



WIND FARM APRICENA "PALOMBINO"

RELAZIONE CALCOLO PRELIMINARE

STRUTTURA FONDAZIONE AEROGENERATORE

Comune di Apricena (FG)

Gennaio 2022

Version: REV01



edp renewables

EDP Renewables Italia Holding S.r.l.

Via Lepetit 8/10

20124 - Milano



SC Studio di Ingegneria
Michele R.G. Curtotti

Ing. Michele Curtotti

Viale 2 Giugno n. 385

San Severo (FG)

Tel. 339/8220246

ing.curtotti@pec.it

**CALCOLO PRELIMINARE
DELLA FONDAZIONE AEROGENERATORE**

COMUNE DI APRICENA
(Prov. di Foggia)

RELAZIONE PRELIMINARE DI CALCOLO

**Torre eolica da 115.00 mt
a sostegno di aerogeneratore da 6000 kW
a 3 pale con diametro di 170 mt**

**“Parco Eolico PALOMBINO”
- Località Mezzana della Quercia – Mandra Murata -**

CALCOLO PRELIMINARE
DELLA FONDAZIONE AEROGENERATORE

Indice

Indice	2
Premessa	3
Descrizione delle opere	4
Dati di progetto	5
Normativa di riferimento	5
Metodologie di calcolo	7
Sistema di riferimento	7
Convenzioni	8
Materiali utilizzati	8
Caratteristiche geotecniche del terreno di fondazione	9
Azioni di progetto	12
Carichi permanenti.....	13
Carichi variabili	17
Azione del vento	17
Azione sismica.....	24
Verifiche strutturali	27
Resistenze di calcolo	27
Verifiche strutturali sul plinto di fondazione	27
Combinazione delle azioni	28
Calcolo azioni sui pali	28
Verifiche agli SLU	30
Verifiche agli SLE.....	32
Verifiche sui Pali.....	33
Calcolo Portata del singolo Palo.....	33
Stima dei cedimenti.....	34
Conclusioni	34

CALCOLO PRELIMINARE
DELLA FONDAZIONE AEROGENERATORE

RELAZIONE DI CALCOLO

Premessa

In quanto segue si riportano i calcoli di verifica della torre a sostegno di un aerogeneratore eolico da 6000 kW, di altezza al mozzo pari a 115.00 mt, diametro del rotore di 170 mt, su fondazione isolata a plinto circolare.

Sarà verificata di seguito la struttura metallica della torre ed il plinto di fondazione.

CALCOLO PRELIMINARE
DELLA FONDAZIONE AEROGENERATORE

Descrizione delle opere

In via preliminare, per gli aerogeneratori di che trattasi sono da distinguere le seguenti parti costitutive

1. Pali di fondazione (n° 16) di diametro $\phi = 1,20$ m, L = 30,00 m;
2. Plinto a base circolare (D=23,40 mt.) con funzione di piastra di collegamento dei pali di fondazione;
3. Virola di fondazione, ovvero un anello metallico costituente il collegamento fra il plinto di fondazione e la torre, immorsata in un cilindro di cls (D=6,0 mt.) gettato in opera con il plinto di fondazione;
4. Torre: torre metallica costituita da 5 parti da assemblare in opera, di lunghezza complessiva pari a 115,000 m, tronco conica.
5. Navicella: guscio metallico per l'alloggio delle apparecchiature meccaniche ed elettriche di produzione;
6. Rotore: a tre pale del diametro di 170,000 mt.

CALCOLO PRELIMINARE
DELLA FONDAZIONE AEROGENERATORE

Dati di progetto

Normativa di riferimento:

1. Legge n. 1086 del 5/11/1971 "*Norme per la disciplina delle opere di conglomerato cementizio armato, normale e precompresso ed a struttura metallica*".
2. Legge n. 64 del 02/02/1974 "*Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche*".
3. D. M. Infrastrutture Trasporti 14 gennaio 2008 "*Norme tecniche per le Costruzioni*".
4. Circolare 2 febbraio 2009 n. 617 del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti "*Istruzioni per l'applicazione delle 'Norme Tecniche delle Costruzioni' di cui al D.M. 14 gennaio 2008*".
5. D.M. 17/01/2018 "*Aggiornamento Norme tecniche per le costruzioni*".

NORME INTERNAZIONALI

1. IEC 61400-1, 2° edition, February 1999, Wind turbine generator system – Part1: Safety requirements UNI 9858 "*Concrete. Performance, production, placing and compliance criteria*".
2. UNI ENV 1992-1-1 del 31-01-1993 Eurocodice 2. Progettazione delle strutture di calcestruzzo.
3. UNI EN 1992-1-1:2005 Parte 1-1: "*Regole generali per gli edifici*".

CALCOLO PRELIMINARE
DELLA FONDAZIONE AEROGENERATORE

Per quanto non specificatamente previsto dalla normativa nazionale vigente in tema di sistemi eolici, per azioni, coefficienti di sicurezza parziali sulle azioni, combinazioni di carico e verifiche da considerarsi per le opere di fondazione si fa riferimento a quanto indicato in:

6. DIBt: *"Richtlinie für Windenergieanlagen. Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründungen"*.

CALCOLO PRELIMINARE
DELLA FONDAZIONE AEROGENERATORE**Metodologie di calcolo**

Le sollecitazioni sono state ottenute con lo schema di vincolo di mensola incastrata al suolo soggetta a carichi variabili lungo l'altezza.

Le verifiche saranno condotte con il metodo degli Stati Limite così come formalizzato nel D.M. 17.01.2018, capitolo 6.4 "Opere di Fondazione".

Sistema di riferimento

Il sistema di riferimento utilizzato nelle calcolazioni che seguono è quello in figura 1. Con origine alla quota della sommità del colletto in calcestruzzo del plinto di fondazione.

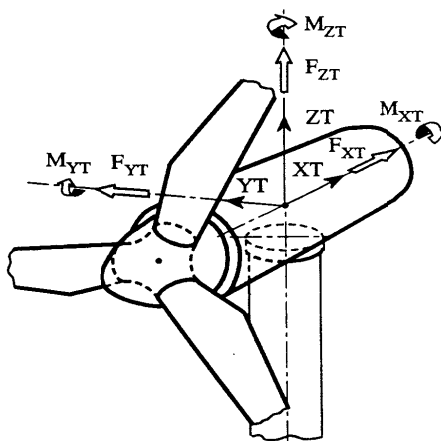


Fig.1 – Assi di riferimento

CALCOLO PRELIMINARE
DELLA FONDAZIONE AEROGENERATORE**Convenzioni**

Le forze ed i momenti si considerano positivi se i relativi vettori rappresentativi sono concordi con gli assi di riferimento di cui al punto precedente.

Materiali utilizzati

Acciaio per virola:	Fe510	$f_{yt} = 510 \text{ MPa}$
Acciaio per flange:	Fe510	$f_{yt} = 510 \text{ MPa}$
	Fe510	$f_{yt} = 510 \text{ MPa}$
Bulloni:	Classe 10.9	$f_{yt} = 1000 \text{ MPa}$ $f_{yt} = 900 \text{ MPa}$
Calcestruzzo colletto di fondazione	C50/60	$f_{ck} = 50 \text{ MPa}$
Calcestruzzo dado di fondazione	C45/55	$f_{ck} = 45 \text{ MPa}$
Acciaio per armature	Fe B500S	$f_{yk} \geq 500 \text{ MPa}$

CALCOLO PRELIMINARE
DELLA FONDAZIONE AEROGENERATORE

Caratteristiche geotecniche del terreno di fondazione

Con riferimento ai terreni rilevati in sito (rif. "Relazione Geologica" e "Relazione Geotecnica" redatte dalla Dott. Iervolino allegate), il carico limite sui vari terreni di fondazione caratterizzanti i siti di che trattasi è stato calcolato come segue.

Il carico limite sul terreno in oggetto è stato desunto adottando la trattazione del Terzaghi della pressione limite, dalla quale si può desumere il carico limite mediante lo studio delle caratteristiche del terreno presente in sito. Il calcolo del suddetto carico limite q_{lim} è condotto nella tabella allegata A relativa al terreno di fondazione di tutti gli aerogeneratori in progetto (chiaramente si farà riferimento al caso più sfavorevole) con il seguente significato dei simboli:

$$q_{lim} = N_c \times c \times \zeta_c + N_q \times \gamma \times D \times \zeta_q + N_\gamma \times \gamma \times \frac{B}{2} \times \zeta_\gamma$$

dove:

c	Coeff. di coesione (KPa)
γ	Peso specifico del terreno (kN/m ³)
D	Diametro della fondazione (m)
P	Profondità minima di scavo (m)
N_c, N_q, N_γ	Fattori di capacità portante, funzioni dell'angolo di resistenza al taglio e della forma della superficie di rottura considerata. Vengono desunti da tabelle note in letteratura, quali la tabella 1 che segue.
ζ_c, ζ_q, ζ_γ	Coefficienti di forma della fondazione.

Tabella A

c =	12 kN/m ²	N_c =	22,254414	ζ_c =	1,53
∅ =	26°	N_q =	11,8542	ζ_q =	1,49
γ =	17.74 kN/m ³	N_γ =	10,58789711	ζ_γ =	0.60
D =	23,40 m	(*)			
P =	4.00 m				
tg ∅ =	0,49	q_{lim.}(kN/m²)		2822,88	

CALCOLO PRELIMINARE
DELLA FONDAZIONE AEROGENERATORE

Prendendo a riferimento la Carta Geologica d'Italia 1:100.000 Fogli: n°155 "S. Severo" e n° 156 "S. Marco in Lamis", in stralcio nella figura che segue, l'area di impianto del campo eolico (in nero) è contraddistinta dal diffuso affioramento di depositi alluvionali terrazzati quaternari.

Le alluvioni più recenti del IV ordine di terrazzo (f4), a carattere prevalentemente limoso-argilloso, sono granulometricamente costituite da limi, argille e sabbie, e presentano uno spessore superiore ai 10 m. Mentre le alluvioni del III ordine di terrazzo (f3), a carattere prevalentemente ghiaioso-sabbioso-argilloso, sono dati da sabbie ed argille con intercalati livelli ghiaiosi, e si rinvengono con spessori di qualche metro.

Depositi alluvionali attuali dati da ghiaie, sabbie ed argille, si rinvengono a ridosso delle principali incisioni fluviali, ove sono soggetti a rimobilizzazione periodica ad opera delle acque incanalate.

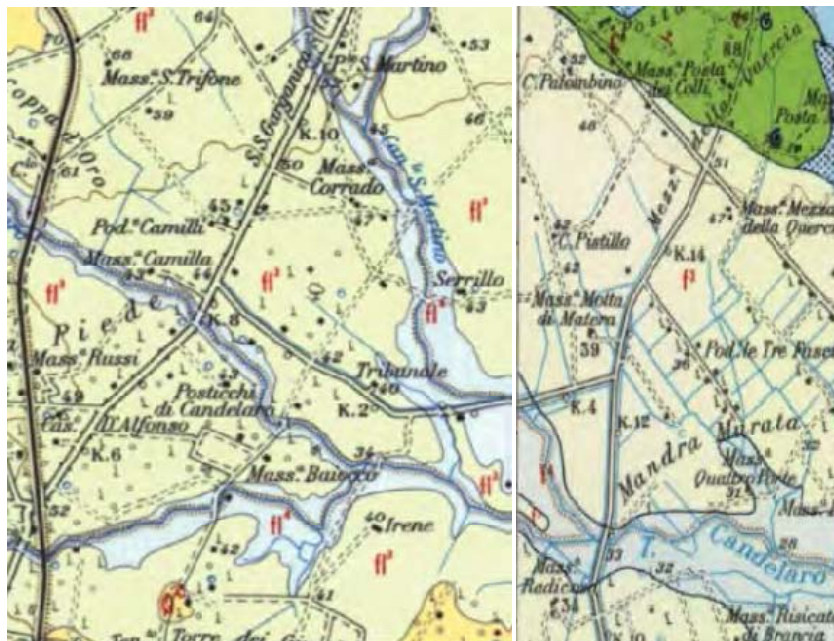


Figura 1 – Stralcio della Carta Geologica d'Italia

CALCOLO PRELIMINARE
DELLA FONDAZIONE AEROGENERATORE

FONDAZIONI

TAB. 4.II. — COEFFICIENTI DI CARICO LIMITE.

