



**Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade de Coimbra
Departamento de Engenharia Civil**
www.dec.uc.pt



Sustainable Constructions under Natural Hazards and Catastrophic Events

DESIGN OF STEEL STRUCTURES FOR RENEWABLE ENERGY SYSTEMS

Professor Doutor responsável pela disciplina - Carlos Rebelo

Dimensionamento de torre eólica de 90m

por

Mário António Fonseca Loureiro

Coimbra, Portugal – Janeiro de 2014

Work

The assignment requires the “complete” calculation of a tubular type wind turbine tower, excluding the foundation. The tower supports a three blade wind turbine. It is composed of three tower segments to be assembled on site. An assumed diameter of 3500 mm at the top and a maximum diameter of 4500 mm at the bottom should be considered. Hub height – 90m.

Following issues shall be addressed in the final report:

I – Pre design of the tower based on natural frequencies constraint and simple hand calculation of stability and fatigue according to eurocodes. Use of simple design tools (excel sheets, seismostruct, ...) is recommended.

II – Create a FE model using shell elements in ABAQUS including tower with top mass and stiffener (simulating generator chassis) and foundation with soil-structure interaction.

Detailed verification of dynamic characteristics of the tower and pertinent limit states for the shell. The optimization of the cross section shall be addressed, considering at least three variations of cross section thickness along each segment in a total minimum of nine variations along tower height.

III – Design the connection used to connect the lower two tower segments considering a friction connection for polygonal sections.

Characteristics and loads for Turbine

1. Characteristics

Wind class (IEC 61400)	II-c
Rotor diameter	79 meters
Rated power	2MW
Number of blades and type	3 of the type given in Lecture 2
Rotor speed:	7 - 22 rpm
Cut-in wind speed:	3 m/s
Rated wind speed:	12.5 m/s
Cut-out wind speed:	24 m/s
Head mass (includes nacelle, rotor and blades)	140 ton

2. Loads at top for extreme load cases (Ultimate Limit State)

		EWM	EOG
Fx (kN)	min	-80	-150
	max	500	1000
Fy (kN)	min	-800	-80
	max	700	50
Mx (kNm)	min	-3500	1600
	max	15000	4000
My (kNm)	min	-9000	-8000
	max	-4000	-4500
Mz (kNm)	min	-3700	-1900
	max	5100	250

3. Fatigue Load spectrum at the connection cross section

In the excel file is given the range of variation of: (i) the shear force, (ii) the axial force and (iii) the bending moment. Additionally the number of cycles can be found in last column.

Índice

- 1 - Objectivo do trabalho
- 2 - Introdução
- 3 - Projecto e dimensionamento inicial
- 4 - Definição estrutural da torre, características e materiais utilizados
- 5 - Descrição dos cálculos
 - 5.1 – Encurvadura (buckling)
 - 5.2 - Fadiga
 - 5.3 - Vento
 - 5.4 - Cálculo da 1ª frequência própria e frequências de trabalho
 - 5.5 – Ligações por atrito – flanges e parafusos
 - 5.6- Acção sísmica
- 6 – Verificação por elementos finitos – “Abaqus”
- 7 - Conclusão
- 8 - Normas utilizadas na concepção e dimensionamento deste projecto:
- 9 - Bibliografia

1 - Objectivo do trabalho

O objectivo deste trabalho é o dimensionamento e cálculo de uma torre metálica do tipo tubular para uma turbina eólica, excluindo a fundação.

A torre destina-se a suportar uma turbina eólica de três pás, é composta por três segmentos a serem montados no local, com a altura total de 90m e a sua secção transversal assume uma forma circular com um diâmetro fixo de 3500 milímetros na parte superior e um diâmetro máximo de 4.500 milímetros na parte inferior. O peso a suportar é de 140ton (nacelle e rotor com três pás).

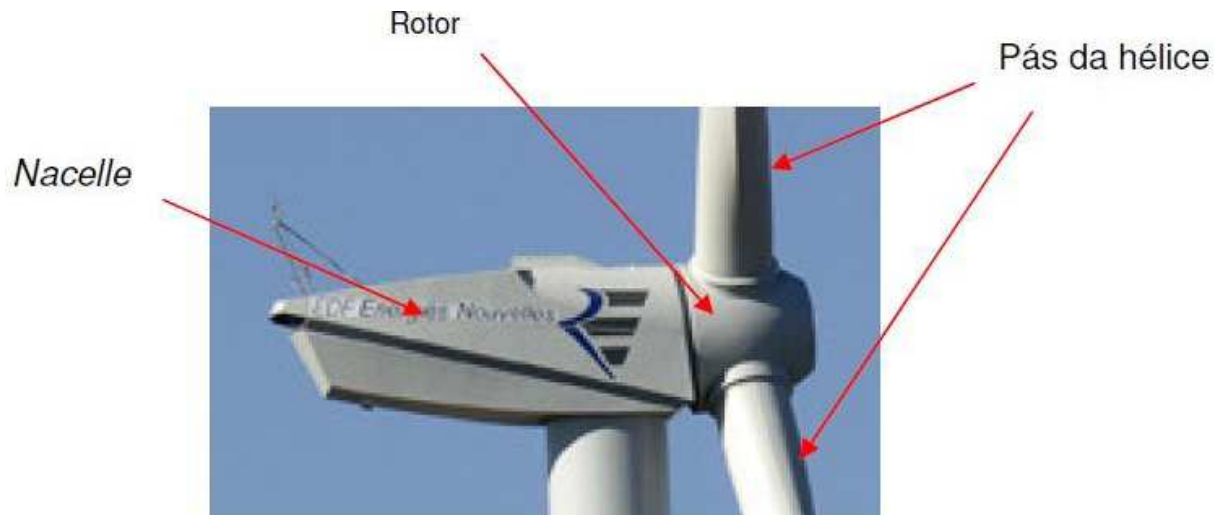


Fig.1 - Componentes da turbina eólica (fonte – Luís Oliveira)

2 - Introdução

A queima de combustíveis fósseis (carvão, petróleo, gás natural) nas centrais termoelétricas gera impactos ambientais devido à emissão de CO₂ e de gases poluentes, contrariamente ao que se passa com as fontes renováveis.

Mais de 50% da energia elétrica consumida em Portugal durante 2012 teve origem em tecnologias renováveis, sendo a mais importante a energia eólica com 40,1%. Em 2013 a menor percentagem produzida foi no mês de julho com 28,3%, atingido o máximo de 70,3% em novembro de 2013, fonte www.edpsu.pt/pt/origemdaenergia/Pages/OrigensdaEnergia.aspx.

A produção de energia elétrica a partir do vento tem ainda um elevado potencial de crescimento, porque ainda se continua a consumir muito carvão e gás natural para a produção de energia elétrica, durante 2012 a origem no carvão foi de 15,1 e atingiu o máximo de 22,5% no mês de Julho de 2013.

Este trabalho é inserido no contexto das energias renováveis e trata do dimensionamento de uma estrutura metálica para a produção elétrica a partir do vento – aerogerador.

3 - Projecto e dimensionamento inicial

Para o dimensionamento inicial e projecto da torre solicitada levou-se em conta algumas preocupações prévias que levaram à sua concepção dimensional e estrutural:

a) Transporte - Há restrições dimensionais devido ao transporte em rodovias, em Portugal está regulamentado pela Portaria n.º 472/2007 de 22/6, II Série, Regulamento de Autorizações Especiais de Trânsito, que foi alterado pela Portaria n.º 787/2009 de 28/7. Conseguir transportar objectos indivisíveis de grandes dimensões mas a largura máxima de 4m facilitava o transporte, também a altura máxima de 5m, incluindo veículo, facilitava imenso, o comprimento não é preocupante uma vez que os segmentos da torre irão ter 30m, assim o autor optou por 4m máximo de diâmetro da torre.



