

# Impianto eolico “Monte Pranu”

## Progetto definitivo

Oggetto:

**Relazione di calcolo preliminare delle fondazioni degli aerogeneratori**

Proponente:



**Sardeolica Srl**  
Sesta Strada Ovest  
09068 Uta; ZI Macchiareddu  
Italy

Progettista:



**Stantec S.p.A.**  
Centro Direzionale Milano 2, Palazzo Canova  
Segrate (Milano)

Rev. N.	Data	Descrizione modifiche	Redatto da	Rivisto da	Approvato da
01	28/10/2023	Integrati commenti	A. Filiberti	D. Mansi	P. Polinelli
00	04/08/2023	Prima Emissione	A. Filiberti	A. Piazza	P. Polinelli
Fase progetto: <b>Definitivo</b>			Formato elaborato: <b>A4</b>		

Nome File: **VIL.003.01** - Relazione di calcolo preliminare delle fondazioni degli aerogeneratori.docx

# Indice

<b>1</b>	<b>PREMESSA .....</b>	<b>5</b>
1.1	DESCRIZIONE DEL PROPONENTE .....	5
1.2	CONTENUTI DELLA RELAZIONE .....	6
<b>2</b>	<b>INQUADRAMENTO TERRITORIALE .....</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>NORMATIVA DI RIFERIMENTO E FONTI CONSULTATE .....</b>	<b>9</b>
<b>4</b>	<b>DIMENSIONAMENTO FONDAZIONI AEROGENERATORI .....</b>	<b>10</b>
4.1	DESCRIZIONE DELLE OPERE .....	10
4.2	PARAMETRI GEOTECNICI DI PROGETTO .....	11
4.3	CARICHI DI PROGETTO .....	12
4.3.1	Carichi permanenti .....	12
4.3.2	Sovraccarichi (Q) .....	12
4.3.3	Azione sismica (E) .....	14
4.4	MATERIALI .....	18
4.4.1	Calcestruzzo armato .....	18
4.4.2	Acciaio di armatura .....	19
4.5	SOFTWARE IMPIEGATO PER LE ANALISI FEM .....	20
4.5.1	Sistemi di riferimento .....	20
4.5.2	Elementi beam .....	20
4.5.3	Output delle azioni interne .....	21
4.5.4	Elementi plate .....	21
4.5.5	Gradi di libertà degli elementi e ECS .....	22
4.5.6	Output delle azioni interne .....	23
4.6	ANALISI STRUTTURALE .....	27
4.6.1	Analisi strutturale tramite modello FEM .....	27
4.6.2	Geometria del modello .....	27
4.6.3	Vincoli .....	29
4.6.4	Casi di carico .....	30
4.6.5	Combinazioni di carico .....	33
4.6.6	Giudizio motivato accettabilità dei risultati .....	35
4.7	RISULTATI DEL MODELLO FEM E VERIFICHE .....	38
4.7.1	Direzioni fissate per gli assi locali degli elementi .....	38

4.7.2 Azioni assiali sui pali .....	40
4.7.3 Azioni sul basamento .....	42
4.7.4 Verifica degli elementi strutturali .....	53
4.7.5 Verifica strutturale del palo .....	53
4.7.6 Verifica a flessione platea .....	57
4.7.7 Verifica a taglio platea .....	66
4.7.8 Verifica a punzonamento platea .....	69
4.7.9 Verifiche allo Stato Limite di Esercizio .....	70
4.7.10 Verifica rigidità del basamento .....	80
<b>5 CONCLUSIONI GENERALI .....</b>	<b>82</b>

# Indice delle figure

Figura 2-1: Inquadramento territoriale dell'impianto eolico Monte Pranu .....	7
Figura 2-2: Inquadramento su ortofoto dell'area dell'impianto eolico Monte Pranu .....	8
Figura 4-1: Sezione opere in progetto.....	10
Figura 4-2: Definizione degli elementi beam e rispettivi ECS .....	21
Figura 4-3: Definizione degli elementi plate e rispettivi ECS.....	23
Figura 4-4: Convenzione dei segni per le forze nodali degli elementi plate .....	24
Figura 4-5: Convenzione dei segni per l'output delle forze per unità di lunghezza.....	24
Figura 4-6: Convenzione dei segni per le azioni flessionali fuori dal piano .....	25
Figura 4-7: Convenzione dei segni per le tensioni agenti .....	25
Figura 4-8: Determinazione delle principali componenti di tensione .....	26
Figura 4-9: Nodo per l'applicazione dei carichi provenienti dalla torre.....	28
Figura 4-10: Modello FEM, vista prospettica .....	28
Figura 4-11: Modelli FEM, vista dall'alto .....	29
Figura 4-12: Caso di carico G2_terreno.....	30
Figura 4-13: Caso di carico G2_WGT .....	30
Figura 4-14: Caso di carico W_Characteristic .....	31
Figura 4-15: Caso di carico W_QP.....	31
Figura 4-16: Caso di carico W_Extreme .....	31
Figura 4-17: Caso di carico W_frequent .....	32
Figura 4-18: Caso di carico E .....	32
Figura 4-19: Reazioni verticali su modello FEM .....	35
Figura 4-20: Reazioni verticali foglio di calcolo Excel .....	37
Figura 4-21: Assi di riferimento locali su elementi plate .....	38
Figura 4-22: Assi di riferimento delle armature .....	39
Figura 4-23: Reazioni verticali massime riportate alla punta del palo.....	40
Figura 4-24: SLUenv: Momento direzione radiale, Bottom .....	42
Figura 4-25: SLUenv: Momento direzione circonferenziale, Bottom .....	43
Figura 4-26: SLUenv: Momento direzione radiale, Top.....	43
Figura 4-27: SLUenv: Momento direzione Circonferenziale, Top.....	44

Figura 4-28: SLUenv: Taglio Vxx .....	44
Figura 4-29: SLUenv: Taglio Vyy .....	45
Figura 4-30: SLV2: Momento direzione radiale, Bottom .....	46
Figura 4-31: SLV2: Momento direzione circonferenziale, Bottom .....	46
Figura 4-32: SLV2: Momento direzione radiale, Top .....	47
Figura 4-33: SLV2: Momento direzione circonferenziale, Top .....	47
Figura 4-34: SLV2: Taglio Vxx .....	48
Figura 4-35: SLV2: Taglio Vyy .....	48
Figura 4-36: SLer: Momento direzione radiale, Bottom .....	49
Figura 4-37: SLer: Momento direzione circonferenziale, Bottom .....	49
Figura 4-38: SLer: Momento direzione radiale, Top .....	50
Figura 4-39: SLer: Momento direzione circonferenziale, Top .....	50
Figura 4-40: SLEqp: Momento direzione radiale, Bottom .....	51
Figura 4-41: SLEqp: Momento direzione circonferenziale, Bottom .....	51
Figura 4-42: SLEqp: Momento direzione radiale, Top .....	52
Figura 4-43: SLEqp: Momento direzione circonferenziale, Top .....	52
Figura 4-44: Sezione rettangolare equivalente .....	54
Figura 4-45: Identificazione nodi .....	80

# 1 PREMESSA

La società Sardeolica S.r.l., d'ora in avanti il proponente, intende realizzare un impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica nella provincia del Sud Sardegna, in agro del comune di Villaperuccio.

L'impianto in questione comprende 10 aerogeneratori, tutti situati nel comune di Villaperuccio. Ogni aerogeneratore è caratterizzato da un'altezza all'hub di 119 m ed un diametro fino a 162 m, arrivando a raggiungere un'altezza massima pari a 200 m. Gli aerogeneratori hanno potenza unitaria fino a 7,2 MW, per 72 MW di potenza totale. L'impianto verrà connesso alla RTN a 150 KV mediante cavidotto a 36 kV, il punto di connessione è ubicato lungo la linea RTN esistente S. Giovanni Suergiu - Villaperuccio.

I progetti del tipo in esame rispondono a finalità di interesse pubblico (riduzione dei gas ad effetto serra, risparmio di fonti fossili scarse ed importate) ed in quanto tali sono indifferibili ed urgenti, come stabilito dalla legge 1° giugno 2002, n. 120, concernente "Ratifica ed esecuzione del Protocollo di Kyoto alla Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici, fatto a Kyoto l'11 dicembre 1997" e dal D.Lgs. 29 dicembre 2003, n.387 "Attuazione della direttiva 2001/77/CE relativa alla promozione dell'energia elettrica prodotta da fonti energetiche rinnovabili nel mercato interno dell'elettricità" e s.m.i..

L'utilizzo di fonti rinnovabili comporta infatti beneficio a livello ambientale, in termini di tonnellate equivalenti di petrolio (TEP) risparmiate e mancate emissioni di gas serra, polveri e inquinanti. Per il progetto in esame si stima una producibilità del parco eolico superiore a 145 GWh/anno (Produzione Media Annuale P50), che consente di risparmiare almeno 27.000 TEP/anno (fonte ARERA: 0,187 TEP/MWh) e di evitare almeno 57.700 ton/anno di emissioni di CO<sub>2</sub> (fonte ISPRA, 2022: 397,6 gCO<sub>2</sub>/kWh).

## 1.1 DESCRIZIONE DEL PROPONENTE

La Società che presenta il progetto è la Sardeolica S.r.l., con sede legale in VI strada Ovest, Z. I. Macchiareddu 09068 Uta (Cagliari) e sede amministrativa in Milano, c/o Saras S.p.A., Galleria Passarella 2, 20122 – Milano.

La Sardeolica S.r.l., costituita nel 2001, fa parte del Gruppo Saras ed ha come scopo la produzione di energia elettrica, lo studio e la ricerca sulle fonti di energia rinnovabili, la realizzazione e la gestione di impianti atti a sfruttare l'energia proveniente da fonti alternative.

È operativa dal 2005 con un Parco eolico composto da 57 aerogeneratori per una potenza totale installata di 128,4MW limitata a 126 MW, nei comuni di Ulassai e Perdasdefogu. La produzione a

regime è di circa 250 GWh/anno, corrispondenti al fabbisogno annuale di circa 85.000 famiglie e a 162.000 tonnellate di emissioni di CO<sub>2</sub> evitate all'anno.

A giugno 2021 è stata completata l'acquisizione del parco eolico di Macchiarèddu, battezzato "Amalteja", attraverso la formalizzazione dell'acquisto da parte di Sardegnaolica delle 2 società proprietarie, Energia Verde S.r.l. ed Energia Alternativa S.r.l. Il parco "Amalteja" ha una potenza complessiva di 45 MW ed è suddiviso nei due impianti di Energia Verde 21 MW (14 turbine) in esercizio dal 2008, e di Energia Alternativa da 24 MW (16 turbine) in esercizio dal 2012.

La produzione dei due parchi eolici è pari a circa 56 GWh/anno e consente di evitare emissioni di CO<sub>2</sub> per circa 36.000 ton/anno, provvedendo al fabbisogno elettrico annuo di circa 40.000 persone.

Sardegolica gestisce direttamente l'esercizio e la manutenzione dei Parchi eolici e assicura i massimi livelli produttivi di energia elettrica, adottando le migliori soluzioni del settore in cui opera, garantendo la salvaguardia della Salute e della Sicurezza sul Lavoro, dell'Ambiente, nonché della Qualità dei propri processi produttivi.

La società ha certificato il proprio Sistema di Gestione secondo gli standard ISO 45001 (Salute e Sicurezza sul Lavoro), ISO 14001 (Ambiente) e ISO 9001 (Qualità) e ISO 50001 (Energia). Inoltre è accreditata EMAS.

## **1.2 CONTENUTI DELLA RELAZIONE**

La presente relazione ha l'obiettivo di illustrare lo studio delle strutture necessarie a garantire i requisiti di sicurezza e di funzionalità dell'opera. In particolare, il presente elaborato contiene i calcoli di stabilità e resistenza del basamento di innesto della struttura metallica.

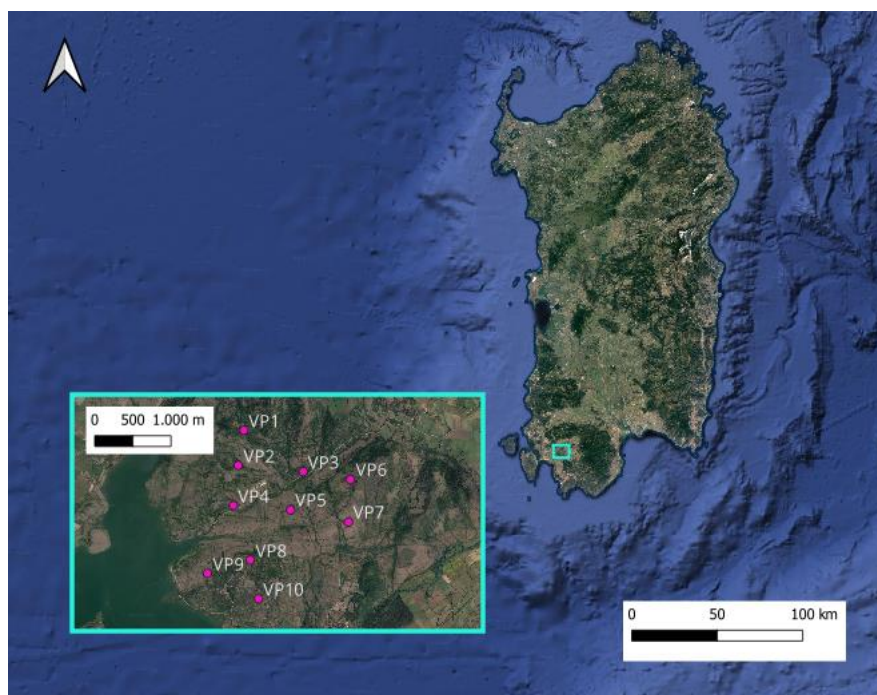
Nella valutazione dell'apparato fondale si è fatto riferimento allo studio preliminare geologico e geotecnico, le assunzioni fatte dovranno essere verificate ed aggiornate nella progettazione esecutiva.

Per i particolari costruttivi e maggiori dettagli dimensionali sulle strutture progettate si faccia riferimento agli elaborati grafici oggetto del presente progetto ("VIL.025 - Pianta e sezioni fondazione delle WTG (tipologico)").

## 2 INQUADRAMENTO TERRITORIALE

Il sito in cui sarà ubicato il parco eolico di nuova costruzione è collocato nel comune di Villaperuccio, nella provincia del Sud Sardegna, in Sardegna.

L'impianto eolico denominato "Monte Pranu" è localizzato a circa 45 km dal capoluogo, a circa 4 km dal centro urbano del comune di Villaperuccio, ed a circa 4 km in direzione ovest e sud rispettivamente dai centri abitati dei comuni di Tratalias e Giba.



**Figura 2-1: Inquadramento territoriale dell'impianto eolico Monte Pranu**

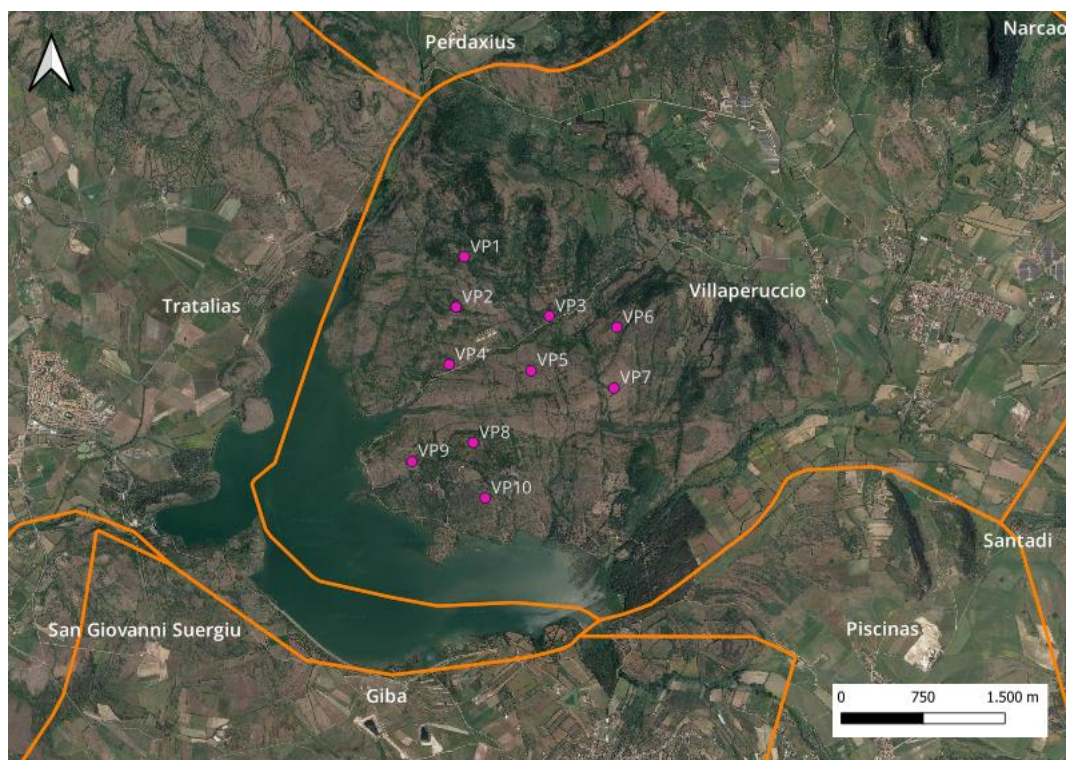
L'impianto eolico denominato "Monte Pranu" è situato in una zona prevalentemente collinare non boschiva caratterizzata da un'altitudine media pari a circa 100 m s.l.m., con sporadiche formazioni di arbusti e la presenza di terreni seminativi/incolti.

Il parco eolico ricade all'interno dei seguenti fogli catastali:

- Fogli 3,4,6,7 nel comune di Villaperuccio

In Figura 2-2 è riportato l'inquadramento territoriale dell'area nel suo stato di fatto e nel suo stato di progetto, con la posizione degli aerogeneratori su ortofoto.





**Figura 2-2: Inquadramento su ortofoto dell'area dell'impianto eolico Monte Pranu**

Si riporta in formato tabellare un dettaglio sulla localizzazione delle turbine eoliche di nuova costruzione, in coordinate Gauss-Boaga (EPSG 3003):

**Tabella 1: Localizzazione geografica degli aerogeneratori di nuova costruzione**

ID	Comune	Est	Nord	Quota (slm)
<b>VP1</b>	Villaperuccio	1467281,72	4329642,03	128
<b>VP2</b>	Villaperuccio	1467206,57	4329183,01	103
<b>VP3</b>	Villaperuccio	1468058,81	4329100,03	78
<b>VP4</b>	Villaperuccio	1467142,90	4328657,79	54
<b>VP5</b>	Villaperuccio	1467892,66	4328599,64	79
<b>VP6</b>	Villaperuccio	1468676,6	4328997,54	145
<b>VP7</b>	Villaperuccio	1468651,37	4328441,09	139
<b>VP8</b>	Villaperuccio	1467363,36	4327944,06	115
<b>VP9</b>	Villaperuccio	1466803,48	4327769,96	70
<b>VP10</b>	Villaperuccio	1467473,24	4327437,77	76

### 3 NORMATIVA DI RIFERIMENTO E FONTI CONSULTATE

Di seguito sono elencati i principali riferimenti Normativi a cui si farà riferimento nella presente relazione.

- [1] D.M. 17/01/2018 “Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»”
- [2] Circolare n.7 Reg. Atti Int. CONSUP del 21.01.2019 “Istruzioni per l'applicazione dello “Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»” di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018
- [3] CNR-DT 207 R1/2018: “Istruzioni per la valutazione delle azioni e degli effetti del vento sulle costruzioni”
- [4] UNI EN 1990. Criteri generali di progettazione strutturale.
- [5] UNI EN 1991-1-1 Parte 1-1: Azioni in generale - Pesì per unità di volume, pesì propri e sovraccarichi per gli edifici
- [6] UNI EN 1992-1-1 Parte 1-1: Progettazione delle strutture di calcestruzzo. Regole generali e regole per gli edifici
- [7] UNI EN 1993-1-1 Parte 1-1: Progettazione delle strutture in acciaio. Regole generali e regole per gli edifici
- [8] UNI EN 1993-1-8 Parte 1-8: Progettazione delle strutture in acciaio. Progettazione dei collegamenti
- [9] UNI EN 1997-1 Parte 1: Progettazione geotecnica. Regole generali
- [10] IEC 61400-1: Wind turbines - Part:1 Design requirements (per le parti di pertinenza)
- [11] Scheda tecnica del produttore delle turbine “Combine Foundation loads EV162-6.5/6.8/7.2 MW, Mk1B, IECS, 119 m”
- [12] UNI EN 206-1. Calcestruzzo – Parte 1: Specificazione, prestazione, produzione e conformità
- [13] UNI 11104 - Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità - Specificazioni complementari per l'applicazione della EN 206

## 4 DIMENSIONAMENTO FONDAZIONI AEROGENERATORI

### 4.1 DESCRIZIONE DELLE OPERE

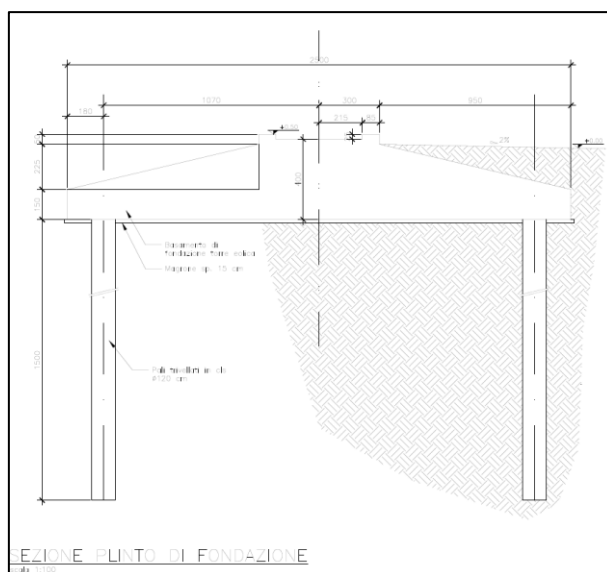
Le opere in progetto sono costituite da un basamento di fondazione per una turbina eolica di capacità 7.2 MW, diametro delle pale 162 m e altezza al mozzo 119 m. La turbina è sostenuta da una torre costituita da un tubolare in acciaio a sezione variabile innestato alla struttura di base in calcestruzzo armato.

Si ipotizza come tipologia di opera fondazionale, una fondazione di tipo indiretto, costituita da un plinto su pali. Nelle successive fasi progettuali, in seguito all'aggiornamento del modello geotecnico di calcolo, si procederà al dimensionamento definitivo della fondazione delle WTG.

Come illustrato in seguito, il basamento è costituito da un plinto, a base circolare su pali, di diametro 25 m. L'altezza dell'elemento è variabile, da un minimo 1.5 m sul perimetro esterno del plinto a un massimo di 3.75 metri nella porzione centrale. In corrispondenza della sezione di innesto della torre di sostegno è realizzato un colletto aggiuntivo di altezza 0.5 m. I pali sono di diametro 1.2 m e lunghezza 15 m.

Il calcestruzzo selezionato per le strutture è di classe di resistenza C25/30 per i pali e C32/40 per il basamento, il colletto dovrà invece essere realizzato con un successivo getto con classe di resistenza C45/55. In ogni caso, all'interfaccia tra il calcestruzzo del colletto e le strutture metalliche, dovrà essere interposta un'idonea malta ad alta resistenza per permettere un livellamento ottimale e garantire la perfetta verticalità delle strutture e permettere un'idonea distribuzione degli sforzi di contatto.

Si allega sezione delle opere estratta dagli elaborati grafici allegati:



**Figura 4-1: Sezione opere in progetto**

## 4.2 PARAMETRI GEOTECNICI DI PROGETTO

Sulla base delle proprietà dei terreni forniti dalla relazione geologica e geotecnica (elaborato "VIL.039 – Relazione geologica e geotecnica") è possibile individuare la seguente stratigrafia di progetto:

- 0 - 30 m da p.c.: litologie andesitico – basaltiche con differente grado di fratturazione

I relativi parametri geotecnici sono sintetizzati nella sottostante tabella 2:

**Tabella 2: Sintesi dei parametri geotecnici di progetto**

Strato	Peso di volume saturo ( $\gamma_{sat}$ ) (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)	$c'$ (KPa)
Andesiti alterate	21	35	0

In cui:

$\gamma$ : peso di volume saturo

$\phi'$ : angolo di resistenza al taglio efficace

$c'$ : coesione efficace

Il grado di fratturazione dei litotipi è molto variabile in sito, con un RDQ (Rock Quality Designation) variabile tra 30% e 90%.

Infine, la falda di progetto è individuata entro la profondità di 10 m da p.c. per la turbina VP4; per le altre turbine di impianto si prevede che la soggiacenza della falda possa collocarsi a profondità maggiori di 30 m da p.c. Per il dimensionamento delle opere si assumerà la condizione più cautelativa, ovvero falda con soggiacenza a 10 m da p.c.

Nella progettazione esecutiva si valuterà se sarà necessario effettuare ulteriori indagini per poter verificare ed eventualmente aggiornare la successione stratigrafica nell'area di progetto ed i relativi parametri meccanici per procedere al dimensionamento definitivo delle fondazioni.

## 4.3 CARICHI DI PROGETTO

Per il dimensionamento preliminare delle fondazioni degli aerogeneratori si considerano i carichi della turbina Vestas EV162-7.2 MW, altezza al mozzo pari a 119 m e riportati nel documento [11] Scheda tecnica del produttore delle turbine "Combine Foundation loads EV162-6.5/6.8/7.2 MW, Mk1B, IECS, 119 m. In fase esecutiva si verificherà se occorrerà eventualmente aggiornare il dimensionamento effettuato.

### 4.3.1 Carichi permanenti

#### 4.3.1.1 Pesì permanenti strutturali (G1)

Il peso proprio delle strutture è calcolato in automatico dal software a elementi finiti, tenuto conto dei volumi degli elementi strutturali e del peso specifico dei materiali assegnati agli elementi. Per gli elementi in calcestruzzo armato si è considerato un peso specifico pari a 25 kN/m<sup>3</sup>.

#### 4.3.1.2 Pesì permanenti non strutturali (G2)

I carichi permanenti non strutturali sono rappresentati dal peso del terreno sovrastante il basamento (G2\_terreno) e quello imputabile al peso della torre e delle macchine installate sul basamento (G2\_wtg). Quest'ultimo viene considerato nelle combinazioni di carico diverse da quelle che utilizzano il carico da vento (W), in cui il peso di torre e macchine è già stato considerato.

### 4.3.2 Sovraccarichi (Q)

#### 4.3.2.1 Carichi indotti dal vento (W)

Il carichi da vento per una turbina con le caratteristiche precedentemente descritte, relativi alle diverse situazioni previste, sono riportati nelle tabelle seguenti estratte dal documento [11] Scheda tecnica del produttore delle turbine "Combine Foundation loads EV162-6.5/6.8/7.2 MW, Mk1B, IECS, 119 m.

Carichi da vento caratteristici (W\_Characteristic):

Production loads							
		Char. load	Prob.:1e-2	Prob.:1e-4	Ref		
M <sub>res</sub>	[kNm]	138700.00	120754.06	129313.97	[2]	[2]	[2]
M <sub>z</sub>	[kNm]	-15953.45	-4664.98	-6959.79	[3]	[3]	[2]
F <sub>res</sub>	[kN]	1322.49	977.00	1086.16	[3]	[2]	[3]
F <sub>z</sub>	[kN]	-7043.74	-6898.90	-6935.19	[3]	[2]	[3]

Table 3-1 Production loads

Carichi da vento in condizione extreme (W\_Extreme), relativi a situazioni eccezionali:

Characteristic Extreme								
Lead	LC/Family	PLF	Type	Mbt	Mzt	FndFr	Fzt	Ref
Sensor	[-]	[-]	[-]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]	[-]
Mbt	62E50b04000(fam352)	1.10	Abs	167200	5836	1500	-6572	[1]
Mzt	22REYHWO1b00(fam169)	1.10	Abs	55460	-12270	448.9	-6667	[1]
FndFr	62E50b04000(fam352)	1.10	Abs	165500	5858	1516	-6563	[1]
Fzt	22REYHWO1a00(fam168)	1.10	Abs	83630	1769	725.7	-6942	[3]

Table 2-3 Characteristic Extreme (excl. PLF). Only load cases with PLF = 1.10.

Carichi da vento in condizione quasi permanente (W\_QP) e relativi alle normali condizioni di esercizio della turbina:

Production loads							
		Char. load	Prob.:1e-2	Prob.:1e-4	Ref		
M <sub>res</sub>	[kNm]	138700.00	120754.06	129313.97	[2]	[2]	[2]
M <sub>z</sub>	[kNm]	-15953.45	-4664.98	-6959.79	[3]	[3]	[2]
F <sub>res</sub>	[kN]	1322.49	977.00	1086.16	[3]	[2]	[3]
F <sub>z</sub>	[kN]	-7043.74	-6898.90	-6935.19	[3]	[2]	[3]

Table 3-1 Production loads

Carichi da vento in condizione frequente (W\_Frequent):

Production loads							
		Char. load	Prob.:1e-2	Prob.:1e-4	Ref		
M <sub>res</sub>	[kNm]	138700.00	120754.06	129313.97	[2]	[2]	[2]
M <sub>z</sub>	[kNm]	-15953.45	-4664.98	-6959.79	[3]	[3]	[2]
F <sub>res</sub>	[kN]	1322.49	977.00	1086.16	[3]	[2]	[3]
F <sub>z</sub>	[kN]	-7043.74	-6898.90	-6935.19	[3]	[2]	[3]

Table 3-1 Production loads

Dove:

M<sub>res</sub> e M<sub>bt</sub> rappresentano il carico espresso come risultante delle azioni in direzione X ed Y globale.

M<sub>z</sub> e M<sub>zt</sub> rappresentano il carico espresso come risultante dell'azione in direzione Z (torcente).

F<sub>res</sub> e F<sub>ndFr</sub> rappresentano l'azione di taglio risultante delle direzioni X e Y globale.

F<sub>z</sub> e F<sub>zt</sub> rappresentano l'azione di compressione dell'aerogeneratore.

### 4.3.3 Azione sismica (E)

L'azione sismica agente sull'elemento viene determinata in maniera semplificata rilevando l'accelerazione sismica ottenuta in corrispondenza del periodo proprio della struttura. Quest'ultimo è ottenuto ricorrendo al metodo di Rayleigh, nel quale si applica una distribuzione di forze pari alla forza peso pensata come distribuita in maniera discreta su un'asta di rigidezza pari alla rigidezza traslazionale del sistema in esame.

$$T = 2 \pi \sqrt{\frac{\sum W_i \delta_i^2}{g \sum W_i \delta_i}}$$

In cui:

- $W_i$  è il peso delle masse strutturali, pensate come distribuite in punti discreti
- $\delta_i$  è lo spostamento misurato in corrispondenza del punto di applicazione della forza
- $g$  è l'accelerazione di gravità

I pesi dei vari tronchi della torre e degli altri componenti sono stati direttamente forniti dal produttore.

#### 4.3.3.1 Spettri di progetto

L'azione sismica è tradotta da spettri in accelerazione. Vista la complessità della struttura si persegue l'obiettivo di una progettazione non dissipativa, le valutazioni sismiche verranno quindi eseguite su spettri di progetto elastici, adottando un fattore di comportamento  $q=1$ .

Si definisce una vita nominale per la struttura  $V_N = 50$  anni e una classe d'uso IV. In queste condizioni si ottiene un periodo di riferimento per la costruzione pari a:

$$V_R = V_N \cdot C_U = 50 \cdot 2 = 100 \text{ anni}$$

Da cui ne deriveranno i periodi di ritorno determinati nella seguente figura.



### FASE 2. SCELTA DELLA STRATEGIA DI PROGETTAZIONE

Vita nominale della costruzione (in anni) -  $V_n$   info

Coefficiente d'uso della costruzione -  $C_u$   info

Valori di progetto

Periodo di riferimento per la costruzione (in anni) -  $V_R$   info

Periodi di ritorno per la definizione dell'azione sismica (in anni) -  $T_R$  info

Stati limite di esercizio - SLE	SLO - $P_{VR} = 81\%$	<input type="text" value="60"/>
	SLD - $P_{VR} = 63\%$	<input type="text" value="101"/>
Stati limite ultimi - SLU	SLV - $P_{VR} = 10\%$	<input type="text" value="949"/>
	SLC - $P_{VR} = 5\%$	<input type="text" value="1950"/>

Elaborazioni

- Grafici parametri azione
- Grafici spettri di risposta
- Tabella parametri azione

Strategia di progettazione

LEGENDA GRAFICO

---□--- Strategia per costruzioni ordinarie

---■--- Strategia scelta

INTRO
FASE 1
FASE 2
FASE 3

Per la determinazione dell'azione sismica di progetto sono stati considerati i parametri di azione sismica della regione Sardegna, uniformi su tutto il territorio regionale:

Stato Limite	$T_R$ [anni]	$a_g$ [g]	$F_o$	$T_c^*$ [s]
Operatività (SLO)	60	0.025	2.685	0.299
Danno (SLD)	101	0.031	2.730	0.307
Salvaguardia vita (SLV)	949	0.060	2.976	0.371
Prevenzione collasso (SLC)	1950	0.071	3.061	0.393

Dalle relazioni geologica e geotecnica è stato rilevato che la Categoria di Sottosuolo che interessa il sito di progetto è la **B** mentre la Categoria Topografica è **T2**.

Si assume, a favore di sicurezza, un valore del coefficiente di smorzamento pari all'1%.