φ	N_c	N_q	N_γ	N_{q1}/N_c	$\text{tg } \varphi$
0	5,14	1,00	0,00	0,20	0,00
1	5,38	1,09	0,07	0,20	0,02
2	5,63	1,20	0,15	0,21	0,03
3	5,90	1,31	0,24	0,22	0,05
4	6,19	1,43	0,34	0,23	0,07
5	6,49	1,57	0,45	0,24	0,09
6	6,81	1,72	0,57	0,25	0,11
7	7,16	1,88	0,71	0,26	0,13
8	7,53	2,06	0,86	0,27	0,14
9	7,92	2,25	1,03	0,28	0,16
10	8,35	2,47	1,22	0,30	0,18
11	8,80	2,71	1,44	0,31	0,19
12	9,28	2,97	1,69	0,32	0,21
13	9,81	3,26	1,97	0,33	0,23
14	10,37	3,59	2,29	0,35	0,25
15	10,98	3,94	2,65	0,36	0,27
16	11,63	4,34	3,06	0,37	0,29
17	12,34	4,77	3,53	0,39	0,31
18	13,10	5,26	4,07	0,40	0,32
19	13,93	5,80	4,68	0,42	0,34
20	14,83	6,40	5,39	0,43	0,36
21	15,82	7,07	6,20	0,45	0,38
22	16,88	7,82	7,13	0,46	0,40
23	18,05	8,66	8,20	0,48	0,42
24	19,32	9,60	9,44	0,50	0,45
25	20,72	10,66	10,88	0,51	0,47
26	22,25	11,85	12,54	0,53	0,49
27	23,94	13,20	14,47	0,55	0,51
28	25,80	14,72	16,72	0,57	0,53
29	27,85	16,44	19,34	0,59	0,55
30	30,14	18,40	22,40	0,61	0,58
31	32,67	20,63	25,99	0,63	0,60
32	35,49	23,18	30,22	0,65	0,62
33	38,64	26,09	35,19	0,68	0,65
34	42,16	29,44	41,06	0,70	0,67
35	46,12	33,30	48,03	0,72	0,70
36	50,59	37,73	56,31	0,75	0,73
37	55,63	42,92	66,19	0,77	0,75
38	61,35	48,93	78,03	0,80	0,78
39	67,87	55,96	92,25	0,82	0,81
40	75,31	64,20	109,41	0,85	0,84
41	83,86	73,90	130,22	0,88	0,87
42	93,71	85,38	155,55	0,91	0,90
43	105,11	99,02	186,54	0,94	0,93
44	118,37	115,31	224,64	0,97	0,97
45	133,88	134,88	271,76	1,01	1,00
46	152,10	158,51	330,35	1,04	1,04
47	173,64	187,21	403,67	1,08	1,07
48	199,26	222,31	496,01	1,12	1,11
49	229,93	265,51	613,16	1,15	1,15
50	266,99	319,07	762,89	1,20	1,19

Tabella 1 - Coefficienti di carico limite

CALCOLO PRELIMINARE DELLA FONDAZIONE AEROGENERATORE

Azioni di progetto

Le azioni di progetto prese in considerazione e calcolate secondo le disposizioni del DM 17/01/2018 sono:

- azioni permanenti (G): peso proprio (G1) e peso delle componenti non strutturali della torre (G2);
- azioni variabili (Q): vento estremo;
- azione sismica (E).

Per la geometria delle macchine installate sopra la torre non sono stati considerati carichi neve sia in quanto influenti ai fini della verifica, sia perché non esistono in pratica possibilità di accumulo significativo della neve sia sulle pale che sulla navicella.

CALCOLO PRELIMINARE
DELLA FONDAZIONE AEROGENERATORE**Carichi permanenti**

I carichi permanenti sono quelli dovuti al peso delle macchine installate sulla torre e alle installazioni (tecnologiche e di servizio) interne ed esterne della torre. Si riporta il tutto nella seguente tabella riassuntiva.

Tabella riepilogativa dei carichi permanenti		
Rotore Peso	12103	kN
Navicella Peso	7546	kN
Trasmissione Peso	7840	kN
Peso proprio della torre Peso totale della torre	3865	kN
Peso delle flange Peso totale delle flange	205	kN
Peso totale delle apparecchiature della torre (trasformatore)	1764	kN
Peso complessivo della turbina (esclusa la struttura di fondazione)	33323	kN

Tabella 2 – Tabella riepilogativa dei carichi permanenti

CALCOLO PRELIMINARE
DELLA FONDAZIONE AEROGENERATORE

Ai fini della descrizione delle **caratteristiche geometriche** della torre in oggetto, si fa riferimento alla tabella riepilogativa di seguito riportata.

h	D	Area	A _t	W	J
m	mm	mm ²	mm ²	mm ³	mm ⁴
1	4690	497028	248514	433872763	1,34735E+12
2	4679	495914	247957	431930050	1,33831E+12
3	4669	494800	247400	429991696	1,32931E+12
4	4658	493686	246843	428057702	1,32035E+12
5	4648	492572	246286	426128066	1,31143E+12
6	4637	491458	245729	424202790	1,30256E+12
7	4627	490344	245172	422281872	1,29372E+12
8	4617	489230	244615	420365315	1,28492E+12
9	4606	488116	244058	418453116	1,27616E+12
10	4596	487002	243501	416545276	1,26745E+12
11	4585	485888	242944	414641796	1,25877E+12
12	4575	484774	242387	412742675	1,25013E+12
13	4564	483660	241830	410847913	1,24153E+12
14	4554	482546	241273	408957510	1,23297E+12
15	4543	481432	240716	407071467	1,22445E+12
16	4533	480318	240159	405189782	1,21597E+12
17	4523	479204	239602	403312457	1,20753E+12
18	4512	478090	239045	401439491	1,19913E+12
19	4502	476976	238488	399570884	1,19077E+12
20	4491	475862	237931	397706637	1,18244E+12
21	4481	474748	237374	395846748	1,17416E+12
22	4470	473634	236817	393991219	1,16591E+12
23	4460	472520	236260	392140049	1,15771E+12
24	4450	471406	235703	390293238	1,14954E+12
25	4439	470292	235146	388450787	1,14141E+12
26	4429	469178	234589	386612695	1,13332E+12
27	4418	468064	234032	384778961	1,12526E+12
28	4408	466950	233475	382949587	1,11725E+12
29	4397	465836	232918	381124573	1,10927E+12
30	4387	464722	232361	379303917	1,10133E+12
31	4377	463608	231804	377487621	1,09343E+12
32	4366	462494	231247	375675683	1,08557E+12
33	4356	461380	230690	373868106	1,07774E+12
34	4345	460266	230133	372064887	1,06996E+12
35	4335	459152	229576	370266027	1,06221E+12
36	4324	458038	229019	368471527	1,05449E+12
37	4314	456924	228462	366681386	1,04682E+12
38	4303	455809	227905	364895604	1,03918E+12
39	4293	454695	227348	363114181	1,03158E+12
40	4283	453581	226791	361337117	1,02402E+12
41	4272	452467	226234	359564413	1,01649E+12
42	4262	451353	225677	357796068	1,009E+12
43	4251	450239	225120	356032082	1,00155E+12
44	4241	449125	224563	354272455	9,94133E+11
45	4230	448011	224006	352517187	9,86754E+11
46	4220	446897	223449	350766279	9,79411E+11
47	4210	445783	222892	349019730	9,72106E+11

CALCOLO PRELIMINARE
DELLA FONDAZIONE AEROGENERATORE

48	4199	444669	222335	347277540	9,64836E+11
49	4189	443555	221778	345539709	9,57603E+11
50	4178	442441	221221	343806237	9,50406E+11
51	4168	441327	220664	342077125	9,43246E+11
52	4157	440213	220107	340352372	9,36121E+11
53	4147	439099	219550	338631978	9,29032E+11
54	4137	437985	218993	336915943	9,2198E+11
55	4126	436871	218436	335204267	9,14963E+11
56	4116	435757	217879	333496951	9,07981E+11
57	4105	434643	217322	331793994	9,01036E+11
58	4095	433529	216765	330095396	8,94125E+11
59	4084	432415	216208	328401157	8,87251E+11
60	4074	431301	215651	326711277	8,80411E+11
61	4063	430187	215094	325025757	8,73607E+11
62	4053	429073	214537	323344595	8,66838E+11
63	4043	427959	213980	321667793	8,60104E+11
64	4032	426845	213423	319995351	8,53405E+11
65	4022	425731	212866	318327267	8,46741E+11
66	4011	424617	212309	316663543	8,40112E+11
67	4001	423503	211751	315004177	8,33517E+11
68	3990	422389	211194	313349171	8,26957E+11
69	3980	421275	210637	311698524	8,20431E+11
70	3970	420161	210080	310052237	8,1394E+11
71	3959	419047	209523	308410308	8,07484E+11
72	3949	417933	208966	306772739	8,01061E+11
73	3938	416819	208409	305139529	7,94673E+11
74	3928	415705	207852	303510678	7,88318E+11
75	3917	414591	207295	301886187	7,81998E+11
76	3907	413477	206738	300266054	7,75711E+11
77	3897	412363	206181	298650281	7,69459E+11
78	3886	411249	205624	297038867	7,6324E+11
79	3876	410135	205067	295431812	7,57054E+11
80	3865	409021	204510	293829116	7,50902E+11
81	3855	407907	203953	292230780	7,44784E+11
82	3844	406793	203396	290636803	7,38699E+11
83	3834	405679	202839	289047185	7,32647E+11
84	3823	404565	202282	287461926	7,26628E+11
85	3813	403451	201725	285881026	7,20642E+11
86	3803	402337	201168	284304486	7,14689E+11
87	3792	401223	200611	282732304	7,08769E+11
88	3782	400109	200054	281164482	7,02882E+11
89	3771	398995	199497	279601019	6,97028E+11
90	3761	397881	198940	278041916	6,91206E+11
91	3750	396767	198383	276487171	6,85417E+11
92	3740	395653	197826	274936786	6,7966E+11
93	3730	394539	197269	273390760	6,73935E+11
94	3719	393425	196712	271849093	6,68243E+11
95	3709	392311	196155	270311785	6,62583E+11
96	3698	391196	195598	268778837	6,56955E+11
97	3688	390082	195041	267250248	6,51358E+11
98	3677	388968	194484	265726018	6,45794E+11
99	3667	387854	193927	264206147	6,40262E+11
100	3657	386740	193370	262690635	6,34761E+11
101	3646	385626	192813	261179483	6,29292E+11

CALCOLO PRELIMINARE
DELLA FONDAZIONE AEROGENERATORE

102	3636	384512	192256	259672689	6,23854E+11
103	3625	383398	191699	258170255	6,18447E+11
104	3615	382284	191142	256672180	6,13072E+11
105	3604	381170	190585	255178465	6,07729E+11
106	3594	380056	190028	253689108	6,02416E+11
107	3583	378942	189471	252204111	5,97135E+11
108	3573	377828	188914	250723473	5,91884E+11
109	3563	376714	188357	249247194	5,86664E+11
110	3552	375600	187800	247775274	5,81475E+11
111	3542	374486	187243	246307714	5,76317E+11
112	3531	373372	186686	244844512	5,71189E+11

Tabella 3 - Tabella riepilogativa delle caratteristiche geometriche

Dove:

h = quota del concio considerato, misurata dal piano di posa della virola;

D = diametro esterno della torre;

S = spessore della struttura in acciaio della torre;

A = superficie in pianta della corona circolare alla quota corrispondente;

A_t = 50% del valore precedente;

W = momento statico della sezione tronco conica;

J = momento di inerzia della sezione tronco conica.

CALCOLO PRELIMINARE
DELLA FONDAZIONE AEROGENERATORE**Carichi variabili**

Come già accennato, nelle operazioni di calcolo che seguono non si terrà conto di azioni quali i carichi da neve.

Azione del vento

Per la località in questione, applicando quanto disposto dal D.M. 17/01/2018- Norme Tecniche per le Costruzioni, par. §3.3.1, si ottiene per la V_{ref} (valore massimo riferito ad un periodo di ritorno di 50 anni) il seguente valore di progetto, avendo preso a base dei calcoli i seguenti dati:

Dati relativi al sito	
Zona del vento	3
Quota massima sul livello del mare	50

Parametri di calcolo (Tab.3.3.I D.M. 17/01/2018)				
Zona	Descrizione	$V_{ref,0}$ (m/s)	a_0 (m)	K_s
3	Puglia	27	500	0.37

Tabella 4 – Classificazione del sito e parametri di calcolo

$$V_{ref} = 27 \text{ m/s}$$

Con ipotesi maggiormente cautelativa, in base alle rilevazioni effettuate in situ è stata posta a base del progetto una velocità di riferimento del vento pari a 40 m/s .