Fig.2 – Dificuldade em passar o 1º segmento de uma torre eólica por ponte devido ao grande diâmetro.

b) Montagem – Para a montagem no local de instalação dos segmentos e restantes componentes pesados do aerogerador, nacelle (que inclui o rotor) e as três pás da turbina é necessária uma ou mais gruas de grande capacidade. O aluguer de uma grua custa milhares de euros por hora pelo que a montagem deve ser feita no menor período de tempo possível. Também a zona de montagem geralmente levanta dificuldades de acesso, por serem em sítios remotos sem estradas de acesso. As condições de trabalho não são favoráveis, pois os aerogeradores só são instalados em lugares ventosos o que dificulta o trabalho da montagem. Assim aquando a montagem da estrutura no local, esta deve ser projectada de modo a facilitar ao máximo a montagem reduzindo o tempo gasto e os custos associados.



Fig.3 e 4– Gruas de grande capacidade necessárias na montagem

c) Manutenção - Um aerogerador é uma máquina muito complexa, que necessita de muita manutenção preventiva. Apresenta-se a lista de tarefas/trabalhos na manutenção de um aerogerador Vestas de 2 MW:

- Verificar se a turbina tem os equipamentos de segurança presentes
- Anotar serial number das ferramentas calibradas (chaves tork etc ...) confirmar com tork tester.
- Verificar e confirmar toda a documentação necessária.
- Testar o sistema VOG (Vestas over speed guard) com ferramenta própria.
- Verificar/ inspeccionar estrutura do Hub (Nose cone).
- Verificar o estado dos LCTU's (nos modelos que ainda dispõe desta tecnologia) - descarregadores de relâmpagos.
- Fazer teste de Pitch (com consola - service box) para verificar se o sistema está todo Ok.
- Fazer inspeção visual aos componentes do HUB.
- Medir folgas no sistema do HUB (apoios de cilindros etc...).
- Inspeção visual às pás.
- Lubrificação dos rolamentos das pás.
- Verificar estrutura principal (main beam).
- Lubrificar (ouvir possíveis ruídos) rolamentos principais.
- Lubrificar locking pins (pinos de bloqueio do HUB).
- Verificar possíveis folgas nos tork arms da gearbox/estragos.
- Verificar nível de óleo hidráulico (trocado a cada 5 anos).
- Retirar amostra de óleo hidráulico
- Substituir filtro de ar estação hidráulica
- Substituir filtros de óleo hidráulico
- Verificar sensores de pressões e funcionamento geral das válvulas hidráulicas
- Verificar e repor azoto nos acumuladores (emergência + estabilizadores de pressão)
- Verificar nível de óleo gearbox (trocado aquando as análises indicarem acidez em excesso, ou baixa viscosidade)
- Retirar amostra de óleo gearbox
- Verificar a presença/ausência de metal ships (sistema magnético no óleo para confirmar desgaste da caixa de velocidades)
- Inspeccionar gearbox através das tampas principais (inspeção visual)
- Substituir filtro de ar gearbox
- Verificar fugas de óleo gerais
- Substituir filtros online e offline da gearbox
- Verificar pressões no sistema de lubrificação da gearbox
- Verificar e testar sistema de travão (brake callipers)
- Verificar acoplamento entre gearbox e gerador (verificar estragos e apertos)
- Verificar os rolamentos do gerador
- Verificar sistema de lubrificação automática e encher o depósito da massa
- Verificar as escovas da massa do rotor
- Verificar escovas e sistema de escovas (potência do rotor) substituir se necessário, fazer reapertos.
- Fazer inspeção a cabos de ligação do rotor do gerador

verificar substituir filtro de ar da câmara do slip ring (sistema de escovas de potência para o rotor)
Verificar nível de fluido de arrefecimento do sistema de conversão, excitação do rotor, (substituído a cada 5 anos)
Verificar fugas no sistema de arrefecimento
Verificar nível de óleo e ruídos no sistema de viragem da nacelle (yaw gears)
Lubrificar ou verificar sistemas automáticos de lubrificação do sistema de yaw
Verificar apertos no sistema de yaw
Verificar sistemas de climatização através de sprays gelados (dentro dos quadros de electrónica e nos sensores de vento por causa do gelo)
Substituir filtros de ar dos quadros de potencia e comando
Verificar / substituir pilhas de backup nos processadores
Substituir elementos de desgaste rápido como contactores e relés com muito trabalho
Substituir baterias do sistema de emergência
Substituir filtros de ar da torre
Verificar as soldas da torre (inspeção visual)
Verificar elevador e escadas
Verificar e substituir filtros no desumidificador da torre
Verificar cabos gerais verificar apertos gerais (torre, pás, estrutura geral) >>> a cada 4 anos.
Fazer inspeção/limpeza no HV transformador de alta tensão/confirmação de apertos e verificação do sistema de incêndios e flash detect.
Verificação dos extintores.
Verificação do sistema de rescue (evacuação e salvamento).
Verificar/ testar disparo automático dos disjuntores principais (ex 1600A).
Verificar sistema de sinalização para aviação (luzes que piscam).
Limpeza geral.
Fazer relatório.

Para execução da imensa manutenção preventiva, não contando com reparação de avarias, tem de haver condições de trabalho, que permitam segurança e produtividade, tem de haver facilidade de acesso e de intervenção, pelo que se procura reduzir as necessidades de intervenções em especial as em altura no exterior, que são cansativas e que põem em risco o operário, reduzir o esforço físico desnecessário aos técnicos de manutenção, como subir 90m de escadas verticais, por exemplo atualmente todos os aerogeradores da marca Vestas já possuem um elevador de serviço. Assim os segmentos a cerca de 1,3m do topo levam um estrado de alumínio para facilitar a montagem e a manutenção nomeadamente o reaperto dos parafusos de ligação ver figura 3 e 5, solução adoptada neste projecto.

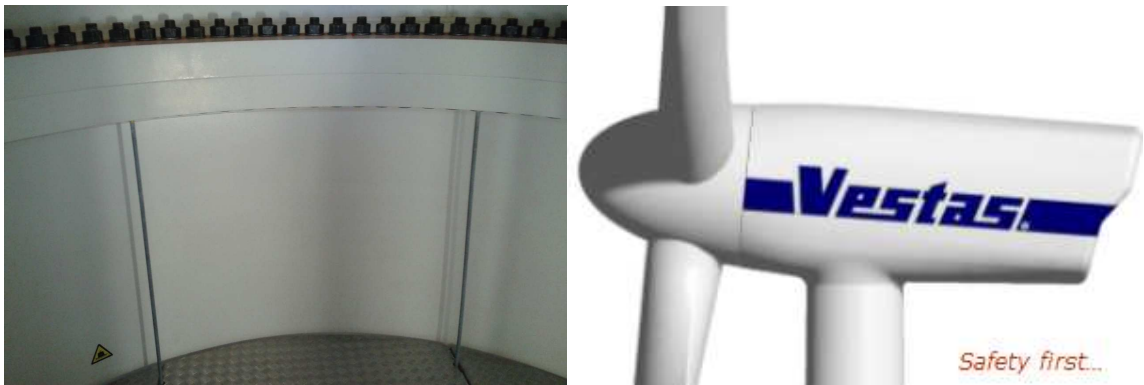


Fig.5 a e b - Estrado para facilitar a montagem e manutenção e logótipo da segurança da Vestas

d) Tipo de ligação entre segmentos - Utilizar flanges (anéis de conexão entre segmentos da torre), de aperto pelo exterior como é exibido na imagem 6, seria uma má opção pois obrigará a equipamento extra de elevação que teria de chegar aos 60m de altura aonde se teria de manipular a máquina de aperto dos parafusos que pode exigir dois operadores para a segurar devido ao seu peso e elevado valor do momento aplicado no aperto. Também deste modo a prevenção da corrosão não será fácil.



