

“BORGIO FAZIO”

Realizzazione parco eolico denominato “Borgio Fazio”

Comune di Trapani (TP)

COMMITTENTE



Edison Rinnovabili S.p.A.

Foro Buonaparte n.31 - Milano (MI)
P.IVA: 12921540154

PROGETTAZIONE



Hydro Engineering s.s.
di Damiano e Mariano Galbo
via Rossotti, 39
91011 Alcamo (TP) Italy



Progettista: Ing. Mariano Galbo

RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE

REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
0	PRIMA EMISSIONE	15/06/2023	MG	VF	MG
Codice commessa: EDIS801		Codifica documento: BOF-PD-R0006_0			

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	2

INDICE

1. PREMESSA	4
2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO	5
3. DESCRIZIONE DELLE OPERE DI FONDAZIONE	6
4. AZIONI AGENTI	9
4.1. AZIONI SECONDO LA NORMA IEC 61400	9
4.1.1. <i>Azione estrema del vento</i>	9
4.1.2. <i>Azione del vento in esercizio</i>	10
4.1.3. <i>Azioni equivalenti a fatica</i>	10
4.2. COMBINAZIONI DI CALCOLO.....	11
4.3. APPLICAZIONE DEI CARICHI.....	13
4.3.1. <i>Carichi applicati per le analisi locali</i>	14
4.3.2. <i>Carichi applicati per le analisi FEM</i>	15
5. CRITERI GENERALI DI CALCOLO	26
5.1. TIPO DI ANALISI E MOTIVAZIONE	26
5.2. METODO DI VERIFICA SEZIONALE	26
5.3. CRITERI USATI PER LA MODELLAZIONE DELLA STRUTTURA	27
5.4. VERIFICHE STRUTTURALI AGLI SLU E SLE SECONDO IL D.M. 17/01/2018	29
5.5. MODELLO DI CALCOLO	30
6. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI	31
6.1. DETERMINAZIONE DELLE LUNGHEZZE DI ANCORAGGIO.....	32
7. VERIFICHE LOCALI SISTEMA DI ANCORAGGIO TRA TORRE E FONDAZIONE	35
7.1. VERIFICA PRESSIONI DI CONTATTO TRA LE FLANGE E CALCESTRUZZO	35
7.2. VERIFICA TIRANTI PER IL CALCESTRUZZO COMPRESSO	42
7.3. VERIFICA DELLE ARMATURE DEL COLLETTO.....	44
8. VERIFICHE GLOBALI PLINTO DI FONDAZIONE	48
8.1. CARATTERISTICHE DI SOLLECITAZIONE AGENTI.....	50
8.2. VERIFICA PRESSO-FLESSIONE AGLI SLU	54
8.3. VERIFICA TAGLIO AGLI SLU.....	59
8.4. VERIFICA PRESSO-FLESSIONE AGLI SLE	63
8.5. VERIFICA A FATICA.....	66
8.6. VERIFICA A PUNZONAMENTO	73
8.6.1. <i>Verifica a punzonamento della torre</i>	73
8.6.2. <i>Verifica a punzonamento dei pali</i>	75
8.7. VERIFICA PALI DI FONDAZIONE	77
9. GIUDIZIO MOTIVATO DI ACCETTABILITA'	80

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	3

9.1.	DETERMINAZIONE DELLE SOLLECITAZIONI RESISTENTI.....	80
9.2.	ANALISI TRASMISSIONE DEGLI SFORZI NEL MODELLO FEM.....	81

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	4

1. PREMESSA

La società Hydro Engineering s.s. è stata incaricata di redigere il progetto definitivo dell'impianto eolico di "Borgo Fazio" composto da 8 aerogeneratori, ciascuno di potenza nominale pari a 6,00 MW, per una potenza complessiva di 48,0 MW, ubicato nel Comune di Trapani e proposto dalla società Edison Rinnovabili S.P.A. con sede in Foro Buonaparte n.31 – Milano (MI).

Gli aerogeneratori previsti sono SG170-6.0 MW, caratterizzati da un diametro di 170,0 m, un'altezza al mozzo pari a 115 m, diametro rotore pari a 170 m e altezza massima al top della pala pari a 200 m.

L'impianto è quindi composto da 8 aerogeneratori di potenza unitaria pari a 6 MW, e una potenza complessiva installata di 48 MW.

L'area di impianto si trova nel comune di Trapani, in località Borgo Fazio, in un'area a circa 7,5 Km dall'abitato di Fulgatore frazione del Comune di Trapani., su una superficie a destinazione agricolo/pastorale. I terreni sui quali si intende realizzare l'impianto sono tutti di proprietà privata. Il territorio è caratterizzato da un'orografia prevalentemente di basse colline, le posizioni delle macchine vanno da un'altitudine di 90 m. slm. a 220,00 m. slm.

Il presente documento si propone di fornire i calcoli preliminare delle fondazioni.

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	5

2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

La normativa cui viene fatto riferimento nelle fasi di calcolo e progettazione è "l'Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni", D.M. 17/01/2018.

Si farà, inoltre, riferimento alle seguenti normative:

- Circolare esplicativa n° 7 del 21/01/2019 "Istruzioni per l'applicazione delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 17/01/2018";
- Legge n. 1086 del 05.11.1971 "Norme per la disciplina delle opere in c.a. normale e precompresso, ed a struttura metallica";
- Legge n. 64 del 02.02.1974 – "Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche".
- IEC 60400-1 "Wind Turbine safety and design";
- Eurocodice 2 "Design of concrete structures".
- Eurocodice 3 "Design of steel structures".
- Eurocodice 4 "Design of composite steel and concrete structures".
- Eurocodice 7 "Geotechnical design".
- Eurocodice 8 "Design of structures for earthquake resistance".

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	6

3. DESCRIZIONE DELLE OPERE DI FONDAZIONE

Nel presente capitolo si riporta la descrizione delle opere di fondazione previste a seguito delle risultanze delle indagini geologiche.

In via esemplificativa, fermo restando che la scelta sarà effettuata in fase di progettazione esecutiva, di seguito si riporta lo schema di una fondazione su pali.

La fondazione indiretta sarà ipotizzata costituita da un plinto circolare, avente diametro pari a 20,00 m, posto su un numero di pali ipotizzato pari a 26 di diametro $\Phi 1000$ e lunghezza variabile.

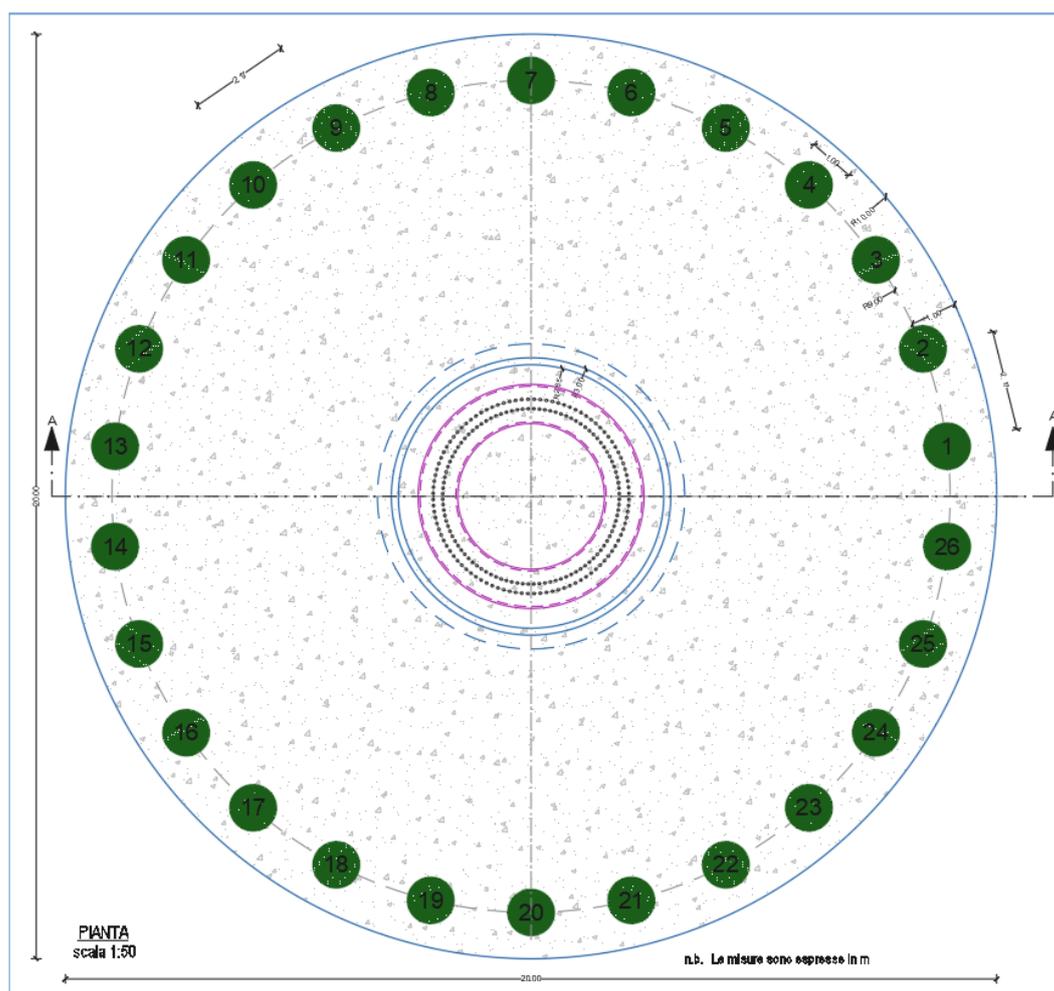


Figura 1 Pianta del plinto con indicazione dei pali di fondazione (n.26 del diametro 100 cm)

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	7

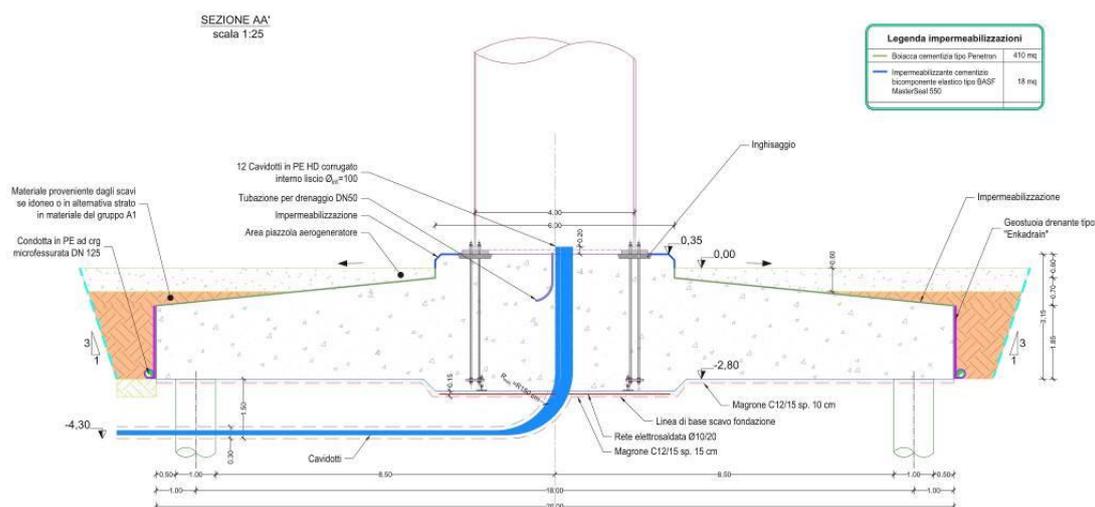


Figura 2 Sezione del plinto

Il plinto presenta una suola di forma troncoconica, con altezza pari a 1,85 m al bordo esterno e pari a 2,55 m in corrispondenza della parte centrale, ad un raggio di 3,00 m, ove è presente un colletto cilindrico che si eleva sulla suola di ulteriori 0,60 m. Il colletto presenta quindi un'altezza complessiva pari a 3,15 m.

All'interno del plinto di fondazione, al fine di collegare la torre metallica di sostegno dell'aerogeneratore alla fondazione, sarà annegata una gabbia metallica di tirafondi di ancoraggio di forma cilindrica dotata di una piastra superiore ed una piastra inferiore: la piastra superiore, che fungerà da piastra di distribuzione del carico proveniente dalla torre, presenta uno spessore di 100 mm e larghezza di 650 mm, mentre la piastra inferiore presenta spessore di 50 mm e larghezza 450 mm.

Sotto la piastra di distribuzione, incassata nella fondazione, sarà eseguito un getto di inghisaggio con malta ad alta resistenza dello spessore pari a 11 cm e larghezza minima pari a 77 cm che ne permetterà il perfetto livellamento.

Entrambe le piastre sono dotate di n°2 serie concentriche di n°100 fori che consentiranno il passaggio di altrettante barre filettate ad alta resistenza di tipo M42 classe 10.9, che, tramite dadi, garantiscono il corretto collegamento delle due piastre alla Torre in elevazione.

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	8

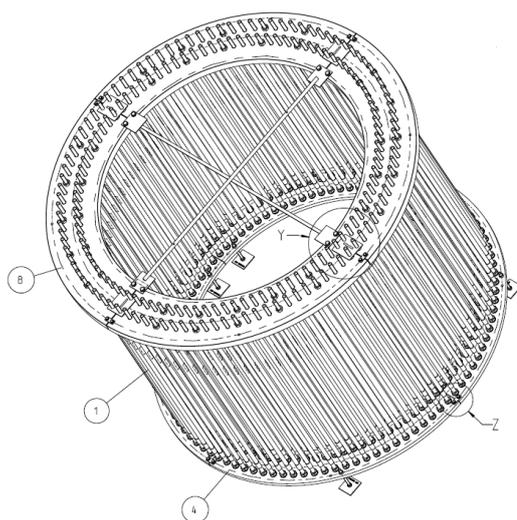


Figura 3 Vista isometrica d'insieme

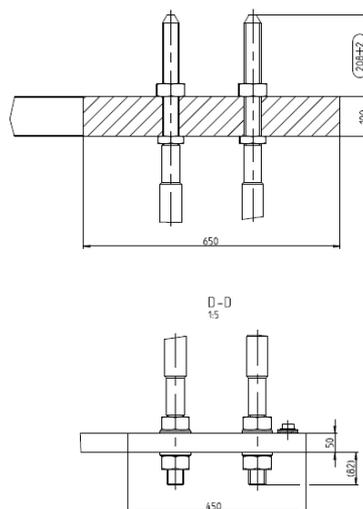


Figura 4 Sezione verticale

A tergo dei lati del manufatto dovrà essere realizzato uno strato di drenaggio dello spessore di 160 cm, munito di tubazione di drenaggio forata per l'allontanamento delle acque dalla fondazione.

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	9

4. AZIONI AGENTI

I carichi agenti sulle opere di fondazione sono essenzialmente quelli scaricati dalle torri.

Il calcolo di progetto della torre di sostegno dell'aerogeneratore, allegato al presente progetto, è stato eseguito dal produttore, sulla base delle sollecitazioni massime previste dalla IEC 61400-1 e dalle NTC 2018.

Le sollecitazioni considerate sulle opere di fondazione sono quelle provenienti dalla struttura sovrastante di una società produttrice di torri similari.

Tali carichi sono dati con riferimento all'intersezione dell'asse della torre con estradosso dell'opera di fondazione secondo quanto riportato nella seguente figura.

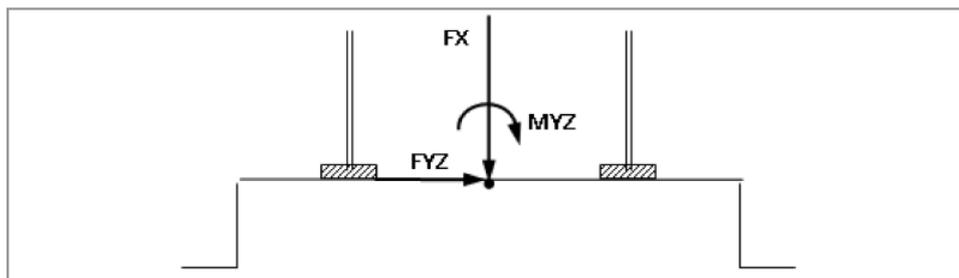


Figura 5 Vista isometrica d'insieme

Il carico dovuto alla neve non viene considerato, in quanto non esistono reali possibilità di accumulo significativo di neve sia sulla navicella che sulle pale.

Oltre a tali sollecitazioni, si è considerato agente sulle opere di fondazione il peso proprio ed un carico uniformemente distribuito per tenere conto del terreno di ricoprimento della fondazione.

4.1. AZIONI SECONDO LA NORMA IEC 61400

4.1.1. *Azione estrema del vento*

L'azione estrema del vento che agisce sulla torre secondo quanto disposto dalla norma IEC 61400 è stata calcolata dal produttore delle torri e confermata dal calcolista della struttura in elevazione ed è riassunta nelle seguenti tabelle, tratte dai documenti forniti dal produttore delle torri, in cui è anche riportato il codice di riferimento della combinazione considerata ed il coefficiente di sicurezza relativo alla tipologia di combinazione (normale o anormale).

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	10

Azioni SLU amplificate con i coefficienti di sicurezza secondo le norme IEC						
Lead	LC/Family	IEC PLF	F _x	F _{yz}	M _x	M _{yz}
LC	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[kN m]	[kN m]
8.1	IEC_Ed3_NCV_00_08010000 Max Fz	1,50	9.795	136	-950	14.844
1.3	IEC_Ed3_NCV_60_01030000 Max Fr	1,35	8.881	1.528	1.185	156.377
1.4	IEC_Ed3_NCV_60_01040000 Max Mz	1,35	8.592	338	11.541	53.032
1.3	IEC_Ed3_NCV_60_01030000 Max Mr	1,35	8.994	1.394	-1.653	158.914

Tabella 1

Azioni SLU non amplificate						
Lead	LC/Family	IEC PLF	F _x	F _{yz}	M _x	M _{yz}
LC	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[kN m]	[kN m]
8.1	IEC_Ed3_NCV_00_08010000 Max Fz	1,50	6.530	91	-633	9.896
1.3	IEC_Ed3_NCV_60_01030000 Max Fr	1,35	6.579	1.132	878	115.835
1.4	IEC_Ed3_NCV_60_01040000 Max Mz	1,35	6.364	250	8.549	39.283
1.3	IEC_Ed3_NCV_60_01030000 Max Mr	1,35	6.662	1.033	-1.224	117.714

Tabella 2

4.1.2. Azione del vento in esercizio

L'azione del vento agli stati limite di esercizio che agisce sulla torre secondo quanto disposto dalla norma IEC 61400 è stata calcolata dal produttore delle torri e confermata dal calcolista della struttura in elevazione; di seguito una tabella riassuntiva delle azioni.

Azioni SLE				
LC/Family	F _x	F _{yz}	M _x	M _{yz}
[-]	[kN]	[kN]	[kN m]	[kN m]
Characteristic load	6.662	1.033	-1.224	117.714
Permanent load	6.902	875	2.739	97.465

Tabella 3

4.1.3. Azioni equivalenti a fatica

Le azioni equivalenti a fatica, che agiscono sulla torre, secondo quanto disposto dalla norma IEC 61400 sono state calcolate dal produttore delle torri e riassunte nella seguente tabella per $m=7$.

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	11

Damage-equivalent load range for fatigue loads					
N	m	FXTB kN	FZTB kN	MXTB kNm	MYTB kNm
1.00E+07	7	138	501	5763	44116
gamma-f - FAT		1.0	1.0	1.0	1.0
Mean load		6553	482	60	56134

Tabella 4

4.2. COMBINAZIONI DI CALCOLO

Per la verifica degli elementi strutturali del nodo torre/plinto di fondazione e per la verifica delle fondazioni, le combinazioni di calcolo considerate sono quelle previste dal D.M. 17/01/2018 per i vari stati limite e per le varie azioni e tipologie costruttive.

In particolare, sono state analizzate le seguenti combinazioni delle azioni:

- Combinazione fondamentale, impiegata per gli stati limite ultimi (S.L.U.) (2.5.1):

$$\gamma_{G1}G_1 + \gamma_{G2}G_2 + \gamma_P P + \gamma_{Q1}Q_{k1} + \gamma_{Q2}\psi_{02}Q_{k2} + \dots$$

- Combinazione caratteristica per gli stati limite di esercizio (S.L.E.), impiegata per le analisi nelle condizioni di esercizio irreversibili (2.5.2):

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

- Combinazione quasi permanente per gli stati limite di esercizio (S.L.E.), impiegata per le analisi nelle condizioni di esercizio degli effetti a lungo termine (2.5.4):

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

- Combinazione sismica, impiegata per gli stati limite ultimi e di esercizio connessi all'azione sismica E (2.5.5):

$$E + G_1 + G_2 + P + \psi_{21}Q_{k1} + \psi_{22}Q_{k2} + \dots$$

in tali condizioni di carico l'azione sismica si somma alle sollecitazioni che agisce sulla torre impiegate per le analisi degli effetti a lungo termine.

Le verifiche a fatica sono state eseguite considerando le due combinazioni di carico a fatica che forniscono rispettivamente le sollecitazioni massime e minime sui singoli componenti della struttura. Tali combinazioni di carico sono state ricavate utilizzando i carichi a fatica corrispondenti a 107 cicli

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	12

con $m=7$ ed i carichi a fatica medi e determinando le sollecitazioni nel seguente modo:

- Combinazione a fatica che definisce le azioni massime:

$$G_1 + G_2 + P + (Q_{k1} + \psi_{02}Q_{k2} + \dots)_{medi} + \Delta(Q_{k1} + \psi_{02}Q_{k2} + \dots)_{fatica} / 2$$

- Combinazione a fatica che definisce le azioni minime:

$$G_1 + G_2 + P + (Q_{k1} + \psi_{02}Q_{k2} + \dots)_{medi} - \Delta(Q_{k1} + \psi_{02}Q_{k2} + \dots)_{fatica} / 2$$

Nelle espressioni precedenti i simboli utilizzati hanno il seguente significato:

- G sono le azioni permanenti, azioni che agiscono durante tutta la vita nominale della costruzione, la cui variazione di intensità nel tempo è così piccola e lenta da poterle considerare con sufficiente approssimazione costanti nel tempo. Esse sono:
 - peso proprio di tutti gli elementi strutturali; peso proprio del terreno, forze indotte dal terreno (esclusi gli effetti di carichi variabili applicati al terreno); forze risultanti dalla pressione dell'acqua (quando si configurino costanti nel tempo) (G1);
 - peso proprio di tutti gli elementi non strutturali (G2);
 - spostamenti e deformazioni imposti, previsti dal progetto e realizzati all'atto della costruzione;
 - pretensione e precompressione (P);
 - spostamenti differenziali;
- Q sono le azioni variabili, azioni agenti sulla struttura o sull'elemento strutturale con valori istantanei che possono risultare sensibilmente diversi fra loro nel tempo, suddivise come:
 - di lunga durata: agisce con un'intensità significativa, anche non continuativamente, per un tempo non trascurabile rispetto alla vita nominale della struttura;
 - di breve durata: azioni che agiscono per un periodo di tempo breve rispetto alla vita nominale della struttura.

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGIO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	13

Per le analisi agli SLU, alle sollecitazioni sopra riportate sono stati applicati i fattori parziali di sicurezza sotto elencati, riportati nella tabella 6.2.I del D.M. 17 gennaio 2018.

Carichi	Effetto	Coefficiente parziale γ_f	EQU	A1	A2
Permanenti	Favorevole	γ_{g1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Permanenti non strutturali	Favorevole	γ_{g2}	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Variabili	Favorevole	γ_{Qi}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

Tabella 5

In tali equazioni, le azioni orizzontali ed i momenti flettenti provenienti dalla torre sono stati considerati come azioni variabili, applicando quindi un coefficiente moltiplicativo pari a 1,50 così come previsto al punto 6.2.4.1.1 del D.M. 17/01/2018.

Come si evincerà nel proseguo del presente lavoro, le azioni dimensionanti per la presente tipologia di strutture sono costituite dalle sollecitazioni derivanti dall'azione del vento, risultando queste ultime molto più gravose delle sollecitazioni ricavate dall'azione sismica. Questa considerazione vale per le azioni calcolate allo SLU così come per le azioni calcolate allo SLE e quindi anche per le combinazioni sismiche ed in particolare per le combinazioni allo SLO e SLE che producono sollecitazioni inferiori a quelle dovute al normale funzionamento della turbina.

4.3. APPLICAZIONE DEI CARICHI

Le sollecitazioni trasmesse dalla torre alla fondazione per le varie condizioni di carico sono state riassunte nella seguente tabella.

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	14

AZIONI ALLA SOMMITA' DELLA FONDAZIONE comprehensive del peso proprio della torre										
	IEC_Ed3_NCV LC_0801 max Fz	IEC_Ed3_NCV LC_0103 max Fr	IEC_Ed3_NCV LC_0104 max Mz	IEC_Ed3_NCV LC_0104 max Mr	DM vento	Sismic load	SLS_CH IEC production Characteristic	SLS_IEC Permanent loads	Fatigue Load Min	Fatigue Load Max
F _{yz} (KN)	91	1.132	250	1.033	1.193	368	1.033	875	232	733
M _{yz} (KN m)	9.896	117.671	39.283	117.714	92.378	14.794	117.714	97.465	34.076	78.192
M _x (KN m)	-633	878	8.549	-1.224	0	566	-1.224	2.739	-2.822	2.942
F _x (KN)	6.530	6.579	6.364	6.662	6.530	6.597	6.662	6.902	6.484	6.622

Tabella 6

Tali azioni sono comprensive del peso proprio della turbina e della torre metallica che risulta pari a circa **6.410 KN**.

4.3.1. Carichi applicati per le analisi locali

Le analisi locali relative al sistema di connessione tra torre e fondazione sono state eseguite analizzando tra quelle precedentemente descritte le combinazioni di interesse più gravose, tenuto conto anche dei coefficienti di amplificazione delle forze da prendere in considerazione.

L'analisi condotta ha portato alla selezione delle azioni riassunte nelle seguenti tabelle:

	WTG Load	IEC_Ed3_NCV LC_0104 max Mr	SLS_CH IEC production Characteristic	SLS_IEC Permanent loads	Fatigue Load Min	Fatigue Load Max
F _{ris} (KN)	0,00	1.032,59	1.032,59	875,00	231,50	732,50
M _{ris} (KN m)	0,00	117.714,07	117.714,07	97.465,00	34.076,00	78.192,00
M _z	0,00	-1.224,44	-1.224,44	2.739,00	-2.821,50	2.941,50
F _z	-6410,00	-252,22	-252,22	-492,00	-74,00	-212,00
γ	1,30	1,50	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabella 7

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	15

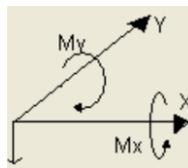
Tali azioni, opportunamente combinate ed amplificate, hanno portato alle seguenti combinazioni di carico:

	SLU	Comb. rara	Comb. QP	fatica minimi	fatica massimi
F_{ris} (KN)	1.548,89	1.032,59	875,00	231,50	732,50
M_{ris} (KN m)	176.571,11	117.714,07	97.465,00	34.076,00	78.192,00
M_z	-1.836,67	-1.224,44	2.739,00	-2.821,50	2.941,50
F_z	-8.711,33	-6.662,22	-6.902,00	-6.484,00	-6.622,00

Tabella 8

4.3.2. Carichi applicati per le analisi FEM

Le azioni provenienti dalla struttura in elevazione sono state applicate al modello FEM della piastra di fondazione in accordo al sistema di riferimento del software, rappresentato nella figura seguente.