CALCOLO PRELIMINARE
DELLA FONDAZIONE AEROGENERATORE

Torre da 115 m - Calcolo delle sollecitazioni alla base dovute al VENTO (DM 17-01-18 §3.3.1) sulla sola torre								
V _{ref}	40,00	m/s	Categoria	II	k _r	0,19		
q _{ref}	100,00	daN/m ²			Z ₀	0,05		
					Z _{min}	4,00		
					c _t	1,00		
Sollecitazioni alla base							91744,02	4793675,99
h	c _e	c _p	c _d	q	Sup. esp.	q lin	T	Mf
m				daN/mq	mq/ml	daN/ml	daN	daNxm
1	1,80	0,70	1,20	151,25	4,500	680,60	91744,02	4793675,99
2	1,80	0,70	1,20	151,25	4,449	672,86	91063,41	4702272,28
3	1,80	0,70	1,20	151,25	4,423	668,98	90390,56	4611545,29
4	1,80	0,70	1,20	151,25	4,398	665,11	89721,57	4521489,22
5	1,93	0,70	1,20	162,06	4,372	708,53	89056,47	4432100,20
6	2,04	0,70	1,20	171,13	4,346	743,77	88347,93	4343398,00
7	2,13	0,70	1,20	178,95	4,321	773,18	87604,16	4255421,96
8	2,21	0,70	1,20	185,84	4,295	798,19	86830,98	4168204,38
9	2,29	0,70	1,20	192,00	4,270	819,76	86032,79	4081772,49
10	2,35	0,70	1,20	197,59	4,244	838,56	85213,03	3996149,58
11	2,41	0,70	1,20	202,71	4,218	855,07	84374,47	3911355,83
12	2,47	0,70	1,20	207,42	4,193	869,65	83519,40	3827408,90
13	2,52	0,70	1,20	211,80	4,167	882,59	82649,74	3744324,33
14	2,57	0,70	1,20	215,89	4,141	894,10	81767,15	3662115,88
15	2,62	0,70	1,20	219,73	4,116	904,36	80873,05	3580795,77
16	2,66	0,70	1,20	223,34	4,090	913,52	79968,69	3500374,90
17	2,70	0,70	1,20	226,76	4,065	921,70	79055,17	3420862,97
18	2,74	0,70	1,20	230,00	4,039	928,99	78133,47	3342268,65
19	2,77	0,70	1,20	233,09	4,013	935,49	77204,48	3264599,68
20	2,81	0,70	1,20	236,04	3,988	941,26	76268,99	3187862,95
21	2,84	0,70	1,20	238,85	3,962	946,38	75327,72	3112064,59
22	2,88	0,70	1,20	241,55	3,937	950,88	74381,35	3037210,06
23	2,91	0,70	1,20	244,14	3,911	954,83	73430,47	2963304,15
24	2,94	0,70	1,20	246,63	3,885	958,25	72475,64	2890351,10
25	2,96	0,70	1,20	249,03	3,860	961,20	71517,39	2818354,58
26	2,99	0,70	1,20	251,35	3,834	963,70	70556,18	2747317,80
27	3,02	0,70	1,20	253,58	3,809	965,78	69592,48	2677243,46
28	3,04	0,70	1,20	255,75	3,783	967,47	68626,70	2608133,87
29	3,07	0,70	1,20	257,84	3,757	968,80	67659,23	2539990,91
30	3,09	0,70	1,20	259,87	3,732	969,77	66690,43	2472816,08
31	3,12	0,70	1,20	261,85	3,706	970,43	65720,65	2406610,54
32	3,14	0,70	1,20	263,76	3,680	970,77	64750,23	2341375,10
33	3,16	0,70	1,20	265,62	3,655	970,82	63779,46	2277110,26
34	3,18	0,70	1,20	267,43	3,629	970,59	62808,64	2213816,21
35	3,20	0,70	1,20	269,20	3,604	970,10	61838,05	2151492,86

**CALCOLO PRELIMINARE
DELLA FONDAZIONE AEROGENERATORE**

36	3,23	0,70	1,20	270,92	3,578	969,36	60867,95	2090139,86
37	3,25	0,70	1,20	272,60	3,552	968,38	59898,59	2029756,60
38	3,26	0,70	1,20	274,23	3,527	967,17	58930,21	1970342,20
39	3,28	0,70	1,20	275,83	3,501	965,74	57963,04	1911895,57
40	3,30	0,70	1,20	277,39	3,476	964,11	56997,29	1854415,41
41	3,32	0,70	1,20	278,92	3,450	962,27	56033,18	1797900,17
42	3,34	0,70	1,20	280,41	3,424	960,25	55070,91	1742348,12
43	3,36	0,70	1,20	281,88	3,399	958,03	54110,66	1687757,34
44	3,37	0,70	1,20	283,31	3,373	955,64	53152,63	1634125,69
45	3,39	0,70	1,20	284,71	3,348	953,08	52196,99	1581450,88
46	3,41	0,70	1,20	286,08	3,322	950,36	51243,90	1529730,43
47	3,42	0,70	1,20	287,43	3,296	947,48	50293,54	1478961,71
48	3,44	0,70	1,20	288,76	3,271	944,44	49346,07	1429141,91
49	3,45	0,70	1,20	290,05	3,245	941,26	48401,63	1380268,06
50	3,47	0,70	1,20	291,33	3,220	937,93	47460,37	1332337,06
51	3,48	0,70	1,20	292,58	3,194	934,47	46522,44	1285345,66
52	3,50	0,70	1,20	293,81	3,168	930,87	45587,97	1239290,45
53	3,51	0,70	1,20	295,02	3,143	927,14	44657,11	1194167,91
54	3,53	0,70	1,20	296,20	3,117	923,29	43729,97	1149974,38
55	3,54	0,70	1,20	297,37	3,091	919,31	42806,68	1106706,05
56	3,55	0,70	1,20	298,52	3,066	915,22	41887,37	1064359,03
57	3,57	0,70	1,20	299,65	3,040	911,01	40972,16	1022929,26
58	3,58	0,70	1,20	300,76	3,015	906,69	40061,15	982412,61
59	3,59	0,70	1,20	301,86	2,989	902,26	39154,46	942804,80
60	3,61	0,70	1,20	302,94	2,963	897,72	38252,20	904101,47
61	3,62	0,70	1,20	304,00	2,938	893,09	37354,48	866298,13
62	3,63	0,70	1,20	305,05	2,912	888,35	36461,39	829390,20
63	3,64	0,70	1,20	306,08	2,887	883,52	35573,04	793372,99
64	3,66	0,70	1,20	307,09	2,861	878,59	34689,52	758241,71
65	3,67	0,70	1,20	308,10	2,835	873,57	33810,93	723991,48
66	3,68	0,70	1,20	309,08	2,810	868,45	32937,37	690617,33
67	3,69	0,70	1,20	310,06	2,784	863,25	32068,92	658114,19
68	3,70	0,70	1,20	311,02	2,759	857,97	31205,66	626476,90
69	3,71	0,70	1,20	311,97	2,733	852,60	30347,70	595700,22
70	3,73	0,70	1,20	312,91	2,707	847,14	29495,10	565778,82
71	3,74	0,70	1,20	313,83	2,682	841,61	28647,96	536707,29
72	3,75	0,70	1,20	314,75	2,656	836,00	27806,35	508480,14
73	3,76	0,70	1,20	315,65	2,630	830,31	26970,35	481091,79
74	3,77	0,70	1,20	316,54	2,605	824,55	26140,04	454536,59
75	3,78	0,70	1,20	317,42	2,579	818,71	25315,50	428808,83
76	3,79	0,70	1,20	318,29	2,554	812,80	24496,79	403902,68
77	3,80	0,70	1,20	319,15	2,528	806,82	23683,99	379812,30
78	3,81	0,70	1,20	320,00	2,502	800,77	22877,17	356531,72
79	3,82	0,70	1,20	320,83	2,477	794,65	22076,40	334054,93
80	3,83	0,70	1,20	321,66	2,451	788,47	21281,75	312375,85
81	3,84	0,70	1,20	322,48	2,426	782,22	20493,28	291488,34
82	3,85	0,70	1,20	323,29	2,400	775,91	19711,06	271386,17

**CALCOLO PRELIMINARE
DELLA FONDAZIONE AEROGENERATORE**

83	3,86	0,70	1,20	324,10	2,374	769,53	18935,15	252063,06
84	3,87	0,70	1,20	324,89	2,349	763,09	18165,62	233512,67
85	3,88	0,70	1,20	325,67	2,323	756,60	17402,53	215728,60
86	3,89	0,70	1,20	326,45	2,298	750,04	16645,93	198704,37
87	3,90	0,70	1,20	327,22	2,272	743,43	15895,89	182433,46
88	3,90	0,70	1,20	327,98	2,246	736,75	15152,46	166909,28
89	3,91	0,70	1,20	328,73	2,221	730,02	14415,71	152125,19
90	3,92	0,70	1,20	329,48	2,195	723,24	13685,69	138074,49
91	3,93	0,70	1,20	330,21	2,170	716,40	12962,45	124750,42
92	3,94	0,70	1,20	330,94	2,144	709,51	12246,05	112146,18
93	3,95	0,70	1,20	331,67	2,118	702,57	11536,54	100254,89
94	3,96	0,70	1,20	332,38	2,093	695,57	10833,97	89069,64
95	3,97	0,70	1,20	333,09	2,067	688,52	10138,40	78583,45
96	3,97	0,70	1,20	333,79	2,041	681,43	9449,88	68789,31
97	3,98	0,70	1,20	334,49	2,016	674,28	8768,45	59680,15
98	3,99	0,70	1,20	335,18	1,990	667,08	8094,17	51248,84
99	4,00	0,70	1,20	335,86	1,965	659,84	7427,09	43488,20
100	4,01	0,70	1,20	336,54	1,939	652,55	6767,25	36391,04
101	4,01	0,70	1,20	337,21	1,913	645,22	6114,70	29950,06
102	4,02	0,70	1,20	337,87	1,888	637,83	5469,48	24157,97
103	4,03	0,70	1,20	338,53	1,862	630,41	4831,65	19007,41
104	4,04	0,70	1,20	339,18	1,837	622,93	4201,24	14490,96
105	4,05	0,70	1,20	339,83	1,811	615,42	3578,31	10601,19
106	4,05	0,70	1,20	340,47	1,785	607,86	2962,89	7330,59
107	4,06	0,70	1,20	341,10	1,760	600,26	2355,03	4671,63
108	4,07	0,70	1,20	341,74	1,734	592,62	1754,76	2616,74
109	4,08	0,70	1,20	342,36	1,709	584,94	1162,15	1158,28
110	4,08	0,70	1,20	342,98	1,683	577,21	577,21	288,61
111	4,09	0,70	1,20	343,59	1,657	569,45	569,45	284,72
112	4,10	0,70	1,20	344,20	1,632	561,64	561,64	280,82

Tabella 5 – Calcolo azione del vento sulla Torre

CALCOLO PRELIMINARE
DELLA FONDAZIONE AEROGENERATORE

Torre da 115 m - Calcolo delle sollecitazioni alla base dovute al VENTO (DM 17-01-18 §3.3.1) sull'elica e sulla navicella