Si riportano di seguito le espressioni ed i parametri caratterizzanti lo spettro di risposta orizzontale allo SLV:



### Espressioni dei parametri dipendenti

$$S = S_s \cdot S_T \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.5})$$

$$\eta = \sqrt{10/(5+\xi)} \geq 0,55; \quad \eta = 1/q \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.6; §. 3.2.3.5})$$

$$T_B = T_C / 3 \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.8})$$

$$T_C = C_c \cdot T_C^* \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.7})$$

$$T_D = 4,0 \cdot a_g / g + 1,6 \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.9})$$

### Espressioni dello spettro di risposta (NTC-08 Eq. 3.2.4)

$$0 \leq T < T_B \quad S_c(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left[ \frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_0} \left( 1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

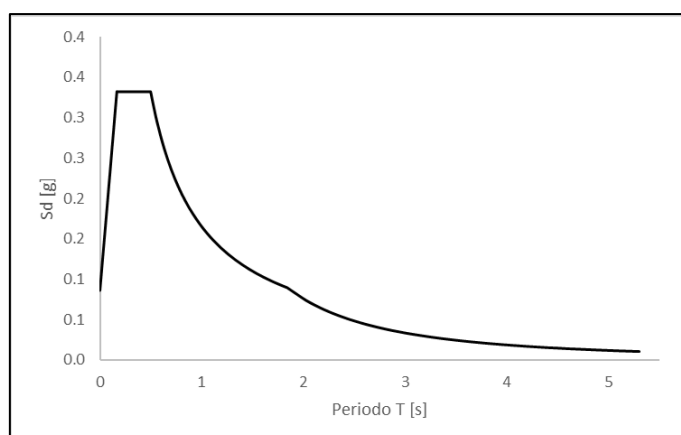
$$T_B \leq T < T_C \quad S_c(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0$$

$$T_C \leq T < T_D \quad S_c(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left( \frac{T_C}{T} \right)$$

$$T_D \leq T \quad S_c(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left( \frac{T_C T_D}{T^2} \right)$$

Accelerazione al suolo					$a_g =$	0.060	[g]	
Fattore di amplificazione dello spettro					$F_0 =$	2.976	[-]	
					$T_C^* =$	0.371	[s]	
					$g$	9.81	m/s <sup>2</sup>	
Categoria di sottosuolo					$B$			
Categoria topografica					$T2$			
Coefficiente amplificazione stratigrafica					$S_s =$	1.2		
Coefficiente di amplificazione topografica					$S_T =$	1.2		
Coefficiente S			$S = S_s \cdot S_T$		$S$	1.4		
Coefficiente $C_c$					$C_c$	1.3		
Smorzamento Convenzionale					$\zeta$	NO		
Coefficiente di smorzamento viscoso non convenzionale					$\eta$	1.00		
Fattore che altera lo spettro			$\eta = \sqrt{10/(5+\xi)}$		$\eta$	1.3		
$T_C$			$T_C = C_c \cdot T_C^*$		$T_C$	0.498	[s]	
$T_B$			$T_B = T_C/3$		$T_B$	0.166	[s]	
$T_D$			$T_D = 4.0 \cdot a_g/g + 1.6$		$T_D$	1.840	[s]	

Si riporta l'andamento dello spettro di risposta orizzontale SLV:



**Figura 4-1 Spettro di risposta SLV**

#### 4.3.3.2 Determinazione della forzante sismica

Per quanto riguarda l'accelerazione sismica da adottare nei calcoli strutturali, si ipotizza che lo spettro di risposta oltre i 4s sia caratterizzato dal medesimo andamento avente per  $T_0 \leq T \leq 4s$ . Come illustrato in tabella sottostante, il periodo proprio della struttura viene determinato pensando la torre incastrata alla base, e risulta pari a 5.88 s. A tale valore del periodo di vibrazione fondamentale, corrisponde una frequenza pari a 0.170 Hz, che ricade nell'intervallo riportato al capitolo 5 del [11] Scheda tecnica del produttore delle turbine "Combine Foundation loads EV162-6.5/6.8/7.2 MW, Mk1B, IECS, 119 m", affinché i carichi indicati risultino validi.

Height [m] m	Node ID	$d_i$ m	$W_i$ kN	$d_i^2$ m <sup>2</sup>	$W_i d_i^2$ kN m <sup>2</sup>	$W_i d_i$ kN m	T s	f Hz
119.00	7	9.577	3196.8	91.725	293230	30617	<b>5.88</b>	<b>0.170</b>
101.96	12	7.244	775.4	52.479	40693	5617		
70.56	11	3.521	778.2	12.4005	9650	2740		
42.61	10	1.276	784.4	1.628186	1277	1001		
20.18	9	0.266	710.0	0.07077	50	189		
5.46	8	0.020	616.5	0.000381	0	12		
				$\Sigma$	<b>344901</b>	<b>40177</b>		

Si precisa che gli spostamenti ottenuti sono conseguenti all'applicazione del sistema di forze assunto per la determinazione del periodo di vibrazione fondamentale attraverso il metodo di Rayleigh e non sono quindi quelli reali a cui è soggetta la turbina.

Per il valore del periodo di vibrazione fondamentale sopra calcolato, si ottiene  $S_e=0.0088g$ , da cui ne seguono le forze statiche equivalenti all'azione sismica riportate in seguito.

Se ( $T_1$ ) 0.0088 g								
Elemento	$z_{min}$ m	$z_{max}$ m	$z$ m	$\Delta z$ m	m kg	N kN	V kN	M kN m
Navicella+rotore+pale	119.00	119.00	119.00	-	326007	3196.8	28.7	3414
Concio fusto 1/5	0.00	11.41	5.46	11.41	79077	775.4	7.0	38
Concio fusto 2/5	11.41	30.17	20.18	18.76	79359	778.2	7.0	141
Concio fusto 3/5	30.17	56.21	42.61	26.04	79988	784.4	7.0	300
Concio fusto 4/5	56.21	86.17	70.56	29.96	72402	710.0	6.4	450
Concio fusto 5/5	86.17	119.00	101.96	30.00	62866	616.5	5.5	564
						<b>6861.2</b>	<b>61.6</b>	<b>4906.4</b>

Per tenere conto della variabilità spaziale del moto sismico e di incertezze nella localizzazione delle masse, come indicato al paragrafo 7.2.6 delle NTC2018 si attribuisce un'eccentricità accidentale pari al 5% del diametro del basamento. Inoltre, per tenere conto della contemporaneità dell'azione sismica nelle due direzioni ortogonali si considera applicato in direzione Y il 30% dell'azione sismica applicata lungo X. Nella tabella sottostante vengono riassunte le forze sismiche risultanti:

eccentricità 0.05\*D 1.25 m

	N kN	F <sub>x</sub> kN	F <sub>y</sub> kN	M <sub>y</sub> kN m	M <sub>x</sub> kN m	M <sub>z</sub> kN m
SISMA X + 0.3 Y	6861.25	61.57	18.47	4906.4	1471.9	77.0

## **4.4 MATERIALI**

### **4.4.1 Calcestruzzo armato**

#### **4.4.1.1 Magrone**

Il getto di magrone posto al fine di realizzare il piano di posa dei plinti è realizzato con calcestruzzo di classe di resistenza C12/15 che presenta le seguenti caratteristiche meccaniche:

$$E_{cm} = 27000 \text{ MPa};$$

$$\nu = 0.20;$$

$$\gamma = 25 \text{ kN/m}^3;$$

$$f_{ck} = 12 \text{ MPa};$$

$$f_{cd} = 6.8 \text{ MPa} (0.85f_{ck}/1.5)$$

#### **4.4.1.2 Pali**

Il calcestruzzo previsto per la realizzazione dei pali di fondazione è di classe di resistenza C25/30 che presenta le seguenti caratteristiche meccaniche:

$$E_{cm} = 31500 \text{ MPa};$$

$$\nu = 0.20;$$

$$\gamma = 25 \text{ kN/m}^3;$$

$$f_{ck} = 25 \text{ MPa};$$

$$f_{cd} = 14.17 \text{ MPa} (=0.85f_{ck}/1.5)$$

Classe di consistenza: S4 (slump tra 16 e 21 cm)

Classe di esposizione: XC2 (Bagnato, raramente asciutto)

Dimensione massima aggregato: 25 mm

#### **4.4.1.3 Basamento**

Il calcestruzzo previsto per la realizzazione del basamento di fondazione è di classe di resistenza C32/40 che presenta le seguenti caratteristiche meccaniche:

$$E_{cm} = 33300 \text{ MPa};$$

$$\nu = 0.20;$$

$$\gamma = 25 \text{ kN/m}^3;$$

$f_{ck} = 32 \text{ MPa};$

$f_{cd} = 18.13 \text{ MPa } (=0.85f_{ck}/1.5)$

Classe di consistenza: S4 (slump tra 16 e 21 cm)

Classe di esposizione: XC4 (Bagnato, raramente asciutto)

Dimensione massima aggregato: 25 mm

#### **4.4.1.4 Colletto di innesto**

Il calcestruzzo previsto per la realizzazione del colletto del plinto di fondazione è di classe di resistenza C45/55 che presenta le seguenti caratteristiche meccaniche:

$E_{cm} = 36200 \text{ MPa};$

$\nu = 0.20;$

$\gamma = 25 \text{ kN/m}^3;$

$f_{ck} = 45 \text{ MPa};$

$f_{cd} = 25.5 \text{ MPa } (=0.85f_{ck}/1.5)$

Classe di consistenza: S4 (slump tra 16 e 21 cm)

Classe di esposizione: XC4 (Bagnato, raramente asciutto)

Dimensione massima aggregato: 25 mm

#### **4.4.2 Acciaio di armatura**

L'acciaio impiegato per le armature di strutture in CA deve essere di tipo B450C e presentare le seguenti caratteristiche:

$E = 200000 \text{ MPa};$

$\nu = 0.30;$

$\alpha = 12 \cdot 10^{-6};$

$\gamma = 78.50 \text{ kN/m}^3;$

$f_{yk} = 450 \text{ MPa};$

$f_{uk} = 540 \text{ Mpa}.$

## 4.5 SOFTWARE IMPIEGATO PER LE ANALISI FEM

Le sollecitazioni di progetto utili per la verifica delle strutture sono state desunte da un modello agli elementi finiti tridimensionale elaborato con il codice di calcolo Midas Gen di Midas Information Technology di estesa commercializzazione.

I modelli strutturali sono stati realizzati congruentemente alle geometrie strutturali e alle caratteristiche dei materiali rappresentate negli elaborati strutturali di progetto.

### 4.5.1 Sistemi di riferimento

In Midas Gen sono definiti i seguenti sistemi di coordinate

- Global Coordinate System (GCS)
- Element Coordinate System (ECS)
- Node local Coordinate System (NCS)

Il GCS usa le lettere maiuscole X, Y e Z per definire un sistema di coordinate cartesiale globale, che segue la regola della mano destra. È utilizzato per la maggior parte della definizione degli input, compreso ad esempio la definizione dei nodi e la restituzione di risultati globali ad essi associati, quali spostamenti e reazioni vincolari.

Il GCS definisce la posizione geometrica della struttura da analizzare e il suo punto di riferimento (l'origine) è automaticamente fissata al set di coordinate (0,0,0). Dal momento che la direzione verticale è rappresentata dall'asse Z è convenzionale modellare le strutture nel loro sviluppo verticale lungo questo asse.

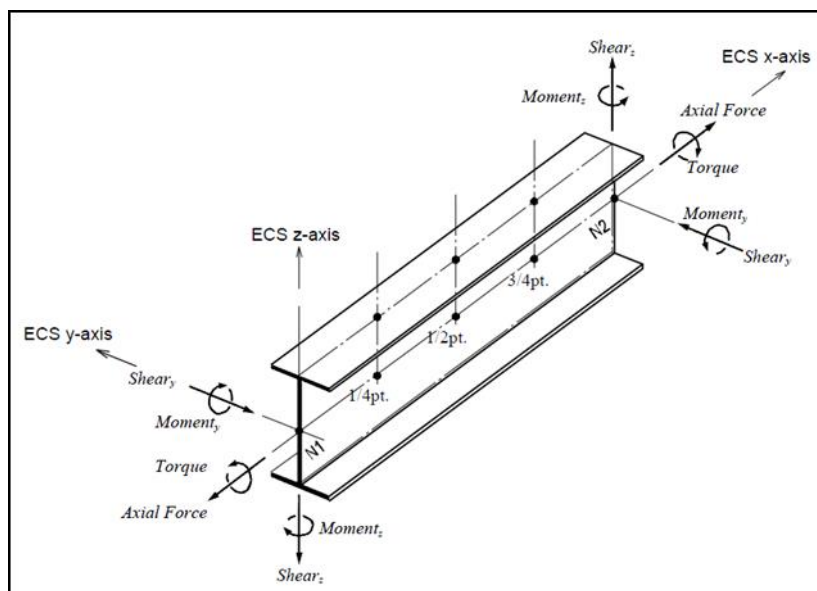
L'ECS usa le lettere minuscole x,y e z per definire un sistema di riferimento cartesiano, che segue la regola della mano destra, associati a un elemento. I risultati delle analisi in termini di forze interne e tensioni e la maggior parte degli input associati al singolo elemento sono espressi in questo sistema di coordinate locali.

### 4.5.2 Elementi beam

Gli elementi a due nodi assimilabili a elementi strutturali monodimensionali, quali travi e pilatri, sono stati modellati come elementi beam. La formulazione di tali elementi è basata sulla teoria della trave di Timoshenko, considerando le capacità di rigidezza in tensione e compressione, taglio e le capacità deformative in condizione di flessione e torsione. La definizione delle caratteristiche della sezione trasversale, caratterizzanti la meccanica dell'elemento, sono definite da apposite finestre di dialogo all'interno del software.

### 4.5.3 Output delle azioni interne

Per gli elementi beam la convenzione dei segni è quella riportata nella figura seguente, le frecce indicano i versi delle sollecitazioni considerate come positive.



**Figura 4-2: Definizione degli elementi beam e rispettivi ECS**

### 4.5.4 Elementi plate

Gli elementi planari a 3 o 4 nodi sono definiti come elementi plate (i nodi che definiscono l'elemento saranno chiamati N1, N2, N3 e, nel caso di elemento a 4 nodi, N4). Questa tipologia di elemento è capace di tener conto di tensioni e compressioni nel piano, sforzi di taglio dentro e fuori dal piano e sollecitazioni di momento flettente nel piano.

Questo elemento può essere utilizzato per modellare strutture in cui sono permesse sia flessioni nel piano sia fuori dal piano, ad esempio per definire serbatoi in pressione, muri di contenimento, impalcati da ponte, impalcati di edifici, fondazioni continue.

I carichi di pressione possono essere applicati sulle superfici degli elementi secondo i sistemi di riferimento GCS o ECS.

Un elemento plate può avere forma quadrilatera o triangolare, con rigidità assiale e a taglio nel piano e rigidità flessionale e a taglio fuori dal piano di riferimento.

Il comportamento flessionale degli elementi plate è descritto secondo due approcci: DKT/DKQ (Discrete Kirchhoff elements) e DKMT/DKMQ (Discrete Kirchhoff-Mindlin elements). DKT/DKQ è sviluppato sulla base della teoria della teoria di Kirchhoff per elementi bidimensionali sottili,

DKMT/DKMQ è sviluppata sulla base della teoria Mindlin-Reissner per elementi bidimensionali moderatamente spessi.

Il comportamento nel piano è formulato in accordo alla teoria LST (Linear Strain Triangle) per gli elementi a 3 nodi e in accordo alla formulazione degli elementi isoparametrici a tensione piana con aggiunta di modi incompatibili per gli elementi a 4 nodi.

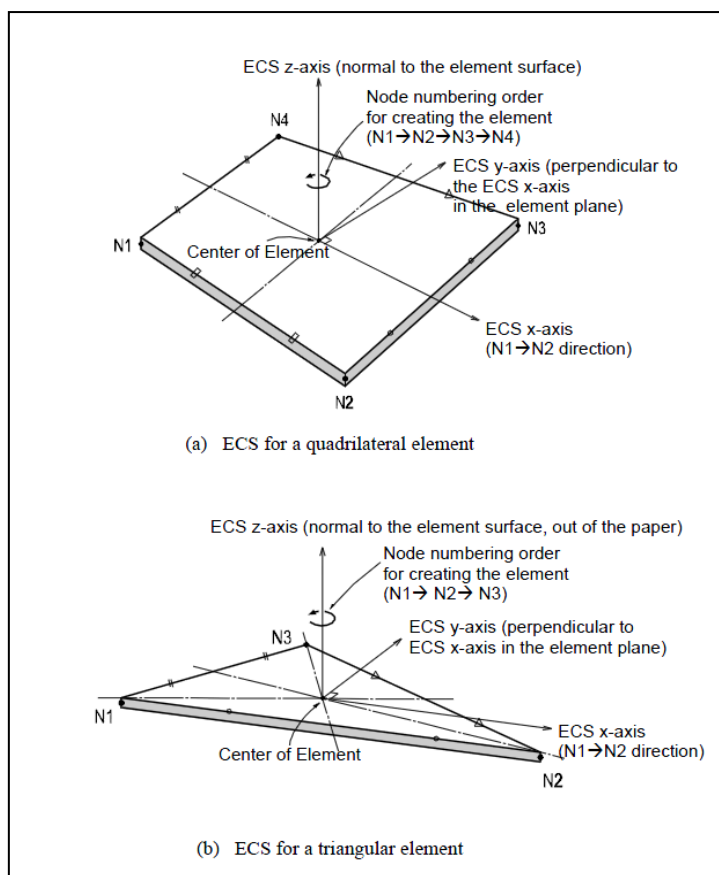
In generale, la rigidità è valutata in maniera automatica dal software a partire dallo spessore e dai parametri meccanici definiti dall'utente per gli elementi; il peso proprio strutturale e la massa strutturale di un elemento plate sono valutati in maniera automatica dal software a partire dallo spessore assegnato all'elemento e da peso nell'unità di volume e densità di massa definita per il materiale assegnati all'elemento.

#### **4.5.5 Gradi di libertà degli elementi e ECS**

Il sistema di riferimento ECS di ogni elemento è utilizzato quando il programma calcola la matrice di rigidità per l'elemento. Gli output grafici delle componenti di sollecitazione sono riportate anche nell'ECS nella fase di post-processing.

I gradi di libertà traslazionali esistono nell'ECS come direzioni XYZ e le rotazioni sono definite rispetto agli assi x e y dell'ECS. Le direzioni degli assi dell'ECS sono rappresentate nella Figura 4-3: Definizione degli elementi plate e rispettivi ECS. In caso di elementi quadrilateri, la direzione del pollice rispetto alla regola della mano destra definisce l'asse Z dell'ECS. La direzione di rotazione (N1, N2, N3, N4) segue la regola della mano destra e definisce la direzione del verso positivo. L'asse Z dell'ECS ha origine dal centro della superficie dell'elemento e ha direzione perpendicolare a essa. La linea che connette il punto medio tra N1 e N4 e il punto medio tra N2 e N3 definisce la direzione dell'asse x. La direzione perpendicolare all'asse x diventa la direzione dell'asse y dell'ECS con verso stabilito dalla regola della mano destra.

Per un elemento triangolare, la linea parallela alla direzione che va da N1 a N2, passante per il centro dell'elemento diventa l'asse X dell'ECS. Le direzioni y e z sono definite come per gli elementi a 4 lati prima descritti.



**Figura 4-3: Definizione degli elementi plate e rispettivi ECS**

#### 4.5.6 Output delle azioni interne

La convenzione dei segni per le azioni interne di un elemento plate e per le sollecitazioni è definita sia dall'ECS che dal GCS.

I seguenti risultati di output sono definite con riferimento all'ECS:

- Azioni sui nodi di connessione
- Azioni per unità di lunghezza sui nodi di connessione e sul baricentro dell'elemento
- Tensioni sulla superficie superiore e inferiore in corrispondenza dei nodi di connessione

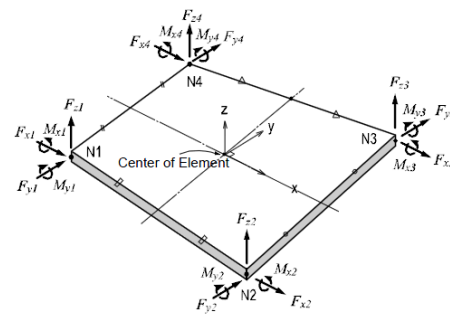
In ogni nodo, moltiplicando ogni componente di spostamento nodale per la corrispondente componenti di rigidezza viene determinata l'azione dell'elemento sul nodo.

Per calcolare le forze per unità di lunghezza in un nodo di connessione o nel baricentro di un elemento, le tensioni sono calcolate separatamente per il comportamento nel piano e quello fuori dal piano e integrate nella direzione dello spessore.

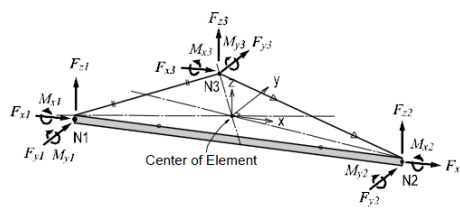
Nelle figure successive sono mostrate le convenzioni secondo le quali sono esplicitate le sollecitazioni sugli elementi plate. Le frecce indicano il verso positivo delle forze.



\* Element forces are produced in the ECS and the arrows represent the positive (+) directions.



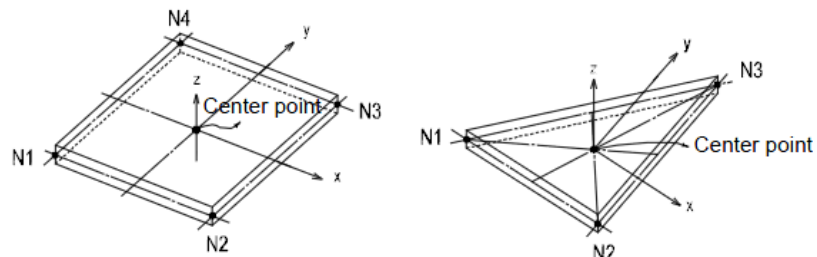
(a) Nodal forces for a quadrilateral element



(b) Nodal forces for a triangular element

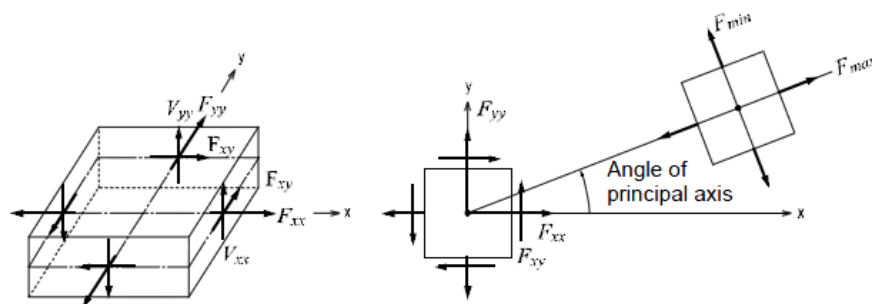
**Figura 4-4: Convenzione dei segni per le forze nodali degli elementi plate**

\* Element forces are produced in the ECS and the arrows represent the positive (+) directions.



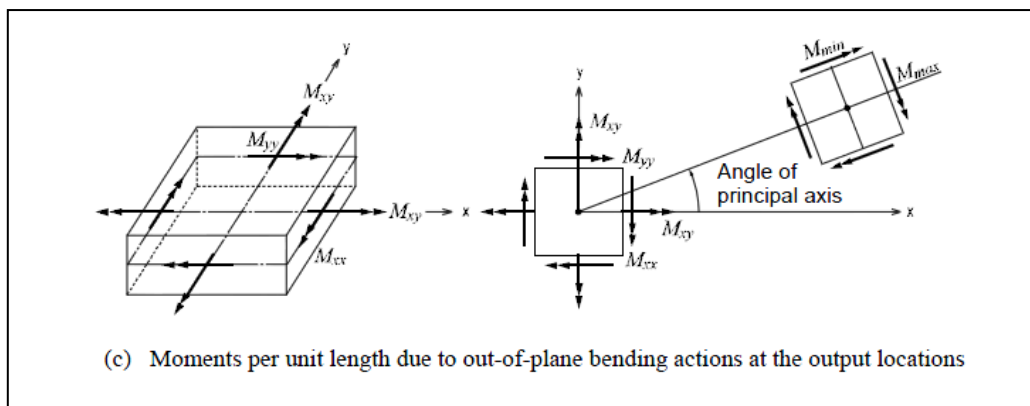
•: Out put locations of element forces per unit length

(a) Output locations of element forces

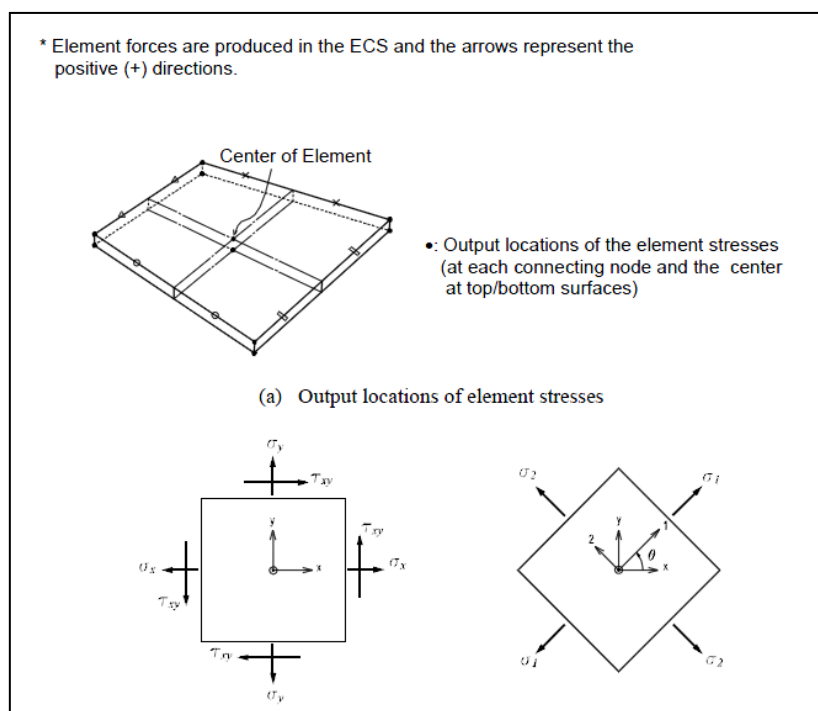


(b) Forces per unit length due to in-plane actions at the output locations

**Figura 4-5: Convenzione dei segni per l'output delle forze per unità di lunghezza**



**Figura 4-6: Convenzione dei segni per le azioni flessionali fuori dal piano**



**Figura 4-7: Convenzione dei segni per le tensioni agenti**

$\sigma_x$  : Axial stress in the ECS x - direction

$\sigma_y$  : Axial stress in the ECS y - direction

$\tau_{xy}$  : Shear stress in the ECS x - y plane

$$\sigma_1 : \text{Maximum principal stress} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\sigma_2 : \text{Minimum principal stress} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\tau_{xy} : \text{Maximum shear stress} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$\theta$  : Angle between the x - axis and the principal axis, 1

$$\sigma_{eff} : \text{von - Mises Stress} = \sqrt{(\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2)}$$

(b) Sign convention for plate element stresses

**Figura 4-8: Determinazione delle principali componenti di tensione**

## **4.6 ANALISI STRUTTURALE**

### **4.6.1 Analisi strutturale tramite modello FEM**

L'analisi strutturale è stata effettuata utilizzando il software MidasGen 2023, realizzando un modello ad elementi finiti tridimensionale. Gli elementi strutturali sono stati schematizzati mediante elementi finiti di tipo beam e plate, introducendo le condizioni di vincolo esterno e gli opportuni svincoli nei punti in cui il vincolo di collegamento è a cerniera.

Vista la condizione di simmetria dei carichi indotti e delle strutture, i carichi orizzontali verranno applicati in direzione radiale lungo un'unica direzione.

Le azioni di vento e sisma verranno applicate con approccio statico equivalente, secondo le determinazioni dei loro effetti calcolati nei capitoli precedenti.

I quantitativi di armatura ottenuti nelle seguenti elaborazioni dovranno essere disposti nella piastra in maniera simmetrica rispetto all'asse verticale baricentrico della platea.

Nei successivi paragrafi vengono riportati con maggiore dettaglio le ipotesi poste alla base delle analisi.

### **4.6.2 Geometria del modello**

Il basamento è stato discretizzato attraverso una mesh di elementi plate che simulano anche l'effetto della variazione della sezione in altezza. Il modello segue quindi con buona approssimazione la variazione di peso e rigidezza della sezione resistente e la forma circolare del basamento.

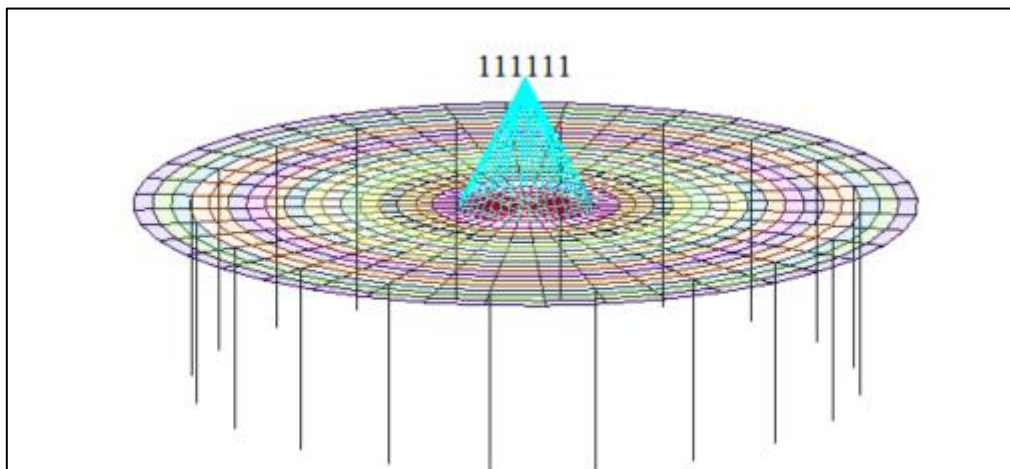
Sul perimetro di innesto della struttura metallica sono stati disposti una serie di nodi collegati mediante un link rigido a un nodo master, nei quali sono state applicate le componenti delle forze che derivano dalla turbina. Nel nodo vengono quindi applicate le seguenti forze:

- carichi gravitazionali delle strutture innestate
- azioni del vento sulla turbina, come definite in 4.3.2.1
- azioni sismiche, come definite in 0

I carichi presenti nel documento [11] Scheda tecnica del produttore delle turbine "Combine Foundation loads EV162-6.5/6.8/7.2 MW, Mk1B, IECS, 119 m" sono relativi ad un'altezza di 0.20 m rispetto all'estradosso della fondazione. Il nodo master è stato quindi posizionato a una quota di 4.70 m superiore rispetto alla quota di testa dei pali.

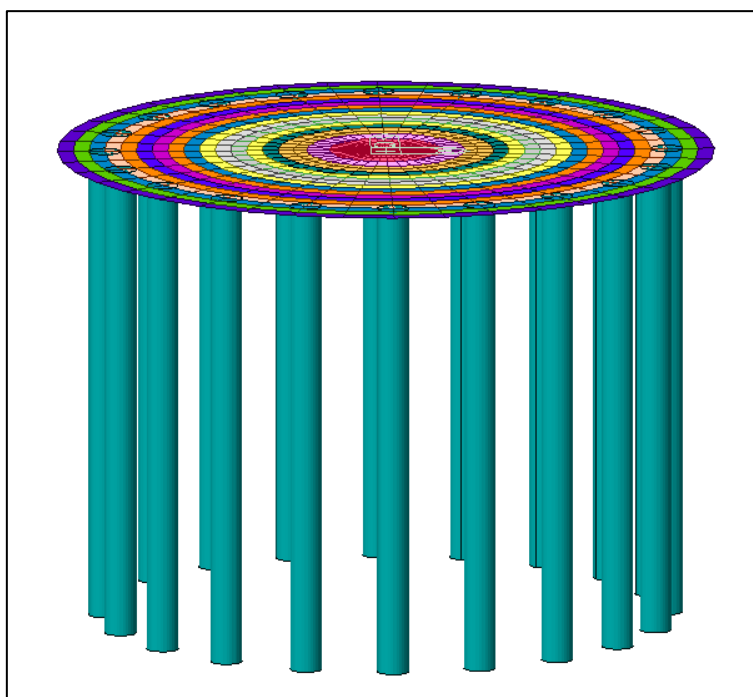
Tali carichi sono espressi come risultante delle azioni in direzione X ed Y globale e azione in direzione Z. Come già anticipato, tali carichi verranno applicati in direzione radiale lungo un'unica direzione

e l'armatura verrà disposta in direzione simmetrica rispetto all'asse verticale baricentrico della platea.



**Figura 4-9: Nodo per l'applicazione dei carichi provenienti dalla torre**

I pali sono stati modellati alla distanza esatta a cui verranno posti rispetto alla platea e modellati mediante elementi beam.



**Figura 4-10: Modello FEM, vista prospettica**

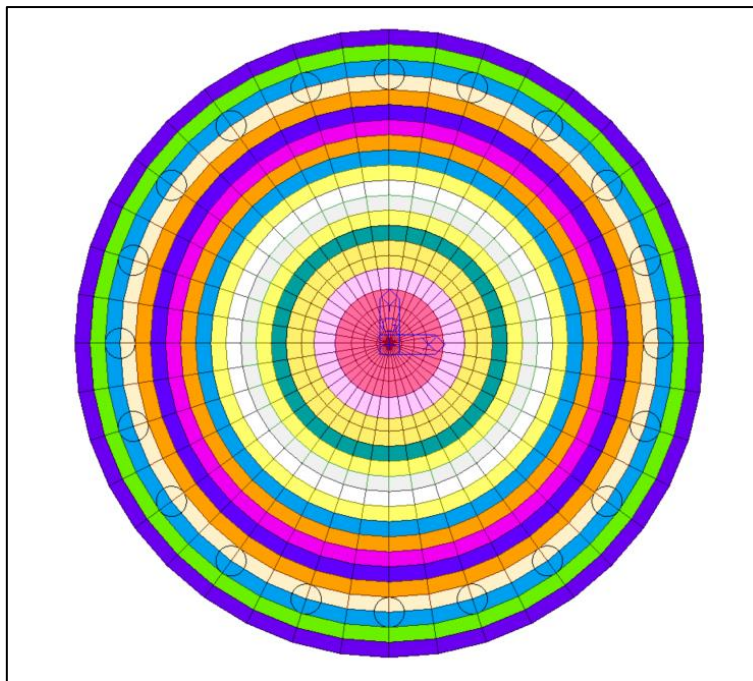


Figura 4-11: Modelli FEM, vista dall'alto

### 4.6.3 Vincoli

Essendo la struttura su pali, si immagina che l'intero carico venga ripartito su tali elementi. Lo spostamento orizzontale viene bloccato sulla testa del palo, mentre in punta si assume vincolato con vincolo a molla che simula il cedimento dovuto al carico subito.