La direzione lungo cui agisce l'azione risultante è stata quindi posta coincidente con uno degli assi principali della fondazione, allo scopo di studiare le sollecitazioni radiali e tangenziali agenti lungo la direttrice maggiormente sollecitata ed estendere i risultati dell'analisi alla totalità della fondazione. Le azioni sono state distribuite in un numero di 22 punti, utilizzando i seguenti dati:

Parametri per la redistribuzione delle forze		
n	24	(numero di parti in cui è divisa la circonferenza)
R	2,00 m	(raggio medio della gabbia di tirafondi)
$\Delta\alpha$	15,00 °	(ampiezza angolo relativo all'arco di riferimento)
C	12,57 m	(lunghezza circonferenza)
ΔC	0,52 m	(lunghezza arco di circonferenza)

Tabella 9

Per il peso proprio, si è considerata la seguente sollecitazione risultante:

F_{ris} (KN)	M_{ris} (KN m)	M_z (KN m)	F_z (KN)
0,00	0,00	0,00	-6.410,00

Tabella 10

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	16

Che ha generato la seguente distribuzione di forze:

Peso proprio WTG				
i	α	x_i	y_i	Pz
1	0,00	2,00	0,00	267,08
2	15,00	1,93	0,52	267,08
3	30,00	1,73	1,00	267,08
4	45,00	1,41	1,41	267,08
5	60,00	1,00	1,73	267,08
6	75,00	0,52	1,93	267,08
7	90,00	0,00	2,00	267,08
8	105,00	-0,52	1,93	267,08
9	120,00	-1,00	1,73	267,08
10	135,00	-1,41	1,41	267,08
11	150,00	-1,73	1,00	267,08
12	165,00	-1,93	0,52	267,08
13	180,00	-2,00	0,00	267,08
14	195,00	-1,93	-0,52	267,08
15	210,00	-1,73	-1,00	267,08
16	225,00	-1,41	-1,41	267,08
17	240,00	-1,00	-1,73	267,08
18	255,00	-0,52	-1,93	267,08
19	270,00	0,00	-2,00	267,08
20	285,00	0,52	-1,93	267,08
21	300,00	1,00	-1,73	267,08
22	315,00	1,41	-1,41	267,08

Tabella 11

Per la condizione "IEC_Ed3_NCV LC_0801 max Fz", si è considerata la seguente sollecitazione risultante:

F_{ris} (KN)	M_{ris} (KN m)	M_z (KN m)	F_z (KN)
90,67	9.896,00	-633,33	120,00

Tabella 12

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	17

Che ha generato la seguente distribuzione di forze:

IEC_Ed3_NCV LC_0801 max Fz				
i	α	x_i	y_i	Pz
1	0,00	2,00	0,00	5,00
2	15,00	1,93	0,52	-101,72
3	30,00	1,73	1,00	-201,17
4	45,00	1,41	1,41	-286,56
5	60,00	1,00	1,73	-352,09
6	75,00	0,52	1,93	-393,28
7	90,00	0,00	2,00	-407,33
8	105,00	-0,52	1,93	-393,28
9	120,00	-1,00	1,73	-352,09
10	135,00	-1,41	1,41	-286,56
11	150,00	-1,73	1,00	-201,17
12	165,00	-1,93	0,52	-101,72
13	180,00	-2,00	0,00	5,00
14	195,00	-1,93	-0,52	111,72
15	210,00	-1,73	-1,00	211,17
16	225,00	-1,41	-1,41	296,56
17	240,00	-1,00	-1,73	362,09
18	255,00	-0,52	-1,93	403,28
19	270,00	0,00	-2,00	417,33
20	285,00	0,52	-1,93	403,28
21	300,00	1,00	-1,73	362,09
22	315,00	1,41	-1,41	296,56

Tabella 13

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	18

Per la condizione "IEC_Ed3_NCV LC_0103 max Fr", si è considerata la seguente sollecitazione risultante:

F_{ris} (KN)	M_{ris} (KN m)	M_z (KN m)	F_z (KN)
1.132,00	117.671,00	878,00	169,00

Tabella 14

Che ha generato la seguente distribuzione di forze:

IEC_Ed3_NCV LC_0103 max Fr				
i	α	x_i	y_i	P_z
1	0,00	2,00	0,00	7,04
2	15,00	1,93	0,52	-1.261,94
3	30,00	1,73	1,00	-2.444,44
4	45,00	1,41	1,41	-3.459,87
5	60,00	1,00	1,73	-4.239,04
6	75,00	0,52	1,93	-4.728,85
7	90,00	0,00	2,00	-4.895,92
8	105,00	-0,52	1,93	-4.728,85
9	120,00	-1,00	1,73	-4.239,04
10	135,00	-1,41	1,41	-3.459,87
11	150,00	-1,73	1,00	-2.444,44
12	165,00	-1,93	0,52	-1.261,94
13	180,00	-2,00	0,00	7,04
14	195,00	-1,93	-0,52	1.276,02
15	210,00	-1,73	-1,00	2.458,52
16	225,00	-1,41	-1,41	3.473,96
17	240,00	-1,00	-1,73	4.253,13
18	255,00	-0,52	-1,93	4.742,94
19	270,00	0,00	-2,00	4.910,00
20	285,00	0,52	-1,93	4.742,94
21	300,00	1,00	-1,73	4.253,13
22	315,00	1,41	-1,41	3.473,96

Tabella 15

Per la condizione "IEC_Ed3_NCV LC_0104 max Mz", si è considerata la seguente sollecitazione risultante:

F_{ris} (KN)	M_{ris} (KN m)	M_z (KN m)	F_z (KN)
250,37	39.282,96	8.548,89	-45,56

Tabella 16

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	19

Che ha generato la seguente distribuzione di forze:

IEC_Ed3_NCV LC_0104 max Mz				
i	α	x_i	y_i	Pz
1	0,00	2,00	0,00	-1,90
2	15,00	1,93	0,52	-425,53
3	30,00	1,73	1,00	-820,29
4	45,00	1,41	1,41	-1.159,28
5	60,00	1,00	1,73	-1.419,40
6	75,00	0,52	1,93	-1.582,92
7	90,00	0,00	2,00	-1.638,69
8	105,00	-0,52	1,93	-1.582,92
9	120,00	-1,00	1,73	-1.419,40
10	135,00	-1,41	1,41	-1.159,28
11	150,00	-1,73	1,00	-820,29
12	165,00	-1,93	0,52	-425,53
13	180,00	-2,00	0,00	-1,90
14	195,00	-1,93	-0,52	421,73
15	210,00	-1,73	-1,00	816,50
16	225,00	-1,41	-1,41	1.155,49
17	240,00	-1,00	-1,73	1.415,60
18	255,00	-0,52	-1,93	1.579,12
19	270,00	0,00	-2,00	1.634,89
20	285,00	0,52	-1,93	1.579,12
21	300,00	1,00	-1,73	1.415,60
22	315,00	1,41	-1,41	1.155,49

Tabella 17

Per la condizione "IEC_Ed3_NCV LC_0104 max Mr", si è considerata la seguente sollecitazione risultante:

F_{ris} (KN)	M_{ris} (KN m)	M_z (KN m)	F_z (KN)
1.032,59	117.714,07	-1.224,44	252,22

Tabella 18

che ha generato la seguente distribuzione di forze:

IEC_Ed3_NCV LC_0104 max Mr				
i	α	x_i	y_i	Pz
1	0,00	2,00	0,00	10,51
2	15,00	1,93	0,52	-1.258,93
3	30,00	1,73	1,00	-2.441,87
4	45,00	1,41	1,41	-3.457,67
5	60,00	1,00	1,73	-4.237,13
6	75,00	0,52	1,93	-4.727,12

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	20

IEC_Ed3_NCV LC_0104 max Mr				
7	90,00	0,00	2,00	-4.894,24
8	105,00	-0,52	1,93	-4.727,12
9	120,00	-1,00	1,73	-4.237,13
10	135,00	-1,41	1,41	-3.457,67
11	150,00	-1,73	1,00	-2.441,87
12	165,00	-1,93	0,52	-1.258,93
13	180,00	-2,00	0,00	10,51
14	195,00	-1,93	-0,52	1.279,95
15	210,00	-1,73	-1,00	2.462,89
16	225,00	-1,41	-1,41	3.478,69
17	240,00	-1,00	-1,73	4.258,15
18	255,00	-0,52	-1,93	4.748,14
19	270,00	0,00	-2,00	4.915,26
20	285,00	0,52	-1,93	4.748,14
21	300,00	1,00	-1,73	4.258,15
22	315,00	1,41	-1,41	3.478,69

Tabella 19

Per la condizione "DM Vento", si è considerata la seguente sollecitazione risultante:

F_{ris} (KN)	M_{ris} (KN m)	M_z (KN m)	F_z (KN)
1.193,06	92.378,28	0,00	120,00

Tabella 20

Che ha generato la seguente distribuzione di forze:

DM Vento				
i	α	x_i	y_i	P_z
1	0,00	2,00	0,00	5,00
2	15,00	1,93	0,52	-991,22
3	30,00	1,73	1,00	-1.919,55
4	45,00	1,41	1,41	-2.716,72
5	60,00	1,00	1,73	-3.328,41
6	75,00	0,52	1,93	-3.712,94
7	90,00	0,00	2,00	-3.844,10
8	105,00	-0,52	1,93	-3.712,94
9	120,00	-1,00	1,73	-3.328,41
10	135,00	-1,41	1,41	-2.716,72
11	150,00	-1,73	1,00	-1.919,55
12	165,00	-1,93	0,52	-991,22
13	180,00	-2,00	0,00	5,00
14	195,00	-1,93	-0,52	1.001,22
15	210,00	-1,73	-1,00	1.929,55

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	21

DM Vento				
16	225,00	-1,41	-1,41	2.726,72
17	240,00	-1,00	-1,73	3.338,41
18	255,00	-0,52	-1,93	3.722,94
19	270,00	0,00	-2,00	3.854,10
20	285,00	0,52	-1,93	3.722,94
21	300,00	1,00	-1,73	3.338,41
22	315,00	1,41	-1,41	2.726,72
23	330,00	1,73	-1,00	1.929,55
24	345,00	1,93	-0,52	1.001,22

Tabella 21

Per la condizione "Sismic load SLV", si è considerata la seguente sollecitazione risultante:

F_{ris} (KN)	M_{ris} (KN m)	M_z (KN m)	F_z (KN)
368,07	14.794,39	566,00	187,03

Tabella 22

Che ha generato la seguente distribuzione di forze:

Sismic load SLV				
i	α	x_i	y_i	P_z
1	0,00	2,00	0,00	7,79
2	15,00	1,93	0,52	-151,75
3	30,00	1,73	1,00	-300,42
4	45,00	1,41	1,41	-428,09
5	60,00	1,00	1,73	-526,05
6	75,00	0,52	1,93	-587,64
7	90,00	0,00	2,00	-608,64
8	105,00	-0,52	1,93	-587,64
9	120,00	-1,00	1,73	-526,05
10	135,00	-1,41	1,41	-428,09
11	150,00	-1,73	1,00	-300,42
12	165,00	-1,93	0,52	-151,75
13	180,00	-2,00	0,00	7,79
14	195,00	-1,93	-0,52	167,34
15	210,00	-1,73	-1,00	316,01
16	225,00	-1,41	-1,41	443,68
17	240,00	-1,00	-1,73	541,64
18	255,00	-0,52	-1,93	603,22
19	270,00	0,00	-2,00	624,23
20	285,00	0,52	-1,93	603,22
21	300,00	1,00	-1,73	541,64
22	315,00	1,41	-1,41	443,68

Tabella 23

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	22

Per la condizione "SLS_IEC Characteristic", si è considerata la seguente sollecitazione risultante:

F_{ris} (KN)	M_{ris} (KN m)	M_z (KN m)	F_z (KN)
1.032,59	117.714,07	-1.224,44	252,22

Tabella 24

Che ha generato la seguente distribuzione di forze:

SLS_IEC Characteristic				
i	α	x_i	y_i	P_z
1	0,00	2,00	0,00	10,51
2	15,00	1,93	0,52	-1.258,93
3	30,00	1,73	1,00	-2.441,87
4	45,00	1,41	1,41	-3.457,67
5	60,00	1,00	1,73	-4.237,13
6	75,00	0,52	1,93	-4.727,12
7	90,00	0,00	2,00	-4.894,24
8	105,00	-0,52	1,93	-4.727,12
9	120,00	-1,00	1,73	-4.237,13
10	135,00	-1,41	1,41	-3.457,67
11	150,00	-1,73	1,00	-2.441,87
12	165,00	-1,93	0,52	-1.258,93
13	180,00	-2,00	0,00	10,51
14	195,00	-1,93	-0,52	1.279,95
15	210,00	-1,73	-1,00	2.462,89
16	225,00	-1,41	-1,41	3.478,69
17	240,00	-1,00	-1,73	4.258,15
18	255,00	-0,52	-1,93	4.748,14
19	270,00	0,00	-2,00	4.915,26
20	285,00	0,52	-1,93	4.748,14
21	300,00	1,00	-1,73	4.258,15
22	315,00	1,41	-1,41	3.478,69

Tabella 25

Per la condizione "SLS IEC Permanet load", si è considerata la seguente sollecitazione risultante:

F_{ris} (KN)	M_{ris} (KN m)	M_z (KN m)	F_z (KN)
875,00	97.465,00	2.739,00	492,00

Tabella 26

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	23

Che ha generato la seguente distribuzione di forze:

SLS IEC Permant load				
i	α	x_i	y_i	P_z
1	0,00	2,00	0,00	20,50
2	15,00	1,93	0,52	-1.030,57
3	30,00	1,73	1,00	-2.010,02
4	45,00	1,41	1,41	-2.851,09
5	60,00	1,00	1,73	-3.496,47
6	75,00	0,52	1,93	-3.902,17
7	90,00	0,00	2,00	-4.040,54
8	105,00	-0,52	1,93	-3.902,17
9	120,00	-1,00	1,73	-3.496,47
10	135,00	-1,41	1,41	-2.851,09
11	150,00	-1,73	1,00	-2.010,02
12	165,00	-1,93	0,52	-1.030,57
13	180,00	-2,00	0,00	20,50
14	195,00	-1,93	-0,52	1.071,57
15	210,00	-1,73	-1,00	2.051,02
16	225,00	-1,41	-1,41	2.892,09
17	240,00	-1,00	-1,73	3.537,47
18	255,00	-0,52	-1,93	3.943,17
19	270,00	0,00	-2,00	4.081,54
20	285,00	0,52	-1,93	3.943,17
21	300,00	1,00	-1,73	3.537,47
22	315,00	1,41	-1,41	2.892,09

Tabella 27

Per la condizione "Carichi a fatica minimi", si è considerata la seguente sollecitazione risultante:

F_{ris} (KN)	M_{ris} (KN m)	M_z (KN m)	F_z (KN)
231,50	34.076,00	-2.821,50	74,00

Tabella 28

Che ha generato la seguente distribuzione di forze:

Carichi a fatica minimi				
i	α	x_i	y_i	P_z
1	0,00	2,00	0,00	3,08
2	15,00	1,93	0,52	-364,40
3	30,00	1,73	1,00	-706,83
4	45,00	1,41	1,41	-1.000,89
5	60,00	1,00	1,73	-1.226,53
6	75,00	0,52	1,93	-1.368,37

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	24

Carichi a fatica minimi				
7	90,00	0,00	2,00	-1.416,75
8	105,00	-0,52	1,93	-1.368,37
9	120,00	-1,00	1,73	-1.226,53
10	135,00	-1,41	1,41	-1.000,89
11	150,00	-1,73	1,00	-706,83
12	165,00	-1,93	0,52	-364,40
13	180,00	-2,00	0,00	3,08
14	195,00	-1,93	-0,52	370,56
15	210,00	-1,73	-1,00	713,00
16	225,00	-1,41	-1,41	1.007,06
17	240,00	-1,00	-1,73	1.232,70
18	255,00	-0,52	-1,93	1.374,54
19	270,00	0,00	-2,00	1.422,92
20	285,00	0,52	-1,93	1.374,54
21	300,00	1,00	-1,73	1.232,70
22	315,00	1,41	-1,41	1.007,06

Tabella 29

Per la condizione "Carichi a fatica massimi", si è considerata la seguente sollecitazione risultante:

F_{ris} (KN)	M_{ris} (KN m)	M_z (KN m)	F_z (KN)
732,50	78.192,00	2.941,50	212,00

Tabella 30

Che ha generato la seguente distribuzione di forze:

Carichi a fatica massimi				
i	α	x_i	y_i	P_z
1	0,00	2,00	0,00	8,83
2	15,00	1,93	0,52	-834,40
3	30,00	1,73	1,00	-1.620,17
4	45,00	1,41	1,41	-2.294,92
5	60,00	1,00	1,73	-2.812,68
6	75,00	0,52	1,93	-3.138,15
7	90,00	0,00	2,00	-3.249,17
8	105,00	-0,52	1,93	-3.138,15
9	120,00	-1,00	1,73	-2.812,68
10	135,00	-1,41	1,41	-2.294,92
11	150,00	-1,73	1,00	-1.620,17
12	165,00	-1,93	0,52	-834,40
13	180,00	-2,00	0,00	8,83
14	195,00	-1,93	-0,52	852,07
15	210,00	-1,73	-1,00	1.637,83

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	25

Carichi a fatica massimi				
i	α	x_i	y_i	Pz
16	225,00	-1,41	-1,41	2.312,59
17	240,00	-1,00	-1,73	2.830,34
18	255,00	-0,52	-1,93	3.155,82
19	270,00	0,00	-2,00	3.266,83
20	285,00	0,52	-1,93	3.155,82
21	300,00	1,00	-1,73	2.830,34
22	315,00	1,41	-1,41	2.312,59

Tabella 31

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	26

5. CRITERI GENERALI DI CALCOLO

L'analisi FEM, eseguita tramite l'ausilio del Software dell'Aztec Informatica, API++14 licenza n°A101280VT, ha fornito le sollecitazioni agenti sull'opera di fondazione.

Vista la particolare modalità delle condizioni di carico applicate, la simmetria del problema e la reale applicazione dei carichi alla fondazione, verrà effettuata l'analisi lungo un diametro della fondazione.

I risultati ottenuti saranno quindi estesi alla totalità della fondazione.

Infatti la direzione di applicazione del carico è una questione puramente convenzionale, in realtà questa condizione di carico si potrà verificare lungo ognuna delle direzioni uscenti dal centro della torre.

5.1. TIPO DI ANALISI E MOTIVAZIONE

L'analisi per le combinazioni delle azioni permanenti e variabili è stata condotta in regime elastico lineare. Per la determinazione degli effetti delle azioni, le analisi saranno effettuate assumendo:

- sezioni interamente reagenti con rigidzze valutate riferendosi al solo calcestruzzo;
- relazioni tensione deformazione lineari;
- valori medi del modulo d'elasticità.

Il metodo di analisi utilizzato è quello statico, che modella le azioni dinamiche agenti sulla struttura mediante l'applicazione di forze statiche equivalenti. Le forze applicate sono comprensive degli effetti dinamici ordinari delle azioni che rappresentano.

5.2. METODO DI VERIFICA SEZIONALE

Le verifiche sono state condotte con il metodo degli stati limite (SLU e SLE) utilizzando i coefficienti parziali della normativa di cui al DM 17.01.2018.

Le verifiche degli elementi bidimensionali sono state effettuate direttamente sullo stato tensionale ottenuto, per le azioni di tipo statico e di esercizio. Per le azioni dovute al sisma (ed in genere per le azioni che provocano elevata domanda di deformazione anelastica), le verifiche sono state effettuate sulle risultanti (forze e momenti) agenti globalmente su una sezione dell'oggetto strutturale.

Per le verifiche sezionali degli elementi in c.a. ed acciaio sono stati utilizzati i seguenti legami:

Legame parabola rettangolo per il cls

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	27

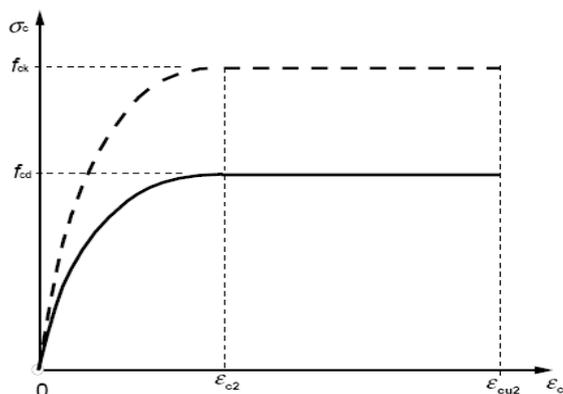


Figura 6

Legame elastico perfettamente plastico o incrudente a duttilità limitata per l'acciaio

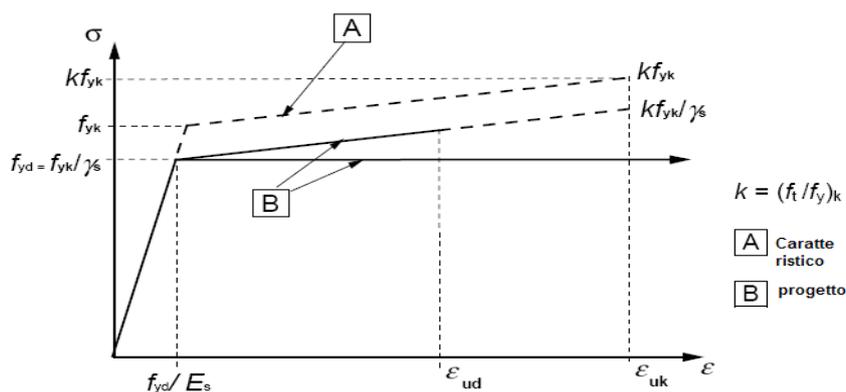


Figura 7

5.3. CRITERI USATI PER LA MODELLAZIONE DELLA STRUTTURA

L'analisi del plinto di fondazione è stata eseguita utilizzando una modellazione con il metodo degli elementi finiti (FEM).

La struttura viene suddivisa in elementi connessi fra di loro in corrispondenza dei nodi. Il campo di spostamenti interno all'elemento viene approssimato in funzione degli spostamenti nodali mediante le funzioni di forma.

Il metodo degli elementi finiti (FEM) sviluppatosi a partire dalla fine degli anni '50 del secolo scorso rappresenta attualmente il metodo più diffuso nel campo dell'analisi del continuo sia per problemi statici che dinamici in campo lineare e non lineare.

Tralasciando gli aspetti teorici del problema, per i quali si rimanda alla vastissima letteratura specializzata, in breve il metodo suddivide il mezzo continuo in tanti sottodomini (detti elementi) connessi fra loro mediante nodi.

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	28

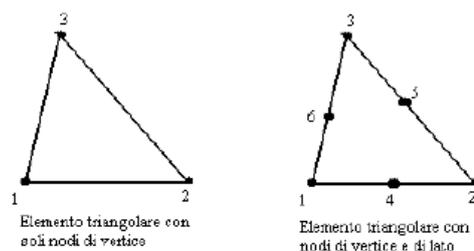


Figura 8

Il programma utilizza, per l'analisi tipo piastra, elementi quadrangolari e triangolari.

La procedura di suddivisione del continuo in elementi prende il nome di generazione mesh e rappresenta il primo passo per l'analisi ad elementi finiti di qualsivoglia struttura.

In letteratura esistono diversi metodi per la generazione di una mesh di elementi su una regione di forma qualsiasi. Il metodo sicuramente più noto si basa sulla tecnica di triangolazione di Delaunay che consente di ottenere mesh di elementi triangolari. Con tale metodo la mesh ottenuta è ottimizzata nel senso che fra tutte le triangolazioni possibili quella di Delaunay minimizza il massimo angolo e massimizza il minimo angolo generando in tal modo elementi che hanno il più basso rapporto di distorsione. Nel problema di tipo piastra gli spostamenti nodali sono lo spostamento verticale w e le rotazioni intorno agli assi x e y , ϕ_x e ϕ_y .

Note le funzioni di forma che legano gli spostamenti nodali al campo di spostamenti sul singolo elemento è possibile costruire la matrice di rigidezza dell'elemento k_e ed il vettore dei carichi nodali dell'elemento p_e .

La determinazione dello stato di tensione indotte nel terreno da un carico applicato in superficie viene eseguita con l'ipotesi di mezzo continuo, elastico-lineare, omogeneo ed isotropo.

La fase di assemblaggio consente di ottenere la matrice di rigidezza globale della struttura K ed il vettore dei carichi nodali p . La soluzione del sistema

$$K u = p$$

consente di ricavare il vettore degli spostamenti nodali u .

Dagli spostamenti nodali è possibile risalire per ogni elemento al campo di spostamenti ed alle sollecitazioni M_x , M_y ed M_{xy} .

Nelle fondazioni dirette il terreno di fondazione viene modellato con delle molle disposte in corrispondenza dei nodi. La rigidezza delle molle è proporzionale alla costante di sottofondo k ed all'area dell'elemento.

Per l'analisi della piastra soggetta a carichi nel piano vengono utilizzati elementi triangolari a 6 nodi a

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	29

deformazione quadratica. L'analisi fornisce in tal caso il campo di spostamenti orizzontali e le tensioni nel piano della lastra σ_x , σ_y e τ_{xy} .

5.4. VERIFICHE STRUTTURALI AGLI SLU E SLE SECONDO IL D.M. 17/01/2018

La sicurezza e le prestazioni saranno garantite verificando gli opportuni stati limite in funzione dell'utilizzo della struttura, della sua vita nominale e di quanto stabilito dalle norme di cui al D.M. 17.01.2018. Gli stati limite analizzati sono:

– Stati limite ultimi (SLU)

La sicurezza nei riguardi degli stati limite ultimi (SLU) che possono provocare eccessive deformazioni permanenti, crolli parziali o globali, dissesti, che possono compromettere l'incolumità delle persone e/o la perdita di beni, provocare danni ambientali e sociali, mettere fuori servizio l'opera. Per le verifiche sono stati utilizzati i coefficienti parziali relativi alle azioni ed alle resistenze dei materiali in accordo a quanto previsto dal D.M. 17.01.2018 per i vari tipi di materiale. I valori utilizzati sono riportati nei tabulati di calcolo.

– Stati limite di esercizio (SLE)

La sicurezza nei riguardi degli stati limite di esercizio (SLE) che possono limitare nell'uso e nella durata l'utilizzo della struttura per le azioni di esercizio. I valori limite, così come definiti nelle norme tecniche, sono riportati nelle tabelle di calcolo.

Secondo quanto previsto dalla normativa le verifiche sono state eseguite nei confronti dei seguenti stati limite:

SLU di tipo geotecnico (GEO)

 collasso per carico limite dell'insieme fondazione-terreno

 collasso per scorrimento sul piano di posa

SLU di tipo strutturale (STR)

 raggiungimento della resistenza negli elementi strutturali, accertando per ogni stato limite considerato la sollecitazione agente sia minore o al più uguale a quella resistente.

Si dovranno adottare due diversi approcci progettuali:

Approccio 1: Combinazione 2: (A2+M2+R2) per le verifiche di stabilità globale

Approccio 2: Combinazione (A1+M1+R3) per le verifiche strutturali e per le rimanenti verifiche geotecniche.

Per gli stati limite ultimi le verifiche vengono effettuate confrontando la resistenza di progetto (R_d) il

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	30

valore di progetto dell'effetto delle azioni (E_d), utilizzando il metodo dei coefficienti parziali di sicurezza. I coefficienti parziali di sicurezza, associati ai materiali ed alle azioni, tengono in conto della variabilità delle rispettive grandezze e le incertezze relative alle tolleranze geometriche e alla affidabilità del modello di calcolo.

5.5. MODELLO DI CALCOLO

Per il calcolo strutturale, e le successive verifiche, l'opera di fondazione è stata schematizzata come una piastra. Per l'analisi si è utilizzato il metodo degli elementi finiti (FEM). La struttura cioè viene suddivisa in elementi connessi fra di loro in corrispondenza dei nodi. Il campo di spostamenti interno all'elemento viene approssimato in funzione degli spostamenti nodali mediante le funzioni di forma. Il programma utilizza, per l'analisi tipo piastra, elementi quadrangolari. Nel problema di tipo piastra gli spostamenti nodali sono lo spostamento verticale w e le rotazione intorno agli assi x e y , φ_x e φ_y , legati allo spostamento w tramite relazioni:

$$f_x = -dw/dy$$

$$f_y = dw/dx$$

Note le funzioni di forma che legano gli spostamenti nodali al campo di spostamenti sul singolo elemento è possibile costruire la matrice di rigidità dell'elemento ed il vettore dei carichi nodali dell'elemento.

In particolare, dall'analisi FEM, eseguita tramite l'ausilio del Software dell'Aztec Informatica, API++14, si sono ricavate le sollecitazioni agenti sull'opera di fondazione. A sua volta, conoscendo le sollecitazioni (si rimanda al fascicolo dei calcoli) si sono eseguite le opportune verifiche agli SLU e SLE ai sensi del DM 17/01/2018; tali verifiche sono riportate nei paragrafi seguenti.

Al fine di eseguire la valutazione delle sollecitazioni agenti sul blocco di fondazione, sono state combinate tra di loro le azioni gravitazionali, sismiche e quelle specifiche sulla torre, secondo quanto previsto dalla normativa vigente.