Vref	40,00	m/s	Categoria	II	kr		0,19	
qref	101,94	daN/mq			z0		0,05	
					z min		4,00	
					Ct		1,00	
Sollecitazioni alla base							91744,02	4793675,99
h	ce	cp	cd	p	Sup. esp.	q lin	T	Mf
m				daN/mq	mq/ml	daN/ml	daN	daNxm
1	1,80	0,70	1,20	151,25	4,500	680,60	91744,02	4793675,99
2	1,80	0,70	1,20	151,25	4,449	672,86	91063,41	4702272,28
3	1,80	0,70	1,20	151,25	4,423	668,98	90390,56	4611545,29
4	1,80	0,70	1,20	151,25	4,398	665,11	89721,57	4521489,22
5	1,93	0,70	1,20	162,06	4,372	708,53	89056,47	4432100,20
6	2,04	0,70	1,20	171,13	4,346	743,77	88347,93	4343398,00
7	2,13	0,70	1,20	178,95	4,321	773,18	87604,16	4255421,96
8	2,21	0,70	1,20	185,84	4,295	798,19	86830,98	4168204,38
9	2,29	0,70	1,20	192,00	4,270	819,76	86032,79	4081772,49
10	2,35	0,70	1,20	197,59	4,244	838,56	85213,03	3996149,58
11	2,41	0,70	1,20	202,71	4,218	855,07	84374,47	3911355,83
12	2,47	0,70	1,20	207,42	4,193	869,65	83519,40	3827408,90
13	2,52	0,70	1,20	211,80	4,167	882,59	82649,74	3744324,33
14	2,57	0,70	1,20	215,89	4,141	894,10	81767,15	3662115,88
15	2,62	0,70	1,20	219,73	4,116	904,36	80873,05	3580795,77
16	2,66	0,70	1,20	223,34	4,090	913,52	79968,69	3500374,90
17	2,70	0,70	1,20	226,76	4,065	921,70	79055,17	3420862,97
18	2,74	0,70	1,20	230,00	4,039	928,99	78133,47	3342268,65
19	2,77	0,70	1,20	233,09	4,013	935,49	77204,48	3264599,68
20	2,81	0,70	1,20	236,04	3,988	941,26	76268,99	3187862,95
21	2,84	0,70	1,20	238,85	3,962	946,38	75327,72	3112064,59
22	2,88	0,70	1,20	241,55	3,937	950,88	74381,35	3037210,06
23	2,91	0,70	1,20	244,14	3,911	954,83	73430,47	2963304,15
24	2,94	0,70	1,20	246,63	3,885	958,25	72475,64	2890351,10
25	2,96	0,70	1,20	249,03	3,860	961,20	71517,39	2818354,58
26	2,99	0,70	1,20	251,35	3,834	963,70	70556,18	2747317,80
27	3,02	0,70	1,20	253,58	3,809	965,78	69592,48	2677243,46
28	3,04	0,70	1,20	255,75	3,783	967,47	68626,70	2608133,87
29	3,07	0,70	1,20	257,84	3,757	968,80	67659,23	2539990,91
30	3,09	0,70	1,20	259,87	3,732	969,77	66690,43	2472816,08
31	3,12	0,70	1,20	261,85	3,706	970,43	65720,65	2406610,54
32	3,14	0,70	1,20	263,76	3,680	970,77	64750,23	2341375,10
33	3,16	0,70	1,20	265,62	3,655	970,82	63779,46	2277110,26
34	3,18	0,70	1,20	267,43	3,629	970,59	62808,64	2213816,21

**CALCOLO PRELIMINARE
DELLA FONDAZIONE AEROGENERATORE**

35	3,20	0,70	1,20	269,20	3,604	970,10	61838,05	2151492,86
36	3,23	0,70	1,20	270,92	3,578	969,36	60867,95	2090139,86
37	3,25	0,70	1,20	272,60	3,552	968,38	59898,59	2029756,60
38	3,26	0,70	1,20	274,23	3,527	967,17	58930,21	1970342,20
39	3,28	0,70	1,20	275,83	3,501	965,74	57963,04	1911895,57
40	3,30	0,70	1,20	277,39	3,476	964,11	56997,29	1854415,41
41	3,32	0,70	1,20	278,92	3,450	962,27	56033,18	1797900,17
42	3,34	0,70	1,20	280,41	3,424	960,25	55070,91	1742348,12
43	3,36	0,70	1,20	281,88	3,399	958,03	54110,66	1687757,34
44	3,37	0,70	1,20	283,31	3,373	955,64	53152,63	1634125,69
45	3,39	0,70	1,20	284,71	3,348	953,08	52196,99	1581450,88
46	3,41	0,70	1,20	286,08	3,322	950,36	51243,90	1529730,43
47	3,42	0,70	1,20	287,43	3,296	947,48	50293,54	1478961,71
48	3,44	0,70	1,20	288,76	3,271	944,44	49346,07	1429141,91
49	3,45	0,70	1,20	290,05	3,245	941,26	48401,63	1380268,06
50	3,47	0,70	1,20	291,33	3,220	937,93	47460,37	1332337,06
51	3,48	0,70	1,20	292,58	3,194	934,47	46522,44	1285345,66
52	3,50	0,70	1,20	293,81	3,168	930,87	45587,97	1239290,45
53	3,51	0,70	1,20	295,02	3,143	927,14	44657,11	1194167,91
54	3,53	0,70	1,20	296,20	3,117	923,29	43729,97	1149974,38
55	3,54	0,70	1,20	297,37	3,091	919,31	42806,68	1106706,05
56	3,55	0,70	1,20	298,52	3,066	915,22	41887,37	1064359,03
57	3,57	0,70	1,20	299,65	3,040	911,01	40972,16	1022929,26
58	3,58	0,70	1,20	300,76	3,015	906,69	40061,15	982412,61
59	3,59	0,70	1,20	301,86	2,989	902,26	39154,46	942804,80
60	3,61	0,70	1,20	302,94	2,963	897,72	38252,20	904101,47
61	3,62	0,70	1,20	304,00	2,938	893,09	37354,48	866298,13
62	3,63	0,70	1,20	305,05	2,912	888,35	36461,39	829390,20
63	3,64	0,70	1,20	306,08	2,887	883,52	35573,04	793372,99
64	3,66	0,70	1,20	307,09	2,861	878,59	34689,52	758241,71
65	3,67	0,70	1,20	308,10	2,835	873,57	33810,93	723991,48
66	3,68	0,70	1,20	309,08	2,810	868,45	32937,37	690617,33
67	3,69	0,70	1,20	310,06	2,784	863,25	32068,92	658114,19
68	3,70	0,70	1,20	311,02	2,759	857,97	31205,66	626476,90
69	3,71	0,70	1,20	311,97	2,733	852,60	30347,70	595700,22
70	3,73	0,70	1,20	312,91	2,707	847,14	29495,10	565778,82
71	3,74	0,70	1,20	313,83	2,682	841,61	28647,96	536707,29
72	3,75	0,70	1,20	314,75	2,656	836,00	27806,35	508480,14
73	3,76	0,70	1,20	315,65	2,630	830,31	26970,35	481091,79
74	3,77	0,70	1,20	316,54	2,605	824,55	26140,04	454536,59
75	3,78	0,70	1,20	317,42	2,579	818,71	25315,50	428808,83
76	3,79	0,70	1,20	318,29	2,554	812,80	24496,79	403902,68
77	3,80	0,70	1,20	319,15	2,528	806,82	23683,99	379812,30
78	3,81	0,70	1,20	320,00	2,502	800,77	22877,17	356531,72
79	3,82	0,70	1,20	320,83	2,477	794,65	22076,40	334054,93
80	3,83	0,70	1,20	321,66	2,451	788,47	21281,75	312375,85
81	3,84	0,70	1,20	322,48	2,426	782,22	20493,28	291488,34

**CALCOLO PRELIMINARE
DELLA FONDAZIONE AEROGENERATORE**

82	3,85	0,70	1,20	323,29	2,400	775,91	19711,06	271386,17
83	3,86	0,70	1,20	324,10	2,374	769,53	18935,15	252063,06
84	3,87	0,70	1,20	324,89	2,349	763,09	18165,62	233512,67
85	3,88	0,70	1,20	325,67	2,323	756,60	17402,53	215728,60
86	3,89	0,70	1,20	326,45	2,298	750,04	16645,93	198704,37
87	3,90	0,70	1,20	327,22	2,272	743,43	15895,89	182433,46
88	3,90	0,70	1,20	327,98	2,246	736,75	15152,46	166909,28
89	3,91	0,70	1,20	328,73	2,221	730,02	14415,71	152125,19
90	3,92	0,70	1,20	329,48	2,195	723,24	13685,69	138074,49
91	3,93	0,70	1,20	330,21	2,170	716,40	12962,45	124750,42
92	3,94	0,70	1,20	330,94	2,144	709,51	12246,05	112146,18
93	3,95	0,70	1,20	331,67	2,118	702,57	11536,54	100254,89
94	3,96	0,70	1,20	332,38	2,093	695,57	10833,97	89069,64
95	3,97	0,70	1,20	333,09	2,067	688,52	10138,40	78583,45
96	3,97	0,70	1,20	333,79	2,041	681,43	9449,88	68789,31
97	3,98	0,70	1,20	334,49	2,016	674,28	8768,45	59680,15
98	3,99	0,70	1,20	335,18	1,990	667,08	8094,17	51248,84
99	4,00	0,70	1,20	335,86	1,965	659,84	7427,09	43488,20
100	4,01	0,70	1,20	336,54	1,939	652,55	6767,25	36391,04
101	4,01	0,70	1,20	337,21	1,913	645,22	6114,70	29950,06
102	4,02	0,70	1,20	337,87	1,888	637,83	5469,48	24157,97
103	4,03	0,70	1,20	338,53	1,862	630,41	4831,65	19007,41
104	4,04	0,70	1,20	339,18	1,837	622,93	4201,24	14490,96
105	4,05	0,70	1,20	339,83	1,811	615,42	3578,31	10601,19
106	4,05	0,70	1,20	340,47	1,785	607,86	2962,89	7330,59
107	4,06	0,70	1,20	341,10	1,760	600,26	2355,03	4671,63
108	4,07	0,70	1,20	341,74	1,734	592,62	1754,76	2616,74
109	4,08	0,70	1,20	342,36	1,709	584,94	1162,15	1158,28
110	4,08	0,70	1,20	342,98	1,683	577,21	577,21	288,61
111	4,09	0,70	1,20	343,59	1,657	569,45	569,45	284,72
112	4,10	0,70	1,20	344,20	1,632	561,64	561,64	280,82

Tabella 6 – Calcolo azione del vento su rotore e navicella

CALCOLO PRELIMINARE
DELLA FONDAZIONE AEROGENERATORE**Azione sismica**

In quanto segue si confrontano in termini di reazioni alla base le sollecitazioni dovute al vento estremo con quelle dovute al sisma calcolate con il metodo dell'analisi lineare statica così come formalizzato nel D.M. 17/01/2018 (per la normativa italiana le due azioni non sono da considerarsi in concomitanza). Si può constatare che in particolare l'azione flettente dovuta al vento è ~1,50 volte quella sismica, che quindi è sicuramente ricompresa nell'azione del vento presa in considerazione.

È stata presa a riferimento la seguente geometria dei carichi:

Tabella pesi propri e baricentro		Peso Proprio	Z (m)
A	Torre (KN)	3865	57,50
C	Navicella (KN)	12103	115,00
D	Rotore (KN)	7546	115,00
Sistema A+B+C+D (KN)		23.514	

Analisi statica lineare del sistema:

Così come definito dalla norma nel paragrafo §7.3.3.2, si è andati a calcolare tutte le grandezze indispensabili per la determinazione delle forze orizzontali statiche equivalenti a quelle inerziali indotte dal sisma.

CALCOLO PRELIMINARE
DELLA FONDAZIONE AEROGENERATORE

Nella tabella di seguito riportata i risultati di tali elaborazioni.

L'analisi geologico/tecnica del territorio di interesse classifica il sito, la cui zonizzazione sismica è la II, come appartenente alla Categoria del sottosuolo

B.

Per semplicità costruttiva e di trasporto, la torre viene realizzata in 6 differenti tronchi che verranno poi riassemblati in cantiere, i cui baricentri vengono considerati punti di applicazione delle azioni sismiche.

I parametri coinvolti nel calcolo dell'azione sismica sono di seguito riassunti:

E	m	g	d	J
modulo elastico	massa	acc di gravità	quota baricentro	momento di inerzia
<i>kN/m²</i>	<i>kg</i>	<i>m/s²</i>	<i>m</i>	<i>m⁴</i>
220000	552.58	9,81	57,50	154,947
H	L	D	T	T_C*
altezza struttura	Spessore struttura	diametro base	periodo di vibrazione	
<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>s</i>	<i>s</i>
115	0,034	4.7	0,03305	0,29
C_C	T_B	T_C	T_D	a_g
	<i>s</i>	<i>s</i>	<i>s</i>	<i>m/s²</i>
1,579785	0,152713	0,458138	1,908257	0,756
F₀	S_s	S_T	S	h
			Coeff sottosuolo	
2,50	1,5	1,0	1,50	1
S(e)	2.872	m/s²	F_h	9158,77
				kN

Dalla determinazione di F_h e la conoscenza dei pesi dei tronchi di torre e delle rispettive quote dei baricentri (intese come distanza del baricentro dalla fondazione) si possono calcolare le forze orizzontali di piano da applicare come azione sismica F_{hi} :

$$F_{hi} = F_h \frac{W_i \cdot h_i}{\sum_i W_i \cdot h_i}$$

CALCOLO PRELIMINARE
DELLA FONDAZIONE AEROGENERATORE

Elemento	W_i	h_i
<i>I tronco</i>	462	7
<i>II tronco</i>	688	22
<i>III tronco</i>	847	43
<i>IV tronco</i>	893	69
<i>V tronco</i>	28377	97

	$W_i h_i$	F_{hi}
	kNm	kN
<i>I tronco</i>	3005,787111	9,599205749
<i>II tronco</i>	14706,06443	46,96491569
<i>III tronco</i>	36429,67087	116,3408762
<i>IV tronco</i>	61163,12102	195,3289975
<i>V tronco</i>	2752571,207	8790,541839

Da cui le sollecitazioni alla base risultano:

$$T = 13968 \text{ kN}$$

$$M = 331166 \text{ kNm}$$

CALCOLO PRELIMINARE
DELLA FONDAZIONE AEROGENERATORE

Verifiche strutturali

Di seguito si riportano i calcoli svolti per il plinto ed i pali di fondazione. Il plinto di base lo si considererà infinitamente rigido con unica funzione quella di collegamento delle teste dei pali, per cui verrà trascurato il suo contributo per la portanza.

