

TITOLARE DEL DOCUMENTO:
AREN ELECTRIC POWER S.p.a.

Sede legale e amministrativa: Via Dell'Arrigoni, 308 – 47522 – Cesena (FC)
Codice Fiscale, P. IVA e numero di iscrizione al Registro delle Imprese di FC: 03803880404

COMUNE DI TROIA (FG)
LOCALITA' "PIANI SAN PIETRO"

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI
IMPIANTO EOLICO
"PIANI SAN PIETRO"

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:

CLTDS_F00R00100_00

FORMATO:

A4

Nr. EL.:

/

FASE:

**PROGETTO
DEFINITIVO**

REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
00	Prima emissione	08/06/2022	D.Zampa	S.Ulivi	S.Ulivi
01					
02					
03					
04					

Aren Electric Power Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDS_F00R00100_00
		Data: 08/06/2022
	Relazione sulle Strutture	Revisione: 00
		Pagina: 1 di 41

Sommario

1	Premessa.....	3
2	Inquadramento del progetto	3
3	Tipologia di intervento.....	6
4	Descrizione generale dell’opera.....	6
5	Normative di riferimento.....	8
6	Caratterizzazione sismica dell’area	8
6.1	Periodo di riferimento dell’azione sismica di base.....	9
6.2	Pericolosità sismica di base.....	9
6.3	Azione sismica di base.....	10
6.3.1	Parametri sismici aerogeneratori.....	10
6.4	Risposta Sismica Locale	13
6.4.1	Amplificazione Topografica.....	13
6.4.2	Amplificazione Stratigrafica.....	14
7	Materiali Impiegati.....	15
7.1	Calcestruzzo	15
7.2	Acciaio per il Calcestruzzo	16
8	Caratterizzazione Geotecnica dell’area.....	17
8.1	WTG 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13 e 14.....	17
8.2	WTG 4 e WTG 12.....	17
8.3	WTG 15 e WTG 16.....	18
9	Metodo di calcolo.....	18
9.1	Modello numero.....	18
10	Modellazione della struttura.....	18
11	Azioni sulla struttura.....	22
12	Modellazione delle azioni.....	23
12.1	Combinazioni delle azioni	23
12.2	Coefficienti adottati.....	24
12.3	Modellazione dei carichi applicati.....	26
12.4	Schematizzazione dei casi di carico.....	27
12.5	Definizione delle combinazioni di carico.....	28
13	Metodo di analisi.....	29
14	Criteri di verifica agli stati limite	29
15	Risultati di calcolo.....	30
15.1	Deformate.....	30

Aren Electric Power Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDS_F00R00100_00
		Data: 08/06/2022
	Relazione sulle Strutture	Revisione: 00
		Pagina: 2 di 41

15.2	Tensioni.....	31
15.3	Azioni sui pali.....	32
16	Armature minime di progetto.....	33
17	Sintesi delle verifiche di sicurezza.....	38
17.1	Verifiche SLU.....	38
17.2	Verifiche SLE.....	40

Aren Electric Power Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDS_F00R00100_00
		Data: 08/06/2022
	Relazione sulle Strutture	Revisione: 00
		Pagina: 3 di 41

1 Premessa

La presente Relazione si riferisce al Progetto Definitivo di un impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica, denominato “Calitri”, e sito nei Comuni di Calitri e Bisaccia (AV) (nel seguito: il **“Progetto”**).

La società proponente è Aren Electric Power spa, con sede in Via dell’Arrigoni 308 – 47522 Cesena (FC), P.IVA 03803880404 (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. 16 aerogeneratori mod. Vestas V150, ciascuno della potenza di 6 MW, per una potenza di immissione complessiva dell’impianto eolico pari a 96 MW.

La Stazione utente e gli aerogeneratori G1, G8 e da G11 a G16 sono compresi nel Comune di Calitri, mentre i restanti aerogeneratori si trovano nel Comune di Bisaccia.

L’impianto sarà costituito da n. 16 aerogeneratori modello Vestas V150 (altezza hub 105 m), di potenza complessiva 96 MW, e sarà allacciato in antenna con la stazione RTN denominata “Bisaccia” di Terna, mediante collegamento a partire dalla Stazione utente attraverso una linea di connessione in AT, secondo il nuovo standard 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 Inquadramento del progetto

Oggetto della presente relazione è il progetto di fondazioni per torri eoliche da realizzarsi nei comuni di Calitri e Bisaccia (AV). Il progetto prevede l’installazione di n.16 aerogeneratori Vestas V150-6MW (potenza complessiva = 96MW), con altezza al mozzo di 105 metri e diametro delle pale di 150m.

Nella *Tabella 1* si elencano le posizioni degli aerogeneratori che costituiscono il Progetto, espresse in coordinate WGS84, fuso 33:

WTG	X	Y
G1	534771	4534651
G2	534263	4533415
G3	533976	4534170
G4	533112	4533649
G5	533685	4533575
G6	533900	4535660
G7	534528	4535636
G8	535504	4535735
G9	533731	4536246
G10	533474	4536904
G11	531873	4529639
G12	534824	4533686
G13	534722	4532896
G14	532366	4529198
G15	533032	4529099
G16	533120	4529714

Tabella 1: Posizioni aerogeneratori (coordinate WGS84 UTM 33)

Aren Electric Power Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDS_F00R00100_00
	Relazione sulle Strutture	Data: 08/06/2022
		Revisione: 00
		Pagina: 4 di 41

L'area interessata dal campo eolico, più nello specifico dagli aerogeneratori, è posta a circa 600-700 metri s.l.m. Il territorio su cui è collocata la Stazione Elettrica di Terna è situato a circa 800 metri s.l.m. Nelle seguenti figure è riportato un inquadramento territoriale del parco eolico.

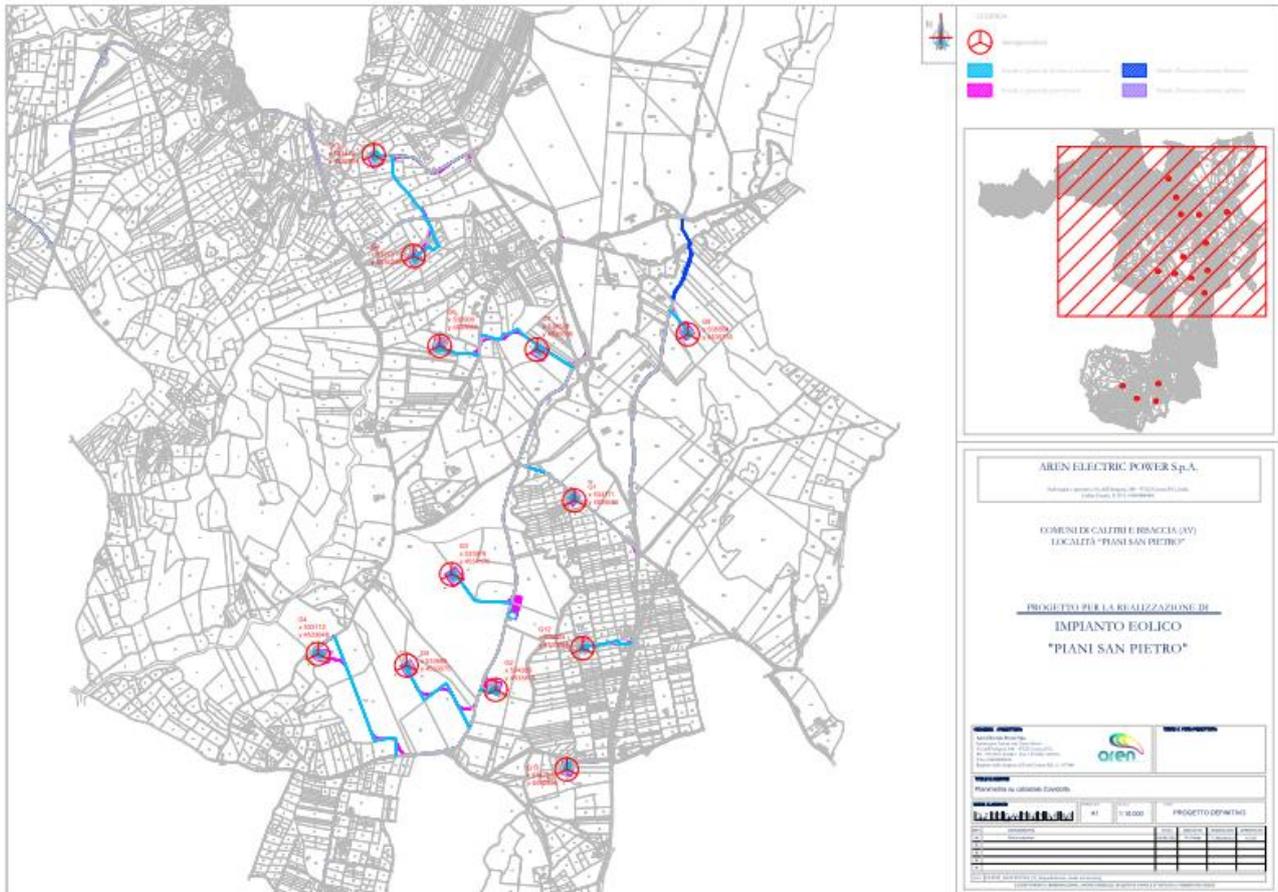


Figura 1: Inquadramento territoriale parco eolico nord

Aren Electric Power Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDS_F00R00100_00
	Relazione sulle Strutture	Data: 08/06/2022
		Revisione: 00
		Pagina: 5 di 41

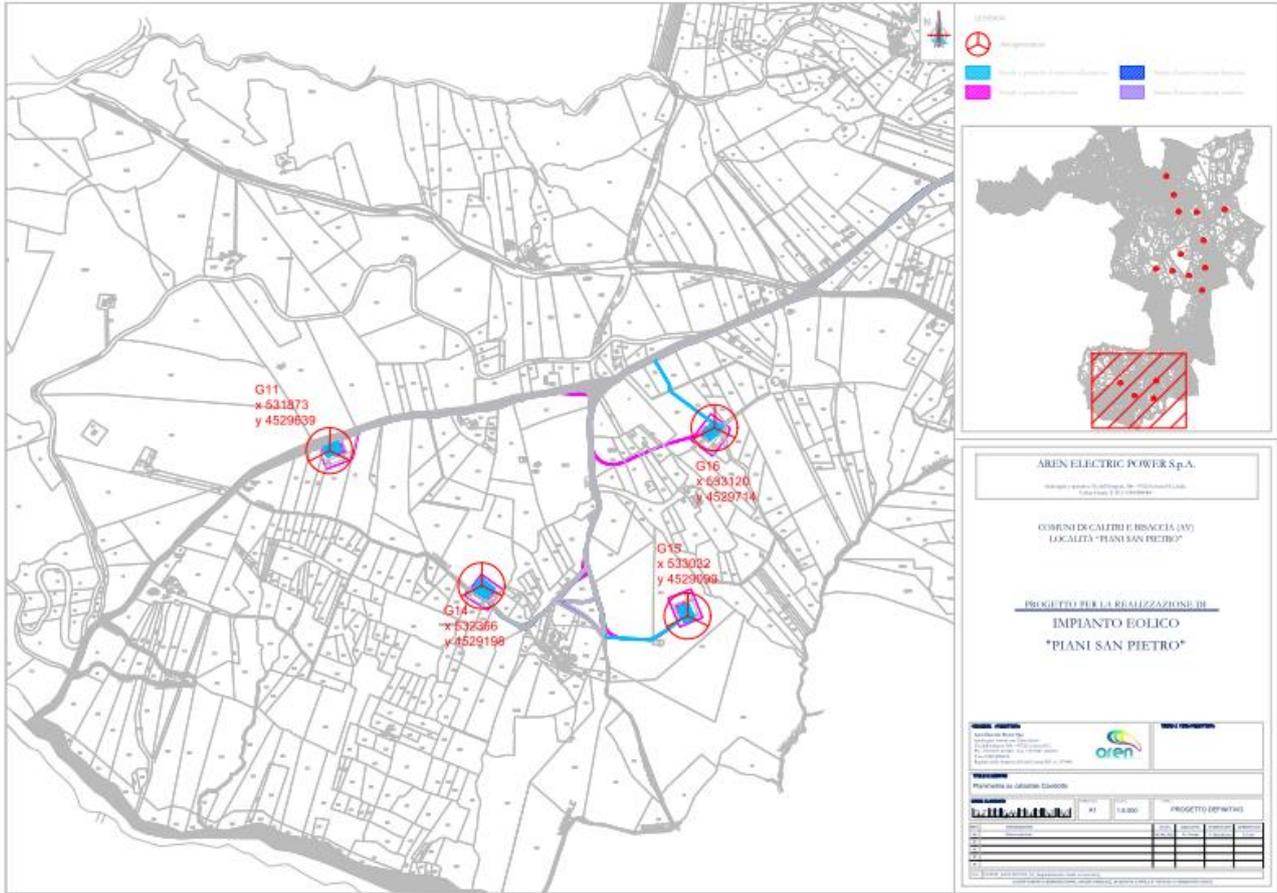


Figura 2: Inquadramento territoriale parco eolico sud

Aren Electric Power Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDS_F00R00100_00
		Data: 08/06/2022
	Relazione sulle Strutture	Revisione: 00
		Pagina: 6 di 41

3 Tipologia di intervento

L'intervento riguarda la nuova costruzione di fondazioni di tipo indiretto (fondazioni su pali) a sostegno di torri eoliche modello Vestas V150-6MW. In *Figura 3* è riportata una rappresentazione tecnica dell'elemento al di sopra del terreno di fondazione.