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	31

6. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

Le proprietà dei materiali che costituiscono gli elementi strutturali in calcestruzzo armato previsti in progetto sono le seguenti:

Acciaio da cemento armato:	B450C
Calcestruzzo per i pali:	C25/30
Calcestruzzo per il plinto:	C45/55
Calcestruzzo per il colletto:	C50/60
Calcestruzzo per l'inghisaggio:	C90/105

Pertanto, le caratteristiche dei materiali possono essere riassunte nelle seguenti tabelle:

Coefficienti di sicurezza		
γ_c	1,50	coefficiente di sicurezza del calcestruzzo
α_{cc}	0,85	coefficiente riduttivo calcestruzzo per le resistenze di lunga durata
γ_s	1,15	coefficiente di sicurezza acciaio
Caratteristiche calcestruzzo suola		
R_{ck}	55,00	Mpa resistenza cubica a compressione caratteristica
f_{ck}	45,00	Mpa resistenza cilindrica a compressione caratteristica
f_{cd}	25,50	Mpa resistenza cilindrica a compressione di progetto
E_{cm}	36.283	Mpa modulo elastico
$f_{cd,fat}$	22,65	Mpa resistenza a fatica di progetto (MC10 eq. 5.1 - 110)
$\sigma_{C \max SLE R}$	27,00	Mpa tensione massima del calcestruzzo per SLE rara (0,6 x f_{ck})
$\sigma_{C \max SLE P}$	20,25	Mpa tensione massima del calcestruzzo per SLE quasi permanente (0,45 x f_{ck})
Caratteristiche calcestruzzo colletto		
R_{ck}	60,00	Mpa resistenza cubica a compressione caratteristica
f_{ck}	50,00	Mpa resistenza cilindrica a compressione caratteristica
f_{cd}	28,33	Mpa resistenza cilindrica a compressione di progetto
E_{cm}	37.278	Mpa modulo elastico
$f_{cd,fat}$	24,79	Mpa resistenza a fatica di progetto (MC10 eq. 5.1 - 110)
$\sigma_{C \max SLE R}$	30,00	Mpa tensione massima del calcestruzzo per SLE rara (0,6 x f_{ck})
$\sigma_{C \max SLE P}$	22,50	Mpa tensione massima del calcestruzzo per SLE quasi permanente (0,45 x f_{ck})

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	32

Caratteristiche calcestruzzo inghisaggio			
R_{ck}	105,00	Mpa	resistenza cubica a compressione caratteristica
f_{ck}	90,00	Mpa	resistenza cilindrica a compressione caratteristica
f_{cd}	51,00	Mpa	resistenza cilindrica a compressione di progetto
E_{cm}	43.631	Mpa	modulo elastico
$f_{cd,fat}$	39,53	Mpa	resistenza a fatica di progetto (MC10 eq. 5.1 - 110)
$\sigma_{C \max SLE R}$	54,00	Mpa	tensione massima del calcestruzzo per SLE rara (0,6 x fck)
$\sigma_{C \max SLE P}$	40,50	Mpa	tensione massima del calcestruzzo per SLE quasi permanente (0,45 x fck)
Caratteristiche dell'acciaio			
f_{yk}	450,00	Mpa	resistenza dell'acciaio caratteristica
f_{yd}	391,30	Mpa	resistenza dell'acciaio di progetto
$\sigma_{S \max SLE R}$	360,00	Mpa	tensione massima dell'acciaio per SLE rara (0,8 x fyk)
$\Delta\sigma_{Rsk}$ (dritte)	162,50	Mpa	escursione massima nell'acciaio verifiche a fatica barre dritte
$\Delta\sigma_{Rsd}$ (dritte)	101,69	Mpa	escursione massima nell'acciaio verifiche a fatica barre dritte a m=7

Tabella 32

6.1. DETERMINAZIONE DELLE LUNGHEZZE DI ANCORAGGIO

Le barre di armatura del calcestruzzo dovranno essere opportunamente ancorate in modo da consentire la trasmissione sicura delle forze di aderenza al calcestruzzo, al fine di evitarne la fessurazione longitudinale ed il distacco. Dovranno inoltre essere curate le lunghezze di sovrapposizione delle barre.

La lunghezza di ancoraggio necessaria è stata determinata utilizzando le espressioni 8.2, 8.3 e 8.4 dell'Eurocodice 2, in cui si è posto σ_{sd} pari a f_{yd}

$$f_{bd} = 2,25 \eta_1 \eta_2 f_{ctd}$$

$$l_{b,rqd} = \frac{\phi}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}$$

$$l_{bd} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 l_{b,rqd} > l_{b,min}$$

in cui

$$\alpha_1 = 1,00 \text{ (nel caso di barre non dritte con } c_d < 3\phi)$$

$$\alpha_2 = 1,00 \text{ (nel caso di barre non dritte con } \alpha_2 = 0,7 < 1 - 0,15 (c_d - 3\phi)/\phi < 1,0)$$

$$\alpha_3 = 1,00 \text{ (nel caso di } K = 0)$$

$$\alpha_4 = 1,00 \text{ (nel caso di barre non saldate)}$$

$$\alpha_5 = 1,00 \text{ (nel caso di assenza di confinamento dovuto a pressione trasversale)}$$

$$c_d = \text{minimo tra: distanza netta tra le barre } a = [(C / n) - \phi]/2 ; \text{ copriferro } c_1$$

$$\phi = \text{diametro barra in mm}$$

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	33

(in funzione della direzione del getto in fase di realizzazione)

$\eta_1 = 0,70$ considerando zona con condizioni di aderenza mediocre

$\eta_2 = 1,00$ barre con diametro minore o uguale a 32 mm

Mentre la lunghezza di sovrapposizione necessaria è stata determinata utilizzando le espressioni 8.10 e 8.11 dell'Eurocodice 2.

$$l_{0d} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 \alpha_6 l_{b,rqd} > l_{0,min}$$

L'analisi condotta può essere riassunta nelle seguenti tabelle:

Determinazione tensione ultima di aderenza			
Caratteristiche dell'acciaio			
f_{yk}	450,00	Mpa	resistenza dell'acciaio caratteristica
f_{yd}	391,30	Mpa	resistenza dell'acciaio di progetto
Caratteristiche calcestruzzo			
R_{ck}	55,00	MPa	resistenza cubica a compressione caratteristica
f_{ck}	45,00	MPa	resistenza cilindrica a compressione caratteristica
f_{ctk}	2,66	MPa	resistenza a trazione del calcestruzzo caratteristica
f_{cd}	25,50	MPa	resistenza cilindrica a compressione di progetto
f_{ctd}	1,77	MPa	resistenza a trazione del calcestruzzo di progetto

Tabella 33

Determinazione della tensione ultima di aderenza			
η_1	0,70		per l'armatura in zona superiore del plinto in zona di aderenza mediocre
η_1	1,00		per l'armatura in zona inferiore del plinto e in zona di aderenza buona
η_2	1,00		armatura sempre minore o uguale a ϕ 32
$f_{bd, sup}$	2,79	MPa	tensione ultima di aderenza armatura in zona con condizioni di aderenza mediocre
$f_{bd, inf}$	3,99	MPa	tensione ultima di aderenza armatura in zona con condizioni di aderenza buona
Lunghezza di ancoraggio (supponendo $\sigma_{sd} = f_{yd}$)			
a	40,00	mm	interferro minimo
c₁	50,00	mm	copriferro
c_d	20,00	mm	
α_1	1,00		barre dritte o con $c_d < 3\phi$
α_2	1,00		$> 0,70$
K	0,00		
α_3	1,00		
α_4	1,00		
α_6	1,40		

Tabella 34

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	34

Di seguito una tabella che riassume i risultati per le varie classi di diametri.

				l_{bd} ancoraggio	l_0 sovrapposizione
d= 32	armatura superiore barre dritte	$l_{b,rqd, sup}$	1.122 mm	1.150 mm	1.650 mm
	armatura inferiore barre dritte	$l_{b,rqd, inf}$	786 mm	800 mm	1150 mm
d= 28	armatura superiore barre dritte	$l_{b,rqd, sup}$	982 mm	1.000 mm	1400 mm
	armatura inferiore barre dritte	$l_{b,rqd, inf}$	687 mm	700 mm	1000 mm
d= 26	armatura superiore barre dritte	$l_{b,rqd, sup}$	912 mm	950 mm	1350 mm
	armatura inferiore barre dritte	$l_{b,rqd, inf}$	638 mm	650 mm	950 mm
d= 24	armatura superiore barre dritte	$l_{b,rqd, sup}$	842 mm	850 mm	1200 mm
	armatura inferiore barre dritte	$l_{b,rqd, inf}$	589 mm	600 mm	850 mm
d= 22	armatura superiore barre dritte	$l_{b,rqd, sup}$	771 mm	800 mm	1150 mm
	armatura inferiore barre dritte	$l_{b,rqd, inf}$	540 mm	550 mm	800 mm
d= 20	armatura superiore barre dritte	$l_{b,rqd, sup}$	701 mm	750 mm	1050 mm
	armatura inferiore barre dritte	$l_{b,rqd, inf}$	491 mm	500 mm	700 mm

Tabella 35

Tali lunghezze sono state riportate anche negli elaborati strutturali.

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	35

7. VERIFICHE LOCALI SISTEMA DI ANCORAGGIO TRA TORRE E FONDAZIONE

7.1. VERIFICA PRESSIONI DI CONTATTO TRA LE FLANGE E CALCESTRUZZO

Per effettuare la verifica della pressione di contatto tra le flange, superiore ed inferiore dell'ancor cage, ed il calcestruzzo è necessario valutare le tensioni di compressione massime agenti $\sigma_{C,max}$ che ivi si esplicano per effetto delle sollecitazioni trasmesse dalla torre.

Nel caso in cui, nelle verifiche agli SLU, tali tensioni risultassero superiori alle tensioni massime resistenti di progetto, andranno determinate le forze agenti $F_{Ed,FS}$ per la flangia superiore e $F_{Ed,FI}$ per la flangia inferiore dell'ancor cage al fine di confrontarle con la forza di compressione ultima che tale area è in grado di sopportare (F_{Rdu}). L'azione resistente del calcestruzzo è stata calcolata secondo l'Eurocodice 2, al paragrafo 6.7, applicando la seguente relazione:

$$F_{Rdu} = A_{c0} \times f_{cd} \times \sqrt{(A_{c1}/A_{c0})}$$

Per la determinazione della pressione massima che si esplica in corrispondenza delle flange, consideriamo l'azione complessiva agente come la composizione dell'aliquota dovuta alle sollecitazioni provenienti dalla torre P_{td} e dell'aliquota dovuta alla post tensione P_a .

Le analisi condotte ai vari stati limite, utilizzano i dati di partenza riportati nella seguente tabella.

Parametri geometrici		
n	100	numero di coppie di barre
A _{barra}	1120 mm ²	area di una barra M42
L _{barra}	3150	Distanza tra le flange
R _m	2,00 m	raggio medio dell'ancor cage
ΔC	0,13 m	Allargamento lungo direzione circonferenziale
Parametri della flangia superiore dell'ancor cage		
L	0,650 m	larghezza flangia
Ri	1,675 m	raggio interno della flangia
Re	2,325 m	raggio esterno della flangia
A _{fl sup}	8,168 m ²	area della flangia superiore
L _{ingh}	0,770 m	larghezza all'inghisaggio
H _{coll}	0,600	altezza colletto
L _{coll}	1,370 m	larghezza cono al colletto
Parametri della flangia inferiore dell'ancor cage		
L	0,450 m	larghezza flangia
Ri	1,775 m	raggio interno della flangia
Re	2,225 m	raggio esterno della flangia

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	36

Parametri geometrici		
$A_{fl\ inf}$	5,655 m ²	area della flangia inferiore
$H_{C50\ inf}$	0,200	altezza porzione di C50/60 sopra la flangia inferiore
$L_{C50\ inf}$	0,650 m	larghezza cono inferiore al C45/55

Forze di post tensione		
P_p	610 kN	Forza iniziale di post tensione
C_s	149.333 N/mm	Costante elastica della coppia di barre
C_c	1.164.133 N/mm	Costante elastica del cls compresso
p	11%	Perdita di tensione nelle barre
Z_i	1.376 KN	

Tabella 37

Di seguito la verifica allo SLU.

Azioni agenti - SLU		
$F_{z\ t}$	-8.711,33 KN	Forza verticale agente
$M_{r\ t}$	176.571,11 KN m	Momento agente
P_{tdFz}	-87 KN	Forza sulla coppia di barre dovuta allo Sforzo verticale
P_{tdMr}	1.766 KN	Forza sulla coppia di barre dovuta al Momento (+/-)
$P_{td\ DW}$	-1.853 KN	Forza sulla coppia di barre verso il basso
$P_{td\ UP}$	1.679 KN	Forza sulla coppia di barre verso l'alto
$P_a\ DW$	505 KN	Forza di post tensione agente sulla singola barra per $P_{td} < Z_i$
$P_a\ UP$	839 KN	Forza di post tensione agente sulla singola barra per $P_{td} > Z_i$

Tabella 38

Verifiche tensioni di contatto delle flange		
$f_{cd\ SLU\ (C90/105)}$	51,00 MPa	resistenza di progetto inghisaggio C90/105
$f_{cd\ SLU\ (C50/60)}$	28,33 MPa	resistenza di progetto colletto C50/60
$f_{cd\ SLU\ (C45/55)}$	25,50 MPa	resistenza di progetto suola C45/55
Verifica della flangia superiore dell'ancor cage		
$\sigma_C\ max\ sotto\ flangia$	35,04 Mpa	tensione massima nel calcestruzzo sotto la flangia
$\sigma_C\ max\ sotto\ inghisaggio$	29,58 Mpa	tensione massima nel calcestruzzo del colletto
$\sigma_C\ max\ sotto\ colletto$	16,63 Mpa	tensione massima nel calcestruzzo della suola
$f_{cd\ (90/105)}$	> $\sigma_C\ max\ sotto\ flangia$	VERIFICA
$f_{cd\ (C50/60)}$	< $\sigma_C\ max\ sotto\ inghisaggio$	NECESSITA VERIFICA pressioni localizzate EC2 par. 6.7
$f_{cd\ (C45/55)}$	> $\sigma_C\ max\ sotto\ colletto$	VERIFICA
Verifica della flangia inferiore dell'ancor cage		
$\sigma_C\ max\ sopra\ la\ flangia$	29,68 Mpa	tensione massima nel calcestruzzo sopra la flangia
$\sigma_C\ max\ al\ C45/55$	20,55 MPa	tensione massima nel calcestruzzo C45/55 sopra la flangia
$f_{cd\ (C45/55)}$	< $\sigma_C\ max\ sopra\ la\ flangia$	NECESSITA VERIFICA pressioni localizzate EC2 par. 6.7
$f_{cd\ (C50/60)}$	> $\sigma_C\ max\ al\ C45/55$	VERIFICA

Tabella 39

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	37

Nelle sezioni in cui la verifica non risulta soddisfatta si procede ad approfondirla considerando l'allargamento del cono previsto da EC2 par. 6.7.

Verifiche pressioni localizzate EC2 par. 6.7		
Caratteristiche calcestruzzo sotto l'inghisaggio		
$\sigma_{C, max}$	29,58 Mpa	tensione massima di compressione agente sul calcestruzzo
f_{cd}	25,50 Mpa	resistenza cilindrica a compressione di progetto
Caratteristiche calcestruzzo sopra la flangia inferiore dell'ancor cage		
$\sigma_{C, max}$	29,68 Mpa	tensione massima di compressione agente sul calcestruzzo
f_{cd}	25,50 Mpa	resistenza cilindrica a compressione di progetto
Caratteristiche dimensionali		
D	4,00 m	Diametro medio della gabbia di ancoraggio
n°	100	Numero di tirafondi
ΔC	0,13 m	Arco di circonferenza interessato
L_{FS}	0,77 m	Larghezza dell'inghisaggio
L_{FI}	0,45 m	Larghezza della flangia inferiore dell'ancor cage
$A_{C0,FS}$	0,10 m ²	area porzione di setto circolare sotto l'inghisaggio
$A_{C0,FI}$	0,06 m ²	area porzione di setto circolare sopra la flangia inferiore dell'ancor cage
$\Delta C_{c,FS}$	0,13 m	All. lungo dir. circonferenziale sotto l'inghisaggio
$L_{r,FS}$	2,31 m	All. lungo dir. radiale sotto l'inghisaggio
$DC_{c,FI}$	0,13 m	All. lungo dir. circonferenziale sopra la flangia inferiore dell'ancor cage
$L_{r,FI}$	1,35 m	All. lungo dir. radiale sopra la flangia inferiore dell'ancor cage
$A_{C1,FS}$	0,29 m ²	area zona interessata sotto l'inghisaggio
$A_{C1,FI}$	0,17 m ²	area zona interessata sopra la flangia inferiore dell'ancor cage
Forze resistenti		
$(A_{c1,FS}/A_{c0,FS})^{0,5}$	1,73	per la flangia della torre
$(A_{c1,FI}/A_{c0,FI})^{0,5}$	1,73	per la flangia inferiore dell'ancor cage
$F_{Rdu,FS}$	4.273,67 KN	$F_{Rdu} = A_{c0,FT} * f_{cd} * (A_{c1,FT}/A_{c0,FT})^{0,5}$
$F_{Rdu,FI}$	2.497,60 KN	$F_{Rdu} = A_{c0,FA} * f_{cd} * (A_{c1,FA}/A_{c0,FA})^{0,5}$
Forze agenti		
$F_{Edu,FS}$	2.862,17 KN	forza che si esplica sotto la flangia superiore dell'ancor cage $F = s_{c, max} \times A_{C0, FS}$
$F_{Edu,FI}$	1.678,60 KN	forza che si esplica sopra la flangia inferiore dell'ancor cage $F = s_{c, max} \times A_{C0, FI}$
Verifica		
$F_{Rdu,FS}$	>	$F_{Edu,FS}$ VERIFICA
$F_{Rdu,FI}$	>	$F_{Edu,FI}$ VERIFICA

Tabella 40

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	38

La verifica risulta soddisfatta. Sarà comunque necessario disporre idonee armature in grado di equilibrare le forze di trazione trasversali dovute all'effetto del carico, di cui si dirà nel successivo paragrafo.

Di seguito la verifica allo SLE combinazione caratteristica.

Azioni agenti - SLE caratteristica		
Fz t	-6.662,22 KN	Forza verticale agente
Mr t	117.714,07 KN m	Momento agente
P _{tdFz}	-67 KN	Forza sulla coppia di barre dovuta allo Sforzo verticale
P _{tdMr}	1.177 KN	Forza sulla coppia di barre dovuta al Momento (+/-)
P _{td DW}	-1.244 KN	Forza sulla coppia di barre verso il basso
P _{td UP}	1.111 KN	Forza sulla coppia di barre verso l'alto
P _{a DW}	539 KN	Forza di post tensione agente sulla singola barra per P _{td} < Z _i
P _{a UP}	610 KN	Forza di post tensione agente sulla singola barra per P _{td} < Z _i

Tabella 41

Verifica compressione calcestruzzo		
f _{cd SLE (90/105)}	54,00 MPa	resistenza caratteristica colletto agli SLE C90/105 (0,6xf _{ck 90/105})
f _{cd SLE (50/60)}	30,00 MPa	resistenza caratteristica colletto agli SLE C50/60 (0,6xf _{ck 50/60})
f _{cd (C45/55)}	27,00 MPa	resistenza caratteristica colletto agli SLE C45/55 (0,6xf _{ck 45/55})
Verifica della flangia superiore dell'ancor cage		
σ _{C max sotto flangia}	28,43 Mpa	tensione massima nel calcestruzzo sotto la flangia
σ _{C max sotto inghisaggio}	24,00 Mpa	tensione massima nel calcestruzzo sotto l'inghisaggio
σ _{C max sotto colletto}	13,49 Mpa	tensione massima nel calcestruzzo della suola
f _{cd (90/105)}	> σ _{C max sotto flangia}	VERIFICA
f _{cd (C50/60)}	> σ _{C max inghisaggio}	VERIFICA
f _{cd (C45/55)}	> σ _{C max sotto colletto}	VERIFICA
Verifica della flangia inferiore dell'ancor cage		
σ _{C max sopra la flangia}	21,57 Mpa	tensione massima nel calcestruzzo
σ _{C max al C45/55}	14,94 Mpa	tensione massima nel calcestruzzo C45/55 sopra la flangia
f _{cd (C45/55)}	> σ _{C max}	VERIFICA
f _{cd (C50/60)}	> σ _{X max al C45/55}	VERIFICA

Tabella 42

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	39

Di seguito la verifica allo SLE combinazione quasi permanente.

Azioni agenti - SLE quasi permanente		
Fz t	-6.902,00 KN	Forza verticale agente
Mr t	97.465,00 KN m	Momento agente
P _{tdFz}	-69 KN	Forza sulla coppia di barre dovuta allo Sforzo verticale
P _{tdMr}	975 KN	Forza sulla coppia di barre dovuta al Momento (+/-)
P _{tdDW}	-1.044 KN	Forza sulla coppia di barre verso il basso
P _{tdUP}	906 KN	Forza sulla coppia di barre verso l'alto
P _{aDW}	551 KN	Forza di post tensione agente sulla singola barra per Ptd < Zi
P _{aUP}	610 KN	Forza di post tensione agente sulla singola barra per Ptd < Zi

Tabella 43

Verifica compressione calcestruzzo		
f _{cd} SLE (90/105)	40,50 MPa	resistenza caratteristica coltetto agli SLE C90/505 (0,45xf _{ck} 90/105)
f _{cd} (C50/60)	22,50 MPa	resistenza caratteristica coltetto agli SLE C50/60 (0,45xf _{ck} 50/60)
f _{cd} (C45/55)	20,25 MPa	resistenza caratteristica coltetto agli SLE C45/55 (0,45xf _{ck} 45/55)
Verifica della flangia superiore dell'ancor cage		
σ _C max sotto flangia	26,26 Mpa	tensione massima nel calcestruzzo sotto la flangia
σ _C max isotto inghisaggio	22,17 Mpa	tensione massima nel calcestruzzo sotto l'inghisaggio
σ _X max sotto coltetto	12,46 Mpa	tensione massima nel calcestruzzo della suola
f _{cd} (90/105)	> σ _C max sotto flangia	VERIFICA
f _{cd} (C50/60)	> σ _C max inghisaggio	VERIFICA
f _{cd} (C45/55)	> σ _C max sotto coltetto	VERIFICA
Verifica della flangia inferiore dell'ancor cage		
σ _C max sopra la flangia	21,57 Mpa	tensione massima nel calcestruzzo
σ _C max al C45/55	14,94 Mpa	tensione massima nel calcestruzzo C45/55 sopra la flangia
f _{cd} (C45/55)	> σ _C max	VERIFICA
f _{cd} (C50/60)	> σ _C max al C45/55	VERIFICA

Tabella 44

La tensione di compressione del calcestruzzo sotto le flange agli SLE è inferiore a quella consentita per gli stati limite considerati, pertanto la verifica risulta soddisfatta.

Inoltre si procederà nel proseguo ad effettuare, per la zona di calcestruzzo in esame, le verifiche allo stato limite di fatica.

Azioni minime a fatica		
Fz t	-6.484,00 KN	Forza verticale agente
Mr t	34.076,00 KN m	Momento agente
P _{tdFz}	-65 KN	Forza sulla coppia di barre dovuta allo Sforzo verticale
P _{tdMr}	341 KN	Forza sulla coppia di barre dovuta al Momento (+/-)

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	40

Azioni minime a fatica		
$P_{td DW}$	-406 KN	Forza sulla coppia di barre verso il basso
$P_{td UP}$	276 KN	Forza sulla coppia di barre verso l'alto
$P_a DW$	587 KN	Forza di post tensione agente sulla singola barra per $P_{td} < Z_i$
$P_a UP$	610 KN	Forza di post tensione agente sulla singola barra per $P_{td} < Z_i$
Azioni massime a fatica		
$F_z t$	-6.622,00 KN	Forza verticale agente
$M_r t$	78.192,00 KN m	Momento agente
$P_{td F_z}$	-66 KN	Forza sulla coppia di barre dovuta allo Sforzo verticale
$P_{td M_r}$	782 KN	Forza sulla coppia di barre dovuta al Momento (+/-)
$P_{td DW}$	-848 KN	Forza sulla coppia di barre verso il basso
$P_{td UP}$	716 KN	Forza sulla coppia di barre verso l'alto
$P_a DW$	562 KN	Forza di post tensione agente sulla singola barra per $P_{td} < Z_i$
$P_a UP$	610 KN	Forza di post tensione agente sulla singola barra per $P_{td} < Z_i$

Tabella 45

Verifiche del calcestruzzo			
$f_{cd fat} (C90/105)$	39,53 MPa	resistenza di progetto a fatica inghisaggio C90/105	
$f_{cd fat} (C50/60)$	24,79 MPa	resistenza di progetto a fatica colletto C50/60	
$f_{cd fat} (C45/55)$	22,63 MPa	resistenza di progetto a fatica colletto C45/55	
Verifica della flangia superiore dell'ancor cage			
σ_C max sotto flangia	24,14	tensione massima nel calcestruzzo sotto la flangia	
σ_C max inghisaggio	20,38 Mpa	tensione massima nel calcestruzzo sotto l'inghisaggio	
σ_C max suola	11,45 Mpa	tensione massima nel calcestruzzo della suola	
σ_C min sotto flangia	19,34 Mpa	tensione minima nel calcestruzzo sotto l'inghisaggio	
σ_C min inghisaggio	16,32	tensione minima nel calcestruzzo sotto l'inghisaggio	
σ_C min suola	9,17	tensione minima nel calcestruzzo della suola	
η_c	0,91		
$S_{cd, max}$ flangia	0,56	livello massimo delle tensioni di compressione C90/105	
$S_{cd, min}$ flangia	0,44	livello minimo delle tensioni di compressione C90/105	
$Y_{flangia}$	0,72		
$S_{cd, max}$ inghisaggio	0,75	livello massimo delle tensioni di compressione C50/60	
$S_{cd, min}$ inghisaggio	0,60	livello minimo delle tensioni di compressione C50/60	
$Y_{inghisaggio}$	0,78		
$S_{cd, max}$ suola	0,46	livello massimo delle tensioni di compressione C45/55	
$S_{cd, min}$ suola	0,37	livello minimo delle tensioni di compressione C45/55	
Y_{suola}	0,69		
Verifica nel calcestruzzo sotto la flangia C90/105			
(MC10 eq. 7.4.7a) $\log N_1 =$	12,62	$\log N = 15,03 > 6$	VERIFICA
(MC10 eq. 7.4.7b) $\log N_2 =$	15,03		
$\sigma_{C max} =$	24,14 <	54,00 = $0,6 \times f_{ck(C90/105)}$	VERIFICA
$(\sigma_{C max} + \sigma_{C min})/2 =$	21,74 <	45,00 = $0,5 \times f_{ck(C90/105)}$	VERIFICA

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	41

Verifiche del calcestruzzo		
Verifica nel calcestruzzo sotto l'inghisaggio C50/60		
(MC10 eq. 7.4.7a) Log N ₁ = 8,99	Log N = 9,08 > 6	VERIFICA
(MC10 eq. 7.4.7b) Log N ₂ = 9,08		
$\sigma_{C \max} = 20,38 < 30,00 = 0,6 \times f_{ck(C50/60)}$		VERIFICA
$(\sigma_{C \max} + \sigma_{C \min})/2 = 18,35 < 25,00 = 0,5 \times f_{ck(C50/60)}$		VERIFICA
Verifica nel calcestruzzo della suola C32/40		
(MC10 eq. 7.4.7a) Log N ₁ = 13,76	Log N = 18,07 > 6	VERIFICA
(MC10 eq. 7.4.7b) Log N ₂ = 18,07		
$\sigma_{C \max} = 11,45 < 27,00 = 0,6 \times f_{ck(C45/55)}$		VERIFICA
$(\sigma_{C \max} + \sigma_{C \min})/2 = 10,31 < 22,50 = 0,5 \times f_{ck(C45/55)}$		VERIFICA
Verifica della flangia inferiore dell'ancor cage		
$\sigma_{C \max}$ sopra la flangia	20,76 Mpa	tensione massima nel calcestruzzo sopra la flangia inferiore
$\sigma_{C \max}$ al C45/55	14,37 Mpa	tensione massima nel calcestruzzo C45/55 sopra la flangia
$\sigma_{C \min}$ sopra la flangia	19,87 Mpa	tensione minima nel calcestruzzo sopra la flangia inferiore
$\sigma_{C \min}$ al C45/55	13,76 Mpa	tensione minima nel calcestruzzo C45/55 sopra la flangia
$f_{cd \text{ fat}} (C50/60)$	24,79 MPa	resistenza di progetto a fatica C50/60
$f_{cd \text{ fat}} (C45/55)$	22,63 MPa	resistenza di progetto a fatica C45/55
η_c	0,98	
$S_{cd, \max} (C50/60)$	0,82 MPa	livello massimo delle tensioni di compressione
$S_{cd, \min} (C50/60)$	0,78 MPa	livello minimo delle tensioni di compressione
$Y (C50/60)$	0,84	
$S_{cd, \max} (C45/55)$	0,62 MPa	livello massimo delle tensioni di compressione
$S_{cd, \min} (C45/55)$	0,60 MPa	livello minimo delle tensioni di compressione
$Y (C45/55)$	0,77	

Tabella 46

Verifica nel calcestruzzo sopra la flangia C50/60		
(MC10 eq. 7.4.7a) Log N ₁ = 8,79	Log N = 8,95 > 6	VERIFICA
(MC10 eq. 7.4.7b) Log N ₂ = 8,95		
$\sigma_{C \max} = 20,76 < 30,00 = 0,6 \times f_{ck(C50/60)}$		VERIFICA
$(\sigma_{C \max} + \sigma_{C \min})/2 = 20,31 < 25,00 = 0,5 \times f_{ck(C50/60)}$		VERIFICA
Verifica nel calcestruzzo sopra la flangia C45/55		
(MC10 eq. 7.4.7a) Log N ₁ = 13,40	Log N = 20,09 > 6	VERIFICA
(MC10 eq. 7.4.7b) Log N ₂ = 20,09		
$\sigma_{C \max} = 22,63 < 27,00 = 0,6 \times f_{ck(C45/55)}$		VERIFICA
$(\sigma_{C \max} + \sigma_{C \min})/2 = 11,73 < 22,50 = 0,5 \times f_{ck(C45/55)}$		VERIFICA

Tabella 47

L'escursione di tensione nel calcestruzzo è inferiore a quella massima consentita, pertanto la verifica risulta soddisfatta.