Resistenze di calcolo

Le resistenze di calcolo dei materiali sono ricavate dalla riduzione delle resistenze caratteristiche secondo quanto disposto dalla norma:

$$f_d = f_k / \gamma_m$$

- o con coefficiente parziale di sicurezza relativo al cls
 $\gamma_c = 1,5$
- o con coefficiente parziale di sicurezza relativo all'acciaio
 $\gamma_s = 1,15$

Verifiche strutturali sul plinto di fondazione

Le verifiche strutturali seguenti sono state condotte secondo le disposizioni del Cap. 6.4.3.1 del DM17/01/2018:

1. Verifiche agli SLU di tipo geotecnico degli elementi di fondazione;
2. Verifiche agli SLE degli elementi di fondazione.

Il principio generale è che per ciascuno stato limite, dovrà essere verificata la seguente espressione:

$$R_d \geq E_d$$

CALCOLO PRELIMINARE
DELLA FONDAZIONE AEROGENERATORE

Combinazione delle azioni

I carichi sono stati analizzati secondo le seguenti combinazioni, come da normativa, Cap. 2.5.3:

Combinazioni di carico considerate	
Combinazione	Condizione di carico
SLE _(frequente)	$F_d = G_k + \varphi_{11} Q_k$
SLU	$F_d = G_k + \gamma_Q x Q_k$
SLU _(Ultimo)	$F_d = \gamma_G x G_k + \gamma_Q x Q_k$

N [kN]	T [kN]	M _{xy} [kNm]	COMBINAZIONE
87606	12571	349592	SLE _(frequente)
99269	18857	448442	SLU
118268	28286	468253	SLU _(Ultimo)

Tabella 7 - Combinazioni di carico e relativi calcoli

Calcolo azioni sui pali

L'ipotesi di plinto di fondazione infinitamente rigido permette di trasferire totalmente sulle teste dei pali le azioni derivanti dalla sovrastruttura, incrementate dei carichi (favorevoli e/o sfavorevoli a seconda delle verifiche da realizzare) dovuti al peso proprio del plinto ed al terreno di ricoprimento.

Con la condizione più sfavorevole si è andati a calcolare il massimo carico agente su singolo palo del gruppo di pali di fondazione:

CALCOLO PRELIMINARE
DELLA FONDAZIONE AEROGENERATORE

Id Palo	N	N° tot pali	l_x	l_y	l_{xy}	$M_{sd,TOT}$	N_i
1	118268,48	16	1131.89	1127.84	0.00	584224,09	7391,78
2							9791,88
3							11727,44
4							13053,95
5							13518,48
6							13053,95
7							11727,44
8							9791,88
9							7391,78
10							4991,68
11							3056,12
12							1729,61
13							1265,08
14							1729,61
15							3056,12
16							4991,68

Tabella 8 – Calcolo distribuzione dei carichi sul gruppo di pali allo SLU ultimo

Id Palo	N	N° tot pali	l_x	l_y	l_{xy}	$M_{sd,TOT}$	N_i
1	99269,33	16	1131.89	1127.84	0.00	525755,35	6204,33
2							8364,23
3							10106,09
4							11299,84
5							11717,88
6							11299,84
7							10106,09
8							8364,23
9							6204,33
10							4044,43
11							2302,58
12							1108,83
13							690,78
14							1108,83
15							2302,58
16							4044,43

Tabella 9 - Calcolo distribuzione dei carichi sul gruppo di pali allo SLU

Id Palo	N	N° tot pali	l_x	l_y	l_{xy}	$M_{sd,TOT}$	N_i
1	87606,28	16	1131.89	1127.84	0.00	401134,63	5475,39
2							7123,33
3							8452,31
4							9363,10
5							9682,06
6							9363,10
7							8452,31
8							7123,33
9							5475,39
10							3827,46
11							2498,48
12							1587,69
13							1268,73
14							1587,69
15							2498,48
16							3827,46

Tabella 10 - Calcolo distribuzione dei carichi sul gruppo di pali allo SLE frequente

CALCOLO PRELIMINARE
DELLA FONDAZIONE AEROGENERATORE

Verifiche agli SLU

Si riportano di seguito le verifiche agli SLU della sezione in C.A. del plinto di fondazione:

Caratteristiche geometrico/strutturali della sezione

SEZIONE IN C.A. del PLINTO DI FONDAZIONE		
B	[cm]	100
H	[cm]	350
A _s	n°/m	10
	F [mm]	34
	d [cm]	6,5
	passo [cm]	10
A _s	n°/m	10
	F [mm]	36
	d [cm]	218.5
	passo [cm]	10
A _s	n°/m	10
	F [mm]	38
	d [cm]	223.5
	passo [cm]	10

Tabella 11 – Dati cls e acciaio in 1 metro lineare di fondazione

1) Verifica a Flessione:

Azioni di progetto

	M _{S,d}	
	[kNm]	[kNm/m]
Palo + Plinto + Terreno	144146	18018

Azioni Resistenti

M _{R,d}	26062 [kNm/m]
------------------	----------------------

Verifica

$$M_{R,d} > M_{S,d}$$

CALCOLO PRELIMINARE
DELLA FONDAZIONE AEROGENERATORE

Verifica a Taglio:

Azioni di progetto

	$V_{S,d}$	
	[kN]	[kN/m]
Pali + Plinto + Terreno	32643,45	1063,30

Azioni Resistenti

$V_{R,d}$	122514,6	[kN]
	9801,17	[kn/m]

Verifica

$$V_{R,d} > V_{S,d}$$

2) Verifica a Punzonamento:

Azioni di progetto

$V_{S,d}$	[MPa]	0,377
-----------	-------	--------------

Azioni Resistenti

U	m	28,5
β		1,4
$V_{r,d}$	[MPa]	0,37
$C_{rd,c}$	0,18 / g_c	0,12
K	$(1+200/d)^{,5}<2$	1,06
D	[mm]	1760
ρ_1	A_s/A_c	0,010317
b_w	[mm]	1000
$\sigma_{c,p}$	[Mpa]	0
$V_{R,d}$	[MPa]	0,484

Verifica

$$V_{R,d} > V_{S,d}$$

CALCOLO PRELIMINARE
DELLA FONDAZIONE AEROGENERATORE

Verifiche agli SLE

Le verifiche agli SLE vengono condotte facendo riferimento, per le informazioni strutturali della sezione analizzata, a quanto già riportato nella Tabella 11 della sezione precedente, avente la geometria riportata in figura 1.

1) Verifica delle Tensioni di Esercizio:

Azioni di progetto

		V _{E,d}	
		[kN]	[kN/m]
Pali + Plinto + Terreno		10858,48	1357,31
	$\sigma_{c,E}$	3,10	[MPa]
	$\sigma_{s,E}$	46,54	[MPa]

Azioni resistenti

$\sigma_{c,R}$	0,45 · f_{ck}	11,25	MPa
$\sigma_{s,R}$	0,80 · f_{yk}	360	MPa

Verifica

$$\sigma_{c,R} > \sigma_{c,E}$$

$$\sigma_{s,R} > \sigma_{s,E}$$

CALCOLO PRELIMINARE
DELLA FONDAZIONE AEROGENERATORE

Verifiche sui Pali

Seguendo quanto disposto dal capitolo 6.4.3.1 della norma vigente, sono state realizzate le seguenti verifiche di collasso per carico limite per azioni assiali sui pali di fondazione condotte secondo l'Approccio 2 (Combinazione A1+M1+R3) che prevede l'utilizzo di coefficienti amplificativi o riduttivi di calcolo da ricavare dalle tabelle 6.2.I, 6.2.II, 6.4.II e 6.4.VI, nelle colonne A1, M1, R3 rispettivamente. Da notare quanto riportato nella norma: "Nelle verifiche effettuate con l'approccio 2 che siano finalizzate al dimensionamento strutturale, il coefficiente γ_R non deve essere portato in conto."

Calcolo Portata del singolo Palo

La capacità portante dei pali viene calcolata analiticamente partendo dalla conoscenza dei dati ottenuti a seguito di indagini svolte sul terreno e i relativi parametri geotecnici ricavati e riportati nella relazione geologica.

Non si considerano diminuzioni della capacità portante del singolo palo per via delle particolari condizioni di carico che portano a sollecitazioni massime elementi disposti su uno degli ordini di conformazione del gruppo di pali, dove è possibile verificare un interasse tra singoli pali maggiore di 3 diametri.

Q_p	6676,01	kN
Φ_{palo}	1,2	m
L_{palo}	30	m
N'_g	14,973518964	
L/D	25	
ϕ	26	
σ'_v	532,20	kPa
k	0,40	
μ	0,488	
s	103,82	kPa
Q_{bat}	10211,07	kN
$Q_{R,d}$	16887,08	kN
$Q_{E,d}$	16544,28	kN

Verifica

$Q_{R,d} > Q_{E,d}$

CALCOLO PRELIMINARE
DELLA FONDAZIONE AEROGENERATORE

Stima dei cedimenti

Tramite calcoli analitici si realizza una stima dei cedimenti che dalla realizzazione degli elementi di progetto possono realizzarsi sul terreno in esame.

$w_{sing} = (Q \cdot d) / (\lambda \cdot Q_{lim}) = d / (\lambda \cdot FS) =$		12	mm
$w_{gruppo} = 2 \cdot w_{sing} =$		25	mm
λ	40	Terreno Incoerente	Palo Trivellato
	110	Terreno Coesivo	
d	1200	mm	diametro palo
FS =	(A1 x M2 x R3) =	2,415	fattore di sicurezza

Conclusioni

Il plinto di fondazione scelto in via preliminare, oggetto della presente relazione, è un elemento fondale su pali, in calcestruzzo gettato in opera, di forma circolare, composto da un plinto di base e un colletto superiore, nonché da n. 16 pali trivellati aventi diametro di 1.20 mt. e lunghezza di 30.00 mt.,:

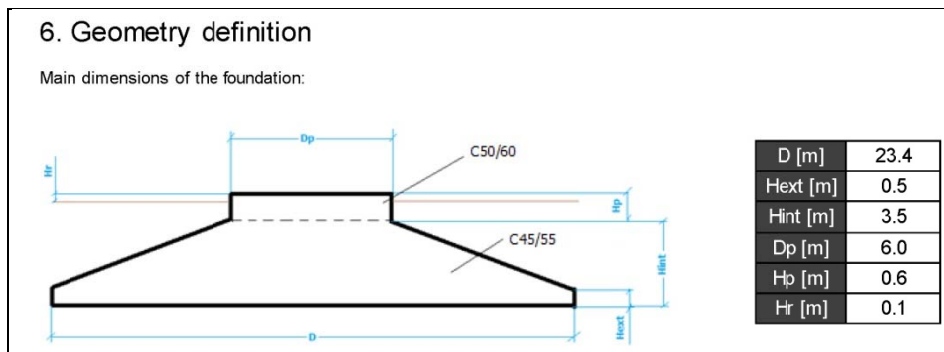


Figura 2 – Tipico Fondazione specifica Siemens - Gamesa
"D2370721_011 SGRE ON SG 6.2-170 Foundation loads T115-50A"

Per il dimensionamento definitivo si rimanda al futuro progetto esecutivo, sia in ordine alla forma che della tipologia di fondazione.

edp renewables

WIND FARM PALOMBINO 54 MW
Relazione A.E.P.