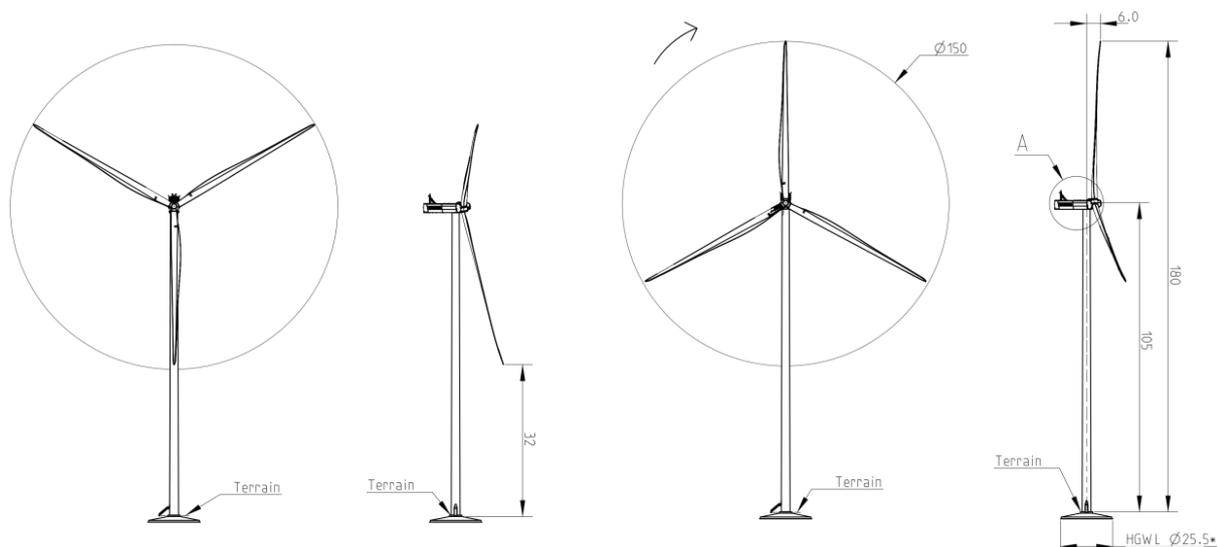


Figura 3: Aerogeneratore Vestas 150

4 Descrizione generale dell'opera

Il progetto prevede la costruzione di n.16 plinti di fondazione su pali a servizio dell'installazione di n.16 aerogeneratori, identificati nel progetto dell'impianto eolico come “WTG” 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 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 25,5 m e base minore avente diametro pari a 5,50 m, con quota d'imposta a circa -2,30m rispetto al piano medio di campagna. L'altezza massima della fondazione misurata al centro della stessa (sul colletto) è di 2,18 m, mentre l'altezza minima misurata sull'estremità è di 1,45 m. Al centro della fondazione viene realizzato un accrescimento di 0,6 m al fine di consentire l'alloggio dell'anchor cage per l'installazione della torre eolica.

Nella *Figura 4* è riportata una sezione di dettaglio della fondazione superficiale.

Aren Electric Power Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDS_F00R00100_00
		Data: 08/06/2022
	Relazione sulle Strutture	Revisione: 00
		Pagina: 8 di 41

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.

5 Normative 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).

6 Caratterizzazione sismica dell'area

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 2: Zone sismicità di base

L'area in oggetto ricade nel territorio comunale di Calitri e Bisaccia, secondo DPCM 20 marzo 2003 i comuni risultano classificati come Zona Sismica 1 (rischio alto) contrassegnata da un valore di accelerazione al suolo a_g compreso tra 0,200 g e 0,275 g.

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

- Vita nominale V_N pari a **50 anni**;
- Classe d'uso **IV** (rischio rilevante);
- Categoria Topografica;
- Categoria Stratigrafica;
- Coefficiente d'uso C_u pari a **2**;

Aren Electric Power Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDS_F00R00100_00
		Data: 08/06/2022
	Relazione sulle Strutture	Revisione: 00
		Pagina: 9 di 41

6.1 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:

$$V_R = 100 \text{ anni}$$

6.2 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.

A titolo di esempio, viene riportato il reticolo sopra citato per i comuni Calitri e Bisaccia (AV) con probabilità di superamento in 50 anni del 10% (SLV).

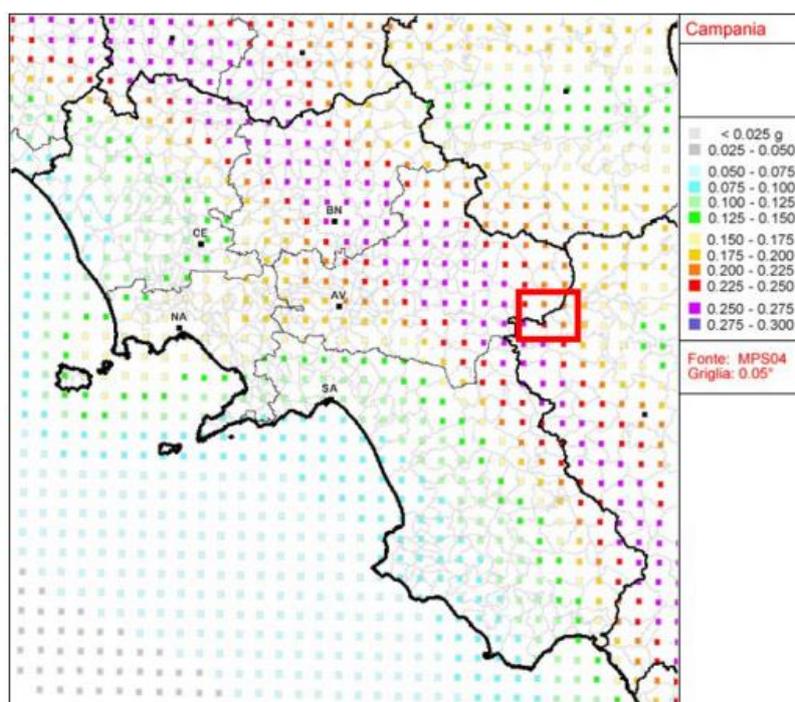


Figura 6: Reticolo di riferimento sismicità di base

Aren Electric Power Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDS_F00R00100_00
		Data: 08/06/2022
	Relazione sulle Strutture	Revisione: 00
		Pagina: 10 di 41

6.3 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, 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%	60
SLD	63%	101
SLV	10%	949
SLC	5%	1950

Tabella 3: 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.

6.3.1 Parametri sismici aerogeneratori

I parametri necessari alla definizione della pericolosità sismica di base sono riportati nelle seguenti tabelle:

STATO LIMITE	T_R [anni]	a_g [g]	F_0	T_c^* [s]
SLO	60	0,083	2,370	0,323
SLD	101	0,109	2,444	0,332
SLV	949	0,329	2,347	0,421
SLC	1950	0,445	2,348	0,447

Tabella 4: Parametri pericolosità sismica di base aerogeneratore WTG 1

STATO LIMITE	T_R [anni]	a_g [g]	F_0	T_c^* [s]
SLO	60	0,084	2,361	0,324
SLD	101	0,111	2,407	0,334
SLV	949	0,335	2,344	0,420
SLC	1950	0,451	2,356	0,448

Tabella 5: Parametri pericolosità sismica di base aerogeneratore WTG 2

Aren Electric Power Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDS_F00R00100_00
		Data: 08/06/2022
	Relazione sulle Strutture	Revisione: 00
		Pagina: 11 di 41

STATO LIMITE	T_R [anni]	a_g [g]	F_o	T_c^* [s]
SLO	60	0,084	2,361	0,324
SLD	101	0,111	2,407	0,334
SLV	949	0,335	2,344	0,420
SLC	1950	0,451	2,356	0,448

Tabella 6: Parametri pericolosità sismica di base aerogeneratore WTG 3

STATO LIMITE	T_R [anni]	a_g [g]	F_o	T_c^* [s]
SLO	60	0,085	2,356	0,323
SLD	101	0,112	2,393	0,334
SLV	949	0,339	2,340	0,420
SLC	1950	0,455	2,358	0,448

Tabella 7: Parametri pericolosità sismica di base aerogeneratore WTG 4

STATO LIMITE	T_R [anni]	a_g [g]	F_o	T_c^* [s]
SLO	60	0,084	2,359	0,323
SLD	101	0,111	2,402	0,334
SLV	949	0,337	2,342	0,420
SLC	1950	0,453	2,357	0,448

Tabella 8: Parametri pericolosità sismica di base aerogeneratore WTG 5

STATO LIMITE	T_R [anni]	a_g [g]	F_o	T_c^* [s]
SLO	60	0,083	2,369	0,323
SLD	101	0,109	2,444	0,332
SLV	949	0,331	2,347	0,421
SLC	1950	0,448	2,346	0,447

Tabella 9: Parametri pericolosità sismica di base aerogeneratore WTG 6

STATO LIMITE	T_R [anni]	a_g [g]	F_o	T_c^* [s]
SLO	60	0,083	2,373	0,323
SLD	101	0,108	2,461	0,332
SLV	949	0,328	2,347	0,421
SLC	1950	0,444	2,343	0,446

Tabella 10: Parametri pericolosità sismica di base aerogeneratore WTG 7

Aren Electric Power Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDS_F00R00100_00
		Data: 08/06/2022
	Relazione sulle Strutture	Revisione: 00
		Pagina: 12 di 41

STATO LIMITE	T _R [anni]	a _g [g]	F _o	T _c * [s]
SLO	60	0,082	2,389	0,323
SLD	101	0,106	2,475	0,332
SLV	949	0,322	2,351	0,424
SLC	1950	0,437	2,345	0,447

Tabella 11: Parametri pericolosità sismica di base aerogeneratore WTG 8

STATO LIMITE	T _R [anni]	a _g [g]	F _o	T _c * [s]
SLO	60	0,083	2,377	0,323
SLD	101	0,108	2,453	0,332
SLV	949	0,329	2,353	0,424
SLC	1950	0,445	2,346	0,447

Tabella 12: Parametri pericolosità sismica di base aerogeneratore WTG 9

STATO LIMITE	T _R [anni]	a _g [g]	F _o	T _c * [s]
SLO	60	0,083	2,384	0,322
SLD	101	0,108	2,458	0,332
SLV	949	0,328	2,348	0,423
SLC	1950	0,444	2,345	0,448

Tabella 13: Parametri pericolosità sismica di base aerogeneratore WTG 10

STATO LIMITE	T _R [anni]	a _g [g]	F _o	T _c * [s]
SLO	60	0,087	2,336	0,322
SLD	101	0,116	2,320	0,336
SLV	949	0,353	2,315	0,423
SLC	1950	0,466	2,375	0,445

Tabella 14: Parametri pericolosità sismica di base aerogeneratore WTG 11

STATO LIMITE	T _R [anni]	a _g [g]	F _o	T _c * [s]
SLO	60	0,083	2,367	0,323
SLD	101	0,109	2,423	0,333
SLV	949	0,331	2,347	0,421
SLC	1950	0,447	2,353	0,448

Tabella 15: Parametri pericolosità sismica di base aerogeneratore WTG 12

STATO LIMITE	T _R [anni]	a _g [g]	F _o	T _c * [s]
SLO	60	0,084	2,363	0,324
SLD	101	0,110	2,401	0,334
SLV	949	0,334	2,346	0,420
SLC	1950	0,450	2,358	0,448

Tabella 16: Parametri pericolosità sismica di base aerogeneratore WTG 13

Aren Electric Power Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDS_F00R00100_00
		Data: 08/06/2022
	Relazione sulle Strutture	Revisione: 00
		Pagina: 13 di 41

STATO LIMITE	T _R [anni]	a _g [g]	F _o	T _c * [s]
SLO	60	0,087	2,337	0,322
SLD	101	0,116	2,321	0,336
SLV	949	0,351	2,318	0,422
SLC	1950	0,465	2,373	0,445

Tabella 17: Parametri pericolosità sismica di base aerogeneratore WTG 14

STATO LIMITE	T _R [anni]	a _g [g]	F _o	T _c * [s]
SLO	60	0,086	2,343	0,323
SLD	101	0,115	2,321	0,337
SLV	949	0,350	2,328	0,421
SLC	1950	0,463	2,376	0,448

Tabella 18: Parametri pericolosità sismica di base aerogeneratore WTG 15

STATO LIMITE	T _R [anni]	a _g [g]	F _o	T _c * [s]
SLO	60	0,086	2,340	0,323
SLD	101	0,116	2,321	0,336
SLV	949	0,350	2,324	0,421
SLC	1950	0,463	2,373	0,446

Tabella 19: Parametri pericolosità sismica di base aerogeneratore WTG 16

6.4 Risposta Sismica Locale

L'azione sismica di base individuata nella precedente sezione viene successivamente variata, nei modi precisati dalle NTC, 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.

6.4.1 Amplificazione Topografica

Di seguito sono riportate le categorie topografiche dell'area in esame:

AEROGENERATORE	CATEGORIA TOPOGRAFICA	DESCRIZIONE
1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16	T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$

Tabella 20: Categoria topografica

Aren Electric Power Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDS_F00R00100_00
		Data: 08/06/2022
	Relazione sulle Strutture	Revisione: 00
		Pagina: 14 di 41

6.4.2 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 nelle Categorie Stratigrafiche seguenti:

WTG	Categoria di suolo	
1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 14	B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s
12, 4, 15, 16	C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s

Tabella 21: Categoria di suolo

Aren Electric Power Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDS_F00R00100_00
		Data: 08/06/2022
	Relazione sulle Strutture	Revisione: 00
		Pagina: 15 di 41

7 Materiali Impiegati

7.1 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 C25/30 ($R_{ck} \geq 30$ MPa). La resistenza della Malta Speciale sarà invece di classe C80/95 ($R_{ck} \geq 95$ MPa).