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	42

7.2. VERIFICA TIRANTI PER IL CALCESTRUZZO COMPRESSO

Secondo quanto disposto dall'Eurocodice 2, al paragrafo 6.7, si raccomanda di disporre idonee armature in grado di equilibrare le forze di trazione trasversali dovute all'effetto delle pressioni localizzate. Tali armature sono state disposte in prossimità delle flange, superiore ed inferiore dell'ancor cage.

Le forze di trazione agenti in tali armature sono state quindi valutate con l'ausilio di modelli tirante-puntone, secondo quanto disposto dall'Eurocodice 2, al paragrafo 6.5.3.

L'analisi condotta può essere riassunta nelle seguenti tabelle:

Caratteristiche geometriche e dei materiali		
Caratteristiche dell'acciaio		
f_{yd}	391,30 Mpa	resistenza dell'acciaio di progetto
Caratteristiche dimensionali flangia superiore dell'ancor cage		
H	3,15 m	Altezza puntone
a	0,65 m	Larghezza flangia
b_{eff}	2,00 m	regione di totale discontinuità - $b_{eff} = 0,5 H + 0,65 a$
$\tan \theta$	2,34	
θ	67 °	Angolo di inclinazione dei puntoni
h	1,58 m	
$z=h/2$	0,79 m	
d	0,95 m	
Caratteristiche dimensionali flangia inferiore dell'ancor cage		
H	3,15 m	Altezza puntone
a	0,45 m	Larghezza flangia
b_{eff}	1,87 m	regione di totale discontinuità - $b_{eff} = 0,5 H + 0,65 a$
$\tan \theta$	2,22	
θ	66 °	Angolo di inclinazione dei puntoni
h	1,58 m	
$z=h/2$	0,79 m	
d	0,95 m	
Caratteristiche armatura presente per la flangia superiore		
ϕ	20 mm	diametro di armatura per la flangia superiore
n	300	numero barre totali
A	1885 mm ²	Area di armatura per la flangia superiore
Caratteristiche armatura presente per la flangia inferiore		
ϕ	20 mm	diametro di armatura per la flangia inferiore
n	300	numero barre totali
A	1885 mm ²	Area di armatura per la flangia inferiore

Tabella 48

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	43

Verifica SLU		
Azione agente		
$F_{Edu,FS}$	2862,17 KN	forza che si esplica sotto la flangia superiore dell'ancor cage
$F_{Edu,FI}$	1678,60 KN	forza che si esplica sopra la flangia inferiore dell'ancor cage
Forza di trazione corrispondente		
$T_{ed,FS}$	612,19 KN	$T=F/4 \times (1-0,7x_a/H)$
$T_{ed,FI}$	377,68 KN	$T=F/4 \times (1-0,7x_a/H)$
Forza di trazione massima resistente		
$F_{R,FS}$	737,59 KN	$F_{Rd}=A \cdot f_{yd}$
$F_{R,FI}$	737,59 KN	$F_{Rd}=A \cdot f_{yd}$
VERIFICA		
$F_{R,FS} > T_{ed,FS}$		VERIFICA
$F_{R,FI} > T_{ed,FI}$		VERIFICA

Tabella 49

La forza massima agente nelle armature allo scopo disposte sotto l'inghisaggio e sopra la flangia inferiore dell'ancor cage risulta idonea a sostenere le forze in gioco, pertanto la verifica risulta soddisfatta.

Inoltre si procederà nel proseguo ad effettuare, per le armature in esame, le verifiche agli stati limite di esercizio e allo stato limite di fatica.

Verifica SLE – combinazione caratteristica		
Azione agente		
$\sigma_{c \max}$	24,00 Mpa	forza che si esplica sotto la flangia superiore dell'ancor cage
F_{FS}	2322,35 KN	forza max che si esplica sotto l'inghisaggio $F = \sigma_{c \max} \times A_{C0, FT}$
$\sigma_{c \max}$	21,57 Mpa	tensione max agente sul calcestruzzo sopra la flangia inferiore dell'ancor cage
F_{FI}	1220,00 KN	forza max che si esplica sopra la flangia inferiore dell'ancor cage $F = \sigma_{c \max} \times A_{C0, FA}$
Caratteristiche acciaio		
$f_{yd \text{ SLE}}$	360 MPa	resistenza dell'acciaio di progetto agli SLE ($0,8x f_{yk}$)
Forza di trazione corrispondente agente nei tiranti sotto la flangia della torre		
T_{FS}	496,73 KN	$T=F/4 \times (1-0,7x_a/h)$
$\sigma_{s \max}$	263,52 MPa	tensione massima nell'acciaio dei tiranti sotto l'inghisaggio
$f_{yd \text{ SLE}} > \sigma_{s \max}$		VERIFICA
Forza di trazione corrispondente agente nei tiranti sopra la flangia inferiore dell'ancor cage		
T_{FI}	244,00 KN	$T=F/4 \times (1-0,7x_a/h)$
$\sigma_{s \max}$	129,45 MPa	tensione massima nell'acciaio dei tiranti sopra la flangia inferiore dell'ancor cage
$f_{yd \text{ SLE}} > \sigma_{s \max}$		VERIFICA

Tabella 50

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	44

La tensione massima nell'acciaio è inferiore a quella consentita per gli stati limite di esercizio, pertanto la verifica risulta soddisfatta.

Di seguito la a fatica.

Verifica a fatica		
Azione agente sotto la flangia superiore dell'ancor cage		
$\sigma_{c \max}$	24,14 Mpa	tensione massima agente sul calcestruzzo sotto la flangia
$F_{FT \max}$	2335,72 KN	forza massima che si esplica sotto la flangia $F = \sigma_{c \max} \times A_{CO, FT}$
$\sigma_{c \min}$	19,34 Mpa	tensione minima agente sul calcestruzzo sotto la flangia
$F_{FS \min}$	1871,08 KN	forza minima che si esplica sotto la flangia $F = \sigma_{c \min} \times A_{CO, FT}$
ΔF_{FS}	464,64 KN	variazione dell'Azione che si esplica sotto la flangia ($F_{\max} - F_{\min}$)
Azione agente sopra la flangia inferiore dell'ancor cage		
$\sigma_{c \max}$	20,76 Mpa	tensione massima agente sul calcestruzzo sopra la flangia inferiore
$F_{FI \max}$	1173,89 KN	forza massima che si esplica sopra la flangia $F = \sigma_{c \max} \times A_{CO, FA}$
$\sigma_{c \min}$	19,87 Mpa	tensione minima agente sul calcestruzzo sopra la flangia
$F_{FI \min}$	1123,57 KN	forza minima che si esplica sopra la flangia $F = \sigma_{c \min} \times A_{CO, FA}$
ΔF_{FI}	50,31 KN	variazione dell'Azione che si esplica sotto la flangia ($F_{\max} - F_{\min}$)
Caratteristiche acciaio		
$\Delta \sigma_{Rsd}$ (dritte)	101,69 Mpa	escursione massima nell'acciaio verifiche a fatica barre dritte
Forza di trazione corrispondente agente nei tiranti sotto la flangia superiore dell'ancor cage		
ΔT_{FS}	82,60 KN	$T = F/4 \times (1 - 0,7x_a/h)$
$\Delta \sigma_{S \max}$	43,82 MPa	escursione di tensione massima nell'acciaio dei tiranti sotto la flangia
$\Delta \sigma_{Rsd}$ (dritte)	> $\Delta \sigma_{S \max}$	VERIFICA

Tabella 51

Forza di trazione corrispondente agente nei tiranti sopra la flangia inferiore dell'ancor cage		
ΔT_{FI}	10,06 KN	$T = F/4 \times (1 - 0,7x_a/h)$
$\Delta \sigma_{S \max}$	5,34 MPa	escursione di tensione massima nell'acciaio dei tiranti sopra la flangia
$\Delta \sigma_{Rsd}$ (dritte)	> $\Delta \sigma_{S \max}$	VERIFICA

Tabella 52

L'escursione di tensione nell'acciaio è inferiore a quella massima consentita, pertanto la verifica risulta soddisfatta.

7.3. VERIFICA DELLE ARMATURE DEL COLLETTTO

Per assicurare il trasferimento degli sforzi di trazione provenienti dalla torre alla fondazione sono stati disposti n° 2 serie di coppie ferri piegati ad U, una interna ed una esterna alla gabbia di tirafondi,

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	45

ognuna composta da n°100 ferri.

Per le verifiche consideriamo il colpetto come una sezione in c.a. .

Dati generali		
f_{yd}	391,30 Mpa	resistenza dell'acciaio di progetto
$f_{yd\ SLE}$	360 MPa	resistenza dell'acciaio di progetto agli SLE (0,8xfyk)
Caratteristiche armatura presente		
ϕ	26 mm	diametro barre armatura
A	531 mm ²	Area barre armatura

Tabella 53

Di seguito la verifica allo SLU.

Figura 9

Il momento resistente della sezione (M_{Rd}) risulta maggiore del momento agente (M_{Ed}), pertanto la verifica risulta soddisfatta.

Inoltre si procederà nel proseguo ad effettuare, per le armature in esame, le verifiche agli stati limite di esercizio e allo stato limite di fatica considerando l'azione di post tensione dei tirafondi

Di seguito la verifica allo SLE combinazione caratteristica.

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	46

Titolo : []

Sezione circolare cava

Raggio esterno: 300 [cm]
Raggio interno: 100 [cm]
N° barre uguali: 0
Diametro barre: 0 [cm]
Copriferro (baric.): 0 [cm]

N° barre 400 Zoom

N°	As [cm²]	x [cm]	y [cm]
1	5,31	-289	0
2	5,31	-237,4	0
3	5,31	-162,6	0
4	5,31	-111,1	0
5	5,31	-288,4	-18,1
6	5,31	-236,9	-14,9

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

Armatura Precompressione

N° cavi 200 Zoom

N°	As [cm²]	x [cm]	y [cm]	σ_{sp} [MPa]
1	0	-210,4	0	545
2	13,85	-189,7	0	545
3	13,85	-209,9	-13,2	545
4	13,85	-189,3	-11,9	545
5	13,85	-208,7	-26,4	545
6	13,85	-188,2	-23,8	545

Sollecitazioni
S.L.U. Metodo n
N Ed: 0 -6622 kN
M xEd: 0 117714 kNm
M yEd: 0 0

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

Materiali
B450C C45/55
 ϵ_{su} 67,5 ‰ ϵ_{c2} 2 ‰
 f_{yd} 391,3 N/mm² ϵ_{cu} 3,5 ‰
 E_s 200.000 N/mm² f_{cd} 25,5 ‰
 E_s/E_c 15 f_{cc}/f_{cd} 0,8
 ϵ_{syd} 1,957 ‰ $\sigma_{c,adm}$ 16
 $\sigma_{s,adm}$ 255 N/mm² τ_{co} 0,9333
 τ_{c1} 2,543

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

σ_c -9,642 N/mm²
 σ_s -2,066 N/mm²
 ϵ_s -0,01033 ‰
d 589 cm
x 597,5 x/d 1,014
 δ 1

Verifica
Vertici: 50
N° iterazioni: 1
 Precompresso

Barra
 ϵ_{su} 67,5 ‰
 f_{yd} 869,6 N/mm²
 E_s/E_c 6
 ϵ_{syd} 4,348 ‰
 $\sigma_{s,adm}$ 800 N/mm²

σ_{sp} 536,6 N/mm²
 ϵ_{sp} 2,683 ‰ compressa predef.

Figura 10

La tensione massima nell'acciaio è inferiore a quella consentita per gli stati limite di esercizio, pertanto la verifica risulta soddisfatta.

Di seguito la verifica a fatica eseguita.

Fatica minimi

Titolo : []

Sezione circolare cava

Raggio esterno: 300 [cm]
Raggio interno: 100 [cm]
N° barre uguali: 0
Diametro barre: 0 [cm]
Copriferro (baric.): 0 [cm]

N° barre 400 Zoom

N°	As [cm²]	x [cm]	y [cm]
1	5,31	-289	0
2	5,31	-237,4	0
3	5,31	-162,6	0
4	5,31	-111,1	0
5	5,31	-288,4	-18,1
6	5,31	-236,9	-14,9

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

Armatura Precompressione

N° cavi 200 Zoom

N°	As [cm²]	x [cm]	y [cm]	σ_{sp} [MPa]
1	0	-210,4	0	545
2	13,85	-189,7	0	545
3	13,85	-209,9	-13,2	545
4	13,85	-189,3	-11,9	545
5	13,85	-208,7	-26,4	545
6	13,85	-188,2	-23,8	545

Sollecitazioni
S.L.U. Metodo n
N Ed: 0 -6484 kN
M xEd: 0 34076 kNm
M yEd: 0 0

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

Materiali
B450C C45/55
 ϵ_{su} 67,5 ‰ ϵ_{c2} 2 ‰
 f_{yd} 391,3 N/mm² ϵ_{cu} 3,5 ‰
 E_s 200.000 N/mm² f_{cd} 25,5 ‰
 E_s/E_c 15 f_{cc}/f_{cd} 0,8
 ϵ_{syd} 1,957 ‰ $\sigma_{c,adm}$ 16
 $\sigma_{s,adm}$ 255 N/mm² τ_{co} 0,9333
 τ_{c1} 2,543

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

σ_c -6,207 N/mm²
 ϵ_s -0,2591 ‰

Verifica
Vertici: 50
N° iterazioni: 0
 Precompresso

Tipo cavo
Barra
 ϵ_{su} 67,5 ‰
 f_{yd} 869,6 N/mm²
 E_s/E_c 6
 ϵ_{syd} 4,348 ‰
 $\sigma_{s,adm}$ 800 N/mm²

σ_{sp} 522,1 N/mm²
 ϵ_{sp} 2,61 ‰ compressa predef.

Figura 11 Fatica massimi

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	47

Titolo : _____

Sezione circolare cava

Raggio esterno: 300 [cm]
Raggio interno: 100 [cm]
N° barre uguali: 0
Diametro barre: 0 [cm]
Copriferro (baric.): 0 [cm]

N° barre 400 Zoom

N°	As [cm²]	x [cm]	y [cm]
1	5,31	-289	0
2	5,31	-237,4	0
3	5,31	-162,6	0
4	5,31	-111,1	0
5	5,31	-288,4	-18,1
6	5,31	-236,9	-14,9

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

Armatura Precompressione

N° cavi 200 Zoom

N°	As [cm²]	x [cm]	y [cm]	σ_{sp} [MPa]
1	0	-210,4	0	545
2	13,85	-189,7	0	545
3	13,85	-209,9	-13,2	545
4	13,85	-189,3	-11,9	545
5	13,85	-208,7	-26,4	545
6	13,85	-188,2	-23,8	545

Sollecitazioni
S.L.U. Metodo n
N_{Ed} 0 -6622 kN
M_{xEd} 0 78192 kNm
M_{yEd} 0 0

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

Materiali
B450C C45/55
 E_{su} 67,5 ‰ E_{c2} 2 ‰
 f_{yd} 391,3 N/mm² E_{cu} 3,5 ‰
 E_s 200.000 N/mm² f_{cd} 25,5 ‰
 E_s/E_c 15 f_{cc}/f_{cd} 0,8
 E_{syd} 1,957 ‰ $\sigma_{c,adm}$ 16
 $\sigma_{s,adm}$ 255 N/mm² τ_{co} 0,9333
 τ_{c1} 2,543

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

σ_c -8,017 N/mm²
 ϵ_s -0,1278 ‰
Vertici: 50
Verifica
N° iterazioni: 0

Tipo cavo Barra
 ϵ_{su} 67,5 ‰
 f_{yd} 869,6 N/mm²
 E_s/E_c 6
 E_{syd} 4,348 ‰
 $\sigma_{s,adm}$ 800 N/mm²
 σ_{sp} 529,7 N/mm²
 ϵ_{sp} 2,649 ‰ compressa predef.

Precompresso

Figura 12

Tensioni agenti			
F_{ed}	-6.622,00 KN	Forza verticale massima agente	
M_{ed}	78.192,00 KN m	Momento massimo agente	
F_{ed}	-6.484,00 KN	Forza verticale minima agente	
M_{ed}	34.076,00 KN m	Momento minimo agente	
σ_s fat max	118,50 Mpa	tensione massima nella barra dell'anchor cage maggiormente sollecitata	
σ_s fat min	92,40 Mpa	tensione minima nella barra dell'anchor cage maggiormente sollecitata	
$\Delta\sigma_{Rsd}$ (dritte)	101,69 Mpa	escursione ammissibile nell'acciaio - verifiche a fatica barre dritte	
$\Delta\sigma_{Rsd}$ (piegate)	54,10 Mpa	barre piegate	$\phi = 26$ D = 182
VERIFICA			
$\Delta\sigma_{Smax}$	26,10 MPa	escursione di tensione massima nelle armature di collegamento	
$\Delta\sigma_{Rsk}$ (piegate)	>	$\Delta\sigma_{Smax}$	VERIFICA

Tabella 54

L'escursione di tensione nell'acciaio è inferiore a quella massima consentita, pertanto la verifica risulta soddisfatta.

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	48

8. VERIFICHE GLOBALI PLINTO DI FONDAZIONE

I risultati di output del modello FEM possono essere riassunti nella seguente colormap in cui è rappresentato l'andamento delle principali caratteristiche di sollecitazione agenti.

- Distribuzione del momento M_y (KN m) nella piastra di fondazione – COMB 12

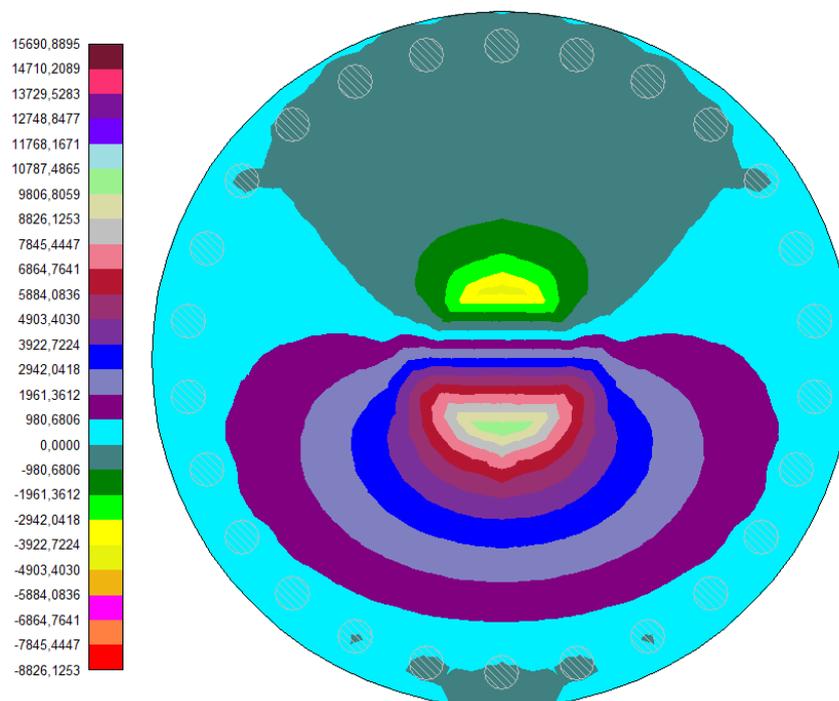


Figura 13

- Distribuzione del momento M_x (KN m) nella piastra di fondazione

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	49

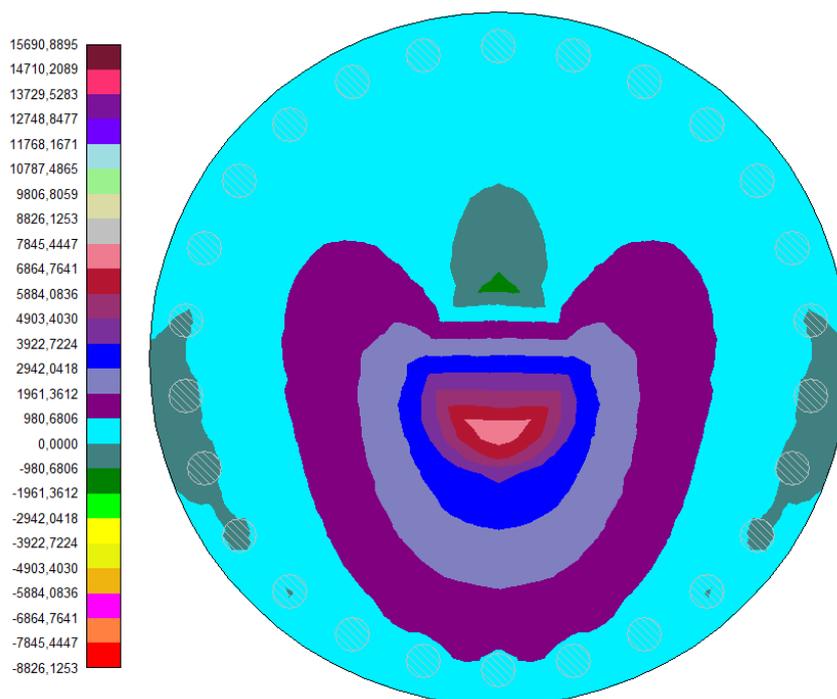


Figura 14

- Distribuzione del taglio T_y (kN) nella piastra di fondazione

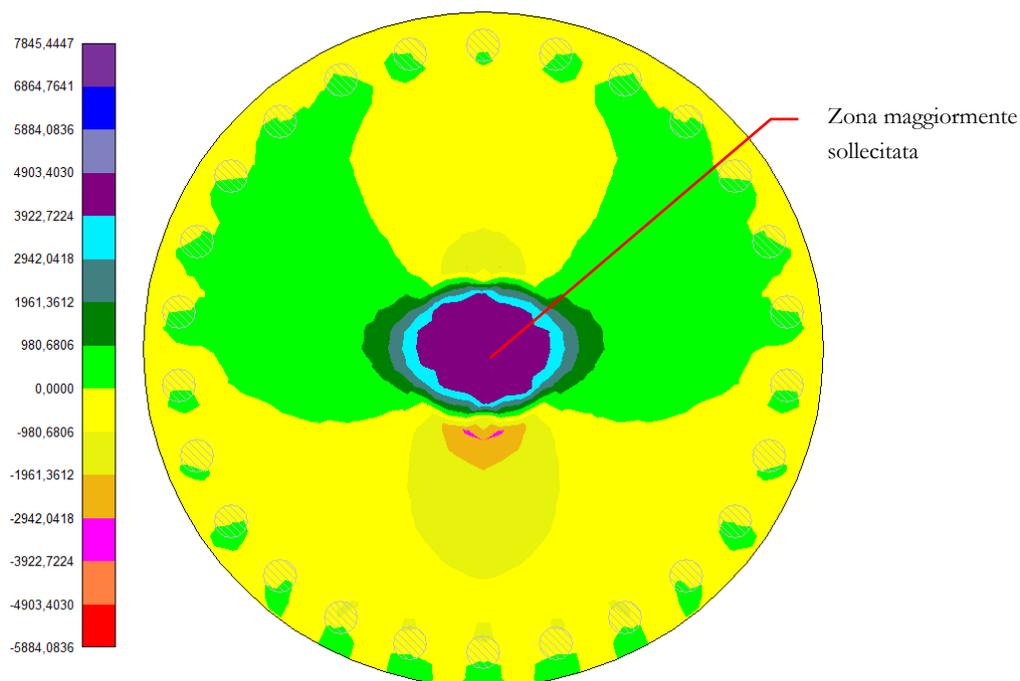


Figura 9

Dall'analisi delle colormap possiamo affermare che, nella configurazione di carico analizzata, le

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	50

sollecitazioni massime agenti lungo la struttura esaminata sono localizzate lungo il diametro della fondazione individuato dall'asse Y. Pertanto si è concentrata l'analisi sulle sollecitazioni radiali e tangenziali agenti lungo tale asse, al fine di estendere i risultati dell'analisi alla totalità della fondazione. Per la definizione delle azioni massime agenti è stato effettuato l'inviluppo delle sollecitazioni nodali agenti nei punti individuati in figura come nodi analizzati, appartenenti ad una fascia di fondazione di larghezza pari ad 1,2 m a cavallo dell'asse Y.