La rigidezza della molla si calcola a partire da una stima della portata del singolo palo e del relativo cedimento utilizzando la formulazione di Viggiani:

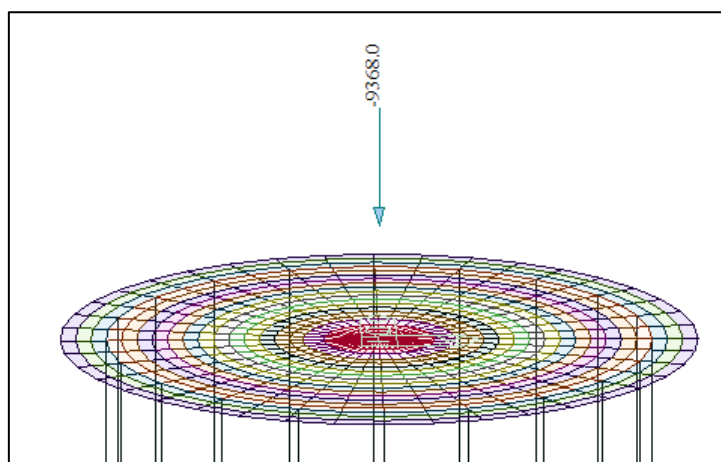
$$k = 473588 \text{ kN/m}$$

STIMA APPROSSIMATA DEL CEDIMENTO - Secondo Viggiani			
<b>Q</b>	carico in esercizio sul palo	3928.4 kN	
<b>Q<sub>lim</sub></b>	portata limite di calcolo	14207.6 kN	
<b>λ</b>	coefficiente relativo al tipo di palo	40	
<b>w</b>	cedimento stimato	0.008295 m	
<b>k</b>	rigidezza verticale	473588 kN/m	
		<b>Tipo di palo</b>	<b>Terreno</b>
		Battuto	Incoerente
			Coesivo
		Trivellato	Incoerente
			Coesivo
		Trivellato pressato	Incoerente
			Coesivo

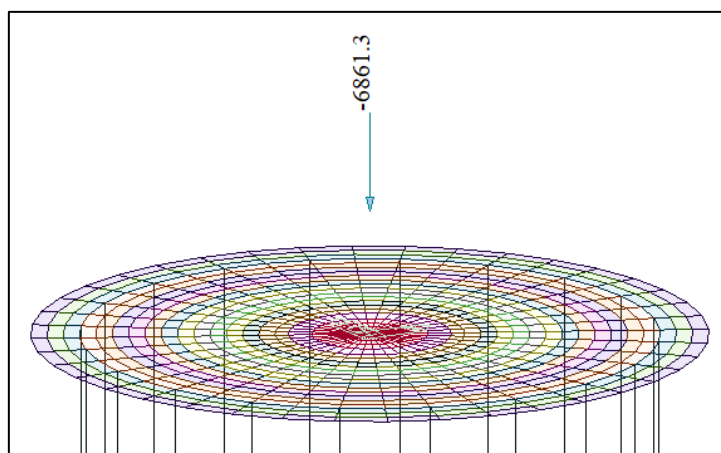
#### 4.6.4 Casi di di carico

Si riportano nelle sottostanti figure le modalità di applicazione dei carichi descritti e riportati al paragrafo 4.3, a cui si rimanda per una migliore lettura dei valori di carico, condizionata nelle figure dalle modalità di rappresentazione del software di calcolo.

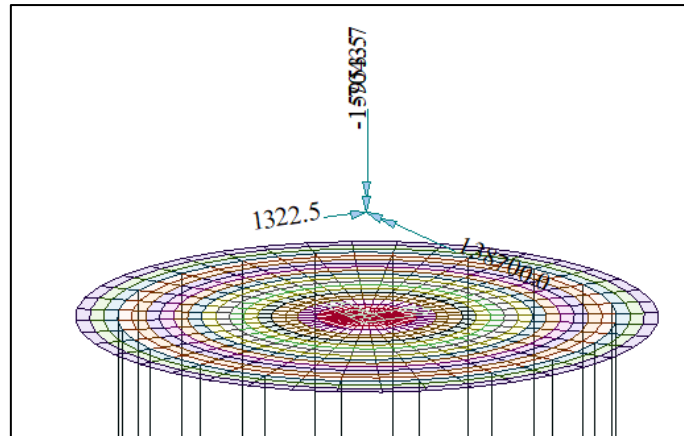
Il carico G2 rappresentante i pesi permanenti non strutturali viene diviso tra peso del terreno sovrastante il basamento (G2\_terreno) e peso proprio della turbina e relative componenti (G2\_WGT). Quest'ultimo viene applicato per tenere in considerazione l'effetto del peso sul basamento solamente nelle combinazioni dove non è presente l'azione del vento nella quale invece è già compreso nei carichi forniti dalle specifiche del produttore.



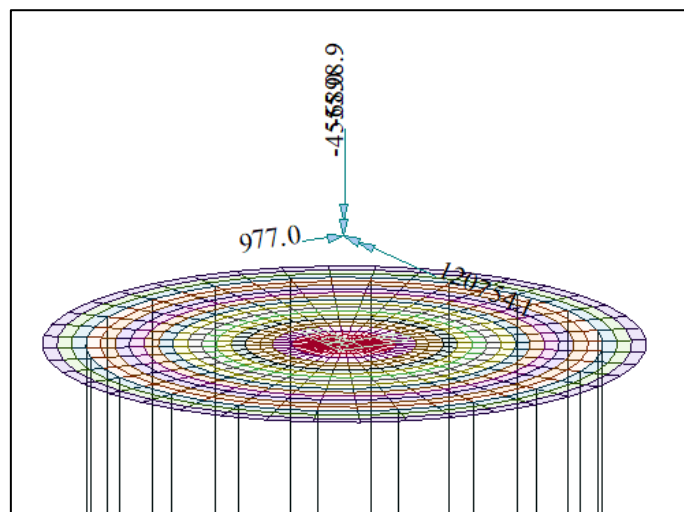
**Figura 4-12: Caso di carico G2\_terreno**



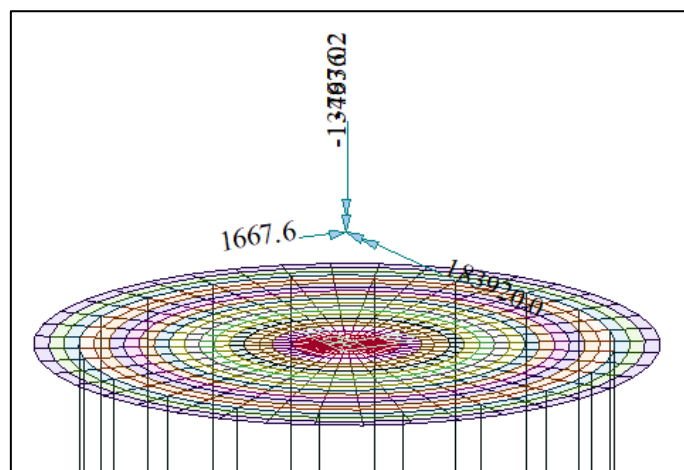
**Figura 4-13: Caso di carico G2\_WGT**



**Figura 4-14: Caso di carico W\_Characteristic**

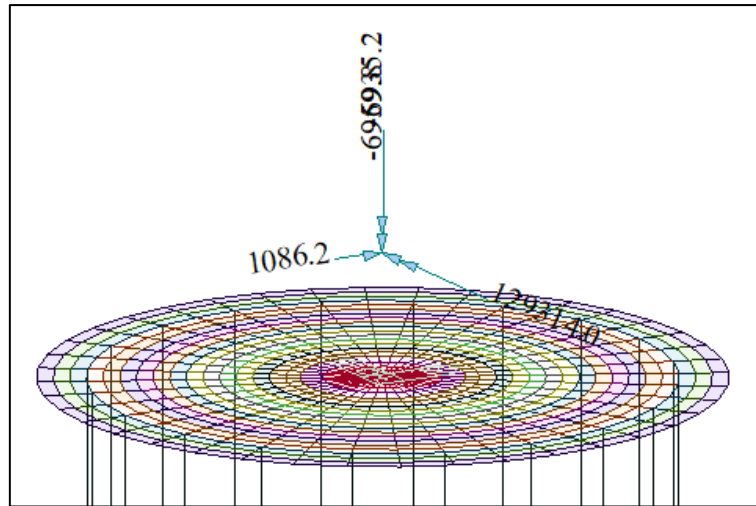


**Figura 4-15: Caso di carico W\_QP**

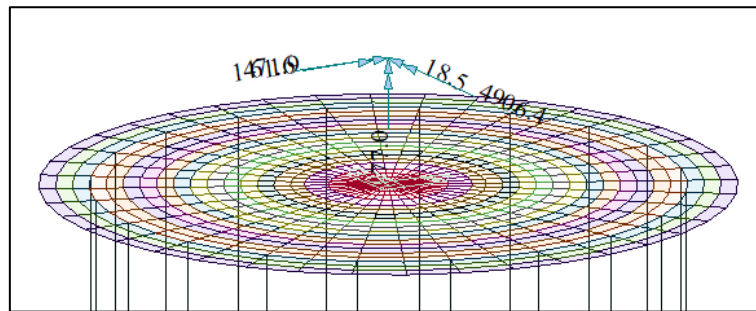


**Figura 4-16: Caso di carico W\_Extreme**





**Figura 4-17: Caso di carico W\_frequent**



**Figura 4-18: Caso di carico E**

#### 4.6.5 Combinazioni di carico

Le combinazioni di calcolo selezionate per le verifiche di tipo STR per le quali dovranno essere impiegati i coefficienti definiti nella colonna A1 della tabella Tab. 2.6.I delle NTC2018.

**Tab. 2.6.I – Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni nelle verifiche SLU**

		Coefficiente $\gamma_F$	EQU	A1	A2
Carichi permanenti $G_1$	Favorevoli	$\gamma_{G1}$	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevoli		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti non strutturali $G_2^{(1)}$	Favorevoli	$\gamma_{G2}$	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevoli		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevoli	$\gamma_Q$	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevoli		1,5	1,5	1,3

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

Di seguito vengono elencati i carichi oggetto delle successive combinazioni, i valori sono indicati nelle rispettive tabelle al precedente paragrafo 0.

Casi di carico	
Cat.	
G1	pesi permanenti strutturali
G2_terreno	pesi permanenti non strutturali
G2_wtg	pesi permanenti non strutturali
W_Characteristic	carichi da vento caratteristici
W_QP	carichi da vento in condizione quasi permanente
W_Extreme	carichi da vento in condizione extreme
W_Frequent	carichi da vento in condizione frequente
E	sisma

La seguente tabella contiene le combinazioni di carico utilizzate nei calcoli.

COMBO	TYPE		G1	G2_terreno	G2_wtg	W_Characteristic	W_QP	W_Extreme	W_Frequent	E
SLU1	Strength/Stress	Add	1.30	1.50	1.50					
SLU2	Strength/Stress	Add	1.30	1.50				1.35		
SLU3	Strength/Stress	Add	1.00	0.80				1.35		
SLUext	Strength/Stress	Add	1.00	1.00					1.00	
SLV1	Strength/Stress(Elastic)	Add	1.00	1.00	1.00					1.00
SLV2	Strength/Stress(Elastic)	Add	1.00	1.00				1.00		1.00
SLEr	Serviceability	Add	1.00	1.00			1.00			
SLEf	Serviceability	Add	1.00	1.00						1.00
SLEqp	Serviceability	Add	1.00	1.00				1.00		

Le combinazioni "SLU2" e "SLU3" si riferiscono alla combinazione fondamentale allo Stato Limite Ultimo. I carichi da vento in queste combinazioni sono i "Production Loads" con probabilità di

eccedenza di 1e-02, riportati al paragrafo 4.3.2.1. Viene attribuito il coefficiente amplificativo 1.35 in quanto si fa riferimento a carichi nella condizione "Normal", ovvero le normali condizioni di esercizio della turbina, come riportato nella sottostante tabella estratta da [10] IEC 61400-1: Wind turbines - Part:1 Design requirements. Tale documento viene considerato come "di comprovata validità" rispetto alle NTC2018.

La combinazione "SLUext" si riferisce alla combinazione allo Stato Limite Ultimo per azioni di tipo eccezionale. In questa combinazione i carichi da vento utilizzati sono gli "Extreme loads" (W\_Extreme); tali carichi saranno amplificati con il coefficiente amplificativo 1.10 in quanto si fa riferimento a carichi in condizione "Abnormal", come riportato nella sottostante tabella estratta da [10] IEC 61400-1: Wind turbines - Part:1 Design requirements. Si precisa che i valori dei carichi inseriti nel modello ad Elementi Finiti sono già amplificati del fattore 1.10, quindi nella tabella delle combinazioni di carico non sono previsti ulteriori fattori amplificativi.

La combinazione "SLV1" rappresenta la combinazione allo Stato Limite Ultimo per sisma.

La combinazione "SLV2" rappresenta la combinazione allo Stato Limite Ultimo per sisma combinata con l'azione del vento nelle normali condizioni di esercizio della turbina (W\_QP), come indicato al paragrafo 11.1 delle [10] IEC 61400-1: Wind turbines - Part:1 Design requirements.

La combinazione "SLer" contiene i carichi da vento caratteristici (W\_Characteristic).

La combinazione "SLEf" contiene i carichi da vento in condizione frequente (W\_Frequent), ovvero i "Production loads" con probabilità di eccedenza 1e-04.

La combinazione "SLEqp" contiene i carichi da vento in condizione quasi-permanente (W\_QP), ovvero i "Production Loads" con probabilità di eccedenza di 1e-02.

Unfavourable loads			Favourable <sup>9</sup> loads
Type of design situation (see Table 2)			All design situations
Normal (N)	Abnormal (A)	Transport and erection (T)	
1,35*	1,1	1,5	0,9

\* For design load case DLC 1.1, given that loads are determined using statistical load extrapolation at prescribed wind speeds between  $V_{in}$  and  $V_{out}$ , the partial load factor for normal design situations shall be  $\gamma_f = 1,25$ .

If for normal design situations the characteristic value of the load response  $F_{gravity}$  due to gravity can be calculated for the design situation in question, and gravity is an unfavourable load, the partial load factor for combined loading from gravity and other sources may have the value

$$\gamma_f = 1,1 + \phi_S^2$$

$$\phi = \begin{cases} 0,15 & \text{for DLC1.1} \\ 0,25 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\phi = \begin{cases} 1 - \left| \frac{F_{gravity}}{F_R} \right| & \left| F_{gravity} \right| \leq \left| F_R \right| \\ 1 & \left| F_{gravity} \right| > \left| F_R \right| \end{cases}$$

Oltre ai casi di carico sopra elencati sono state introdotte anche delle combinazioni di involucro delle combinazioni di stato limite ultimo ("SLUenv").

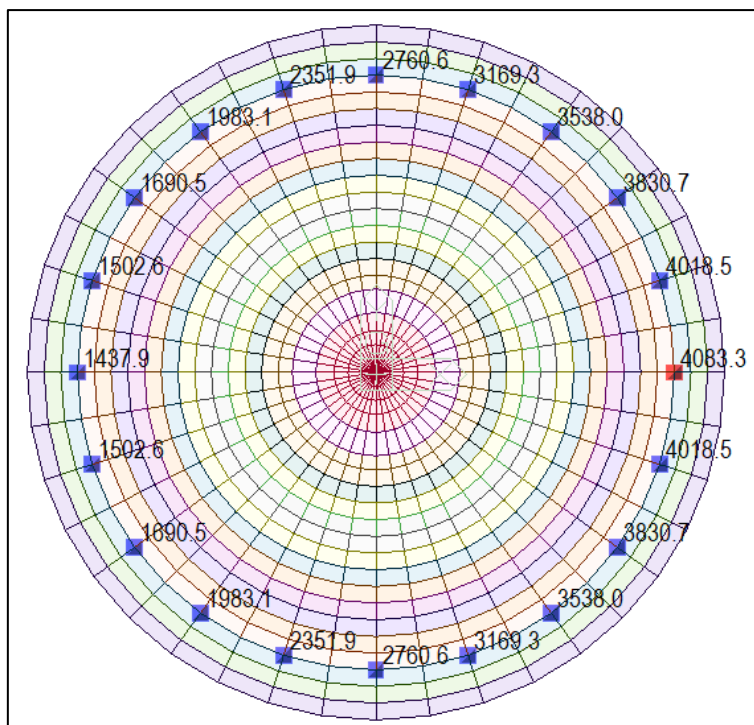
#### 4.6.6 Giudizio motivato accettabilità dei risultati

Al fine di validare il modello di calcolo vengono confrontati i risultati ottenuti da:

- Modello di calcolo FEM;
- Calcolo manuale su piastra rigida delle reazioni alla testa dei pali con foglio excel.

Visti gli spessori degli elementi assunti i due risultati portano a valori di reazione verticale simile.

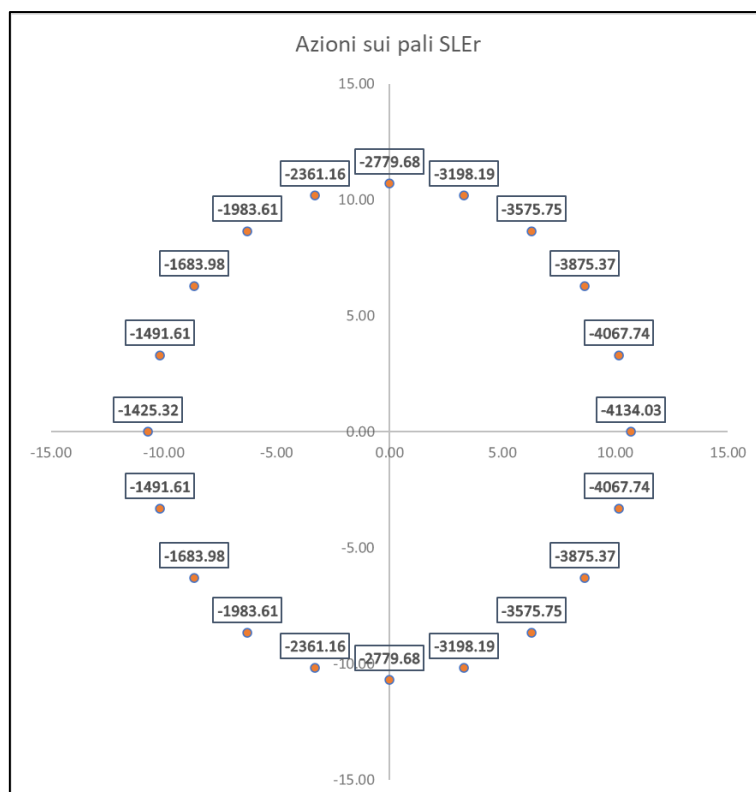
Le valutazioni vengono eseguite sulla combinazione di carico "SLer".



**Figura 4-19: Reazioni verticali su modello FEM**

Di seguito, elaborazione con foglio di calcolo Excel e relative reazioni sui pali ottenute:

DATI DI INPUT									
Raggio del basamento				Rb	12.5	m			
Raggio colletto				Rc	3	m			
Diametro del basamento				Rb	25	m			
Diametro colletto				Dc	6	m			
Altezza minima basamento				hmin	1.5	m			
Altezza massima basamento				hmax	3.75	m			
Altezza colletto				hc	0.5	m			
Diametro del palo				Øp	1.2	m			
Raggio d'asse pali				Rp	10.7	m			
Lunghezza palo				Lp	15	m			
Peso specifico terreno				γ	18	kN/mc			
Altezza massima terreno				ht	2.25	m			
Larghezza porzione terreno				Lt	9.5	m			
PESO DEL BASAMENTO									
Volume cilindro inferiore				Vinf	736.3	m3			
Volume tronco di cono				Vsup	477.7	m3			
Volume colletto				Vcol	14.1	m3			
Volume basamento				V	1228.2	m3			
Volume terreno				Vt	520.4	m3			
Peso basamento				G1,b	-30704.15945	kN			
Peso palo				G1,p	-423.9	kN			
Peso terreno				G2, terreno	-9367.640244	kN			
FORZE ALL'INNESTO DELLA TURBINA									
Coefficiente di combinazione pesi permanenti				γG1	1				
Coefficiente di combinazione sovraccarichi				γQ	1				
Forza verticale				Fz	-7043.74	kN			
Forza orizzontale direzione X				Fx	1322.49	kN			
Forza orizzontale direzione Y				Fy	0	kN			
Quota di applicazione delle forze				zF	4.7	m			
Momento attorno a Y				My	138700	kN m			
Momento attorno a X				Mx	0	kN m			
Torsione alla base				Mz	-15953	kN m			
CARICHI SLE									
Forza verticale				Fz	-55593.54	kN		Contributo taglio su palo	
Forza orizzontale direzione X				Fx	1322.49	kN		66.1245	
Forza orizzontale direzione Y				Fy	0.00	kN		0	
Momento attorno a Y				My	144915.70	kN m			
Momento attorno a X				Mx	0.00	kN m			
Torsione alla base				Mz	-15953.00	kN m		-74.547	
Numero pali				np	20				
Distanza angolare pali				α	18	°			
<b>n<sub>pi</sub></b>	<b>α<sub>i</sub></b>	<b>X<sub>i</sub></b>	<b>Y<sub>i</sub></b>	<b>X<sub>i</sub><sup>2</sup></b>	<b>Y<sub>i</sub><sup>2</sup></b>	<b>Fz/n<sub>p</sub></b>	<b>My*Xy/Jy</b>	<b>Mx*Yi/Jx</b>	<b>N<sub>p</sub></b>
1	0	10.70	0.00	114.49	0.00	-2779.68	-1354.35	0.00	-4134.03
2	18	10.18	3.31	103.56	10.93	-2779.68	-1288.07	0.00	-4067.74
3	36	8.66	6.29	74.93	39.56	-2779.68	-1095.69	0.00	-3875.37
4	54	6.29	8.66	39.56	74.93	-2779.68	-796.07	0.00	-3575.75
5	72	3.31	10.18	10.93	103.56	-2779.68	-418.52	0.00	-3198.19
6	90	0.00	10.70	0.00	114.49	-2779.68	0.00	0.00	-2779.68
7	108	-3.31	10.18	10.93	103.56	-2779.68	418.52	0.00	-2361.16
8	126	-6.29	8.66	39.56	74.93	-2779.68	796.07	0.00	-1983.61
9	144	-8.66	6.29	74.93	39.56	-2779.68	1095.69	0.00	-1683.98
10	162	-10.18	3.31	103.56	10.93	-2779.68	1288.07	0.00	-1491.61
11	180	-10.70	0.00	114.49	0.00	-2779.68	1354.35	0.00	-1425.32
12	198	-10.18	-3.31	103.56	10.93	-2779.68	1288.07	0.00	-1491.61
13	216	-8.66	-6.29	74.93	39.56	-2779.68	1095.69	0.00	-1683.98
14	234	-6.29	-8.66	39.56	74.93	-2779.68	796.07	0.00	-1983.61
15	252	-3.31	-10.18	10.93	103.56	-2779.68	418.52	0.00	-2361.16
16	270	0.00	-10.70	0.00	114.49	-2779.68	0.00	0.00	-2779.68
17	288	3.31	-10.18	10.93	103.56	-2779.68	-418.52	0.00	-3198.19
18	306	6.29	-8.66	39.56	74.93	-2779.68	-796.07	0.00	-3575.75
19	324	8.66	-6.29	74.93	39.56	-2779.68	-1095.69	0.00	-3875.37
20	342	10.18	-3.31	103.56	10.93	-2779.68	-1288.07	0.00	-4067.74
G		0.00	0.00						
J <sub>i</sub>				1144.9	1144.90				
Massima azione su palo					N <sub>p,MAX</sub>	-1425.32	kN		
Minima azione su palo					N <sub>p,MIN</sub>	-4134.03	kN		
Taglio su palo singolo					V <sub>p,MIN</sub>	-8.42	kN		



**Figura 4-20: Reazioni verticali foglio di calcolo Excel**

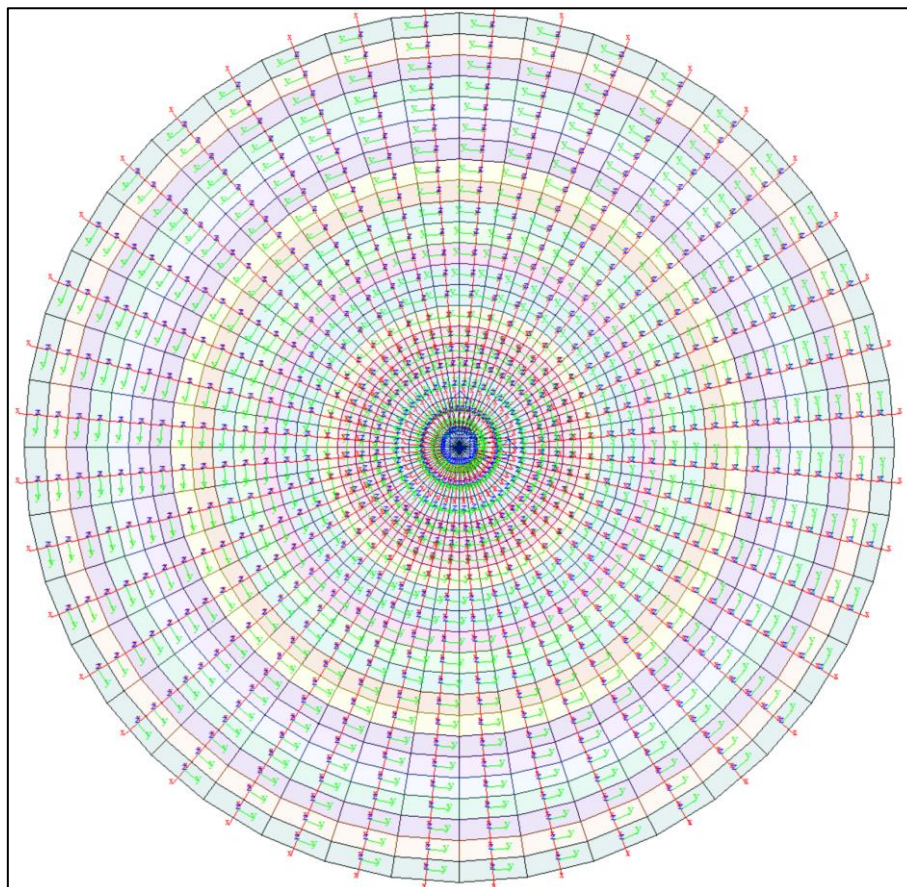
Lo scarto tra i risultati forniti dai due modelli è trascurabile; il modello FEM risponde in maniera efficace agli input dati.

## 4.7 RISULTATI DEL MODELLO FEM E VERIFICHE

### 4.7.1 Direzioni fissate per gli assi locali degli elementi

L'analisi strutturale è stata eseguita facendo riferimento al sistema di riferimento globale per la definizione delle azioni agenti.

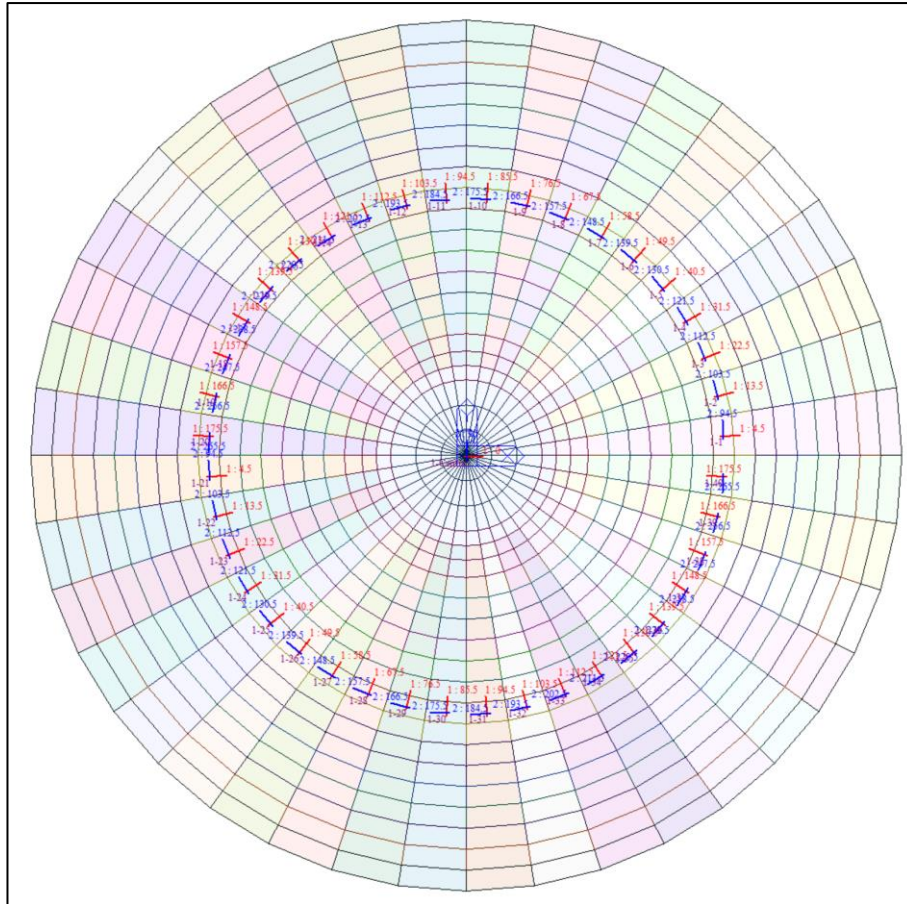
Per migliorare la lettura delle sollecitazioni sono stati orientati gli assi di riferimento locale degli elementi in direzione radiale (assi x) e circonferenziale (assi y).



**Figura 4-21: Assi di riferimento locali su elementi plate**

Le armature che verranno assegnate agli elementi plate vengono definite in direzione circonferenziale e radiale per gli elementi posti esternamente al nucleo di innesto della torre della turbina eolica, la porzione centrale ha armature definite in direzione X e Y.



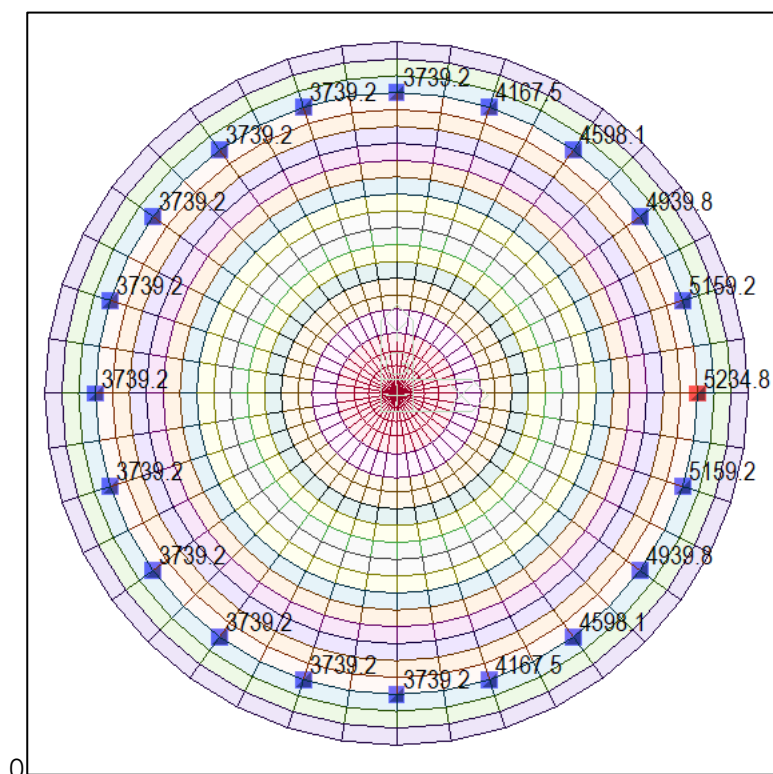


**Figura 4-22: Assi di riferimento delle armature**



#### 4.7.2 Azioni assiali sui pali

Nell'immagine sottostante si riportano le reazioni massime misurate alla base dei pali per l'involuppo delle combinazioni SLU e SLV. Le forze sono indicate in kN ed il software indica con il segno (+) azioni assiali di compressione.



**Figura 4-23: Reazioni verticali massime riportate alla punta del palo**

Si è provveduto a stimare la portata verticale limite mediante metodi statici considerando la stratigrafia ed i relativi parametri di progetto riportata al paragrafo 4.2, se ne riportano i risultati, che prevedono l'impiego di pali di diametro 1.2 m e lunghezza 15 m per poter fornire una portata compatibile con le reazioni risultate dal calcolo. La verifica di capacità portante è stata condotta mediante l'Approccio 2 e la combinazione A1+M1+R3 come riportato al paragrafo 6.4.3.1. della Normativa. Nell'inserimento dei parametri geotecnici relativi alla stratigrafia di progetto si è tenuto in conto della profondità dello scavo di sbancamento per la realizzazione del plinto, assunta preliminarmente pari a 4 m da p.c.