Fig.6 - Aperto de flange pelo exterior

Utilizar flanges de aperto interior é a solução mais utilizada para torres de secção circular, Martifer, Vestas, ... solução que vai ser adoptada neste projecto apesar de haver uma nova proposta de ligação que se apresentará.



Fig.7 e 8 – flanges de aperto pelo interior

Estas são geralmente utilizadas para fixar primeiro segmento ao betão e para fixar o último segmento à nacelle.



Fig.9 - Flange a fixar a nacelle



Fig.10 - Flange de ligação ao betão

Estas flanges facilitam a montagem mas, têm desvantagens como o seu alto custo de fabricação, o prazo de entrega normalmente ser longo, baixa resistência relativamente à fadiga, aproximadamente 50MPa (Carlos Rebelo), transporte caro, e são condicionantes da eficiência estrutural.

As flanges para serem mais resistentes são forjadas (há orientação e afinação do tamanho do grão), são torneadas em tornos horizontais e os furos (que podem ser mais de 100) são feitos em fresadora vertical, cujos furos têm de ter grande precisão posicional para que posteriormente se interliguem duas a duas aquando a montagem da torre, pelo que são muito caras, o seu custo aproximado é de 30k€ por unidade (Carlos Rebelo). Um fornecedor espanhol é a fábrica Barranquesa SA, de Navarra, www.barranquesa.com, que as fabrica a partir de perfis (dobrados a quente e soldados de topo), uma alternativa mais barata apesar do transporte ser mais caro é o fabricante chinês Kinhi Ltd, www.kinhi.com.



Fig.11 - Forjamento da flange



Fig.12 -Torneamento da flange



Fig.13 - flange acabada

As flanges podiam ser feitas a partir de chapa de aço, por laser cortava-se um anel, seguindo-se das operações de torneamento e furação, mas a sua resistência não seria tão grande como as forjadas, porque não há um alinhamento favorável do grão nem o seu refinamento e haveria um grande desperdício de material.

Há uma nova proposta de ligação preconizada por Carlos Rebelo (2011), Wylliam Husson (2008), que consiste em utilizar uma ligação por atrito a ser feita por vários parafusos de aperto pelo interior conforme imagens.

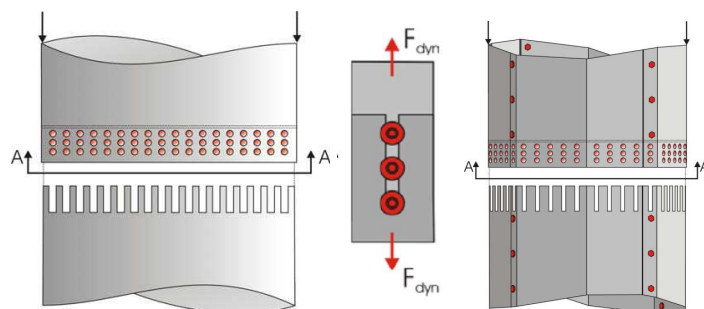


Fig.14 a,b,c - Ligação, com vários parafusos de aperto interior



Fig.15 Visita à Martinfer SA, alunos e professor Carlos Rebelo da UC a 20/12/2013

Este tipo de ligação poupava a compra de quatro flanges, e evitava nesses locais limitações de resistência estrutural que se tem com as flanges de aperto pelo topo e possivelmente ficaria mais barata o fabrico da torre, mas levantam-se dificuldades e prevêem-se problemas. Como o diâmetro da torre é grande e a espessura da chapa terá mais de 20mm, o encaixe entre dois segmentos (tubos) terá de ser feita com pouca folga para que eles se unam. Não haver folga não facilitará a montagem. São exigidas grandes precisões no fabrico mas até a temperatura pode levantar problema devido às dilatações. No mínimo os topos teriam de ser cónicos (e em oposição) para facilitarem o encaixe. Como o peso de cada segmento é de muitas dezenas de toneladas, este ajudava o encaixe forçado, mas se mais tarde se tivesse de desmontar a estrutura, o corte do tubo será muito possivelmente a única solução. Devido a termos uma casca fina quando comparada com o diâmetro, o transporte e o manuseamento dos segmentos seria delicado, pois a mínima deformação dificultaria e poderia mesmo impedir o encaixe, como há um elevado custo do aluguer das guias há grandes probabilidades de ficar mais caro do que a ligação de flanges normalmente utilizadas. Também a resistência à corrosão com este tipo ligação exigia mais manutenção em especial pelo exterior que com o tempo podia sair bastante caro, em especial se houver uma substancial redução do tempo de vida útil da estrutura.

O autor pensou numa ligação alternativa a ser feita por fanges roscadas, um macho e uma fêmea de grande resistência a soldar na mesma no topo de cada segmento, cujo fabrico ficaria mais

barato, pois evitava a abertura de cerca de uma centena de furos que levam muito tempo a executar, evitava o uso de parafusos que também são caros, evitava o tempo de inserir e apertar os parafusos, evitava a manutenção respectiva mas, que exigiria uma máquina de grandes dimensões para fazer o aperto em altura aquando da montagem, pelo que não vai ser adoptada.

e) Economia – Com a concorrência cada vez maior da China, os projectos têm de ser feitos de modo a diminuir custos de fabrico em especial os de mão-de-obra, uma vez que o custo com as matérias-primas são controláveis e não afectam a capacidade de fabrico. Reduzir o tempo de máquina, reduzir a energia despendida nos processos e reduzir os desperdícios de matéria-prima são também essenciais para este fim. No fabrico da torre a chapa é enrolada numa calandra para fazer um tubo, que de seguida será soldada. Se a calandra não tiver capacidade para chapa com 6m de largura por 40mm de espessura a torre terá de levar mais soldaduras que vão encarecer o seu fabrico e diminuir a capacidade industrial.

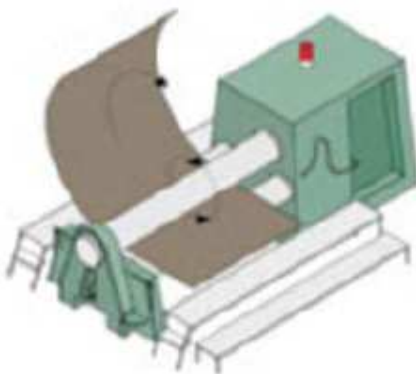


Fig.16 – Calandra

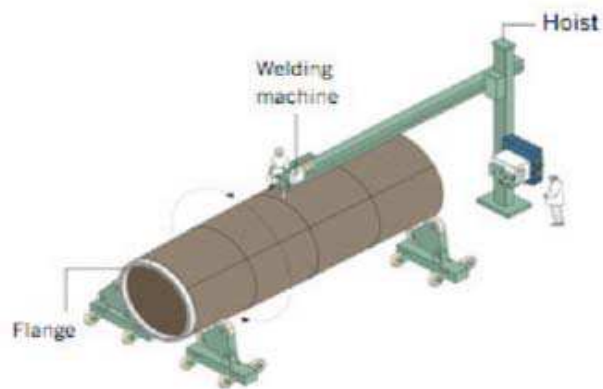


Fig.17 – Máquina de soldadura automática

As chapas chegam a ter **6 m de largura pelo que sempre que possível será essa a largura a empregar na construção** da torre reduzindo assim energia consumida, tempo de corte, tempo de soldadura, tempo dos operários. O custo mínimo também será minimizar o peso da torre.

f) Optimização da estrutura - Fazer toda a torre em cone sairia mais caro e reduzia a capacidade de fabrico, pois a construção de cones exige, muitos mais cortes, devido a correcção dos dois topos não ficarem planos após terem passado pela calandra pois eles ficam curvilíneos, ter de se fazer um corte adicional, o de um triângulo para permitir fazer o cone, operações que levam a mais tempo gasto com máquinas e operários, mais desperdícios, mais consumo de energia, menor capacidade de fabrico. Também é mais fácil ter maior precisão a fabricar tubos cilíndricos do que tubos cónicos. Em algumas simulações feitas com o programa Abaqus é no meio da torre que aparece a encurvadura, se essa zona for um cone ele terá mais resistência pois intuitivamente um cone de tem maior resistência à encurvadura originada por forças laterais, **assim só o segmento do meio é que será cónico**. Noutras modelações com Abaqus visualizadas pelo autor é normal ser a zona a sofrer encurvadura. As flanges largas impedem a encurvadura nas proximidades.