8.1. CARATTERISTICHE DI SOLLECITAZIONE AGENTI

Dall'analisi effettuata sono state dedotte le seguenti sollecitazioni massime agenti sulla fondazione:

SLU – A1

Inviluppo del momento radiale agente sulla fascia di fondazione (KN m)

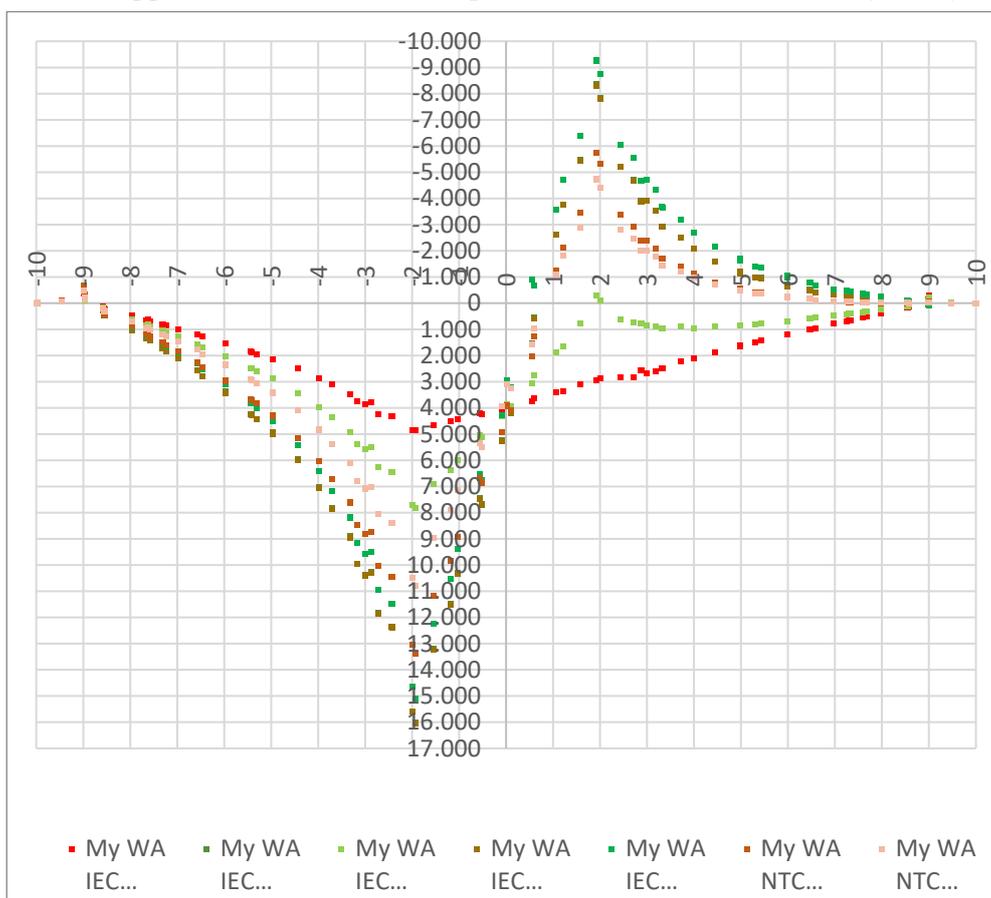


Figura 10

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	51

Involuppo del momento circonferenziale agente sulla fascia di fondazione (KN m)

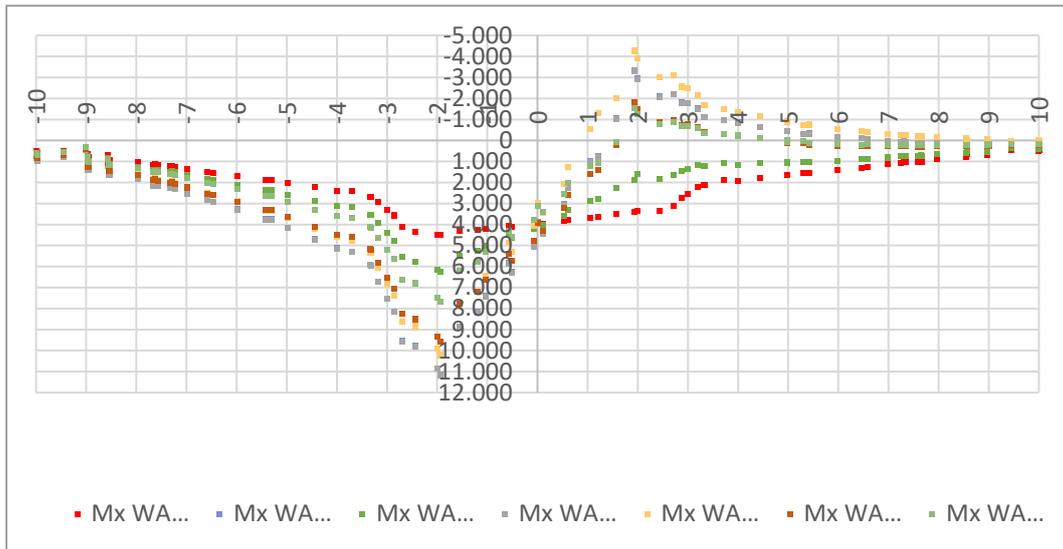


Figura 11

Involuppo del taglio agente sulla fascia di fondazione (KN)

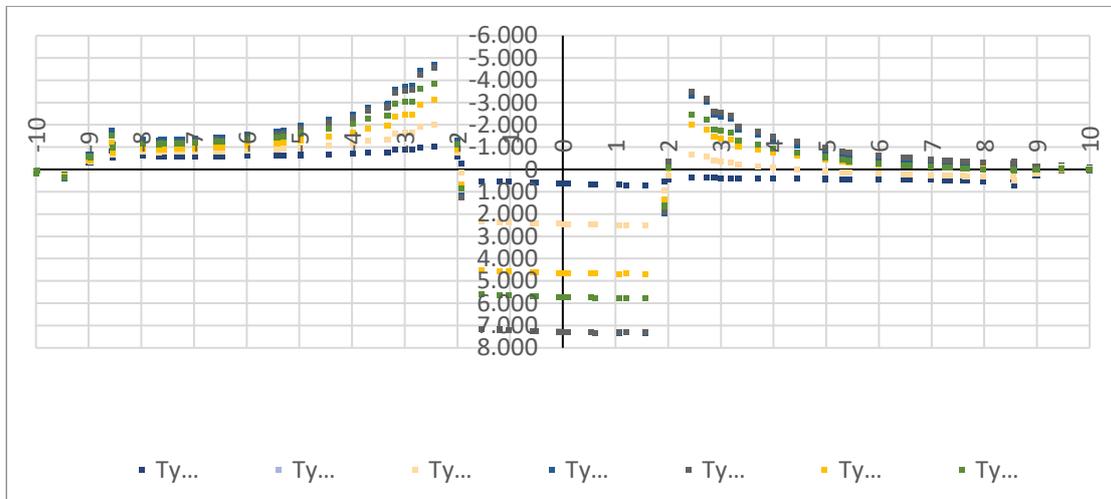


Figura 12

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	52

SLE combinazioni Quasi Permanente e Caratteristica

Inviluppo del momento radiale agente sulla fascia di fondazione (KN m)

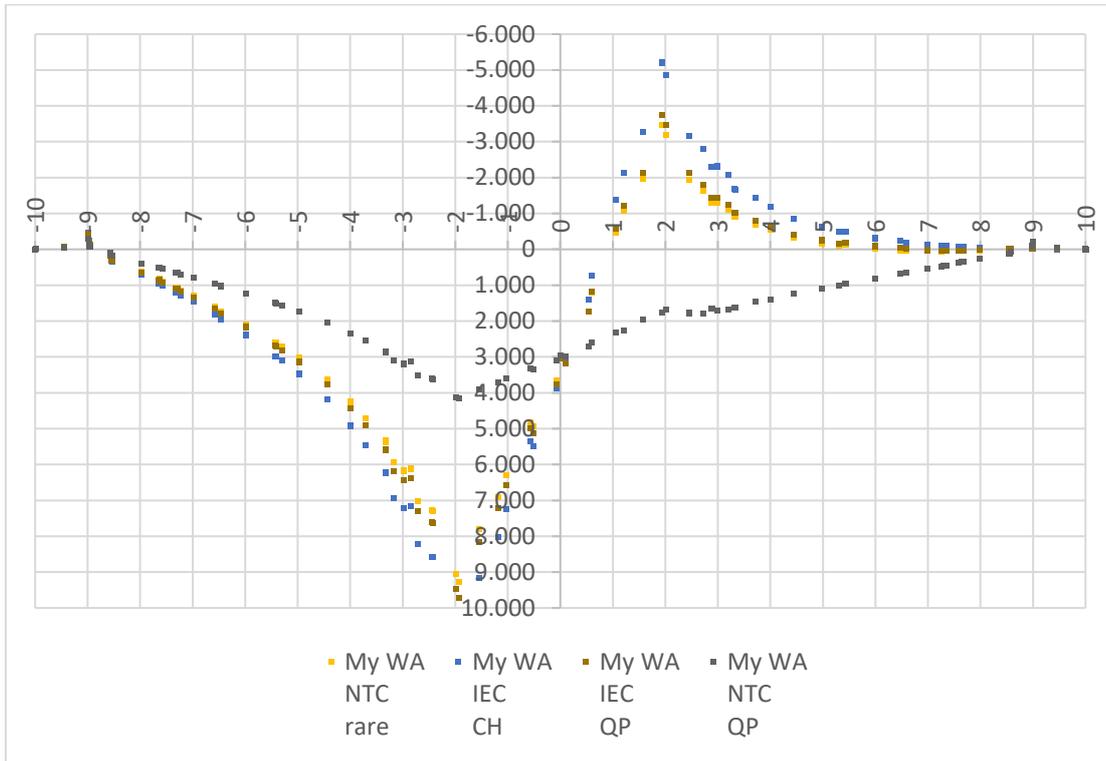


Figura 13

Inviluppo del momento circonferenziale agente sulla fascia di fondazione (KN m)

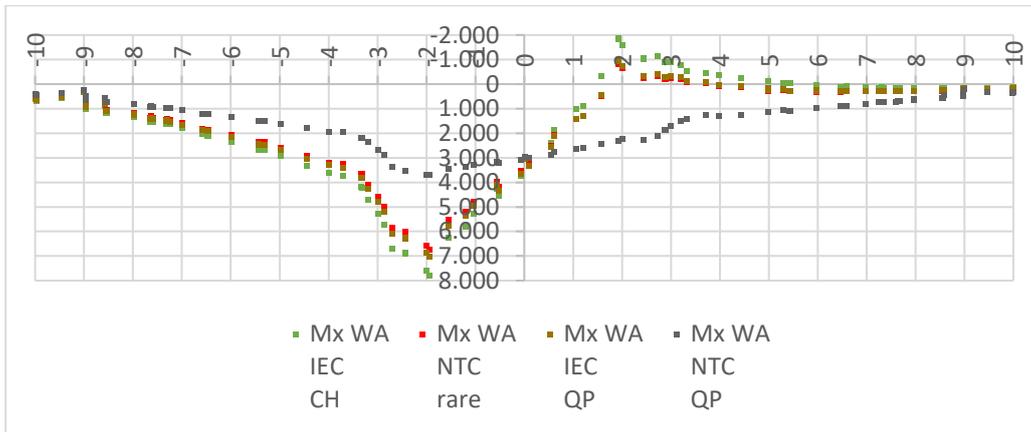


Figura 14

Carichi a fatica

Momento radiale agente sulla fascia di fondazione (KN m)

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	53

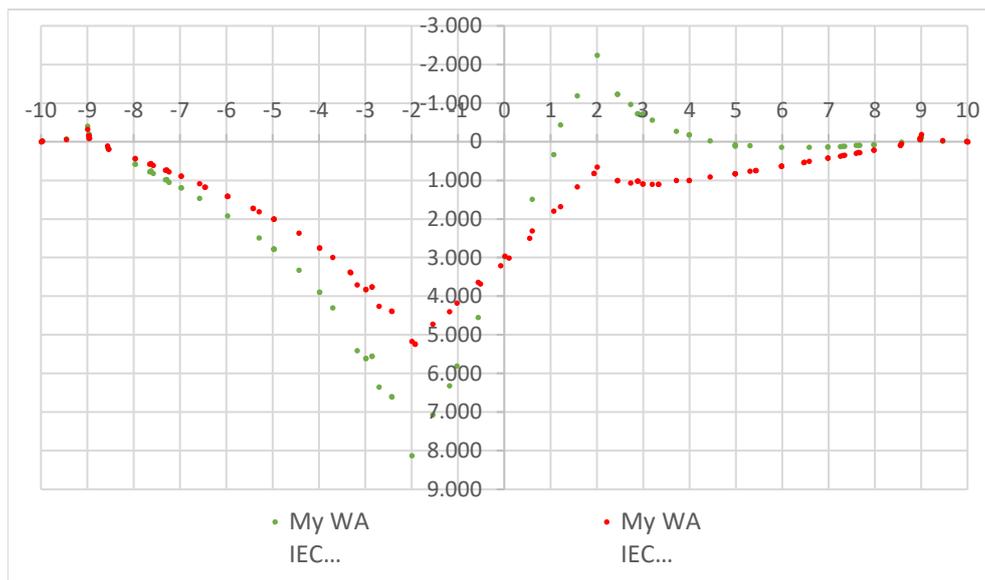


Figura 15

Momento circonferenziale agente sulla fascia di fondazione (KN m)

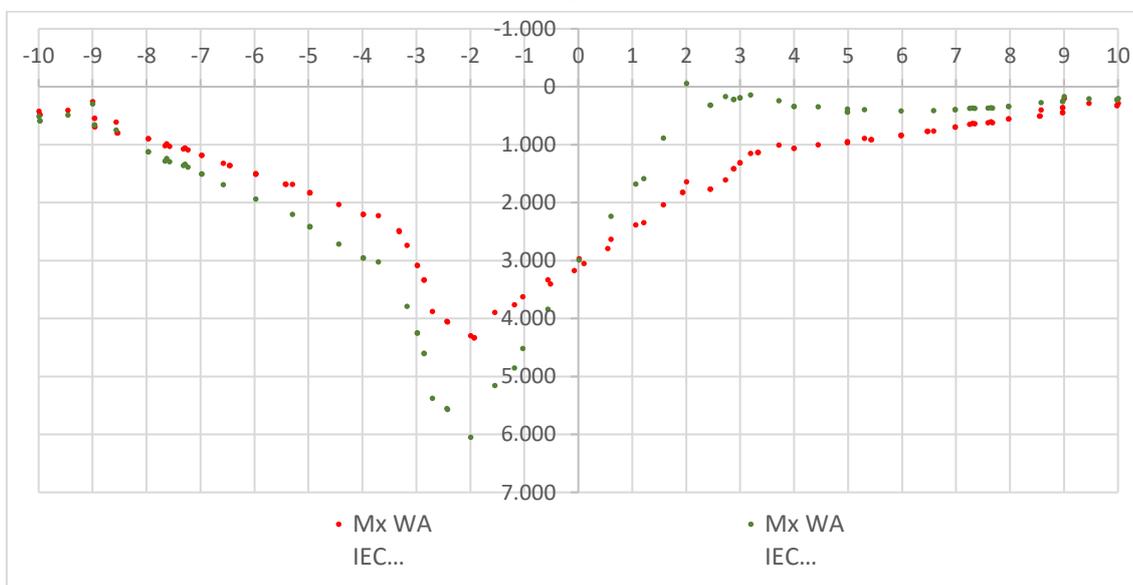


Figura 16

Dalle analisi dei tabulati di output (riportati nell'elaborato fascicolo dei calcoli) provenienti dalla modellazione in oggetto è stato possibile desumere le condizioni di sollecitazioni agenti più gravose e, altresì, le sezioni della piastra maggiormente sollecitate.

Definite le sollecitazioni agenti si sono eseguite le opportune verifiche agli SLU e SLE ai sensi del DM 17/01/2018; tali verifiche sono riportate nei paragrafi seguenti.

Il progetto-verifica avviene sempre secondo due direzioni ortogonali, una radiale e l'altra circonferenziale. Le convenzioni adottate sono tali che il momento positivo produce le fibre tese della parte inferiore della fondazione.

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	54

8.2. VERIFICA PRESSO-FLESSIONE AGLI SLU

Il momento resistente viene determinato dopo aver calcolato la curvatura che, in condizioni di deformazione limite del calcestruzzo o dell'acciaio, soddisfa l'equilibrio alla traslazione. Tale momento viene quindi confrontato con il momento agente nella sezione corrispondente, la verifica risulta soddisfatta se risulta soddisfatta la seguente espressione:

$$M_{rd} \geq M_{ed}$$

Le sezioni indagate ai fini della determinazione del momento radiale resistente sono individuate dalla ordinata a cui si effettua l'analisi. Le verifiche sono riportate nelle tabelle seguenti.

Momento Ultimo Resistente radiale inferiore									
y (-)	y (+)	C	$\phi_{r, inf}$	$n_{r, inf}$	$\phi_{r, inf}$	$n_{r, inf}$	H (M _{inf})	A _{f, inf}	M _{rd, r inf}
[m]	[m]	[m]	[mm]		[mm]		[mm]	[mm ² /m]	[kN*m]
-10,00	10,00	62,83	32	200	20	200	1850	3560,00	2.428,26
-9,50	9,50	59,69	32	200	20	200	1900	3747,37	2.625,90
-9,00	9,00	56,55	32	200	20	200	1950	3955,56	2.845,47
-8,50	8,50	53,41	32	200	20	200	2000	4188,24	3.090,84
-8,00	8,00	50,27	32	200	20	200	2050	4450,00	3.366,82
-7,50	7,50	47,12	32	200	20	200	2100	4746,67	3.679,54
-7,00	7,00	43,98	32	200	20	200	2150	5085,71	4.036,86
-6,50	6,50	40,84	32	200	20	200	2200	5476,92	4.449,05
-6,50	6,50	40,84	32	300	20	200	2200	7446,15	6.022,55
-6,00	6,00	37,70	32	300	20	200	2250	8066,67	6.675,26
-6,00	6,00	37,70	32	300	20	200	2250	8066,67	6.675,26
-5,50	5,50	34,56	32	300	20	200	2300	8800,00	7.446,47
-5,50	5,50	34,56	32	300	20	200	2300	8800,00	7.446,47
-5,00	5,00	31,42	32	300	20	200	2350	9680,00	8.371,75
-4,50	4,50	28,27	32	300	20	200	2400	10755,56	9.502,32
-4,50	4,50	28,27	32	300	32	100	2400	11377,78	10.047,01
-4,00	4,00	25,13	32	300	32	100	2450	12800,00	11.541,88
-3,50	3,50	21,99	32	300	32	100	2500	14628,57	13.463,86
-3,00	3,00	18,85	32	300	32	100	2550	17066,67	16.026,69
-3,00	3,00	18,85	32	200	32	100	3150	12800,00	15.047,88
-2,50	2,50	15,71	32	200	32	100	3150	15360,00	18.041,25
-2,00	2,00	12,57	32	200	32	100	3150	19200,00	22.531,93

Tabella 55

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	55

Momento Ultimo Resistente radiale superiore									
y (-)	y (+)	C	$\phi_{r, sup}$	$n_{r, sup}$	$\phi_{r, sup}$	$n_{r, sup}$	H (M _{sup})	A _{r, sup}	M _{rd, r sup}
[m]	[m]	[m]	[mm]		[mm]			[mm ² /m]	[kN*m]
-10,00	10,00	62,83	32	200	20	200	1850	3560,00	-2.428,26
-9,50	9,50	59,69	32	200	20	200	1900	3747,37	-2.625,90
-9,00	9,00	56,55	32	200	20	200	1950	3955,56	-2.845,47
-8,50	8,50	53,41	32	200	20	200	2000	4188,24	-3.090,84
-8,00	8,00	50,27	32	200	20	200	2050	4450,00	-3.366,82
-7,50	7,50	47,12	32	200	20	200	2100	4746,67	-3.679,54
-7,00	7,00	43,98	32	200	20	200	2150	5085,71	-4.036,86
-6,50	6,50	40,84	32	200	20	200	2200	5476,92	-4.449,05
-6,50	6,50	40,84	32	200	20	200	2200	5476,92	-4.448,51
-6,00	6,00	37,70	32	200	20	200	2250	5933,33	-4.929,22
-6,00	6,00	37,70	32	200	20	200	2250	5933,33	-4.929,22
-5,50	5,50	34,56	32	200	20	200	2300	6472,73	-5.497,25
-5,50	5,50	34,56	32	200	20	200	2300	6472,73	-5.497,25
-5,00	5,00	31,42	32	200	20	200	2350	7120,00	-6.178,79
-4,50	4,50	28,27	32	200	20	200	2400	7911,11	-7.011,67
-4,50	4,50	28,27	32	300			2400	8533,33	-7.557,34
-4,00	4,00	25,13	32	300			2450	9600,00	-8.680,09
-3,50	3,50	21,99	32	300			2500	10971,43	-10.123,53
-3,00	3,00	18,85	32	300			2550	12800,00	-12.048,01
-3,00	3,00	18,85	32	200	32	100	2550	12800,00	-12.047,63
-2,50	2,50	15,71	32	200	32	100	2550	15360,00	-14.439,41
-2,00	2,00	12,57	32	200	32	100	2550	19200,00	-18.027,82

Tabella 56

Nel seguente grafico viene confrontato il momento radiale resistente ultimo con il momento radiale agente:

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	56

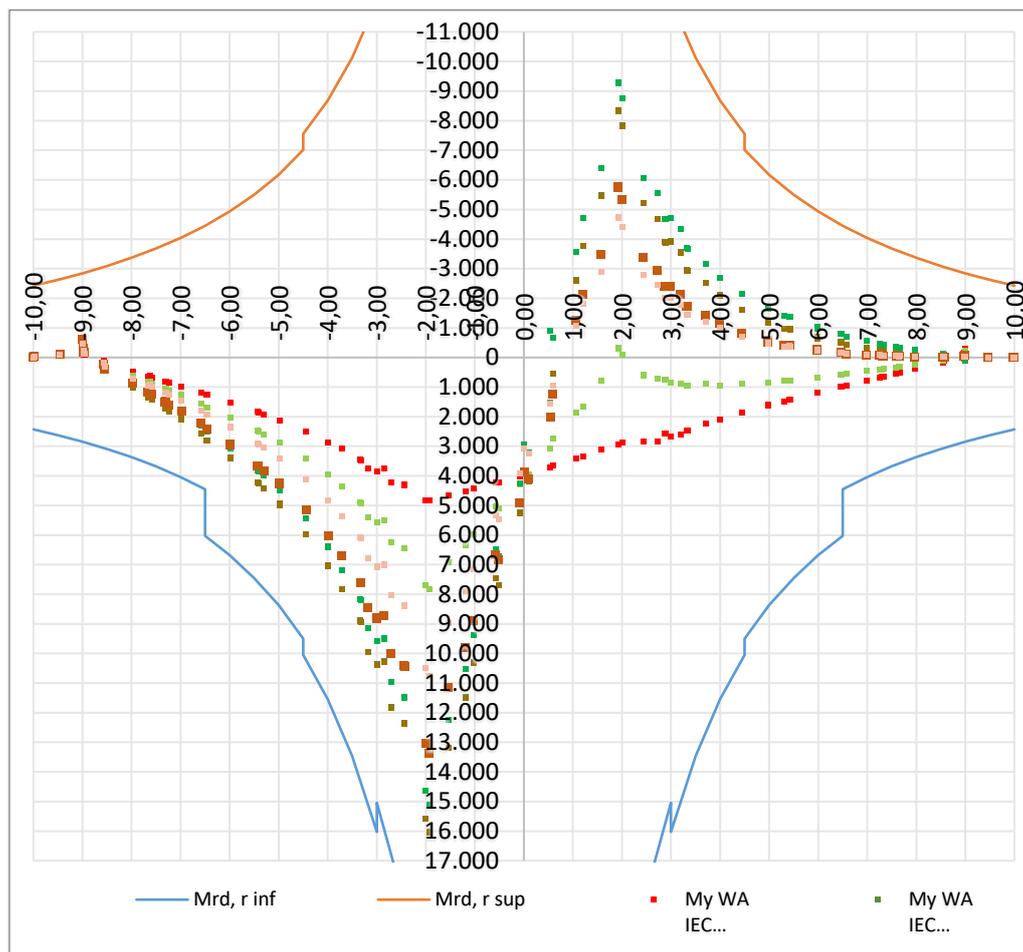


Figura 17

Il momento resistente risulta sempre maggiore del momento agente. La fondazione risulta pertanto verificata in ogni sua sezione.

Le sezioni indagate ai fini della determinazione del momento circonferenziale resistente sono individuate dalla ordinata a cui si effettua la verifica. Le verifiche sono riportate nelle tabelle seguenti.

Momento Ultimo Resistente circonferenziale inferiore						
y (-)	y (+)	$\phi_{c, inf}$	$p_{c, inf}$	H (M_{inf})	$A_{f, inf}$	$M_{rd, r inf}$
[m]	[m]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ² /m]	[kN*m]
-10,00	10,00	26	150	1850	3539,53	2.414,24
-9,50	9,50	26	150	1900	3539,53	2.483,14
-9,00	9,00	26	150	1950	3539,53	2.552,04
-8,50	8,50	26	150	2000	3539,53	2.620,98
-8,50	8,50	26	120	2000	4424,41	3.261,70
-7,50	7,50	26	120	2100	4424,41	3.434,23
-7,00	7,00	26	120	2150	4424,41	3.520,51
-6,50	6,50	26	120	2200	4424,41	3.606,82

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	57

Momento Ultimo Resistente circonferenziale inferiore						
-6,50	6,50	26	90	2200	5899,21	4.787,40
-6,00	6,00	26	90	2250	5899,21	4.902,54
-6,00	6,00	26	90	2250	5899,21	4.902,54
-5,50	5,50	26	90	2300	5899,21	5.017,68
-5,50	5,50	26	90	2300	5899,21	5.017,68
-5,00	5,00	26	90	2350	5899,21	5.132,82
-4,50	4,50	26	90	2400	5899,21	5.247,97
-4,50	4,50	26	50	2400	10618,58	9.369,78
-4,00	4,00	26	50	2450	10618,58	9.577,86
-3,50	3,50	26	50	2500	10618,58	9.786,16
-3,00	3,00	26	50	2550	10618,58	9.994,67
-3,00	3,00	26	50	3150	10618,58	12.490,31
-2,50	2,50	26	50	3150	10618,58	12.490,31
-2,00	2,00	26	50	3150	10618,58	12.490,31

Tabella 57

Momento Ultimo Resistente circonferenziale superiore						
y (-)	y (+)	$\phi_{c, sup}$	$\rho_{c, sup}$	H (M _{sup})	A _{f, sup}	M _{rd, r sup}
[m]	[m]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ² /m]	[kN*m]
-10,00	10,00	26	200	1850	2654,65	-1.825,42
-9,50	9,50	26	200	1900	2654,65	-1.876,92
-9,00	9,00	26	200	1950	2654,65	-1.928,48
-8,50	8,50	26	200	2000	2654,65	-1.980,10
-8,50	8,50	26	150	2000	3539,53	-2.621,54
-7,50	7,50	26	150	2100	3539,53	-2.759,40
-7,00	7,00	26	150	2150	3539,53	-2.828,41
-6,50	6,50	26	150	2200	3539,53	-2.897,48
-6,50	6,50	26	130	2200	4084,07	-3.333,86
-6,00	6,00	26	130	2250	4084,07	-3.413,56
-6,00	6,00	26	130	2250	4084,07	-3.413,56
-5,50	5,50	26	130	2300	4084,07	-3.493,31
-5,50	5,50	26	130	2300	4084,07	-3.493,31
-5,00	5,00	26	130	2350	4084,07	-3.573,14
-4,50	4,50	26	130	2400	4084,07	-3.652,73
-4,50	4,50	26	130	2400	4084,07	-3.652,32
-4,00	4,00	26	130	2450	4084,07	-3.731,89
-3,50	3,50	26	130	2500	4084,07	-3.811,44
-3,00	3,00	26	130	2550	4084,07	-3.890,98
-3,00	3,00	26	100	2550	5309,29	-5.039,64
-2,50	2,50	26	100	2550	5309,29	-5.039,64
-2,00	2,00	26	100	2550	5309,29	-5.039,64

Tabella 58

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	58

Nel seguente grafico viene confrontato il momento radiale resistente ultimo con il momento radiale agente:

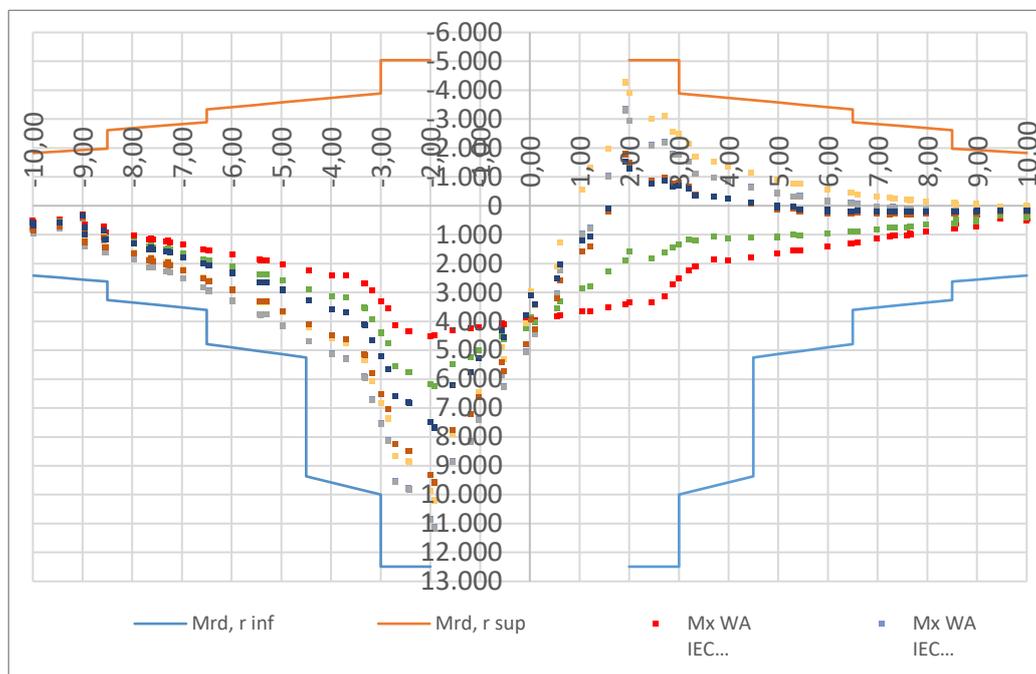


Figura 18

Figura Il momento resistente risulta sempre maggiore del momento agente. La fondazione risulta pertanto verificata in ogni sua sezione.

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	59

8.3. VERIFICA TAGLIO AGLI SLU

Le verifiche a taglio sono state eseguite in accordo con quanto disposto dall'Eurocodice 2 al paragrafo 6.2. Il procedimento consiste nel confrontare il valore dell'azione a taglio massima resistente (V_{Rd}) dell'elemento, con il valore di sforzo di taglio di progetto (V_{Ed}) che vi agisce.