**CALCOLO PORTATA PALI TRIVELLATI**

**DATI DI INPUT**

D	diametro del palo	1.20	[m]	FS	Coefficiente parziale resistenza alla base	$\gamma_b$	1.35	[-]
L	lunghezza massima di calcolo	15.00	[m]		Coefficiente parziale resistenza laterale	$\gamma_l$	1.15	[-]
$z_w$	profondità della falda dal p.c.	10.00	[m]		Fattori di correlazione $\xi$	$\xi$	1.70	[-]
$f_{cd}$	resistenza di calcolo del c.l.s.	14.17	[Mpa]					

$n^\circ$ strato	tipo terreno	$DH_i$ [m]	$H_i$ [m]	$\gamma_n$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma'$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$N_{SPT}$ [-]	$f$ [°]	$K$ [-]	$c_u$ [kPa]	$\alpha$ [-]	$c_a$ [kPa]
1a	Andesiti	6.00	6.00	21.00	21.00	-	35.00	0.40		0.00	0.00
1b	Andesiti	9.00	15.00	21.00	11.00	-	35.00	0.40		0.00	0.00
					0.00					0.00	0.00
					0.00					0.00	0.00
					0.00					0.00	0.00
					0.00					0.00	0.00
					0.00					0.00	0.00
					0.00					0.00	0.00
					0.00					0.00	0.00
					0.00					0.00	0.00

**LEGENDA**

$DH_i$	spessore dello strato
$H_i$	profondità dello strato dal p.c.
$\gamma_n$	peso specifico del terreno naturale
$\gamma'$	peso specifico efficace
$N_{SPT}$	Numero colpi al piede (solo granulari)
$\phi$	angolo di attrito (solo granulari)
$K$	rapporto tra $\sigma_v/\sigma_v$
$c_u$	coesione non drenata (solo coesivi)
$c_a = \alpha C_t$	adesione (solo coesivi)

**PORTATA ALLA BASE - protocollo di Berenzanvez**

$n^\circ$ strato	tipo terreno	$DH_i$ [m]	$H_i$ [m]	$\gamma_n$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma'$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$N_{SPT}$ [-]	$f$ [°]	$K$ [-]	$c_u$ [kPa]	$\alpha$ [-]	$c_a$ [kPa]
0		9.00	15.00	21.00	11.00	0.00	35.00	0.40	0.00	0.00	0.00

$A_b$	Area della base del palo	1.13	[m <sup>2</sup> ]	$\phi$	26	30	34	37	40
$s_{v,L}$	Pressione geostatica di base	225	[kPa]	$B_k$	20.00	33.00	63.00	104.00	186.00
$N_{q,v}B_k$	Coeff. di pressione geostatica	42.84	[kPa]	H/D	26	30	34	37	40
$c$	Coessione alla base	0.00	[kPa]	5	0.75	0.77	0.81	0.83	0.85
$N_c$	Coeff. di coessione	9.00	[kPa]	10	0.62	0.67	0.73	0.76	0.79
				15	0.55	0.61	0.68	0.73	0.77
				20	0.49	0.57	0.65	0.71	0.75
				25	0.44	0.53	0.63	0.70	0.74

$Q_{b,lim}$	Portata limite di base	6412.62	[kN]
$Q_{b,amm}$	Portata amm. di base	4750.09	[kN]

Tabella per il calcolo di  $B_k$

Tabella per il calcolo di  $v$

H/D 12.5

**PORTATA LATERALE - protocollo di Viggiani**

$\sigma_{v,i}$	$\sigma_{v,i+1}$	$\sigma_{v,med}$	$\sigma_{h,med}$		$c_u$	$\sigma$		$\sigma = c_u + \sigma_{h,med} \cdot \tan \phi$	
$\sigma_{h,1}$	tensione laterale strato 1°	0.00	126.00	63.00	25.20	[kPa]	0.00	17.65	105.8714
$\sigma_{h,2}$	tensione laterale strato 2°	126.00	225.00	175.50	70.20	[kPa]	0.00	49.15	442.3911
$\sigma_{h,3}$	tensione laterale strato 3°	0.00	0.00	0.00	0.00	[kPa]	0.00	0.00	0
$\sigma_{h,4}$	tensione laterale strato 4°	0.00	0.00	0.00	0.00	[kPa]	0.00	0.00	
$\sigma_{h,5}$	tensione laterale strato 5°	0.00	0.00	0.00	0.00	[kPa]	0.00	0.00	
$\sigma_{h,6}$	tensione laterale strato 6°	0.00	0.00	0.00	0.00	[kPa]	0.00	0.00	
$\sigma_{h,7}$	tensione laterale strato 7°	0.00	0.00	0.00	0.00	[kPa]	0.00	0.00	
$\sigma_{h,8}$	tensione laterale strato 8°	0.00	0.00	0.00	0.00	[kPa]	0.00	0.00	
$\sigma_{h,9}$	tensione laterale strato 9°	0.00	0.00	0.00	0.00	[kPa]	0.00	0.00	

$Q_{l,lim}$	Portata limite laterale	2066.90	[kN]	Peso proprio palo	424.12	[kN]	<input checked="" type="radio"/>	tenere in conto nel calcolo della portata
$Q_{l,amm}$	Portata amm. laterale	1057.24	[kN]				<input type="radio"/>	non tenere in conto nel calcolo della portata

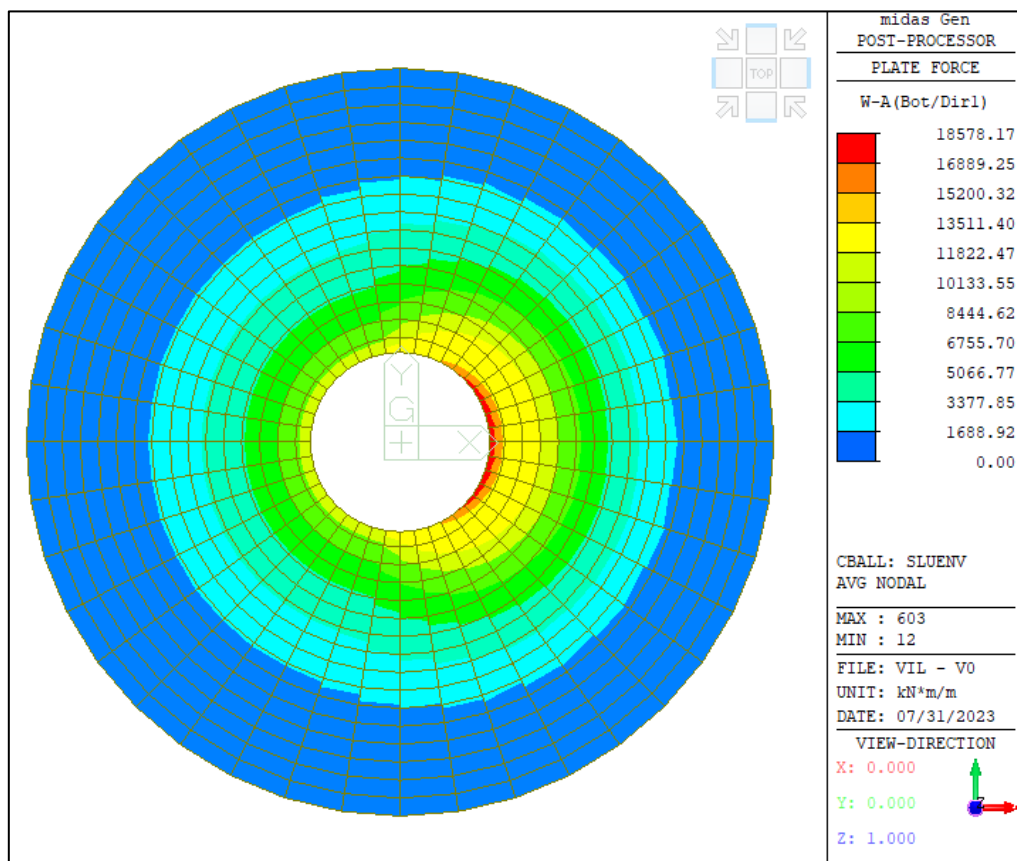
**PORTATA PALO**

**PORTATA TOTALE LIMITE** 5383.21 [kN]

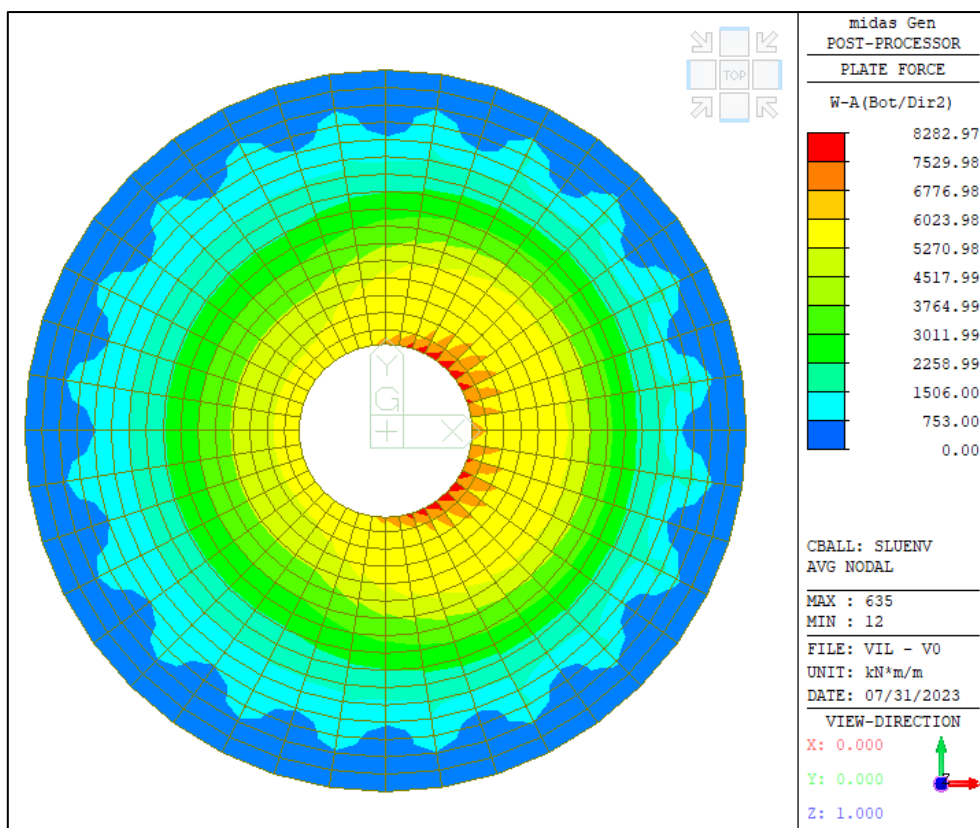
### 4.7.3 Azioni sul basamento

Si riportano di seguito le sollecitazioni flettenti e taglianti sul basamento, calcolate secondo la teoria Wood Armer, in direzione radiale e circonferenziale per le diverse combinazioni indicate.

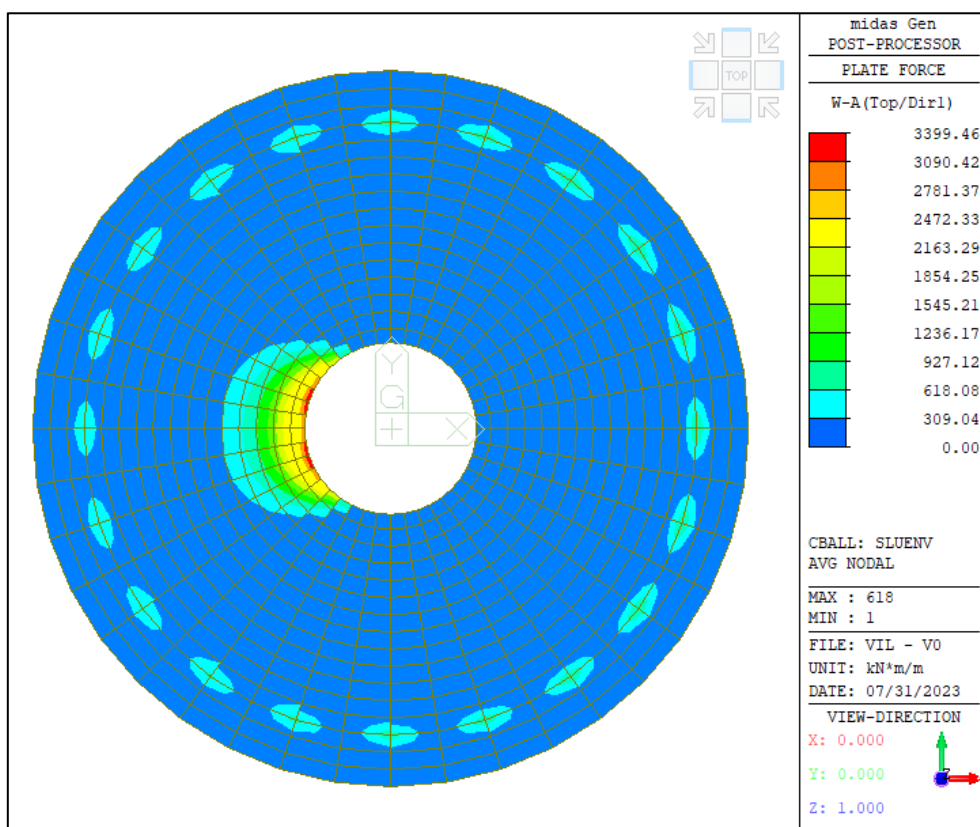
Inviluppo delle combinazioni SLU: "SLUenv"



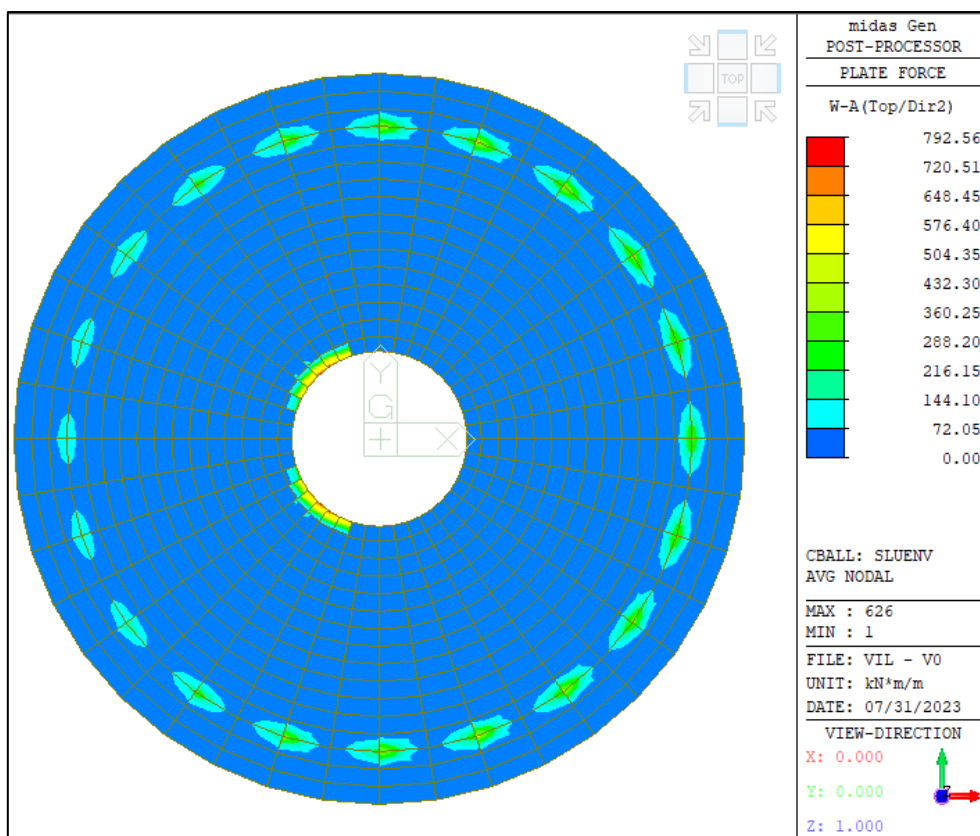
**Figura 4-24: SLUenv: Momento direzione radiale, Bottom**



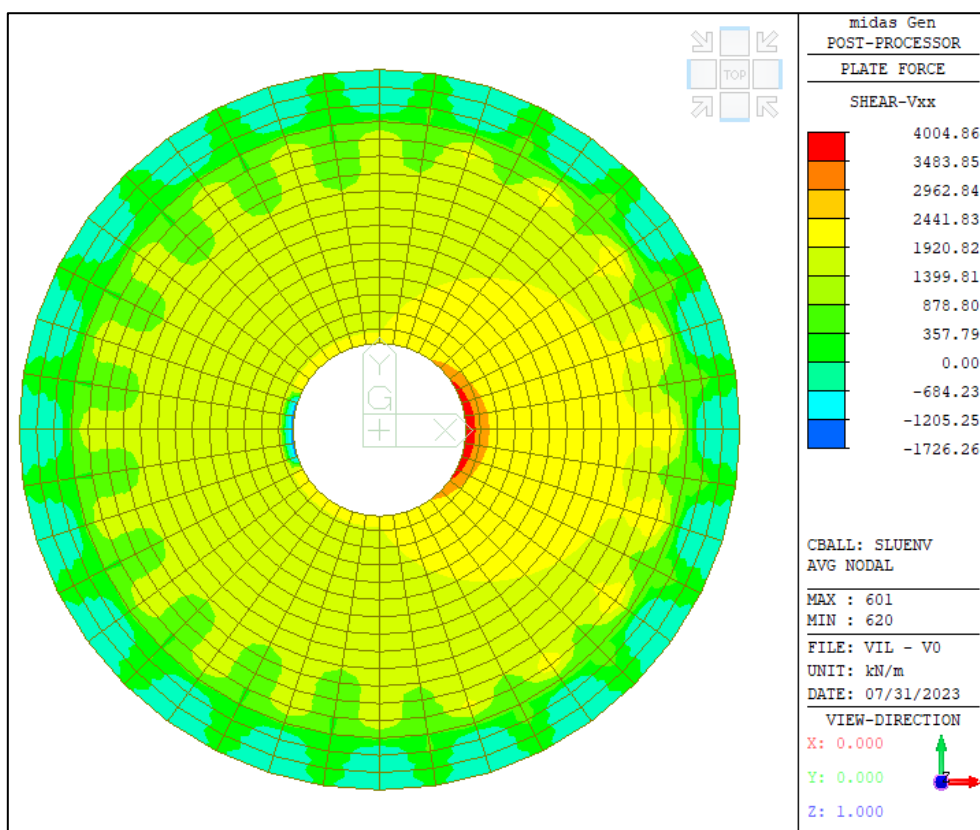
**Figura 4-25: SLUenv: Momento direzione circonferenziale, Bottom**



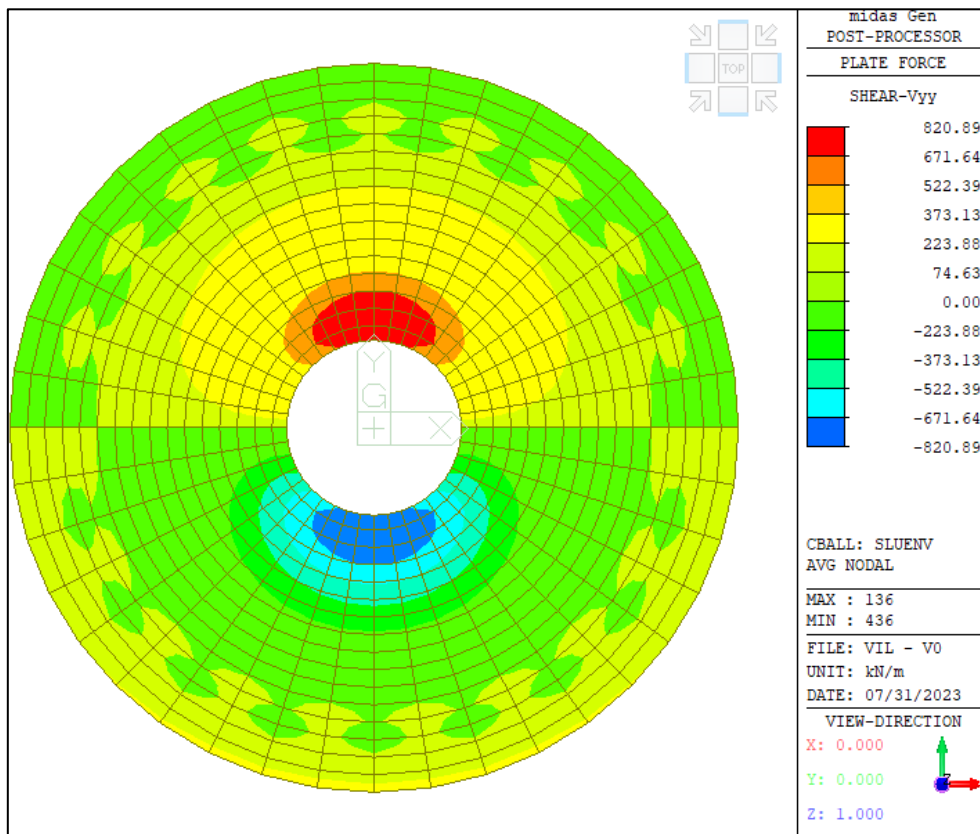
**Figura 4-26: SLUenv: Momento direzione radiale, Top**



**Figura 4-27: SLUenv: Momento direzione Circonferenziale, Top**



**Figura 4-28: SLUenv: Taglio Vxx**



**Figura 4-29: SLUenv: Taglio Vyy**

Combinazione "SLV2":