4 - Definição estrutural da torre, características e materiais seleccionados

Em folha de Excel foi feito o cálculo das espessuras e o material a utilizar, com as correcções introduzidas sucessivamente até satisfazerem todas as exigências normativas, por exemplo o aço S275 foi excluído porque aumentava o peso da torre, em especial o primeiro segmento.

Todos os cálculos reportam-se a células de dados para que qualquer alteração ao dimensionamento seja imediata em todos os resultados.

Para prevenir erros e ser mais fácil corrigi-los as equações eram explanadas numa outra célula e eram inseridas as respectivas fontes e os termos empregues eram explanados numa tabela e sempre que possíveis eram de acordo com os euros códigos.

Para ser mais fácil a fabricação opta-se por fazer todos os segmentos com o mesmo tamanho 30m, uma vez que o primeiro segmento será mais pesado mas não adianta muito estar a fazer os outros mais compridos, só se justificava se houvesse uma linha de produção fabril unicamente para os segmentos com 36m e assim o primeiro poderia ficar com 22m.

Apresenta-se de seguida o quadro alcançado com as espessuras a utilizar por segmento em função da altura:

Segmento	H, desde (m)	até (m)	esp. (mm)	L (m)	Mat.	f_y (MPa)	
1 104 ton	0	10	38	10	S355 J2	345	
	10	20	36	10	S355 J2	345	
	20	30	32	10	S355 J2	345	Flange 1
2 77 ton	30	36	32	6	S355 J2	345	
	36	48	28	12	S355 J2	345	
	48	54	26	6	S355 J2	345	
	54	60	25	6	S355 J2	345	Flange 2
3 53 ton	60	70	23	10	S355 J2	345	
	70	80	20	10	S355 J2	345	
	80	90	18	10	S355 J2	345	
nº de segmentos		3	f_y de acordo c/ EN10025				
nº de secções		10					

Quadro 1 – segmentos, espessuras por comprimento e aço a utilizar

ρ	7850	kg/m ³	Peso específico
E	210	GPa	Módulo de elasticidade
ν	0,3		Coeficiente de Poisson

Quadro 2 – Outras características do aço utilizadas nos cálculos

O desenho seguinte corresponde à torre concebida com os pormenores de ligação.

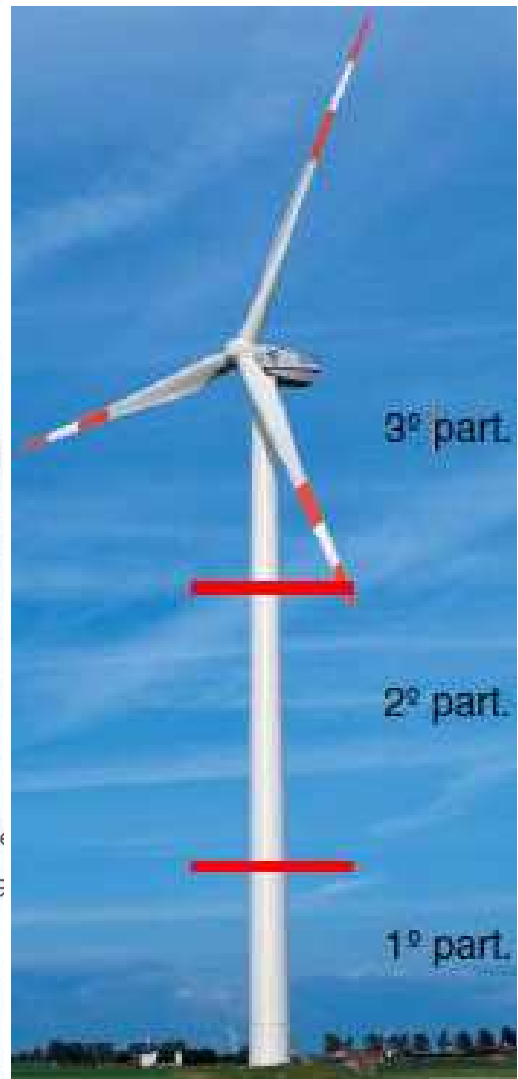
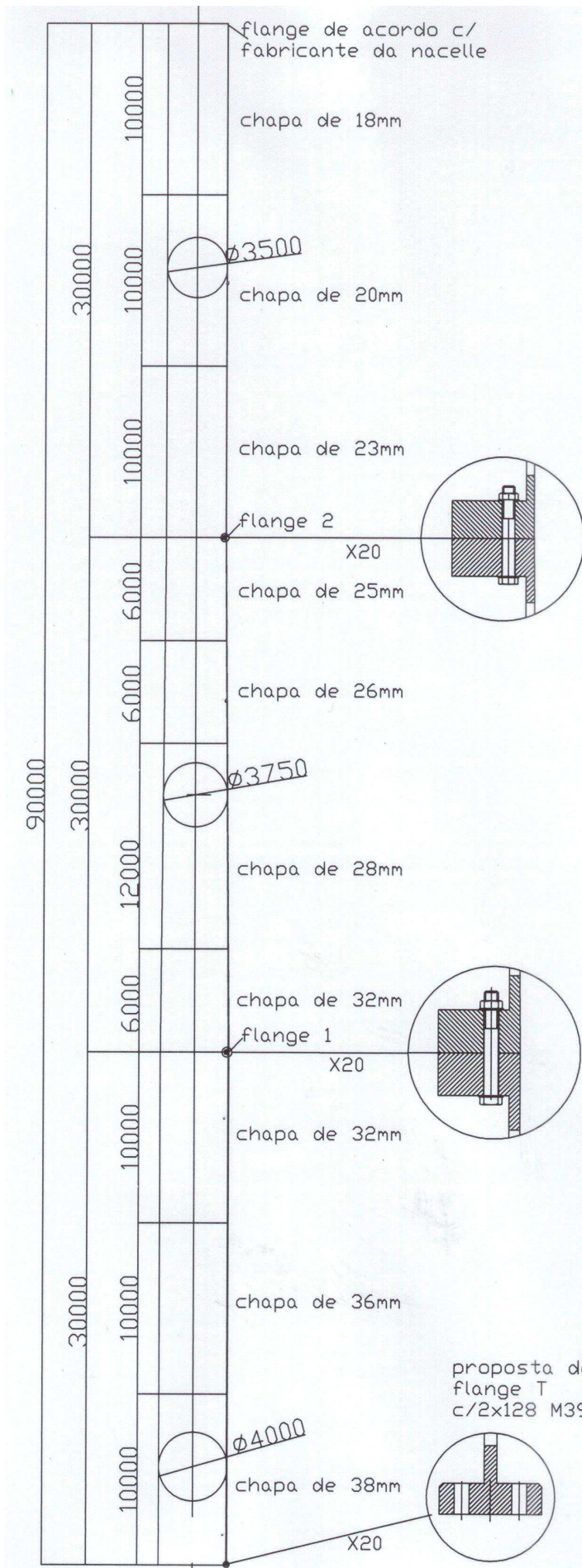


Fig.18 a e b - Desenho da torre e imagem ilustrativa dos três segmentos (fonte - Luís Oliveira)

5 - Descrição dos cálculos

5.1 – Encurvadura (buckling)

Efectuada a análise de resistência da casca à encurvadura de acordo com a EN1993-1-6 e a IEC 61600.