La prima parte della verifica vede confrontarsi il valore di taglio agente di progetto con la resistenza a taglio di progetto dell'elemento privo di armatura a taglio ($V_{Rd,c}$).

$$V_{Rd,c} = \left[C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp} \right] \cdot b_w d$$

Se si verifica che sono necessarie armature a taglio, il valore dell'azione a taglio massima resistente (V_{Rd}), è stato calcolato come valore minimo tra i seguenti valori:

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} b_w z v_1 f_{cd}}{(\cot\theta + \tan\theta)} \quad e \quad V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} z f_{yd} \cot\theta$$

Nelle verifiche si limita l'inclinazione θ dei puntoni di calcestruzzo rispetto all'asse della trave secondo la seguente espressione:

$$1 \leq \cot \theta \leq 2,5$$

Dati generali verifiche a taglio		
verifica a taglio di elementi che non presentano specifiche armature		
$C_{Rd,c}$	0,12	$0,18 / \gamma_c$
k_1	0,15	
σ_{cp}	0,00 Mpa	N_{ed} / A_c
verifica a taglio di elementi con specifiche armature		
α_{cw}	1	
f_{ywd}	360 Mpa	
v_1	0,60	0,6 se $f_{ywd} < 80\% f_{yk}$ 0,6 [1-fck/250] se $f_{ywd} > 80\% f_{yk}$

Tabella 59

Le sezioni indagate ai fini della determinazione del taglio radiale resistente sono individuate dalla ordinata a cui si effettua la verifica. Le verifiche sono riportate nelle tabelle seguenti.

Taglio Ultimo Resistente radiale superiore senza specifiche armature									
y (-)	y (+)	C	$A_{f,r sup}$	H	d	k	ρ_r	V_{min}	$V_{rdc, sup}$
[m]	[m]	[m]	[mm ² /m]	[mm]	[mm]			[Mpa]	[kN]
-10,00	10,00	62,83	3560,00	1850	1770	1,34	0,002	0,363	-641,84
-9,50	9,50	59,69	3747,37	1900	1820	1,33	0,002	0,361	-656,53
-9,00	9,00	56,55	3955,56	1950	1870	1,33	0,002	0,359	-671,18
-8,50	8,50	53,41	4188,24	2000	1920	1,32	0,002	0,357	-685,79
-8,00	8,00	50,27	4450,00	2050	1970	1,32	0,002	0,356	-700,36
-7,50	7,50	47,12	4746,67	2100	2020	1,31	0,002	0,354	-714,90
-7,00	7,00	43,98	5085,71	2150	2070	1,31	0,002	0,352	-729,40

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	60

Taglio Ultimo Resistente radiale superiore senza specifiche armature									
-6,40	6,40	40,21	5476,92	2210	2130	1,31	0,003	0,351	-755,27
-5,80	5,80	36,44	5933,33	2270	2190	1,30	0,003	0,349	-787,64
-5,30	5,30	33,30	6472,73	2320	2240	1,30	0,003	0,348	-820,96
-4,80	4,80	30,16	7120,00	2370	2290	1,30	0,003	0,346	-857,86
-4,30	4,30	27,02	7911,11	2420	2340	1,29	0,003	0,345	-899,20
-3,80	3,80	23,88	9600,00	2470	2390	1,29	0,004	0,344	-970,41
-3,30	3,30	20,73	10971,43	2520	2440	1,29	0,004	0,343	-1.026,30
-3,00	3,00	18,85	12800,00	2550	2470	1,28	0,005	0,342	-1.087,78
-3,00	3,00	18,85	12800,00	3150	3070	1,26	0,004	0,330	-1.228,78
-2,50	2,50	15,71	15360,00	3150	3070	1,26	0,005	0,330	-1.305,77
-2,00	2,00	12,57	19200,00	3150	3070	1,26	0,006	0,330	-1.406,60

Tabella 60

Taglio Ultimo Resistente radiale inferiore senza specifiche armature									
y (-)	y (+)	C	$A_{f, r \text{ inf}}$	H	d	k	ρ_r	V_{\min}	$V_{rdc, \text{ inf}}$
[m]	[m]	[m]	[mm ² /m]	[mm]	[mm]			[Mpa]	[kN]
-10,00	10,00	62,83	3560,00	1850	1770	1,34	0,002	0,363	641,84
-9,50	9,50	59,69	3747,37	1900	1820	1,33	0,002	0,361	656,53
-9,00	9,00	56,55	3955,56	1950	1870	1,33	0,002	0,359	671,18
-8,50	8,50	53,41	4188,24	2000	1920	1,32	0,002	0,357	685,79
-8,00	8,00	50,27	4450,00	2050	1970	1,32	0,002	0,356	700,36
-7,50	7,50	47,12	4746,67	2100	2020	1,31	0,002	0,354	714,90
-7,00	7,00	43,98	5085,71	2150	2070	1,31	0,002	0,352	729,40
-6,40	6,40	40,21	7446,15	2210	2130	1,31	0,003	0,351	836,70
-5,80	5,80	36,44	8066,67	2270	2190	1,30	0,004	0,349	872,55
-5,30	5,30	33,30	8800,00	2320	2240	1,30	0,004	0,348	909,47
-4,80	4,80	30,16	9680,00	2370	2290	1,30	0,004	0,346	950,34
-4,30	4,30	27,02	10755,56	2420	2340	1,29	0,005	0,345	996,14
-3,80	3,80	23,88	12800,00	2470	2390	1,29	0,005	0,344	1.068,07
-3,30	3,30	20,73	14628,57	2520	2440	1,29	0,006	0,343	1.129,59
-3,00	3,00	18,85	17066,67	2550	2470	1,28	0,007	0,342	1.197,25
-3,00	3,00	18,85	12800,00	3150	3070	1,26	0,004	0,330	1.228,78
-2,50	2,50	15,71	15360,00	3150	3070	1,26	0,005	0,330	1.305,77
-2,00	2,00	12,57	19200,00	3150	3070	1,26	0,006	0,330	1.406,60

Tabella 61

Taglio Ultimo Resistente radiale inferiore con specifiche armature													
y (-)	y (+)	C	H	d	ρ_r	ϕ_{st}	$p_{st, r}$	$n_{st, r}$	$A_{st, r}$	θ	$V_{Rd, s \text{ sup}}$	$V_{Rd, \text{ max sup}}$	$V_{Rd, \text{ sup}}$
[m]	[m]	[m]	[mm]	[mm]		[mm]	[mm]	(totale)	[mm ² /m]	°	[kN]	[kN]	[kN]
-10,00	10,00	62,83	1850	1770	0,002	20	500	144	720,00	21,8	2.064,56	4.202,17	-2.064,56
-9,50	9,50	59,69	1900	1820	0,002	20	500	144	757,89	21,8	2.234,61	4.320,88	-2.234,61
-9,00	9,00	56,55	1950	1870	0,002	20	500	156	866,67	21,8	2.625,52	4.439,58	-2.625,52
-8,50	8,50	53,41	2000	1920	0,002	20	500	144	847,06	21,8	2.634,88	4.558,11	-2.634,88
-8,00	8,00	50,27	2050	1970	0,002	20	500	128	800,00	21,8	2.553,30	4.676,81	-2.553,30

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	61

Taglio Ultimo Resistente radiale inferiore con specifiche armature													
-7,50	7,50	47,12	2100	2020	0,002	20	500	116	773,33	21,8	2.530,70	4.795,70	-2.530,70
-7,00	7,00	43,98	2150	2070	0,002	20	600	116	828,57	21,8	2.315,48	4.914,41	-2.315,48
-6,40	6,40	40,21	2210	2130	0,003	20	600	108	843,75	21,8	2.426,24	5.056,85	-2.426,24
-5,80	5,80	36,44	2270	2190	0,003	20	600	108	931,03	21,8	2.752,65	5.199,30	-2.752,65
-5,30	5,30	33,30	2320	2240	0,003	20	500	96	905,66	21,8	3.285,75	5.318,90	-3.285,75
-4,80	4,80	30,16	2370	2290	0,003	20	500	88	916,67	21,8	3.400,89	5.436,49	-3.400,89
-4,30	4,30	27,02	2420	2340	0,003	20	500	88	1023,26	21,8	3.879,23	5.555,20	-3.879,23
-3,80	3,80	23,88	2470	2390	0,004	20	500	80	1052,63	21,8	4.075,87	5.673,90	-4.075,87
-3,30	3,30	20,73	2520	2440	0,004	20	500	80	1212,12	21,8	4.791,61	5.792,60	-4.791,61
-3,00	3,00	18,85	2550	2470	0,005	26	500	100	2816,67	31,0	7.506,18	7.506,18	-7.506,18
-3,00	3,00	18,85	3150	3070	0,004	26	500	100	2816,67	31,0	9.329,54	9.329,54	-9.329,54
-2,50	2,50	15,71	3150	3070	0,005	26	500	100	3380,00	34,3	9.844,44	9.844,44	-9.844,44
-2,00	2,00	12,57	3150	3070	0,006	26	500	100	4225,00	39,1	10.344,67	10.344,67	-10.344,67

Tabella 62

Taglio Ultimo Resistente radiale inferiore con specifiche armature														
y (-)	y (+)	C	H	d	ρ_r	ϕ_{st}	$p_{st,r}$	$n_{st,r}$	$A_{st,r}$	θ	$V_{Rd,s inf}$	$V_{Rd,max inf}$	$V_{Rd, inf}$	
[m]	[m]	[m]	[mm]	[mm]		[mm]	[mm]	(totale)	[mm ² /m]	°	[kN]	[kN]	[kN]	
-10,00	10,00	62,83	1850	1770	0,002	20	500	144	720,00	21,8	2.064,56	4.202,17	2.064,56	
-9,50	9,50	59,69	1900	1820	0,002	20	500	144	757,89	21,8	2.234,61	4.320,88	2.234,61	
-9,00	9,00	56,55	1950	1870	0,002	20	500	156	866,67	21,8	2.625,52	4.439,58	2.625,52	
-8,50	8,50	53,41	2000	1920	0,002	20	500	144	847,06	21,8	2.634,88	4.558,11	2.634,88	
-8,00	8,00	50,27	2050	1970	0,002	20	500	128	800,00	21,8	2.553,30	4.676,81	2.553,30	
-7,50	7,50	47,12	2100	2020	0,002	20	500	116	773,33	21,8	2.530,70	4.795,70	2.530,70	
-7,00	7,00	43,98	2150	2070	0,002	20	600	116	828,57	21,8	2.315,48	4.914,41	2.315,48	
-6,40	6,40	40,21	2210	2130	0,003	20	600	106	843,75	21,8	2.426,24	5.056,85	2.426,24	
-5,80	5,80	36,44	2270	2190	0,004	20	600	98	931,03	21,8	2.752,65	5.199,30	2.752,65	
-5,30	5,30	33,30	2320	2240	0,004	20	500	96	905,66	21,8	3.285,75	5.318,90	3.285,75	
-4,80	4,80	30,16	2370	2290	0,004	20	500	88	916,67	21,8	3.400,89	5.436,49	3.400,89	
-4,30	4,30	27,02	2420	2340	0,005	20	500	88	1023,26	21,8	3.879,23	5.555,20	3.879,23	
-3,80	3,80	23,88	2470	2390	0,005	20	500	80	1052,63	21,8	4.075,87	5.673,90	4.075,87	
-3,30	3,30	20,73	2520	2440	0,006	20	500	80	1212,12	21,8	4.791,61	5.792,60	4.791,61	
-3,00	3,00	18,85	2550	2470	0,007	20	500	100	2816,67	31,0	7.506,18	7.506,18	7.506,18	
-3,00	3,00	18,85	3150	3070	0,004	26	500	100	2816,67	31,0	9.329,54	9.329,54	9.329,54	
-2,50	2,50	15,71	3150	3070	0,005	26	500	100	3380,00	34,3	9.844,44	9.844,44	9.844,44	
-2,00	2,00	12,57	3150	3070	0,006	26	500	100	4225,00	39,1	10.344,67	10.344,67	10.344,67	

Tabella 63

Nel seguente grafico viene confrontato il taglio resistente ultimo con il taglio agente:

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	62

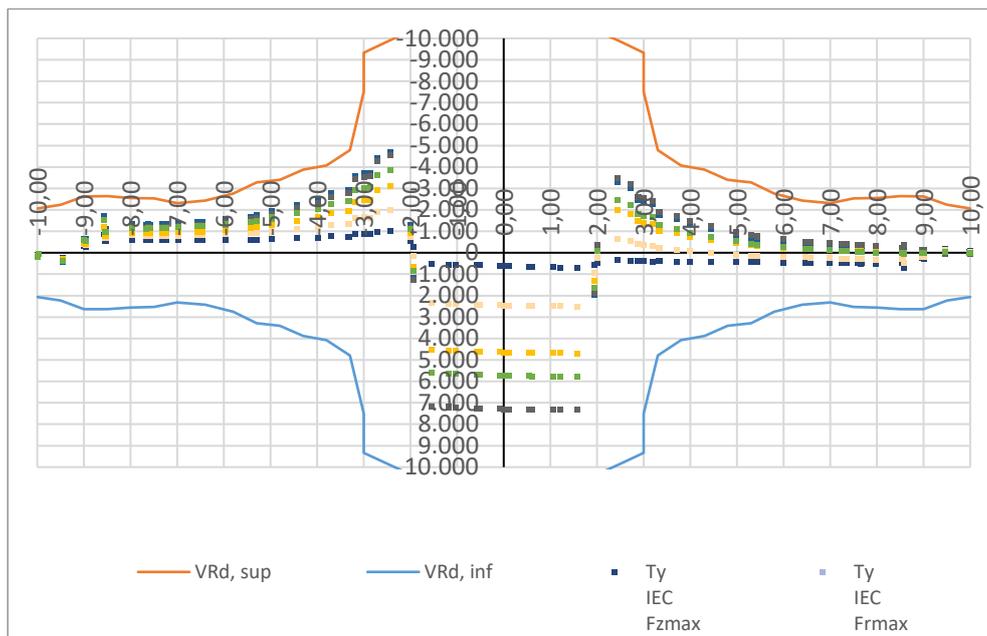


Figura 19

Il taglio resistente risulta sempre maggiore del taglio agente. La fondazione risulta pertanto verificata in ogni sua sezione.

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	63

8.4. VERIFICA PRESSO-FLESSIONE AGLI SLE

La verifica è stata condotta valutando le sollecitazioni dovute alle combinazioni caratteristica e quasi permanente delle azioni, e valutando le massime tensioni agenti nel calcestruzzo e nelle armature: si deve verificare che tali tensioni siano inferiori ai massimi valori consentiti per lo stato limite in esame. Nel caso in cui le tensioni agenti nel calcestruzzo dovute alla combinazione caratteristica siano inferiori alle tensioni limite imposte per la combinazione quasi permanente non si è proceduto alla determinazione delle tensioni dovute a tale ultima combinazione, ritenendo la verifica alla combinazione quasi permanente sicuramente soddisfatta.

I valori limite di calcolo sono i seguenti:

$$\sigma_{S\ SLE\ R} \leq 360,00\ \text{Mpa} \quad \sigma_{C\ SLE\ R} \leq 27,00\ \text{Mpa} \quad \sigma_{C\ SLE\ QP} \leq 20,25\ \text{Mpa}$$

L'analisi condotta può essere riassunta nelle seguenti tabelle:

Tensione nel calcestruzzo superiore e nell'acciaio inferiore dovuta al momento radiale che tende le fibre inferiori										
y (-)	y (+)	H(M _{inf})	A _{f, inf}	A _{f, sup}	M _{SLE r, inf}	x _{inf}	J _{inf}	σ _{C SLE R inf}	σ _{S SLE R inf}	σ _{C SLE R} < σ _{C max SLE QP} σ _{S SLE R} < σ _{S max SLE R}
[m]	[m]	[mm]	[mm ² /m]	[mm ² /m]	[kN*m]	[mm]	[mm ⁴]	[Mpa]	[Mpa]	
10,00	-10,00	1850	3560,00	3560,00	0,00	350,35	1,26E+11	0,00	0,00	VERIFICA
9,50	-9,50	1900	3747,37	3747,37	0,00	363,22	1,40E+11	0,00	0,00	VERIFICA
9,00	-9,00	1950	3955,56	3955,56	0,00	376,79	1,55E+11	0,00	0,00	VERIFICA
8,50	-8,50	2000	4188,24	4188,24	296,35	391,15	1,73E+11	0,67	39,31	VERIFICA
8,00	-8,00	2050	4450,00	4450,00	647,55	406,40	1,93E+11	1,37	78,82	VERIFICA
7,50	-7,50	2100	4746,67	4746,67	1005,30	422,68	2,15E+11	1,97	111,93	VERIFICA
7,00	-7,00	2150	5085,71	5085,71	1465,25	440,14	2,41E+11	2,68	148,66	VERIFICA
6,50	-6,50	2200	5476,92	5476,92	1967,24	458,97	2,71E+11	3,34	181,07	VERIFICA
6,50	-6,50	2200	7446,15	5476,92	1967,24	530,24	3,49E+11	2,99	134,56	VERIFICA
6,00	-6,00	2250	8066,67	5933,33	2401,72	553,86	3,93E+11	3,39	148,28	VERIFICA
6,00	-6,00	2250	8066,67	5933,33	2401,72	553,86	3,93E+11	3,39	148,28	VERIFICA
5,50	-5,50	2300	8800,00	6472,73	3100,78	579,67	4,44E+11	4,05	171,70	VERIFICA
5,50	-5,50	2300	8800,00	6472,73	3100,76	579,67	4,44E+11	4,05	171,70	VERIFICA
5,00	-5,00	2350	9680,00	7120,00	3486,02	608,12	5,06E+11	4,19	171,82	VERIFICA
4,50	-4,50	2400	10755,56	7911,11	4180,47	639,77	5,80E+11	4,61	181,68	VERIFICA
4,50	-4,50	2400	11377,78	8533,33	4180,47	650,85	6,09E+11	4,47	171,84	VERIFICA
4,00	-4,00	2450	12800,00	9600,00	4918,12	686,75	7,05E+11	4,79	176,14	VERIFICA
3,50	-3,50	2500	14628,57	10971,43	6233,80	727,68	8,26E+11	5,49	191,60	VERIFICA
3,00	-3,00	2550	17066,67	12800,00	7218,96	775,14	9,83E+11	5,69	186,63	VERIFICA
3,00	-3,00	3150	12800,00	12800,00	7218,96	780,93	1,26E+12	4,48	196,86	VERIFICA
2,50	-2,50	3150	15360,00	15360,00	8583,27	829,11	1,48E+12	4,82	195,44	VERIFICA
2,00	-2,00	3150	19200,00	19200,00	9710,80	888,98	1,79E+12	4,82	177,22	VERIFICA

Tabella 64

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	64

Tensione nel calcestruzzo inferiore e nell'acciaio superiore dovuta al momento radiale che tende le fibre superiori										
y (-)	y (+)	H(M _{sup})	A _{f, inf}	A _{f, sup}	M _{SLE r, sup}	x _{sup}	J _{sup}	σ _{C SLE R sup}	σ _{S SLE R sup}	σ _{C SLE R} < σ _{C max SLE QP} σ _{S SLE R} < σ _{S max SLE R}
[m]	[m]	[mm]	[mm ² /m]	[mm ² /m]	[kN*m]	[mm]	[mm ⁴]	[Mpa]	[Mpa]	
10,00	-10,00	1850	3560,00	3560,00	-10,95	350,35	1,26E+11	0,03	1,85	VERIFICA
9,50	-9,50	1900	3747,37	3747,37	-49,64	363,22	1,40E+11	0,13	7,76	VERIFICA
9,00	-9,00	1950	3955,56	3955,56	-478,82	376,79	1,55E+11	1,16	69,03	VERIFICA
8,50	-8,50	2000	4188,24	4188,24	-9,24	391,15	1,73E+11	0,02	1,23	VERIFICA
8,00	-8,00	2050	4450,00	4450,00	-52,30	406,40	1,93E+11	0,11	6,37	VERIFICA
7,50	-7,50	2100	4746,67	4746,67	-80,09	422,68	2,15E+11	0,16	8,92	VERIFICA
7,00	-7,00	2150	5085,71	5085,71	-139,20	440,14	2,41E+11	0,25	14,12	VERIFICA
6,50	-6,50	2200	5476,92	5476,92	-239,27	458,97	2,71E+11	0,41	22,02	VERIFICA
6,50	-6,50	2200	7446,15	5476,92	-239,27	441,59	2,75E+11	0,38	21,93	VERIFICA
6,00	-6,00	2250	8066,67	5933,33	-304,16	460,61	3,10E+11	0,45	25,14	VERIFICA
6,00	-6,00	2250	8066,67	5933,33	-304,16	460,61	3,10E+11	0,45	25,14	VERIFICA
5,50	-5,50	2300	8800,00	6472,73	-496,07	481,32	3,52E+11	0,68	36,76	VERIFICA
5,50	-5,50	2300	8800,00	6472,73	-496,07	481,32	3,52E+11	0,68	36,76	VERIFICA
5,00	-5,00	2350	9680,00	7120,00	-645,08	504,05	4,02E+11	0,81	42,52	VERIFICA
4,50	-4,50	2400	10755,56	7911,11	-869,46	529,21	4,63E+11	0,99	50,50	VERIFICA
4,50	-4,50	2400	11377,78	8533,33	-869,46	544,20	4,94E+11	0,96	46,87	VERIFICA
4,00	-4,00	2450	12800,00	9600,00	-1182,62	572,94	5,74E+11	1,18	55,50	VERIFICA
3,50	-3,50	2500	14628,57	10971,43	-1690,27	605,49	6,76E+11	1,51	68,01	VERIFICA
3,00	-3,00	2550	17066,67	12800,00	-2313,11	642,94	8,11E+11	1,83	78,20	VERIFICA
3,00	-3,00	2550	12800,00	12800,00	-2313,11	780,93	1,26E+12	1,43	46,54	VERIFICA
2,50	-2,50	2550	15360,00	15360,00	-3158,03	829,11	1,48E+12	1,77	52,65	VERIFICA
2,00	-2,00	2550	19200,00	19200,00	-5207,85	888,98	1,79E+12	2,58	68,90	VERIFICA

Tabella 65

Tensione nel calcestruzzo superiore e nell'acciaio inferiore dovuta al momento circonferenziale che tende le fibre inferiori										
y (-)	y (+)	H(M _{inf})	A _{f, inf}	A _{f, sup}	M _{SLE c, inf}	x _{inf}	J _{inf}	σ _{C SLE R inf}	σ _{S SLE R inf}	σ _{C SLE R} < σ _{C max SLE QP} σ _{S SLE R} < σ _{S max SLE R}
[m]	[m]	[mm]	[mm ² /m]	[mm ² /m]	[kN*m]	[mm]	[mm ⁴]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
-10,00	10,00	1850	3539,53	2654,65	637,23	357,59	1,24E+11	1,83	108,68	VERIFICA
-9,50	9,50	1900	3539,53	2654,65	530,69	363,44	1,32E+11	1,46	87,94	VERIFICA
-9,00	9,00	1950	3539,53	2654,65	996,37	369,23	1,40E+11	2,63	160,57	VERIFICA
-8,50	8,50	2000	3539,53	2654,65	1161,41	374,93	1,48E+11	2,95	182,14	VERIFICA
-8,50	8,50	2000	4424,41	3539,53	1161,41	407,43	1,80E+11	2,63	146,33	VERIFICA
-7,50	7,50	2100	4424,41	3539,53	1643,91	419,88	2,01E+11	3,44	196,57	VERIFICA
-7,00	7,00	2150	4424,41	3539,53	1787,33	426,00	2,11E+11	3,60	208,40	VERIFICA
-6,50	6,50	2200	4424,41	3539,53	2089,19	432,05	2,23E+11	4,06	237,68	VERIFICA
-6,50	6,50	2200	5899,21	4084,07	2089,19	488,54	2,85E+11	3,59	179,63	VERIFICA
-6,00	6,00	2250	5899,21	4084,07	2344,53	495,44	2,99E+11	3,88	196,80	VERIFICA
-6,00	6,00	2250	5899,21	4084,07	2344,53	495,44	2,99E+11	3,88	196,80	VERIFICA
-5,50	5,50	2300	5899,21	4084,07	2670,28	502,26	3,14E+11	4,27	218,94	VERIFICA
-5,50	5,50	2300	5899,21	4084,07	2670,28	502,26	3,14E+11	4,27	218,94	VERIFICA
-5,00	5,00	2350	5899,21	4084,07	2937,55	509,01	3,30E+11	4,54	235,39	VERIFICA
-4,50	4,50	2400	5899,21	4084,07	3315,68	515,69	3,45E+11	4,95	259,79	VERIFICA

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	65

Tensione nel calcestruzzo superiore e nell'acciaio inferiore dovuta al momento circonferenziale che tende le fibre inferiori										
-4,50	4,50	2400	10618,58	4084,07	3315,68	672,48	5,55E+11	4,02	147,58	VERIFICA
-4,00	4,00	2450	10618,58	4084,07	3620,29	681,36	5,82E+11	4,24	157,62	VERIFICA
-3,50	3,50	2500	10618,58	4084,07	4193,75	690,15	6,09E+11	4,75	178,68	VERIFICA
-3,00	3,00	2550	10618,58	4084,07	5291,29	698,85	6,37E+11	5,81	220,72	VERIFICA
-3,00	3,00	3150	10618,58	5309,29	5291,29	784,70	1,03E+12	4,02	175,68	VERIFICA
-2,50	2,50	3150	10618,58	5309,29	6905,60	784,70	1,03E+12	5,25	229,28	VERIFICA
-2,00	2,00	3150	10618,58	5309,29	7814,05	784,70	1,03E+12	5,94	259,44	VERIFICA

Tabella 66

Tensione nel calcestruzzo inferiore e nell'acciaio superiore dovuta al momento circonferenziale che tende le fibre superiori										
y (-)	y (+)	H(M _{sup})	A _{f, inf}	A _{f, sup}	M _{SLE c, sup}	x _{sup}	J _{sup}	σ _{C SLE R sup}	σ _{S SLE R sup}	σ _{C SLE R} < σ _{C max SLE QP} σ _{S SLE R} < σ _{S max SLE R}
[m]	[m]	[mm]	[mm ² /m]	[mm ² /m]	[kN*m]	[mm]	[mm ⁴]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
-10,00	10,00	1850	3539,53	2654,65	0,00	304,69	9,76E+10	0,00	0,00	VERIFICA
-9,50	9,50	1900	3539,53	2654,65	0,00	309,67	1,04E+11	0,00	0,00	VERIFICA
-9,00	9,00	1950	3539,53	2654,65	0,00	314,58	1,10E+11	0,00	0,00	VERIFICA
-8,50	8,50	2000	3539,53	2654,65	0,00	319,44	1,16E+11	0,00	0,00	VERIFICA
-8,50	8,50	2000	4424,41	3539,53	0,00	358,84	1,50E+11	0,00	0,00	VERIFICA
-7,50	7,50	2100	4424,41	3539,53	0,00	369,81	1,67E+11	0,00	0,00	VERIFICA
-7,00	7,00	2150	4424,41	3539,53	0,00	375,21	1,76E+11	0,00	0,00	VERIFICA
-6,50	6,50	2200	4424,41	3539,53	0,00	380,54	1,85E+11	0,00	0,00	VERIFICA
-6,50	6,50	2200	5899,21	4084,07	0,00	394,61	2,12E+11	0,00	0,00	VERIFICA
-6,00	6,00	2250	5899,21	4084,07	0,00	400,21	2,22E+11	0,00	0,00	VERIFICA
-6,00	6,00	2250	5899,21	4084,07	0,00	400,21	2,22E+11	0,00	0,00	VERIFICA
-5,50	5,50	2300	5899,21	4084,07	-63,33	405,75	2,33E+11	0,11	7,39	VERIFICA
-5,50	5,50	2300	5899,21	4084,07	-63,33	405,75	2,33E+11	0,11	7,39	VERIFICA
-5,00	5,00	2350	5899,21	4084,07	-125,73	411,24	2,45E+11	0,21	14,33	VERIFICA
-4,50	4,50	2400	5899,21	4084,07	-249,47	416,67	2,56E+11	0,41	27,81	VERIFICA
-4,50	4,50	2400	10618,58	4084,07	-249,47	378,10	2,63E+11	0,36	27,61	VERIFICA
-4,00	4,00	2450	10618,58	4084,07	-376,74	383,20	2,75E+11	0,52	40,80	VERIFICA
-3,50	3,50	2500	10618,58	4084,07	-645,52	388,25	2,88E+11	0,87	68,42	VERIFICA
-3,00	3,00	2550	10618,58	4084,07	-914,30	393,26	3,00E+11	1,20	94,90	VERIFICA
-3,00	3,00	2550	10618,58	5309,29	-914,30	451,00	3,77E+11	1,09	73,42	VERIFICA
-2,50	2,50	2550	10618,58	5309,29	-1375,17	451,00	3,77E+11	1,64	110,43	VERIFICA
-2,00	2,00	2550	10618,58	5309,29	-1836,04	451,00	3,77E+11	2,20	147,44	VERIFICA

Tabella 67

La tensione agente nel calcestruzzo (σ_c) risulta sempre minore della tensione massima di compressione per le condizioni di esercizio caratteristiche e quasi permanenti, così come la tensione agente nell'acciaio (σ_s) risulta sempre minore della tensione massima nelle condizioni di esercizio caratteristiche. La fondazione risulta pertanto verificata in ogni sua sezione.