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

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

Classe di esposizione: XC4

Copriferro minimo: 5cm (salvo diversamente specificato)

Classe	f _{ck}	α _{cc}	γ _{cls}	E _{cm}	f _{cd}	f _{ctm}	f _{ctk}	f _{ctd}	f _{cfm}	f _{bk}	f _{bd}	ε _{c2}	ε _{cu}	σ _{c,Rara}	σ _{c,QP}
	[MPa]			[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]			[MPa]	[MPa]
C35/45	35,00	0,85	1,50	34.077	19,83	3,21	2,25	1,50	3,86	5,06	3,37	0,00200	0,00350	21,00	15,75

Tabella 22: Caratteristiche meccaniche CLS C35/45

- **Calcestruzzo per pali di fondazione: C25/30**

Classe di esposizione: XC2

Copriferro minimo: 5cm (salvo diversamente specificato)

Classe	f _{ck}	α _{cc}	γ _{cls}	E _{cm}	f _{cd}	f _{ctm}	f _{ctk}	f _{ctd}	f _{cfm}	f _{bk}	f _{bd}	ε _{c2}	ε _{cu}	σ _{c,Rara}	σ _{c,QP}
	[MPa]			[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]			[MPa]	[MPa]
C25/30	25,00	0,85	1,50	31.476	14,17	2,57	1,80	1,20	3,08	4,04	2,70	0,00200	0,00350	15,00	11,25

Tabella 23: Caratteristiche meccaniche CLS C25/30

- **Malta speciale C80/95**

Classe	f _{ck}	α _{cc}	γ _{cls}	E _{cm}	f _{cd}	f _{ctm}	f _{ctk}	f _{ctd}	f _{cfm}	f _{bk}	f _{bd}	ε _{c2}	ε _{cu}	σ _{c,Rara}	σ _{c,QP}
	[MPa]			[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]			[MPa]	[MPa]
C80/95	80,00	0,85	1,50	42'244	45,33	4,84	3,39	2,26	5,81	7,62	5,08	0,00252	0,00260	48,00	36,00

Tabella 24: 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 in Figura 7:

Aren Electric Power Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDS_F00R00100_00
		Data: 08/06/2022
	Relazione sulle Strutture	Revisione: 00
		Pagina: 16 di 41

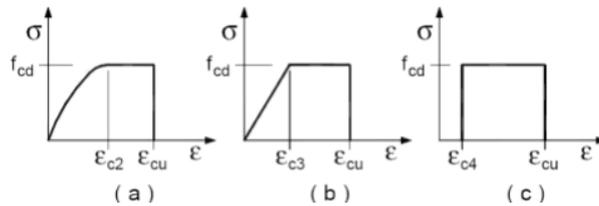


Figura 7: Modello tensione-deformazione per il calcestruzzo

7.2 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	fyk	γs	ftk	Es	fyd	eyd	euk	(fy/fy,nom)k	eud	k = (ft/fy)k	σs,Rara	Diametro minimo mandrino di piegatura	
	[MPa]		[MPa]	[MPa]	[MPa]					[MPa]	[MPa]	Φ≤16mm	Φ>16mm
B450C	450,00	1,15	540,00	210.000	391,30	0,00186	0,07500	≤ 1,25	0,06750	1,15 - 1,35	360,00	4Φ	7Φ

Tabella 25: 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 in Figura 8.b:

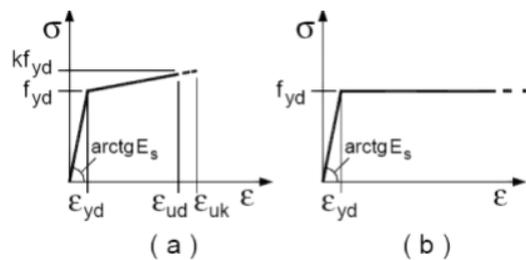


Figura 8: Modello tensione-deformazione per l'acciaio

Aren Electric Power Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDS_F00R00100_00
		Data: 08/06/2022
	Relazione sulle Strutture	Revisione: 00
		Pagina: 17 di 41

8 Caratterizzazione Geotecnica dell'area

Dalle conoscenze pregresse e dal modello geologico risultante dell'area di studio si è proceduto ad analizzare una serie di indagini eseguite nel corso degli anni in aree limitrofe al sito in esame e su terreni con caratteristiche similari. In particolare, sono state prese in considerazione sia sondaggi geognostici che prove geotecniche di laboratorio eseguite su campioni indisturbati prelevati negli stessi sondaggi.

Di seguito si riportano i parametri geotecnici medi rappresentativi per ciascuno degli aerogeneratori.

8.1 WTG 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13 e 14

- Calcareniti a grana media e fine alternata a calcari marnosi, marne e calcisiltiti in strati dello spessore variabile da 10 cm a 40 cm;
- Intercalato nella parte alta dell'unità si distingue una successione spessa circa 80 m di arenarie da fini a grossolane, stratificate, massive, gradate e laminate, con sequenza di Bouma Ta-c e Tb-c alternate a calcareniti fini con sequenza Tc-e; silt, marne e argille marnose sottilmente laminate (torbititici e pelagici).

γ = peso di volume del terreno	1,90 t/mc ÷ 1,98 t/mc
ϕ' = angolo di attrito interno	25,00° ÷ 28,00°
c' = coesione drenata	0,04 kg/cmq ÷ 0,08 kg/cmq
C_u = coesione non drenata	-
E_d = modulo edometrico	72,60 kg/cmq ÷ 84,65 kg/cmq

Tabella 26: Parametri geotecnici medi WTG 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13 e 14

8.2 WTG 4 e WTG 12

- Chiudono la serie breccie calcaree e calcareniti a grana media e fine con liste e noduli di selce e sottili strati di argille rosse e diaspri (depositi pelagici e torbitidici), con spessore massimo 30 m.

γ = peso di volume	1,96 t/mc ÷ 2,11 t/mc
ϕ' = angolo di attrito drenato	27,00° ÷ 32,00°
c' = coesione drenata	0,00 kg/cmq ÷ 0,12 kg/cmq
C_u = coesione non drenata	-
E_d = modulo edometrico	114,65 kg/cmq ÷ 144,36 kg/cmq

Tabella 27: Parametri geotecnici medi WTG 4 e 12

Aren Electric Power Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDS_F00R00100_00
		Data: 08/06/2022
	Relazione sulle Strutture	Revisione: 00
		Pagina: 18 di 41

8.3 WTG 15 e WTG 16

- Argille e argille marnose di colore rosso, verde e grigio in assetto caotico o affette da intensa deformazione, con olistoliti e intercalazioni nella parte alta di strati di arenarie quarzose e arcose.

γ = peso di volume	1,90 t/mc ÷ 1,95 t/mc
ϕ' = angolo di attrito drenato	23,00° ÷ 24,00°
c' = coesione drenata	0,21 kg/cmq
C_u = coesione non drenata	0,94 kg/cmq
E_d = modulo edometrico	124,50 kg/cmq ÷ 145,78 kg/cmq

Tabella 28: Parametri geotecnici medi WTG 15 e WTG 16

Dai sondaggi consultati si rileva un livello piezometrico che varia da circa 1,50 e 6,00 metri di profondità dal piano campagna.

9 Metodo di calcolo

La struttura di fondazione è calcolata in base al metodo degli stati limite in accordo con il DM 17/01/2018 (NTC2018). Le azioni derivanti dalle sollecitazioni sulla sovrastruttura (torre eolica / aerogeneratore) vengono considerate nelle combinazioni di carico di cui al cap.2 e cap.3 delle NTC2018.

9.1 Modello numero

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.

10 Modellazione della struttura

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.

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.

Aren Electric Power Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDS_F00R00100_00
		Data: 08/06/2022
	Relazione sulle Strutture	Revisione: 00
		Pagina: 19 di 41

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.

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

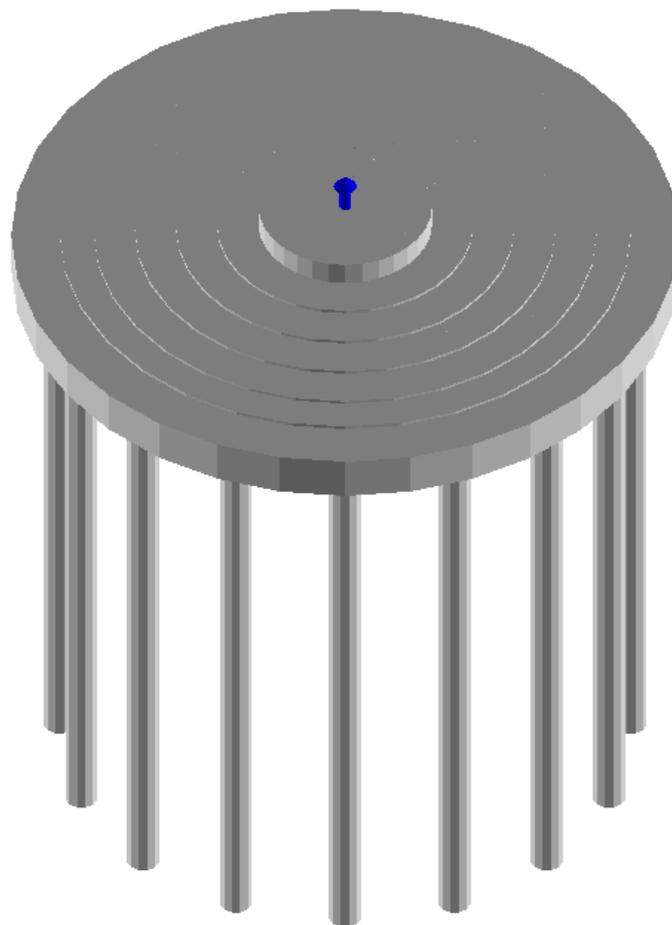


Figura 9: Vista solida elemento di fondazione

Aren Electric Power Spa Impianto Eolico "Piani San Pietro"	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDS_F00R00100_00
		Data: 08/06/2022
	Relazione sulle Strutture	Revisione: 00
		Pagina: 20 di 41

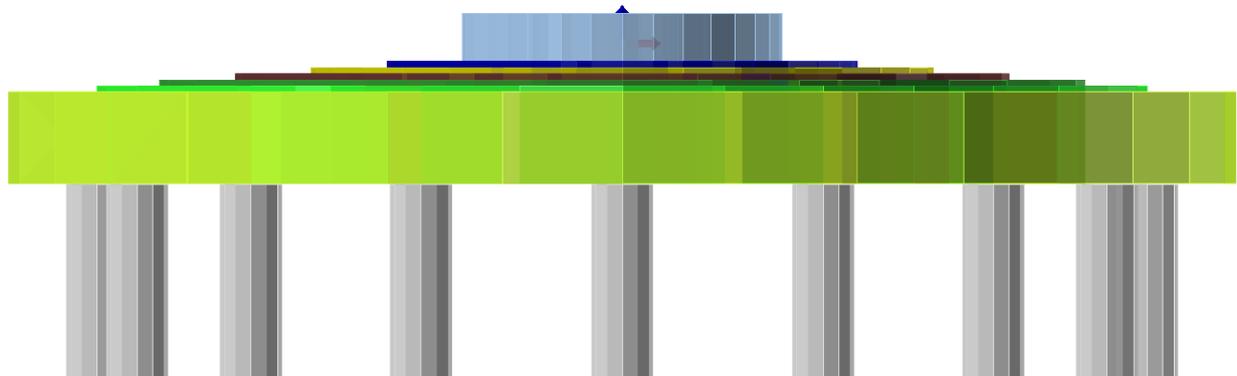


Figura 10: Vista solida laterale

Nella Figura 11 è riportata una distinzione per colori degli spessori di ciascun elemento shell D3.

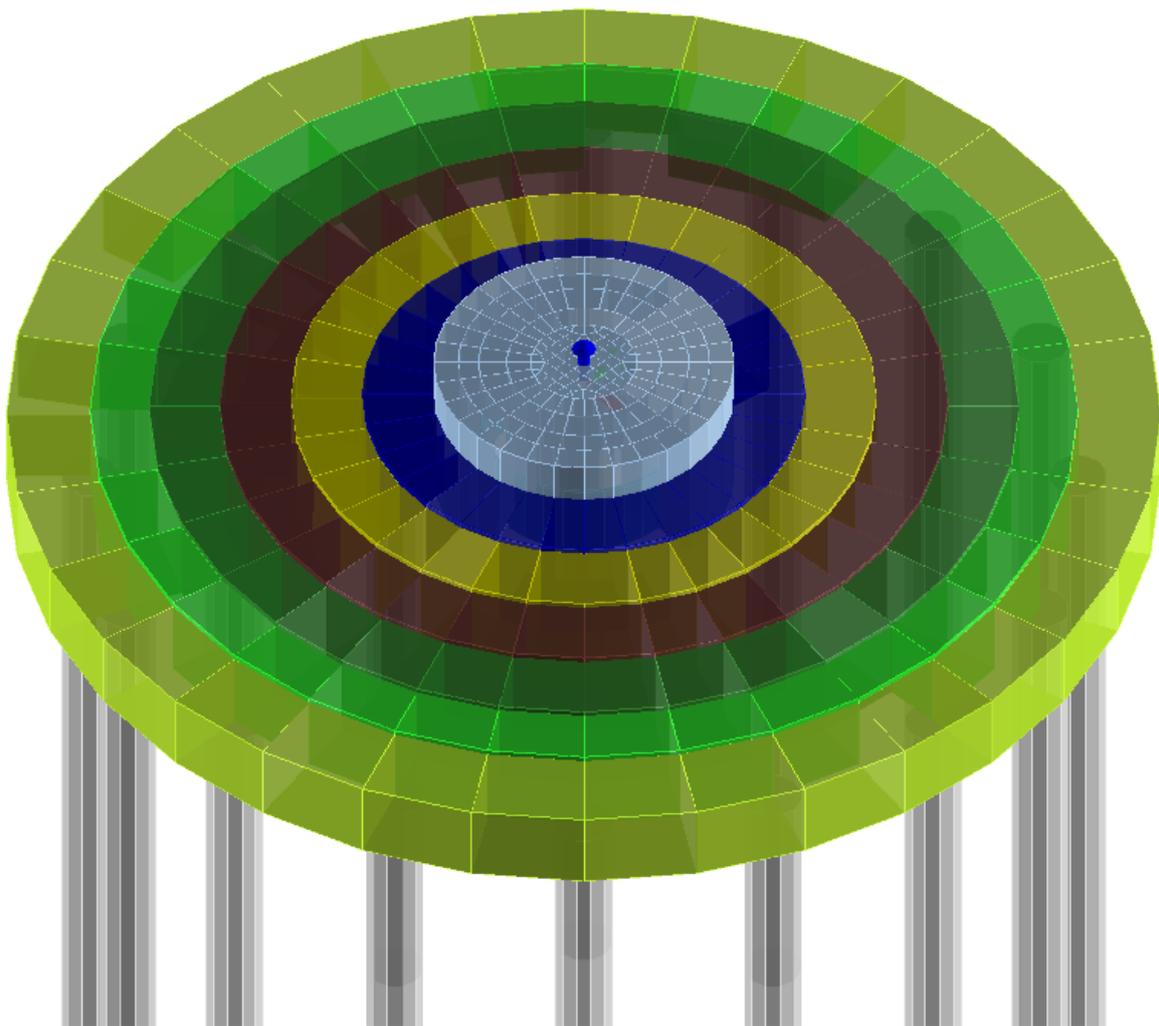


Figura 11: Vista solida. Distinzione degli spessori

Aren Electric Power Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDS_F00R00100_00
	Relazione sulle Strutture	Data: 08/06/2022
		Revisione: 00
		Pagina: 21 di 41

Figura 12 riportata invece una rappresentazione in pianta dei nodi di connessione tra gli elementi shell costituenti il modello della fondazione.