Os parâmetros de qualidade de fabricação (Q , α_0 e α_r) foram determinados considerando uma tolerância de qualidade excelente (Classe A) retirados das Tabelas D.2, D.5 e D.6.

Descrevem-se os modelos de análise e procedimentos de projeto de acordo com a EN1993-1-6.

De acordo com os Estados Limites Últimos em reservatórios de aço tem-se o estado limite LS3 no caso de encurvadura, onde toda ou parte da estrutura, de repente desenvolve grandes deslocamentos normais à superfície da casca, causada pela perda de estabilidade da membrana sob compressão ou tensões de membrana de corte na parede do invólucro, levando a incapacidade de manter a qualquer aumento nas resultantes das tensões. Um dos vários métodos de análise a serem utilizados para o cálculo das tensões de projeto e resultantes de tensão ao verificar LS3 é dada no Anexo A. **(4.1.3)**

As Tensões de Projecto para os estados limites devem ser avaliadas em termos de três categorias de tensão: tensões primárias, secundárias e locais **(4.2.2)**

O componente de membrana da soma das tensões primárias e secundárias devem ser limitados pela resistência de projeto à encurvadura de acordo com a secção 8 da EN1993-1-6.

Estado limite de encurvadura – LS3 **(8)**

Parâmetros de resistência de tensões projeto à encurvadura **(8.2):**

- $\sigma_{x,Rcr}$ é a tensão crítica meridional elástica de encurvadura ;
- $\sigma_{\theta,Rcr}$ é a tensão crítica circunferencial elástica de encurvadura ;
- $\tau_{x\theta,Rcr}$ é a tensão crítica de corte elástica de encurvadura;
- $\sigma_{x,Rk}$ é a tensão característica meridional de encurvadura;
- $\sigma_{\theta,Rk}$ é a tensão característica circunferencial de encurvadura;
- $\tau_{x\theta,Rk}$ é a tensão característica de corte de encurvadura;
- $\sigma_{x,Rd}$ é a tensão de projeto meridional de encurvadura;
- $\sigma_{\theta,Rd}$ é a tensão de projeto circunferencial de encurvadura;
- $\tau_{x\theta,Rd}$ é a tensão de projeto de corte de encurvadura;

Tolerâncias geométricas relevantes à encurvadura **(8.4.1)**

Nas condições de contorno para o estado limite LS3 considerou-se cilindro com anel endurecido (BC2f:restringido radialmente, meridionalmente livre e rotação livre) de acordo com a Figura 1.8 f).

Cálculo de tensões de projeto **(8.5)**

Para a determinação da força de encurvadura de resistência de projeto **(8.5.2)** as tensões de projeto de encurvadura são obtidas a partir de:

$$\sigma_{x,Rd}=\sigma_{x,Rk}/\gamma_{M1}, \sigma_{\theta,Rd}=\sigma_{\theta,Rk}/\gamma_{M1}, \tau_{x\theta,Rd}=\tau_{x\theta,Rk}/\gamma_{M1} \quad \mathbf{(8.11)} \text{ com } \gamma_{M1}=1,1.$$

As tensões características de encurvadura devem ser obtidas multiplicando-se o limite de escoamento característico pelos fatores de redução de encurvadura χ :

$$\sigma_{x,Rk} = \chi_x f_{yk}, \quad \sigma_{\theta,Rk} = \chi_{\theta} f_{yk}, \quad \tau_{x\theta,Rk} = \chi_{\tau} f_{yk} / \sqrt{3} \quad (8.12)$$

Os fatores de redução de encurvadura χ_x , χ_{θ} e χ_{τ} devem ser determinados como uma função da esbelteza relativa do invólucro λ :

$$\chi = 1 \text{ quando } \lambda \leq \lambda_0 \quad (8.13)$$

$$\chi = 1 - \beta \left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_p - \lambda_0} \right)^{\eta} \text{ quando } \lambda_0 < \lambda < \lambda_p \quad (8.14)$$

$$\chi = \alpha / \lambda^2 \text{ quando } \lambda_p \leq \lambda \quad (8.15)$$

Retirando do Anexo D os seguintes parâmetros:

α : factor de redução imperfeição elástico

β : factor de alcance plástico

η : expoente interação

λ_0 : limite de esbelteza relativa

Determina-se o limite de esbelteza plástica relativa $\lambda_p = \sqrt{(\alpha / (1 - \beta))}$ (8.16) e os parâmetros de esbelteza relativa da casca para os diferentes componentes de tensão

$$\lambda_x = \sqrt{f_{yk} / \sigma_{x,Rcr}}, \quad \lambda_{\theta} = \sqrt{f_{yk} / \sigma_{\theta,Rcr}}, \quad \lambda_{\tau} = \sqrt{(f_{yk} / \sqrt{3}) / \tau_{x\theta,Rcr}} \quad (8.17)$$

e as tensões elásticas críticas de encurvadura também retiradas do Anexo D : $\sigma_{x,Rcr}$, $\sigma_{\theta,Rcr}$ e $\tau_{x\theta,Rcr}$.

Verificação de segurança: $\sigma_{x,Ed} \leq \sigma_{x,Rd}$, $\sigma_{\theta,Ed} \leq \sigma_{\theta,Rd}$ e $\tau_{x\theta,Ed} \leq \tau_{x\theta,Rd}$ (8.18)

Se mais de um dos três componentes de tensão de membrana relevantes para a encurvadura estão presentes no âmbito das acções em consideração, a seguinte verificação de interação para o estado de tensão membrana combinado deve ser realizada:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}}\right)^{k_x} + \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}}\right)^{k_{\theta}} + \left(\frac{\tau_{x\theta,Ed}}{\tau_{x\theta,Rd}}\right)^{k_{\tau}} \leq 1 \quad (8.19)$$

$$\text{Com } k_x = 1,0 + \chi_x^2 \quad (8.20) \quad k_{\theta} = 1,0 + \chi_{\theta}^2 \quad (8.21) \quad k_{\tau} = 1,5 + 0,5 \chi_{\tau}^2 \quad (8.22)$$

Os valores de cálculo das tensões $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{\theta,Ed}$, $\tau_{x\theta,Ed}$ devem ser tomados como os valores da chave de tensões de membrana de compressão e de corte, obtidos a partir de análise de concha linear (LA). Para os casos de carga básicas as tensões de membrana podem ser tomadas a partir do Anexo A (8.5.1)

Assim, segundo o Anexo A da EN1993-1-6 as tensões que actuam na casca para cascas cilíndricas não endurecidas são:

Tensão meridional (A.2.1)

$$M = \sqrt{M_x^2 + M_y^2}$$

$$\sigma_{x,Ed} = -F z / 2 \pi r t$$

Tensões de corte (A.2.1)

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$

$$\tau_{x\theta, Ed} = F / \pi r t + M_z / 2 \pi r^2 t$$

É necessária a verificação de segurança da casca da estrutura para Tensões Meridionais. De acordo com o Anexo D, para a Compressão meridional (axial) (D.1.2), para o cálculo das Tensões críticas meridionais (D.1.2.1) e no caso de reservatórios com condições de contorno BC1 ou BC2 em ambas as bordas são utilizadas as seguintes expressões:

O comprimento do segmento do invólucro é caracterizado em termos do parâmetro de comprimento adimensional ω : $\omega = l/r \sqrt{(r/t)} = l/\sqrt{(rt)}$ (D.1)

Com l = comprimento do cilindro entre contornos definidos; r = raio da superfície média do cilindro e t = espessura da casca.

