077	19,83	3,21	1,50	3,86	0,00200	0,00350

Tabella 8: Caratteristiche meccaniche CLS C35/45

- **Calcestruzzo per pali di fondazione: C30/37**

Classe di esposizione: XC2

Copriferro minimo: 5cm (salvo diversamente specificato)

Classe	f_{ck}	α_{cc}	γ_{cls}	E_{cm}	f_{cd}	f_{ctm}	f_{ctd}	f_{cfm}	ϵ_{c2}	ϵ_{cu}
	[MPa]			[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]		
C30/37	30,00	0,85	1,50	33019	17,40	2,94	1,96	3,53	0,00200	0,00350

Tabella 9: Caratteristiche meccaniche CLS C25/30

- **Malta speciale C90/105**

Classe	f_{ck}	α_{cc}	γ_{cls}	E_{cm}	f_{cd}	f_{ctm}	f_{ctd}	f_{cfm}
	[MPa]			[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
C90/105	87,00	0,85	1,50	43246	49,35	4,99	3,32	5,97

Tabella 10: Caratteristiche meccaniche CLS C80/95

I diagrammi costitutivi del calcestruzzo (tensione-deformazione) sono stati adottati in conformità alle indicazioni riportate al punto 4.1.2.1.2.1 del D.M. 17 gennaio 2018; in particolare per le verifiche effettuate a pressoflessione retta e a pressoflessione deviata è adottato il modello riportato nella seguente figura:

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico "Duchessa"	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Data: 05/04/2024
		Revisione: 00
		Pagina: 14 di 46

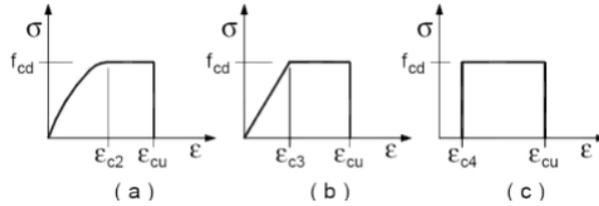


Figura 6: Modello tensione-deformazione per il calcestruzzo

6.2 Acciaio per il Calcestruzzo

L'acciaio adottato per le barre di armatura è di classe B450C con le seguenti caratteristiche meccaniche:

- **Acciaio in barre: B450C**

Classe acciaio	f_{yk}	γ_s	f_{tk}	E_s	f_{yd}	e_{yd}	e_{uk}	$(f_y/f_{y,nom})_k$	e_{ud}	$k = (f_t/f_y)_k$	σ_s , Rara	Diametro minimo mandrino di piegatura	
	[MPa]		[MPa]	[MPa]	[MPa]					[MPa]	[MPa]	$\Phi \leq 16\text{mm}$	$\Phi > 16\text{mm}$
B450C	450,00	1,15	540,00	210.000	391,30	0,00186	0,07500	$\leq 1,25$	0,06750	1,15 - 1,35	360,00	4 Φ	7 Φ

Tabella 11: Caratteristiche meccaniche acciaio B450C

I diagrammi costitutivi dell'acciaio sono stati adottati in conformità alle indicazioni riportate al punto 4.1.2.1.2.2 del D.M. 17 gennaio 2018; in particolare è adottato il modello elastico perfettamente plastico rappresentato nella figura b seguente:

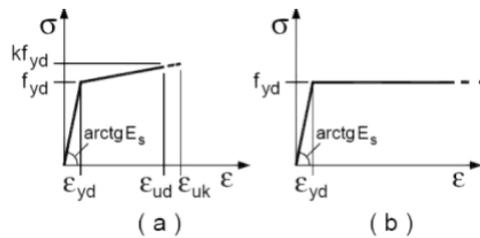


Figura 7: Modello tensione-deformazione per l'acciaio

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Duchessa”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
		Data: 05/04/2024
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Revisione: 00
		Pagina: 15 di 46

7 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DELL'AREA

Al fine di determinare la stratigrafia e le caratteristiche geomeccaniche dei terreni di sedime degli aerogeneratori, sono state utilizzate le risultanze delle indagini geotecniche in situ eseguite in aree limitrofe relativamente a progetti di impianti eolici che ricadono su terreni simili. Tutte le indagini consultate sono sufficienti a dare un'indicazione di massima sia delle stratigrafie che delle caratteristiche geomeccaniche dei suoli interessati dal parco eolico.

Le informazioni di carattere litologico acquisite utilizzando i dati delle indagini e prove eseguite in aree limitrofe, consentono di ricostruire una colonna stratigrafica, di seguito riportata:

0,00 m – 0,80 m	Copertura vegetale ricca di frammenti litici di varie dimensioni
0,80 m – 1,90 m	Limo argilloso brunastro ricco di alterazioni vegetali e frammenti litici di varia natura e dimensioni centimetriche. Sedimento di origine eluviale (Elu.)
1,90 m – 15,00 m	Argilla limo sabbiosa di colore grigio giallastro, umida plastica e moderatamente consistente, con livello sabbio alla base

Tabella 12: Stratigrafia terreni di sedime aerogeneratori

Il lavoro di rilevamento geologico, supportato principalmente dalla campagna di indagini eseguita in area limitrofa, e dai numerosi dati della letteratura tecnica, ha permesso di ricostruire un'attendibile geologia dell'area interessata e quindi di un modello stratigrafico, riportato nelle seguenti tabelle.

7.1 Parametri geotecnici

Si riportano di seguito i parametri meccanici degli orizzonti.

- COPERTURA AGRARIA (Cop.)

È costituito nel complesso da sedimenti con basse proprietà meccaniche. Complessivamente ha un comportamento meccanico simile a quello di un suolo pseudocoessivo scarsamente consolidato o sottoconsolidato per la preponderanza della frazione fine. Nei periodi umidi le acque di pioggia si infiltrano dal p.c. saturando in maniera variegata il suolo (in casi estremi coinvolge l'intero orizzonte sino alla superficie topografica) che mollificandosi rigonfia, perde consistenza e coesione. Di contro, nel periodo caldo, come riscontrato attualmente, la vicinanza con il p.c. facilita gli scambi termici con l'esterno (perdite di umidità per evapotraspirazione) creando di conseguenza riduzioni volumetriche dei sedimenti. Quanto osservato penalizza le doti meccaniche generali dell'intero orizzonte determinando un comportamento scadente e differenziato.

$\gamma = 1,80 \text{ T/mc}$	$C' = 0,00 \text{ T/mq}$	$\phi' = 18^\circ$
$W_n = 25 - 35 \%$	$C_u = 1,00 - 2,00 \text{ T/mq}$	$\phi_u = 0^\circ$
$W_p < W_n$	$E = 275 \text{ MPa}$	$G = 110 \text{ MPa}$
$W_l > W_n$		
$I_c \ll 1$		
$I_p = 25 - 30 \%$		
$\delta = 0,32$		
$K = 1 \text{ Kg/cm}^3$		

Tabella 13: Caratteristiche del terreno (Cop).

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Duchessa”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
		Data: 05/04/2024
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Revisione: 00
		Pagina: 16 di 46

- **ORIZZONTE DI NATURA ELUVIALE (Elu.)**

È un sedimento a granulometria limoso-argillosa con una piccola percentuale sabbiosa. La bassa permeabilità della porzione pseudocoesiva impedisce rapidi trasferimenti delle tensioni allo scheletro solido con ripercussioni nei valori di resistenza al taglio mobilitabili e differimenti nel tempo relativamente ai processi di deformabilità.

$\gamma = 2,00 \text{ T/mc}$	$C' = 1,50 \text{ T/mq}$	$\varphi' = 22^\circ$
$W_n < 20 \%$	$C_u = 6,00-7,00 \text{ T/mq}$	$\varphi_u = 0^\circ$
$W_p \geq W_n$	$E = 640 \text{ MPa}$	$G = 225 \text{ MPa}$
$W_l \gg W_n$		
$I_c \approx 1$		
$I_p = 25 - 30 \%$		
$\delta = 0,35$		
$K = 7 \text{ Kg/cm}^3$		

Tabella 14: Caratteristiche del terreno (Elu.)

- **ORIZZONTE DI BASE-BED ROCK (Fb.)**

Trattasi di un terreno pseudocoesivo in netto contrasto dal punto di vista meccanico con l'orizzonte che lo sovrasta. Il grado di sovraconsolidazione che lo contraddistingue ed il modestissimo contenuto d'acqua conferiscono consistenza e, complessivamente, apprezzabili doti in termini di rottura e deformabilità. A grande scala, inoltre, si presenta abbastanza omogeneo sia in senso verticale che orizzontale. Tali motivi, unitamente alla notevole estensione areale ed al considerevole spessore, ne fanno un livello di riferimento (bed-rock) nella contrada in questione.

$\gamma = 2,20 \text{ T/mc}$	$C' = 2,50 \text{ T/mq}$	$\varphi' = 24^\circ$
$W_n < 20 \%$	$C_u = 12,00 \text{ T/mq}$	$\varphi_u = 0^\circ$
$W_l \gg W_n$	$E = 1400 \text{ MPa}$	$G = 520 \text{ MPa}$
$W_p \gg W_n$		
$I_c > 1$		
$\delta = 0,37$		
$K = 10 \text{ Kg/cm}^3$		

Tabella 15: Caratteristiche del terreno (Fb.)

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Duchessa”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Data: 05/04/2024
		Revisione: 00
		Pagina: 17 di 46

8 MODELLO NUMERICO

L'analisi strutturale è eseguita per mezzo di una modellazione di tipo FEM (Finite Element Model) utilizzando il software “PRO_SAP” (PROfessional Structural Analysis Program), dove la struttura viene suddivisa in elementi connessi fra di loro in corrispondenza dei nodi.

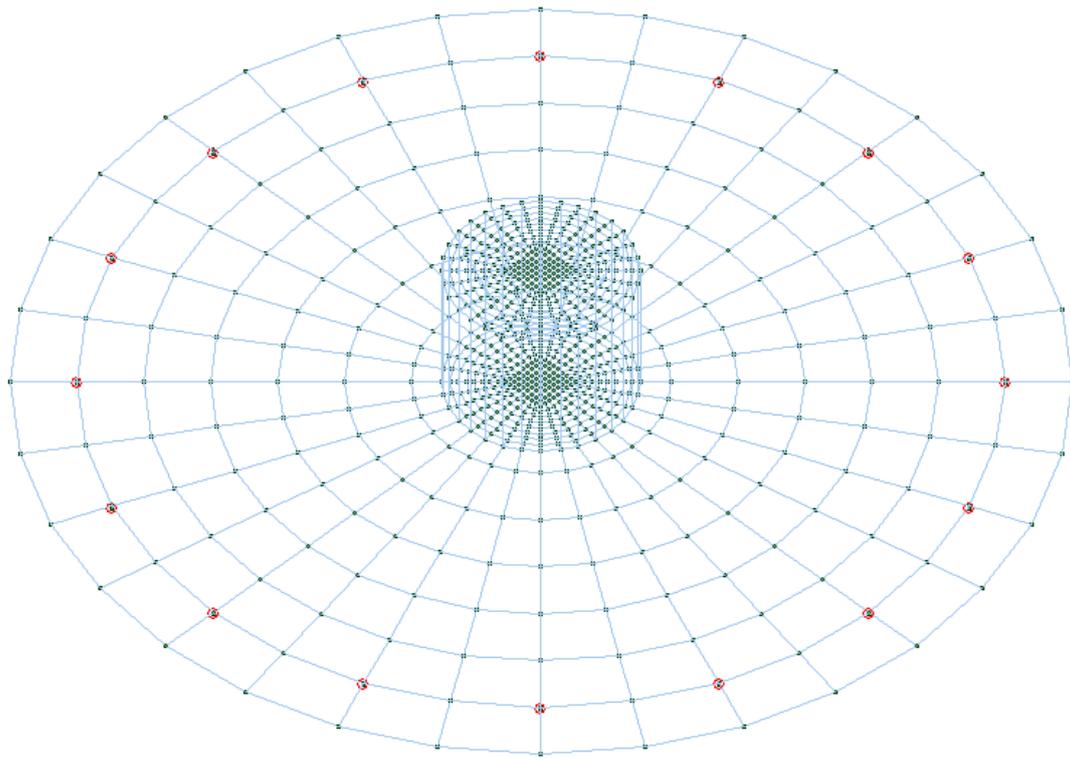


Figura 8: Modello unifilare

8.1 Criteri principali di modellazione

Le geometrie strutturali della platea e dei pali sono state implementate nel modello di calcolo meglio identificato nel proseguo nel rispetto di ipotesi delle geometrie e dei carichi in elevazione derivanti dallo specifico impiego. La platea è discretizzata in elementi shell con distribuzione concentrica modificando lo spessore degli stessi dai bordi esterni verso il centro.

Si prevede nella modellazione l'effettiva distribuzione radiale delle armature al fine di una migliore simulazione del reale comportamento dell'insieme. Nella verifica dell'opera si osservano i criteri specifici per ogni contingenza, in osservanza del D.M. 17/01/2018.

Le verifiche sono state condotte nei riguardi degli stati limite ultimi e di esercizio. Le azioni sulla platea sono cumulate in modo da determinare condizioni di carico tali da risultare più sfavorevoli ai fini delle singole verifiche, tenendo conto della probabilità ridotta di intervento simultaneo di tutte le azioni con i rispettivi valori più sfavorevoli, come indicato nel D.M. 17/01/2018 Cap. 2.5.3.

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Duchessa”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
		Data: 05/04/2024
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Revisione: 00
		Pagina: 18 di 46

8.2 Vincoli strutturali

Le fondazioni, di tipo a platea in c.c.a. gettata in opera su pali si considerano completamente sostenute dai pali stessi. Le costanti elastiche sono determinate automaticamente dal programma di calcolo ProSap utilizzato attraverso correlazioni fra pressioni sul terreno e deformazioni attese, previo input nel modulo geotecnico delle caratteristiche del terreno in sito ricavabili dalla Relazione Geologica preliminare di riferimento.