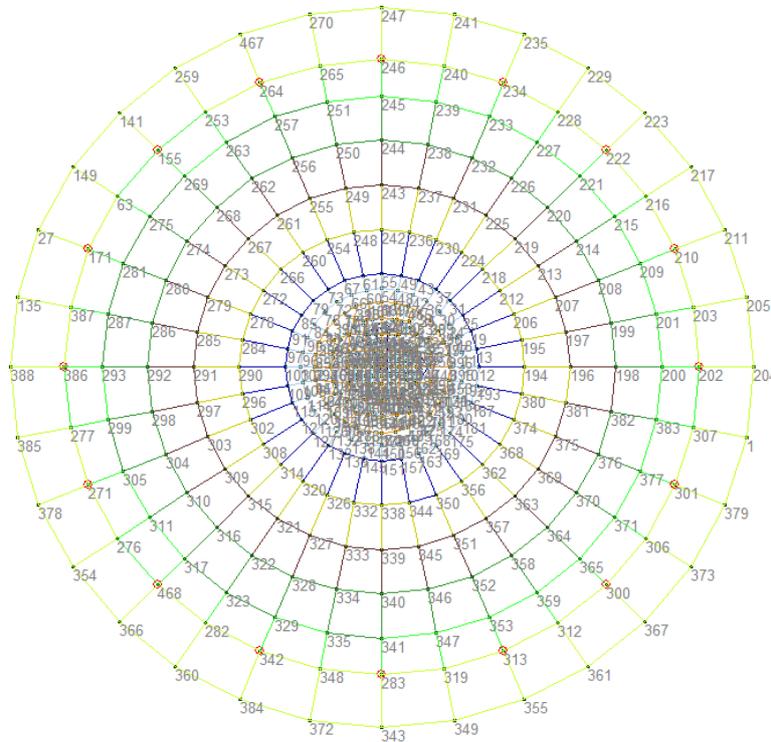


Figura 12: Pianta fondazione. Nodi della struttura

L'implementazione del “Palo in Mezzo Elastico” segue la procedura riportata in Figura 13.

Palo in mezzo elastico

Stringa identificativa

Palo

Diametro

Lunghezza

Modulo elastico

Peso specifico

Modello matematico palo

P.to	Quota	K orizz...	K verti...
n. 1	-230.00	0.30	0.01
n. 2	-330.00	0.33	0.01
n. 3	-330.00	0.33	0.01
n. 4	-430.00	0.35	0.01
n. 5	-430.00	0.35	0.01
n. 6	-530.00	0.36	0.01
n. 7	-530.00	0.36	0.01

Usa stratigrafia semplificata con coefficienti:
KDo Kzo Kv (attrito)

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

Figura 13: Modello elemento tipo "Palo in Mezzo Elastico"

Aren Electric Power Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDS_F00R00100_00
		Data: 08/06/2022
	Relazione sulle Strutture	Revisione: 00
		Pagina: 22 di 41

11 Azioni sulla struttura

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

I carichi della struttura in elevazione sono forniti dalla società produttrice degli aerogeneratori Vestas Wind Systems, calcolati sulla base delle caratteristiche geografiche del sito di riferimento e dei parametri sismici di progetto.

I carichi estremi sono così determinati:

CARICO ESTREMO	
M_{Res} [kNm]	108300
M_Z [kNm]	-11170
F_{Res} [kN]	1034
F_Z [kN]	-5725

Tabella 29: Carichi di progetto fondazione

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

La convenzione adottata per i carichi applicati è riportata in Figura 14.

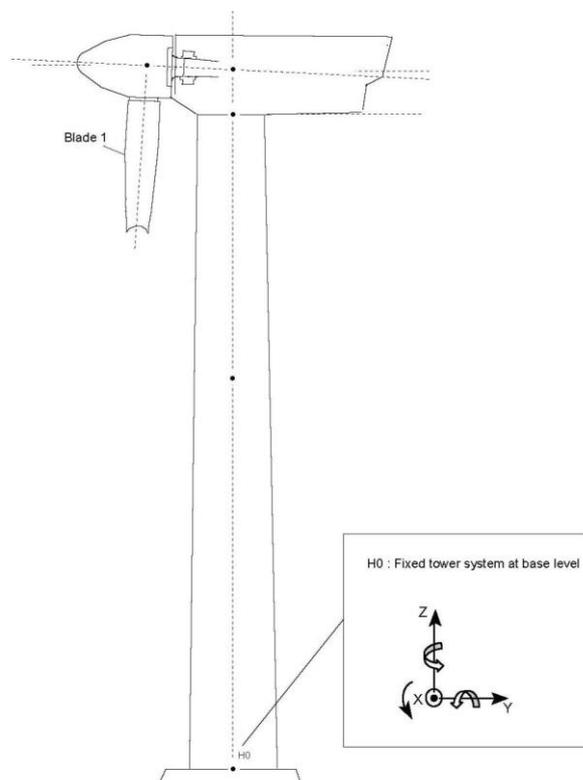


Figura 14: Sistema di riferimento per i carichi applicati

Aren Electric Power Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDS_F00R00100_00
	Relazione sulle Strutture	Data: 08/06/2022
		Revisione: 00
		Pagina: 23 di 41

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

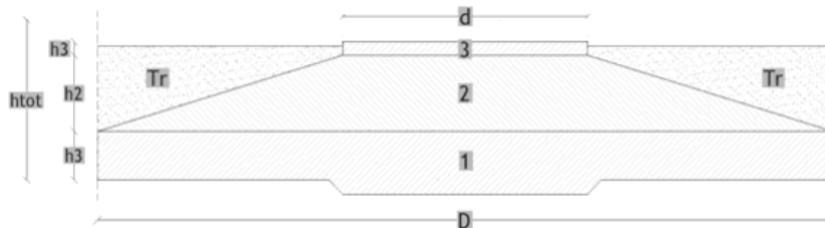


Figura 15: Modello di calcolo fondazione

Il peso proprio degli elementi è rappresentato dai seguenti dati:

- Peso proprio degli elementi strutturali: $G1=2500 \text{ kg/m}^3$
- Peso terreno di riempimento considerato in maniera cautelativa pari a: $G2 = 1800 \text{ kg/m}^3$

Il modello riportato in Figura 15 è suddiviso in tre solidi di cui il primo è un cilindro (1) con un diametro di 25,50 m e un'altezza di 1,80 m, il secondo (2) è un tronco di cono con diametro di base pari a 25,50 m, diametro superiore di 5,50m ed altezza pari a 0,75 m; il terzo corpo (3) è un cilindro con un diametro di 5,50m 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.

12 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.

12.1 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**
 $\gamma G1 \cdot G1 + \gamma G2 \cdot G2 + \gamma P \cdot P + \gamma Q1 \cdot Qk1 + \gamma Q2 \cdot \psi 02 \cdot Qk2 + \gamma Q3 \cdot \psi 03 \cdot Qk3 + \dots$
- **Combinazione caratteristica (rara) SLE**
 $G1 + G2 + P + Qk1 + \psi 02 \cdot Qk2 + \psi 03 \cdot Qk3 + \dots$
- **Combinazione frequente SLE**
 $G1 + G2 + P + \psi 11 \cdot Qk1 + \psi 22 \cdot Qk2 + \psi 23 \cdot Qk3 + \dots$
- **Combinazione quasi permanente SLE**
 $G1 + G2 + P + \psi 21 \cdot Qk1 + \psi 22 \cdot Qk2 + \psi 23 \cdot Qk3 + \dots$
- **Combinazione sismica**, impiegata per gli stati limite ultimi e di esercizio connessi all'azione sismica E
 $E + G1 + G2 + P + \psi 21 \cdot Qk1 + \psi 22 \cdot Qk2 + \dots$

Aren Electric Power Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDS_F00R00100_00
		Data: 08/06/2022
	Relazione sulle Strutture	Revisione: 00
		Pagina: 24 di 41

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 $\leq 30\text{kN}$)	0,70	0,70	0,60
Categoria G Rimesse e parcheggi (autoveicoli $> 30\text{kN}$)	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 30: Valori dei coefficienti di combinazione

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	EQU	A1	A2
		γ_f			
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 31: Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni nelle verifiche SLU

12.2 Coefficienti adottati

Per quanto riguarda le azioni esterne fornite dal produttore Vestas, si considerano il momento flettente ($(M_{Res} = M_X; M_Y)$), momento torcente (M_Z) ed il taglio ($(F_{Res} = F_X; F_Y)$) come azioni dovute a carichi variabili (vento). L'azione verticale F_z , dovuta principalmente al peso proprio dell'aerogeneratore, si considera come carico permanente.

Ne consegue l'attribuzione dei coefficienti parziali delle azioni e, per i carichi variabili, dei coefficienti di combinazione.

Le verifiche allo SLU di tipo geotecnico (GEO) delle fondazioni vengono eseguite, in ottemperanza alle prescrizioni contenute nel par. 6.4.3.1 delle N.T.C. 17/01/2018, secondo la Combinazione (A1+M1+R3) dell'Approccio 2, tenendo conto dei coefficienti parziali come di seguito riportati:

Aren Electric Power Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDS_F00R00100_00
		Data: 08/06/2022
	Relazione sulle Strutture	Revisione: 00
		Pagina: 25 di 41

- Coefficienti parziali per azioni:

$$G_1 = 1,3 \text{ sfavorevole}$$

$$G_2 = 0,0 \text{ favorevole (carico del terreno di riempimento}=0 \text{ quando favorevole)}$$

$$G_2^{(1)} = 1,3 \text{ sfavorevole}$$

$$Q = 1,5 \text{ sfavorevole}$$

⁽¹⁾ Nel caso in cui l'intensità dei carichi permanenti non strutturali o di una parte di essi (ad es. canchi permanenti portati) sia ben definita in fase di progetto, per detti canchi o per la parte di essi nota si potranno adottare gli stessi coefficienti parziali validi per le azioni permanenti.

- Coefficienti di riduzione per materiali:

$$\gamma_c = 1,5 \text{ coefficiente riduttivo per calcestruzzo}$$

- Coefficienti di combinazione delle azioni variabili adottati

Azione per carico accidentale mezzi di manutenzione:

Destinazione d'uso/azione	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Vento	0,60	0,20	0,00

Tabella 32: Valori dei coefficienti di combinazione

Si riportano di seguito i coefficienti parziali adottati in maniera più dettagliata per quanto riguarda i carichi degli elementi in elevazione:

		Mx; My	Mz	Fx;Fy	Fz
Coeff. Parziali delle azioni	γ_G	-	-	-	1.3
	γ_Q	1.5	1.5	1.5	-
Coeff. di combinazione	ψ_0	0.6	0.6	0.6	-
	ψ_1	0.2	0.2	0.2	-
	ψ_2	0	0	0	-

Tabella 33: Coefficienti parziali per le azioni degli elementi in elevazione

Nella Tabella 34 vengono riportate le differenti combinazioni considerate allo stato limite ultimo SLU:

Fattori di Combinazione delle azioni				
SLU	1.5	1.5	1.5	1.3
SLE r	1	1	1	1
SLE f	0.6	0.6	0.6	1
SLE p	0.2	0.2	0.2	1

Tabella 34: Fattori di combinazione delle azioni allo SLU

Aren Electric Power Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDS_F00R00100_00
		Data: 08/06/2022
	Relazione sulle Strutture	Revisione: 00
		Pagina: 26 di 41

Sulla base dei valori forniti dalla Vestas riportati nella Tabella 29, si ottengono le seguenti combinazioni per vento estremo:

	Combinazioni Vento estremo			
	M_{Res}	M_Z	F_{Res}	F_Z
	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]
BASE	108300	-11170	1034	-5725
SLU	162450	-16755	1551	-7443
SLE r	108300	-11170	1034	-5725
SLE f	64980	-6702	620	-5725
SLE p	21660	-2234	207	-5725

Tabella 35: Combinazioni Vento estremo

Le combinazioni in condizioni sismiche non variano rispetto a quanto riportato nel paragrafo precedente.