O meridional crítico elástico de encurvadura deve ser obtido a partir de: $\sigma_{x,Rcr} = 0,605 E C_x (t/r)$ (D.2)

Mediante o comprimento do cilindro são definidas condições, neste caso tem-se cilindro longo porque $\omega > 0,5$ (r/t) (D.7), então o factor C_x deve ser encontrado como $C_x = C_{x,N}$ (D.8) em que $C_{x,N}$ é o maior valor entre:

$$C_{x,N} = 1 + 0,2/C_{xb} (1 - 2\omega (t/r)) \text{ (D.9)} \quad \text{e} \quad C_{x,N} = 0,60 \text{ (D.10)}$$

C_{xb} é um parâmetro em função das condições de contorno retirado da tabela D.1. Como as condições de contorno são BC2, temos o Caso 3 e $C_{xb} = 1$.

Determinam-se os parâmetros de encurvadura meridional (D.1.2.2):

O factor de redução meridional de imperfeição elástica deve ser obtido a partir de:

$$\alpha_x = 0,62 / (1 + 1,91 (\Delta \omega_k t)^{1,44}) \text{ (D.14)}$$

Onde a amplitude de imperfeição característica é dada por: $\Delta \omega_k = (1/Q) (\sqrt{(r/t)}) t$ (D.15)

Q é a compressão meridional do parâmetro de qualidade de fabrico. A qualidade de fabricação de parâmetro Q deve ser tomada a partir da tabela D.2 para a classe de qualidade tolerância de fabricação especificado. No nosso caso é excelente, a classe de qualidade de tolerância de fabricação Classe A onde $Q = 40$.

O limite meridional de esbelteza $\bar{\lambda}_{x0}$, o factor de alcance plástico β e o expoente de interação η são dados por: $\lambda_{x0} = 0,20$, $\beta = 0,60$ e $\eta = 1,0$ (D.16)

Determina-se a resistência de projeto através da força de encurvadura (8.5.2), sabendo que as tensões de projeto são obtidas a partir de:

$$\sigma_{x,Rd} = \sigma_{x,Rk} / \gamma_{M1}, \sigma_{\theta,Rd} = \sigma_{\theta,Rk} / \gamma_{M1}, \tau_{x\theta,Rd} = \tau_{x\theta,Rk} / \gamma_{M1} \text{ (8.11)}$$

Sabendo que o factor parcial para resistência à deformação não deve ser tomado como menor do que $\gamma_{M1} = 1,1$. As tensões características de encurvadura devem ser obtidas multiplicando-se o limite de escoamento característico pelos fatores de redução χ :

$$\sigma_{x,Rk} = \chi_x f_{yk}, \sigma_{\theta,Rk} = \chi_\theta f_{yk}, \tau_{x\theta,Rk} = \chi_\tau f_{yk} / \sqrt{3} \text{ (8.12)}$$

Os fatores de redução de encurvadura χ_x , χ_θ e χ_τ devem ser determinados em função da relação de esbelteza da casca a partir de λ :

$$\chi = 1 \text{ quando } \lambda \leq \lambda_0 \quad (8.13)$$

$$\chi = 1 - \beta \left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_p - \lambda_0} \right)^\eta \quad \text{quando } \lambda_0 < \lambda < \lambda_p \quad (8.14)$$

$\chi = \alpha / \lambda^2$ quando $\lambda_p \leq \lambda$ (8.15) Neste caso, em que o comportamento está totalmente elástico, as tensões características de encurvadura podem, alternativamente, ser determinada diretamente a partir de:

$$\sigma_{x,Rk} = \alpha_x \sigma_{x,Rcr}, \quad \sigma_{\theta,Rk} = \alpha_\theta \sigma_{\theta,Rcr} \text{ e } \tau_{x\theta,Rk} = \alpha_\tau \tau_{x\theta,Rcr}$$

O valor do limite de esbelteza relativa plástica deve ser determinado a partir de:

$$\lambda_p = \sqrt{\alpha / (1 - \beta)} \quad (8.16)$$

Os parâmetros de esbelteza relativos ao corte para diferentes componentes de tensão deve ser determinado a partir de:

$$\lambda_x = \sqrt{f_{yk} / \sigma_{x,Rcr}}, \quad \lambda_\theta = \sqrt{f_{yk} / \sigma_{\theta,Rcr}}, \quad \lambda_\tau = \sqrt{(f_{yk} / \sqrt{3}) / \tau_{x\theta,Rcr}} \quad (8.17)$$

Onde $\sigma_{x,Rcr}$, $\sigma_{\theta,Rcr}$ e $\tau_{x\theta,Rcr}$ são as tensões críticas elásticas de encurvadura

É necessária a verificação de segurança da casca da estrutura de acordo com o Anexo D, no caso de Compressão Circunferencial (Aro) (D.1.3) para o cálculo da tensão crítica circunferencial de encurvadura (D.1.3.1)

O comprimento do segmento da casca deve ser caracterizado em termos do parâmetro de comprimento adimensional ω : $\omega = l/r \sqrt{r/t} = l/\sqrt{r \cdot t}$ (D.19)

Mediante o comprimento do cilindro são definidas condições, neste caso tem-se cilindro longo porque $\omega / C_\theta > 1,63(r/t)$ (D.24)

A encurvadura circunferencial elástica crítica deve ser obtida a partir de:

$$\sigma_{\theta,Rcr} = E(t/r)^2 (0,275 + 2,03(C_\theta/\omega \cdot r/t)^4) \quad (D.25)$$

Determinam-se os parâmetros circunferenciais de encurvadura (D.1.3.2), sabendo que o factor de redução de imperfeição elástica circunferencial α_θ deve ser tomado a partir da tabela D.5 para a classe de qualidade tolerância de fabricação especificado. No nosso caso descrição excelente, classe de qualidade de tolerância de fabricação Classe A, onde $\alpha_\theta = 0,75$.

Devem ser considerados os seguintes valores para o limite de esbelteza $\lambda_{\theta 0} = 0,40$, para o factor plástico $\beta = 0,60$ e para o expoente de interação $\eta = 1,0$ (D.26)

Os cilindros não precisam de ser verificados em relação ao corte circunferencial de encurvadura se cumprirem: $r/t \leq 0,21 \sqrt{E/f_y k}$ (D.27)

A distribuição não uniforme da pressão q_w resultante da carga de vento externo sobre cilindros pode ser substituída por uma pressão exterior uniforme equivalente: $q_{eq} = k_w q_{w,max}$ (D.28) onde $q_{w,max}$ é a pressão máxima do vento e $k_w = 0,46(1 + 0,1\sqrt{C_\theta/\omega r/t})$ (D.29), com o valor de k_w dentro do intervalo $0,65 \leq k_w \leq 1$ e C_θ retirado da Tabela D.3 segundo as condições de contorno, no nosso caso $C_\theta = 1$.

A distribuição da pressão do vento ao longo do perímetro da secção da torre cilíndrica é determinante para a estabilidade da casca.

A tensão de cálculo circunferencial a ser introduzida é: $\sigma_{\theta,Ed} = (q_{eq} + q_s)(r/t)$ (D.30)

q_s é a sucção interna causada por ventilação, vácuo parcial interna ou outros fenómenos.

Na Compressão Circunferencial (Aro) **(D.2.3)** é necessário determinar as tensões circunferenciais críticas de encurvadura **(D.2.3.1)**

As espessuras de parede fictícias t_a , t_b e t_c das três secções devem ser determinados como a média ponderada da espessura da parede por cima de cada uma das três secções fictícias:

$$t_a = 1/l_a \sum 1_j t_j \quad \text{(D.58)}$$

$$t_b = 1/l_b \sum 1_j t_j \quad \text{(D.59)}$$

$$t_c = 1/l_c \sum 1_j t_j \quad \text{(D.60)}$$

A secção de três cilindros, isto é, o equivalente de um ou o real respectivamente devem ser substituídos por um único cilindro de comprimento efetivo equivalente l_{eff} e com parede de espessura uniforme $t = t_a$.