8.3 Metodologia di modellazione ed analisi

Nel prosieguo si indicano tipo di analisi strutturale condotta (statico, dinamico, lineare o non lineare) e il metodo adottato per la risoluzione del problema strutturale nonché le metodologie seguite per la verifica o per il progetto-verifica delle sezioni.

Si riportano le combinazioni di carico adottate e, nel caso di calcoli non lineari, i percorsi di carico seguiti; le configurazioni studiate per la struttura in esame sono risultate effettivamente esaustive per la progettazione-verifica.

Si è utilizzata un'analisi statica lineare, in aderenza a quanto previsto nel D.M. 17/01/2018, nella considerazione che le fondazioni sono interrato.

Tipo di analisi strutturale	
Sismica statica lineare	NO
Sismica dinamica lineare	NO
Sismica statica non lineare (prop. masse)	NO
Sismica statica non lineare (prop. modo)	NO
Sismica statica non lineare (triangolare)	NO
Non linearità geometriche (fattore P delta)	NO
Analisi lineare	SI

Tabella 16: Tipo di analisi strutturale

Progetto-verifica degli elementi	
Progetto cemento armato	D.M. 17-01-2018
Progetto acciaio	D.M. 17-01-2018
Progetto legno	D.M. 17-01-2018
Progetto muratura	D.M. 17-01-2018
Azione sismica	
Norma applicata per l'azione sismica	D.M. 17-01-2018

Tabella 17: Normative di riferimento

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico "Duchessa"	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
		Data: 05/04/2024
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Revisione: 00
		Pagina: 19 di 46

Combinazioni dei casi di carico	
APPROCCIO PROGETTUALE	Approccio 2
SLU	SI
SLV (SLU con sisma)	NO
SIC	NO
SLD	NO
SLO	NO
SLU GEO A2 (per approccio 1)	NO
SLU EQU	NO
Combinazione caratteristica (rara)	SI
Combinazione frequente	SI
Combinazione quasi permanente (SLE)	SI
SLA (accidentale quale incendio)	NO

Tabella 18: Combinazioni dei casi di carico

La verifica della sicurezza degli elementi strutturali avviene con i metodi della scienza delle costruzioni. L'analisi strutturale è condotta con il metodo degli spostamenti per la valutazione dello stato tensodeformativo indotto da carichi statici. L'analisi strutturale viene effettuata con il metodo degli elementi finiti. Il metodo sopraindicato si basa sulla schematizzazione della struttura in elementi connessi solo in corrispondenza di un numero prefissato di punti denominati nodi. I nodi sono definiti dalle tre coordinate cartesiane in un sistema di riferimento globale. Le incognite del problema (nell'ambito del metodo degli spostamenti) sono le componenti di spostamento dei nodi riferite al sistema di riferimento globale (traslazioni secondo X, Y, Z, rotazioni attorno X, Y, Z). La soluzione del problema si ottiene con un sistema di equazioni algebriche lineari i cui termini noti sono costituiti dai carichi agenti sulla struttura opportunamente concentrati ai nodi:

$$\mathbf{K} * \mathbf{u} = \mathbf{F} \quad \text{dove} \quad \mathbf{K} = \text{matrice di rigidità}$$

$$\mathbf{u} = \text{vettore spostamenti nodali}$$

$$\mathbf{F} = \text{vettore forze nodali}$$

Dagli spostamenti ottenuti con la risoluzione del sistema vengono quindi dedotte le sollecitazioni e/o le tensioni di ogni elemento, riferite generalmente ad una terna locale all'elemento stesso. Il sistema di riferimento utilizzato è costituito da una terna cartesiana destrorsa XYZ. Si assume l'asse Z verticale ed orientato verso l'alto.

Gli elementi utilizzati per la modellazione dello schema statico della struttura sono i seguenti:

- Elemento tipo TRUSS (biella-D2)
- Elemento tipo BEAM (trave-D2)
- Elemento tipo MEMBRANE (membrana-D3)
- Elemento tipo PLATE (piastra-guscio-D3)
- Elemento tipo BOUNDARY (molla)
- Elemento tipo SOLAIO (macro-elemento composto da più membrane)

Le azioni sono modellate secondo due modalità:

1. Azioni nodali

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Duchessa”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
		Data: 05/04/2024
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Revisione: 00
		Pagina: 20 di 46

Sono forze o momenti concentrati nei nodi del modello strutturale (oppure cedimenti impressi). Per ogni carico nodale si riporta il numero del caso di carico a cui è relativo ed i valori delle componenti riferite alla terna globale.

2. Carichi agenti sugli elementi

Si tratta di carichi locali applicati agli elementi (carichi distribuiti lungo l'asse di travi, pressioni agenti perpendicolarmente sulla superficie di setti, variazioni termiche eccetera). I carichi possono essere assegnati anche per zone di carico. Ciò accade quando si carica una lastra per zone; per zona si intende una regione poligonale, convessa o concava, senza vuoti, individuata dai relativi vertici, che possono essere nodi di estremità di travi, oppure nodi appartenenti a setti.

Il programma individua, in modo automatico, le eventuali travi e/o setti, disposte lungo il contorno della poligonale di carico, in modo da ripartire su di esse il peso proprio, il permanente portato ed il carico accidentale, gravanti sulla zona.

La ripartizione dei carichi avviene con il criterio delle aree di influenza: l'area elementare è un quadrilatero avente due lati paralleli alla direzione di orditura della lastra e due lati dati dalle intercette sul contorno della poligonale di carico; il carico gravante sull'areola viene ripartito al 50% tra i due elementi strutturali (travi e/o setti) disposti lungo i due lati non paralleli alla direzione d'orditura del solaio. Qualora in uno solo dei due lati vi sia un elemento trave o setto il carico è riportato al 100% su tale elemento, con l'aggiunta del momento di trasporto. Qualora lungo i due lati non vi siano né travi né setti, non viene effettuato alcun tipo di ripartizione.

8.4 Criteri di verifica agli stati limite indagati

Le verifiche nei confronti degli S.L.U. si sono effettuate in termini di resistenza in campo elastico. Le verifiche nei confronti degli S.L.E. si sono effettuate in termini di deformabilità, di fessurazione e di tensioni in esercizio, in aderenza a quanto descritto nel punto 4.1.2.2 del D.M. del 17/01/2018. Le deformazioni, in accordo al punto 4.1.2.2.2, devono risultare congruenti con le prestazioni richieste dalle strutture in relazione alle rispettive destinazioni d'uso.

8.5 Modellazione della fondazione superficiale e profonda

Il plinto circolare di base è modellato tramite elementi finiti di tipo D3 (Shell) con spessore variabile, coerentemente con la variazione di spessore della struttura. Gli elementi D3 non sono definiti come “Fondazione”, in quanto si considera l'interazione con il terreno affidata interamente ai pali, questo per avere un ulteriore margine di sicurezza.

I punti della maglia che compongono il plinto circolare sono posti a quota -230cm, coerentemente con la quota media d'imposta della fondazione rispetto al piano medio di campagna. Agli elementi D3 è assegnato filo di allineamento verticale all'intradosso.

I pali di fondazione sono definiti attraverso elementi tipo “Palo in Mezzo Elastico”, ai quali sono assegnati coefficienti “k” di Winkler calcolati in base alla stratigrafia del terreno.

Le azioni esterne dovute ai carichi sugli aerogeneratori vengono assegnate in un punto ideale posto a quota +20cm, come indicato dai fornitori degli aerogeneratori.

Le azioni sono trasmesse alla sottostruttura tramite piastra di materiale infinitamente rigido, modellata sulle dimensioni della flangia di base degli aerogeneratori. La piastra è a sua volta collegata ad una serie circolare di elementi D3 verticali sottili (spessore 5cm) che collegano la piastra superiore al baricentro degli elementi D3 del plinto.

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Duchessa”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Data: 05/04/2024
		Revisione: 00
		Pagina: 21 di 46

Nelle seguenti figure vengono riportate rappresentazioni solide del modello agli elementi finiti implementato nel software ProSap.

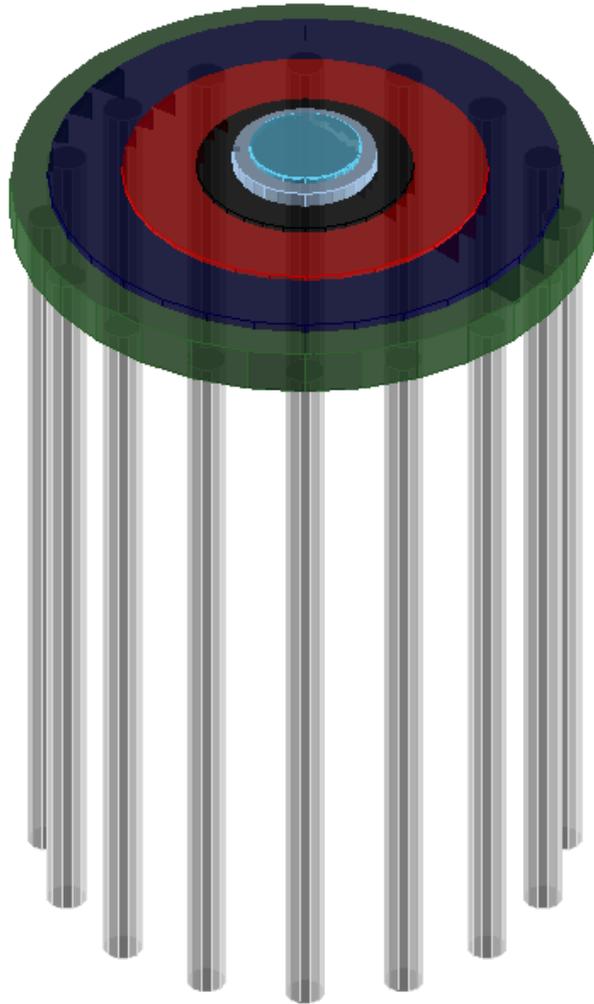


Figura 9: Vista solida elemento di fondazione

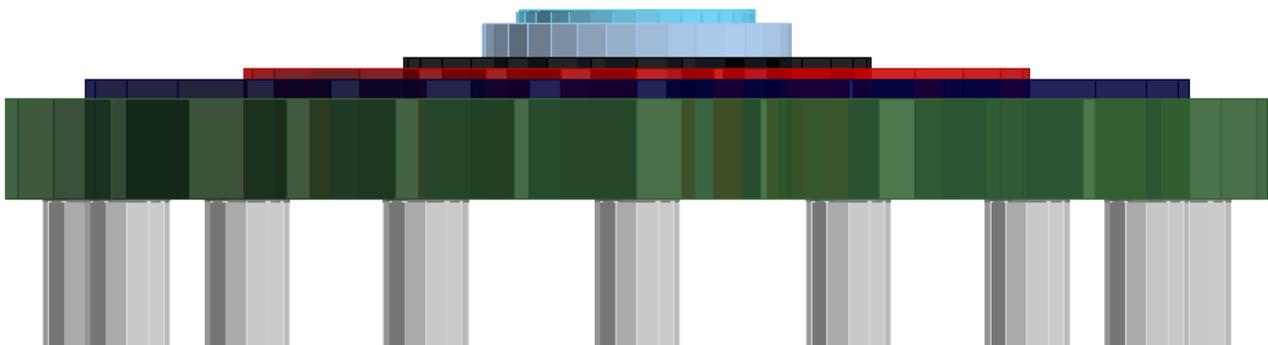


Figura 10: Vista solida laterale

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico "Duchessa"	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Data: 05/04/2024
		Revisione: 00
		Pagina: 22 di 46

Nella figura precedente e seguente è riportata una distinzione per colori degli spessori di ciascun elemento shell D3.

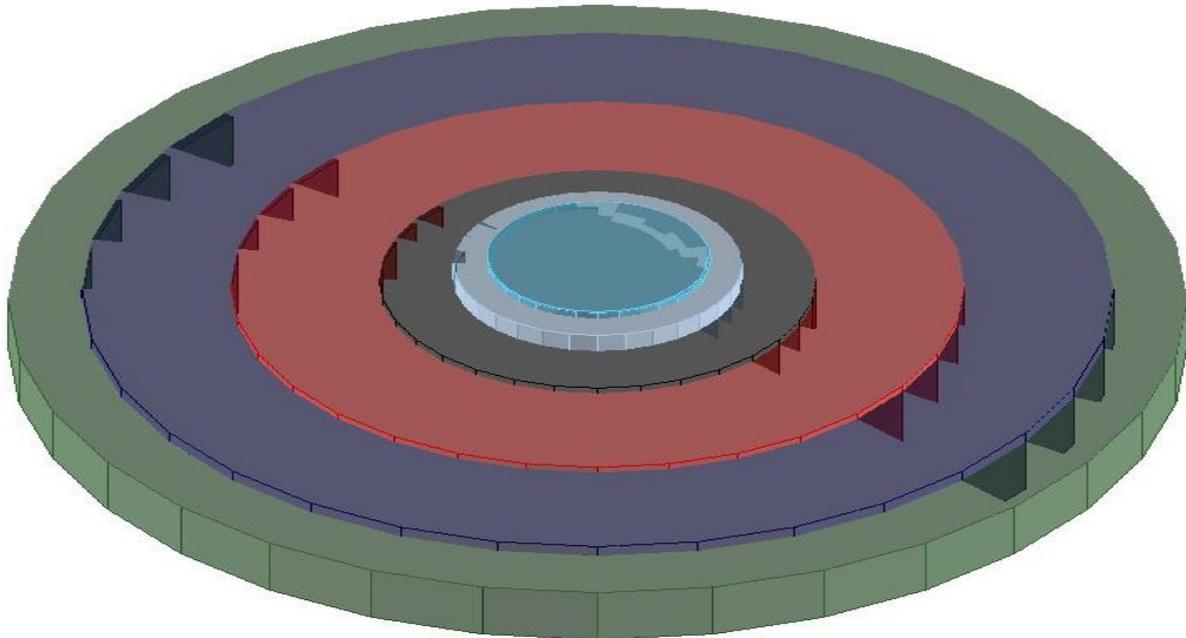


Figura 11: Vista solida. Distinzione degli spessori

La seguente figura riporta invece una rappresentazione in pianta dei nodi di connessione tra gli elementi shell costituenti il modello della fondazione.