12.3 Modellazione 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 topologia. Le tabelle riportano infatti i seguenti dati in relazione alla tipologia:

1	Carico concentrato nodale 6 dati (forza F _x , F _y , F _z , momento M _x , M _y , M _z)
2	Spostamento nodale impresso 6 dati (spostamento T _x , T _y , T _z , rotazione R _x , R _y , R _z)
3	Carico distribuito globale su elemento tipo trave 7 dati (f _x , f _y , f _z , m _x , m _y , m _z , ascissa di inizio carico) 7 dati (f _x , f _y , f _z , m _x , m _y , m _z , ascissa di fine carico)
4	Carico distribuito locale su elemento tipo trave 7 dati (f ₁ , f ₂ , f ₃ , m ₁ , m ₂ , m ₃ , ascissa di inizio carico) 7 dati (f ₁ , f ₂ , f ₃ , m ₁ , m ₂ , m ₃ , ascissa di fine carico)
5	Carico concentrato globale su elemento tipo trave 7 dati (F _x , F _y , F _z , M _x , M _y , M _z , ascissa di carico)
6	Carico concentrato locale su elemento tipo trave 7 dati (F ₁ , F ₂ , F ₃ , M ₁ , M ₂ , M ₃ , ascissa di carico)
7	Variazione termica applicata ad elemento tipo trave 7 dati (variazioni termiche: uniforme, media e differenza in altezza e larghezza al nodo iniziale e finale)
8	Carico di pressione uniforme su elemento tipo piastra 1 dato (pressione)
9	Carico di pressione variabile su elemento tipo piastra 4 dati (pressione, quota, pressione, quota)
10	Variazione termica applicata ad elemento tipo piastra 2 dati (variazioni termiche: media e differenza nello spessore)
11	Carico variabile generale su elementi tipo trave e piastra 1 dato descrizione della tipologia 4 dati per segmento (posizione, valore, posizione, valore) la tipologia precisa l'ascissa di definizione, la direzione del carico, la modalità di carico e la larghezza d'influenza per gli elementi tipo trave
12	Gruppo di carichi con impronta su piastra 9 dati (numero di ripetizioni in direzione X e Y, valore di ciascun carico, posizione centrale del primo, dimensioni dell'impronta, interasse tra i carichi)

Tabella 36: Tipologia di carico applicato

Aren Electric Power Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDS_F00R00100_00
		Data: 08/06/2022
	Relazione sulle Strutture	Revisione: 00
		Pagina: 27 di 41

12.4 Schematizzazione dei casi di carico

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 37: 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;
- Valore di riferimento del caso di carico (se previsto).

In successione, per i casi di carico non automatici, viene riportato l'elenco di nodi ed elementi direttamente caricati con la sigla identificativa del carico.

Per i casi di carico di tipo sismico (9-Esk e 10-Edk), viene riportata la tabella di definizione delle masse; per ogni caso di carico partecipante alla definizione delle masse viene indicata la relativa aliquota (partecipazione) considerata. Si precisa che per il caso di carico 5-Qsk e 6-Qnk la partecipazione è prevista localmente per ogni elemento solaio o copertura presente nel modello e pertanto la loro partecipazione è di norma pari a uno.

CDC	Tipo	Sigla Id	Note
1	Ggk	CDC=Ggk (peso proprio della struttura)	
2	Gk	Peso proprio (Fz)	Azioni applicate:
3	Gk	Terreno	Azioni applicate:
			D3: da 2 a 5 Azione: Pressione terreno- QV: var R - Qz - Pres.
			D3: da 7 a 10 Azione: Pressione terreno- QV: var R - Qz - Pres.
			D3: da 12 a 15 Azione: Pressione terreno- QV: var R - Qz - Pres.
			D3: da 17 a 20 Azione: Pressione terreno- QV: var R - Qz - Pres.
			D3: da 22 a 25 Azione: Pressione terreno- QV: var R - Qz - Pres.
			D3: da 27 a 30 Azione: Pressione terreno- QV: var R - Qz - Pres.
			D3: da 32 a 35 Azione: Pressione terreno- QV: var R - Qz - Pres.
			D3: da 37 a 55 Azione: Pressione terreno- QV: var R - Qz - Pres.
			D3: da 57 a 70 Azione: Pressione terreno- QV: var R - Qz - Pres.
			D3: da 72 a 80 Azione: Pressione terreno- QV: var R - Qz - Pres.
			D3: da 82 a 85 Azione: Pressione terreno- QV: var R - Qz - Pres.
			D3: da 87 a 90 Azione: Pressione terreno- QV: var R - Qz - Pres.
			D3: da 92 a 95 Azione: Pressione terreno- QV: var R - Qz - Pres.
			D3: da 97 a 100 Azione: Pressione terreno- QV: var R - Qz - Pres.
			D3: da 102 a 105 Azione: Pressione terreno- QV: var R - Qz - Pres.

Aren Electric Power Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDS_F00R00100_00
		Data: 08/06/2022
	Relazione sulle Strutture	Revisione: 00
		Pagina: 28 di 41

CDC	Tipo	Sigla Id	Note
			D3: da 107 a 110 Azione: Pressione terreno- QV: var R - Qz - Pres.
			D3: da 112 a 115 Azione: Pressione terreno- QV: var R - Qz - Pres.
			D3: da 117 a 120 Azione: Pressione terreno- QV: var R - Qz - Pres.
			D3: da 122 a 130 Azione: Pressione terreno- QV: var R - Qz - Pres.
			D3: da 132 a 135 Azione: Pressione terreno- QV: var R - Qz - Pres.
			D3: da 137 a 140 Azione: Pressione terreno- QV: var R - Qz - Pres.
			D3: da 142 a 219 Azione: Pressione terreno- QV: var R - Qz - Pres.
			D3: da 221 a 230 Azione: Pressione terreno- QV: var R - Qz - Pres.
			D3: da 232 a 236 Azione: Pressione terreno- QV: var R - Qz - Pres.
			D3: da 239 a 249 Azione: Pressione terreno- QV: var R - Qz - Pres.
			D3: da 251 a 254 Azione: Pressione terreno- QV: var R - Qz - Pres.
			D3: da 257 a 260 Azione: Pressione terreno- QV: var R - Qz - Pres.
			D3: da 262 a 266 Azione: Pressione terreno- QV: var R - Qz - Pres.
			D3: da 268 a 296 Azione: Pressione terreno- QV: var R - Qz - Pres.
			D3: da 298 a 352 Azione: Pressione terreno- QV: var R - Qz - Pres.
4	Qk	CDC=Qk Azione Vento Fres	Azioni applicate:
5	Qk	CDC=Qk Azione Vento Mrs	Azioni applicate:
6	Qk	CDC=Qk Azione Vento Mz	Azioni applicate:
7	Etk	CDC=Etk (inc. sp. Terreno) SLO dir + alfa=0.0	Azioni applicate:
8	Etk	CDC=Etk (inc. sp. Terreno) SLD dir + alfa=0.0	Azioni applicate:
9	Etk	CDC=Etk (inc. sp. Terreno) SLV dir + alfa=0.0	Azioni applicate:
10	Etk	CDC=Etk (inc. sp. Terreno) SLC dir + alfa=0.0	Azioni applicate:

Tabella 38: Casi di carico agenti

12.5 Definizione delle combinazioni di carico

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

Combinazione	Tipo	Sigla Id
1	SLU	SLU 1
2	SLU	SLU 2
3	SLU	SLU 3
4	SLE(r)	SLE r 1
5	SLE(r)	SLE r 2
6	SLE(f)	SLE f 1
7	SLE(f)	SLE f 2
8	SLE(p)	SLE p 1
9	SLE(p)	SLE p 2
10	SLU	SLO 1
11	SLU	SLO 2
12	SLD(sis)	SLD 1
13	SLD(sis)	SLD 2
14	SLU	SLV 1
15	SLU	SLV 2
16	SLU	SLC 1
17	SLU	SLC 2

Tabella 39: Combinazioni di carico agli stati limite

Aren Electric Power Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDS_F00R00100_00
		Data: 08/06/2022
	Relazione sulle Strutture	Revisione: 00
		Pagina: 29 di 41

Cmb	CDC1/15...	CDC2/16...	CDC3/17...	CDC4/18...	CDC5/19...	CDC6/20...	CDC7/21...	CDC8/22...	CDC9/23...	CDC10/24...
1	1.30	1.30	0.0	1.50	1.50	1.50	0.0	0.0	0.0	0.0
2	1.30	1.30	1.00	1.50	1.50	1.50	0.0	0.0	0.0	0.0
3	1.30	1.30	1.30	1.50	1.50	1.50	0.0	0.0	0.0	0.0
4	1.00	1.00	0.0	1.00	1.00	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0
5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0
6	1.00	1.00	0.0	0.60	0.60	0.60	0.0	0.0	0.0	0.0
7	1.00	1.00	1.00	0.60	0.60	0.60	0.0	0.0	0.0	0.0
8	1.00	1.00	0.0	0.20	0.20	0.20	0.0	0.0	0.0	0.0
9	1.00	1.00	1.00	0.20	0.20	0.20	0.0	0.0	0.0	0.0
10	1.00	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	1.00	0.0	0.0	0.0
11	1.00	1.00	1.00	0.0	0.0	0.0	1.00	0.0	0.0	0.0
12	1.00	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.00	0.0	0.0
13	1.00	1.00	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	1.00	0.0	0.0
14	1.00	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.00	0.0
15	1.00	1.00	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.00	0.0
16	1.00	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.00
17	1.00	1.00	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.00

Tabella 40: Coefficienti delle combinazioni di carico

13 Metodo di analisi

È stata eseguita un'analisi di tipo statico lineare. Le azioni dinamiche, coerentemente con quanto illustrato nei paragrafi precedenti, vengono rappresentate da azioni statiche equivalenti.

14 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.

Aren Electric Power Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDS_F00R00100_00
		Data: 08/06/2022
	Relazione sulle Strutture	Revisione: 00
		Pagina: 30 di 41

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:

$$C_d \geq E_d$$

15 Risultati di calcolo

Nelle sezioni seguenti vengono riportati i risultati ritenuti principali al design dell'elemento di fondazione.

15.1 Deformate

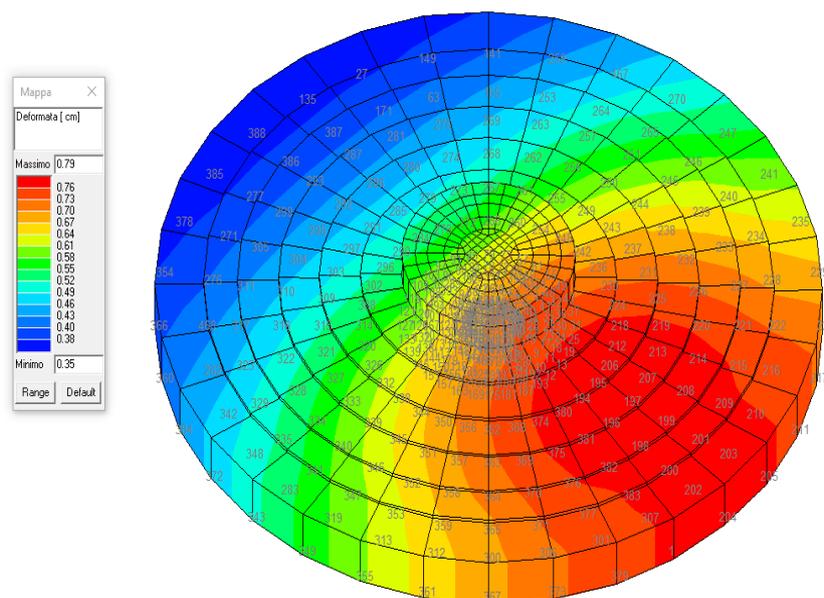


Figura 16: Deformata per Combinazione SLU 3

Aren Electric Power Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDS_F00R00100_00
	Relazione sulle Strutture	Data: 08/06/2022
		Revisione: 00
		Pagina: 31 di 41

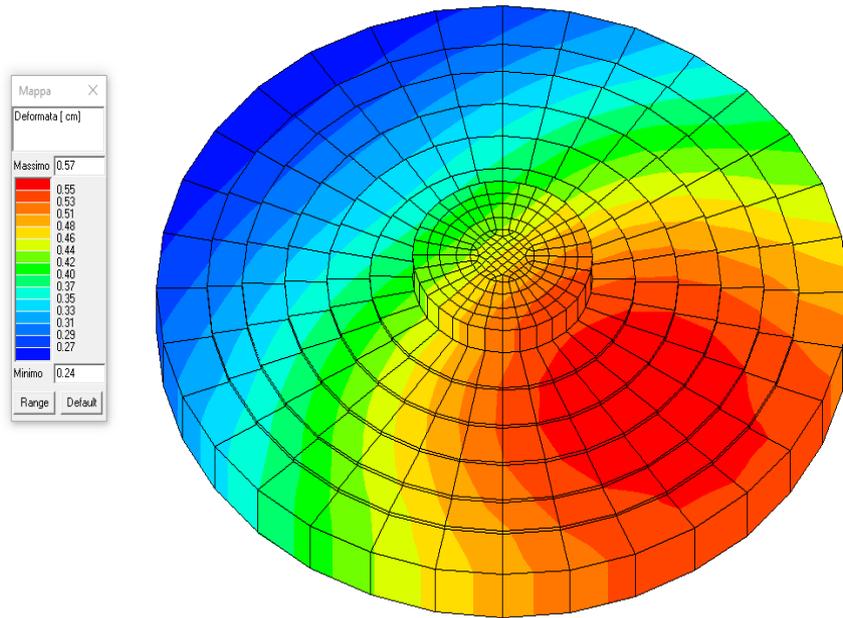


Figura 17: Deformata massima Combinazione SLE

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

15.2 Tensioni

Tensioni totali secondo Von Mises.