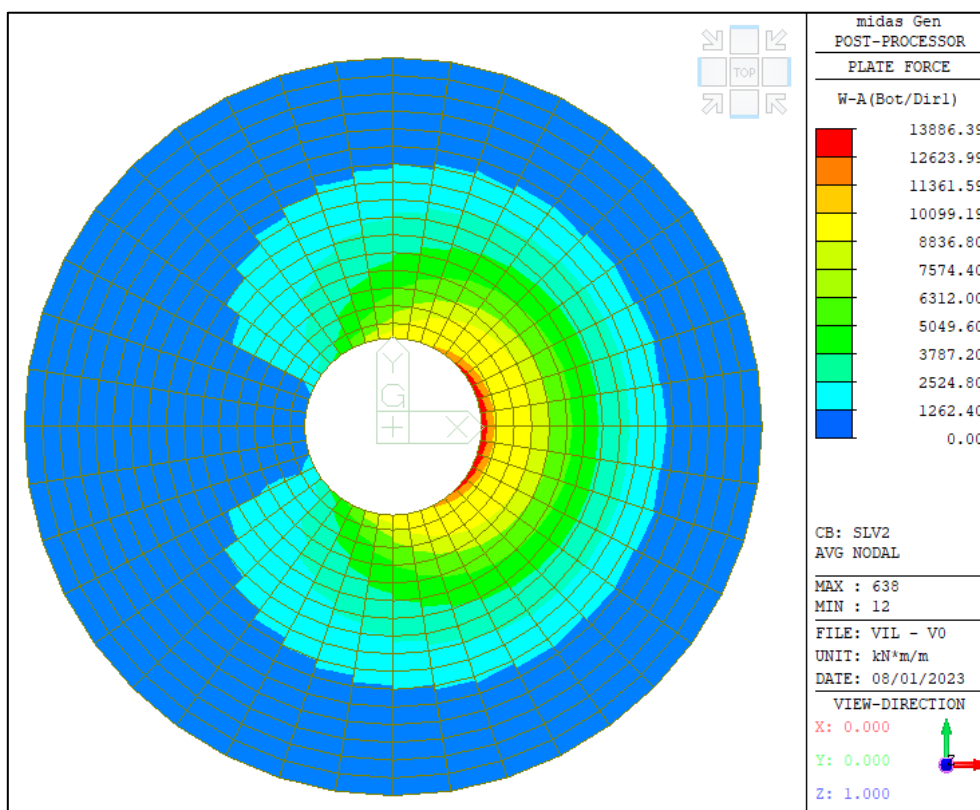


Figura 4-30: SLV2: Momento direzione radiale, Bottom

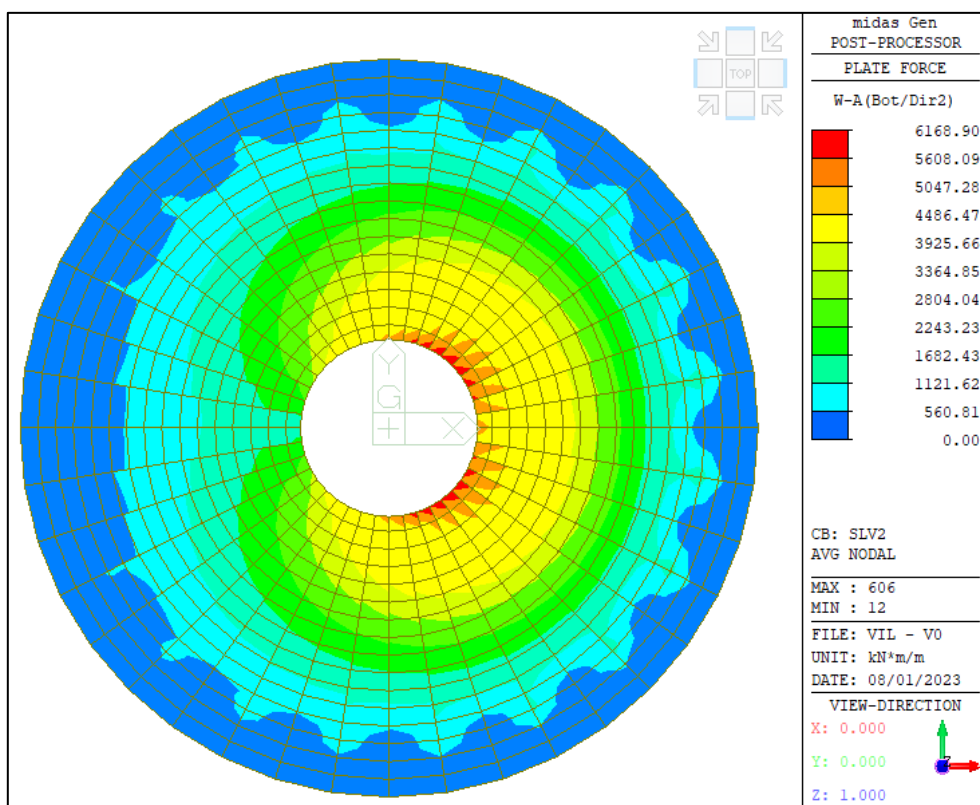


Figura 4-31: SLV2: Momento direzione circonferenziale, Bottom



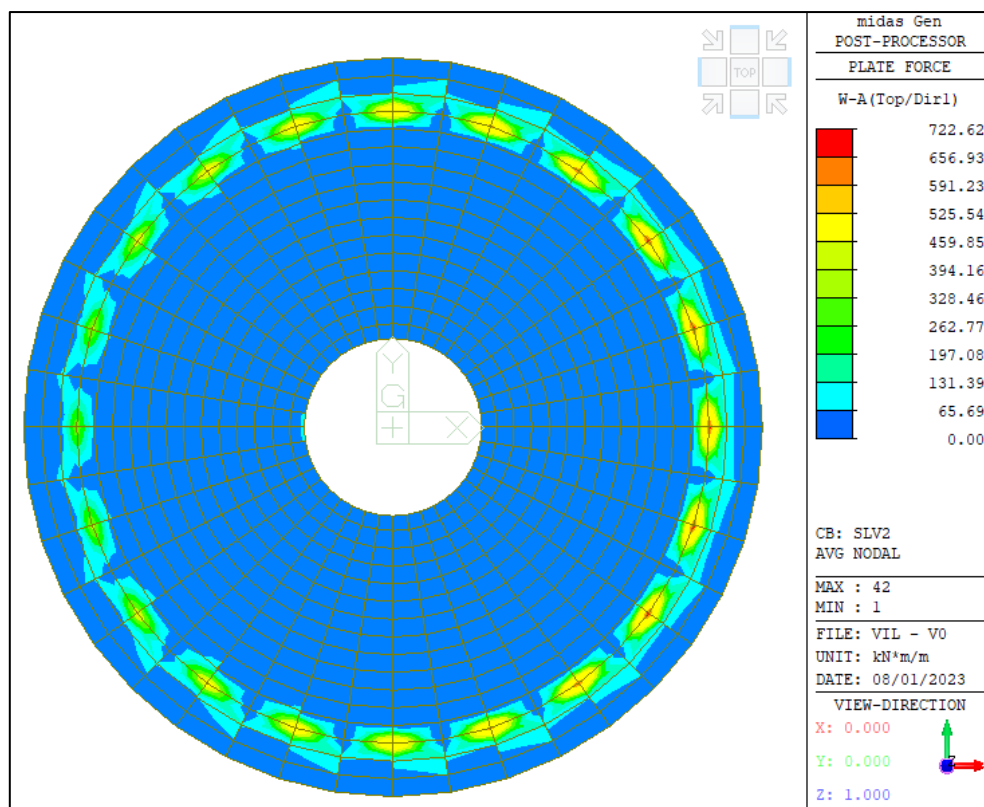


Figura 4-32: SLV2: Momento direzione radiale, Top

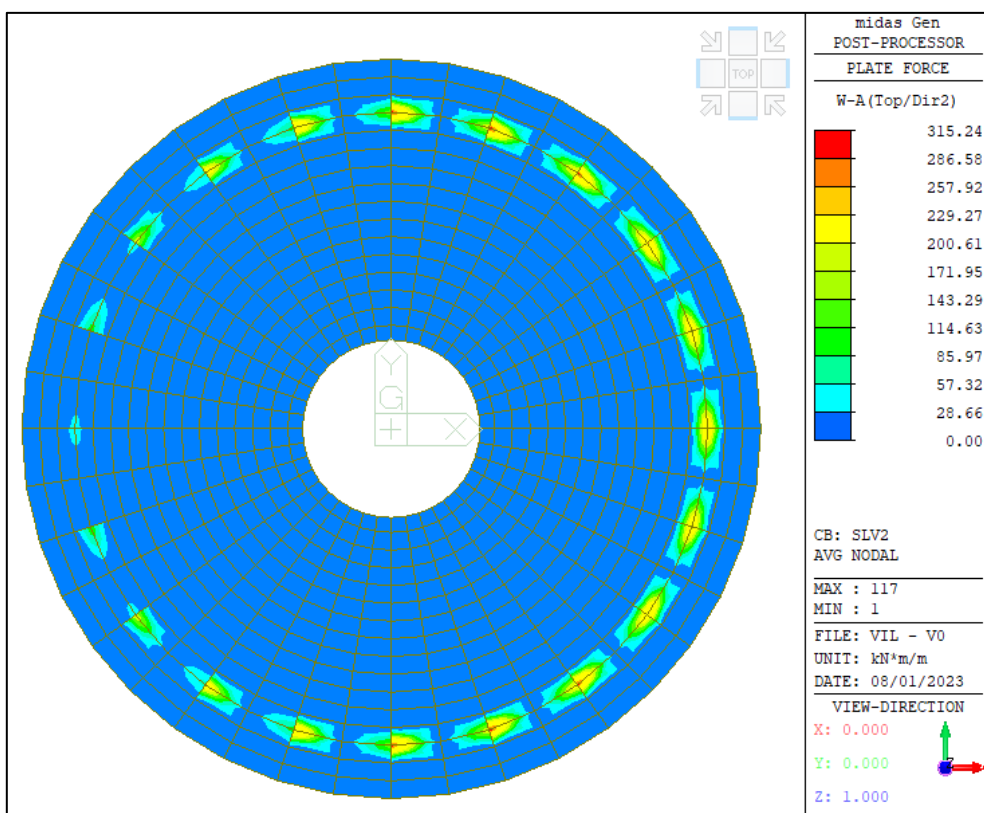


Figura 4-33: SLV2: Momento direzione circonferenziale, Top



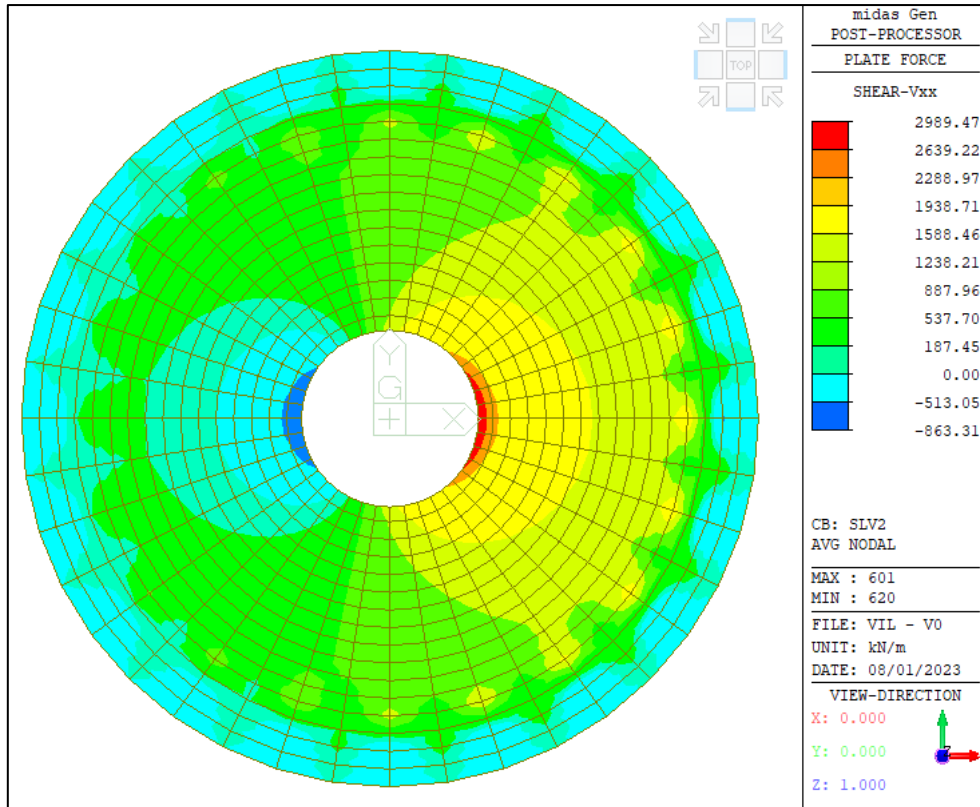


Figura 4-34: SLV2: Taglio Vxx

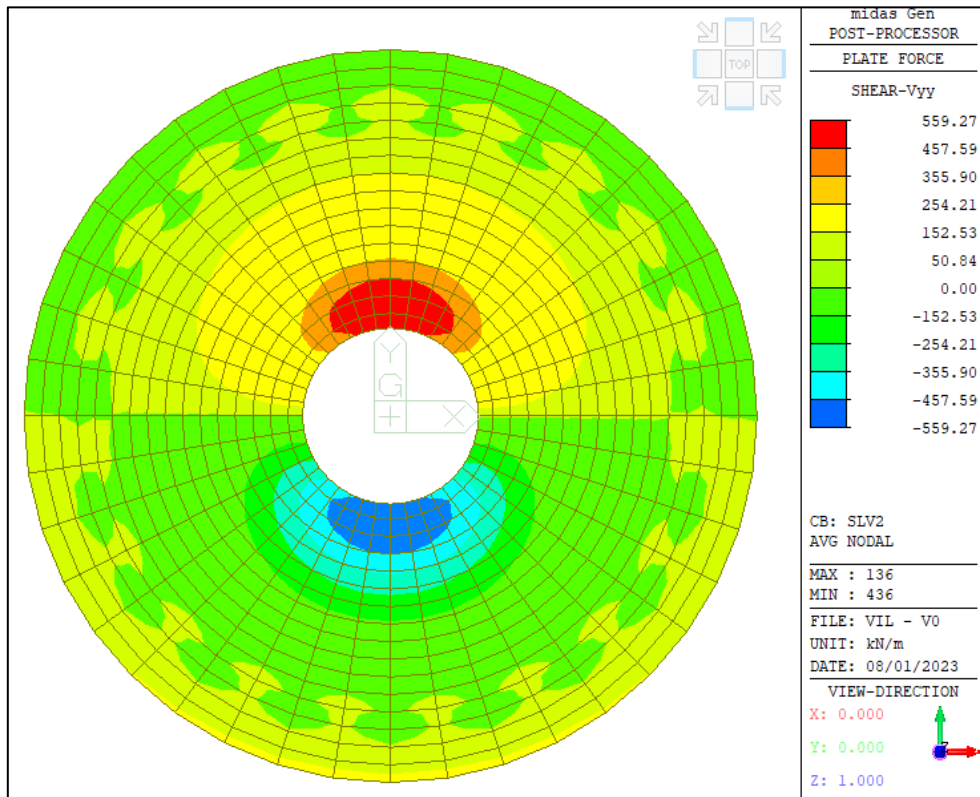
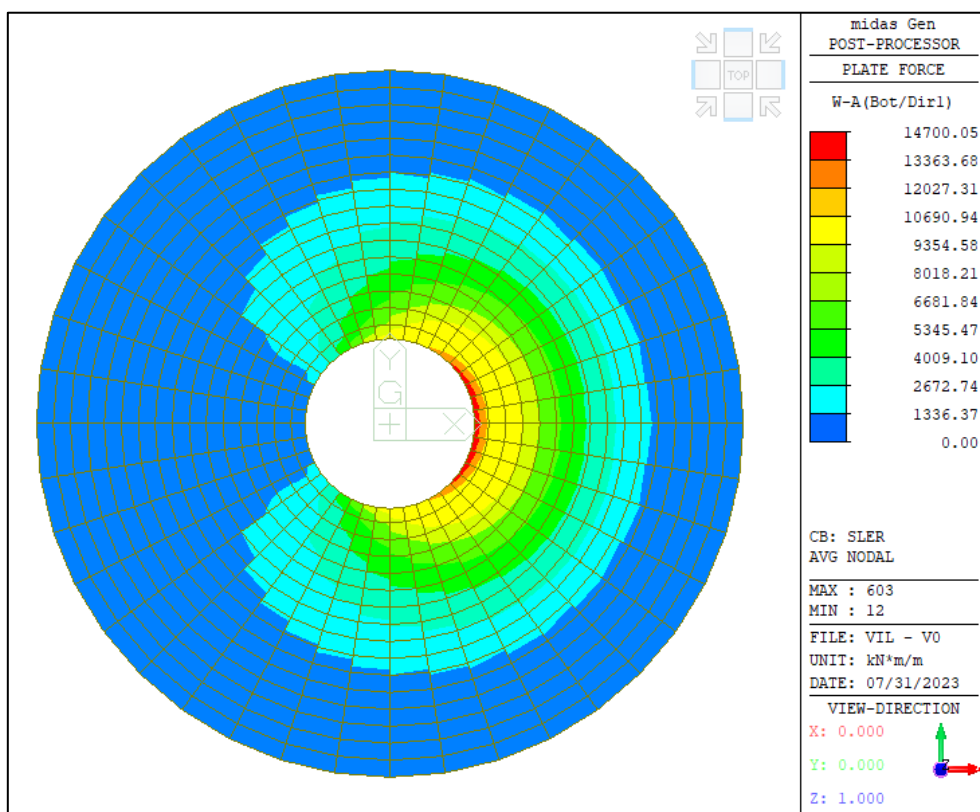
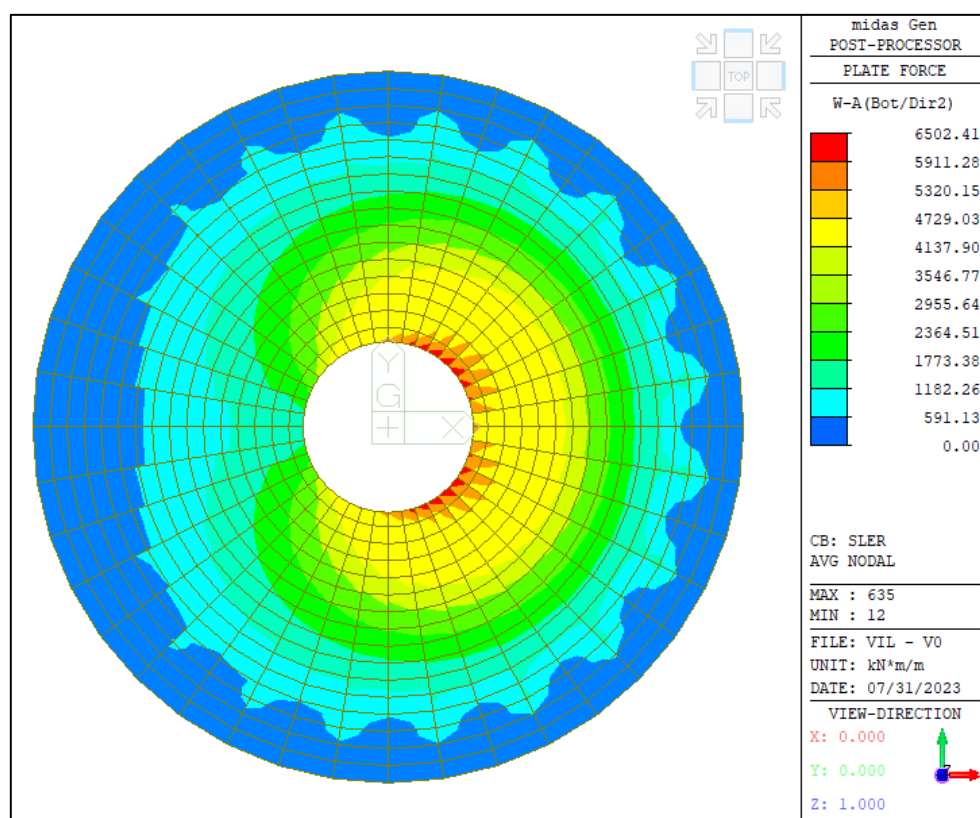


Figura 4-35: SLV2: Taglio Vyy

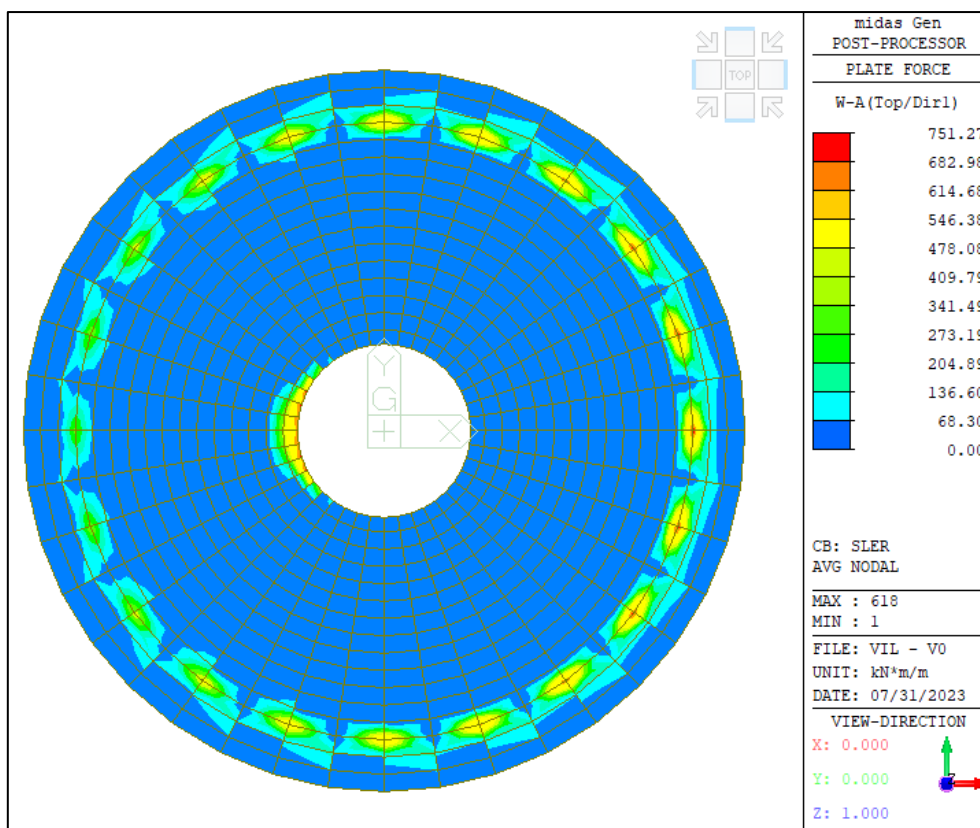
Combinazione "SLer":



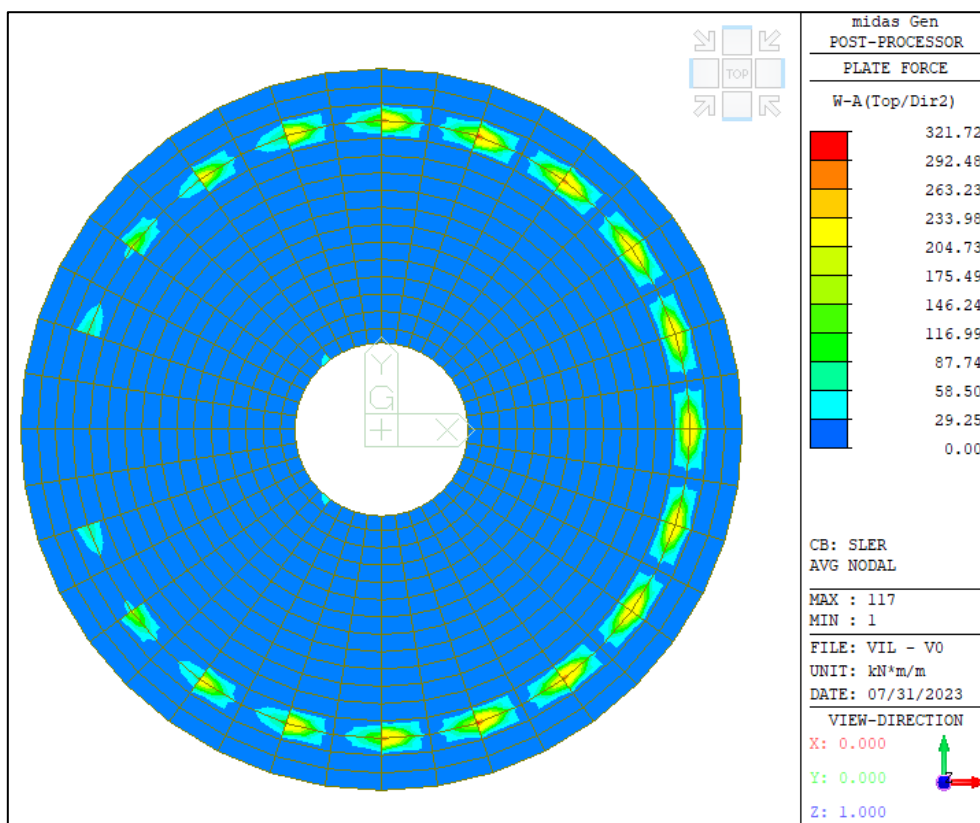
**Figura 4-36: SLer: Momento direzione radiale, Bottom**



**Figura 4-37: SLer: Momento direzione circonferenziale, Bottom**



**Figura 4-38: SLER: Momento direzione radiale, Top**



**Figura 4-39: SLER: Momento direzione circonferenziale, Top**

Combinazione "SLEqp":

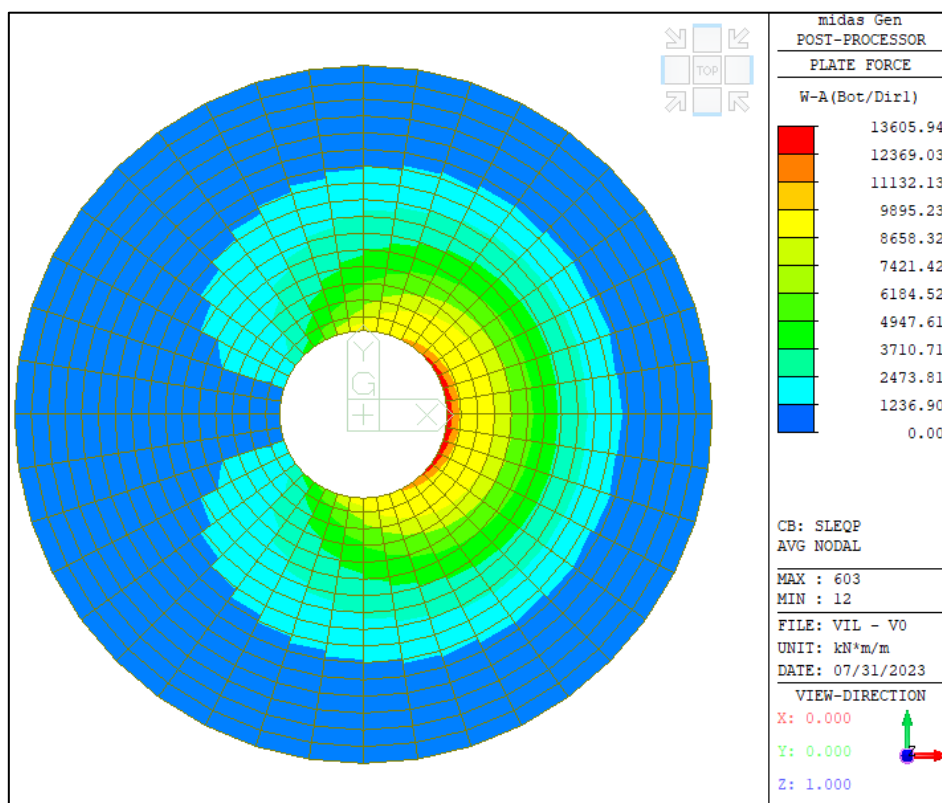


Figura 4-40: SLEqp: Momento direzione radiale, Bottom

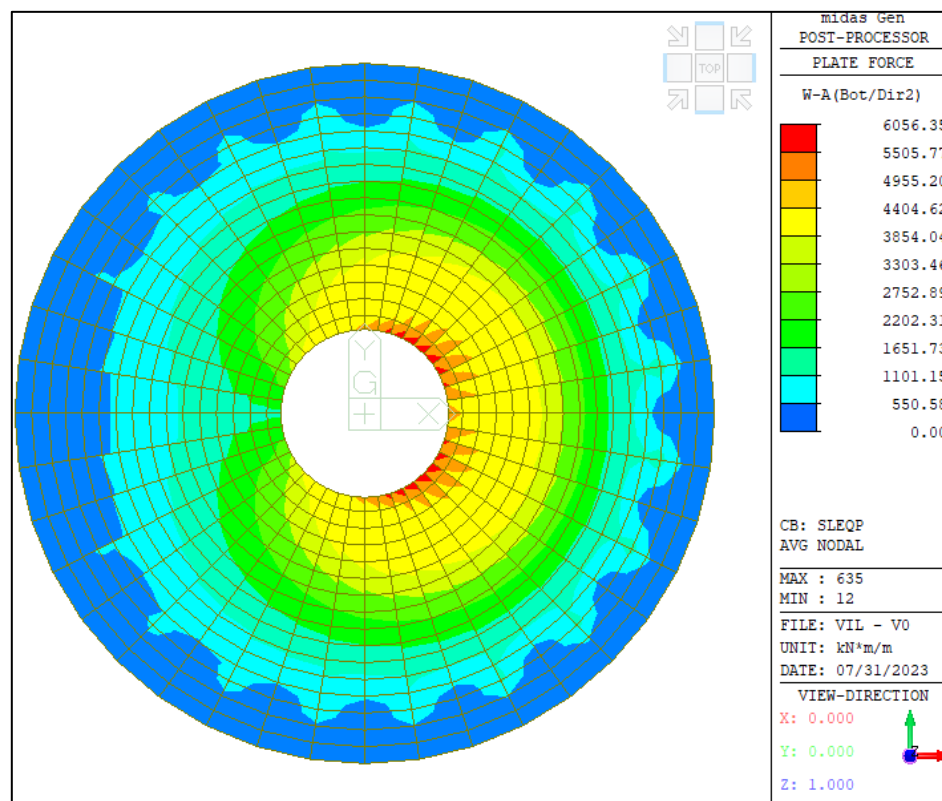
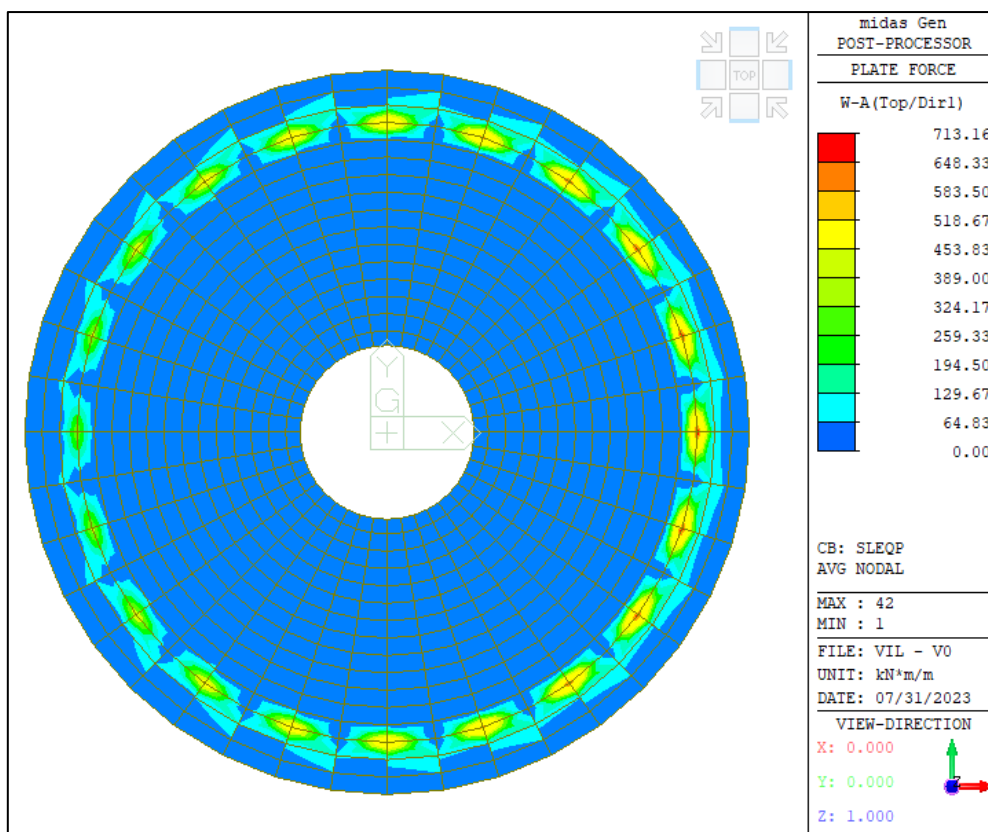
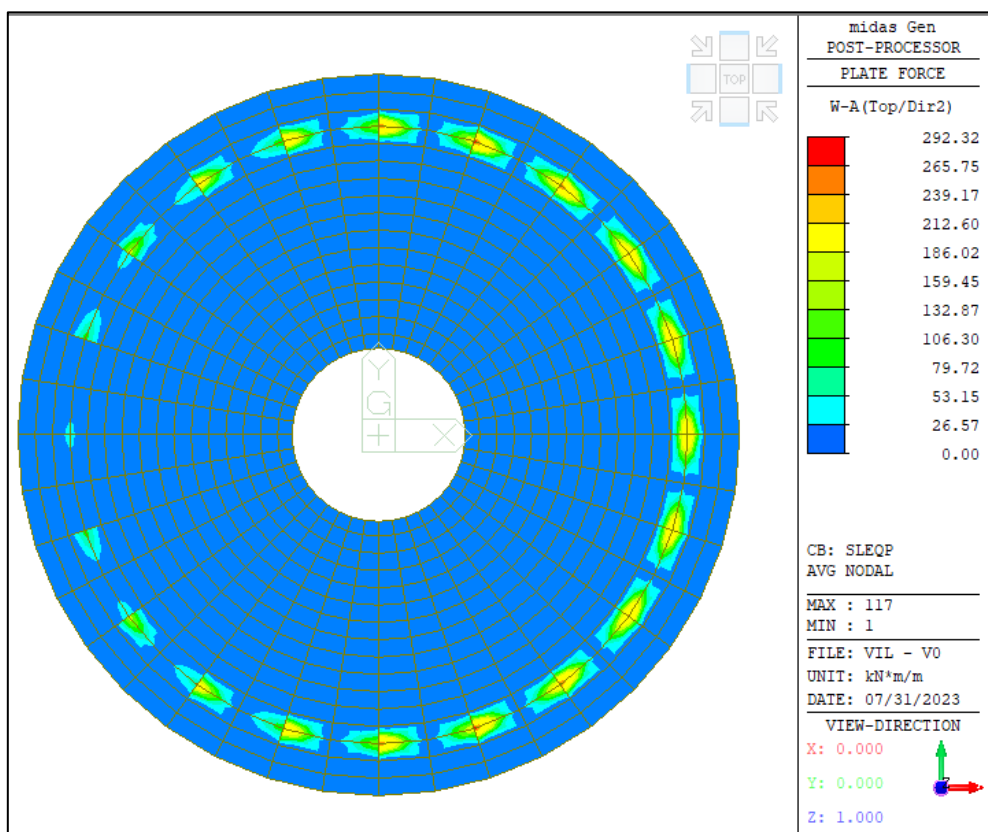


Figura 4-41: SLEqp: Momento direzione circonferenziale, Bottom



**Figura 4-42: SLEqp: Momento direzione radiale, Top**



**Figura 4-43: SLEqp: Momento direzione circonferenziale, Top**



#### 4.7.4 Verifica degli elementi strutturali

Le verifiche sugli elementi strutturali vengono eseguite come segue:

- SLU: Verifica con acciaio snervato e calcestruzzo con deformazione allo 0.35%
- SLV: Verifica con acciaio snervato e calcestruzzo in campo elastico
- SLE caratteristica (rara): verifica tensionale sulla massima tensione delle fibre d'acciaio  $\sigma_s \leq 0.8 * f_{yk}$  e sulla massima tensione di compressione del calcestruzzo  $\sigma_c \leq 0.6 * f_{ck}$
- SLE frequente: verifica che la massima apertura di fessura sia inferiore al valore  $w_3 \leq 0.3\text{mm}$ .
- SLE quasi permanente: verifica sulla massima tensione di compressione del calcestruzzo  $\sigma_c \leq 0.45 * f_{ck}$  e che la massima apertura di fessura risulti inferiore al limite  $w_2 \leq 0.2\text{mm}$ .

#### 4.7.5 Verifica strutturale del palo

Sul palo sono state disposti 16Ø20 longitudinali e un'armatura a spirale Ø10/25 su tutta la sua lunghezza per garantire adeguato confinamento. Tale armatura è maggiore del minimo indicato ai paragrafi 4.1.6.1.2 delle NTC2018.

**Verifica C.A. S.L.U. - File: SLU\_longitudinale**

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2018 ?

**Titolo:** SLU\_longitudinale

**Sezione circolare cava**

Raggio esterno: 60 [cm]  
Raggio interno: 0 [cm]  
N° barre uguali: 16  
Diametro barre: 2 [cm]  
Copriferro (baric.): 9 [cm]

N° barre: 0 Zoom

**Sollecitazioni**

S.L.U. Metodo n

N<sub>Ed</sub>: 0 kN  
M<sub>xEd</sub>: 0 kNm  
M<sub>yEd</sub>: 0 kNm

**P.to applicazione N**

Centro Baricentro cls  
Coord.[cm] xN: 0 yN: 0

**Tipo rottura**

Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

**Materiali**

B450C C25/30

$\epsilon_{su}$ : 67.5 ‰  $\epsilon_{c2}$ : 2 ‰  
 $f_{yd}$ : 391.3 N/mm<sup>2</sup>  $\epsilon_{cu}$ : 3.5 ‰  
 $E_s$ : 200.000 N/mm<sup>2</sup>  $f_{cd}$ : 14.17 N/mm<sup>2</sup>  
 $E_s/E_c$ : 15  $f_{cc}/f_{cd}$ : 0.8  
 $\epsilon_{syd}$ : 1.957 ‰  $\sigma_{c,adm}$ : 9.75 N/mm<sup>2</sup>  
 $\sigma_{s,adm}$ : 255 N/mm<sup>2</sup>  $\tau_{co}$ : 0.6  
 $\tau_{c1}$ : 1.829

**M** xRd: 962 kN m

$\sigma_c$ : -14.17 N/mm<sup>2</sup>  
 $\sigma_s$ : 391.3 N/mm<sup>2</sup>  
 $\epsilon_c$ : 3.5 ‰  
 $\epsilon_s$ : 16.93 ‰  
d: 111 cm  
x: 19.02 x/d: 0.1713  
 $\delta$ : 0.7

**Metodo di calcolo**

S.L.U.+ S.L.U.-  
Metodo n

**Tipo flessione**

Retta Deviata

Vertici: 52 N° rett.: 100

Calcola MRd Dominio M-N

L<sub>0</sub>: 0 cm Col. modello

M-curvatura

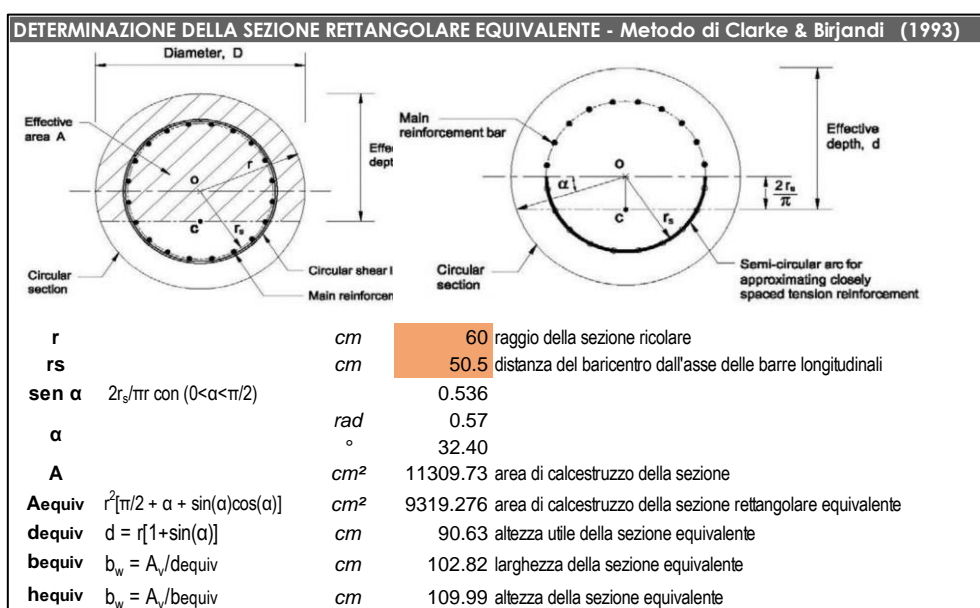
Precompresso

Le sollecitazioni di taglio vengono estratte dalle reazioni orizzontali globali e ripartite sui 20 pali presenti.

Load	$F_x$ (kN)	$F_y$ (kN)	$F_z$ (kN)	$V_{TOT}$ (kN)	$V_{PALO}$ (kN)
SLU1	0	0	75518.94	0.00	0.00
SLU2	-1318.95	0	74540.58	1318.95	65.95
SLU3	-1318.95	0	56173.35	1318.95	65.95
SLUext	-1667.6	0	56369.63	1667.60	83.38
SLV1	-61.57	-18.47	55594.68	64.28	3.21
SLV2	-1038.57	-18.47	55632.33	1038.73	51.94

Si considera il valore di azione sollecitante tagliante derivante dalla combinazione "SLUext", più gravosa.

La resistenza a taglio viene calcolata su una sezione rettangolare equivalente attraverso il Metodo di Clarke & Birjandi.



**Figura 4-44: Sezione rettangolare equivalente**

Verifica a taglio:

DETERMINAZIONE DELLA RESISTENZA A TAGLIO DI SEZIONI IN C.A. - NTC2018									
Caratteristiche dei materiali									
$f_{ck}$		MPa	25						
$\alpha_{cc}$			0.85						
$\gamma_c$			1.5						
$f_{cd}$	resistenza di calcolo a compressione del calcestruzzo	MPa	14.17					$a_{cc} \cdot f_{cd} / g_c$	
$\gamma_s$			1.15						
$f_{y,wd}$		MPa	391.30					$f_{y,d} / g_s$	
Caratteristiche della sezione resistente									
$V_{Ed}$	taglio sollecitante di progetto	kN	83.4						
$b_w$	larghezza della sezione	cm	102.82						
$h$	altezza totale della sezione	cm	109.99						
$c$	distanza asse barre dal lembo teso	cm	9.5						
$d$	altezza utile della sezione	cm	100.49					$h - c$	
$d^*$		cm	90.441					$0.9 d$	
$k$			1.446					$\min[1.0 + \sqrt{(20/d)}, 2.0]$	
$A_{sl}$	area di armatura longitudinale tesa	cm <sup>2</sup>	40.82						
$\rho_l$	rapporto geometrico di armatura longitudinale tesa		0.0036						
$A_{sw}$	area di armatura a taglio disposta	cm <sup>2</sup>	1.571						
$s$	spaziatura staffe	cm	25						
Controllo necessità di armatura a taglio									
$V_{Rdc1}$		kN	373.29					$[0.18 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3}] / \gamma_c \cdot b_w \cdot d$	
$V_{Rdc2}$		kN	314.45					$[0.035 \cdot k^{3/2} \cdot \sqrt{f_{ck}}] \cdot b_w \cdot d$	
$V_{Rdc}$	resistenza della sezione non armata a taglio	kN	373.29					$\max[V_{Rdc1}, V_{Rdc2}]$	
$V_{Ed} / V_{Rdc}$	non è necessario prevedere l'armatura a taglio $V_{Rdc} > V_{Ed}$								
Controllo capacità massima della sezione a taglio									
$v$	coefficiente di riduzione della resistenza del cls fessurato per taglio		0.5						
$\alpha_c$	coefficiente per effetti dello sforzo assiale di compressione		1						
$\alpha$	inclinazione armature a taglio	rad	1.571		gradi	90			
$V_{Rd,max}$	massima resistenza a taglio-comprensione della sezione	kN	3293.45					$1.0 \cdot v \cdot f_{cd} / \{ \cot(45) + \tan(45) \} \cdot b_w \cdot 0.9 \cdot d^*$	
$V_{Ed} / V_{Rd,max}$	sezione sufficiente per la resistenza taglio		0.025						
Calcolo della resistenza della sezione con armatura a taglio									
$\omega_{sw}$	percentuale meccanica di armatura trasversale (per $\alpha=90^\circ$ )		0.02					$(A_{sw} \cdot f_{y,d}) / (b \cdot s \cdot f_{cd})$	
$\vartheta_{calc}$	valore di teta calcolato	rad	0.185		= 10.58°			$\cot(\vartheta_{calc}) = 5.35$	
$\vartheta_{min}$	valore minimo di teta	rad	0.785		= 45°			$\cot(\vartheta_{min}) = 1.00$	
$\vartheta_{max}$	valore massimo di teta	rad	0.381		= 21.8°			$\cot(\vartheta_{max}) = 2.50$	
$\vartheta$	valore di calcolo di teta	rad	0.381		= 21.8°			$\cot(\vartheta) = 2.50$	
$V_{Rsd}$	resistenza a taglio trazione	kN	555.98					$A_{sw} \cdot f_{y,d} \cdot d^* / s \cdot (\cot(\alpha) + \cot(\vartheta)) \cdot \sin(\alpha)$	
$V_{Rcd}$	resistenza a taglio compressione	kN	2271.34					$b \cdot d^* \cdot a_c \cdot n \cdot f_{cd} \cdot (\cot(\alpha) + \cot(\vartheta)) / (1 + \cot^2(\alpha))$	
$V_{Rd}$	resistenza a taglio della sezione	kN	555.98						
$V_{Ed}/V_{Rd}$	coefficiente di sfruttamento della capacità di resistenza a taglio		0.150						

Si ottiene che non è necessario prevedere armatura a taglio, la resistenza del calcestruzzo è sufficiente a garantire adeguata resistenza all'elemento, tuttavia si dispone comunque un'armatura a spirale (staffe) Ø10/25 (leggermente maggiore del minimo Normativo richiesto di 3 staffe al metro) lungo tutta la lunghezza dei pali, al fine di evitare fenomeni di instabilizzazione delle barre longitudinali e fornire confinamento al calcestruzzo.



### Verifica di resistenza a forze orizzontali:

Utilizzando la teoria di Broms, si deduce che i valori di resistenza geotecnica e strutturale del palo sono sufficienti a garantire la stabilità, la resistenza del palo a forze orizzontali risulta pari a 302.02 kN, maggiore della massima sollecitazione tagliante sul palo (83.4 kN). Di seguito la verifica effettuata:

INPUTS				
<b>Geometria</b>				
Dimensione sezionale del palo	d =	1.20 m		
Lunghezza palo	L =	15.00 m		
Momento di plasticizzazione della sezione	M <sub>y</sub> =	962.00 kN m		
<b>Parametri geotecnici</b>				
Peso specifico terreno	γ =	21.50 kN/m <sup>2</sup>		
Angolo di resistenza al taglio terreno	φ =	35.00 °	=	0.61 rad
<b>Coefficienti parziali</b>				
Coefficiente parziale SLU per pali soggetti a carichi trasversali	γ <sub>T</sub> =	1.30		<sup>1</sup> Tab.6.4.VI
Fattore di correlazione	ζ =	1.70		<sup>1</sup> Tab.6.4.IV
CALCOLO PER PALI IN CD				
Coefficiente di spinta passiva	$K_p = (1 + \tan \phi) / (1 - \tan \phi)$	K <sub>p</sub> =	3.69	
Pressione in testa	p = 3 * K <sub>p</sub> * γ * d * z	p(z=0) =	0.00 kN/m <sup>2</sup>	
Pressione in punta	p = 3 * K <sub>p</sub> * γ * d * z	p(z=L) =	4,284.29 kN/m <sup>2</sup>	
<b>Meccanismo di palo corto</b>				
Resistenza alla traslazione orizzontale	H <sub>C</sub> = f(K <sub>p</sub> , d, L)	H <sub>C</sub> =	8,351.83 kN	
Momento massimo	M <sub>max</sub> = 2/3 H L	M <sub>max</sub> =	37,635.47 kN m	
<b>Meccanismo di palo lungo</b>				
Resistenza alla traslazione orizzontale	H <sub>L</sub> = f(C <sub>u</sub> , d, M <sub>y</sub> )	H <sub>L</sub> =	667.47 kN	
<b>Meccanismo di rottura</b>				
Resistenza di calcolo del palo a forze orizzontali		Meccanismo di palo lungo	H <sub>D</sub> =	302.02 kN

#### 4.7.6 Verifica a flessione platea

Il quantitativo di armatura è stato calcolato in termini di sezione trasversale per metro. Se ne riportano i risultati nelle tabelle sottostanti.