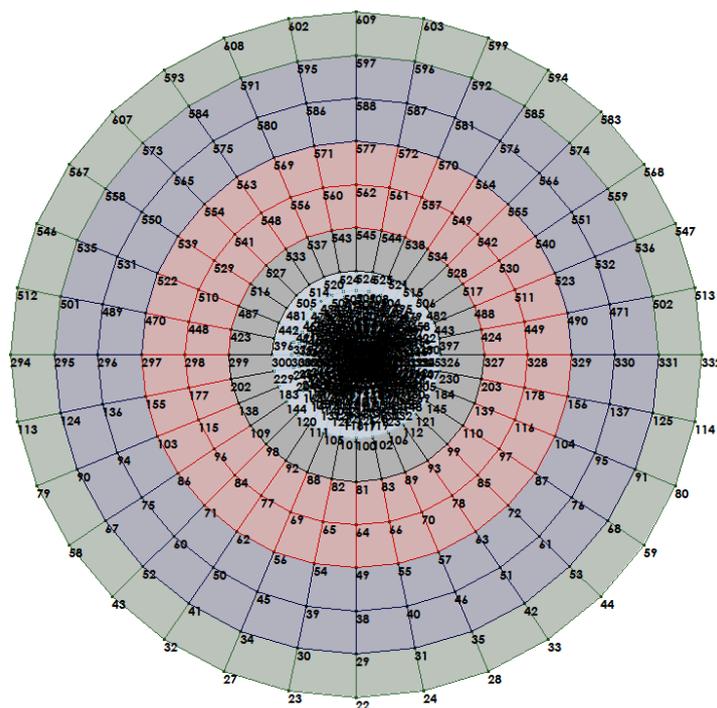


Figura 12: Numerazione nodi

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico "Duchessa"	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Data: 05/04/2024
		Revisione: 00
		Pagina: 23 di 46

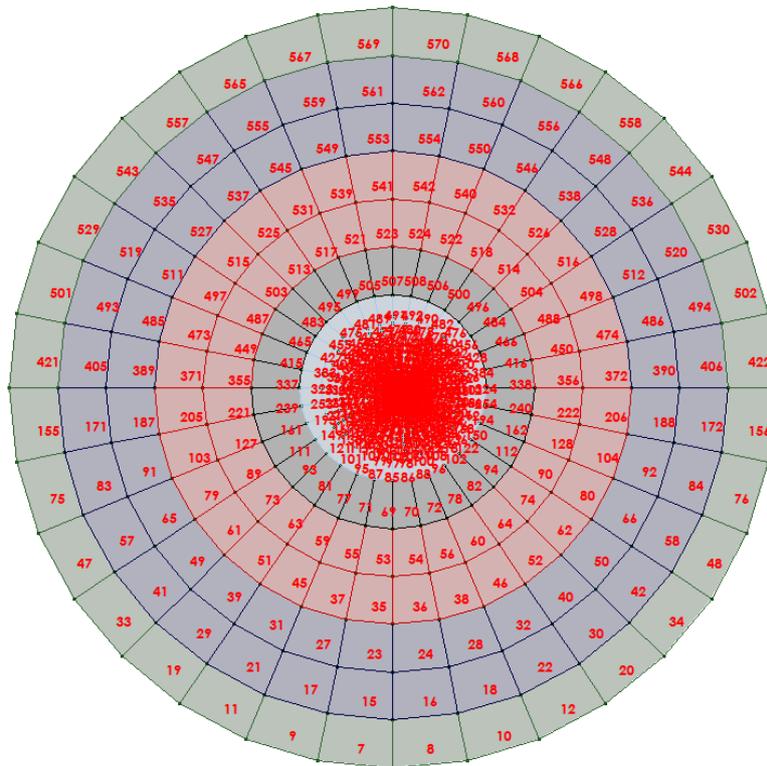


Figura 13: Numerazione elementi D3

L'implementazione del "Palo in Mezzo Elastico" segue la procedura riportata di seguito.

Palo in mezzo elastico

Stringa identificativa
Pali Fi 150 - 30m

Palo
 Diametro: 150.0
 Lunghezza: 3000
 Modulo elastico: 330195.0
 Peso specifico: 2.5000e-03

Modello matematico palo

P.to	Quota	K orizz...	K verti...
n. 1	-305.00	1.75	0.03
n. 2	-455.00	1.97	0.03
n. 3	-455.00	1.97	0.03
n. 4	-605.00	2.08	0.03
n. 5	-605.00	2.08	0.03
n. 6	-755.00	2.16	0.03
n. 7	-755.00	2.16	0.03

Usa stratigrafia semplificata con coefficienti:
 K0: 0.0 Kz0: 0.0 Kv (altrito): 0.0

Testa: svincolo flessione
 Piede: vincolo rotazione
 Piede: vincolo traslazione orizzontale
 Piede: vincolo traslazione verticale
 Piede: rigidezza traslazione verticale: 2252506.0

Plinto

Spessore: 0.0
 Rotazione: 0.0
 Distanza bordo: 0.0
 Interasse princ.: 0.0
 Interasse sec.: 0.0

Plinto con bicchiere

Bicchiere

Altezza esterna: 0.0
 Altezza interna: 0.0
 Base X: 0.0
 Base Y: 0.0
 Spessore inf.: 0.0
 Spessore sup.: 0.0

Unità in uso: daN.cm

OK Annulla

Figura 14: Modello elemento tipo "Palo in Mezzo Elastico"

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Duchessa”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
		Data: 05/04/2024
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Revisione: 00
		Pagina: 24 di 46

8.6 Modellazione dei vincoli interni ed esterni

Per le fondazioni in progetto, gli unici vincoli esistenti sono quelli fra i pali ed il terreno. Le fondazioni, di tipo a platea in c.c.a. gettata in opera, in conformità alle ipotesi di progetto ed in aderenza alle risultanze della Relazione Geologica preliminare, sono poggianti esclusivamente su pali senza considerare l'apporto del terreno sottostante l'intradosso delle fondazioni stesse. Le costanti elastiche che simulano il comportamento del terreno sui pali sono determinate automaticamente con il programma di calcolo correlando pressioni sul terreno e deformazioni e verificando i risultati con considerazioni sulle deformazioni attese.

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Duchessa”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
		Data: 05/04/2024
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Revisione: 00
		Pagina: 25 di 46

9 AZIONI SULLA STRUTTURA

Le azioni esterne agenti sulle fondazioni derivano dai pesi propri, permanenti della struttura in elevazione e dai carichi variabili agenti sugli aerogeneratori (azione principale = vento; azione della neve = non rilevante).

Le azioni considerate nella verifica sono state così modellate:

- a. forze puntuali concentrate per simulare i carichi dovuti all'Aerogeneratore, oltre a quelli indotti dal funzionamento dell'impianto stesso;
- b. pressioni distribuite per simulare i carichi applicati con impronta a terra su ampia superficie (es. carichi dovuti alla presenza di automezzi e/o manutenzione, carico dovuto al terreno di ricoprimento della fondazione).

I carichi della struttura in elevazione sono forniti dalla società produttrice degli aerogeneratori, calcolati sulla base delle caratteristiche geografiche del sito di riferimento e dei parametri sismici di progetto. In via cautelativa, si considerano come azioni di progetto quelle riferite alle condizioni peggiori di vento, come da scheda tecnica del fornitore degli aerogeneratori.

9.1 Azioni di progetto

Le azioni di calcolo elementari e la loro combinazione, considerate nelle analisi per la valutazione della sicurezza e per la verifica degli elementi di fondazione, sono stati determinati nel rispetto del Capitolo 3 del D.M. 17/01/2018 e dei carichi delle opere in elevazione, di seguito esplicitati.

In particolare, si sono previsti e recepiti i seguenti carichi di progetto:

- a - Pesi propri
- b - Carichi permanenti
- c - Carichi accidentali

Per comodità di individuazione dei carichi applicati alle fondazioni si riporta il sistema di riferimento utilizzato per la parte in elevazione dell'Aerogeneratore.

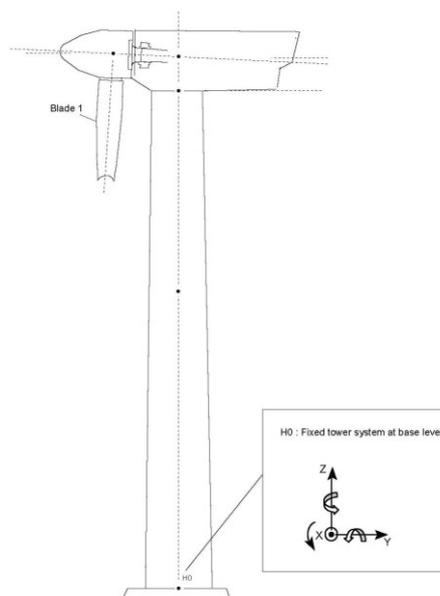


Figura 15: Sistema di riferimento per i carichi applicati

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico "Duchessa"	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Data: 05/04/2024
		Revisione: 00
		Pagina: 26 di 46

Il modello di calcolo realizzato ha un suo sistema di riferimento che è legato a quello sopra rappresentato, nella logica che le azioni sui vincoli alla base della torre sono di fatto esplicabili in esercizio radialmente in tutte le direzioni, considerando la terna identificata nella figura come direzioni e versi delle azioni sollecitanti mutue.

9.2 a – pesi propri ($G\gamma$)

Il programma di calcolo utilizzato consente la creazione automatica di un caso di carico "Pesi propri" qualora si siano definite le sezioni delle fondazioni e dei pali. Nello specifico il peso degli elementi strutturali in conglomerato cementizio armato è determinato con riferimento alla loro effettiva geometria ed a un peso unitario di volume pari a 2500.00 daN/m³.

9.3 b – carichi permanenti (G)

Terreno di ricoprimento

Per il calcolo dei carichi permanenti (peso terreno di ricoprimento) viene utilizzato il seguente schema di calcolo:

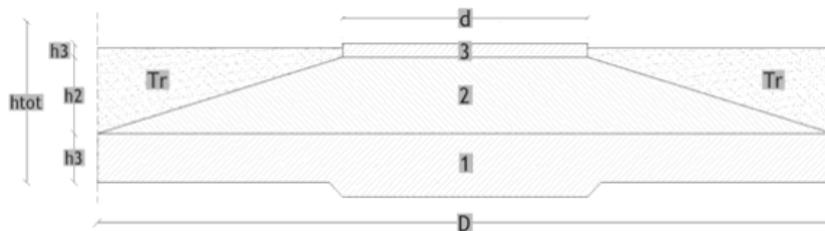


Figura 16: Modello di calcolo fondazione

Il peso proprio è rappresentato dai seguenti dati:

- Peso terreno di riempimento considerato in maniera cautelativa pari a: $G_2 = 1800 \text{ kg/m}^3$

Il modello riportato in figura è suddiviso in tre solidi di cui il primo è un cilindro (1) con un diametro di 22.50 m e un'altezza di 1.80 m, il secondo (2) è un tronco di cono con diametro di base pari a 22.50 m, diametro superiore di 5.35 m ed altezza pari a 0.75 m; il terzo corpo (3) è un cilindro con un diametro di 5.35m ed altezza di 0.60m. Per il terreno di ricoprimento si schematizza un parallelepipedo con peso pari a γ_{sat} del primo strato desunto dalla relazione geologica.

Aerogeneratore

I carichi della struttura in elevazione sono forniti dalla società produttrice degli aerogeneratori sulla base delle caratteristiche geografiche del sito di riferimento. Nella seguente tabella vengono riportate le seguenti azioni:

- Peso proprio dell'aerogeneratore, indicato con il valore F_z ;
- Azione del vento in "Esercizio".

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Duchessa”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
		Data: 05/04/2024
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Revisione: 00
		Pagina: 27 di 46

Production loads							
		Char. load	Prob.:1e-2	Prob.:1e-4	Ref		
M _{res}	[kNm]	108300.00	89643.44	95622.76	[3]	[3]	[3]
M _z	[kNm]	-11172.32	-3203.54	-5404.52	[1]	[2]	[3]
F _{res}	[kN]	1033.55	790.14	862.99	[3]	[3]	[3]
F _z	[kN]	-5725.43	-5549.86	-5577.68	[3]	[3]	[3]

Table 3-1 Production loads

Tabella 19: Permanente – Peso proprio e Vento in Esercizio

dove:

- M_{Res} = Momento risultante dato dalla combinazione tra M_X ed M_Y
- F_{Res} = Azione di taglio risultante dalla combinazione tra F_X ed F_Y
- M_Z = Momento torcente
- F_Z = Azione verticale

I valori M_{Res} e F_{Res} sopra citati sono la risultante della composizione delle azioni flettenti e taglianti secondo le direzioni ortogonali principali X e Y e corrispondono ai valori definiti di “Produzione”, quindi di esercizio, dell’Aerogeneratore e sono da considerarsi, debitamente combinati, come casi di carico permanenti per i dimensionamenti e le verifiche delle fondazioni. In particolare, secondo le indicazioni fornite dal Fornitore delle opere in elevazione, i valori di progetto per le fondazioni sono quelli corrispondenti alla colonna “Prob.: 1e-2”, da combinarsi secondo i criteri del D.M. del 17/01/2018 con le altre azioni agenti sulle fondazioni.