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	66

8.5. VERIFICA A FATICA

La fatica è un fenomeno meccanico per cui un materiale sottoposto a cicli di carico variabili nel tempo (in maniera regolare o variabili ciclicamente) si danneggia fino a rottura, nonostante l'intensità massima dei carichi in questione sia sensibilmente inferiore a quella di rottura o di snervamento statico del materiale stesso.

Secondo quanto previsto dall'Eurocodice 2 al punto 6.8, la resistenza delle strutture a fatica deve essere svolta separatamente per il calcestruzzo e per l'acciaio.

La verifica sulle barre d'armatura metallica, par. 6.8.4, prevede il calcolo delle tensioni massime e minime, σ_{\max} e σ_{\min} , per le sezioni maggiormente svantaggiate, la cui differenza dovrà essere minore di:

$$\Delta\sigma_{Rsd} = \frac{\Delta\sigma_{Rsk}}{\gamma_{S,fat}}$$

dove:

$\Delta\sigma_{Rsk}$ si ricava dalla tabella 6.3N in funzione del tipo di armatura e del numero di cicli di carico.

Per barre dritte $\Delta\sigma_{Rsk} = 162,5$ MPa.

$\gamma_{S,fat}$ è un coefficiente di sicurezza che si ricava dalla tabella 2.1N dell'Eurocodice suddetto pari a 1,15.

Il valore di $\Delta\sigma_{Rsd}$ nel caso di barre piegate va ridotto a mezzo del fattore $\zeta = 0,35 + 0,26 D/\phi$, in cui D è il diametro del mandrino e ϕ è il diametro della barra.

Mentre la verifica sul calcestruzzo, par. 6.8.7, prevede che vi sia una soddisfacente resistenza a fatica se sono soddisfatte le seguenti espressioni:

$$E_{cd,max} + 0,43 \sqrt{1-R_{equ}} < 1 \quad (1)$$

$$0,5 + 0,45 \sigma_{c,min} / f_{cd,fat} > \sigma_{cd,max} / f_{cd,fat} \quad (2)$$

L'escursione massima di tensione consentita nelle barre è quindi pari a:

$\Delta\sigma_{Rsd}$ (dritte)	101,70 Mpa	(Per barre dritte a m=7)
$\Delta\sigma_{Rsk}$ (piegate D=7 ϕ)	54,10 Mpa	(per barre con $\phi > 16$ piegate con D=7 ϕ)
$\Delta\sigma_{Rsk}$ (piegate $\phi 32$ D=250)	56,25 Mpa	(per barre $\phi=32$ piegate con D=250mm)

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	67

L'analisi condotta può essere riassunta nelle seguenti tabelle:

Caratteristiche delle sezioni soggette a momento radiale positivo e negativo										
Caratteristiche geometriche della sezione							Il momento tende le fibre inferiori		Il momento tende le fibre superiori	
y	H(M _{inf})	H(M _{sup})	A _{f, inf}	A _{f, sup}	M _{fat min}	M _{fat max}	x _{inf}	J _{inf}	x _{sup}	J _{sup}
[m]	[mm]	[mm]	[mm ² /m]	[mm ² /m]	[kN*m]	[kN*m]	[mm]	[mm ⁴]	[mm]	[mm ⁴]
10,00	1850	1850	3560,00	3560,00	0,00	2,45	350,35	1,26E+11	350,35	1,26E+11
9,50	1900	1900	3747,37	3747,37	-31,79	0,00	363,22	1,40E+11	363,22	1,40E+11
9,00	1950	1950	3955,56	3955,56	-185,65	-55,83	376,79	1,55E+11	376,79	1,55E+11
8,50	2000	2000	4188,24	4188,24	50,88	91,53	391,15	1,73E+11	391,15	1,73E+11
8,00	2050	2050	4450,00	4450,00	75,01	215,78	406,40	1,93E+11	406,40	1,93E+11
7,50	2100	2100	4746,67	4746,67	91,22	297,68	422,68	2,15E+11	422,68	2,15E+11
7,00	2150	2150	5085,71	5085,71	137,06	425,51	440,14	2,41E+11	440,14	2,41E+11
6,50	2200	2200	5476,92	5476,92	143,79	535,25	458,97	2,71E+11	458,97	2,71E+11
6,50	2200	2200	7446,15	5476,92	143,79	535,25	530,24	3,49E+11	441,59	2,75E+11
6,00	2250	2250	8066,67	5933,33	142,95	637,09	553,86	3,93E+11	460,61	3,10E+11
6,00	2250	2250	8066,67	5933,33	142,95	637,09	553,86	3,93E+11	460,61	3,10E+11
5,50	2300	2300	8800,00	6472,73	102,58	767,56	579,67	4,44E+11	481,32	3,52E+11
5,50	2300	2300	8800,00	6472,73	102,58	767,56	579,67	4,44E+11	481,32	3,52E+11
5,00	2350	2350	9680,00	7120,00	107,96	831,24	608,12	5,06E+11	504,05	4,02E+11
4,50	2400	2400	10755,56	7911,11	-23,89	911,43	639,77	5,80E+11	529,21	4,63E+11
4,50	2400	2400	11377,78	8533,33	-23,89	911,43	650,85	6,09E+11	544,20	4,94E+11
4,00	2450	2450	12800,00	9600,00	-182,82	1005,86	686,75	7,05E+11	572,94	5,74E+11
3,50	2500	2500	14628,57	10971,43	-449,63	1100,33	727,68	8,26E+11	605,49	6,76E+11
3,00	2550	2550	17066,67	12800,00	-716,44	1093,78	775,14	9,83E+11	642,94	8,11E+11
3,00	3150	2550	12800,00	12800,00	-716,44	1093,78	780,93	1,26E+12	677,44	7,89E+11
2,50	3150	2550	15360,00	15360,00	-1225,95	1009,36	829,11	1,48E+12	717,07	9,24E+11
2,00	3150	2550	19200,00	19200,00	-2240,71	660,18	888,98	1,79E+12	765,86	1,12E+12
-10,00	1850	1850	3560,00	3560,00	-12,06	0,00	350,35	1,26E+11	350,35	1,26E+11
-9,50	1900	1900	3747,37	3747,37	-54,96	-54,96	363,22	1,40E+11	363,22	1,40E+11
-9,00	1950	1950	3955,56	3955,56	-316,68	-90,89	376,79	1,55E+11	376,79	1,55E+11
-8,50	2000	2000	4188,24	4188,24	110,71	197,38	391,15	1,73E+11	391,15	1,73E+11
-8,00	2050	2050	4450,00	4450,00	436,39	581,14	406,40	1,93E+11	406,40	1,93E+11
-7,50	2100	2100	4746,67	4746,67	583,27	821,44	422,68	2,15E+11	422,68	2,15E+11
-7,00	2150	2150	5085,71	5085,71	889,85	1194,70	440,14	2,41E+11	440,14	2,41E+11
-6,50	2200	2200	5476,92	5476,92	1175,42	1466,00	458,97	2,71E+11	458,97	2,71E+11
-6,50	2200	2200	7446,15	5476,92	1175,42	1466,00	530,24	3,49E+11	441,59	2,75E+11
-6,00	2250	2250	8066,67	5933,33	1417,80	1920,34	553,86	3,93E+11	460,61	3,10E+11
-6,00	2250	2250	8066,67	5933,33	1417,80	1920,34	553,86	3,93E+11	460,61	3,10E+11
-5,50	2300	2300	8800,00	6472,73	1734,11	2493,74	579,67	4,44E+11	481,32	3,52E+11
-5,50	2300	2300	8800,00	6472,73	1734,11	2493,74	579,67	4,44E+11	481,32	3,52E+11
-5,00	2350	2350	9680,00	7120,00	2001,16	2789,51	608,12	5,06E+11	504,05	4,02E+11
-4,50	2400	2400	10755,56	7911,11	2371,34	3329,75	639,77	5,80E+11	529,21	4,63E+11
-4,50	2400	2400	11377,78	8533,33	2371,34	3329,75	650,85	6,09E+11	544,20	4,94E+11
-4,00	2450	2450	12800,00	9600,00	2752,66	3899,79	686,75	7,05E+11	572,94	5,74E+11
-3,50	2500	2500	14628,57	10971,43	2997,60	4740,00	727,68	8,26E+11	605,49	6,76E+11
-3,00	2550	2550	17066,67	12800,00	3761,65	5618,26	775,14	9,83E+11	642,94	8,11E+11
-3,00	3150	3150	12800,00	12800,00	3761,65	5618,26	780,93	1,26E+12	780,93	1,26E+12

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	68

Caratteristiche delle sezioni soggette a momento radiale positivo e negativo										
-2,50	3150	3150	15360,00	15360,00	4392,45	6611,50	829,11	1,48E+12	829,11	1,48E+12
-2,00	3150	3150	19200,00	19200,00	5238,75	8126,90	888,98	1,79E+12	888,98	1,79E+12

Tabella 68

Escursione di tensione dovuta al momento radiale che tende le fibre inferiori nel calcestruzzo e nell'acciaio												
y	verifiche nelle barre di acciaio					verifiche nel calcestruzzo						
	σ_s inf, min	σ_s inf, max	$\Delta\sigma_s$ inf, max	$\Delta\sigma_{Rsd}$	verificato	σ_c inf, min	$E_{cd,min,eq}$	σ_c inf, max	$E_{cd,max,eq}$	R_{equ}	(1)	(2)
[m]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]		[Mpa]		[Mpa]				
10,00	0,00	0,41	0,41	54,10	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
9,50	-0,97	0,00	0,97	54,10	SI	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
9,00	-5,32	-1,60	3,72	54,10	SI	0,45	0,02	0,14	0,01	0,30	0,37	0,51
8,50	6,75	12,14	5,39	54,10	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
8,00	9,13	26,27	17,14	54,10	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
7,50	10,16	33,14	22,99	54,10	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
7,00	13,91	43,17	29,27	54,10	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
6,50	13,24	49,27	36,03	54,10	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
6,50	9,84	36,61	26,78	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
6,00	8,83	39,33	30,51	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
6,00	8,83	39,33	30,51	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
5,50	5,68	42,50	36,82	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
5,50	5,68	42,50	36,82	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
5,00	5,32	40,97	35,65	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
4,50	-0,35	39,61	39,96	101,69	SI	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
4,50	-0,34	37,46	37,80	101,69	SI	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
4,00	-2,35	36,02	38,38	54,10	SI	0,18	0,01	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
3,50	-5,24	33,82	39,06	54,10	SI	0,40	0,02	0,00	0,00	0,00	0,43	0,51
3,00	-7,46	28,28	35,74	54,10	SI	0,57	0,03	0,00	0,00	0,00	0,43	0,51
3,00	-8,14	29,83	37,96	54,10	SI	0,62	0,03	0,00	0,00	0,00	0,43	0,51
2,50	-12,67	22,98	35,66	54,10	SI	0,95	0,04	0,00	0,00	0,00	0,43	0,52
2,00	-20,55	12,05	32,60	54,10	SI	1,53	0,07	0,00	0,00	0,00	0,43	0,53
-10,00	-0,39	0,00	0,39	54,10	SI	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
-9,50	-1,67	-1,67	0,00	54,10	SI	0,14	0,01	0,14	0,01	1,00	0,01	0,50
-9,00	-9,08	-2,60	6,47	54,10	SI	0,77	0,03	0,22	0,01	0,29	0,37	0,52
-8,50	14,69	26,18	11,50	54,10	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
-8,00	53,12	70,74	17,62	54,10	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
-7,50	64,94	91,46	26,52	54,10	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
-7,00	90,28	121,21	30,93	54,10	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
-6,50	108,19	134,94	26,75	54,10	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
-6,50	80,40	100,27	19,88	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
-6,00	87,53	118,56	31,03	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
-6,00	87,53	118,56	31,03	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
-5,50	96,03	138,09	42,06	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
-5,50	96,03	138,09	42,06	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
-5,00	98,63	137,49	38,86	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
-4,50	103,06	144,71	41,65	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
-4,50	97,47	136,87	39,40	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
-4,00	98,59	139,67	41,08	54,10	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	69

Escursione di tensione dovuta al momento radiale che tende le fibre inferiori nel calcestruzzo e nell'acciaio												
-3,50	92,13	145,69	53,55	54,10	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
-3,00	97,25	145,24	48,00	54,10	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
-3,00	102,58	153,21	50,63	54,10	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
-2,50	100,01	150,54	50,53	54,10	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
-2,00	95,61	148,31	52,71	54,10	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50

Tabella 69

Escursione di tensione dovuta al momento radiale che tende le fibre superiori nel calcestruzzo e nell'acciaio												
y	verifiche nelle barre di acciaio					verifiche nel calcestruzzo						
	σ_s sup, min	σ_s sup, max	$\Delta\sigma_s$ sup, max	$\Delta\sigma_{Rsd}$	verificato	σ_c sup, min	$E_{cd,min,eq}$	σ_c sup, max	$E_{cd,max,eq}$	R_{eq}	(1) < 1	(2) > $E_{cd,max,eq}$
[m]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]		[Mpa]		[Mpa]				
10,00	0,00	0,08	0,08	54,10	SI	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,43	0,50
9,50	-4,97	0,00	4,97	54,10	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
9,00	-26,77	-8,05	18,72	54,10	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
8,50	1,37	2,47	1,10	54,10	SI	0,12	0,01	0,21	0,01	0,56	0,30	0,50
8,00	1,91	5,48	3,58	54,10	SI	0,16	0,01	0,46	0,02	0,35	0,37	0,50
7,50	2,18	7,11	4,93	54,10	SI	0,18	0,01	0,58	0,03	0,31	0,38	0,50
7,00	3,07	9,54	6,47	54,10	SI	0,25	0,01	0,78	0,03	0,32	0,39	0,50
6,50	3,02	11,24	8,22	54,10	SI	0,24	0,01	0,91	0,04	0,27	0,41	0,50
6,50	2,79	10,37	7,58	101,69	SI	0,22	0,01	0,81	0,04	0,27	0,40	0,50
6,00	2,59	11,53	8,94	101,69	SI	0,20	0,01	0,90	0,04	0,22	0,42	0,50
6,00	2,59	11,53	8,94	101,69	SI	0,20	0,01	0,90	0,04	0,22	0,42	0,50
5,50	1,73	12,95	11,22	101,69	SI	0,13	0,01	1,00	0,04	0,13	0,44	0,50
5,50	1,73	12,95	11,22	101,69	SI	0,13	0,01	1,00	0,04	0,13	0,44	0,50
5,00	1,69	13,02	11,33	101,69	SI	0,13	0,01	1,00	0,04	0,13	0,45	0,50
4,50	-1,39	13,20	14,58	101,69	SI	0,00	0,00	1,01	0,04	0,00	0,47	0,50
4,50	-1,29	12,81	14,10	101,69	SI	0,00	0,00	0,97	0,04	0,00	0,47	0,50
4,00	-8,58	12,99	21,57	54,10	SI	0,00	0,00	0,98	0,04	0,00	0,47	0,50
3,50	-18,09	12,94	31,03	54,10	SI	0,00	0,00	0,97	0,04	0,00	0,47	0,50
3,00	-24,22	11,60	35,82	54,10	SI	0,00	0,00	0,86	0,04	0,00	0,47	0,50
3,00	-24,41	0,34	24,75	54,10	SI	0,00	0,00	0,68	0,03	0,00	0,46	0,50
2,50	-34,87	0,20	35,07	54,10	SI	0,00	0,00	0,57	0,03	0,00	0,46	0,50
2,00	-51,07	0,45	51,52	54,10	SI	0,00	0,00	0,33	0,01	0,00	0,44	0,50
-10,00	-2,04	0,00	2,04	54,10	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
-9,50	-8,59	-8,59	0,00	54,10	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
-9,00	-45,66	-13,10	32,55	54,10	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
-8,50	2,99	5,33	2,34	54,10	SI	0,25	0,01	0,45	0,02	0,56	0,30	0,50
-8,00	11,09	14,77	3,68	54,10	SI	0,92	0,04	1,23	0,05	0,75	0,27	0,52
-7,50	13,93	19,62	5,69	54,10	SI	1,15	0,05	1,61	0,07	0,71	0,30	0,52
-7,00	19,95	26,78	6,83	54,10	SI	1,63	0,07	2,18	0,10	0,74	0,31	0,53
-6,50	24,68	30,79	6,10	54,10	SI	1,99	0,09	2,49	0,11	0,80	0,30	0,54
-6,50	22,77	28,40	5,63	101,69	SI	1,79	0,08	2,23	0,10	0,80	0,29	0,54
-6,00	25,66	34,76	9,10	101,69	SI	2,00	0,09	2,71	0,12	0,74	0,34	0,54
-6,00	25,66	34,76	9,10	101,69	SI	2,00	0,09	2,71	0,12	0,74	0,34	0,54
-5,50	29,25	42,06	12,81	101,69	SI	2,26	0,10	3,25	0,14	0,70	0,38	0,54
-5,50	29,25	42,06	12,81	101,69	SI	2,26	0,10	3,25	0,14	0,70	0,38	0,54
-5,00	31,34	43,69	12,35	101,69	SI	2,41	0,11	3,35	0,15	0,72	0,38	0,55

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	70

Escursione di tensione dovuta al momento radiale che tende le fibre superiori nel calcestruzzo e nell'acciaio												
-4,50	34,33	48,21	13,88	101,69	SI	2,62	0,12	3,67	0,16	0,71	0,39	0,55
-4,50	33,34	46,81	13,47	101,69	SI	2,53	0,11	3,56	0,16	0,71	0,39	0,55
-4,00	35,54	50,35	14,81	54,10	SI	2,68	0,12	3,80	0,17	0,71	0,40	0,55
-3,50	35,26	55,76	20,50	54,10	SI	2,64	0,12	4,18	0,18	0,63	0,45	0,55
-3,00	39,89	59,57	19,69	54,10	SI	2,97	0,13	4,43	0,20	0,67	0,44	0,56
-3,00	31,41	46,91	15,50	54,10	SI	2,33	0,10	3,48	0,15	0,67	0,40	0,55
-2,50	33,43	50,32	16,89	54,10	SI	2,47	0,11	3,71	0,16	0,66	0,41	0,55
-2,00	35,46	55,01	19,55	54,10	SI	2,60	0,11	4,03	0,18	0,64	0,43	0,55

Tabella 70

Caratteristiche delle sezioni soggette a momento circonferenziale positivo e negativo										
Caratteristiche geometriche della sezione							Il momento tende le fibre inferiori		Il momento tende le fibre superiori	
y	H(M _{inf})	H(M _{sup})	A _{f, inf}	A _{f, sup}	M _{fat min}	M _{fat max}	x _{inf}	J _{inf}	x _{sup}	J _{sup}
[m]	[mm]	[mm]	[mm ² /m]	[mm ² /m]	[kN*m]	[kN*m]	[m]	[mm]	[mm]	[mm ² /m]
-10,00	1850,00	1850,00	3539,53	2654,65	419,99	586,01	357,59	1,24E+11	304,69	9,76E+10
-9,50	1900,00	1900,00	3539,53	2654,65	406,70	489,52	363,44	1,32E+11	309,67	1,04E+11
-9,00	1950,00	1950,00	3539,53	2654,65	256,88	660,95	369,23	1,40E+11	314,58	1,10E+11
-8,50	2000,00	2000,00	3539,53	2654,65	609,79	748,37	374,93	1,48E+11	319,44	1,16E+11
-8,50	2000,00	2000,00	4424,41	3539,53	609,79	748,37	407,43	1,80E+11	358,84	1,50E+11
-7,50	2100,00	2100,00	4424,41	3539,53	1055,43	1384,62	419,88	2,01E+11	369,81	1,67E+11
-7,00	2150,00	2150,00	4424,41	3539,53	1180,46	1503,04	426,00	2,11E+11	375,21	1,76E+11
-6,50	2200,00	2200,00	4424,41	3539,53	1357,60	1690,51	432,05	2,23E+11	380,54	1,85E+11
-6,50	2200,00	2200,00	5899,21	4084,07	1357,60	1690,51	488,54	2,85E+11	394,61	2,12E+11
-6,00	2250,00	2250,00	5899,21	4084,07	1497,14	1936,10	495,44	2,99E+11	400,21	2,22E+11
-6,00	2250,00	2250,00	5899,21	4084,07	1497,14	1936,10	495,44	2,99E+11	400,21	2,22E+11
-5,50	2300,00	2300,00	5899,21	4084,07	1684,18	2204,81	502,26	3,14E+11	405,75	2,33E+11
-5,50	2300,00	2300,00	5899,21	4084,07	1684,18	2204,81	502,26	3,14E+11	405,75	2,33E+11
-5,00	2350,00	2350,00	5899,21	4084,07	1833,44	2413,83	509,01	3,30E+11	411,24	2,45E+11
-4,50	2400,00	2400,00	5899,21	4084,07	2032,09	2713,54	515,69	3,45E+11	416,67	2,56E+11
-4,50	2400,00	2400,00	10618,58	4084,07	2032,09	2713,54	672,48	5,55E+11	378,10	2,63E+11
-4,00	2450,00	2450,00	10618,58	4084,07	2200,15	2952,02	681,36	5,82E+11	383,20	2,75E+11
-3,50	2500,00	2500,00	10618,58	4084,07	2221,86	3393,62	690,15	6,09E+11	388,25	2,88E+11
-3,00	2550,00	2550,00	10618,58	4084,07	3083,83	4249,81	698,85	6,37E+11	393,26	3,00E+11
-3,00	3150,00	2550,00	10618,58	5309,29	3083,83	4249,81	784,70	1,03E+12	451,00	3,77E+11
-2,50	3150,00	2550,00	10618,58	5309,29	4056,37	5680,00	784,70	1,03E+12	451,00	3,77E+11
-2,00	3150,00	2550,00	10618,58	5309,29	4334,21	6046,51	784,70	1,03E+12	451,00	3,77E+11
10,00	1850,00	1850,00	3539,53	2654,65	226,61	324,62	357,59	1,24E+11	304,69	9,76E+10
9,50	1900,00	1900,00	3539,53	2654,65	207,16	283,83	363,44	1,32E+11	309,67	1,04E+11
9,00	1950,00	1950,00	3539,53	2654,65	168,36	442,98	369,23	1,40E+11	314,58	1,10E+11
8,50	2000,00	2000,00	3539,53	2654,65	272,87	505,07	374,93	1,48E+11	319,44	1,16E+11
8,50	2000,00	2000,00	4424,41	3539,53	272,87	505,07	407,43	1,80E+11	358,84	1,50E+11
7,50	2100,00	2100,00	4424,41	3539,53	364,47	622,54	419,88	2,01E+11	369,81	1,67E+11
7,00	2150,00	2150,00	4424,41	3539,53	394,26	694,36	426,00	2,11E+11	375,21	1,76E+11
6,50	2200,00	2200,00	4424,41	3539,53	409,53	770,42	432,05	2,23E+11	380,54	1,85E+11
6,50	2200,00	2200,00	5899,21	4084,07	409,53	770,42	488,54	2,85E+11	394,61	2,12E+11

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	71

Caratteristiche delle sezioni soggette a momento circonferenziale positivo e negativo										
6,00	2250,00	2250,00	5899,21	4084,07	415,33	834,27	495,44	2,99E+11	400,21	2,22E+11
6,00	2250,00	2250,00	5899,21	4084,07	415,33	834,27	495,44	2,99E+11	400,21	2,22E+11
5,50	2300,00	2300,00	5899,21	4084,07	394,19	912,83	502,26	3,14E+11	405,75	2,33E+11
5,50	2300,00	2300,00	5899,21	4084,07	394,19	912,83	502,26	3,14E+11	405,75	2,33E+11
5,00	2350,00	2350,00	5899,21	4084,07	436,88	960,30	509,01	3,30E+11	411,24	2,45E+11
4,50	2400,00	2400,00	5899,21	4084,07	302,76	999,23	515,69	3,45E+11	416,67	2,56E+11
4,50	2400,00	2400,00	10618,58	4084,07	302,76	999,23	672,48	5,55E+11	378,10	2,63E+11
4,00	2450,00	2450,00	10618,58	4084,07	240,30	1060,82	681,36	5,82E+11	383,20	2,75E+11
3,50	2500,00	2500,00	10618,58	4084,07	240,30	1130,79	690,15	6,09E+11	388,25	2,88E+11
3,00	2550,00	2550,00	10618,58	4084,07	139,37	1312,05	698,85	6,37E+11	393,26	3,00E+11
3,00	3150,00	2550,00	10618,58	5309,29	139,37	1312,05	784,70	1,03E+12	451,00	3,77E+11
2,50	3150,00	2550,00	10618,58	5309,29	317,56	1765,66	784,70	1,03E+12	451,00	3,77E+11
2,00	3150,00	2550,00	10618,58	5309,29	-59,64	1822,95	784,70	1,03E+12	451,00	3,77E+11

Tabella 71

Escursione di tensione dovuta al momento circonferenziale che tende le fibre inferiori nel calcestruzzo e nell'acciaio												
y (-) [m]	verifiche nelle barre di acciaio					verifiche nel calcestruzzo						
	$\sigma_{s \text{ inf, min}}$ [Mpa]	$\sigma_{s \text{ inf, max}}$ [Mpa]	$\Delta\sigma_{s \text{ inf, max}}$ [Mpa]	$\Delta\sigma_{Rsk}$ [Mpa]	verificato	$\sigma_{c \text{ inf, min}}$ [Mpa]	$E_{cd, \text{min, equ}}$	$\sigma_{c \text{ inf, max}}$ [Mpa]	$E_{cd, \text{max, equ}}$	R_{equ}	1) < 1	2) > $E_{cd, \text{max, equ}}$
-10,00	71,63	99,94	28,31	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
-9,50	67,40	81,12	13,72	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
-9,00	41,40	106,51	65,12	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
-8,50	95,63	117,37	21,73	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
-8,50	76,83	94,29	17,46	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
-7,50	126,20	165,56	39,36	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
-7,00	137,64	175,25	37,61	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
-6,50	154,45	192,33	37,87	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
-6,50	116,73	145,35	28,62	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
-6,00	125,67	162,52	36,85	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
-6,00	125,67	162,52	36,85	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
-5,50	138,09	180,78	42,69	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
-5,50	138,09	180,78	42,69	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
-5,00	146,92	193,42	46,51	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
-4,50	159,22	212,61	53,39	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
-4,50	90,45	120,78	30,33	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
-4,00	95,79	128,53	32,74	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
-3,50	94,67	144,59	49,93	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
-3,00	128,64	177,28	48,64	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
-3,00	102,39	141,10	38,71	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
-2,50	134,68	188,59	53,91	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
-2,00	143,90	200,76	56,85	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
10,00	38,65	55,36	16,72	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
9,50	34,33	47,04	12,71	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
9,00	27,13	71,39	44,26	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
8,50	42,79	79,21	36,42	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
8,50	34,38	63,64	29,26	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	72

Escursione di tensione dovuta al momento circonferenziale che tende le fibre inferiori nel calcestruzzo e nell'acciaio												
7,50	43,58	74,44	30,86	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
7,00	45,97	80,96	34,99	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
6,50	46,59	87,65	41,06	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
6,50	35,21	66,24	31,03	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
6,00	34,86	70,03	35,17	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
6,00	34,86	70,03	35,17	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
5,50	32,32	74,84	42,52	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
5,50	32,32	74,84	42,52	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
5,00	35,01	76,95	41,94	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
4,50	23,72	78,29	54,57	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
4,50	13,48	44,48	31,00	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
4,00	10,46	46,19	35,72	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
3,50	10,24	48,18	37,94	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
3,00	5,81	54,73	48,92	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
3,00	4,63	43,56	38,94	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
2,50	10,54	58,62	48,08	101,69	SI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50
2,00	-0,88	60,53	61,41	101,69	SI	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,50