ARMATURA RADIALE BOTTOM						
r	s	layer	n	fi	As	Note
cm	mm			mm	cm <sup>2</sup>	
300	105	2	19.05	30	134.6	
350	122	2	16.39	30	115.8	
470	164	2	12.20	30	86.2	
890	310	2	6.45	30	45.6	
1070	373	2	5.36	30	37.9	
775	270	2	7.41	30	52.3	Mezzeria Basamento

ARMATURA CIRCONFERENZIALE BOTTOM						
r	s	layer	n	fi	As	Note
cm	mm			mm	cm <sup>2</sup>	
175	100	2	20.00	20	62.8	
890	100	2	20.00	20	62.8	
890	100	1	10.00	20	31.4	
1200	100	1	10.00	20	31.4	
1200	200	1	5.00	20	15.7	
1250	200	1	5.00	20	15.7	
775	100	2	20.00	20	62.8	Mezzeria Basamento

ARMATURA RADIALE TOP						
r	s	layer	n	fi	As	Note
cm	mm			mm	cm <sup>2</sup>	
300	105	1	9.52	30	67.3	
470	164	1	6.10	30	43.1	
775	270	1	3.70	30	26.2	Mezzeria Basamento

ARMATURA CIRCONFERENZIALE TOP						
r	s	layer	n	fi	As	Note
cm	mm			mm	cm <sup>2</sup>	
215	150	2	13.33	20	41.9	
470	150	2	13.33	20	41.9	
470	100	1	10.00	20	31.4	
1200	100	1	10.00	20	31.4	
1200	200	1	5.00	20	15.7	
1250	200	1	5.00	20	15.7	
775	100	1	10.00	20	31.4	Mezzeria Basamento
1070	100	1	10.00	20	31.4	Centro palo

La verifica a flessione della platea è stata eseguita in tre sezioni significative, in entrambe le direzioni (radiale e circonferenziale), confrontando il momento resistente con quello sollecitante di Wood Armer riportato al paragrafo 4.7.3. Sono state svolte le verifiche considerando l'involuppo delle combinazioni stato limite ultimo "SLUenv" e la combinazione "SLV2", con differenti parametri dei materiali per soddisfare le condizioni al paragrafo 4.7.4.

La verifica lato Top (cioè le sezioni sopra la mezzeria del basamento) è stata eseguita solamente sulla sezione del colletto, più sollecitata.

## Verifiche allo Stato Limite Ultimo: inviluppo combinazioni SLU

Sezione Colletto: Verifica direzione radiale, Bottom

$M_{Ed} = 18578.17 \text{ kNm}$	$M_{Rd} = 18927 \text{ kNm}$	$C.S = M_{Ed}/M_{Rd} = 0.982$
---------------------------------	------------------------------	-------------------------------

Verifica C.A. S.L.U. - File: SLU\_h375\_radiale

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2018 ?

**Titolo:** Sezione

N° figure elementari: 1 Zoom N° strati barre: 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	375

N°	As [cm²]	d [cm]
1	67.3	8.5
2	134.6	367.5

**Sollecitazioni:** S.L.U. Metodo n

N<sub>Ed</sub> 0 kN  
M<sub>Ed</sub> 0 kNm  
M<sub>yEd</sub> 0

**P.to applicazione N:** Centro Baricentro cls  
Coord.[cm] xN 0 yN 0

**Materiali:** B450C C32/40

ε<sub>su</sub> 67.5 ‰ ε<sub>c2</sub> 2 ‰  
f<sub>yd</sub> 391.3 N/mm² ε<sub>cu</sub> 3.5 ‰  
E<sub>s</sub> 200.000 N/mm² f<sub>cd</sub> 18.13 ‰  
E<sub>s</sub>/E<sub>c</sub> 15 f<sub>cc</sub>/f<sub>cd</sub> 0.8  
ε<sub>syd</sub> 1.957 ‰ σ<sub>c,adm</sub> 12.25  
σ<sub>s,adm</sub> 255 N/mm² τ<sub>co</sub> 0.7333  
τ<sub>c1</sub> 2.114

M<sub>Rd</sub> 18.927 kNm  
σ<sub>c</sub> -18.13 N/mm²  
σ<sub>s</sub> 391.3 N/mm²  
ε<sub>c</sub> 3.5 ‰  
ε<sub>s</sub> 66.24 ‰  
d 367.5 cm  
x 18.44 x/d 0.05019  
δ 0.7

**Tipo Sezione:** Rettan.re Trapezi  
a T Circolare  
Rettangoli Coord.  
DXF

**Metodo di calcolo:** S.L.U. + S.L.U.  
Metodo n

**Tipo flessione:** Retta Deviata

N° rett. 100  
Calcola M<sub>Rd</sub> Dominio M-N  
L<sub>0</sub> 0 cm Col. modello  
M-curvatura  
Precompresso

Sezione Colletto: Verifica direzione circonferenziale, Bottom

$M_{Ed} = 8282.97 \text{ kNm}$	$M_{Rd} = 8624 \text{ kNm}$	$C.S = M_{Ed}/M_{Rd} = 0.960$
--------------------------------	-----------------------------	-------------------------------

Verifica C.A. S.L.U. - File: SLU\_h375\_circonferenziale

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2018 ?

**Titolo:** SLU h375 circonf

N° Vertici: 4 Zoom N° barre: 2 Zoom

N°	x [cm]	y [cm]
1	0	0
2	0	375
3	100	351.3
4	100	0

N°	As [cm²]	x [cm]	y [cm]
1	62.83	50	7.5
2	41.9	50	353.65

**Sollecitazioni:** S.L.U. Metodo n

N<sub>Ed</sub> 0 kN  
M<sub>Ed</sub> 0 kNm  
M<sub>yEd</sub> 0

**P.to applicazione N:** Centro Baricentro cls  
Coord.[cm] xN 0 yN 0

**Materiali:** B450C C32/40

ε<sub>su</sub> 67.5 ‰ ε<sub>c2</sub> 2 ‰  
f<sub>yd</sub> 391.3 N/mm² ε<sub>cu</sub> 3.5 ‰  
E<sub>s</sub> 200.000 N/mm² f<sub>cd</sub> 18.13 ‰  
E<sub>s</sub>/E<sub>c</sub> 15 f<sub>cc</sub>/f<sub>cd</sub> 0.8  
ε<sub>syd</sub> 1.957 ‰ σ<sub>c,adm</sub> 12.25  
σ<sub>s,adm</sub> 255 N/mm² τ<sub>co</sub> 0.7333  
τ<sub>c1</sub> 2.114

M<sub>Rd</sub> 8.624 kNm  
σ<sub>c</sub> -18.13 N/mm²  
σ<sub>s</sub> 391.3 N/mm²  
ε<sub>c</sub> 3.5 ‰  
ε<sub>s</sub> 44.5 ‰  
d 367.5 cm  
x 26.8 x/d 0.07291  
δ 0.7

**Tipo Sezione:** Rettan.re Trapezi  
a T Circolare  
Rettangoli Coord.  
DXF

**Metodo di calcolo:** S.L.U. + S.L.U.  
Metodo n

**Tipo flessione:** Retta Deviata

N° rett. 100  
Calcola M<sub>Rd</sub> Dominio M-N  
L<sub>0</sub> 0 cm Col. modello  
M-curvatura  
Precompresso

Sezione Colletto: Verifica direzione radiale, Top

$M_{Ed} = 3399.46 \text{ kNm}$	$M_{Rd} = 9497 \text{ kNm}$	$C.S = M_{Ed}/M_{Rd} = 0.358$
--------------------------------	-----------------------------	-------------------------------

Verifica C.A. S.L.U. - File: SLU\_h375\_radiale

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2018 ?

**Titolo:** Sezione

N° figure elementari 1 Zoom N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]	N°	As [cm²]	d [cm]
1	100	375	1	67.3	8.5
			2	134.6	367.5

**Sollecitazioni**  
S.L.U. Metodo n

N<sub>Ed</sub> 0 kN  
M<sub>Ed</sub> 0 kNm  
M<sub>yEd</sub> 0

**P.to applicazione N**  
Centro Baricentro cls  
Coord.[cm] xN 0 yN 0

**Tipo rottura**  
Lato acciaio - Acciaio snervato

**Materiali**  
B450C C32/40  
E<sub>su</sub> 67.5 % E<sub>c2</sub> 2 %  
f<sub>yd</sub> 391.3 N/mm² E<sub>cu</sub> 3.5  
E<sub>s</sub> 200.000 N/mm² f<sub>cd</sub> 18.13  
E<sub>s</sub>/E<sub>c</sub> 15 f<sub>cc</sub>/f<sub>cd</sub> 0.8  
E<sub>syd</sub> 1.957 % σ<sub>c,adm</sub> 12.25  
σ<sub>s,adm</sub> 255 N/mm² τ<sub>co</sub> 0.7333  
τ<sub>c1</sub> 2.114

M<sub>xRd</sub> -9.497 kNm  
σ<sub>c</sub> -18.11 N/mm²  
σ<sub>s</sub> 391.3 N/mm²  
ε<sub>c</sub> 1.94 ‰  
ε<sub>s</sub> 67.5 ‰  
d 366.5 cm  
x 10.24 x/d 0.02794  
δ 0.7

**Metodo di calcolo**  
S.L.U. Metodo n

**Tipo flessione**  
Retta Deviata

N° rett. 100  
Calcola MRd Dominio M-N  
L<sub>0</sub> 0 cm Col. modello  
M-curvatura  
Precompresso

Sezione Colletto: Verifica direzione circonferenziale, Top

$M_{Ed} = 792.56 \text{ kNm}$	$M_{Rd} = 5718 \text{ kNm}$	$C.S = M_{Ed}/M_{Rd} = 0.139$
-------------------------------	-----------------------------	-------------------------------

Verifica C.A. S.L.U. - File: SLU\_h375\_circonfrenziale

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2018 ?

**Titolo:** SLU h375 circonf

N° Vertici 4 Zoom N° barre 2 Zoom

N°	x [cm]	y [cm]	N°	As [cm²]	x [cm]	y [cm]
1	0	0	1	62.83	50	7.5
2	0	375	2	41.9	50	353.65
3	100	351.3				
4	100	0				

**Sollecitazioni**  
S.L.U. Metodo n

N<sub>Ed</sub> 0 kN  
M<sub>Ed</sub> 0 kNm  
M<sub>yEd</sub> 0

**P.to applicazione N**  
Centro Baricentro cls  
Coord.[cm] xN 0 yN 0

**Tipo rottura**  
Lato acciaio - Acciaio snervato

**Materiali**  
B450C C32/40  
E<sub>su</sub> 67.5 % E<sub>c2</sub> 2 %  
f<sub>yd</sub> 391.3 N/mm² E<sub>cu</sub> 3.5  
E<sub>s</sub> 200.000 N/mm² f<sub>cd</sub> 18.13  
E<sub>s</sub>/E<sub>c</sub> 15 f<sub>cc</sub>/f<sub>cd</sub> 0.8  
E<sub>syd</sub> 1.957 % σ<sub>c,adm</sub> 12.25  
σ<sub>s,adm</sub> 255 N/mm² τ<sub>co</sub> 0.7333  
τ<sub>c1</sub> 2.114

M<sub>xRd</sub> -5.718 kNm  
σ<sub>c</sub> -18.06 N/mm²  
σ<sub>s</sub> 391.3 N/mm²  
ε<sub>c</sub> 1.874 ‰  
ε<sub>s</sub> 67.5 ‰  
d 353.7 cm  
x 9.555 x/d 0.02702  
δ 0.7

**Metodo di calcolo**  
S.L.U. Metodo n

**Tipo flessione**  
Retta Deviata

N° rett. 100  
Calcola MRd Dominio M-N  
L<sub>0</sub> 0 cm Col. modello  
M-curvatura  
Precompresso

Sezione in mezzeria del basamento: Verifica direzione radiale

$M_{Ed} = 4824.22 \text{ kNm}$	$M_{Rd} = 5117 \text{ kNm}$	$C.S = M_{Ed}/M_{Rd} = 0.943$
--------------------------------	-----------------------------	-------------------------------

Verifica C.A. S.L.U. - File: SLU\_h263 (mezzeria)\_radiale

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2018 ?

**Titolo:** SLU\_H263\_Radiale

N° figure elementari 1 Zoom N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	263

N°	As [cm²]	d [cm]
1	26,2	8,5
2	52,3	255,5

**Sollecitazioni**  
S.L.U. Metodo n

N<sub>Ed</sub> 0 kN  
M<sub>Ed</sub> 0 kNm  
M<sub>yEd</sub> 0

**P.to applicazione N**  
Centro Baricentro cls  
Coord.[cm] xN 0 yN 0

**Materiali**  
B450C C32/40

ε<sub>su</sub> 67,5 ‰ ε<sub>c2</sub> 2 ‰  
f<sub>yd</sub> 391,3 N/mm² ε<sub>cu</sub> 3,5 ‰  
E<sub>s</sub> 200.000 N/mm² f<sub>cd</sub> 18,13 ‰  
E<sub>s</sub>/E<sub>c</sub> 15 f<sub>cc</sub>/f<sub>cd</sub> 0,8  
ε<sub>syd</sub> 1,957 ‰ σ<sub>c,adm</sub> 12,25  
σ<sub>s,adm</sub> 255 N/mm² τ<sub>co</sub> 0,7333  
τ<sub>c1</sub> 2,114

**P.to rottura**  
Lato acciaio - Acciaio snervato

M<sub>xRd</sub> 5.117 kNm  
σ<sub>c</sub> -18,13 N/mm²  
σ<sub>s</sub> 391,3 N/mm²  
ε<sub>c</sub> 3,139 ‰  
ε<sub>s</sub> 67,5 ‰  
d 255,5 cm  
x 11,35 x/d 0,04443  
δ 0,7

**Tipo Sezione**  
Rettan.re Trapezi  
a T Circolare  
Rettangoli Coord.  
DXF

**Metodo di calcolo**  
S.L.U. S.L.U.-  
Metodo n

**Tipo flessione**  
Retta Deviata

N° rett. 100  
Calcola MRd Dominio M-N  
L<sub>0</sub> 0 cm Col. modello  
M-curvatura  
Precompresso

Sezione in mezzeria del basamento: Verifica direzione circonferenziale

$M_{Ed} = 3755.71 \text{ kNm}$	$M_{Rd} = 6227 \text{ kNm}$	$C.S = M_{Ed}/M_{Rd} = 0.603$
--------------------------------	-----------------------------	-------------------------------

Verifica C.A. S.L.U. - File: SLU\_h263 (mezzeria)\_circonferenziale

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2018 ?

**Titolo:** SLU\_h263\_circonferenziale

N° Vertici 4 Zoom N° barre 2 Zoom

N°	x [cm]	y [cm]
1	0	0
2	0	274
3	100	251
4	100	0

N°	As [cm²]	x [cm]	y [cm]
1	62,8	50	5
2	31,42	50	256

**Sollecitazioni**  
S.L.U. Metodo n

N<sub>Ed</sub> 0 kN  
M<sub>Ed</sub> 0 kNm  
M<sub>yEd</sub> 0

**P.to applicazione N**  
Centro Baricentro cls  
Coord.[cm] xN 0 yN 0

**Materiali**  
B450C C32/40

ε<sub>su</sub> 67,5 ‰ ε<sub>c2</sub> 2 ‰  
f<sub>yd</sub> 391,3 N/mm² ε<sub>cu</sub> 3,5 ‰  
E<sub>s</sub> 200.000 N/mm² f<sub>cd</sub> 18,13 ‰  
E<sub>s</sub>/E<sub>c</sub> 15 f<sub>cc</sub>/f<sub>cd</sub> 0,8  
ε<sub>syd</sub> 1,957 ‰ σ<sub>c,adm</sub> 12,25  
σ<sub>s,adm</sub> 255 N/mm² τ<sub>co</sub> 0,7333  
τ<sub>c1</sub> 2,114

**P.to rottura**  
Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

M<sub>xRd</sub> 6.227 kNm  
σ<sub>c</sub> -18,13 N/mm²  
σ<sub>s</sub> 391,3 N/mm²  
ε<sub>c</sub> 3,5 ‰  
ε<sub>s</sub> 32,85 ‰  
d 269 cm  
x 25,9 x/d 0,09628  
δ 0,7

**Tipo Sezione**  
Rettan.re Trapezi  
a T Circolare  
Rettangoli Coord.  
DXF

**Metodo di calcolo**  
S.L.U. S.L.U.-  
Metodo n

**Tipo flessione**  
Retta Deviata

N° rett. 100  
Calcola MRd Dominio M-N  
L<sub>0</sub> 0 cm Col. modello  
M-curvatura  
Precompresso

Sezione perimetrale del basamento, asse palo: Verifica direzione radiale

$M_{Ed} = 669.49 \text{ kNm}$	$M_{Rd} = 2681 \text{ kNm}$	$C.S = M_{Ed}/M_{Rd} = 0.250$
-------------------------------	-----------------------------	-------------------------------

Verifica C.A. S.L.U. - File: SLU\_h193 (palo)\_radiale

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2018 ?

Titolo: SLU\_h193(palo)\_radiale

N° figure elementari 1 Zoom N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	193

N°	As [cm²]	d [cm]
1	20.2	7.5
2	37.9	185

Sollecitazioni S.L.U. Metodo n

N<sub>Ed</sub> 0 kN  
M<sub>xEd</sub> 0 kNm  
M<sub>yEd</sub> 0 kNm

P.to applicazione N  
Centro Baricentro cls  
Coord.[cm] xN 0 yN 0

Tipo rottura Lato acciaio - Acciaio snervato

M<sub>Rd</sub> 2.681 kNm

Materiali B450C C32/40

$\epsilon_{su}$  67.5 ‰  $\epsilon_{c2}$  2 ‰  
 $f_{yd}$  391.3 N/mm²  $\epsilon_{cu}$  3.5 ‰  
 $E_s$  200.000 N/mm²  $f_{cd}$  18.13 N/mm²  
 $E_s/E_c$  15  $f_{cc}/f_{cd}$  0.8  
 $\epsilon_{syd}$  1.957 ‰  $\sigma_{c,adm}$  12.25 N/mm²  
 $\sigma_{s,adm}$  255 N/mm²  $\tau_{co}$  0.7333  
 $\tau_{c1}$  2.114

$\sigma_c$  -18.13 N/mm²  
 $\sigma_s$  391.3 N/mm²  
 $\epsilon_c$  3.363 ‰  
 $\epsilon_s$  67.5 ‰  
d 185 cm  
x 8.78 x/d 0.04746  
 $\delta$  0.7

Tipo Sezione  
☒ Rettan.re ☐ Trapezi  
☐ a T ☐ Circolare  
☐ Rettangoli ☐ Coord.  
☐ DXF

Metodo di calcolo  
☒ S.L.U. + ☐ S.L.U. -  
☐ Metodo n

Tipo flessione  
☒ Retta ☐ Deviata

N° rett. 100

Calcola MRd Dominio M-N

L<sub>0</sub> 0 cm Col. modello

M-curvatura

☐ Precompresso

Sezione perimetrale del basamento, asse palo: Verifica direzione circonferenziale

$M_{Ed} = 1005.71 \text{ kNm}$	$M_{Rd} = 2300 \text{ kNm}$	$C.S = M_{Ed}/M_{Rd} = 0.437$
--------------------------------	-----------------------------	-------------------------------

Verifica C.A. S.L.U. - File: SLU\_h193 (palo)\_circonferenziale

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2018 ?

Titolo: SLU\_SeZ\_palo\_circonferenziale

N° Vertici 4 Zoom N° barre 2 Zoom

N°	x [cm]	y [cm]
1	0	0
2	0	204
3	100	181
4	100	0

N°	As [cm²]	x [cm]	y [cm]
1	31.42	50	5
2	31.42	50	188

Sollecitazioni S.L.U. Metodo n

N<sub>Ed</sub> 0 kN  
M<sub>xEd</sub> 0 kNm  
M<sub>yEd</sub> 0 kNm

P.to applicazione N  
Centro Baricentro cls  
Coord.[cm] xN 0 yN 0

Tipo rottura Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

M<sub>Rd</sub> 2.300 kNm

Materiali B450C C32/40

$\epsilon_{su}$  67.5 ‰  $\epsilon_{c2}$  2 ‰  
 $f_{yd}$  391.3 N/mm²  $\epsilon_{cu}$  3.5 ‰  
 $E_s$  200.000 N/mm²  $f_{cd}$  18.13 N/mm²  
 $E_s/E_c$  15  $f_{cc}/f_{cd}$  0.8  
 $\epsilon_{syd}$  1.957 ‰  $\sigma_{c,adm}$  12.25 N/mm²  
 $\sigma_{s,adm}$  255 N/mm²  $\tau_{co}$  0.7333  
 $\tau_{c1}$  2.114

$\sigma_c$  -18.13 N/mm²  
 $\sigma_s$  391.3 N/mm²  
 $\epsilon_c$  3.5 ‰  
 $\epsilon_s$  33.97 ‰  
d 199 cm  
x 18.59 x/d 0.09341  
 $\delta$  0.7

Tipo Sezione  
☐ Rettan.re ☐ Trapezi  
☐ a T ☐ Circolare  
☐ Rettangoli ☒ Coord.  
☐ DXF

Metodo di calcolo  
☒ S.L.U. + ☐ S.L.U. -  
☐ Metodo n

Tipo flessione  
☒ Retta ☐ Deviata

N° rett. 100

Calcola MRd Dominio M-N

L<sub>0</sub> 0 cm Col. modello

M-curvatura

☐ Precompresso

## Verifica Stato Limite di Vita: combinazione SLV2

Sezione Colletto: Verifica direzione radiale, Bottom

$M_{Ed} = 13886.39 \text{ kNm}$	$M_{Rd} = 17916 \text{ kNm}$	$C.S = M_{Ed}/M_{Rd} = 0.775$
---------------------------------	------------------------------	-------------------------------

Verifica C.A. S.L.U. - File: SLV\_h375\_radiale

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2018 ?

**Titolo:** Sezione

N° figure elementari 1 Zoom N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	375

N°	As [cm²]	d [cm]
1	67.3	8.5
2	134.6	367.5

Sollecitazioni: S.L.U. Metodo n

N<sub>Ed</sub> 0 kN  
M<sub>Ed</sub> 0 kNm  
M<sub>yEd</sub> 0

P.to applicazione N: Centro Baricentro cls  
Coord. [cm]: xN 0 yN 0

Tipo rottura: Lato acciaio - Acciaio snervato

M<sub>xRd</sub> 17.916 kN m

Materiali: B450C C32/40

E<sub>su</sub> 1.957 % E<sub>c2</sub> 2 %  
f<sub>yd</sub> 391.3 N/mm² E<sub>cu</sub> 2 %  
E<sub>s</sub> 200.000 N/mm² f<sub>cd</sub> 18.13  
E<sub>s</sub>/E<sub>c</sub> 15 f<sub>cc</sub>/f<sub>cd</sub> 0.8  
E<sub>syd</sub> 1.957 % C<sub>c,adm</sub> 12.25  
C<sub>s,adm</sub> 255 N/mm² τ<sub>co</sub> 0.7333  
τ<sub>c1</sub> 2.114

σ<sub>c</sub> -9.552 N/mm²  
σ<sub>s</sub> 391.3 N/mm²  
ε<sub>c</sub> 0.6243 ‰  
ε<sub>s</sub> 1.957 ‰  
d 367.5 cm  
x 88.88 x/d 0.2419  
ξ 0.7423

Tipo Sezione: Rettan.re Trapezi  
a T Circolare  
Rettangoli Coord.  
DXF

Metodo di calcolo: S.L.U. + S.L.U.  
Metodo n

Tipo flessione: Retta Deviata

N° rett. 100  
Calcola MRd Dominio M-N  
L<sub>0</sub> 0 cm Col. modello  
M-curvatura  
Precompresso

Sezione Colletto: Verifica direzione circonferenziale, Bottom

$M_{Ed} = 6168.90 \text{ kNm}$	$M_{Rd} = 8283 \text{ kNm}$	$C.S = M_{Ed}/M_{Rd} = 0.745$
--------------------------------	-----------------------------	-------------------------------

Verifica C.A. S.L.U. - File: SLU\_h375\_circonferenziale

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2018 ?

**Titolo:** SLU h375 circonfer

N° Vertici 4 Zoom N° barre 2 Zoom

N°	x [cm]	y [cm]
1	0	0
2	0	375
3	100	351.3
4	100	0

N°	As [cm²]	x [cm]	y [cm]
1	62.83	50	7.5
2	41.9	50	353.65

Sollecitazioni: S.L.U. Metodo n

N<sub>Ed</sub> 0 kN  
M<sub>Ed</sub> 0 kNm  
M<sub>yEd</sub> 0

P.to applicazione N: Centro Baricentro cls  
Coord. [cm]: xN 0 yN 0

Tipo rottura: Lato acciaio - Acciaio snervato

M<sub>xRd</sub> 8.283 kN m

Materiali: B450C C32/40

E<sub>su</sub> 1.957 % E<sub>c2</sub> 2 %  
f<sub>yd</sub> 391.3 N/mm² E<sub>cu</sub> 2 %  
E<sub>s</sub> 200.000 N/mm² f<sub>cd</sub> 18.13  
E<sub>s</sub>/E<sub>c</sub> 15 f<sub>cc</sub>/f<sub>cd</sub> 0.8  
E<sub>syd</sub> 1.957 % C<sub>c,adm</sub> 12.25  
C<sub>s,adm</sub> 255 N/mm² τ<sub>co</sub> 0.7333  
τ<sub>c1</sub> 2.114

σ<sub>c</sub> -7.793 N/mm²  
σ<sub>s</sub> 391.3 N/mm²  
ε<sub>c</sub> 0.4898 ‰  
ε<sub>s</sub> 1.957 ‰  
d 367.5 cm  
x 73.57 x/d 0.2002  
ξ 0.7

Tipo Sezione: Rettan.re Trapezi  
a T Circolare  
Rettangoli Coord.  
DXF

Metodo di calcolo: S.L.U. + S.L.U.  
Metodo n

Tipo flessione: Retta Deviata

N° rett. 100  
Calcola MRd Dominio M-N  
L<sub>0</sub> 0 cm Col. modello  
M-curvatura  
Precompresso

Sezione Colletto: Verifica direzione radiale, Top

$M_{Ed} = 722 \text{ kNm}$	$M_{Rd} = 9240 \text{ kNm}$	$C.S = M_{Ed}/M_{Rd} = 0.078$
----------------------------	-----------------------------	-------------------------------

Verifica C.A. S.L.U. - File: SLV\_h375\_radiale

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2018 ?

**Titolo:** Sezione

N° figure elementari 1 Zoom N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	375

N°	As [cm²]	d [cm]
1	67,3	8,5
2	134,6	367,5

Sollecitazioni S.L.U. Metodo n

N<sub>Ed</sub> 0 kN  
M<sub>Ed</sub> 0 kNm  
M<sub>yEd</sub> 0

P.to applicazione N  
Centro Baricentro cls  
Coord.[cm] xN 0 yN 0

Tipo rottura Lato acciaio - Acciaio snervato

M<sub>xRd</sub> -9.240 kNm

Materiali B450C C32/40

ε<sub>su</sub> 1.957 ‰ ε<sub>c2</sub> 2 ‰  
f<sub>yd</sub> 391,3 N/mm² ε<sub>cu</sub> 2 ‰  
E<sub>s</sub> 200.000 N/mm² f<sub>cd</sub> 18,13 ‰  
E<sub>s</sub>/E<sub>c</sub> 15 f<sub>cc</sub>/f<sub>cd</sub> 0,8 ‰  
ε<sub>syd</sub> 1.957 ‰ σ<sub>c,adm</sub> 12,25 ‰  
σ<sub>s,adm</sub> 255 N/mm² τ<sub>co</sub> 0,7333 ‰  
τ<sub>c1</sub> 2,114

σ<sub>c</sub> -5,998 N/mm²  
σ<sub>s</sub> 391,3 N/mm²  
ε<sub>c</sub> 0,364 ‰  
ε<sub>s</sub> 1,957 ‰  
d 366,5 cm  
x 57,48 x/d 0,1568  
δ 0,7

Tipo Sezione  
Rettan.re Trapezi  
a T Circolare  
Rettangoli Coord.  
DXF

Metodo di calcolo  
S.L.U. + S.L.U.  
Metodo n

Tipo flessione  
Retta Deviata

N° rett. 100  
Calcola MRd Dominio M-N  
L<sub>0</sub> 0 cm Col. modello  
M-curvatura  
Precompresso

Sezione Colletto: Verifica direzione circonferenziale, Top

$M_{Ed} = 315 \text{ kNm}$	$M_{Rd} = 5558 \text{ kNm}$	$C.S = M_{Ed}/M_{Rd} = 0.057$
----------------------------	-----------------------------	-------------------------------

Verifica C.A. S.L.U. - File: SLU\_h375\_circonferenziale

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2018 ?

**Titolo:** SLU h375 circonfer

N° Vertici 4 Zoom N° barre 2 Zoom

N°	x [cm]	y [cm]
1	0	0
2	0	375
3	100	351,3
4	100	0

N°	As [cm²]	x [cm]	y [cm]
1	62,83	50	7,5
2	41,9	50	353,65

Sollecitazioni S.L.U. Metodo n

N<sub>Ed</sub> 0 kN  
M<sub>Ed</sub> 0 kNm  
M<sub>yEd</sub> 0

P.to applicazione N  
Centro Baricentro cls  
Coord.[cm] xN 0 yN 0

Tipo rottura Lato acciaio - Acciaio snervato

M<sub>xRd</sub> -5.558 kNm

Materiali B450C C32/40

ε<sub>su</sub> 1.957 ‰ ε<sub>c2</sub> 2 ‰  
f<sub>yd</sub> 391,3 N/mm² ε<sub>cu</sub> 2 ‰  
E<sub>s</sub> 200.000 N/mm² f<sub>cd</sub> 18,13 ‰  
E<sub>s</sub>/E<sub>c</sub> 15 f<sub>cc</sub>/f<sub>cd</sub> 0,8 ‰  
ε<sub>syd</sub> 1.957 ‰ σ<sub>c,adm</sub> 12,25 ‰  
σ<sub>s,adm</sub> 255 N/mm² τ<sub>co</sub> 0,7333 ‰  
τ<sub>c1</sub> 2,114

σ<sub>c</sub> -5,222 N/mm²  
σ<sub>s</sub> 391,3 N/mm²  
ε<sub>c</sub> 0,3125 ‰  
ε<sub>s</sub> 1,957 ‰  
d 353,7 cm  
x 48,69 x/d 0,1377  
δ 0,7

Tipo Sezione  
Rettan.re Trapezi  
a T Circolare  
Rettangoli Coord.  
DXF

Metodo di calcolo  
S.L.U. + S.L.U.  
Metodo n

Tipo flessione  
Retta Deviata

N° rett. 100  
Calcola MRd Dominio M-N  
L<sub>0</sub> 0 cm Col. modello  
M-curvatura  
Precompresso



Sezione mezzeria basamento: Verifica direzione radiale

$M_{Ed} = 3619.21 \text{ kNm}$	$M_{Rd} = 4907 \text{ kNm}$	$C.S = M_{Ed}/M_{Rd} = 0.738$
--------------------------------	-----------------------------	-------------------------------

Verifica C.A. S.L.U. - File: SLU\_h263 (mezzeria)\_radiale

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2018 ?

**Titolo:** SLU\_H263\_Radiale

N° figure elementari: 1 Zoom N° strati barre: 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	263

N°	As [cm²]	d [cm]
1	26,2	8,5
2	52,3	255,5

Sollecitazioni: S.L.U. Metodo n

N<sub>Ed</sub> 0 kN  
M<sub>Ed</sub> 0 kNm  
M<sub>yEd</sub> 0

P.to applicazione N: Centro Baricentro cls  
Coord. [cm] xN 0 yN 0

Tipo rottura: Lato acciaio - Acciaio snervato

M<sub>Rd</sub> 4.907 kN m

Materiali: B450C C32/40

ε<sub>su</sub> 1.957 ‰ ε<sub>c2</sub> 2 ‰  
f<sub>yd</sub> 391,3 N/mm² ε<sub>cu</sub> 2 ‰  
E<sub>s</sub> 200.000 N/mm² f<sub>cd</sub> 18,13 ‰  
E<sub>s</sub>/E<sub>c</sub> 15 f<sub>cc</sub>/f<sub>cd</sub> 0,8 ‰  
ε<sub>syd</sub> 1.957 ‰ σ<sub>c,adm</sub> 12,25  
σ<sub>s,adm</sub> 255 N/mm² τ<sub>co</sub> 0,7333  
τ<sub>c1</sub> 2,114

σ<sub>c</sub> -7,335 N/mm²  
σ<sub>s</sub> 391,3 N/mm²  
ε<sub>c</sub> 0,4567 ‰  
ε<sub>s</sub> 1,957 ‰  
d 255,5 cm  
x 48,34 x/d 0,1892  
δ 0,7

Tipo Sezione: Rettan.re Trapezi  
a T Circolare  
Rettangoli Coord.  
DXF

Metodo di calcolo: S.L.U. + S.L.U. -  
Metodo n

Tipo flessione: Retta Deviata

N° rett. 100

Calcola MRd Dominio M-N  
L<sub>0</sub> 0 cm Col. modello  
M-curvatura  
Precompresso

Sezione mezzeria basamento: Verifica direzione circonferenziale

$M_{Ed} = 2797.06 \text{ kNm}$	$M_{Rd} = 5945 \text{ kNm}$	$C.S = M_{Ed}/M_{Rd} = 0.470$
--------------------------------	-----------------------------	-------------------------------

Verifica C.A. S.L.U. - File: SLU\_h263 (mezzeria)\_circonferenziale

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2018 ?