9.4 c – carichi accidentali

I carichi accidentali considerati nelle analisi sono i seguenti:

- Auto in sosta: 250.00 daN/m²
 - (Cat. F: Rimesse, aree per traffico, parcheggio e sosta di veicoli leggeri (fino a 30 kN))
 - Applicato su tutta la superficie della fondazione.
- Manutenzione: 500.00 daN/m²
 - (Cat. G: Aree per traffico di veicoli medi (peso a pieno carico superiore a 30 kN))
 - Applicato su metà della superficie della fondazione, nella logica che la gru per la manutenzione può essere posizionata solo su un lato.
- Aerogeneratore: Vento Estremo

Characteristic Extreme								
Lead	LC/Family	PLF	Type	Mbt	Mzt	FndFr	Fzt	Ref
Sensor	[-]	[-]	[-]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]	[-]
Mbt	14Ecdvraa00(fam91)	1.35	Abs	108300	1147	976.9	-5527	[3]
Mzt	23NTMHCHWO200(fam246)	1.35	Abs	22120	-11170	306.5	-5258	[1]
FndFr	23NTMSCHWO100(fam238)	1.35	Abs	104500	-1271	1034	-5503	[3]
Fzt	23NTMSCVrm00(fam234)	1.35	Abs	80540	1838	631.4	-5725	[3]

Tabella 20: Accidentali – Vento Estremo

I valori nominali riportati nella precedente tabella sono da combinarsi secondo i criteri del D.M. del 17/01/2018.

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Duchessa”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
		Data: 05/04/2024
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Revisione: 00
		Pagina: 28 di 46

- Temperatura: non si considera l'azione della temperatura, trattandosi di manufatto completamente interrato.
- Incendio: non esistono materiali esplosivi né possono formarsi miscele esplosive di polveri o gas sulle strutture in progetto. Per quanto esposto non è necessario tenere in conto esplicito l'azione eccezionale dell'esplosione.
- Urti: Non sono presi in considerazione. La sola porzione di fondazione esposta è il colletto su cui poggia la torre, che sarà adeguatamente inibito alla possibilità di impatti con veicoli.

9.5 Modellazione delle azioni

I calcoli e le verifiche sono condotti con il metodo semiprobabilistico agli stati limite secondo le indicazioni del D.M. 17 gennaio 2018. Le azioni introdotte direttamente sono combinate con le altre (carichi permanenti, vento e sisma) mediante le combinazioni di carico di seguito descritte; da esse si ottengono i valori probabilistici da impiegare successivamente nelle verifiche.

9.6 Combinazioni delle azioni

Le sollecitazioni sono ricavate applicando le combinazioni di carico come da D.M. 17 gennaio 2018 (NTC) al punto 2.5.3.:

- **Combinazione fondamentale** SLU
 $\gamma G_1 \cdot G_1 + \gamma G_2 \cdot G_2 + \gamma P \cdot P + \gamma Q_1 \cdot Q_{k1} + \gamma Q_2 \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \gamma Q_3 \cdot \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$
- **Combinazione caratteristica** (rara) SLE
 $G_1 + G_2 + P + Q_{k1} + \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$
- **Combinazione frequente** SLE
 $G_1 + G_2 + P + \psi_{11} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$
- **Combinazione quasi permanente** SLE
 $G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$
- **Combinazione sismica**, impiegata per gli stati limite ultimi e di esercizio connessi all'azione sismica E
 $E + G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots$

Dove i coefficienti di combinazione delle azioni variabili sono definiti dalla NTC 2018 Tabella 2.5.I come segue:

Destinazione d'uso/azione	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Categoria A residenziali	0,70	0,50	0,30
Categoria B uffici	0,70	0,50	0,30
Categoria C ambienti suscettibili di affollamento	0,70	0,70	0,60
Categoria D ambienti ad uso commerciale	0,70	0,70	0,60
Categoria E biblioteche, archivi, magazzini	1,00	0,90	0,80
Categoria F Rimesse e parcheggi (autoveicoli ≤ 30 kN)	0,70	0,70	0,60
Categoria G Rimesse e parcheggi (autoveicoli > 30 kN)	0,70	0,50	0,30
Categoria H Coperture	0,00	0,00	0,00
Vento	0,60	0,20	0,00
Neve a quota ≤ 1000 m	0,50	0,20	0,00
Neve a quota > 1000 m	0,70	0,50	0,20
Variazioni Termiche	0,60	0,50	0,00

Tabella 21: Coefficienti di combinazione

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico "Duchessa"	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
		Data: 05/04/2024
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Revisione: 00
		Pagina: 29 di 46

Nelle verifiche possono essere adottati in alternativa due diversi approcci progettuali:

- Approccio 1: si considerano due diverse combinazioni di gruppi di coefficienti di sicurezza parziali per le azioni, per i materiali e per la resistenza globale (combinazione 1 con coefficienti A1 e combinazione 2 con coefficienti A2);
- Approccio 2: si definisce un'unica combinazione per le azioni, per la resistenza dei materiali e per la resistenza globale (con coefficienti A1).

I coefficienti sopra citati sono definiti dalla NTC 2018 Tabella 2.6.I:

		Coefficiente γ_f	EQU	A1	A2
Carichi permanenti	Favorevoli	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevoli		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti non strutturali (Non compiutamente definiti)	Favorevoli	γ_{G2}	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevoli		1,5	1,5	1,3
Carichi variabili	Favorevoli	γ_{Qi}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevoli		1,5	1,5	1,3

Tabella 22: Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni nelle verifiche SLU

9.7 Schematizzazione dei casi di carico e dei carichi applicati

Il programma consente l'uso di diverse tipologie di carico (azioni). Le azioni utilizzate nella modellazione sono individuate da una sigla identificativa ed un codice numerico (gli elementi strutturali richiamano quest'ultimo nella propria descrizione). Per ogni azione applicata alla struttura viene riportato il codice, il tipo e la sigla identificativa. Le tabelle successive dettagliano i valori caratteristici di ogni azione in relazione alla tipologia.

Il programma consente l'applicazione di diverse tipologie di casi di carico. Sono previsti i seguenti 12 tipi di casi di carico:

	Sigla	Tipologia	Descrizione
1	Ggk	A	caso di carico comprensivo del peso proprio struttura
2	Gk	NA	caso di carico con azioni permanenti
3	Qk	NA	caso di carico con azioni variabili
4	Gsk	A	caso di carico comprensivo dei carichi permanenti sui solai e sulle coperture
5	Qsk	A	caso di carico comprensivo dei carichi variabili sui solai
6	Qnk	A	caso di carico comprensivo dei carichi di neve sulle coperture
7	Qtk	SA	caso di carico comprensivo di una variazione termica agente sulla struttura
8	Qvk	NA	caso di carico comprensivo di azioni da vento sulla struttura
9	Esk	SA	caso di carico sismico con analisi statica equivalente
10	Edk	SA	caso di carico sismico con analisi dinamica
11	Etk	NA	caso di carico comprensivo di azioni derivanti dall'incremento di spinta delle terre in condizione sismica
12	Pk	NA	caso di carico comprensivo di azioni derivanti da coazioni, cedimenti e precompressioni

Tabella 23: Tipologie di casi di carico

Dove:

- **A** = automatico, ossia non prevedono l'introduzione di dati da parte dell'utente;
- **SA** = semi-automatico, ossia prevedono una minima introduzione di dati da parte dell'utente;
- **NA** = non automatico, ossia prevedono la diretta applicazione di carichi generici agli elementi strutturali.

Nella tabella successiva vengono riportati i casi di carico agenti sulla struttura, con l'indicazione dei dati relativi al caso di carico stesso:

- Numero Tipologia e Sigla identificativa;

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Duchessa”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Data: 05/04/2024
		Revisione: 00
		Pagina: 30 di 46

- Valore di riferimento del caso di carico (se previsto).

Nella seguente tabella vengono riportati i casi di carico automatici e non automatici.

CDC	Tipo	Sigla Id
1	Ggk	CDC=Ggk (peso proprio della struttura)
2	Gk	CDC=G1k (permanente) Peso proprio WTG
3	Gk	CDC=G1k (permanente) Azioni Vento Esercizio WTG
4	Gk	CDC=G1k (permanente) Peso Terreno su fondazioni
5	Qk	CDC=Qk (variabile) Azioni Vento Estremo WTG
6	Qk	CDC=Qk (variabile) Automobili
7	Qk	CDC=Qk (variabile) Gru - Manutenzione

Tabella 24: Casi di carico agenti

Di seguito le figure con i casi di carico sopra richiamati. Le figure hanno dimensioni e rappresentazioni dei carichi non in scala.

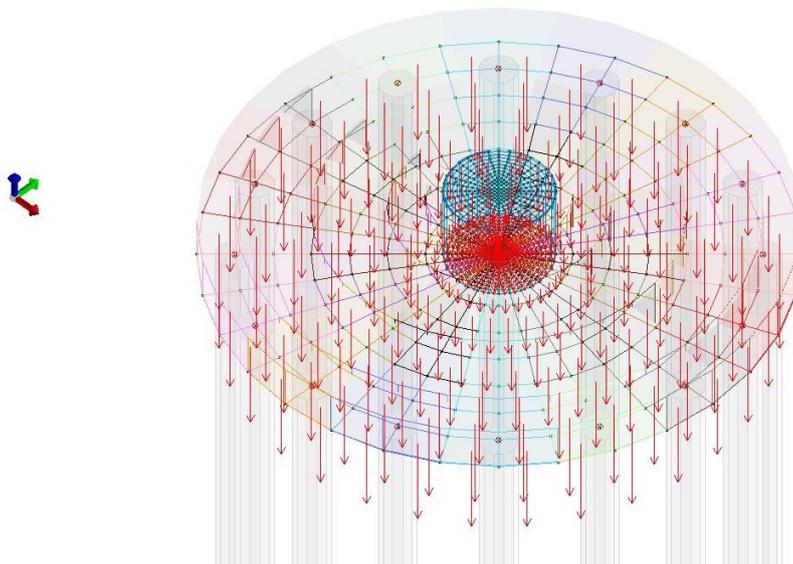


Figura 17: Peso proprio della struttura

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico "Duchessa"	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Data: 05/04/2024
		Revisione: 00
		Pagina: 31 di 46

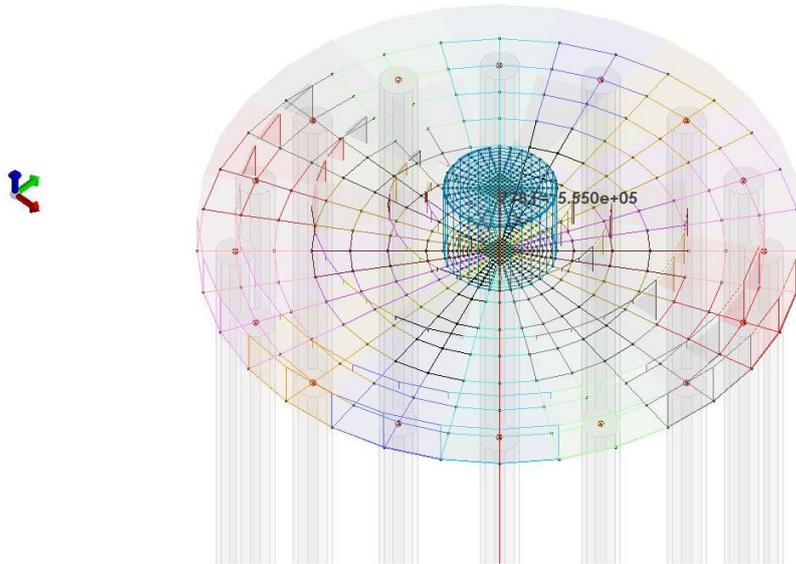


Figura 18: Peso proprio WTG

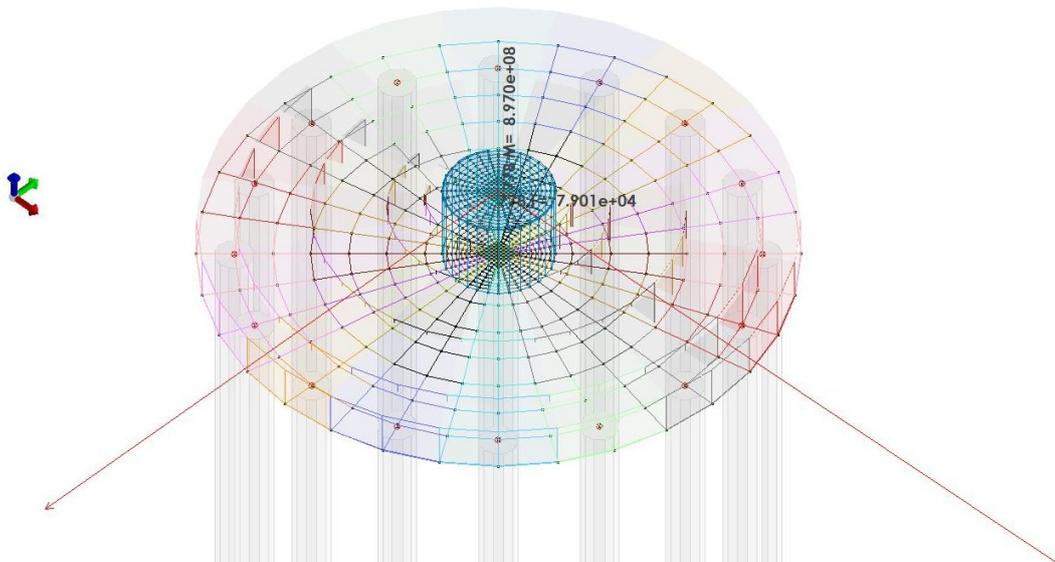


Figura 19: Permanente - Vento Esercizio WTG

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico "Duchessa"	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Data: 05/04/2024
		Revisione: 00
		Pagina: 32 di 46