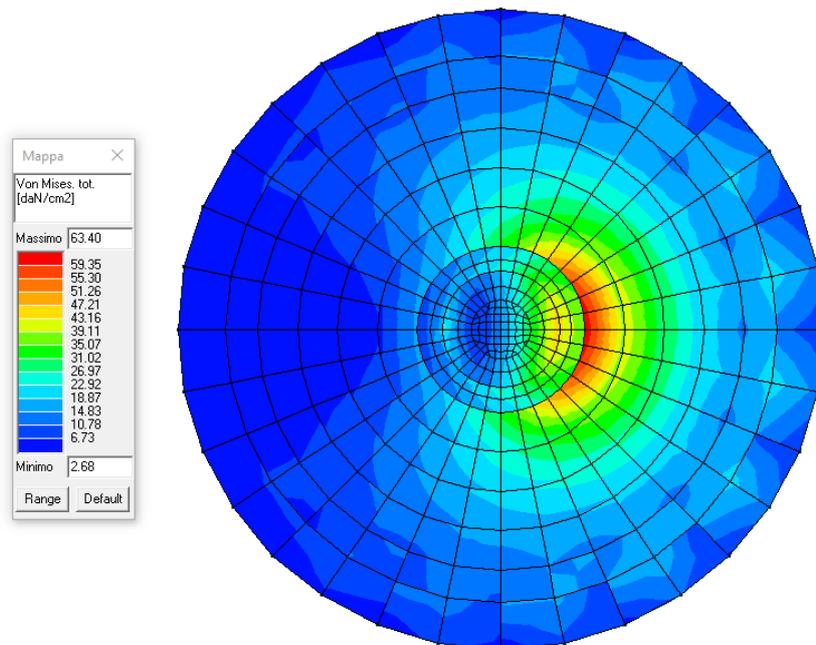


Figura 18: Tensioni totali Combinazione SLU 3

Aren Electric Power Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDS_F00R00100_00
	Relazione sulle Strutture	Data: 08/06/2022
		Revisione: 00
		Pagina: 32 di 41

15.3 Azioni sui pali

Massime azioni agenti sui vincoli allo stato limite ultimo SLU.

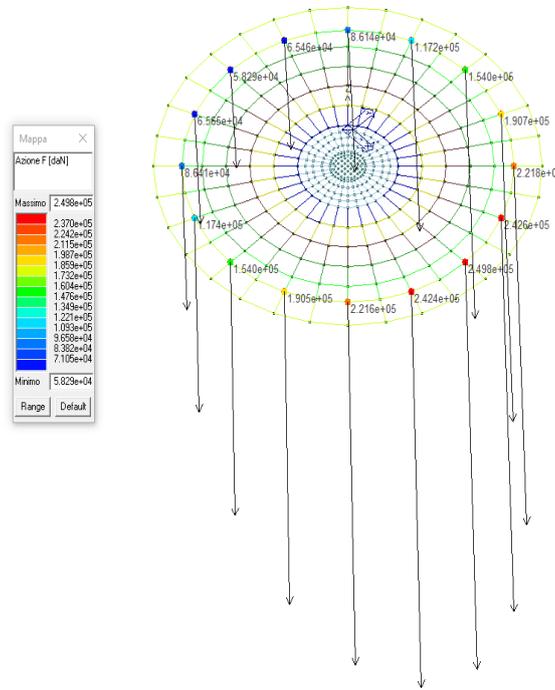


Figura 19: Azioni F massime sui vincoli, Combinazione SLU 3

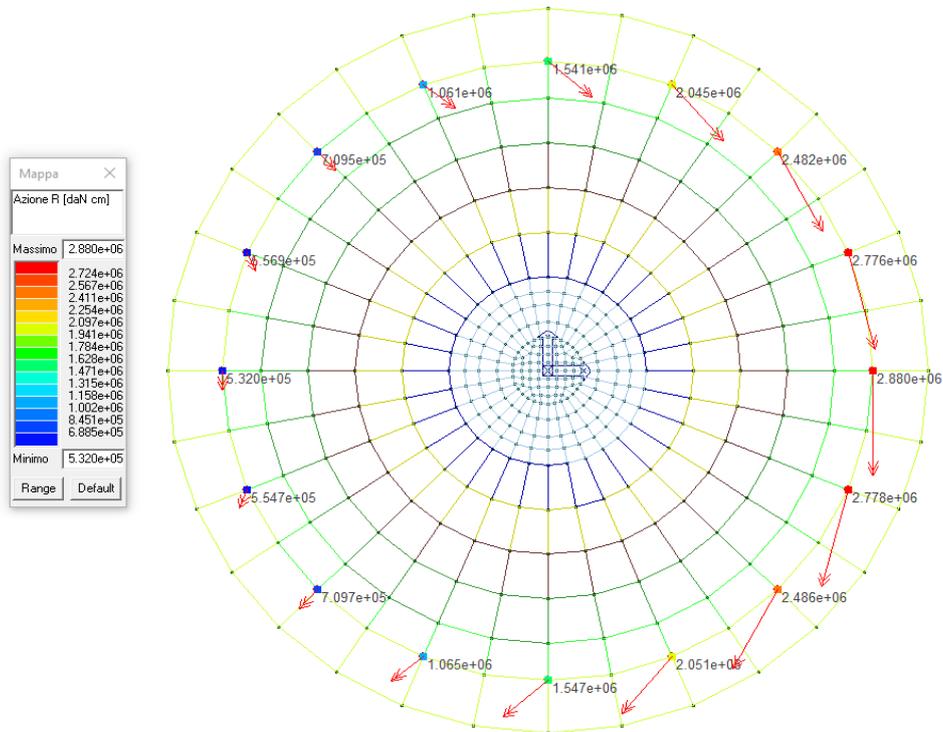


Figura 20: Azioni R massime sui vincoli, Combinazione SLU 3

Aren Electric Power Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDS_F00R00100_00
		Data: 08/06/2022
	Relazione sulle Strutture	Revisione: 00
		Pagina: 33 di 41

16 Armature minime di progetto

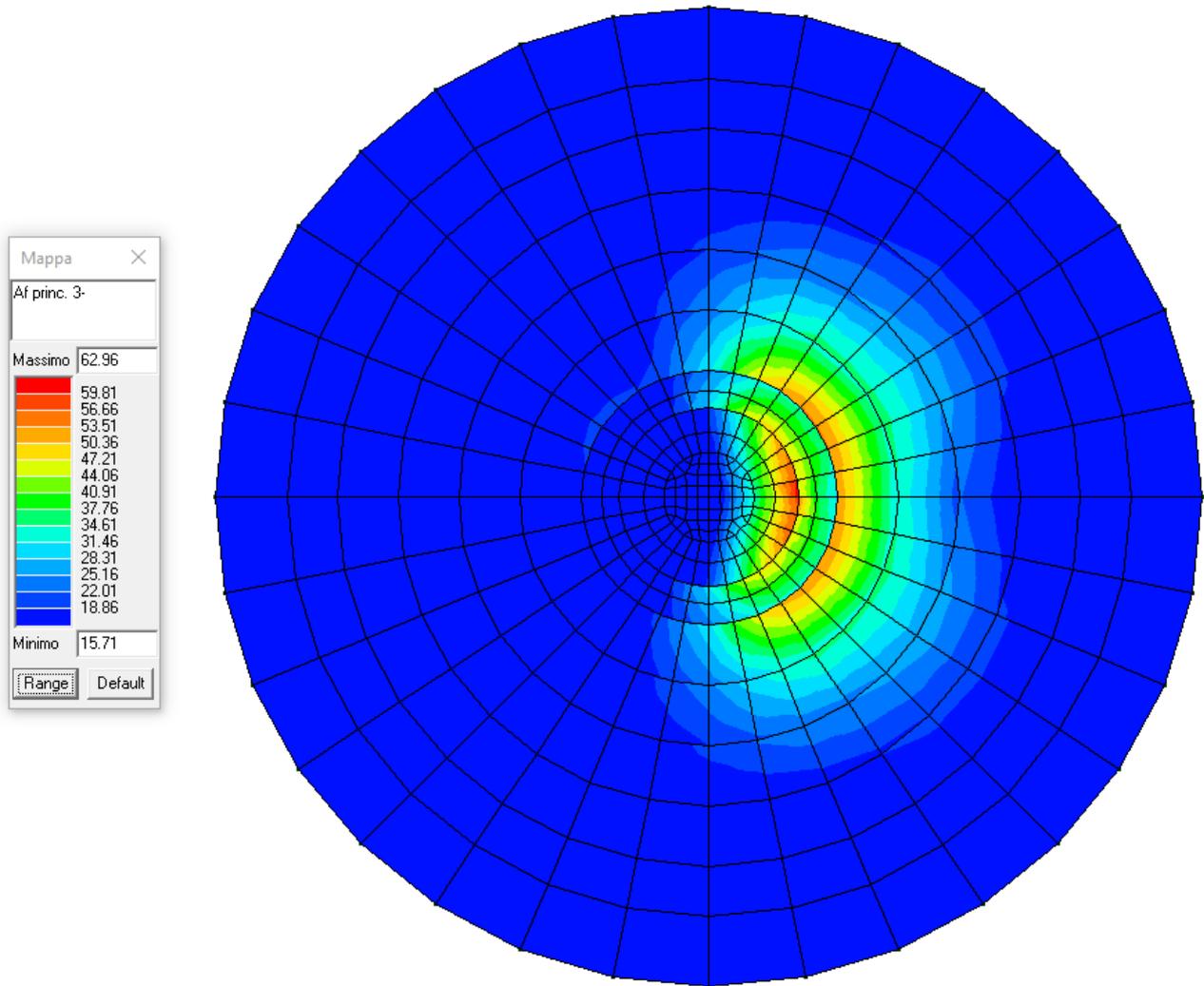


Figura 21: Armatura principale su plinto lato inferiore. Valori in cm^2 per metro lineare

Aren Electric Power Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDS_F00R00100_00
		Data: 08/06/2022
	Relazione sulle Strutture	Revisione: 00
		Pagina: 34 di 41

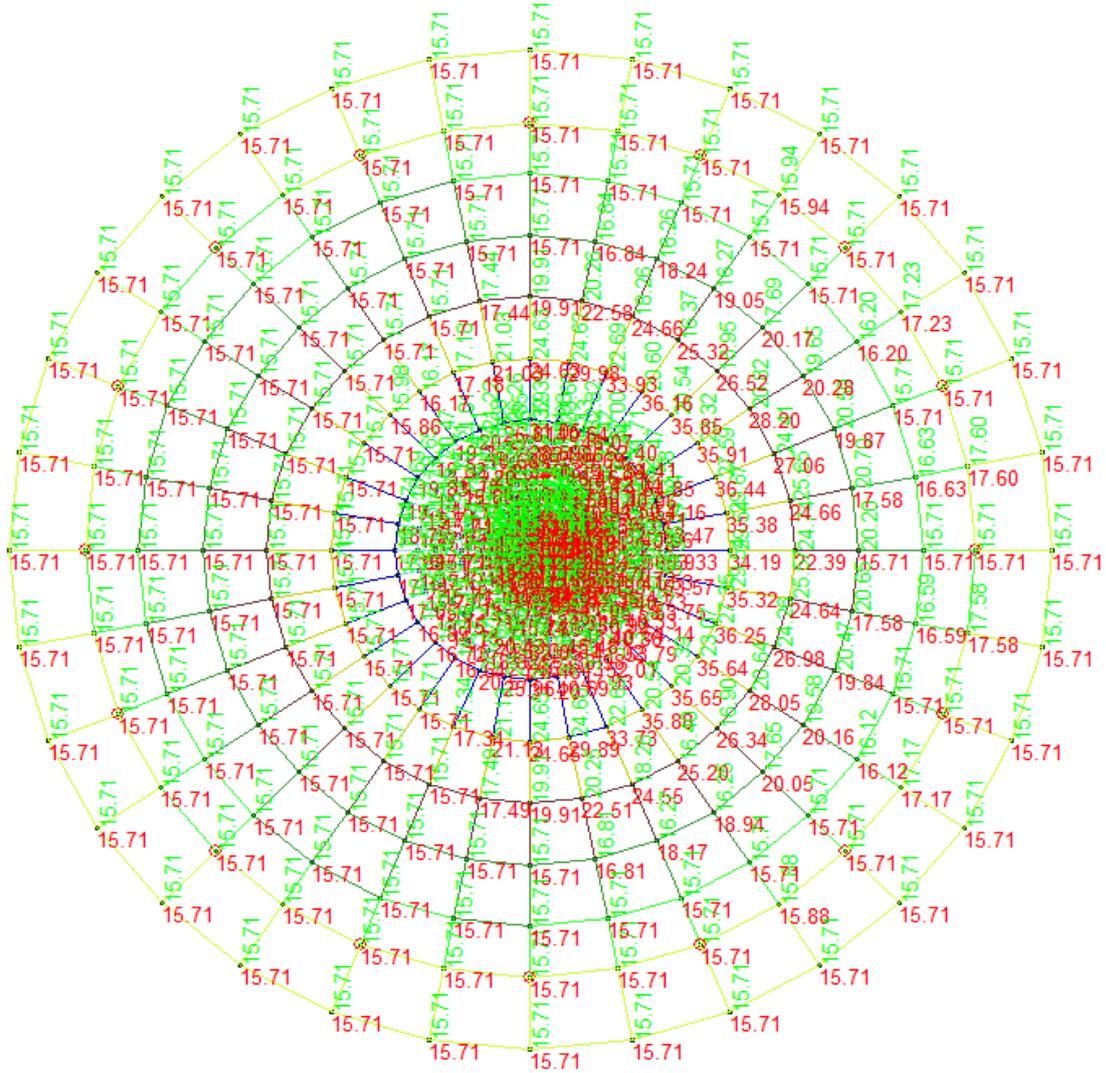


Figura 22: Dettaglio armatura su lato inferiore. In rosso armatura principale, in verde armatura secondaria. Valori in cm^2 per metro lineare