Gennaio 2022

Allegato n. 1

SCHEDA TECNICA SG170 Foundation Loads

Foundation Loads T115-50A

SG 6.2-170

Document ID and revision	Status	Date (yyyy-mm-dd)	Language
D2370721/011	Approved	2021-11-10	en-US

Original or translation of
Original

File name
D2370721_011 SGRE SG ON 6.2-170 Foundation loads T115-50A.docx/

Siemens Gamesa Renewable Energy S.A. Parque Tecnológico de Bizkaia, Edificio 222, 48170, Zamudio, Vizcaya, Spain
 +34 944 03 73 52 – info@siemensgamesa.com – www.siemensgamesa.com

Disclaimer of liability and conditions of use

To the extent permitted by law, neither Siemens Gamesa Renewable Energy A/S nor any of its affiliates in the Siemens Gamesa group including Siemens Gamesa Renewable Energy S.A. and its subsidiaries (hereinafter “SGRE”) gives any warranty of any type, either express or implied, with respect to the use of this document or parts thereof other than the use of the document for its intended purpose. In no event will SGRE be liable for damages, including any general, special, incidental or consequential damages, arising out of the use of the document, the inability to use the document, the use of data embodied in, or obtained from, the document or the use of any documentation or other material accompanying the document except where the documents or other material accompanying the documents becomes part of an agreement between you and SGRE in which case the liability of SGRE will be regulated by the said agreement. SGRE reviews this document at regular intervals and includes appropriate amendments in subsequent issues. The intellectual property rights of this document are and remain the property of SGRE. SGRE reserves the right to update this documentation from time to time, or to change it without prior notice.

Table of contents

1. Foundation Loads T115-50A	2
2. Introduction	2
3. Design code information	2
4. Coordinate system	2
5. Rotational stiffness	3
6. Extreme load	3
7. Characteristic load	3
8. Quasi-permanent load	4
9. Fatigue load	4
10. Interface	5

1. Foundation Loads T115-50A

2. Introduction

This document specifies foundation loads for SG 6.2-170 T115-50A.

3. Design code information

The foundation loads are calculated according to the design code & different climate conditions shown in Table 1.

Description	Unit	Value	Value
Design code	-	IEC-61400-1 Ed3	IEC-61400-1 Ed3
IEC Class	-	3A	3B
Design lifetime according to IEC	years	20	25
Annual average wind speed at hub height, V_{ave}	m/s	7.5	7.5
Extreme wind speed at hub height (10-min with 50 years return period), V_{ref}	m/s	37.5	37.5
Mean turbulence intensity at 15 m/s, I_{ref}	-	0.16	0.14
Average air density, ρ	kg/m ³	1.225	1.225

Table 1. Design code information and climatic conditions

4. Coordinate system

The axis system used for presentation of the tower bottom loads is depicted in Figure 1:

Co-ordinate system at Tower bottom (tower bottom): Location at tower bottom, at the upper surface of flange of foundation steel section.

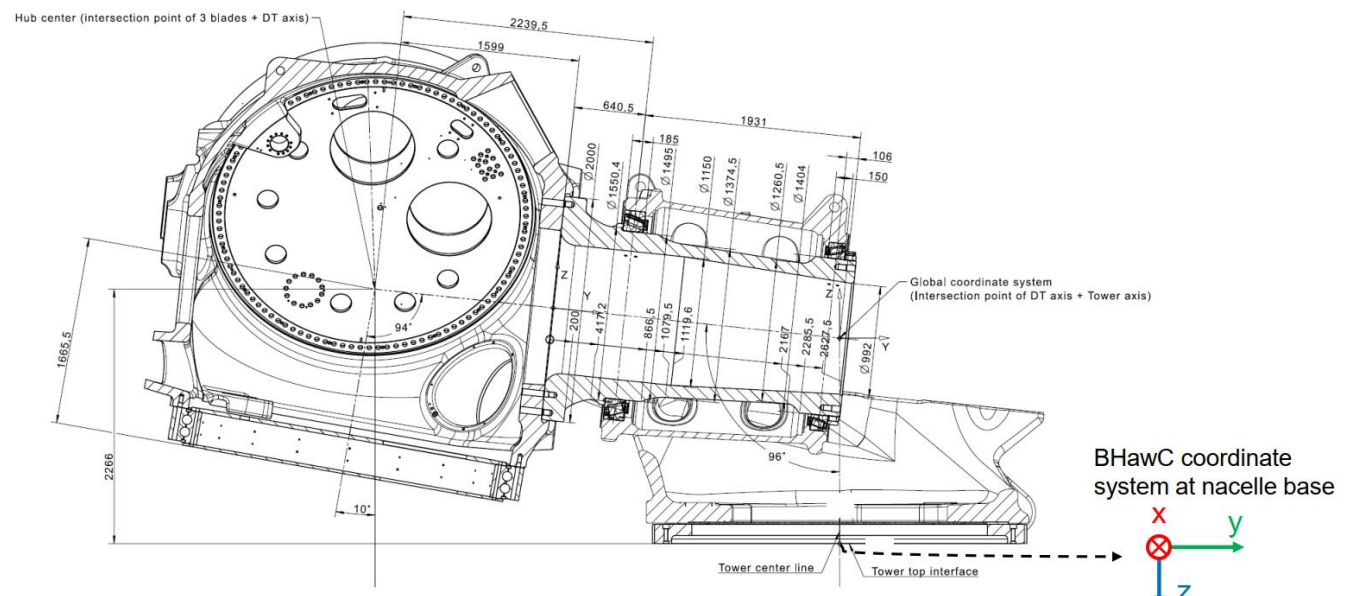


Figure 1. Coordinate system

5. Rotational stiffness

The foundation rotational stiffness requirements are specified by SGRE for each wind turbine, in order to operate the turbine correctly at the natural frequency of the entire unit.

If this condition is not met, the loads provided by SGRE for the foundation loads will no longer be valid.

In the case of pile foundations, SGRE will supply the minimum foundation horizontal stiffness value to be guaranteed in the design.

The value for SG 6.2-170 T115-50A is shown in *Table 2*:

WTG	SG 6.2-170 T115-50A
Minimum rotational stiffness of the foundation	7.0E+10 Nm/rad

Table 2. SG 6.2-170 T115-50A Minimum rotational stiffness

The minimum rotational stiffness of the foundation comes from the aeroelastic model of the complete wind turbine. In case these values drive the foundation designs, lower values can be evaluated if they keep assuring the adequate dynamic behavior of the wind turbine.

6. Extreme load

The extreme loads for the design of the SG 6.2-170 T115-50A foundations are shown in *Table 3*.

Load case	Load factor	F _z (kN)	F _{xy} (kN)	M _z (kNm)	M _{xy} (kNm)
ULS with Psf	1.35	9668	1595	-1274	192389
ULS without Psf	1.0	7060	1459	2333	174779

Table 3. SG 6.2-170 T115-50A Factored/Unfactored Extreme loads at tower bottom

The loads provided by Siemens Gamesa as “Extreme Loads” in this section are the maximum static loads for the specific wind turbine calculated according to IEC 61400 or DIBt standard for each site class. These loads must not be combined with any other type of load. They include the dynamic behaviour of the structure and correspond to the most unfavourable case at the base of the wind turbine among the different load cases, according to IEC 61400 or DIBt. Therefore, the loads provided by Siemens Gamesa as “Extreme Loads” are directly the foundation design loads. They shall not be divided or combined with any other load.

7. Characteristic load

Characteristics loads (maximum M_{xy} bending moment load combination of groups N, E and T according to GL2012 Sec. 5.4.3.1.3, or equivalent groups N-T according to IEC 61400-1 2006) have been estimated as shown in *Table 4*:

Load case	F _z (kN)	F _{xy} (kN)	M _z (kNm)	M _{xy} (kNm)
Characteristic without Psf	7161	1181	-944	142511

Table 4. SG 6.2-170 T115-50A Characteristics Loads at the base of the tower

8. Quasi-permanent load

Loads according to GL2010, considering DLC 1.1 and 6.4 with a probability of exceedance of $pf = 10^{-2}$ (equivalent to 1750 h in 20 years) with $\gamma F = 1.0$ have been estimated as shown in Table 5:

pf=0.01000	Tower loads at section			
	Section Height from bottom (m)	F _{xy} (KN)	F _z (KN)	M _{xy} (KNm)
0	960	7165	114106	5008

Table 5. SG 6.2-170 T111-50A Quasi Permanent Loads at tower bottom

Gap verification for the foundation shall be as per IEC64100-6.

9. Fatigue load

The equivalent fatigue loads are provided for the design foundations in Table 6, calculated for 10^7 cycles:

	Load factor	m	F _y (kN)	F _z (kN)	M _x (kNm)	M _z (kNm)
Tower Bottom	1	4	505	161	36624	9076
Tower Bottom	1	7	512	163	47878	10251

Table 6. SG 6.2-170 T115-50A equivalent fatigue loads at the base of the tower

In the above table, the “m” values correspond to the Wöhler gradient, which has a value of $m=4$ for embedded steel and $m=7$ reinforcement in reinforced concrete.

Table 7 shows the mean fatigue loads for the design of the SG 6.2-170 T115-50A foundation:

Load factor	F _y (kN)	F _z (kN)	M _x (kNm)	M _z (kNm)
1	493	7311	58822	1134

Table 7. SG 6.2-170 T115-50A Mean Fatigue Loads at base of tower

The Markov Matrix to be used for the fatigue verifications of 20 years is the following



T115-50A-Markov_T
OWER_My_0.000m-2

The Markov Matrix to be used for the fatigue verifications of 25 years is the following



T115-50A-Markov_T
OWER_My_0.000m-2

10. Interface

The junction between tower and foundation shall be performed using the interfaces provided by SGRE (including levelling and positioning systems).

For SG 6.2-170 T115-50A foundation a post-tensioned bars cage interface is included. The bars cage must be assembled with the T115 bottom T-flange.

The T-flange main dimensions are illustrated from Table 8 and Figure 2.

Siemens Gamesa 5.X T115-50A (T-interface)		BOTTOM
Flange thickness with neck	tflt	0.160
Flange thickness without neck	tfl	0.100
Flange width	wfl	0.350
Neck shell thickness	tsh	0.066
BCD diameter	dBCD	4.146/4.554
Neck shell center diameter	dM pl,2	4.350
Bolt holes diameter	Dbh	0.054
Number of bolts	nmet	104*2
Bolt metric	met	48

Table 8. Tower bottom interface

10.1. Initial preload

695 kN

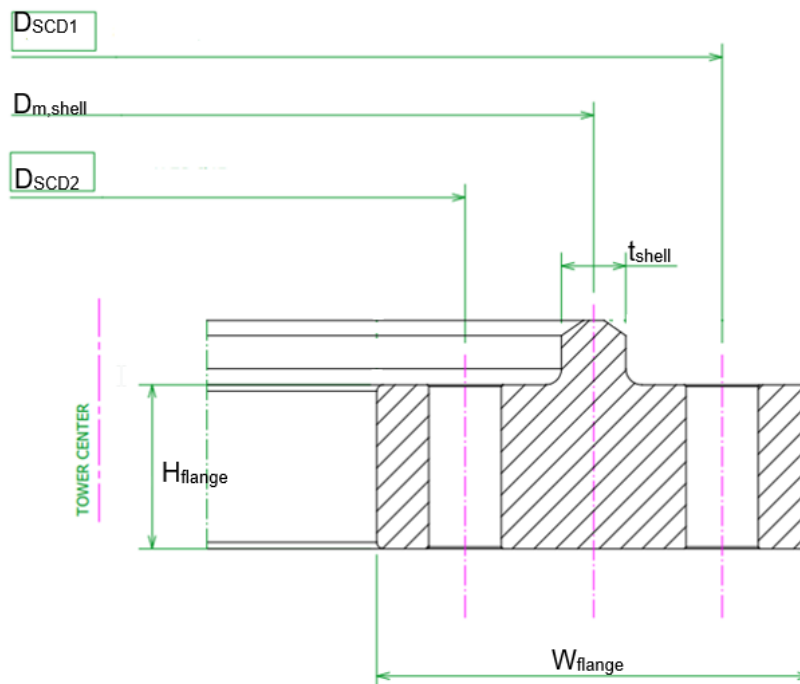


Figure 2. Illustration of important dimensions

10.2. Bars cage

Bars cage information can be seen below:

DIMENSIONS		
Dped (m)	6.0	Pedestal diameter
N rows	2	Number of rows
D (m)	4.35	Mean diameter of the tower
Nbars	208	Total number of bars
s (m)	0.204	Distance between rows
Bar metric	M48	Metric of the threaded bars
Øext ducts (mm)	58	External diameter of protection ducts for threaded bars
Wtow (m)	0.350	Width of the tower flange
Htow (m)	0.100	Thickness of the tower bottom flange
Neck (m)	0.066	Neck thickness of the tower flange
Wtem (m)	0.604	Width of the upper template
Htem (m)	0.127	Thickness of the upper template
Øh,tem (mm)	51	Diameter of the holes of the upper template
Wgro (m)	0.820	Width of the grout
Hgro (m)	0.160	Thickness of the grout layer (measured between lower faces of upper template and grout)
Hupp (m)	0.400	Height of concrete with different strength
Wlow (m)	0.569	Width of the lower template
Hlow (m)	0.098	Thickness of the lower template
Øhlow (mm)	51	Diameter of holes in the lower template
$\alpha 1$ (°)	45	Compression distribution angle within steel
$\alpha 2$ (°)	33.7	Compression distribution angle within concrete