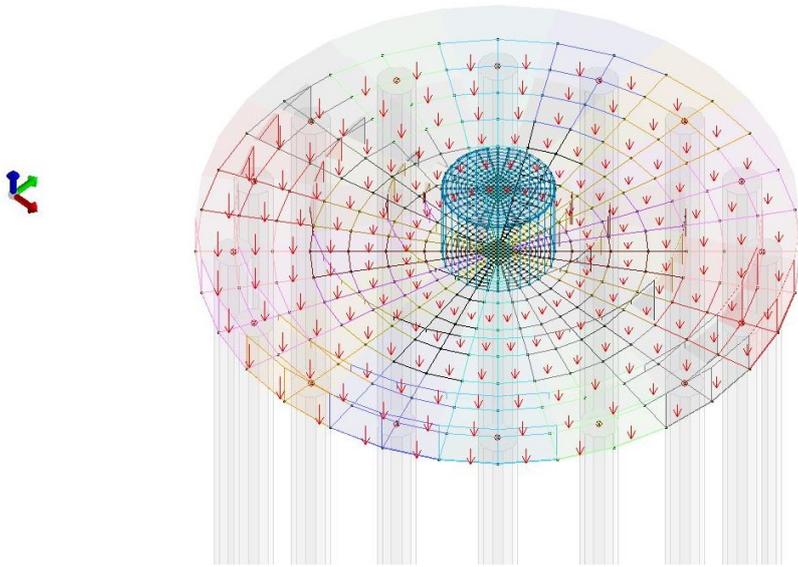


Figura 20: Permanente - Peso terreno su fondazione

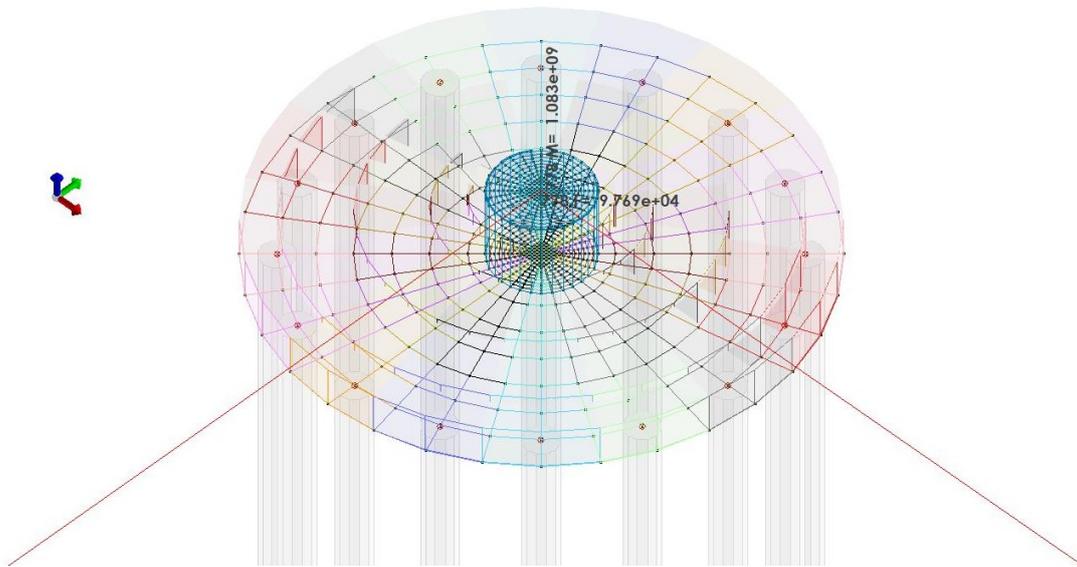


Figura 21: Accidentali - Vento Estremo WTG

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Duchessa”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Data: 05/04/2024
		Revisione: 00
		Pagina: 33 di 46

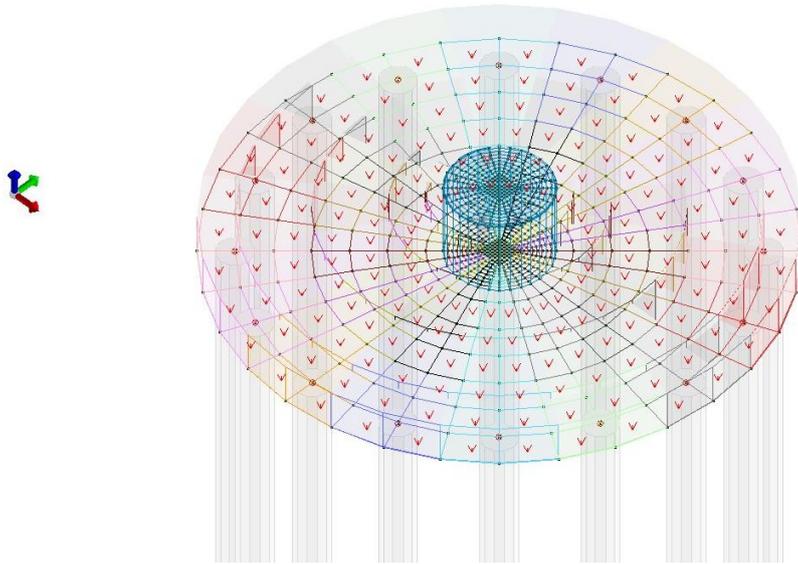


Figura 22: Accidentali: Auto

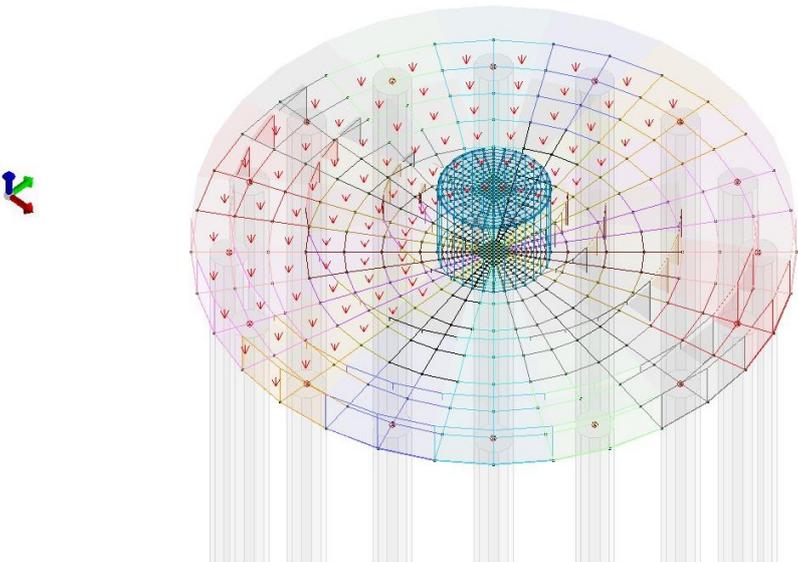


Figura 23: Accidentali - Manutenzione: presenza gru su fondazione

9.8 Definizione delle combinazioni di carico

Nelle seguenti tabelle sono riportate le differenti combinazioni di carico agli Stati Limite ed i relativi coefficienti di sicurezza.

Cmb	Tipo	Sigla Id	effetto P-delta
1	SLU	Comb. SLU A1 1	
2	SLU	Comb. SLU A1 2	
3	SLU	Comb. SLU A1 3	
4	SLU	Comb. SLU A1 4	
5	SLU	Comb. SLU A1 5	
6	SLU	Comb. SLU A1 6	

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Duchessa”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
		Data: 05/04/2024
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Revisione: 00
		Pagina: 34 di 46

Cmb	Tipo	Sigla Id	effetto P-delta
7	SLU	Comb. SLU A1 7	
8	SLU	Comb. SLU A1 8	
9	SLU	Comb. SLU A1 9	
10	SLU	Comb. SLU A1 10	
11	SLU	Comb. SLU A1 11	
12	SLU	Comb. SLU A1 12	
13	SLU	Comb. SLU A1 13	
14	SLU	Comb. SLU A1 14	
15	SLU	Comb. SLU A1 15	
16	SLU	Comb. SLU A1 16	
17	SLE(r)	Comb. SLE(rara) 17	
18	SLE(r)	Comb. SLE(rara) 18	
19	SLE(r)	Comb. SLE(rara) 19	
20	SLE(r)	Comb. SLE(rara) 20	
21	SLE(r)	Comb. SLE(rara) 21	
22	SLE(r)	Comb. SLE(rara) 22	
23	SLE(r)	Comb. SLE(rara) 23	
24	SLE(r)	Comb. SLE(rara) 24	
25	SLE(f)	Comb. SLE(freq.) 25	
26	SLE(f)	Comb. SLE(freq.) 26	
27	SLE(f)	Comb. SLE(freq.) 27	
28	SLE(f)	Comb. SLE(freq.) 28	
29	SLE(f)	Comb. SLE(freq.) 29	
30	SLE(f)	Comb. SLE(freq.) 30	
31	SLE(p)	Comb. SLE(perm.) 31	
32	SLE(p)	Comb. SLE(perm.) 32	

Tabella 25: Combinazioni di carico agli stati limite

Cmb	CDC 1/15...	CDC 2/16...	CDC 3/17...	CDC 4/18...	CDC 5/19...	CDC 6/20...	CDC 7/21...	CDC 8/22...	CDC 9/23...	CDC 10/24...	CDC 11/25...	CDC 12/26...	CDC 13/27...	CDC 14/28...
1	1.30	1.30	1.30	1.30	0.0	1.05	0.0							
2	1.00	1.00	1.00	1.00	0.0	1.05	0.0							
3	1.30	1.30	1.30	1.30	0.0	1.50	0.0							
4	1.00	1.00	1.00	1.00	0.0	1.50	0.0							
5	1.30	1.30	1.30	1.30	1.50	1.05	0.0							
6	1.00	1.00	1.00	1.00	1.50	1.05	0.0							
7	1.30	1.30	1.30	1.30	0.90	1.50	0.0							
8	1.00	1.00	1.00	1.00	0.90	1.50	0.0							
9	1.30	1.30	1.30	1.30	0.90	1.05	0.0							
10	1.00	1.00	1.00	1.00	0.90	1.05	0.0							
11	1.30	1.30	1.30	1.30	0.0	1.05	1.05							
12	1.00	1.00	1.00	1.00	0.0	1.05	1.05							
13	1.30	1.30	1.30	1.30	0.0	1.50	1.05							
14	1.00	1.00	1.00	1.00	0.0	1.50	1.05							
15	1.30	1.30	1.30	1.30	0.0	1.05	1.50							
16	1.00	1.00	1.00	1.00	0.0	1.05	1.50							
17	1.00	1.00	1.00	1.00	0.0	0.70	0.0							
18	1.00	1.00	1.00	1.00	0.0	1.00	0.0							
19	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.70	0.0							
20	1.00	1.00	1.00	1.00	0.60	1.00	0.0							
21	1.00	1.00	1.00	1.00	0.60	0.70	0.0							
22	1.00	1.00	1.00	1.00	0.0	0.70	0.70							
23	1.00	1.00	1.00	1.00	0.0	1.00	0.70							
24	1.00	1.00	1.00	1.00	0.0	0.70	1.00							
25	1.00	1.00	1.00	1.00	0.0	0.60	0.0							
26	1.00	1.00	1.00	1.00	0.0	0.70	0.0							
27	1.00	1.00	1.00	1.00	0.20	0.60	0.0							
28	1.00	1.00	1.00	1.00	0.0	0.60	0.60							
29	1.00	1.00	1.00	1.00	0.0	0.70	0.60							

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Duchessa”	PROGETTO DEFINITIVO		Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
			Data: 05/04/2024
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE		Revisione: 00
			Pagina: 35 di 46

Cmb	CDC 1/15...	CDC 2/16...	CDC 3/17...	CDC 4/18...	CDC 5/19...	CDC 6/20...	CDC 7/21...	CDC 8/22...	CDC 9/23...	CDC 10/24...	CDC 11/25...	CDC 12/26...	CDC 13/27...	CDC 14/28...
30	1.00	1.00	1.00	1.00	0.0	0.60	0.70							
31	1.00	1.00	1.00	1.00	0.0	0.60	0.0							
32	1.00	1.00	1.00	1.00	0.0	0.60	0.60							

Tabella 26: Coefficienti delle combinazioni di carico

9.9 Informazioni su copriferro e ricoprimento delle armature

Per le strutture in progetto secondo quanto previsto dalla Tabella C4.1.IV della Circolare n° 7 del 21/01/2019, per elementi a piastra, considerando un ambiente ordinario e un calcestruzzo C35/45, i ricoprimenti di armatura potrebbero essere come minimo 3.50 cm. Trattandosi di opere interrate si ritiene comunque cautelativo considerare in progetto, e quindi inserire nella modellazione, un ricoprimento pari a $c = 5.00$ cm, essendo c lo strato di calcestruzzo di ricoprimento delle armature più esterne (staffe/armature esterne).

Si riporta di seguito la tabella sopra citata.

			Barre da c.a. Elementi a piastra		Barre da c.a. Altri elementi		Cavi da c.a.p. Elementi a piastra		Cavi da c.a.p. Altri elementi	
C_{min}	C_0	ambiente	$C > C_0$	$C_{min} > C > C_0$	$C > C_0$	$C_{min} > C > C_0$	$C > C_0$	$C_{min} > C > C_0$	$C > C_0$	$C_{min} > C > C_0$
25/30	C35/45	ordinario	15	20	20	25	25	30	30	35
28/35	C40/50	aggressivo	25	30	30	35	35	40	40	45
35/45	C45/55	Molto aggressivo	35	40	40	45	45	50	50	50

Tabella 27: C4.1.IV – Copriferrini minimi in mm

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Duchessa”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
		Data: 05/04/2024
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Revisione: 00
		Pagina: 36 di 46

10 CRITERI DI VERIFICA AGLI STATI LIMITE

Nel metodo agli stati limite, la sicurezza strutturale nei confronti degli stati limite ultimi deve essere verificata confrontando la capacità di progetto R_d , in termini di resistenza, duttilità e/o spostamento della struttura o della membratura strutturale (funzione delle caratteristiche meccaniche dei materiali che la compongono “ X_d ” e dei valori nominali delle grandezze geometriche interessate “ ad ”), con il corrispondente valore di progetto della domanda E_d , funzione dei valori di progetto delle azioni “ F_d ” e dei valori nominali delle grandezze geometriche della struttura interessate.