O comprimento efetivo deve ser determinado a partir de: $l_{\text{eff}} = l_a / \kappa$ **(D.61)** sendo κ um factor adimensional.

Para as secções de cilindro de comprimento moderado ou baixo, as tensões circunferenciais críticas de buckling de cada secção j do cilindro original de espessura de parede variável deve ser gradual e determinado a partir de: $\sigma_{\theta, \text{Rcr}, j} = (t_a / t_j) \sigma_{\theta, \text{Rcr}, \text{eff}}$ **(D.62)** com $C_\theta = 1,0$.

O comprimento do segmento do invólucro é caracterizada em termos do parâmetro de comprimento adimensional $\omega_j = l/j \sqrt{(r^* t_j)}$ **(D.63)**

A secção de cilindro j deve ser tratada como por muito tempo se: $\omega_j > 1,63 r/t_j$ **(D.64)**

$$\sigma_{\theta, \text{Rcr}, j} = E(t_j/r)^2 (0,275 + 2,03 (1/\omega_j r/t)^4) \quad \text{(D.65)}$$

Também de acordo com o Anexo D, é necessária a verificação de segurança da casca da estrutura ao corte **(D.1.4)** para o cálculo da Tensão crítica de encurvadura ao corte **(D.1.4.1)**

Quando os reservatórios têm as condições de contorno em ambas as bordas BC1 ou BC2 devem ser aplicadas as seguintes expressões:

O comprimento do segmento do invólucro deve ser caracterizado em termos do parâmetro de comprimento adimensional: $\omega = l/r \sqrt{(r/t)} = l/\sqrt{(rt)}$ **(D.31)**

O corte elástico crítico de encurvadura deve ser obtido a partir de: $\tau_{x\theta, \text{Rcr}} = 0,75 E C_\tau \sqrt{1/\omega} (t/r)$ **(D.32)**

Mediante o comprimento do cilindro são definidas condições, neste caso tem-se cilindro de comprimento médio porque $10 \leq \omega \leq 8,7 r/t$ **(D.33)** e o factor $C_\tau = 1,0$ **(D.34)**

Determinam-se os parâmetros ao corte **(D.1.4.2)**, sabendo que o factor de redução de imperfeição elástica α_τ é retirado da tabela D.6 para a classe de qualidade tolerância de fabricação especificado. No nosso caso descrição excelente, classe de qualidade de tolerância de fabricação Classe A onde $\alpha_\tau = 0,75$.

Devem ser considerados os seguintes valores para o limite de esbelteza $\lambda_{t0} = 0,40$, para o factor plástico $\beta = 0,60$ e para o expoente de interação $\eta = 1,0$ **(D.39)**

Os cilindros não precisam ser verificados em relação ao corte de encurvadura se:

$$r/t \leq 16 (E/fyk)^{0,67} \quad (\mathbf{D.40})$$

No nosso caso temos Compressão meridional (axial) em simultâneo com compressão circunferencial (aro) e corte (**D.1.6**) então os parâmetros de interação de encurvadura podem ser obtidos a partir de:

$$k_x = 1,25 + 0,75 \chi_x \quad (\mathbf{D.46})$$

$$k_\theta = 1,25 + 0,75 \chi_\theta \quad (\mathbf{D.47})$$

$$k_\tau = 1,75 + 0,25 \chi_\tau \quad (\mathbf{D.48})$$

$$k_i = (\chi_x \chi_\theta)^2 \quad (\mathbf{D.49})$$

A análise de resistência da casca à encurvadura também é efetuada de acordo com a IEC 61600.

Dentro de cada situação de projeto vários casos de carga de projeto devem ser considerados. No mínimo, deve ser considerado nos casos de carga de conceção na Tabela 2. Nessa tabela, os casos de carga projeto são especificados para cada situação de projeto pela descrição do vento, elétrica e outras condições externas. "U" refere-se a análise de cargas finais, com referência à resistência do material, a deflexão da ponta da lâmina e estabilidade estrutural. Estas cargas de projeto podem ser classificadas como normal (N) ou anormal (A). Casos de carga de projeto normais são esperados para ocorrer com frequência durante a vida de uma turbina. A turbina está em um estado normal ou pode ter experimentado pequenas falhas ou anormalidades. Situações de projeto anormais são menos prováveis de ocorrer e geralmente correspondem a projectar situações com falhas graves que resultam na activação de funções de proteção do sistema. O tipo de situação de projecto, N, A, ou T, determina o factor de segurança parcial γ_f para ser aplicado às cargas finais. Estes fatores são indicados na Tabela 3.

Neste caso da Tabela 2 e admitindo que a situação de projeto é a produção de energia além de ocorrência de falhas, temos o caso DLC 2.3 de carga de projeto onde a condição do vento é EOG $V_{hub} = Vr \pm 2$ m/s e V_{out} e para outras condições de falha elétrica, incluindo a perda externa ou interna da rede elétrica, que corresponde ao tipo de análise U com fatores de segurança parciais A. Quando está parado ou em marcha lenta temos o caso DLC 6.1 de carga de projeto onde a condição do vento é EWM período de recorrência de 50 anos que corresponde ao tipo de análise U com fatores de segurança parciais N.

Assim, temos produção de energia além de ocorrência de falhas ou perda de conexão de rede elétrica (DLC 2.1 – 2.4) (**7.4.2**). Esta situação de projeto envolve um evento transitório provocado por uma falha ou a perda de conexão com a rede elétrica, enquanto a turbina está a produzir energia. Qualquer falha no sistema de controlo e proteção, ou falha interna no sistema elétrico, significativa para o carregamento de turbina eólica (como gerador de curto-circuito) deve ser considerada.

Para DLC 2.3, caso com valor potencialmente significativa, EOG, é combinada com uma falha de sistema elétrico interno ou externo (incluindo perda de conexão com a rede elétrica) e considerado como um evento anormal. Neste caso, o tempo destes dois eventos serão escolhidos para alcançar o pior carregamento.

Considera-se também o caso de paralisação ou marcha lenta designada estacionada (DLC 6.1 – 6.4) (7.4.6). Nesta situação de projeto, o rotor de uma turbina eólica estacionado ou é em um impasse ou em marcha lenta condição. No DLC 6.1, 6.2 e 6.3 desta situação será examinada com a extrema modelo velocidade do vento (EWM).

No DLC 6.1, para uma turbina eólica com um sistema de guinada activo, um desalinhamento guinada de até $\pm 15^\circ$, utilizando o modelo de vento extremo estável ou um desalinhamento média guinada de $\pm 8^\circ$ usando o modelo de vento extremo turbulenta serão impostas, a restrição contra derrapagem no sistema de guinada pode ser assegurada.