Aren Electric Power Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDS_F00R00100_00
	Relazione sulle Strutture	Data: 08/06/2022
		Revisione: 00
		Pagina: 35 di 41

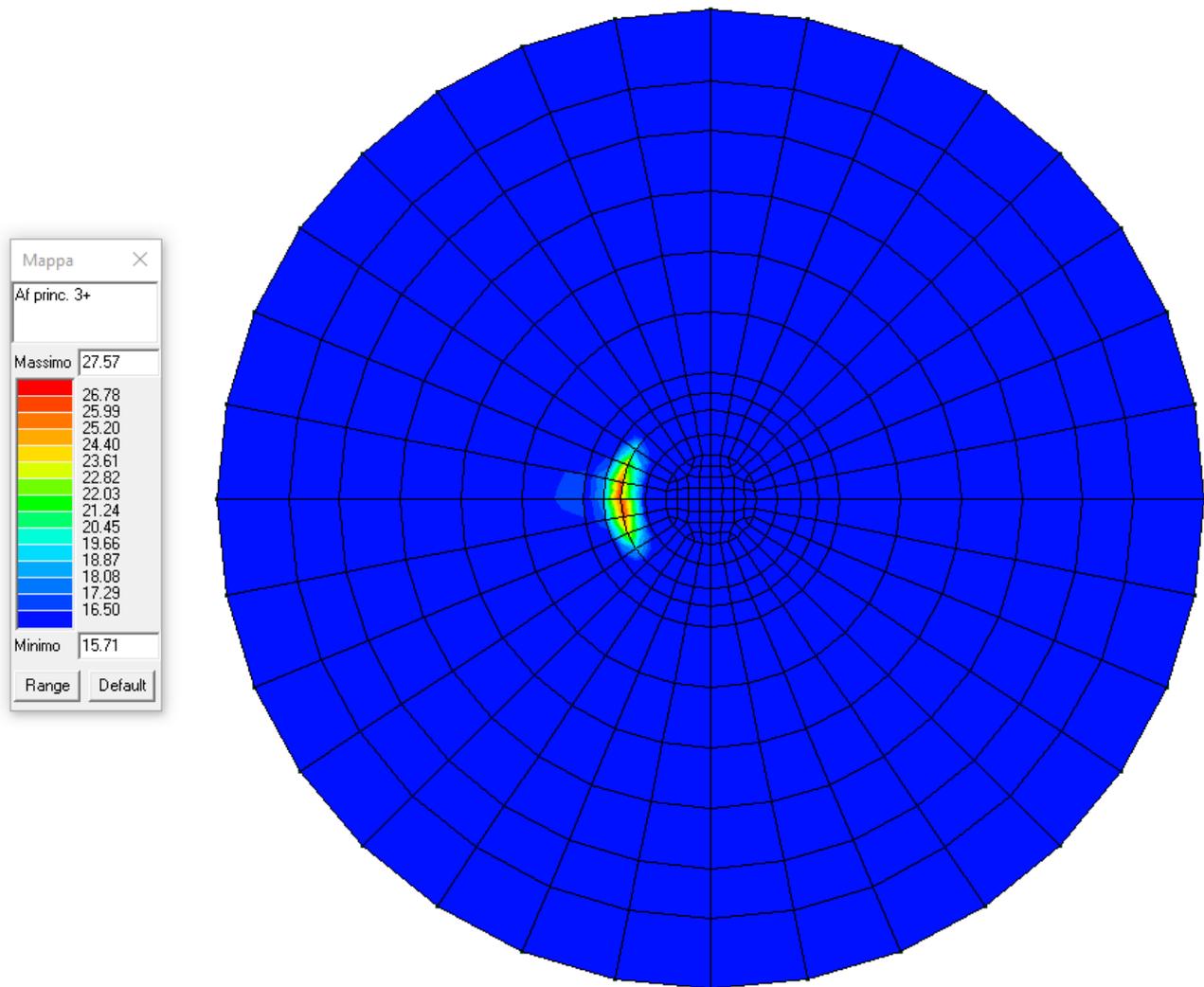


Figura 23: Armatura su plinto lato superiore. Valori in cm² per metro lineare

Aren Electric Power Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDS_F00R00100_00
	Relazione sulle Strutture	Data: 08/06/2022
		Revisione: 00
		Pagina: 36 di 41

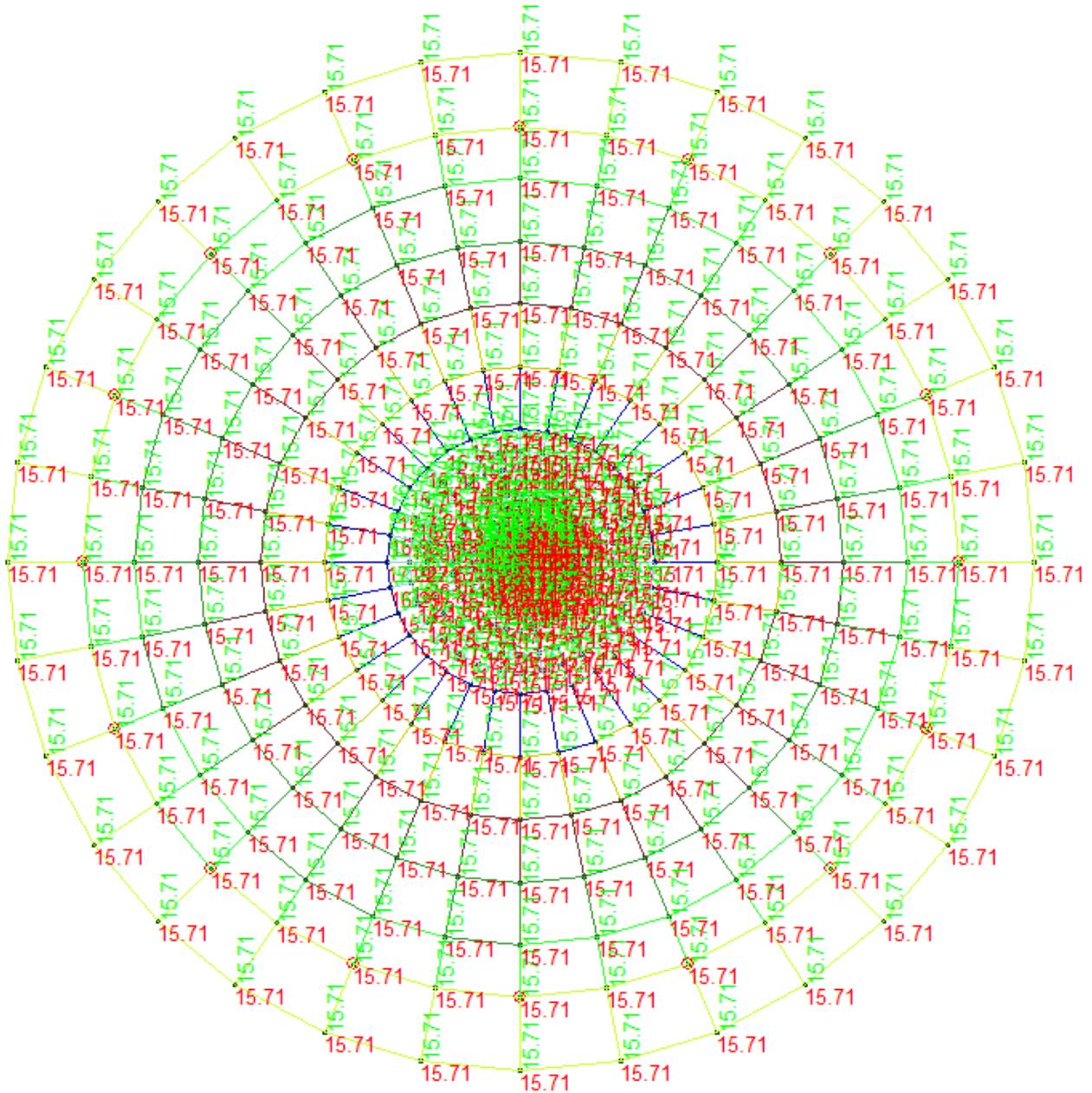


Figura 24: Dettaglio armatura su lato superiore. In rosso armatura principale, in verde armatura secondaria. Valori in cm^2 per metro lineare

Aren Electric Power Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDS_F00R00100_00
	Relazione sulle Strutture	Data: 08/06/2022
		Revisione: 00
		Pagina: 37 di 41

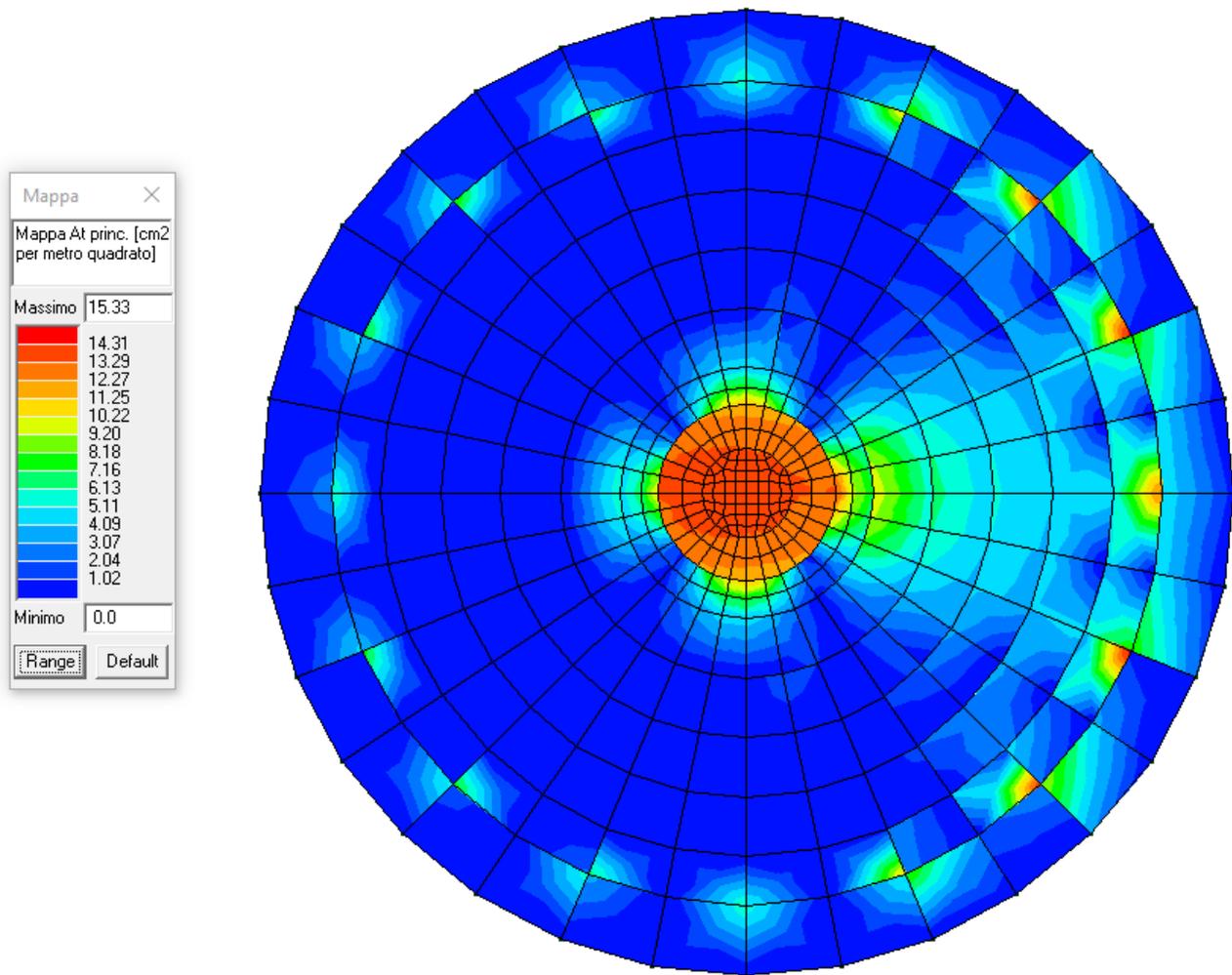


Figura 25: Armatura a taglio. Valori in cm² per metro quadro

Aren Electric Power Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDS_F00R00100_00
		Data: 08/06/2022
	Relazione sulle Strutture	Revisione: 00
		Pagina: 38 di 41

17 Sintesi delle verifiche di sicurezza

17.1 Verifiche SLU

In azzurro sono rappresentati gli elementi verificati.