La verifica della sicurezza nei riguardi degli stati limite ultimi (SLU) è espressa dall’equazione formale:

$$R_d \geq E_d$$

Il valore di progetto della resistenza di un dato materiale X_d è, a sua volta, funzione del valore caratteristico della resistenza, definito come frattile 5 % della distribuzione statistica della grandezza, attraverso l’espressione:

$$X_d = X_k / \gamma_M,$$

Essendo γ_M il fattore parziale associato alla resistenza del materiale.

Il valore di progetto di ciascuna delle azioni agenti sulla struttura F_d è ottenuto dal suo valore caratteristico F_k , inteso come frattile 95% della distribuzione statistica o come valore caratterizzato da un assegnato periodo di ritorno, attraverso l’espressione:

$$F_d = \gamma_F F_k$$

Essendo γ_F il fattore parziale relativo alle azioni. Nel caso di concomitanza di più azioni variabili di origine diversa si definisce un valore di combinazione $\psi_0 F_k$, ove $\psi_0 \leq 1$ è un opportuno coefficiente di combinazione che tiene conto della ridotta probabilità che più azioni di diversa origine si realizzino simultaneamente con il loro valore caratteristico.

La capacità di garantire le prestazioni previste per le condizioni di esercizio (SLE) deve essere verificata confrontando il valore limite di progetto associato a ciascun aspetto di funzionalità esaminato (C_d), con il corrispondente valore di progetto dell’effetto delle azioni (E_d), attraverso la seguente espressione formale:

$$C_d \geq E_d$$

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico "Duchessa"	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Data: 05/04/2024
		Revisione: 00
		Pagina: 37 di 46

11 PRINCIPALI RISULTATI

Nel seguito vengono riportati per via grafica e numerica i principali risultati ottenuti dalle verifiche sviluppate.

11.1 Involuppo delle sollecitazioni maggiormente significative

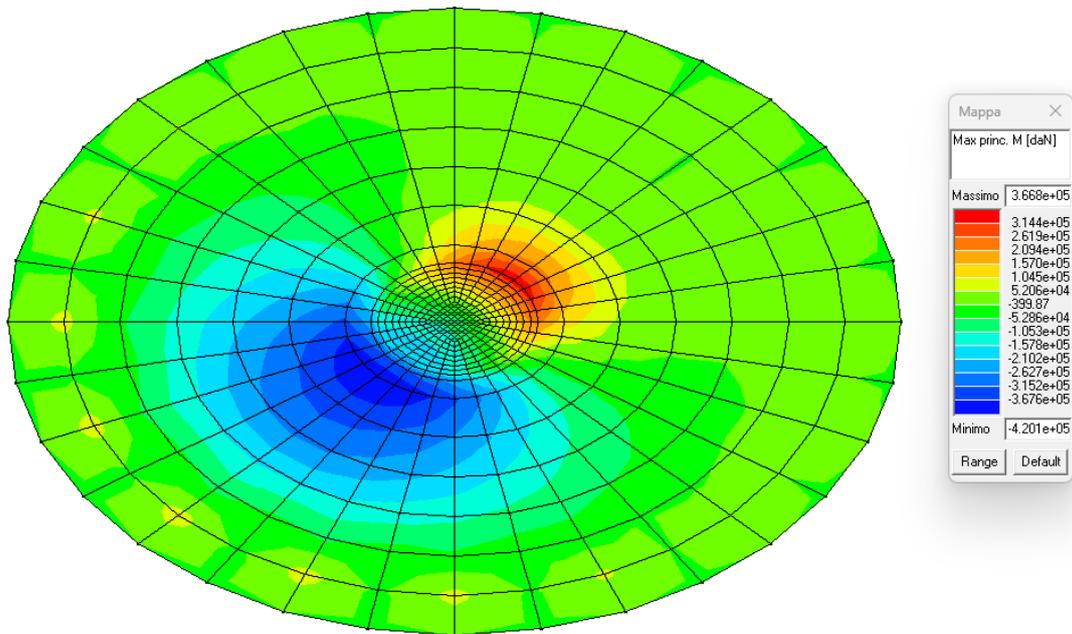


Figura 24: Mappa cromatica azioni M_{max} nella direzione principale (Cmb. SLU)

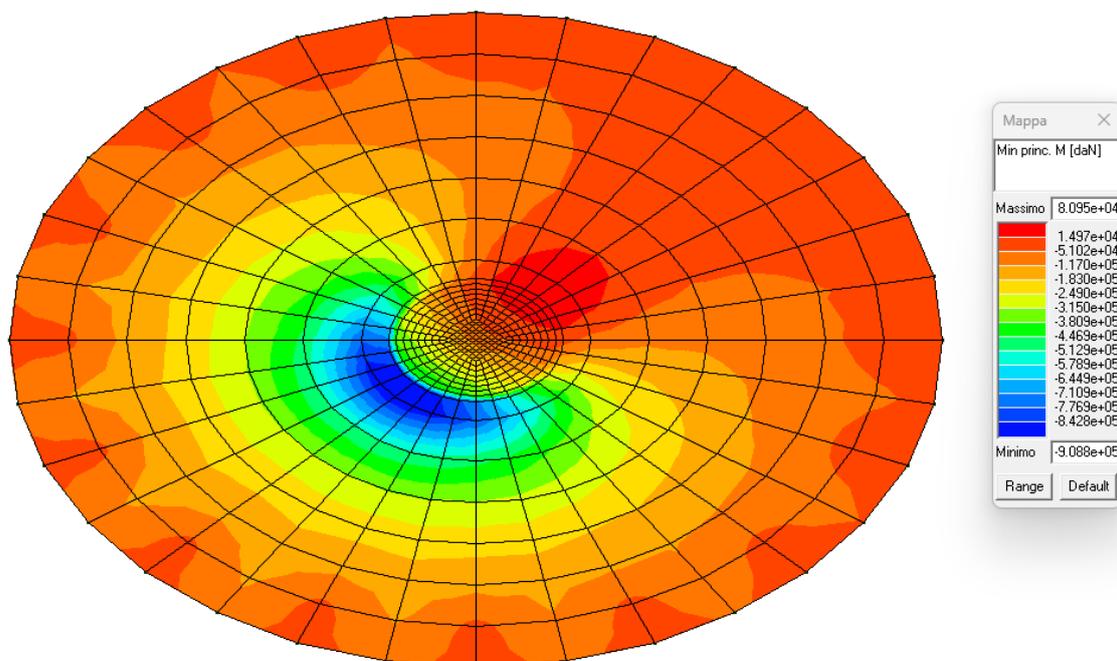


Figura 25: Mappa cromatica azioni M_{min} nella direzione principale (Cmb. SLU)

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico "Duchessa"	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Data: 05/04/2024
		Revisione: 00
		Pagina: 38 di 46

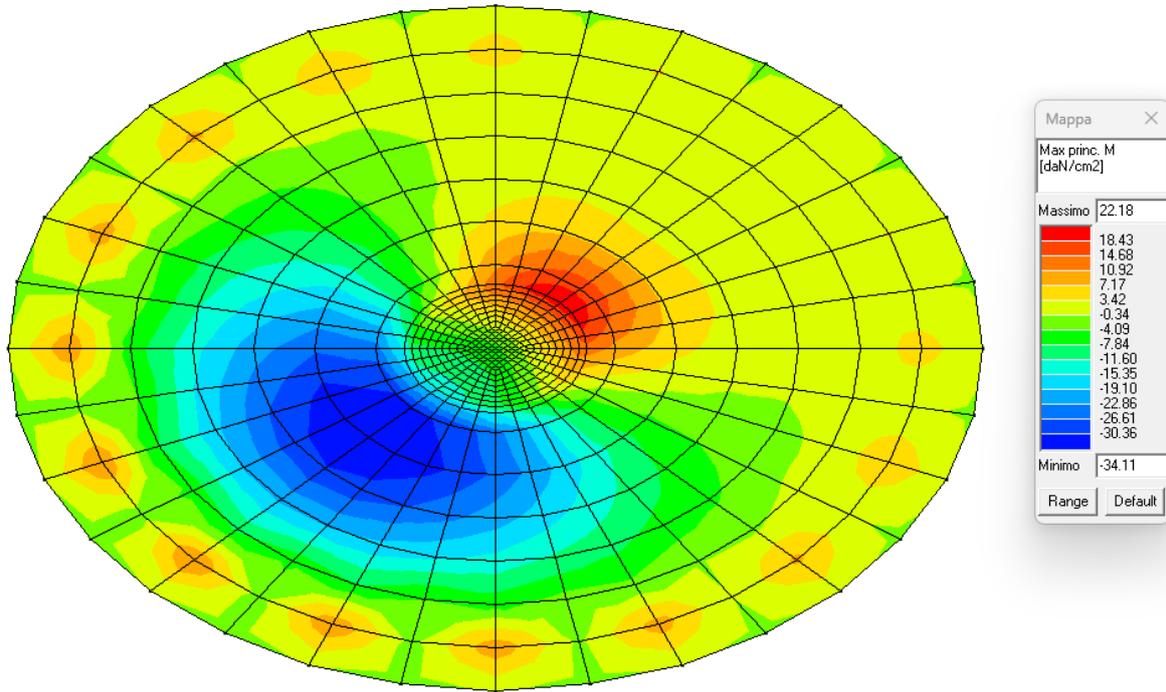


Figura 26: Mappa cromatica tensioni M_{max} nella direzione principale (Cmb. SLU)

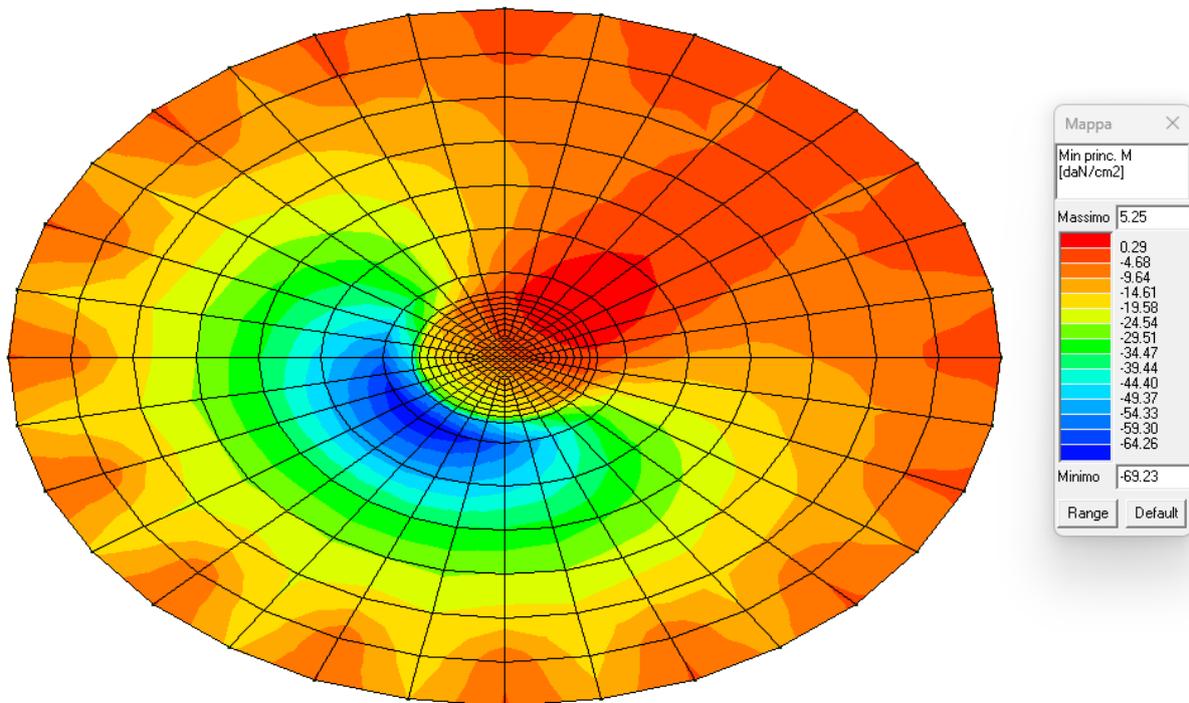


Figura 27: Mappa cromatica tensioni M_{min} nella direzione principale (Cmb. SLU)

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico "Duchessa"	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Data: 05/04/2024
		Revisione: 00
		Pagina: 39 di 46