**Titolo:** SLU\_h263\_circonferenziale

N° Vertici: 4 Zoom N° barre: 2 Zoom

N°	x [cm]	y [cm]
1	0	0
2	0	274
3	100	251
4	100	0

N°	As [cm²]	x [cm]	y [cm]
1	62,8	50	5
2	31,42	50	256

Sollecitazioni: S.L.U. Metodo n

N<sub>Ed</sub> 0 kN  
M<sub>Ed</sub> 0 kNm  
M<sub>yEd</sub> 0

P.to applicazione N: Centro Baricentro cls  
Coord. [cm] xN 0 yN 0

Tipo rottura: Lato acciaio - Acciaio snervato

M<sub>Rd</sub> 5.945 kN m

Materiali: B450C C32/40

ε<sub>su</sub> 1.957 ‰ ε<sub>c2</sub> 2 ‰  
f<sub>yd</sub> 391,3 N/mm² ε<sub>cu</sub> 2 ‰  
E<sub>s</sub> 200.000 N/mm² f<sub>cd</sub> 18,13 ‰  
E<sub>s</sub>/E<sub>c</sub> 15 f<sub>cc</sub>/f<sub>cd</sub> 0,8 ‰  
ε<sub>syd</sub> 1.957 ‰ σ<sub>c,adm</sub> 12,25  
σ<sub>s,adm</sub> 255 N/mm² τ<sub>co</sub> 0,7333  
τ<sub>c1</sub> 2,114

σ<sub>c</sub> -9,326 N/mm²  
σ<sub>s</sub> 391,3 N/mm²  
ε<sub>c</sub> 0,6063 ‰  
ε<sub>s</sub> 1,957 ‰  
d 269 cm  
x 63,63 x/d 0,2365  
δ 0,7357

Tipo Sezione: Rettan.re Trapezi  
a T Circolare  
Rettangoli Coord.  
DXF

Metodo di calcolo: S.L.U. + S.L.U. -  
Metodo n

Tipo flessione: Retta Deviata

N° rett. 100

Calcola MRd Dominio M-N  
L<sub>0</sub> 0 cm Col. modello  
M-curvatura  
Precompresso

Sezione perimetrale del basamento, asse palo: Verifica direzione radiale

$M_{Ed} = 511 \text{ kNm}$	$M_{Rd} = 2573 \text{ kNm}$	$C.S = M_{Ed}/M_{Rd} = 0.199$
----------------------------	-----------------------------	-------------------------------

Verifica C.A. S.L.U. - File: SLU\_h193 (palo)\_radiale

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2018 ?

**Titolo:** SLU\_H193(palo)\_radiale

N° figure elementari: 1 Zoom N° strati barre: 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	193

N°	As [cm²]	d [cm]
1	20,2	7,5
2	37,9	185

**Sollecitazioni**  
S.L.U. Metodo n

N<sub>Ed</sub> 0 kN  
M<sub>Ed</sub> 0 kNm  
M<sub>yEd</sub> 0

**P.to applicazione N**  
Centro Baricentro cls  
Coord.[cm] xN 0 yN 0

**Materiali**  
B450C C32/40  
E<sub>su</sub> 1.957 % E<sub>c2</sub> 2 %  
f<sub>yd</sub> 391,3 N/mm² E<sub>cu</sub> 2 %  
E<sub>s</sub> 200.000 N/mm² f<sub>cd</sub> 18,13  
E<sub>s</sub>/E<sub>c</sub> 15 f<sub>cc</sub>/f<sub>cd</sub> 0,8  
E<sub>syd</sub> 1.957 % σ<sub>c,adm</sub> 12,25  
σ<sub>s,adm</sub> 255 N/mm² τ<sub>co</sub> 0,7333  
τ<sub>c1</sub> 2,114

**Metodo di calcolo**  
S.L.U. + S.L.U.  
Metodo n

**Tipo flessione**  
Retta Deviata

N° rett. 100  
Calcola MRd Dominio M-N  
L<sub>0</sub> 0 cm Col. modello  
M-curvatura  
Precompresso

**Calcoli:**  
M<sub>Rd</sub> 2.573 kNm  
σ<sub>c</sub> -7,332 N/mm²  
σ<sub>s</sub> 391,3 N/mm²  
ε<sub>c</sub> 0,4565 %  
ε<sub>s</sub> 1,957 %  
d 185 cm  
x 34,99 x/d 0,1892  
δ 0,7

Sezione perimetrale del basamento, asse palo: Verifica direzione circonferenziale

$M_{Ed} = 750.13 \text{ kNm}$	$M_{Rd} = 2208 \text{ kNm}$	$C.S = M_{Ed}/M_{Rd} = 0.340$
-------------------------------	-----------------------------	-------------------------------

Verifica C.A. S.L.U. - File: SLU\_h193 (palo)\_circonferenziale

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2018 ?

**Titolo:** SLU\_Sez\_palo\_circonferenziale

N° Vertici: 4 Zoom N° barre: 2 Zoom

N°	x [cm]	y [cm]
1	0	0
2	0	204
3	100	181
4	100	0

N°	As [cm²]	x [cm]	y [cm]
1	31,42	50	5
2	31,42	50	188

**Sollecitazioni**  
S.L.U. Metodo n

N<sub>Ed</sub> 0 kN  
M<sub>Ed</sub> 0 kNm  
M<sub>yEd</sub> 0

**P.to applicazione N**  
Centro Baricentro cls  
Coord.[cm] xN 0 yN 0

**Materiali**  
B450C C32/40  
E<sub>su</sub> 1.957 % E<sub>c2</sub> 2 %  
f<sub>yd</sub> 391,3 N/mm² E<sub>cu</sub> 2 %  
E<sub>s</sub> 200.000 N/mm² f<sub>cd</sub> 18,13  
E<sub>s</sub>/E<sub>c</sub> 15 f<sub>cc</sub>/f<sub>cd</sub> 0,8  
E<sub>syd</sub> 1.957 % σ<sub>c,adm</sub> 12,25  
σ<sub>s,adm</sub> 255 N/mm² τ<sub>co</sub> 0,7333  
τ<sub>c1</sub> 2,114

**Metodo di calcolo**  
S.L.U. + S.L.U.  
Metodo n

**Tipo flessione**  
Retta Deviata

N° rett. 100  
Calcola MRd Dominio M-N  
L<sub>0</sub> 0 cm Col. modello  
M-curvatura  
Precompresso

**Calcoli:**  
M<sub>Rd</sub> 2.208 kNm  
σ<sub>c</sub> -8,249 N/mm²  
σ<sub>s</sub> 391,3 N/mm²  
ε<sub>c</sub> 0,5235 %  
ε<sub>s</sub> 1,957 %  
d 199 cm  
x 42 x/d 0,2111  
δ 0,7038

#### 4.7.7 Verifica a taglio platea

Si considerano i valori di taglio massimo  $V_{xx}$  in combinazione "SLUenv", come riportati al paragrafo 4.7.3, essendo in questa direzione le azioni più gravose.

Sezione Colletto:

Nelle zone di maggior sollecitazione, riscontrabili nel perimetro prossimo al colletto di innesto della torre dovrà essere disposto un opportuno quantitativo di armatura trasversale in modo da incrementare la resistenza a taglio della piastra.

Saranno disposti nella zona prossima al colletto a passo 25 cm almeno  $6.28 \text{ cm}^2$  di armatura ( $2\varnothing 20$ ) per metro trasversale, come mostrato nella verifica sottostante.

DETERMINAZIONE DELLA RESISTENZA A TAGLIO DI SEZIONI IN C.A. - NTC2018									
Caratteristiche dei materiali									
$f_{ck}$		MPa	32						
$\alpha_{cc}$			0.85						
$\gamma_c$			1.5						
$f_{cd}$	resistenza di calcolo a compressione del calcestruzzo	MPa	18.13					$a_{cc} \cdot f_{cd} / \gamma_c$	
$\gamma_s$			1.15						
$f_{y,wd}$		MPa	391.30					$f_{yd} / \gamma_s$	
Caratteristiche della sezione resistente									
$V_{Ed}$	taglio sollecitante di progetto	kN	4005						
$b_w$	larghezza della sezione	cm	100						
$h$	altezza totale della sezione	cm	375						
$c$	distanza asse barre dal lembo teso	cm	8.5						
$d$	altezza utile della sezione	cm	366.5					$h - c$	
$d^*$		cm	329.85					$0.9 \cdot d$	
$k$			1.234					$\min[1.0 + \sqrt{(20/d)}, 2.0]$	
$A_{sl}$	area di armatura longitudinale tesa	cm <sup>2</sup>	134.6						
$\rho_l$	rapporto geometrico di armatura longitudinale tesa		0.0036						
$A_{sw}$	area di armatura a taglio disposta	cm <sup>2</sup>	6.28						
$s$	spaziatura staffe	cm	25						
Controllo necessità di armatura a taglio									
$V_{Rdc1}$		kN	1224.10					$[0.18 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3}] / \gamma_c \cdot b_w \cdot d$	
$V_{Rdc2}$		kN	994.21					$[0.035 \cdot k^2 (3/2) \cdot \sqrt{(f_{ck})}] \cdot b_w \cdot d$	
$V_{Rdc}$	resistenza della sezione non armata a taglio	kN	1224.10					$\max[V_{Rdc1}, V_{Rdc2}]$	
$V_{Ed} / V_{Rdc}$	è necessario prevedere l'armatura a taglio $V_{Rdc} < V_{Ed}$								
Controllo capacità massima della sezione a taglio									
$v$	coefficiente di riduzione della resistenza del cls fessurato per taglio		0.5						
$\alpha_c$	coefficiente per effetti dello sforzo assiale di compressione		1						
$\alpha$	inclinazione armature a taglio	rad	1.571		gradi	90			
$V_{Rd,max}$	massima resistenza a taglio-compresione della sezione	kN	14953					$1.0 \cdot v \cdot f_{cd} \cdot \{\cot(45) + \tan(45)\} \cdot b_w \cdot 0.9 \cdot d^*$	
$V_{Ed} / V_{Rd,max}$	sezione sufficiente per la resistenza taglio								
			0.268						
Calcolo della resistenza della sezione con armatura a taglio									
$\omega_{sw}$	percentuale meccanica di armatura trasversale (per $\alpha=90^\circ$ )		0.05					$(A_{sw} \cdot f_{yd}) / (b \cdot s \cdot f_{cd})$	
$\vartheta_{calc}$	valore di teta calcolato	rad	0.336	= 19.22°				$\cot(\vartheta_{calc}) = 2.87$	
$\vartheta_{min}$	valore minimo di teta	rad	0.785	= 45°				$\cot(\vartheta_{min}) = 1.00$	
$\vartheta_{max}$	valore massimo di teta	rad	0.381	= 21.8°				$\cot(\vartheta_{max}) = 2.50$	
$\vartheta$	valore di calcolo di teta	rad	0.381	= 21.8°				$\cot(\vartheta) = 2.50$	
$V_{Rsd}$	resistenza a taglio trazione	kN	8106					$A_{sw} \cdot f_{yd} \cdot d^* / s \cdot (\cot(\alpha) + \cot(\vartheta)) \cdot \sin(\alpha)$	
$V_{Rcd}$	resistenza a taglio compressione	kN	10313					$b \cdot d^* \cdot a_c \cdot n \cdot f_{cd} \cdot (\cot(\alpha) + \cot(\vartheta)) / (1 + \cot^2(\alpha))$	
$V_{Rd}$	resistenza a taglio della sezione	kN	8106						
$V_{Ed} / V_{Rd}$	coefficiente di sfruttamento della capacità di resistenza a taglio		0.494						

Nelle altre zone è sufficiente una spaziatura superiore dell'armatura trasversale.

Nel tratto centrale del basamento è possibile aumentare il passo a 50 cm, mantenendo almeno 6.28 cm<sup>2</sup> di armatura (2Ø20) per metro trasversale, come mostrato nella verifica sottostante, nella sezione posta a 470 cm dal centro del basamento.

DETERMINAZIONE DELLA RESISTENZA A TAGLIO DI SEZIONI IN C.A. - NTC2018									
Caratteristiche dei materiali									
$f_{ck}$		MPa	32						
$\alpha_{cc}$			0.85						
$\gamma_c$			1.5						
$f_{cd}$	resistenza di calcolo a compressione del calcestruzzo	MPa	18.13					$a_{cc} \cdot f_{cd} / g_c$	
$\gamma_s$			1.15						
$f_{y,wd}$		MPa	391.30					$f_{yd} / g_s$	
Caratteristiche della sezione resistente									
$V_{Ed}$	taglio sollecitante di progetto	kN	1617						
$b_w$	larghezza della sezione	cm	100						
$h$	altezza totale della sezione	cm	335						
$c$	distanza asse barre dal lembo teso	cm	8.5						
$d$	altezza utile della sezione	cm	326.5					$h - c$	
$d^*$		cm	293.85					$0.9 d$	
$k$			1.247					$\min[1.0 + \sqrt{(20/d)}, 2.0]$	
$A_{sl}$	area di armatura longitudinale tesa	cm <sup>2</sup>	86.2						
$\rho_l$	rapporto geometrico di armatura longitudinale tesa		0.0026						
$A_{sw}$	area di armatura a taglio disposta	cm <sup>2</sup>	6.28						
$s$	spaziatura staffe	cm	50						
Controllo necessità di armatura a taglio									
$V_{Rdc1}$		kN	986.98					$[0.18 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{(1/3)}] / \gamma_c \cdot b_w \cdot d$	
$V_{Rdc2}$		kN	900.71					$[0.035 \cdot k^{(3/2)} \cdot \sqrt{(f_{ck})}] \cdot b_w \cdot d$	
$V_{Rdc}$	resistenza della sezione non armata a taglio	kN	986.98					$\max[V_{Rdc1}, V_{Rdc2}]$	
$V_{Ed} / V_{Rdc}$	è necessario prevedere l'armatura a taglio $V_{Rdc} < V_{Ed}$								
Controllo capacità massima della sezione a taglio									
$v$	coefficiente di riduzione della resistenza del cls fessurato per taglio		0.5						
$\alpha_c$	coefficiente per effetti dello sforzo assiale di compressione		1						
$\alpha$	inclinazione armature a taglio	rad	1.571		gradi	90			
$V_{Rd,max}$	massima resistenza a taglio-compresione della sezione	kN	13321					$1.0 \cdot v \cdot f_{cd} / \{ \cot(45) + \tan(45) \} \cdot b_w \cdot 0.9 \cdot d^*$	
$V_{Ed} / V_{Rd,max}$	sezione sufficiente per la resistenza taglio								
			0.121						
Calcolo della resistenza della sezione con armatura a taglio									
$\omega_{sw}$	percentuale meccanica di armatura trasversale (per $\alpha=90^\circ$ )		0.03					$(A_{sw} \cdot f_{yd}) / (b \cdot s \cdot f_{cd})$	
$\vartheta_{calc}$	valore di teta calcolato	rad	0.235		= 13.46°			$\cot(\vartheta_{calc}) = 4.18$	
$\vartheta_{min}$	valore minimo di teta	rad	0.785		= 45°			$\cot(\vartheta_{min}) = 1.00$	
$\vartheta_{max}$	valore massimo di teta	rad	0.381		= 21.8°			$\cot(\vartheta_{max}) = 2.50$	
$\vartheta$	valore di calcolo di teta	rad	0.381		= 21.8°			$\cot(\vartheta) = 2.50$	
$V_{Rsd}$	resistenza a taglio trazione	kN	3611					$A_{sw} \cdot f_{yd} \cdot d^* / s \cdot ( \cot(\alpha) + \cot(\vartheta) ) \cdot \sin(\alpha)$	
$V_{Rcd}$	resistenza a taglio compressione	kN	9187					$b \cdot d^* \cdot a_c \cdot n \cdot f_{cd} \cdot ( \cot(\alpha) + \cot(\vartheta) ) / ( 1 + \cot^2(\alpha) )$	
$V_{Rd}$	resistenza a taglio della sezione	kN	3611						
$V_{Ed}/V_{Rd}$	coefficiente di sfruttamento della capacità di resistenza a taglio		0.448						

Nella zona più periferica è possibile aumentare il passo fino a 1 m, mantenendo almeno 6.28 cm<sup>2</sup> di armatura (2Ø20) per metro trasversale, come evidenziato nella verifica sottostante, per una sezione a 1130 cm dal centro del basamento.

DETERMINAZIONE DELLA RESISTENZA A TAGLIO DI SEZIONI IN C.A. - NTC2018									
Caratteristiche dei materiali									
$f_{ck}$		MPa	32						
$\alpha_{cc}$			0.85						
$\gamma_c$			1.5						
$f_{cd}$	resistenza di calcolo a compressione del calcestruzzo	MPa	18.13					$a_{cc} \cdot f_{cd} / g_c$	
$\gamma_s$			1.15						
$f_{y,wd}$		MPa	391.30					$f_{yd} / g_s$	
Caratteristiche della sezione resistente									
$V_{Ed}$	taglio sollecitante di progetto	kN	623						
$b_w$	larghezza della sezione	cm	100						
$h$	altezza totale della sezione	cm	175						
$c$	distanza asse barre dal lembo teso	cm	8.5						
$d$	altezza utile della sezione	cm	166.5					$h - c$	
$d^*$		cm	149.85					$0.9 d$	
$k$			1.347					$\min[1.0 + \sqrt{(20/d)}, 2.0]$	
$A_{sl}$	area di armatura longitudinale tesa	cm <sup>2</sup>	35.9						
$\rho_l$	rapporto geometrico di armatura longitudinale tesa		0.0021						
$A_{sw}$	area di armatura a taglio disposta	cm <sup>2</sup>	6.28						
$s$	spaziatura staffe	cm	100						
Controllo necessità di armatura a taglio									
$V_{Rdc1}$		kN	503.77					$[0.18 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{(1/3)}] / \gamma_c \cdot b_w \cdot d$	
$V_{Rdc2}$		kN	515.12					$[0.035 \cdot k^{(3/2)} \cdot \sqrt{(f_{ck})}] \cdot b_w \cdot d$	
$V_{Rdc}$	resistenza della sezione non armata a taglio	kN	515.12					$\max[V_{Rdc1}, V_{Rdc2}]$	
$V_{Ed} / V_{Rdc}$	è necessario prevedere l'armatura a taglio $V_{Rdc} < V_{Ed}$								
Controllo capacità massima della sezione a taglio									
$v$	coefficiente di riduzione della resistenza del cls fessurato per taglio		0.5						
$\alpha_c$	coefficiente per effetti dello sforzo assiale di compressione		1						
$\alpha$	inclinazione armature a taglio	rad	1.571		gradi	90			
$V_{Rd,max}$	massima resistenza a taglio-compressione della sezione	kN	6793					$1.0 \cdot v \cdot f_{cd} / \{ \cot(45) + \tan(45) \} \cdot b_w \cdot 0.9 \cdot d^*$	
$V_{Ed} / V_{Rd,max}$	sezione sufficiente per la resistenza taglio								
			0.092						
Calcolo della resistenza della sezione con armatura a taglio									
$\omega_{sw}$	percentuale meccanica di armatura trasversale (per $\alpha=90^\circ$ )		0.01					$(A_{sw} \cdot f_{yd}) / (b \cdot s \cdot f_{cd})$	
$\vartheta_{calc}$	valore di teta calcolato	rad	0.165		= 9.47°			$\cot(\vartheta_{calc}) = 5.99$	
$\vartheta_{min}$	valore minimo di teta	rad	0.785		= 45°			$\cot(\vartheta_{min}) = 1.00$	
$\vartheta_{max}$	valore massimo di teta	rad	0.381		= 21.8°			$\cot(\vartheta_{max}) = 2.50$	
$\vartheta$	valore di calcolo di teta	rad	0.381		= 21.8°			$\cot(\vartheta) = 2.50$	
$V_{Rsd}$	resistenza a taglio trazione	kN	921					$A_{sw} \cdot f_{yd} \cdot d^* / s \cdot (\cot(\alpha) + \cot(\vartheta)) \cdot \sin(\alpha)$	
$V_{Rcd}$	resistenza a taglio compressione	kN	4685					$b \cdot d^* \cdot a_c \cdot n \cdot f_{cd} \cdot (\cot(\alpha) + \cot(\vartheta)) / (1 + \cot^2(\alpha))$	
$V_{Rd}$	resistenza a taglio della sezione	kN	921						
$V_{Ed}/V_{Rd}$	coefficiente di sfruttamento della capacità di resistenza a taglio		0.677						

## 4.7.8 Verifica a punzonamento platea

La verifica di punzonamento viene eseguita considerando la reazione massima (combinazione "SLUenv") misurata alla base del palo meno il peso proprio del palo, sulla base delle indicazioni dell'EC2. Cautelativamente il coefficiente  $\beta$  viene adottato pari a 1.5, come per il caso di elementi posti all'angolo di piastre.

$$V_{Ed} = 5351.4 - 452.2 = 4899.2 \text{ kN}$$

Elemento:		Basamento pala eolica			
$V_{Ed,g}$	daN	489.920	Forza globale di taglio-punzonamento di progetto		
$\Delta V_{Ed}$	daN	0	Forza contraria a $V_{Ed,g}$ (eventuale, nel caso di fondazioni)		
$\beta$	n.o puro	1.50	coefficiente amplificativo della forza, in caso di eccentricità di carico		
H	cm	177.00	Altezza totale della piastra		
$d_y$	cm	168.00	altezze utili relative alle armature poste nelle due dir. ortogonali		
$d_z$	cm	165.00	altezze utili relative alle armature poste nelle due dir. ortogonali		
$\rho_{ly}$	%	0.21%	Rapporto % dell'armat. tesa in direz. "y" rispetto area sezione		
$\rho_{lz}$	%	0.09%	Rapporto % dell'armat. tesa in direz. "z" rispetto area sezione		
$R_{ck}$	daN/cm <sup>2</sup>	400.0	Resistenza caratteristica cubica del calcestruzzo della lastra		
Pilastro	Sezione	b) Circolare		C	simbolo
Pilastro	Posizione	d) di Bordo con sporto		BS	simbolo
Fori	Vicinanza	a) No		N	simbolo
$\Phi$	cm	120.00	diametro pilastro circolare		

Dati dedotti dai materiali e dai dati di input

$f_{ck}$	daN/cm <sup>2</sup>	332.0	Resistenza caratteristica cilindrica del calcestruzzo
$f_{cd}$	daN/cm <sup>2</sup>	188.1	Resistenza di calcolo a compressione del calcestruzzo
$f = f_{ck}^{1/2} / f_{yk}$	cm/daN <sup>1/2</sup>	0.004049	Parte dipendente dai materiali nella formula (9.11)
$d = d_{eff}$	cm	166.50	Altezza utile della sezione
$\rho_{lyz} = \text{RADQ}(\rho_{ly} \times \rho_{lz})$	n.o puro	0.00140	Radice quadrata del prodotto delle percentuali di armatura
$\rho_l = \min(0.02; \rho_{lyz})$	n.o puro	0.00140	Coefficiente della formula (6.47): deve essere comunque <= 0.02
$d_{u1} = 2 \times d$	cm	333.00	Distanza di $u_1$ dal filo pilastro
$d_{est} = k_{out} \times d$	cm	249.75	Distanza da $u_{out}$ dell'armatura più lontana dal filo pilastro
$d_{min} = 0.3 \times d$	cm	49.95	Distanza dal filo pilastro dell'armatura più vicina (cuciture verticali)
$d_{rad,max} = 0.75 \times d$	cm	124.88	Distanza radiale massima fra cuciture
$d_{cir,max,i} = 1.5 \times d$	cm	249.75	Distanza circonferenziale massima per cuciture interne a $u_{out}$
$d_{cir,max,e} = 2.0 \times d$	cm	333.00	Distanza circonferenziale massima per cuciture esterne a $u_{out}$

Dati dedotti: forze, tensioni, perimetro di verifica

$V_{Ed} = \beta \times (V_{Ed,g} - \Delta V_{Ed})$	daN	734.880	Forza effettiva di taglio-punzonamento di progetto
$\tau_{Rd,max} = v_v \times v \times f_{cd}$	daN/cm <sup>2</sup>	37.63	Tensione di taglio-punzonamento massima assoluta
$k = \min(2; 1 + (20/d)^{1/2})$	n.o puro	1.347	Coefficiente della formula (6.47): deve essere comunque <= 2.00
$\tau_a = C_{Rd,c} \times k \times (100 \times \rho_l \times f_{ck})^{1/3}$	daN/cm <sup>2</sup>	2.698	Tensione massima ammessa senza armatura da confrontare con $\tau_{min}$
$\tau_{min} = 0.1107 \times k^{3/2} \times f_{ck}^{1/2}$	daN/cm <sup>2</sup>	3.152	Tensione massima ammessa senza armatura: valore minimo comunque
$\tau_{Rd,c} = \max(\tau_a; \tau_{min})$	daN/cm <sup>2</sup>	3.152	Tensione massima ammessa senza armatura (max fra $\tau_{min}$ e $\tau_{Rd,c}$ )
$u_{out} = V_{Ed} / (\tau_{Rd,c} \times d)$	cm	1,400.3	Perimetro di verifica oltre il quale non serve armatura

Perimetro di filo pilastro:  $u_0$

cm

377.0

Perimetro di verifica di filo pilastro

Perimetro di verifica di base:  $u_1$

cm

1,554.6

Perimetro di verifica di base

Verifica alla faccia del pilastro; controllo della correttezza di materiali e dimensioni

$\tau_{Ed} = \beta \times V_{Ed,g} / (u_0 \times d)$	daN/cm <sup>2</sup>	11.71	Tensione di progetto in corrispondenza della faccia del pilastro
$r = \tau_{Rd,max} / \tau_{Ed}$	n.o puro	3.214	materiali e geometria idonei

Verifica al perimetro di base; controllo della necessità di armatura

$\tau_{Ed,1} = V_{Ed} / (u_1 \times d)$	daN/cm <sup>2</sup>	2.839	Tensione di progetto in corrispondenza della sezione di base
$r = \tau_{Rd,c} / \tau_{Ed,1}$	n.o puro	1.110	non è necessaria l'armatura

## 4.7.9 Verifiche allo Stato Limite di Esercizio

### 4.7.9.1 Verifiche tensionali

Si esegue il controllo delle tensioni sulla sezione del colpetto, la più sollecitata, e si verifica che siano compatibili con i seguenti limiti imposti dalle NTC2018.

Sono stati ottenuti i seguenti risultati, che verificano le sezioni analizzate.

Combinazione	Normativa	Valore limite	Valore progetto	
			Direzione radiale	Direzione circonferenziale
			Bottom	
SLEr	$\sigma_s \leq 0.8 * f_{yk}$	$\sigma_s \leq 360 \text{ MPa}$	321.9 MPa	309.2 MPa
	$\sigma_c \leq 0.6 * f_{ck}$	$\sigma_c \leq 19.2 \text{ MPa}$	7.6 MPa	4.9 MPa
			Top	
	$\sigma_s \leq 0.8 * f_{yk}$	$\sigma_s \leq 360 \text{ MPa}$	31.8 MPa	22.6 MPa
	$\sigma_c \leq 0.6 * f_{ck}$	$\sigma_c \leq 19.2 \text{ MPa}$	0.4 MPa	0.3 MPa
			Bottom	
SLEqp	$\sigma_c \leq 0.45 * f_{ck}$	$\sigma_c \leq 14.4 \text{ MPa}$	7.1 MPa	4.5 MPa
			Top	
	$\sigma_c \leq 0.45 * f_{ck}$	$\sigma_c \leq 14.4 \text{ MPa}$	0.4 MPa	0.3 MPa

#### 4.7.9.2 Verifiche di fessurazione

Si esegue il controllo dell'apertura delle fessure sulla sezione del colletto, la più sollecitata, e si verifica che siano compatibile con i limiti imposti dalle NTC2018 al paragrafo 4.1.2.2.4.

Dall'analisi delle condizioni ambientali di sito, si ritiene che la porzione superiore del plinto, a contatto con il terreno di ricoprimento, sia soggetta a rischio di fenomeni di degrado da carbonatazione, dovuta all'alternanza di condizioni di asciutto ed umido. Di conseguenza, ai fini della determinazione del valore limite di apertura delle fessure per le verifiche condotte sul lato "Bottom", si ipotizzano condizioni ambientali aggressive (XC4 secondo UNI 11104 - Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità - Specificazioni complementari per l'applicazione della EN 206). Viceversa, la porzione inferiore del plinto, interrata di circa 4 m in corrispondenza del colletto, risulta immersa in terreno considerato, sulla base dei dati tuttora disponibili, come non aggressivo (XC2 secondo UNI 11104 - Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità - Specificazioni complementari per l'applicazione della EN 206). Il rischio di corrosione da carbonatazione è inferiore, assimilabile, ai fini della determinazione del valore limite di apertura delle fessure per le verifiche condotte sul lato "Top", a quello in condizioni ambientali ordinarie.

Si riporta di seguito tabella riassuntiva delle verifiche effettuate:

Combinazione	Valore limite	Valore progetto	
		Direzione radiale	Direzione circonferenziale
		Bottom	
SLEf	$w_k \leq w_3 = 0.4 \text{ mm}$	0.29 mm	0.38 mm
		Top	
	$w_k \leq w_2 = 0.3 \text{ mm}$	0.09 mm	0.07 mm
		Bottom	
SLEqp	$w_k \leq w_2 = 0.3 \text{ mm}$	0.28 mm	0.30 mm
		Top	
	$w_k \leq w_1 = 0.2 \text{ mm}$	0.08 mm	0.06 mm



Combinazione: SLEf

Sezione colletto: verifica direzione radiale, bottom

STATO LIMITE DI APERTURA DELLE FESSURE - Rif. Circolare 21/1/2019: §C.4.1.2.2.4			
<b>Geometria della sezione</b>			
Altezza della sezione	h	3750	[mm]
Larghezza della sezione	b	1000	[mm]
Altezza utile della sezione	d	3675	[mm]
Distanza tra asse armatura e lembo compresso	d'	85	[mm]
Ricoprimento dell'armatura	c	40	[mm]
<b>Armatura tesa ordinaria</b>			
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	nf.1	19	[-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	φ <sub>1</sub>	30	[mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	Asf.1	13430	[mm <sup>2</sup> ]
<b>Armatura tesa di infittimento</b>			
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	nf.2	0	[-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	φ <sub>2</sub>	0	[mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	Asf.2	0	[mm <sup>2</sup> ]
<b>Caratteristiche dei materiali</b>			
Resistenza caratteristica cilindrica del calcestruzzo	f <sub>ck</sub>	32	[MPa]
Resistenza a trazione media del calcestruzzo	f <sub>ctm</sub>	3.0	[MPa]
Modulo di elasticità del calcestruzzo	E <sub>cm</sub>	33346	[MPa]
Resistenza a snervamento dell'acciaio	f <sub>yk</sub>	450	[MPa]
Modulo di elasticità dell'acciaio	E <sub>s</sub>	200000	[MPa]
<b>DETERMINAZIONE DELL'AMPIEZZA DELLE FESSURE</b>			
Tensione nell'armatura tesa considerando la sezione fessurata	σ <sub>s</sub>	308.6	[MPa]
Asse neutro della sezione	x	959.2	[mm]
Tipo e durata dei carichi applicati		Lunga	
Coefficiente di omogeneizzazione	α <sub>ε</sub>	6.00	[-]
Area totale delle armature presenti nella zona tesa	As	13430	[mm <sup>2</sup> ]
Area efficace tesa di calcestruzzo	Ac,eff.1	187500	[mm <sup>2</sup> ]
	Ac,eff.2	930267	[mm <sup>2</sup> ]
	Ac,eff.3	1875000	[mm <sup>2</sup> ]
	Ac,eff.min	187500	[mm <sup>2</sup> ]
<div> <div> <p>b) Piastra</p> <p>B Area tesa efficace, A<sub>c,eff</sub></p> </div> <div> <p>c) Elemento in trazione</p> <p>B Area tesa efficace di estradosso, A<sub>te,eff</sub></p> <p>C Area tesa efficace di intradosso, A<sub>bi,eff</sub></p> </div> </div>			
<div> <p>figura 7.1 Area tesa efficace (casi tipici)</p> <p>Legenda</p> <p>a) Trave</p> <p>A Livello del baricentro dell'acciaio</p> <p>B Area tesa efficace, A<sub>c,eff</sub></p> </div>			
Rapporto tra l'area di acciaio teso e quella di calcestruzzo teso	ρ <sub>te,eff</sub>	0.07163	[-]
Resistenza efficace media del calcestruzzo	f <sub>ct,eff</sub>	3.0	[MPa]
Fattore di durata del carico	k <sub>t</sub>	0.4	[-]
<b>Differenza tra la deformazione nell'acciaio e nel cls</b>			
	ε <sub>sm,1</sub>	0.000926	[-]
	ε <sub>sm,2</sub>	0.001422	[-]
	ε <sub>sm</sub>	0.001422	[-]
Spaziatura tra le barre (calcolata tra i baricentri dei ferri)	s	122	[mm]
Diametro equivalente delle barre	φ <sub>eq</sub>	30.00	[mm]
Spaziatura massima di riferimento	s <sub>max,rif</sub>	275	[mm]
Coefficienti k per il calcolo dell'ampiezza di fessurazione	k <sub>1</sub>	0.800	[-]
	k <sub>2</sub>	0.500	[-]
	k <sub>3</sub>	3.400	[-]
	k <sub>4</sub>	0.425	[-]
<b>Distanza massima tra le fessure</b>			
	Δ <sub>sm1</sub>	122	[mm]
	Δ <sub>sm2</sub>	2093	[mm]
	Δ <sub>sm</sub>	122	[mm]
<b>Ampiezza limite delle fessure per la combinazione di calcolo pertinente</b>			
	w <sub>k,lim</sub>	0.40	[mm]
<b>Ampiezza delle fessure (di calcolo)</b>	w <sub>k</sub>	0.29	[mm]