Table 9. Bars cage information

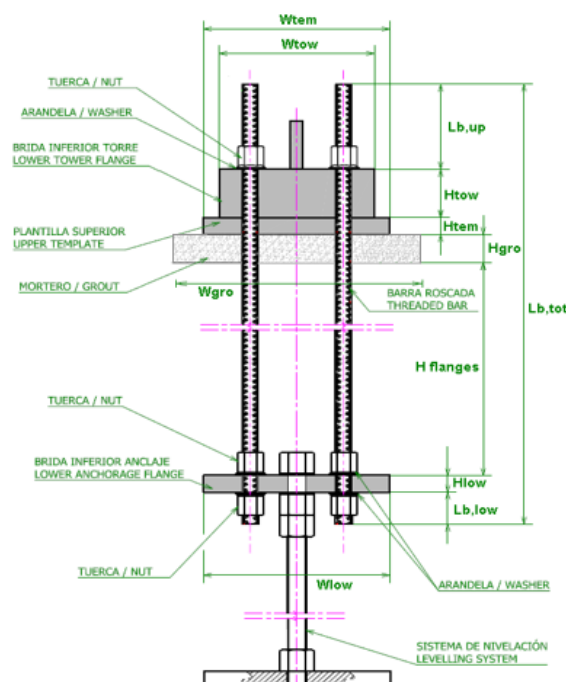


Figure 3. Overall sketch of bars cage

The scheme for upper and lower ends of bars is illustrated on Figure 4:

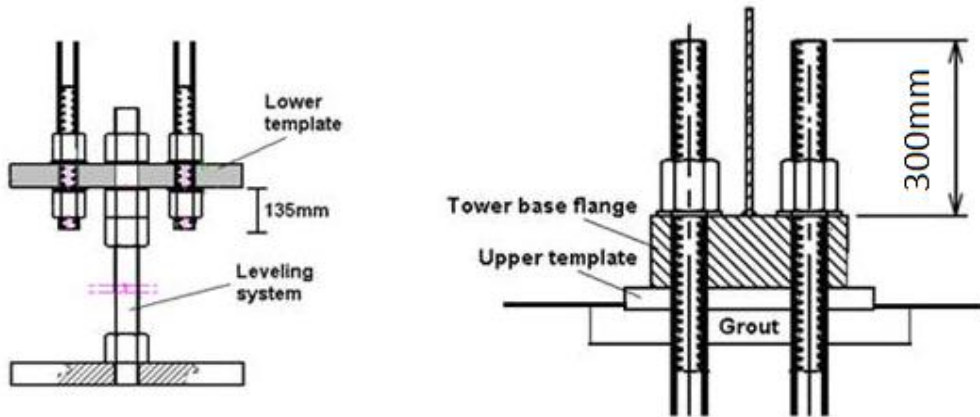


Figure 4. Schemes for upper and lower ends of bars

Threaded bars are as follows:

- 208 (104x2) bars with threaded ends
- BC can be used with bolt length between 3000mm and 4000mm (3000mm, 3500 and 4000mm). Keep in mind that the foundation is calculated with 4000mm bolt length.
- Each bar length is available according to both ISO and ASTM regulation

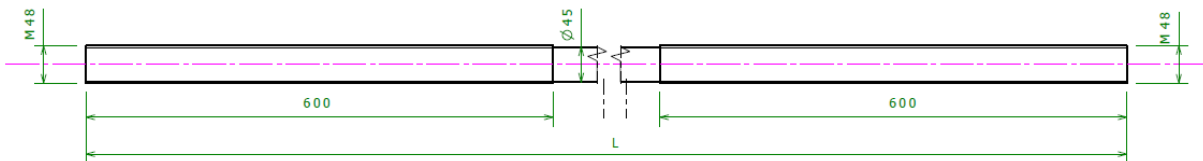


Figure 5. Threaded bars (dimensions in mm)

In order to achieve proper finish of the bars cage installation the following details showed in Figure 6 must be carried out:

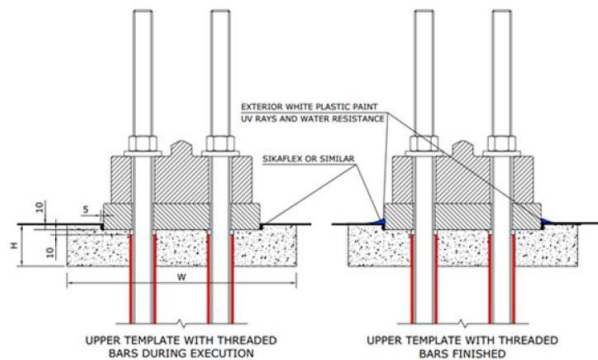


Figure 6. Bars cage finish

Plastic paints allowed are: Masterseal 6100 FX (BASF), Nitocote CM660 (FOSROC), Sikalastic 560 (SIKA).

Bolted connection is as follows:

- 3 nuts per bar (2 at lower template and 1 at tower flange)
 - M48 (ISO 4032) 10.9 for threaded bars according to ISO regulations.
 - Full strength hex nut M48
- Corrosion protection: hot dip galvanized (HDG)
- 3 washers per bar (2 at the bottom of the lower template and 1 at tower flange)
 - 2 Washer M48 (ISO 7089) 300HV for threaded bars according to ISO regulation for lower template or 2 Hardened Washers M48 according WILLIAMS FORM catalogue
 - 1 Washer Hard Thick 48-300HV-HDG for tower flange
- Corrosion protection: hot dip galvanized (HDG)
- A protective cap per bar
 - SCREW CAP RADOLID M48-BM G385 for threaded bars according to ISO regulations.
 - WILLIAMS FORM R79T TOWER END CAP 16" for threaded bars according to ASTM regulation
- A protective sleeve per bar (see necessary length in the following figure):
 - Material: PVC
 - Minimum inner diameter: 51mm
 - Maximum outer diameter: 58mm
 - Minimum thickness: 2mm

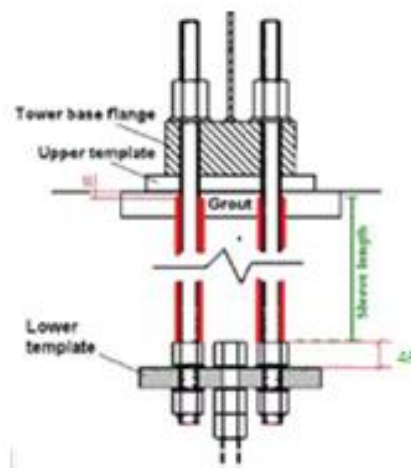


Figure 7. Length of protective sleeve

10.3. Upper template

Upper template design can be made with the following

- One-piece design
- Segmented 4x segments

Dimensions do not change

The geometry of this template is defined in the following figure:

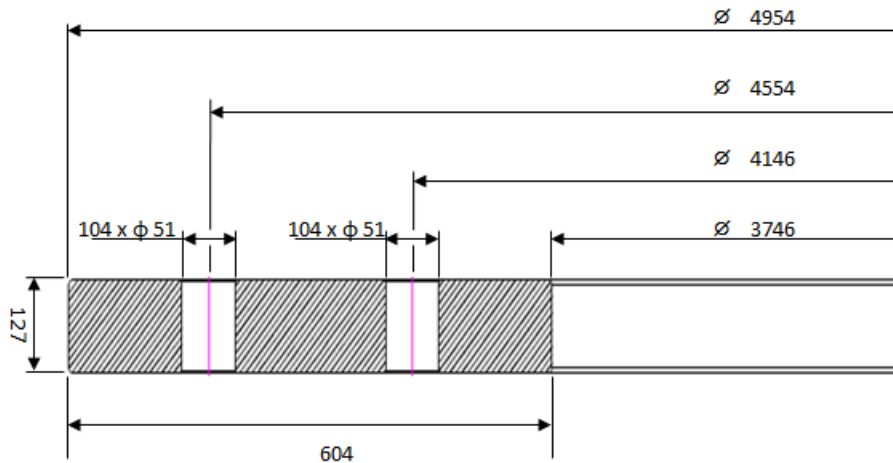


Figure 8. Sketch of the upper template (dimensions in mm)

10.4. Lower template

Lower template design can be made with the following

- One-piece design
- Only design in 4x segments

The geometry of a single tower lower template is defined in the following figure:

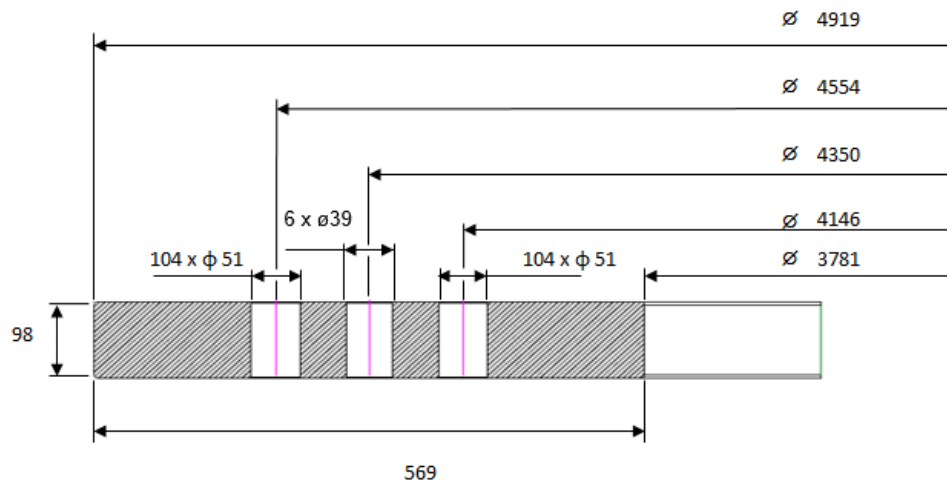


Figure 9. Sketch of the lower template (dimensions in mm)

10.5. Levelling system

6 levelling legs are necessary in order to carry out the assembly of the bar cage considering lower single template. In case of having the lower template divided by sectors, it will be necessary to place 12 levelling legs. The geometry of these levelling legs is defined in the following figure.

Note: the position of the lower template within the height of the levelling leg can vary, as shown in the following figure. This position can be combined with the available bar lengths and the exposed length under the lower template, in order to suit the height of the bar cage to the foundation.

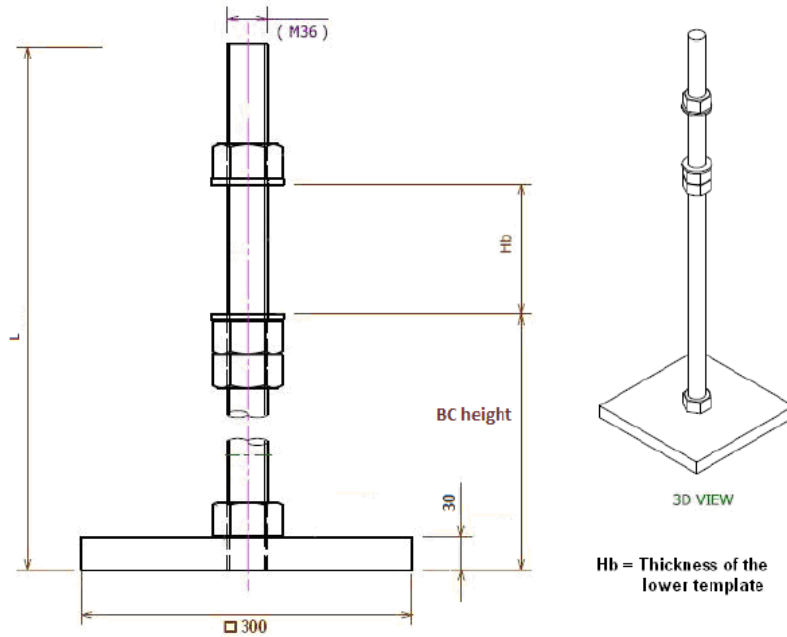


Figure 10. Sketch of the levelling legs (dimensions in mm)

10.6. Other characteristics

- Minimum grout thickness of 170 mm and minimum grout width of 820 mm
- Minimum grout characteristic strength: 85 MPa (12328.21 psi)
- Grout type: Masterflow 9400 (BASF), SikagROUT 3200 or another grout with similar characteristics
- Grout must be embedded in the upper part of the pedestal, in order to consider that it is confined.
- Upper template should be embedded 10 mm in the grout, as it is shown in Figure 6 and Figure 11.