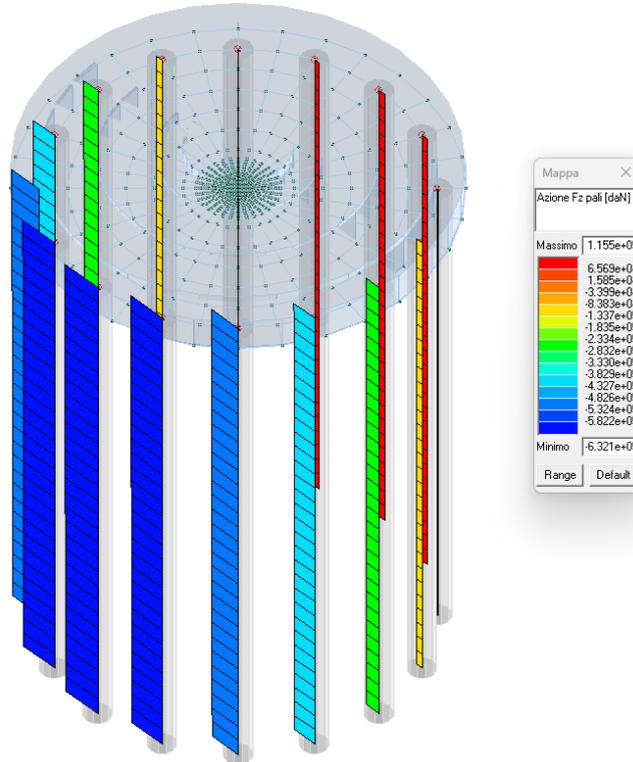


Figura 28: Massima sollecitazione di sforzo normale sui pali

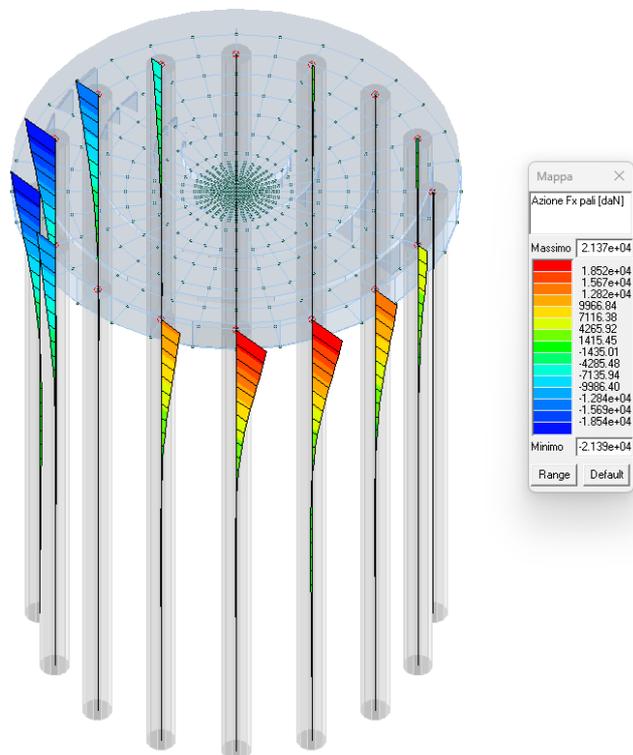


Figura 29: Massima sollecitazione tagliante in direzione X agente sui pali

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico "Duchessa"	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Data: 05/04/2024
		Revisione: 00
		Pagina: 40 di 46

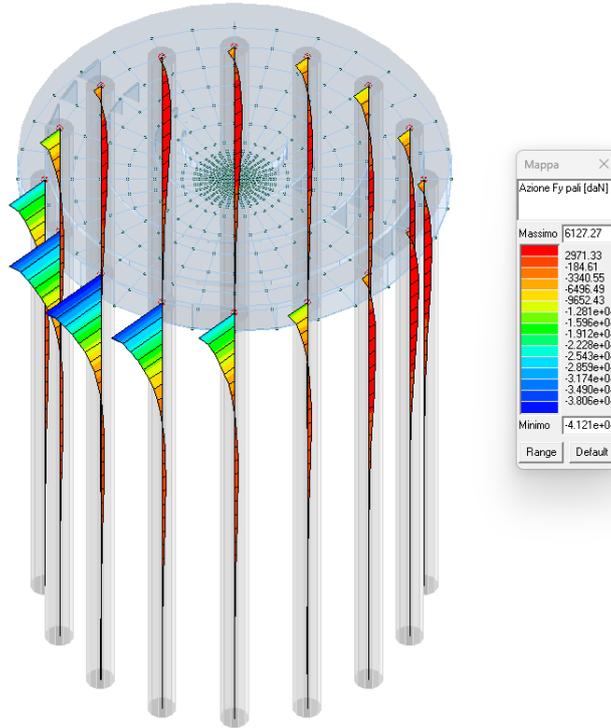


Figura 30: Massima sollecitazione tagliante in direzione Y agente sui pali

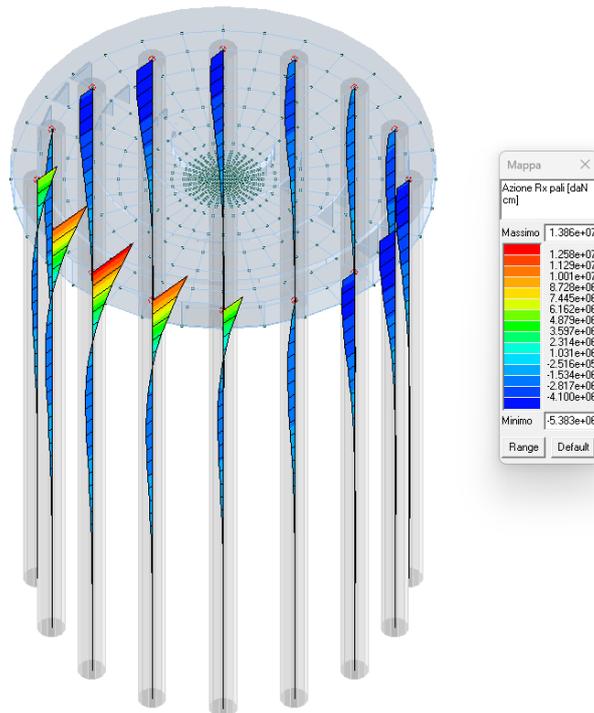


Figura 31: Massima sollecitazione flessionale M_x agente sui pali

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico "Duchessa"	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
		Data: 05/04/2024
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Revisione: 00
		Pagina: 41 di 46

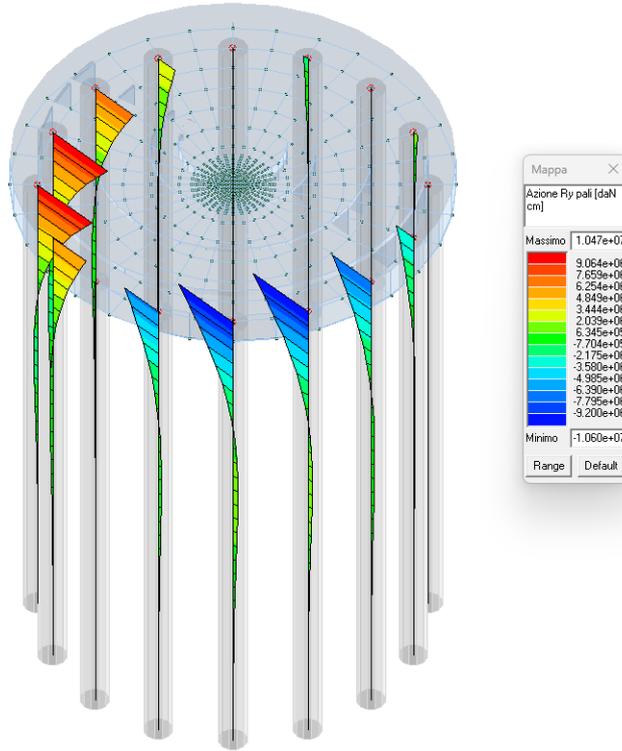


Figura 32: Massima sollecitazione flessionale M_Y agente sui pali

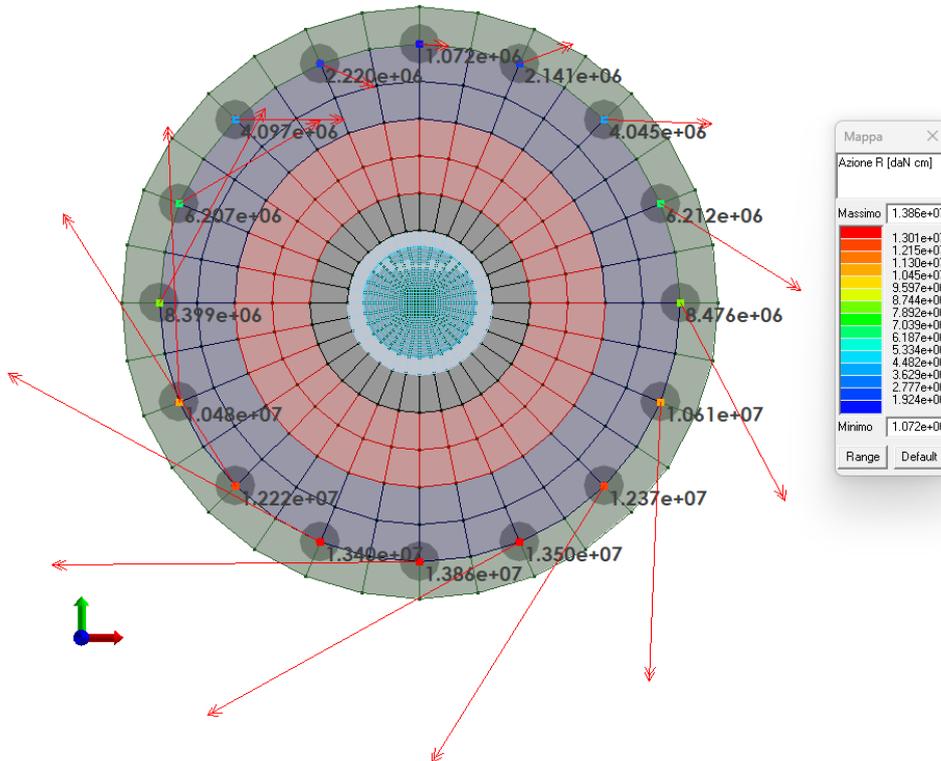


Figura 33: Azioni R massime sui vincoli (SLU)

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico "Duchessa"	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Data: 05/04/2024
		Revisione: 00
		Pagina: 42 di 46

11.2 Deformate

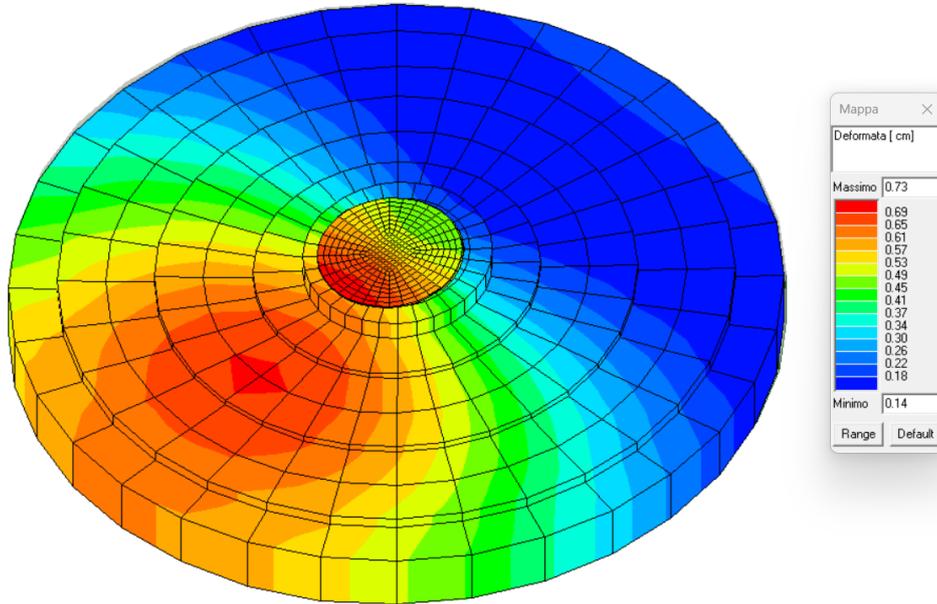


Figura 34: Deformata massima in combinazione SLU

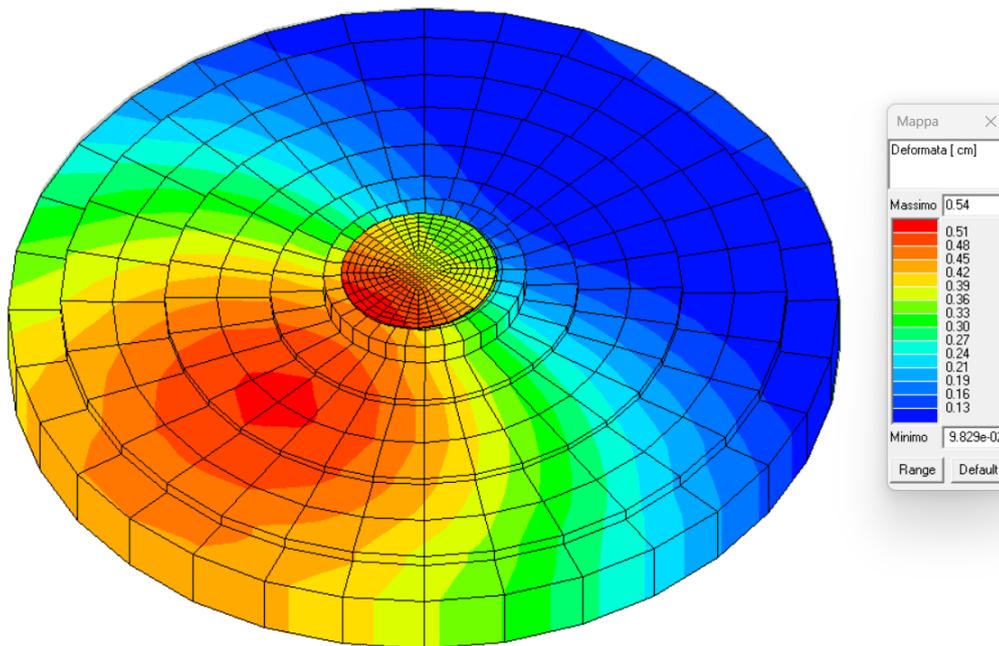


Figura 35: Deformata massima in combinazione SLE rara

Gli spostamenti agli SLE sono verificati per la destinazione d'uso dell'opera.

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico "Duchessa"	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Data: 05/04/2024
		Revisione: 00
		Pagina: 43 di 46

12 VERIFICHE AGLI STATI LIMITE ULTIMI E DI ESERCIZIO

12.1 Verifiche SLU

In azzurro sono rappresentati gli elementi verificati.