Sezione coltetto: verifica direzione circonferenziale, bottom

STATO LIMITE DI APERTURA DELLE FESSURE - Rif. Circolare 21/1/2019: §C.4.1.2.2.4			
<b>Geometria della sezione</b>			
Altezza della sezione	h	3632	[mm]
Larghezza della sezione	b	1000	[mm]
Altezza utile della sezione	d	3461	[mm]
Distanza tra asse armatura e lembo compresso	d'	75	[mm]
Ricoprimento dell'armatura	c	40	[mm]
<b>Armatura tesa ordinaria</b>			
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	nf.1	20	[-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	φ <sub>1</sub>	20	[mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	Asf.1	6283	[mm <sup>2</sup> ]
<b>Armatura tesa di infittimento</b>			
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	nf.2	0	[-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	φ <sub>2</sub>	0	[mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	Asf.2	0	[mm <sup>2</sup> ]
<b>Caratteristiche dei materiali</b>			
Resistenza caratteristica cilindrica del calcestruzzo	f <sub>ck</sub>	32	[MPa]
Resistenza a trazione media del calcestruzzo	f <sub>ctm</sub>	3.0	[MPa]
Modulo di elasticità del calcestruzzo	E <sub>cm</sub>	33346	[MPa]
Resistenza a snervamento dell'acciaio	f <sub>yk</sub>	450	[MPa]
Modulo di elasticità dell'acciaio	E <sub>s</sub>	200000	[MPa]
<b>DETERMINAZIONE DELL'AMPIEZZA DELLE FESSURE</b>			
Tensione nell'armatura tesa considerando la sezione fessurata	σ <sub>s</sub>	297.4	[MPa]
Asse neutro della sezione	x	665.3	[mm]
Tipo e durata dei carichi applicati	αε	Lunga	[-]
Coefficiente di omogeneizzazione	As	6283	[mm <sup>2</sup> ]
Area totale delle armature presenti nella zona tesa	Ac,eff.1	427500	[mm <sup>2</sup> ]
Area efficace tesa di calcestruzzo	Ac,eff.2	988900	[mm <sup>2</sup> ]
	Ac,eff.3	1816000	[mm <sup>2</sup> ]
	Ac,eff.min	427500	[mm <sup>2</sup> ]
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>b) Piastra</p> <p>B Area tesa efficace, A<sub>c,eff</sub></p> <p>b)</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p>figura 7.1 Area tesa efficace (casi tipici)</p> <p>Legenda</p> <p>a) Trave</p> <p>A Livello del baricentro dell'acciaio</p> <p>B Area tesa efficace, A<sub>c,eff</sub></p> <p>a)</p> </div> </div>			
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>c) Elemento in trazione</p> <p>B Area tesa efficace di estradosso, A<sub>0,eff</sub></p> <p>C Area tesa efficace di intradosso, A<sub>0,eff</sub></p> <p>c)</p> </div> </div>			
Rapporto tra l'area di acciaio teso e quella di calcestruzzo teso	ρ <sub>π,εφφ</sub>	0.01470	[-]
Resistenza efficace media del calcestruzzo	f <sub>ct,eff</sub>	3.0	[MPa]
Fattore di durata del carico	k <sub>t</sub>	0.4	[-]
<b>Differenza tra la deformazione nell'acciaio e nel cls</b>			
	ε <sub>sm,1</sub>	0.000892	[-]
	ε <sub>sm,2</sub>	0.001039	[-]
	ε <sub>sm</sub>	0.001039	[-]
Spaziatura tra le barre (calcolata tra i baricentri dei ferri)	s	100	[mm]
Diametro equivalente delle barre	φ <sub>eq</sub>	20.00	[mm]
Spaziatura massima di riferimento	s <sub>max,rif</sub>	250	[mm]
Coefficienti k per il calcolo dell'ampiezza di fessurazione	k <sub>1</sub>	0.800	[-]
	k <sub>2</sub>	0.500	[-]
	k <sub>3</sub>	3.400	[-]
	k <sub>4</sub>	0.425	[-]
<b>Distanza massima tra le fessure</b>			
	Δ <sub>sm1</sub>	216	[mm]
	Δ <sub>sm2</sub>	2225	[mm]
	Δ <sub>sm</sub>	216	[mm]
<b>Ampiezza limite delle fessure per la combinazione di calcolo pertinente</b>			
	w <sub>k,lim</sub>	0.40	[mm]
<b>Ampiezza delle fessure (di calcolo)</b>			
	w <sub>k</sub>	0.38	[mm]

Sezione coltetto: verifica direzione radiale, top

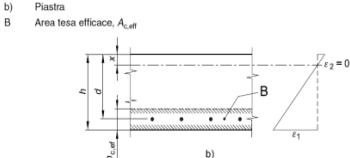
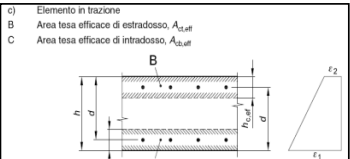
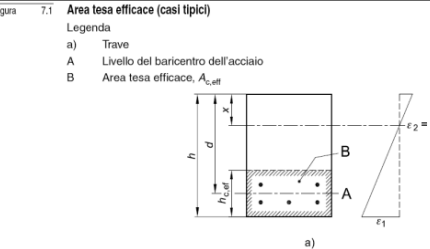
STATO LIMITE DI APERTURA DELLE FESSURE - Rif. Circolare 21/1/2019: §C.4.1.2.2.4			
<b>Geometria della sezione</b>			
Altezza della sezione	h	3750	[mm]
Larghezza della sezione	b	1000	[mm]
Altezza utile della sezione	d	85	[mm]
Distanza tra asse armatura e lembo compresso	d'	3675	[mm]
Ricoprimento dell'armatura	c	40	[mm]
<b>Armatura tesa ordinaria</b>			
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	nf.1	9.52	[-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	φ <sub>1</sub>	30	[mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	Asf.1	6729	[mm <sup>2</sup> ]
<b>Armatura tesa di infittimento</b>			
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	nf.2	0	[-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	φ <sub>2</sub>	0	[mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	Asf.2	0	[mm <sup>2</sup> ]
<b>Caratteristiche dei materiali</b>			
Resistenza caratteristica cilindrica del calcestruzzo	f <sub>ck</sub>	32	[MPa]
Resistenza a trazione media del calcestruzzo	f <sub>ctm</sub>	3.0	[MPa]
Modulo di elasticità del calcestruzzo	E <sub>cm</sub>	33346	[MPa]
Resistenza a snervamento dell'acciaio	f <sub>yk</sub>	450	[MPa]
Modulo di elasticità dell'acciaio	E <sub>s</sub>	200000	[MPa]
<b>DETERMINAZIONE DELL'AMPIEZZA DELLE FESSURE</b>			
Tensione nell'armatura tesa considerando la sezione fessurata	σ <sub>s</sub>	30.95	[MPa]
Asse neutro della sezione	x	625.6	[mm]
Tipo e durata dei carichi applicati		Lunga	
Coefficiente di omogeneizzazione	α <sub>E</sub>	6.00	[-]
Area totale delle armature presenti nella zona tesa	As	6729	[mm <sup>2</sup> ]
Area efficace tesa di calcestruzzo	Ac,eff.1	9162500	[mm <sup>2</sup> ]
	Ac,eff.2	1041467	[mm <sup>2</sup> ]
	Ac,eff.3	1875000	[mm <sup>2</sup> ]
	Ac,eff.min	1041467	[mm <sup>2</sup> ]
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>b) Piastra</p> <p>c) Elemento in trazione</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p>figura 7.1 Area tesa efficace (casi tipici)</p> <p>Legenda</p> <p>a) Trave</p> <p>A Livello del baricentro dell'acciaio</p> <p>B Area tesa efficace, A<sub>c,eff</sub></p> </div> </div>			
Rapporto tra l'area di acciaio teso e quella di calcestruzzo teso	ρ <sub>π,εφφ</sub>	0.00646	[-]
Resistenza efficace media del calcestruzzo	f <sub>ct,eff</sub>	3.0	[MPa]
Fattore di durata del carico	k <sub>t</sub>	0.4	[-]
<b>Differenza tra la deformazione nell'acciaio e nel cls</b>			
	ε <sub>sm,1</sub>	0.000093	[-]
	ε <sub>sm,2</sub>	-0.000817	[-]
	ε <sub>sm</sub>	0.000093	[-]
Spaziatura tra le barre (calcolata tra i baricentri dei ferri)	s	122	[mm]
Diametro equivalente delle barre	φ <sub>eq</sub>	30.00	[mm]
Spaziatura massima di riferimento	s <sub>max,rif</sub>	275	[mm]
Coefficienti k per il calcolo dell'ampiezza di fessurazione	k <sub>1</sub>	0.800	[-]
	k <sub>2</sub>	0.500	[-]
	k <sub>3</sub>	3.400	[-]
	k <sub>4</sub>	0.425	[-]
<b>Distanza massima tra le fessure</b>			
	Δ <sub>sm1</sub>	544	[mm]
	Δ <sub>sm2</sub>	2343	[mm]
	Δ <sub>sm</sub>	544	[mm]
<b>Ampiezza limite delle fessure per la combinazione di calcolo pertinente</b>			
	w <sub>k,lim</sub>	0.30	[mm]
<b>Ampiezza delle fessure (di calcolo)</b>			
	w <sub>k</sub>	0.09	[mm]

Sezione coltetto: verifica direzione circonferenziale, top

STATO LIMITE DI APERTURA DELLE FESSURE - Rif. Circolare 21/1/2019: §C.4.1.2.2.4		
<b>Geometria della sezione</b>		
Altezza della sezione	h	3632 [mm]
Larghezza della sezione	b	1000 [mm]
Altezza utile della sezione	d	75 [mm]
Distanza tra asse armatura e lembo compresso	d'	3536 [mm]
Ricoprimento dell'armatura	c	40 [mm]
<b>Armatura tesa ordinaria</b>		
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	nf.1	13.3 [-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	φ <sub>1</sub>	20 [mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	Asf.1	4178 [mm <sup>2</sup> ]
<b>Armatura tesa di infittimento</b>		
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	nf.2	0 [-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	φ <sub>2</sub>	0 [mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	Asf.2	0 [mm <sup>2</sup> ]
<b>Caratteristiche dei materiali</b>		
Resistenza caratteristica cilindrica del calcestruzzo	f <sub>ck</sub>	32 [MPa]
Resistenza a trazione media del calcestruzzo	f <sub>ctm</sub>	3.0 [MPa]
Modulo di elasticità del calcestruzzo	E <sub>cm</sub>	33346 [MPa]
Resistenza a snervamento dell'acciaio	f <sub>yk</sub>	450 [MPa]
Modulo di elasticità dell'acciaio	E <sub>s</sub>	200000 [MPa]
<b>DETERMINAZIONE DELL'AMPIEZZA DELLE FESSURE</b>		
Tensione nell'armatura tesa considerando la sezione fessurata	σ <sub>s</sub>	23.15 [MPa]
Asse neutro della sezione	x	538.1 [mm]
Tipo e durata dei carichi applicati		Lunga
Coefficiente di omogeneizzazione	α <sub>L</sub>	6.00 [-]
Area totale delle armature presenti nella zona tesa	As	4178 [mm <sup>2</sup> ]
Area efficace tesa di calcestruzzo	Ac,eff.1	8892500 [mm <sup>2</sup> ]
	Ac,eff.2	1031300 [mm <sup>2</sup> ]
	Ac,eff.3	1816000 [mm <sup>2</sup> ]
	Ac,eff.min	1031300 [mm <sup>2</sup> ]
<p>Figura 7.1 Area tesa efficace (casi tipici)</p> <p>Legenda</p> <p>a) Trave</p> <p>A Livello del baricentro dell'acciaio</p> <p>B Area tesa efficace, A<sub>c,eff</sub></p>		
Rapporto tra l'area di acciaio teso e quella di calcestruzzo teso	ρ <sub>te,eff</sub>	0.00405 [-]
Resistenza efficace media del calcestruzzo	f <sub>ct,eff</sub>	3.0 [MPa]
Fattore di durata del carico	k <sub>t</sub>	0.4 [-]
<b>Differenza tra la deformazione nell'acciaio e nel cls</b>		
	ε <sub>sm,1</sub>	0.000069 [-]
	ε <sub>sm,2</sub>	-0.001413 [-]
	ε <sub>sm</sub>	0.000069 [-]
Spaziatura tra le barre (calcolata tra i baricentri dei ferri)	s	150 [mm]
Diametro equivalente delle barre	φ <sub>eq</sub>	20.00 [mm]
Spaziatura massima di riferimento	s <sub>max,rif</sub>	250 [mm]
Coefficienti k per il calcolo dell'ampiezza di fessurazione	k <sub>1</sub>	0.800 [-]
	k <sub>2</sub>	0.500 [-]
	k <sub>3</sub>	3.400 [-]
	k <sub>4</sub>	0.425 [-]
<b>Distanza massima tra le fessure</b>		
	Δ <sub>sm1</sub>	574 [mm]
	Δ <sub>sm2</sub>	2320 [mm]
	Δ <sub>sm</sub>	574 [mm]
<b>Ampiezza limite delle fessure per la combinazione di calcolo pertinente</b>		
	w <sub>k,lim</sub>	0.30 [mm]
<b>Ampiezza delle fessure (di calcolo)</b>		
	w <sub>k</sub>	0.07 [mm]

Combinazione: SLEqp

Sezione coltetto: verifica direzione radiale, bottom

STATO LIMITE DI APERTURA DELLE FESSURE - Rif. Circolare 21/1/2019: §C.4.1.2.2.4			
<b>Geometria della sezione</b>			
Altezza della sezione	h	3750	[mm]
Larghezza della sezione	b	1000	[mm]
Altezza utile della sezione	d	3675	[mm]
Distanza tra asse armatura e lembo compresso	d'	85	[mm]
Ricoprimento dell'armatura	c	40	[mm]
<b>Armatura tesa ordinaria</b>			
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	nf.1	19	[-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	φφ.1	30	[mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	Asf.1	13430	[mm <sup>2</sup> ]
<b>Armatura tesa di infittimento</b>			
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	nf.2	0	[-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	φφ.2	0	[mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	Asf.2	0	[mm <sup>2</sup> ]
<b>Caratteristiche dei materiali</b>			
Resistenza caratteristica cilindrica del calcestruzzo	fck	32	[MPa]
Resistenza a trazione media del calcestruzzo	fctm	3.0	[MPa]
Modulo di elasticità del calcestruzzo	Ecm	33346	[MPa]
Resistenza a snervamento dell'acciaio	fyk	450	[MPa]
Modulo di elasticità dell'acciaio	Es	200000	[MPa]
<b>DETERMINAZIONE DELL'AMPIEZZA DELLE FESSURE</b>			
Tensione nell'armatura tesa considerando la sezione fessurata	σs	297.9	[MPa]
Asse neutro della sezione	x	959.2	[mm]
Tipo e durata dei carichi applicati			
Coefficiente di omogeneizzazione	αε	6.00	[-]
Area totale delle armature presenti nella zona tesa	As	13430	[mm <sup>2</sup> ]
Area efficace tesa di calcestruzzo	Ac,eff.1	187500	[mm <sup>2</sup> ]
	Ac,eff.2	930267	[mm <sup>2</sup> ]
	Ac,eff.3	1875000	[mm <sup>2</sup> ]
	Ac,eff.min	187500	[mm <sup>2</sup> ]
<div> <div> <p>b) Piastra</p> <p>B Area tesa efficace, <math>A_{c,eff}</math></p>  </div> <div> <p>c) Elemento in trazione</p> <p>B Area tesa efficace di estradosso, <math>A_{c,eff}</math></p> <p>C Area tesa efficace di intradosso, <math>A_{c,eff}</math></p>  </div> </div> <div> <p>figura 7.1 Area tesa efficace (casi tipici)</p> <p>Legenda</p> <p>a) Trave</p> <p>A Livello del baricentro dell'acciaio</p> <p>B Area tesa efficace, <math>A_{c,eff}</math></p>  </div>			
Rapporto tra l'area di acciaio teso e quella di calcestruzzo teso	ρ <sub>π,eff</sub>	0.07163	[-]
Resistenza efficace media del calcestruzzo	fct,eff	3.0	[MPa]
Fattore di durata del carico	kt	0.4	[-]
<b>Differenza tra la deformazione nell'acciaio e nel cls</b>			
	ε <sub>sm,1</sub>	0.000894	[-]
	ε <sub>sm,2</sub>	0.001369	[-]
	ε <sub>sm</sub>	0.001369	[-]
<b>Spaziatura tra le barre (calcolata tra i baricentri dei ferri)</b>			
Diametro equivalente delle barre	φeq	30.00	[mm]
Spaziatura massima di riferimento	s <sub>max,rif</sub>	275	[mm]
Coefficienti k per il calcolo dell'ampiezza di fessurazione	k1	0.800	[-]
	k2	0.500	[-]
	k3	3.400	[-]
	k4	0.425	[-]
<b>Distanza massima tra le fessure</b>			
	Δ <sub>sm1</sub>	122	[mm]
	Δ <sub>sm2</sub>	2093	[mm]
	Δ <sub>sm</sub>	122	[mm]
<b>Ampiezza limite delle fessure per la combinazione di calcolo pertinente</b>			
Ampiezza delle fessure (di calcolo)	wk	0.30	[mm]
	wk	0.28	[mm]

Sezione coltetto: verifica direzione circonferenziale, bottom

STATO LIMITE DI APERTURA DELLE FESSURE - Rif. Circolare 21/1/2019: §C.4.1.2.2.4			
<b>Geometria della sezione</b>			
Altezza della sezione	h	3631	[mm]
Larghezza della sezione	b	1000	[mm]
Altezza utile della sezione	d	3537	[mm]
Distanza tra asse armatura e lembo compresso	d'	75	[mm]
Ricoprimento dell'armatura	c	40	[mm]
<b>Armatura tesa ordinaria</b>			
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	nf.1	20	[-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	φ <sub>1</sub>	20	[mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	Asf.1	6283	[mm <sup>2</sup> ]
<b>Armatura tesa di infittimento</b>			
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	nf.2	0	[-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	φ <sub>2</sub>	0	[mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	Asf.2	0	[mm <sup>2</sup> ]
<b>Caratteristiche dei materiali</b>			
Resistenza caratteristica cilindrica del calcestruzzo	f <sub>ck</sub>	32	[MPa]
Resistenza a trazione media del calcestruzzo	f <sub>ctm</sub>	3.0	[MPa]
Modulo di elasticità del calcestruzzo	E <sub>cm</sub>	33346	[MPa]
Resistenza a snervamento dell'acciaio	f <sub>yk</sub>	450	[MPa]
Modulo di elasticità dell'acciaio	E <sub>s</sub>	200000	[MPa]
<b>DETERMINAZIONE DELL'AMPIEZZA DELLE FESSURE</b>			
Tensione nell'armatura tesa considerando la sezione fessurata	σ <sub>s</sub>	280	[MPa]
Asse neutro della sezione	x	665.3	[mm]
Tipo e durata dei carichi applicati	α <sub>L</sub>	Lunga	
Coefficiente di omogeneizzazione	α <sub>E</sub>	6.00	[-]
Area totale delle armature presenti nella zona tesa	As	6283	[mm <sup>2</sup> ]
Area efficace tesa di calcestruzzo	Ac,eff.1	235000	[mm <sup>2</sup> ]
	Ac,eff.2	988567	[mm <sup>2</sup> ]
	Ac,eff.3	1815500	[mm <sup>2</sup> ]
	Ac,eff.min	235000	[mm <sup>2</sup> ]
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>b) Piastra</p> <p>B Area tesa efficace, A<sub>c,eff</sub></p> <p>b)</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p>figura 7.1 Area tesa efficace (casi tipici)</p> <p>Legenda</p> <p>a) Trave</p> <p>A Livello del baricentro dell'acciaio</p> <p>B Area tesa efficace, A<sub>c,eff</sub></p> <p>a)</p> </div> </div>			
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>c) Elemento in trazione</p> <p>B Area tesa efficace di estradosso, A<sub>c,eff</sub></p> <p>C Area tesa efficace di intradosso, A<sub>c,eff</sub></p> <p>c)</p> </div> </div>			
Rapporto tra l'area di acciaio teso e quella di calcestruzzo teso	ρ <sub>π,εφφ</sub>	0.02674	[-]
Resistenza efficace media del calcestruzzo	f <sub>ct,eff</sub>	3.0	[MPa]
Fattore di durata del carico	k <sub>t</sub>	0.4	[-]
<b>Differenza tra la deformazione nell'acciaio e nel cls</b>			
	ε <sub>sm,1</sub>	0.000840	[-]
	ε <sub>sm,2</sub>	0.001138	[-]
	ε <sub>sm</sub>	0.001138	[-]
<b>Spaziatura tra le barre (calcolata tra i baricentri dei ferri)</b>			
	s	100	[mm]
Diametro equivalente delle barre	φ <sub>eq</sub>	20.00	[mm]
Spaziatura massima di riferimento	s <sub>max,rif</sub>	250	[mm]
Coefficienti k per il calcolo dell'ampiezza di fessurazione	k <sub>1</sub>	0.800	[-]
	k <sub>2</sub>	0.500	[-]
	k <sub>3</sub>	3.400	[-]
	k <sub>4</sub>	0.425	[-]
<b>Distanza massima tra le fessure</b>			
	Δ <sub>sm1</sub>	155	[mm]
	Δ <sub>sm2</sub>	2224	[mm]
	Δ <sub>sm</sub>	155	[mm]
<b>Ampiezza limite delle fessure per la combinazione di calcolo pertinente</b>			
	w <sub>k,lim</sub>	0.30	[mm]
<b>Ampiezza delle fessure (di calcolo)</b>			
	w <sub>k</sub>	0.30	[mm]

Sezione coltetto: verifica direzione radiale, top

STATO LIMITE DI APERTURA DELLE FESSURE - Rif. Circolare 21/1/2019: §C.4.1.2.2.4			
<b>Geometria della sezione</b>			
Altezza della sezione	h	3750	[mm]
Larghezza della sezione	b	1000	[mm]
Altezza utile della sezione	d	85	[mm]
Distanza tra asse armatura e lembo compresso	d'	3665	[mm]
Ricoprimento dell'armatura	c	40	[mm]
<b>Armatura tesa ordinaria</b>			
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	nf.1	9.52	[-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	φ <sub>1</sub>	30	[mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	Asf.1	6729	[mm <sup>2</sup> ]
<b>Armatura tesa di infittimento</b>			
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	nf.2	0	[-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	φ <sub>2</sub>	0	[mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	Asf.2	0	[mm <sup>2</sup> ]
<b>Caratteristiche dei materiali</b>			
Resistenza caratteristica cilindrica del calcestruzzo	f <sub>ck</sub>	32	[MPa]
Resistenza a trazione media del calcestruzzo	f <sub>ctm</sub>	3.0	[MPa]
Modulo di elasticità del calcestruzzo	E <sub>cm</sub>	33346	[MPa]
Resistenza a snervamento dell'acciaio	f <sub>yk</sub>	450	[MPa]
Modulo di elasticità dell'acciaio	E <sub>s</sub>	200000	[MPa]
<b>DETERMINAZIONE DELL'AMPIEZZA DELLE FESSURE</b>			
Tensione nell'armatura tesa considerando la sezione fessurata	σ <sub>s</sub>	30.23	[MPa]
Asse neutro della sezione	x	625.6	[mm]
Tipo e durata dei carichi applicati		Lunga	
Coefficiente di omogeneizzazione	α <sub>E</sub>	6.00	[-]
Area totale delle armature presenti nella zona tesa	As	6729	[mm <sup>2</sup> ]
Area efficace tesa di calcestruzzo	Ac,eff.1	9162500	[mm <sup>2</sup> ]
	Ac,eff.2	1041467	[mm <sup>2</sup> ]
	Ac,eff.3	1875000	[mm <sup>2</sup> ]
	Ac,eff.min	1041467	[mm <sup>2</sup> ]
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>b) Piastra</p> <p>c) Elemento in trazione</p> </div> <div style="width: 50%;"> <p>figura 7.1 Area tesa efficace (casi tipici)</p> <p>Legenda</p> <p>a) Trave</p> <p>A Livello del baricentro dell'acciaio</p> <p>B Area tesa efficace, A<sub>c,eff</sub></p> </div> </div>			
Rapporto tra l'area di acciaio teso e quella di calcestruzzo teso	ρ <sub>π,εφφ</sub>	0.00646	[-]
Resistenza efficace media del calcestruzzo	f <sub>ct,eff</sub>	3.0	[MPa]
Fattore di durata del carico	k <sub>t</sub>	0.4	[-]
<b>Differenza tra la deformazione nell'acciaio e nel cls</b>			
	ε <sub>sm,1</sub>	0.000091	[-]
	ε <sub>sm,2</sub>	-0.000821	[-]
	ε <sub>sm</sub>	0.000091	[-]
Spaziatura tra le barre (calcolata tra i baricentri dei ferri)	s	122	[mm]
Diametro equivalente delle barre	φ <sub>eq</sub>	30.00	[mm]
Spaziatura massima di riferimento	s <sub>max,rif</sub>	275	[mm]
Coefficienti k per il calcolo dell'ampiezza di fessurazione	k <sub>1</sub>	0.800	[-]
	k <sub>2</sub>	0.500	[-]
	k <sub>3</sub>	3.400	[-]
	k <sub>4</sub>	0.425	[-]
<b>Distanza massima tra le fessure</b>			
	Δ <sub>sm1</sub>	544	[mm]
	Δ <sub>sm2</sub>	2343	[mm]
	Δ <sub>sm</sub>	544	[mm]
<b>Ampiezza limite delle fessure per la combinazione di calcolo pertinente</b>			
	w <sub>k,lim</sub>	0.20	[mm]
<b>Ampiezza delle fessure (di calcolo)</b>			
	w <sub>k</sub>	0.08	[mm]

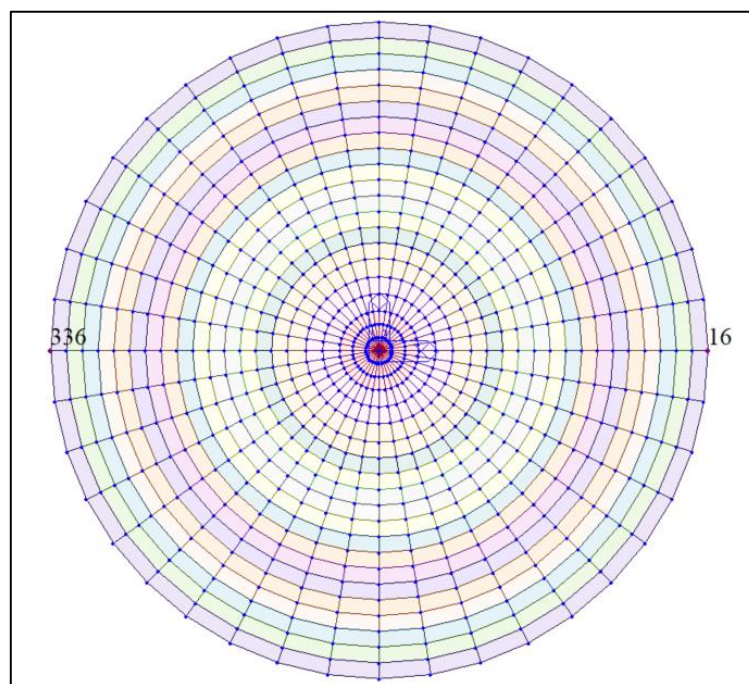
Sezione coltetto: verifica direzione circonferenziale, top

STATO LIMITE DI APERTURA DELLE FESSURE - Rif. Circolare 21/1/2019: §C.4.1.2.2.4		
<b>Geometria della sezione</b>		
Altezza della sezione	h	3632 [mm]
Larghezza della sezione	b	1000 [mm]
Altezza utile della sezione	d	75 [mm]
Distanza tra asse armatura e lembo compresso	d'	3537 [mm]
Ricoprimento dell'armatura	c	40 [mm]
<b>Armatura tesa ordinaria</b>		
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	nf.1	13.3 [-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	φ <sub>1</sub>	20 [mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	Asf.1	4178 [mm <sup>2</sup> ]
<b>Armatura tesa di infittimento</b>		
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	nf.2	0 [-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	φ <sub>2</sub>	0 [mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	Asf.2	0 [mm <sup>2</sup> ]
<b>Caratteristiche dei materiali</b>		
Resistenza caratteristica cilindrica del calcestruzzo	f <sub>ck</sub>	32 [MPa]
Resistenza a trazione media del calcestruzzo	f <sub>ctm</sub>	3.0 [MPa]
Modulo di elasticità del calcestruzzo	E <sub>cm</sub>	33346 [MPa]
Resistenza a snervamento dell'acciaio	f <sub>yk</sub>	450 [MPa]
Modulo di elasticità dell'acciaio	E <sub>s</sub>	200000 [MPa]
<b>DETERMINAZIONE DELL'AMPIEZZA DELLE FESSURE</b>		
Tensione nell'armatura tesa considerando la sezione fessurata	σ <sub>s</sub>	20.61 [MPa]
Asse neutro della sezione	x	538.1 [mm]
Tipo e durata dei carichi applicati		Lunga
Coefficiente di omogeneizzazione	α <sub>E</sub>	6.00 [-]
Area totale delle armature presenti nella zona tesa	As	4178 [mm <sup>2</sup> ]
Area efficace tesa di calcestruzzo	Ac,eff.1	8892500 [mm <sup>2</sup> ]
	Ac,eff.2	1031300 [mm <sup>2</sup> ]
	Ac,eff.3	1816000 [mm <sup>2</sup> ]
	Ac,eff.min	1031300 [mm <sup>2</sup> ]
<p>Figura 7.1 Area tesa efficace (casi tipici)</p> <p>Legenda</p> <p>a) Trave</p> <p>A Livello del baricentro dell'acciaio</p> <p>B Area tesa efficace, A<sub>c,eff</sub></p>		
Rapporto tra l'area di acciaio teso e quella di calcestruzzo teso	ρ <sub>te,eff</sub>	0.00405 [-]
Resistenza efficace media del calcestruzzo	f <sub>ct,eff</sub>	3.0 [MPa]
Fattore di durata del carico	k <sub>t</sub>	0.4 [-]
<b>Differenza tra la deformazione nell'acciaio e nel cls</b>		
	ε <sub>sm,1</sub>	0.000062 [-]
	ε <sub>sm,2</sub>	-0.001426 [-]
	ε <sub>sm</sub>	0.000062 [-]
Spaziatura tra le barre (calcolata tra i baricentri dei ferri)	s	150 [mm]
Diametro equivalente delle barre	φ <sub>eq</sub>	20.00 [mm]
Spaziatura massima di riferimento	s <sub>max,rif</sub>	250 [mm]
Coefficienti k per il calcolo dell'ampiezza di fessurazione	k <sub>1</sub>	0.800 [-]
	k <sub>2</sub>	0.500 [-]
	k <sub>3</sub>	3.400 [-]
	k <sub>4</sub>	0.425 [-]
<b>Distanza massima tra le fessure</b>		
	Δ <sub>sm1</sub>	574 [mm]
	Δ <sub>sm2</sub>	2320 [mm]
	Δ <sub>sm</sub>	574 [mm]
<b>Ampiezza limite delle fessure per la combinazione di calcolo pertinente</b>		
	w <sub>k,lim</sub>	0.20 [mm]
<b>Ampiezza delle fessure (di calcolo)</b>		
	w <sub>k</sub>	0.06 [mm]



#### 4.7.10 Verifica rigidezza del basamento

Si riporta la verifica di compatibilità della minima rigidezza rotazionale e laterale della fondazione allo Stato Limite di Esercizio. Ai fini del calcolo della rigidezza alla rotazione si sono presi in considerazione i nodi agli estremi della fondazione (16 e 336) indicati nell'immagine seguente e distanti 2500 cm. Ai fini del calcolo della rigidezza laterale sono stati presi in considerazione tutti i nodi appartenenti al basamento.



**Figura 4-45: Identificazione nodi**

Si considerano quindi gli spostamenti dei nodi precedentemente indicati, nelle combinazioni "SLer" e "SLEqp".

La rigidezza alla rotazione, calcolata come  $(M/\sigma)$  deve essere superiore, per entrambe le combinazioni di calcolo, al valore minimo indicato nella specifica fornita dal produttore della turbina (168 GNm/rad) e riportata nell'immagine sottostante.

La rigidezza laterale, calcolata come  $(F/s)$  deve essere superiore, per entrambe le combinazioni di calcolo, al valore minimo indicato nella specifica fornita dal produttore della turbina (6.0 MN/m) e riportata nell'immagine sottostante.

Concurrent values for rotational- and lateral stiffness										
Rotational stiffness	[GNm/rad]	168	196	229	268	313	366	428	458	500
Lateral stiffness	[MN/m]	6.0	6.3	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0

Table 5-1 Minimum lateral stiffness.

Verifica rigidezza rotazionale del basamento:

RIGIDEZZA ROTAZIONALE DEL BASAMENTO						
	<b>Combinazione di calcolo</b>				SLEr	
$s_{max}$	spostamento massimo				1.030	cm
$s_{min}$	spostamento minimo				0.277	cm
$s_{max} - s_{min}$	differenza tra i due spostamenti				0.75	cm
$d$	distanza tra i nodi				2500.00	cm
$\alpha$	angolo di rotazione				0.00030	rad
$M$	Momento flettente agente				1.39E+08	Nm
$\vartheta$	rigidezza rotazionale				4.60E+11	Nm/rad
$\vartheta_{lim}$	rigidezza rotazionale minima				1.68E+11	Nm/rad
	<b>Verifica soddisfatta</b>				OK	
	<b>Combinazione di calcolo</b>				SLEqp	
$s_{max}$	spostamento massimo				0.9774	cm
$s_{min}$	spostamento minimo				0.3261	cm
$s_{max} - s_{min}$	differenza tra i due spostamenti				0.65	cm
$d$	distanza tra i nodi				2500	cm
$\alpha$	angolo di rotazione				0.000261	rad
$M$	Momento flettente agente				1.21E+08	Nm
$\vartheta$	rigidezza rotazionale				4.63E+11	Nm/rad
$\vartheta_{lim}$	rigidezza rotazionale minima				1.68E+11	Nm/rad
	<b>Verifica soddisfatta</b>				OK	

Verifica rigidezza laterale del basamento:

RIGIDEZZA LATERALE DEL BASAMENTO						
	<b>Combinazione di calcolo</b>				SLEr	
$s_{max}$	spostamento laterale				1.68E-05	cm
$F_{Ed}$	Forza orizzontale agente				1322490	N
$k$	rigidezza laterale				7.86E+10	
$k_{lim}$	rigidezza laterale minima				6.00E+06	N/m
	<b>Verifica soddisfatta</b>				OK	
	<b>Combinazione di calcolo</b>				SLEqp	
$s_{max}$	spostamento laterale				7.29E-06	cm
$F_{Ed}$	Forza orizzontale agente				977000	N
$k$	rigidezza laterale				1.34E+11	
$k_{lim}$	rigidezza laterale minima				6.00E+06	N/m
	<b>Verifica soddisfatta</b>				OK	

## 5 CONCLUSIONI GENERALI

Il presente elaborato riporta i calcoli preliminari delle fondazioni degli aereogeneratori. Il predimensionamento delle opere è stato effettuato considerando carichi preliminarmente forniti dal produttore della turbina e i parametri geotecnici più conservativi presenti nel documento "VIL.039 – Relazione geologica e geotecnica".

I valori dei cedimenti calcolati preliminarmente, sono risultati tali da non compromettere la funzionalità dell'impianto durante la sua fase operativa.

Nella fase di progettazione esecutiva si valuteranno i reali carichi e parametri geotecnici di progetto si procederà ad una verifica del predimensionamento effettuato.