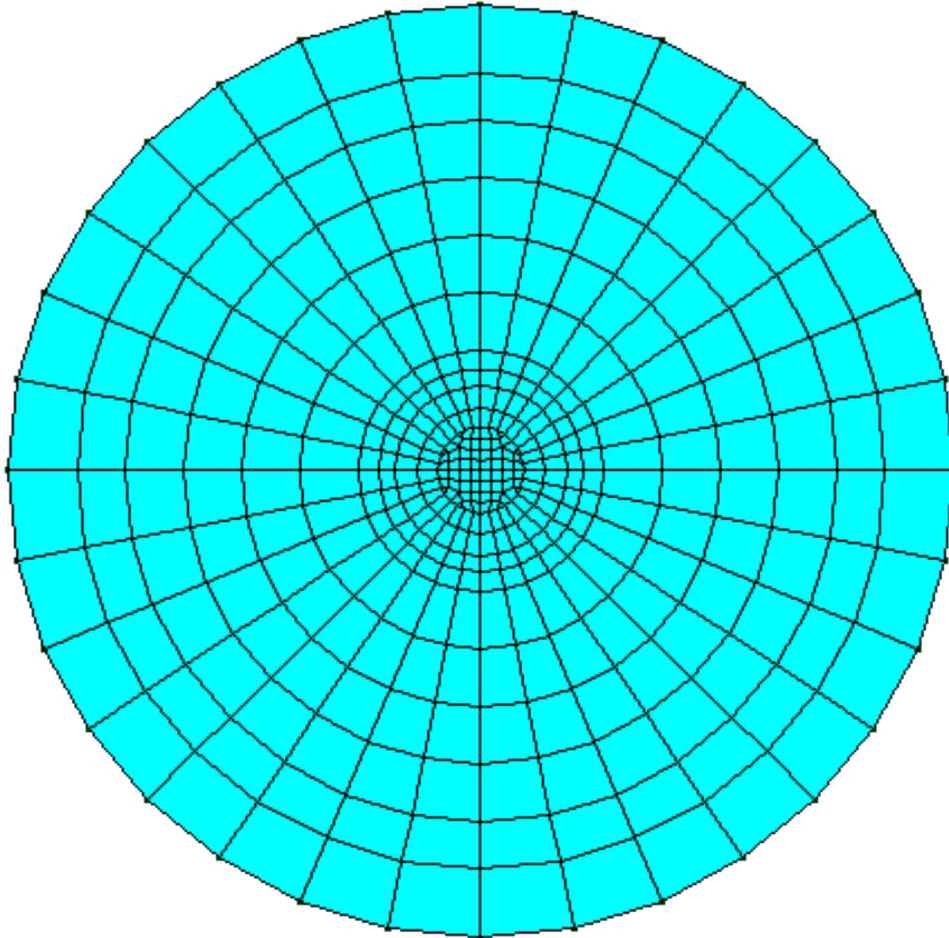


Figura 26: Verifica SLU. In azzurro gli elementi verificati

Aren Electric Power Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDS_F00R00100_00
	Relazione sulle Strutture	Data: 08/06/2022
		Revisione: 00
		Pagina: 39 di 41

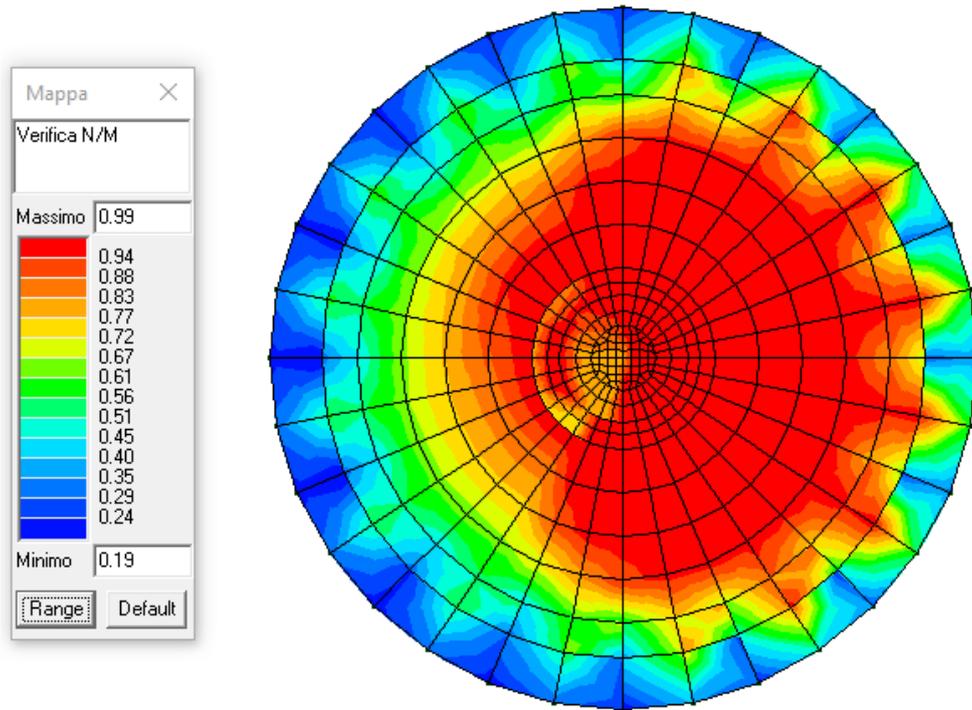


Figura 27: Verifica a pressoflessione N-MSLU (Verificato per valori <1)

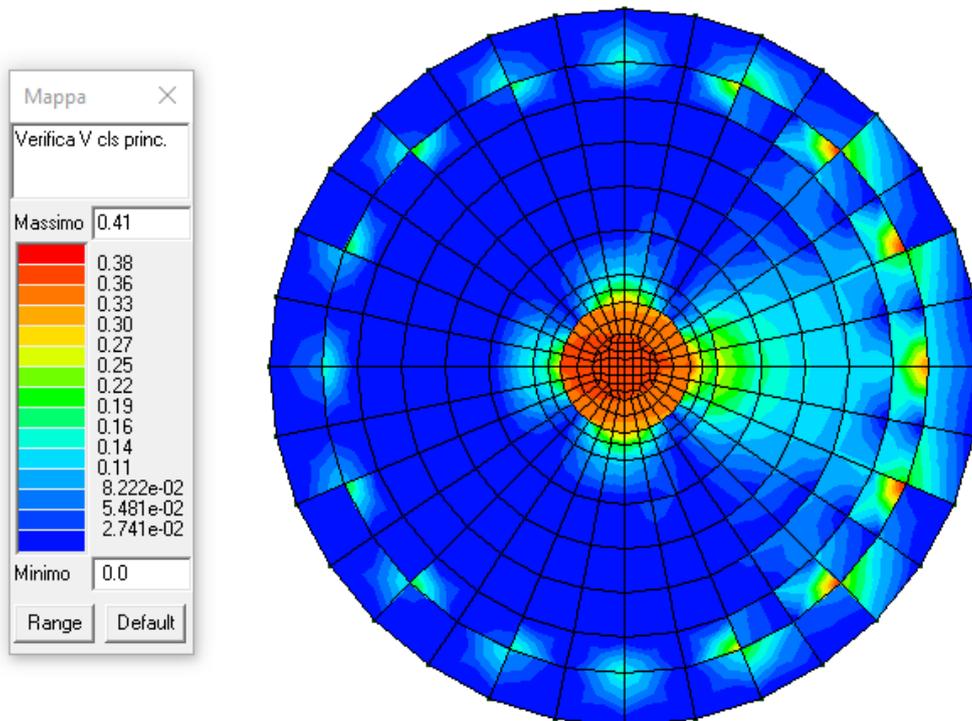


Figura 28: Verifica V CLS principale (verifica per valori <1)

Aren Electric Power Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDS_F00R00100_00
		Data: 08/06/2022
	Relazione sulle Strutture	Revisione: 00
		Pagina: 40 di 41

17.2 Verifiche SLE

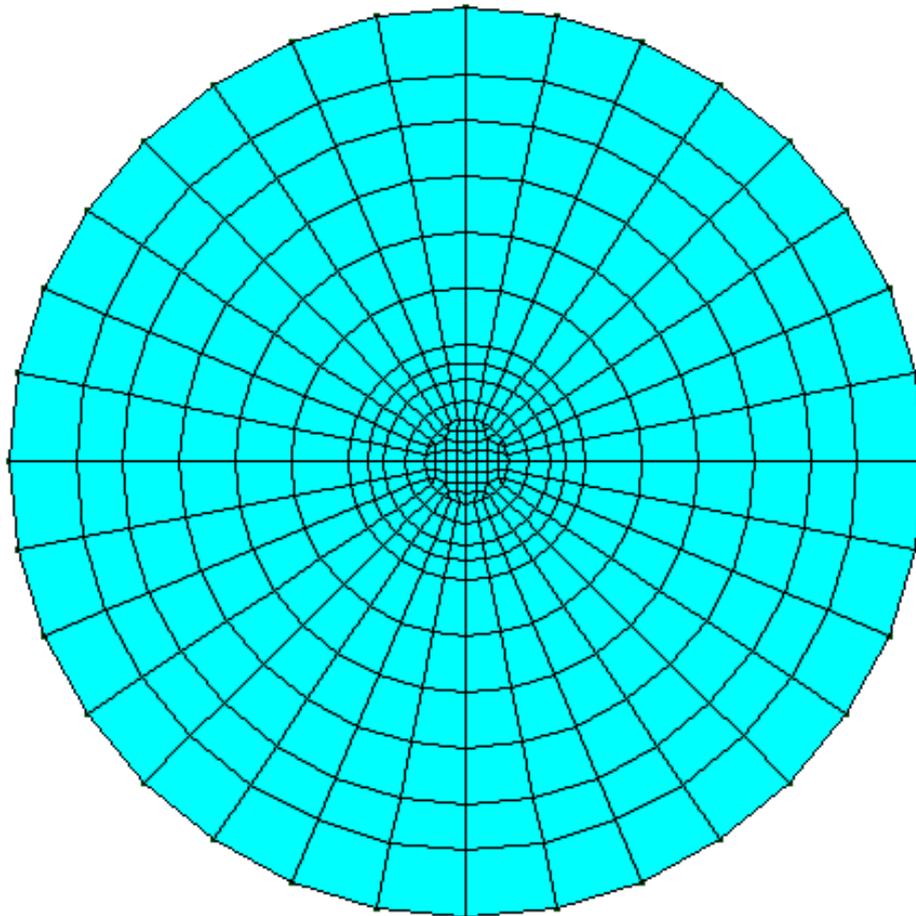


Figura 29: Verifica SLE. In azzurro gli elementi verificati

Aren Electric Power Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDS_F00R00100_00
	Relazione sulle Strutture	Data: 08/06/2022
		Revisione: 00
		Pagina: 41 di 41

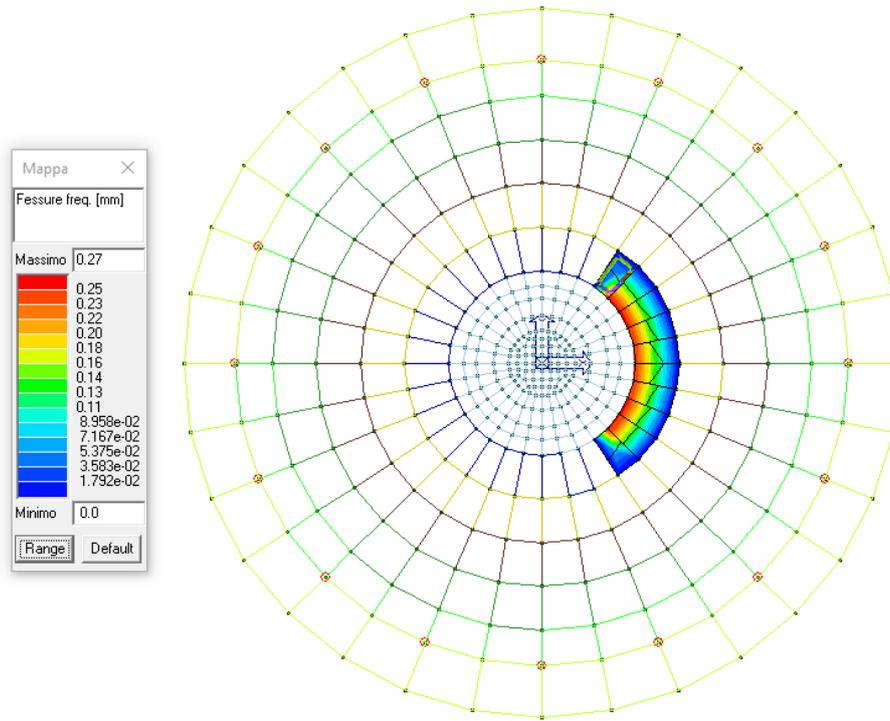


Figura 30: Fessure SLE frequenti. Ampiezza fessure <0,3 mm - Verifica soddisfatta

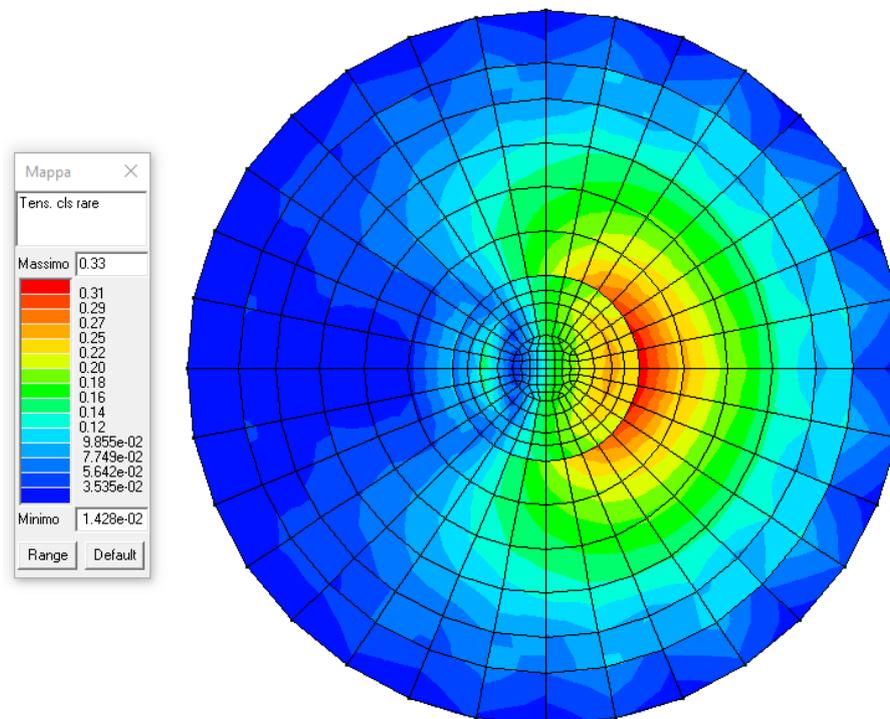


Figura 31: Tensioni CLS SLE rare (verificato per valori <1)