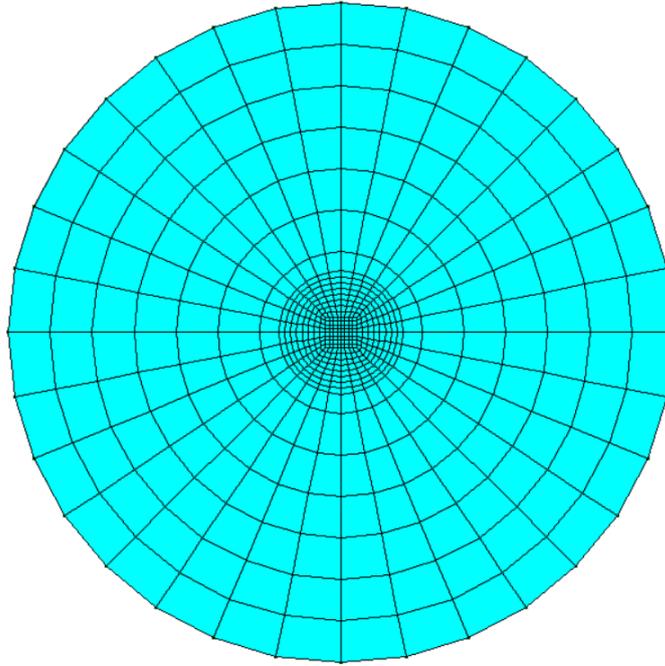


Figura 36: Verifica SLU. In azzurro gli elementi verificati

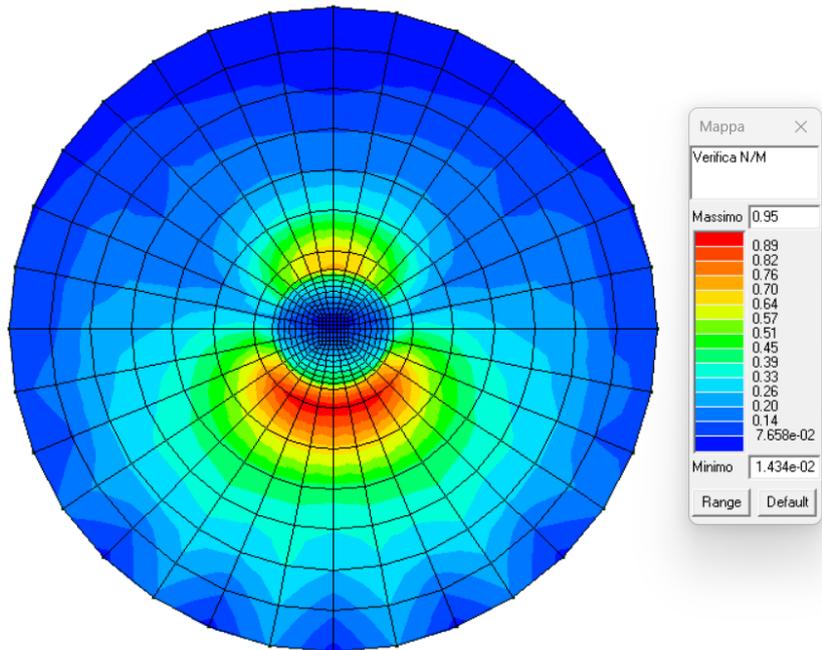


Figura 37: Verifica a pressoflessione N-M SLU (Verificato per valori <1)

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Duchessa”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Data: 05/04/2024
		Revisione: 00
		Pagina: 44 di 46

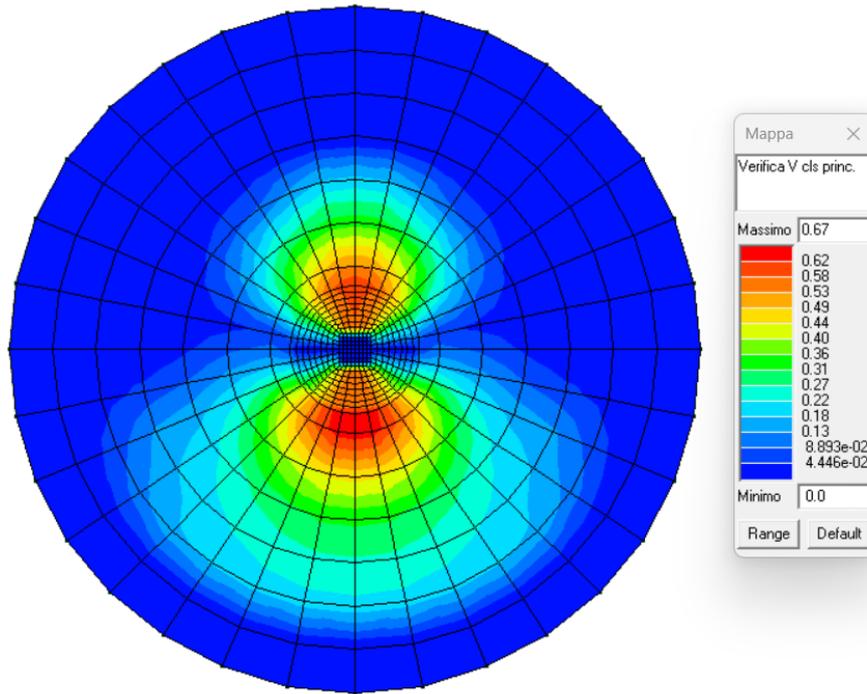


Figura 38: Verifica VCLS principale (verifica per valori <1)

12.2 Verifiche SLE

In azzurro sono rappresentati gli elementi verificati.

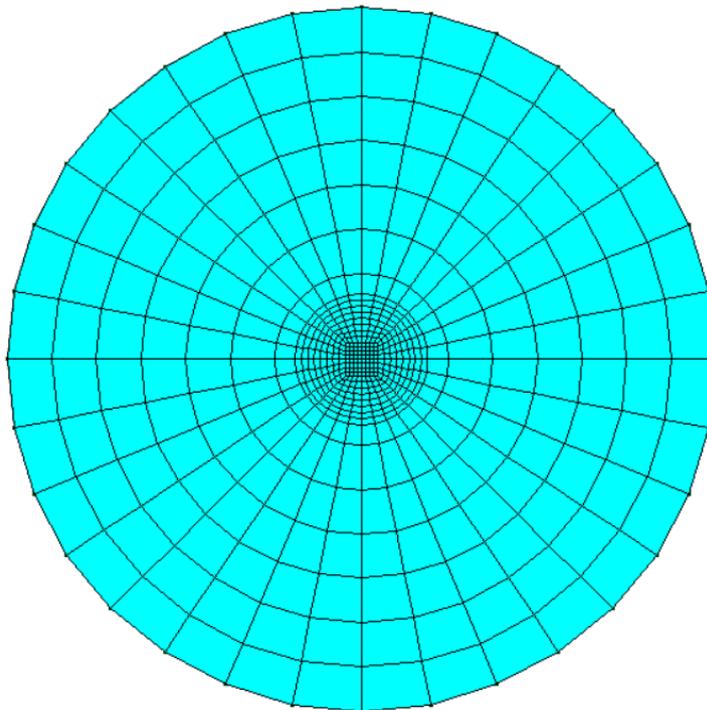


Figura 39: Verifica SLE. In azzurro gli elementi verificati

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico "Duchessa"	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Data: 05/04/2024
		Revisione: 00
		Pagina: 45 di 46

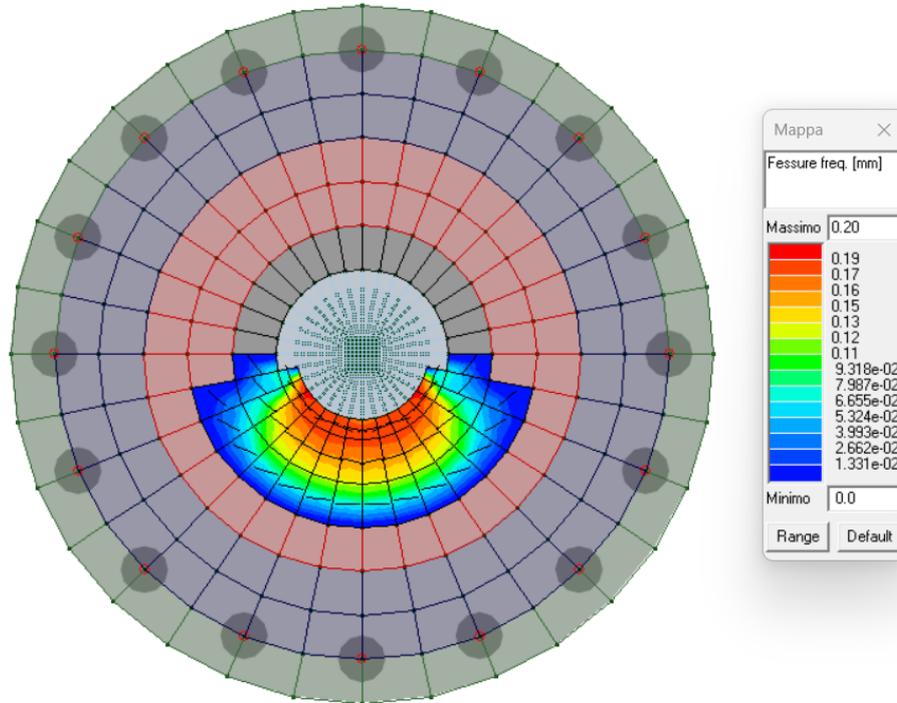


Figura 40: Fessure SLE frequenti

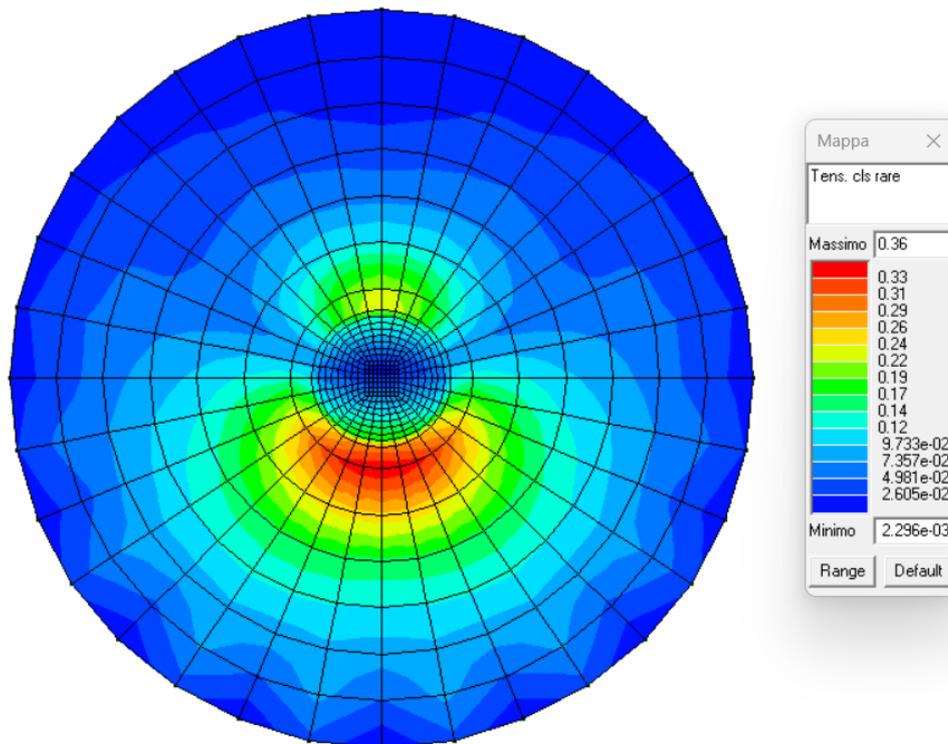


Figura 41: Tensioni CLS SLE rare (verificato per valori <1)

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Duchessa”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: DUCDS_F00R00100_00
	RELAZIONE SULLE STRUTTURE	Data: 05/04/2024
		Revisione: 00
		Pagina: 46 di 46

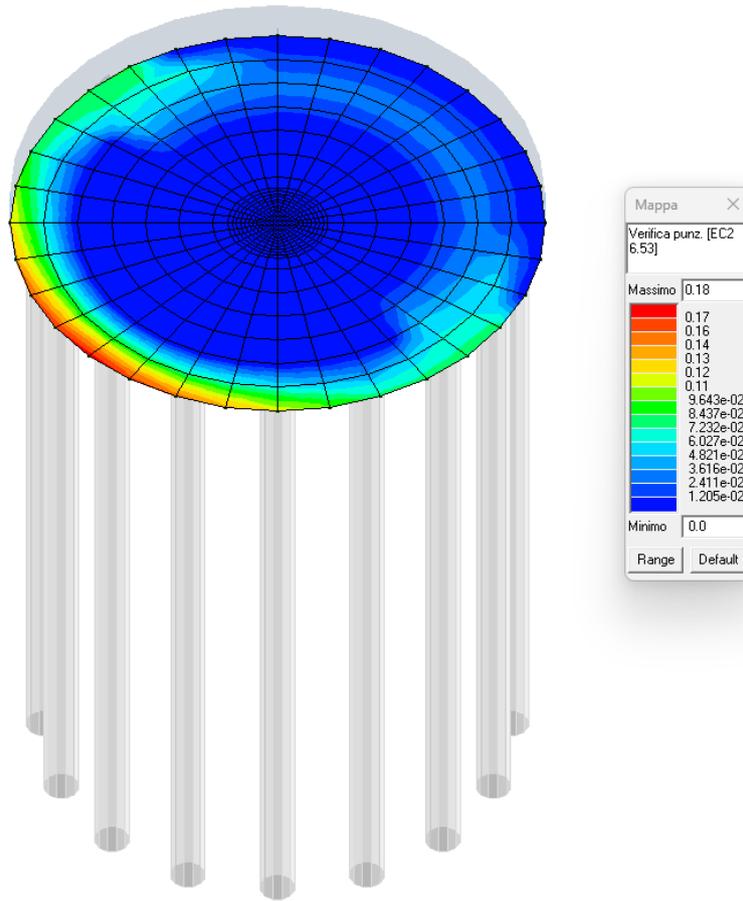


Figura 42: Verifica a punzonamento (verificato per valori <1)