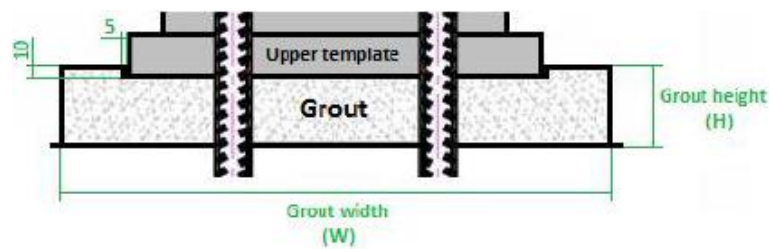


Figure 11. Scheme of grout disposal

- Minimum concrete characteristic strength in the top 600 mm of the pedestal: 50 MPa (7251.89 psi)
- Minimum characteristic strength (rest of foundation): 45 MPa (6526.70 psi)
- Minimum pedestal dimensions: $\varnothing 6000\text{mm} \times 600\text{mm}$

10.7. Electrical conduit diagram

- 4 x Ø160 HV cables
- 2 x Ø110 LV cable

The electrical conduit diagram shown in D2677984 is a standard layout for Siemens Gamesa 5.X, The final layout depends on the project and can be adopted. Lay-out of the main electrical components is as shown in the following figure. For earthing details Please refer D2047461.

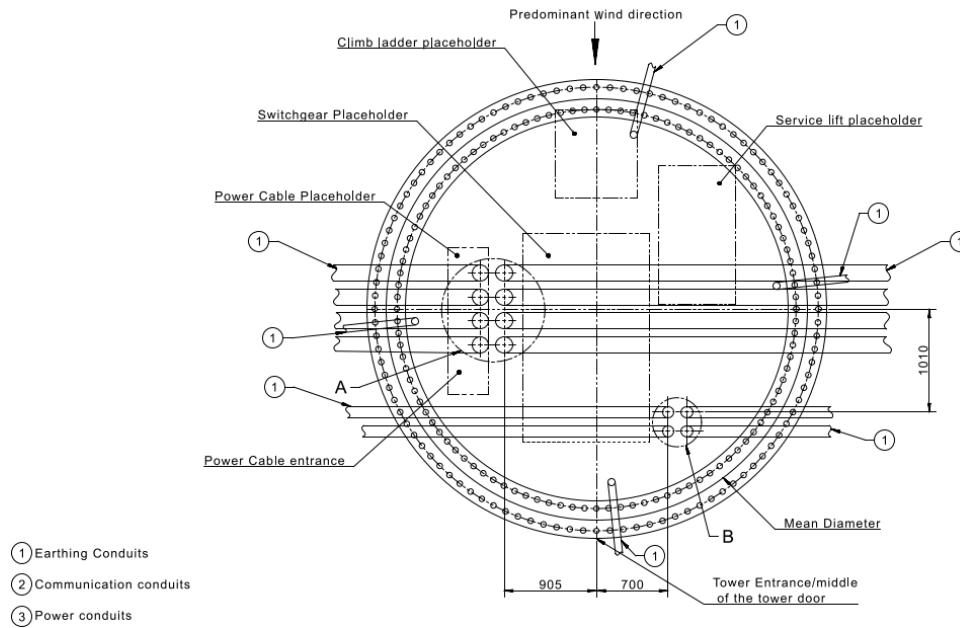


Figure 12. Electrical conduit diagram. Dimensions in mm.

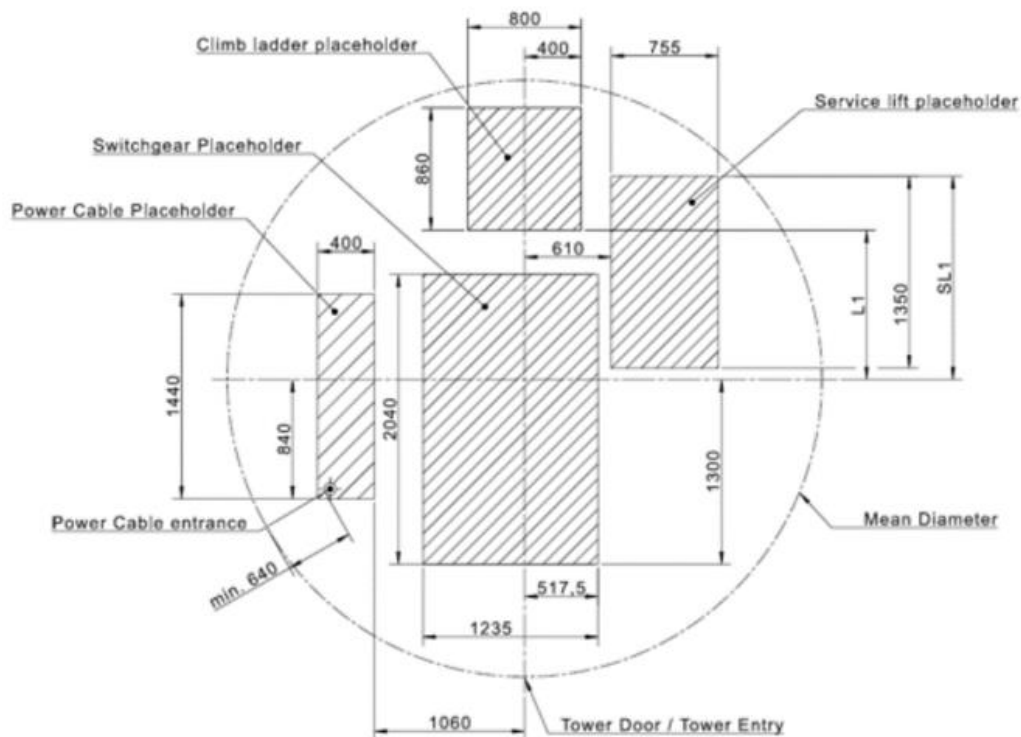


Figure 13. Foundation Interface with tower internals

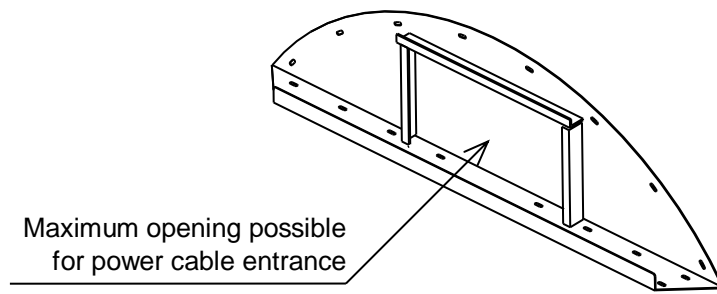


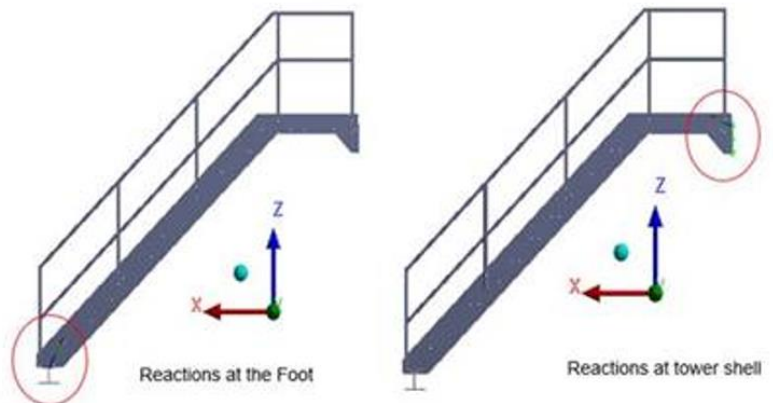
Figure 14. Bottom view of the power cable passing area

10.8. Tower access ladder

Foundation Loads of access ladder: Support reactions of stair ladder due to self-weight and live load with safety factors are shown below.

Reaction Forces

Location	X (N)	Y (N)	Z (N)
Reactions at the Foot			
Foot -1	-7613	-3576	14074
Foot -2	-7692	3582	14134
	Reaction Force at Foot		28208
Reactions at tower shell			
Bolt -1	388	-223	155
Bolt -2	2886	-431	1148
Bolt -3	4338	617	1907
Bolt -4	564	214	147
Bolt -5	2906	417	1135
Bolt -6	4223	-599	1854
	Reaction Force at Shell		6346
Total Reaction Force			34554



Summary

Total Applied Force	34683 N
Total Force Reaction	34554 N
% Diff	0.4%

In order to guarantee proper integration between foundation terrain level and tower access ladder, H, L and W values must be the ones below according to

- L = 6094 mm
- H = 525 mm
- W = 1400 mm (clear)

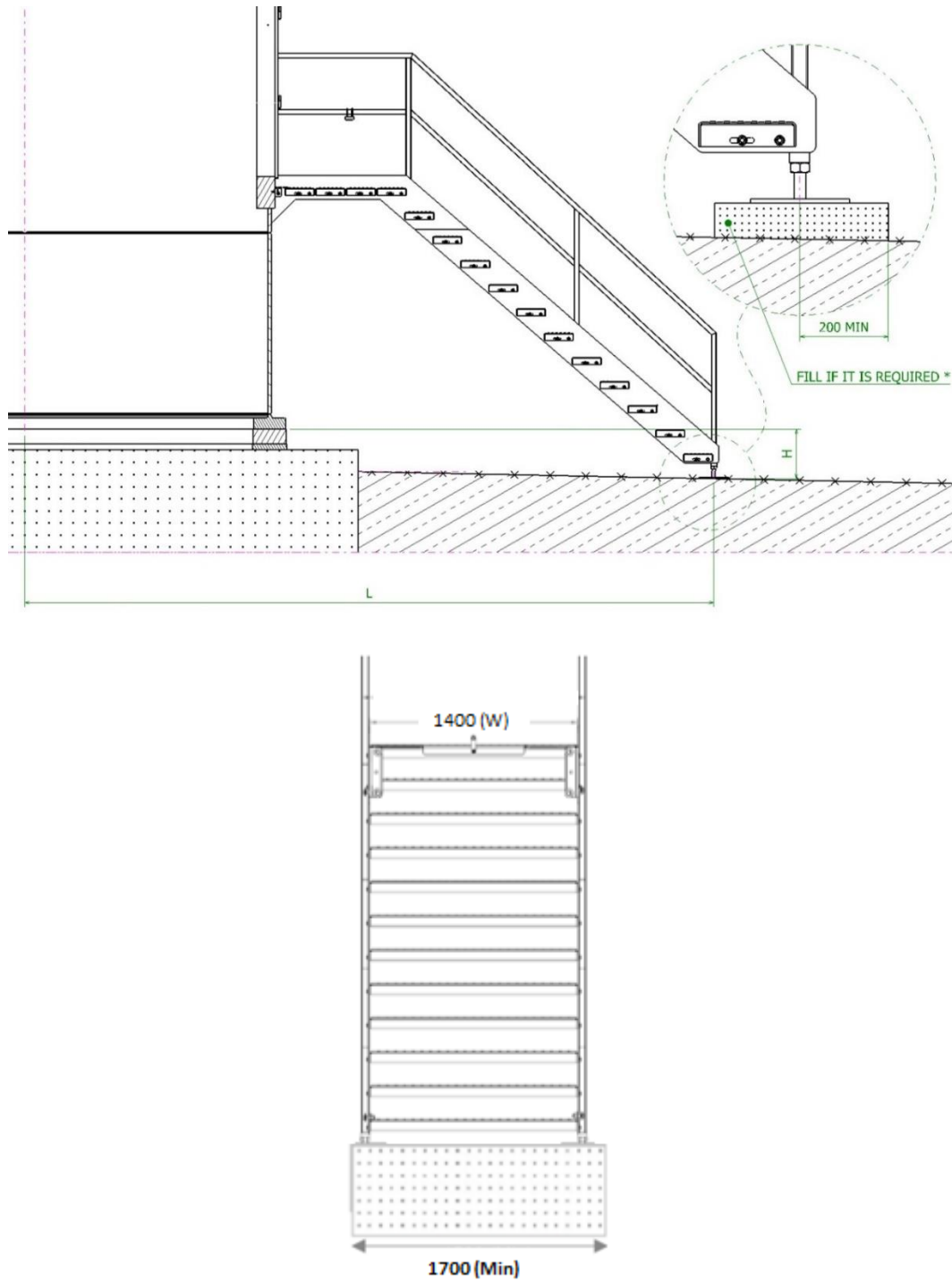


Figure 15. Refill terrain level