Tabella 72

Escursione di tensione dovuta al momento circonferenziale che tende le fibre superiori nel calcestruzzo e nell'acciaio													
y (-)	verifiche nelle barre di acciaio					verifiche nel calcestruzzo							
	σ_s sup, min	σ_s sup, max	$\Delta\sigma_s$ sup, max	$\Delta\sigma_{Rsk}$	verificato	σ_c sup, min	$E_{cd,min, equ}$	σ_c sup, max	$E_{cd,max, equ}$	R_{equ}	1) < 1	2) > $E_{cd,max, equ}$	
[m]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]		[Mpa]		[Mpa]					
-10,00	14,08	19,64	5,56	101,69	SI	1,21	0,05	1,69	0,07	0,72	0,30	0,52	
-9,50	13,12	15,79	2,67	101,69	SI	1,12	0,05	1,35	0,06	0,83	0,24	0,52	
-9,00	7,98	20,53	12,55	101,69	SI	0,68	0,03	1,75	0,08	0,39	0,41	0,51	
-8,50	18,26	22,40	4,15	101,69	SI	1,55	0,07	1,90	0,08	0,81	0,27	0,53	
-8,50	16,63	20,41	3,78	101,69	SI	1,38	0,06	1,69	0,07	0,81	0,26	0,53	
-7,50	26,81	35,17	8,36	101,69	SI	2,21	0,10	2,90	0,13	0,76	0,34	0,54	
-7,00	28,97	36,88	7,92	101,69	SI	2,38	0,11	3,03	0,13	0,79	0,33	0,55	
-6,50	32,21	40,11	7,90	101,69	SI	2,64	0,12	3,28	0,15	0,80	0,34	0,55	
-6,50	29,23	36,40	7,17	101,69	SI	2,33	0,10	2,90	0,13	0,80	0,32	0,55	
-6,00	31,18	40,32	9,14	101,69	SI	2,48	0,11	3,21	0,14	0,77	0,35	0,55	
-6,00	31,18	40,32	9,14	101,69	SI	2,48	0,11	3,21	0,14	0,77	0,35	0,55	
-5,50	33,95	44,44	10,49	101,69	SI	2,69	0,12	3,52	0,16	0,76	0,36	0,55	
-5,50	33,95	44,44	10,49	101,69	SI	2,69	0,12	3,52	0,16	0,76	0,36	0,55	
-5,00	35,79	47,12	11,33	101,69	SI	2,83	0,13	3,73	0,16	0,76	0,38	0,56	
-4,50	38,45	51,34	12,89	101,69	SI	3,03	0,13	4,05	0,18	0,75	0,39	0,56	
-4,50	32,53	43,44	10,91	101,69	SI	2,46	0,11	3,29	0,15	0,75	0,36	0,55	
-4,00	34,11	45,77	11,66	101,69	SI	2,58	0,11	3,46	0,15	0,75	0,37	0,55	
-3,50	33,39	51,00	17,61	101,69	SI	2,52	0,11	3,85	0,17	0,65	0,42	0,55	
-3,00	44,95	61,94	16,99	101,69	SI	3,38	0,15	4,66	0,21	0,73	0,43	0,57	
-3,00	31,57	43,51	11,94	101,69	SI	2,34	0,10	3,23	0,14	0,73	0,37	0,55	
-2,50	41,53	58,15	16,62	101,69	SI	3,08	0,14	4,32	0,19	0,71	0,42	0,56	
-2,00	44,37	61,91	17,53	101,69	SI	3,29	0,15	4,60	0,20	0,72	0,43	0,57	
10,00	7,60	10,88	3,29	101,69	SI	0,65	0,03	0,93	0,04	0,70	0,28	0,51	

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	73

Escursione di tensione dovuta al momento circonferenziale che tende le fibre superiori nel calcestruzzo e nell'acciaio												
9,50	6,68	9,15	2,47	101,69	SI	0,57	0,03	0,78	0,03	0,73	0,26	0,51
9,00	5,23	13,76	8,53	101,69	SI	0,44	0,02	1,17	0,05	0,38	0,39	0,51
8,50	8,17	15,12	6,95	101,69	SI	0,69	0,03	1,28	0,06	0,54	0,35	0,51
8,50	7,44	13,78	6,33	101,69	SI	0,62	0,03	1,14	0,05	0,54	0,34	0,51
7,50	9,26	15,81	6,55	101,69	SI	0,76	0,03	1,30	0,06	0,59	0,33	0,52
7,00	9,67	17,04	7,36	101,69	SI	0,79	0,04	1,40	0,06	0,57	0,34	0,52
6,50	9,72	18,28	8,56	101,69	SI	0,80	0,04	1,50	0,07	0,53	0,36	0,52
6,50	8,82	16,59	7,77	101,69	SI	0,70	0,03	1,32	0,06	0,53	0,35	0,51
6,00	8,65	17,37	8,72	101,69	SI	0,69	0,03	1,38	0,06	0,50	0,37	0,51
6,00	8,65	17,37	8,72	101,69	SI	0,69	0,03	1,38	0,06	0,50	0,37	0,51
5,50	7,95	18,40	10,45	101,69	SI	0,63	0,03	1,46	0,06	0,43	0,39	0,51
5,50	7,95	18,40	10,45	101,69	SI	0,63	0,03	1,46	0,06	0,43	0,39	0,51
5,00	8,53	18,75	10,22	101,69	SI	0,67	0,03	1,48	0,07	0,45	0,38	0,51
4,50	5,73	18,91	13,18	101,69	SI	0,45	0,02	1,49	0,07	0,30	0,42	0,51
4,50	4,85	15,99	11,15	101,69	SI	0,37	0,02	1,21	0,05	0,30	0,41	0,51
4,00	3,73	16,45	12,72	101,69	SI	0,28	0,01	1,24	0,05	0,23	0,43	0,51
3,50	3,61	16,99	13,38	101,69	SI	0,27	0,01	1,28	0,06	0,21	0,44	0,51
3,00	2,03	19,12	17,09	101,69	SI	0,15	0,01	1,44	0,06	0,11	0,47	0,50
3,00	1,43	13,43	12,01	101,69	SI	0,11	0,00	1,00	0,04	0,11	0,45	0,50
2,50	3,25	18,08	14,83	101,69	SI	0,24	0,01	1,34	0,06	0,18	0,45	0,50
2,00	-4,79	18,66	23,45	101,69	SI	0,00	0,00	1,39	0,06	0,00	0,49	0,50

Tabella 73

L'escursione di tensione nell'acciaio ($\Delta\sigma_s$) risulta sempre minore alla escursione di tensione massima consentita, così come le espressioni (1) e (2) per la verifica dell'escursione di tensione nel calcestruzzo risultano sempre verificate. La fondazione risulta pertanto verificata in ogni sua sezione.

8.6. VERIFICA A PUNZONAMENTO

Le verifiche a punzonamento nei riguardi della fondazione sono state eseguite, nei confronti dell'azione dovuta alla torre e dell'azione dovuta ai pali, con le modalità disposte dall'Eurocodice 2 per le verifiche relative ad elementi che non sono dotati di armature specifiche.

Il procedimento consiste nel confrontare il valore unitario dell'azione a taglio-punzonamento (v_{Ed}) che si esplica lungo il perimetro dell'area caricata u_0 , con l'azione a taglio-punzonamento ($v_{Rd,max}$) massima resistente dell'elemento lungo tale perimetro.

Si dovrà confrontare inoltre il valore unitario dell'azione a taglio-punzonamento (v_{Ed}) che si esplica lungo il perimetro di verifica u , con l'azione a taglio-punzonamento ($v_{Rd,c}$) massima resistente dell'elemento lungo la sezione di verifica considerata.

8.6.1. Verifica a punzonamento della torre

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	74

Il perimetro di verifica u è quello relativo alla distanza r_{cont} dal centro della torre, determinata secondo quanto previsto dall'EC2 per piastre con pilastri muniti di capitello circolare per i quali $l_H < 2h_H$ (vedasi fig. 6.17 EC2).

L'azione agente di progetto posta a base del calcolo è quella relativa alla combinazione che genera il momento massimo all'interfaccia tra la torre e la fondazione, dedotta dall'analisi delle combinazioni utilizzate per i carichi applicati nelle verifiche locali.

Parametri della flangia superiore dell'ancor cage		
L	0,650	larghezza flangia
R_{mFS}	2,000 m	raggio medio della flangia inferiore torre
R_{iFS}	1,675 m	raggio interno della flangia inferiore torre
R_{eFS}	2,325 m	raggio esterno della flangia inferiore torre
Caratteristiche calcestruzzo		
f_{ck}	45,00 MPa	resistenza caratteristica cls fondazione
f_{cd}	25,50 MPa	resistenza di progetto cls fondazione

Tabella 74

Caratteristiche dimensionali della sezione di riferimento		
c	4,450 m	Diametro esterno flangia ancor cage
l_H	0,675 m	distanza tra raggio esterno ancor cage e colletto
h_H	0,690 m	altezza colletto
d	2,330 m	altezza utile della suola
r_{cont}	7,56 m	EC2 eq. 6.33
e	22,30 m	eccentricità del carico $e=Mr/Fz$

Tabella 75

Caratteristiche armatura		
r_{cont}	7,940 m	raggio del perimetro di rottura
A_{slr}	44,50 cm ² /m	Area di armatura radiale inferiore al metro
hr	2,05 m	altezza netta sezione al perimetro di rottura
ρ_r	0,002 < 0,02	$A_{sl} / b_w d$ considerando un a base b_w pari a 1m
A_{slc}	44,24 cm ² /m	Area armatura circonferenziale inferiore al metro
hc	2,05 m	altezza netta sezione al perimetro di rottura
ρ_c	0,002 < 0,02	$A_{sl} / b_w d$ considerando un a base b_w pari a 1m

Tabella 76

Coefficienti per la verifica a punzonamento per elementi che non presentano specifiche armature		
$C_{Rd,c}$	0,12	$0,18 / \gamma_c$
k	$1,28 < 2$	$1 + \sqrt{200/d}$ rispetto a d altezza utile minore tra dir x e dir y
k_1	0,10	
σ_{cp}	0,00 Mpa	N_{ed} / A_c

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	75

Coefficients per la verifica a punzonamento per elementi che non presentano specifiche armature		
ρ_l	0,002 < 0,02	radq($\rho_x \rho_y$)
v_{min} (C32/40)	0,34 MPa	$0,035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2}$
β	3,63	EC2 eq. 6.42 pilastro circolare interno
v	0,49	0,6 (1- f_{ck} /250)
dati della verifica		
u_0	14,61 m	Perimetro dell'area caricata
u_1	49,89 m	Perimetro di verifica alla distanza di verifica (r_{cont})
V_{ed}	8711,33 KN	Azione Tagliante applicata
M_{ed}	176571,11 KN m	Momento applicato
e	20,27 m	eccentricità
Azioni agenti		
$v_{Ed}(u_0)$	0,88 Mpa	al perimetro dell'area caricata ($v_{ed} = \beta V_{ed} / u_0 d_u$)
$v_{Ed}(u_1)$	0,257 Mpa	al perimetro di verifica ($v_{ed} = \beta V_{ed} / u_1 d_u$)

Tabella 77

Verifica		
$v_{Ed}(u_0) = 0,88 < v_{Rd,max} = 6,27$ MPa	resistenza a punzonamento massima in adiacenza all'area caricata $v_{Rd,max} = 0,5 v f_{cd}$	VERIFICA
$v_{Ed}(u_1) = 0,26 < v_{Rd,c} = 0,34$ MPa	resistenza a punzonamento relativa all'altezza utile della fondazione priva d'armatura specifica lungo il perimetro di controllo $v_{Rd,c} = C_{Rd,c} k (100 \square_1 f_{ck})^{1/3}$	VERIFICA

Tabella 78

Il valore unitario dell'azione a taglio-punzonamento (v_{Ed}) è inferiore all'azione a taglio-punzonamento (v_{Rd}) massima resistente dell'elemento lungo la sezione di verifica considerata. La verifica risulta soddisfatta.

8.6.2. Verifica a punzonamento dei pali

Per la verifica a punzonamento dei pali, l'altezza utile (d) della piastra considerata è l'altezza minima della fondazione in corrispondenza dei pali stessi, mentre il perimetro di verifica u_1 è quello relativo alla distanza $2d$ dal bordo esterno del palo, a cui è stata sottratta la porzione d'angolo e la zona consigliata dall'EC2.

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	76

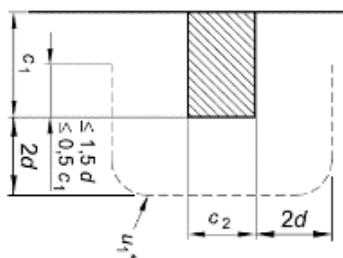


Figura 20

L'azione agente di progetto posta a base del calcolo è l'azione massima di compressione agente in testa ai pali della fondazione, dedotta dei tabulati di calcolo con l'ausilio di software per la gestione informatizzata dei dati.

Palo maggiormente sollecitato in testa	Palo 17
Combinazione	comb.12
Sollecitazioni agenti	
M_{ed} (KN m)	0,0 KN m
N_{ed} (KN)	2.922,59 KN

Tabella 79

Verifica a punzonamento del solo calcestruzzo armato			
Caratteristiche dimensionali della sezione di riferimento			
R_p	0,50	m	raggio del palo
d_u	1,85	m	Altezza media della suola di fondazione al perimetro di rottura
Caratteristiche calcestruzzo			
f_{ck}	45,00	MPa	resistenza di caratteristica fondazione
f_{cd}	25,50	MPa	resistenza di progetto fondazione
Caratteristiche armatura			
r_{rot}	4,200	m	raggio del perimetro di rottura
r_{rot}	4,800	m	raggio della fondazione al perimetro di rottura
A_{slr}	71,20	cm ² /m	area di armatura radiale superiore al metro
h_r	2,350		altezza netta sezione al perimetro di rottura
ρ_r	0,003	< 0,02	$A_{sl} / b_w d$ considerando un a base b_w pari a 1m
ϕ_c	26	mm	diametro barre armatura circonferenziale superiore
A_{slc}	40,84	cm ² /m	area armatura circonferenziale superiore al metro
h_c	2,350		altezza netta sezione al perimetro di rottura
ρ_c	0,002	< 0,02	$A_{sl} / b_w d$ considerando un a base b_w pari a 1m
Coefficienti per la verifica a punzonamento per elementi che non presentano specifiche armature			
$C_{Rd,c}$	0,12	$0,18 / \gamma_c$	
k	1,33	< 2	$1 + \sqrt{200/d}$ rispetto a d altezza utile minore tra dir x e dir y
k_1	0,10		
σ_{cp}	0,00	MPa	N_{ed} / A_c
ρ_l	0,002	< 0,02	$\text{rad}q(\rho_x \rho_y)$

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	77

v_{min}	0,36 MPa	$0,035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2}$
-----------	----------	------------------------------

Tabella 80

Dati della verifica		
u_0	3,14 m	Perimetro dell'area caricata
u_1	26,39 m	Perimetro di verifica alla distanza 2d
u_1^*	11,20 m	Perimetro di verifica (depurata della zona perimetrale)
β	2,36	(EC2 eq. 6.44 pilastro angolo con eccentricità verso l'interno della piastra)
V_{ed}	2922,59 KN	Azione Tagliante applicata
v	0,49	0,6 (1-fck/250)
$v_{Ed}(u_0)$	1,18 Mpa	al perimetro dell'area caricata ($v_{ed} = \beta V_{ed} / u_0 d_u$)
$v_{Ed}(u_1^*)$	0,33 Mpa	al perimetro di verifica ($v_{ed} = \beta V_{ed} / u_1^* d_u$)

Tabella 81

Verifica a punzonamento		
$v_{Ed}(u_0) = 1,18 < v_{Rd,max} = 6,27$ MPa	Resistenza a punzonamento massima in adiacenza all'area caricata $v_{Rd,max} = 0,5 v f_{ed}$	VERIFICA
$v_{Ed}(u_1) = 0,33 < v_{Rd,c} = 0,36$ Mpa	Resistenza a punzonamento della porzione di fondazione relativa all'altezza utile tra la testa del palo e la faccia superiore della fondazione priva d'armatura specifica lungo il perimetro di controllo $v_{Rd,c} = C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3}$	VERIFICA

Tabella 82

Il valore unitario dell'azione a taglio-punzonamento (v_{Ed}) è inferiore all'azione a taglio-punzonamento (v_{Rd}) massima resistente dell'elemento lungo la sezione di verifica considerata. La verifica risulta soddisfatta.

8.7. VERIFICA PALI DI FONDAZIONE

Le verifiche strutturali complete relative agli SLU es agli SLE dei pali di fondazione sono state eseguite con il software di calcolo dell'Aztec Informatica, API++14 licenza n° A101280VT, e sono allegate nel fascicolo dei calcoli a cui si rimanda per ogni ulteriore approfondimento.

Purtuttavia, nel proseguo del presente paragrafo, è stato condotto una ulteriore verifica del palo maggiormente sollecitato al fine di confermare i risultati ottenuti con il software.

Le azioni agenti di progetto, poste a base del calcolo sono dedotte dei tabulati di calcolo con l'ausilio di software per la gestione informatizzata dei dati. Tali analisi hanno permesso di determinare il palo maggiormente sollecitato.

In particolare, si sono ottenuti i seguenti dati di input per le verifiche:

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	78

- Palo soggetto allo sforzo normale minimo: Palo n°1

Nr. palo	Y(m)	M(KNm)	T(KN)	N(KN)
1	0,0	0,0	60,18	-464,01

- Palo soggetto allo sforzo normale massimo: Palo n°14

Nr. palo	Y(m)	M(KNm)	T(KN)	N(KN)
14	0,0	0,0	60,18	2922,59

- Palo soggetto al momento massimo: Palo n°20

Nr. palo	Y(m)	M(KNm)	T(KN)	N(KN)
20	3,2	101,08	-1,00	1564,05

L'elemento strutturale sarà soggetto ad una combinazione di sforzo normale e momento che individuerà un punto di sollecitazione che confrontato con il dominio di rottura della sezione permetterà di affermare se la sezione risulta verificata.

Il Dominio di rottura della sezione viene determinato dopo aver calcolato la curvatura che, in condizioni di deformazione limite del calcestruzzo o dell'acciaio, soddisfa l'equilibrio alla traslazione.

Titolo: []

Sezione circolare cava

Raggio esterno: 50 [cm]

Raggio interno: 0 [cm]

N° barre uguali: 28

Diametro barre: 2,2 [cm]

Copriferro (baric.): 7,3 [cm]

N° barre: 0 Zoom

Tipo Sezione

Rettan.re Trapezi

a T Circolare

Rettangoli Coord.

DXF

Sollecitazioni

S.L.U. Metodo n

N_{Ed}: 0 kN

M_{Ed}: 0 kNm

M_{yEd}: 0

P.to applicazione N

Centro Baricentro cls

Coord.[cm] xN: 0 yN: 0

Tipo rottura

Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

M_{xRd}: 1.513 kNm

Materiali

B450C C25/30

ε_{su}: 67,5 ‰ ε_{c2}: 2 ‰

f_{yd}: 391,3 N/mm² ε_{cu}: 3,5 ‰

E_s: 200.000 N/mm² f_{cd}: 14,17

ε_s/E_c: 15 f_{cc}/f_{cd}: 0,8

ε_{syd}: 1,957 ‰ σ_{c,adm}: 9,75

σ_{s,adm}: 255 N/mm² τ_{co}: 0,6

τ_{c1}: 1,829

σ_c: -14,17 N/mm²

σ_s: 391,3 N/mm²

ε_c: 3,5 ‰

ε_s: 9,163 ‰

d: 92,7 cm

x: 25,62 x/d: 0,2764

δ: 0,7855

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

L₀: 0 cm Col. modello

M-curvatura

Precompresso

Figura 20

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	79

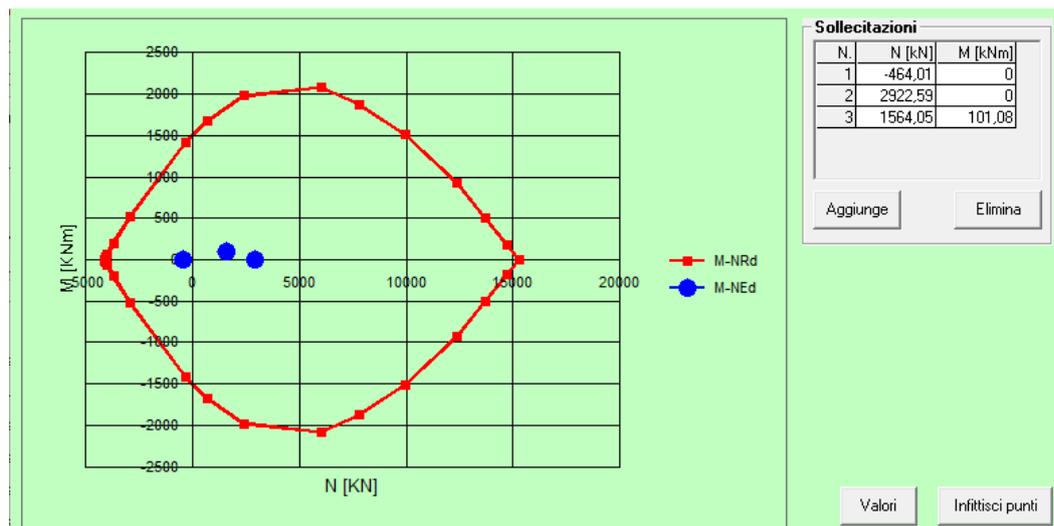


Figura 21

I punti individuati sono tutti interni al dominio di rottura della sezione, pertanto la sezione risulta verificata.

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	80

9. GIUDIZIO MOTIVATO DI ACCETTABILITA'

Le verifiche strutturali sul plinto di fondazione sono state eseguite introducendo nel modello FEM la geometria e le condizioni al contorno del modello, le azioni sollecitanti e le loro combinazioni ed estrapolando in output le sollecitazioni che agiscono al fine di procedere alle verifiche manuali.

Pertanto, non sarebbe necessario sottoporre i risultati ad elaborazioni e controlli che ne comprovino l'attendibilità. In ogni caso si procederà ad incrociare alcuni dati dall'analisi con metodi di calcolo paralleli e speditivi al fine effettuare un controllo di massima sul lavoro effettuato.

9.1. DETERMINAZIONE DELLE SOLLECITAZIONI RESISTENTI

Al fine di validare le modalità di calcolo del momento resistente ultimo della fondazione si confronteranno i valori calcolati con il foglio elettronico e i valori calcolati con l'ausilio del software VCASLU rilasciata dal Prof. Piero Gelfi in distribuzione gratuita.

Estrapoliamo da quanto riportato nelle precedenti tabelle di calcolo relativamente alla sezione in cui la suola di fondazione si innesta nel colletto: posta a una ordinata di 3,00m, altezza pari a 2,55m, area di ferro superiore pari a 128,00 cm²/m ed inferiore pari a 170,67 cm²/m. Ciò porta a calcolare un momento ultimo resistente pari a 16.027 KN m. Mentre calcolando il momento ultimo resistente della sezione con l'ausilio del software otteniamo i seguenti risultati:

The screenshot shows the software interface for structural verification. It includes a menu bar, a title bar, and several data input and output sections.

N°	b [cm]	h [cm]	N°	As [cm²]	d [cm]
1	100	255	1	128	8
			2	170,67	247

Sollecitazioni

S.L.U. Metodo n

N_{Ed} 0 kN
M_{xEd} 0 kNm
M_{yEd} 0

Materiali

B450C C45/55

E_{su} 67,5 ‰ E_{c2} 2 ‰
f_{yd} 391,3 N/mm² E_{cu} 3,5 ‰
E_s 200.000 N/mm² f_{cd} 25,5 ‰
E_s/E_c 15 f_{cc}/f_{cd} 0,8
E_{syd} 1,957 ‰ σ_{c,adm} 16
σ_{s,adm} 255 N/mm² τ_{co} 0,9333
τ_{c1} 2,543

Tipo rotture

Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

M_{xRd} 16.025 kN m

σ_c -25,5 N/mm²
σ_s 391,3 N/mm²
ε_c 3,5 ‰
ε_s 58,65 ‰
d 247 cm
x 13,91 x/d 0,05631
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. 500
Calcola MRd Dominio M-N
o 0 cm Col. modello
M-curvatura
Precompresso

Figura 22

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	81

Il momento calcolato pari a 16.025 KN m conferma il calcolo del momento eseguito manualmente con l'ausilio del foglio di calcolo riportato nella relazione. Pertanto, risultano confermate le modalità di determinazione del momento ultimo utilizzate nei fogli di calcolo.

9.2. ANALISI TRASMISSIONE DEGLI SFORZI NEL MODELLO FEM

Al fine di validare la corretta distribuzione delle azioni applicate in prossimità dei 24 punti del modello FEM della fondazione e che effettivamente queste sollecitazioni percorrano il modello inputato fino a distribuirsi esclusivamente sui pali, si procede con la valutazione speditiva delle sollecitazioni sui pali mediante un modello elastico in cui i pali sono collegati rigidamente al centro di sollecitazione della fondazione ove sono applicate le risultanti provenienti dalla torre. Si confronteranno quindi i valori ottenuti con quelli di output del modello FEM.

Calcolo pesi fondazione:

Dati geometrici			
R	10,00	m	Raggio della base del plinto
r	3,00	m	Raggio del colletto del plinto
H	1,85	m	Altezza della parte esterna del plinto
Hp	2,55	m	Altezza del plinto in corrispondenza del colletto dalla parte esterna
Hc	3,15	m	Altezza del plinto in corrispondenza del colletto dalla parte interna
Hcft	0,35	m	Altezza del colletto fuori terra
Dati dei pesi propri dei materiali			
γ_{ca}	25	kN/m ³	Peso specifico c.a.
γ_t	19	kN/m ³	Peso specifico terreno
Dati caratteristici fondazione			
V _p	700,05	m ³	Volume del plinto
W _p	17.501,29	KN	Peso del plinto
V _r	189,49	m ³	Volume del ricoprimento plinto
W _r	3.600,32	KN	Peso del ricoprimento del plinto

Tabella 83

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	82

Azioni per la combinazione considerata (amplificate):

	Azione massima trasmessa dalla torre (SLU + PP WTG)	Peso proprio fondazione	Peso ricoprimento
Fris (KN m)	1.548,89	0,00	0,00
Mr t (KN m)	176.571,11	0,00	0,00
Fz (KN)	-8.660,89	22.751,68	5.400,48

Tabella 84

Tali azioni verranno distribuite sui pali utilizzando i seguenti parametri caratteristici:

n	26	n° parti
R	9	m
$\Delta\alpha$	13,85	°
C	56,55	m
ΔC	2,17	m

Combinazione SLU NTC Vento							
i	α	x_i	y_i	$P_{Mris,i}$	P_{Fz}	P_{Wt}	P_{Ris}
1	0,00	9,00	0,00	1.509,15	-333,11	-1.082,78	93,27
2	13,85	8,74	2,15	1.465,30	-333,11	-1.082,78	49,42
3	27,69	7,97	4,18	1.336,29	-333,11	-1.082,78	-79,60
4	41,54	6,74	5,97	1.129,62	-333,11	-1.082,78	-286,27
5	55,38	5,11	7,41	857,30	-333,11	-1.082,78	-558,59
6	69,23	3,19	8,42	535,15	-333,11	-1.082,78	-880,73
7	83,08	1,08	8,93	181,91	-333,11	-1.082,78	-1.233,98
8	96,92	-1,08	8,93	-181,91	-333,11	-1.082,78	-1.597,79
9	110,77	-3,19	8,42	-535,15	-333,11	-1.082,78	-1.951,04
10	124,62	-5,11	7,41	-857,30	-333,11	-1.082,78	-2.273,18
11	138,46	-6,74	5,97	-1.129,62	-333,11	-1.082,78	-2.545,50
12	152,31	-7,97	4,18	-1.336,29	-333,11	-1.082,78	-2.752,18
13	166,15	-8,74	2,15	-1.465,30	-333,11	-1.082,78	-2.881,19
14	180,00	-9,00	0,00	-1.509,15	-333,11	-1.082,78	-2.925,04
15	193,85	-8,74	-2,15	-1.465,30	-333,11	-1.082,78	-2.881,19
16	207,69	-7,97	-4,18	-1.336,29	-333,11	-1.082,78	-2.752,18
17	221,54	-6,74	-5,97	-1.129,62	-333,11	-1.082,78	-2.545,50
18	235,38	-5,11	-7,41	-857,30	-333,11	-1.082,78	-2.273,18
19	249,23	-3,19	-8,42	-535,15	-333,11	-1.082,78	-1.951,04
20	263,08	-1,08	-8,93	-181,91	-333,11	-1.082,78	-1.597,79
21	276,92	1,08	-8,93	181,91	-333,11	-1.082,78	-1.233,98
22	290,77	3,19	-8,42	535,15	-333,11	-1.082,78	-880,73

Tabella 85

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
BOF-PD-R0006_R0	REALIZZAZIONE PARCO EOLICO "BORGO FAZIO" RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DELLE STRUTTURE	83

Tale distribuzione di forze può essere rappresentata nel seguente grafico:

Possiamo a questo punto estrapolare dai tabulati di calcolo le azioni che agiscono in testa ai pali nella combinazione 12 del modello T06nd, al fine di effettuare il confronto. Le azioni possono essere riassunte nel seguente grafico.

I risultati ottenuti sono perfettamente confrontabili, pertanto risultano confermate le modellazioni effettuate e la trasmissione degli sforzi nel modello FEM.