Resultados obtidos - gráficos:

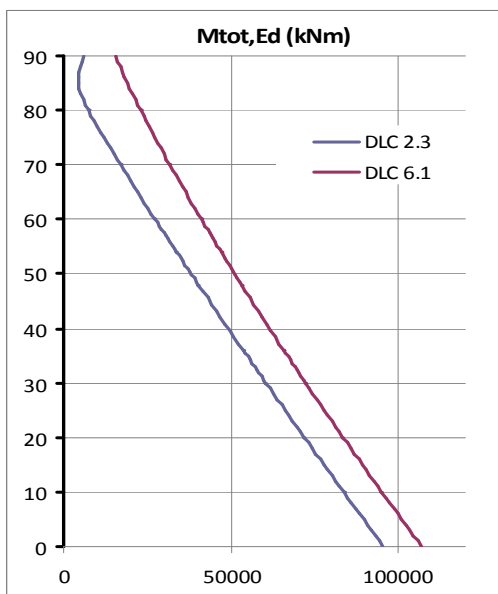


Gráfico 5.1.1 - Bending moment

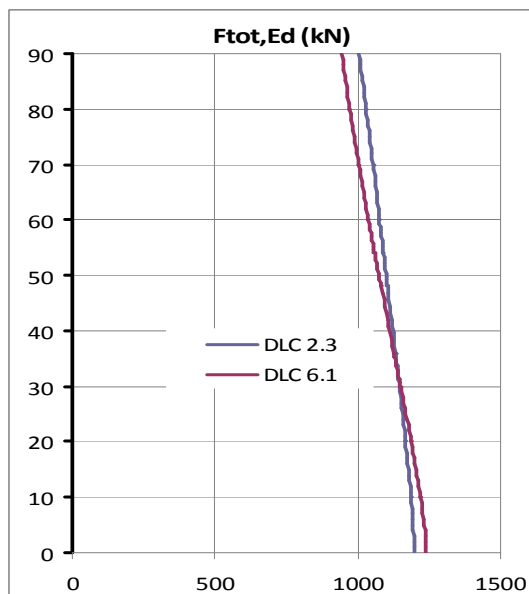


Gráfico 5.1.2 - Shear force

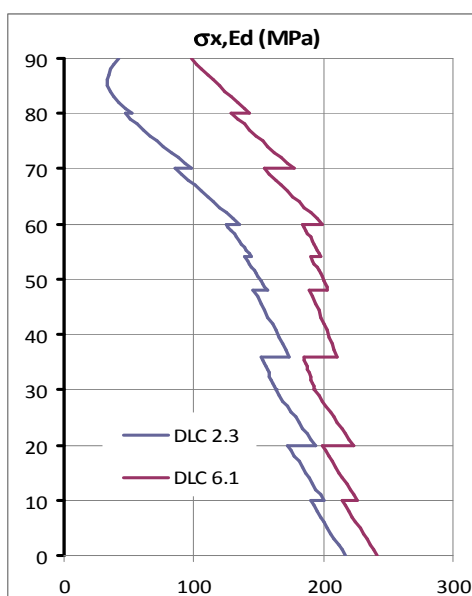


Gráfico 5.1.3 - Normal stress

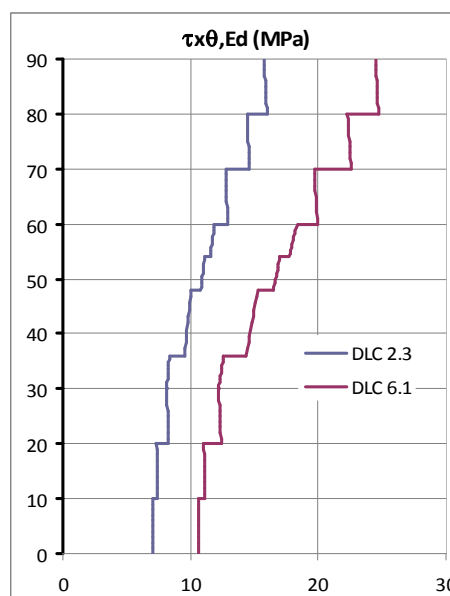


Gráfico 5.1.4 - Shear stress

Resultados obtidos – tabelas do Excel:

Segment	1			2				3		
Section	1	2	3	1	2	3	4	1	2	3

Shell geometry (mm)

L_{tot}	30000			30000				30000		
l	10000	10000	10000	6000	12000	6000	6000	10000	10000	10000
t	38	36	32	32	28	26	25	23	20	18
r	4000	4000	4000	4000	3900	3700	3600	3500	3500	3500
ω	76,9	79,1	83,9	83,9	90,8	96,7	100,0	105,7	113,4	119,5
r/t	105	111	125	125	139	142	144	152	175	194
l_R	3000			3000				3000		

Meridional compression (MPa)

C_x	0,91	0,92	0,93	0,93	0,94	0,93	0,92	0,92	0,94	0,95
$\sigma_{x,Rcr}$	1095,9	1047,1	947,3	947,3	857,1	828,9	814,0	770,1	683,3	623,7
λ_b	0,56	0,57	0,60	0,60	0,63	0,65	0,65	0,67	0,71	0,74
χ_x	0,761	0,752	0,733	0,733	0,712	0,705	0,701	0,689	0,662	0,640
$\sigma_{x,Rk}$	262,4	259,5	252,7	252,7	245,6	243,2	241,8	237,7	228,2	220,6
$\sigma_{x,Rd}$	238,6	235,9	229,7	229,7	223,3	221,1	219,9	216,1	207,5	200,6
$\sigma_{x,Ed}$ EOG	208,7	200,2	193,4	158,8	173,5	156,6	144,7	120,5	98,7	51,9
$\sigma_{x,Ed}$ EWM	233,2	226,1	222,9	189,9	210,6	203,6	198,1	185,6	177,1	143,6

Circumferential compression (MPa)

l_c	10000			6000				10000		
l_b	10000			6000				10000		
l_a	10000			12000				10000		
t_c	38			32				23		
t_b	36			28				20		
t_a	32			25,5				18		
κ	0,5			0,5				0,5		
l_{eff}	20000			24000				20000		
ω_{eff}	56			75				80		
ω_j	25,6	26,4	28,0	16,8	36,3	19,3	20,0	35,2	37,8	39,8
C_θ	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$\sigma_{\theta,Rcr}$	23,3	24,6	27,6	13,1	15,3	17,4	18,6	9,8	11,2	12,5
λ_b	3,85	3,75	3,53	5,14	4,75	4,46	4,31	5,95	5,54	5,26
χ_θ	0,051	0,053	0,060	0,028	0,033	0,038	0,040	0,021	0,024	0,027
$\sigma_{\theta,Rk}$	17,5	18,4	20,7	9,8	11,5	13,0	13,9	7,3	8,4	9,4
$\sigma_{\theta,Rd}$	15,9	16,8	18,9	8,9	10,4	11,8	12,7	6,7	7,7	8,5

Equivalent wind external pressure (MPa)										
k_w	0,650	0,650	0,650	0,650	0,650	0,650	0,650	0,650	0,650	0,650
$q_{w,max,EOG}$	0,20	0,51	0,56	0,59	0,63	0,64	0,66	0,68	0,70	0,72
$q_{eq,EOG}$	0,13	0,33	0,37	0,38	0,41	0,42	0,43	0,44	0,45	0,47
$q_{w,max,EWM}$	0,42	1,20	1,33	1,40	1,50	1,54	1,58	1,63	1,68	1,73
$q_{eq,EWM}$	0,27	0,78	0,87	0,91	0,97	1,00	1,02	1,06	1,09	1,12
q_s	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\sigma_{\theta,Ed,EOG}$	0,01	0,04	0,05	0,05	0,06	0,07	0,07	0,07	0,09	0,10
$\sigma_{\theta,Ed,EWM}$	0,04	0,12	0,15	0,15	0,18	0,19	0,20	0,22	0,26	0,29
Shear (MPa)										
C_τ	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\tau_{x\theta,Rcr}$	170,6	159,4	137,6	137,6	118,7	112,5	109,4	100,7	84,5	74,1
λ_b	1,08	1,12	1,20	1,20	1,30	1,33	1,35	1,41	1,54	1,64
χ_τ	0,579	0,556	0,503	0,503	0,446	0,424	0,412	0,379	0,318	0,279
$\tau_{x\theta,Rk,EOG}$	115,3	110,7	100,2	100,2	88,8	84,5	82,1	75,5	63,4	55,6
$\tau_{x\theta,Rd,EWM}$	104,8	100,6	91,1	91,1	80,7	76,8	74,7	68,6	57,6	50,5
$\tau_{x\theta,Ed,EOG}$	7,1	7,4	8,2	8,1	9,5	10,8	11,5	12,9	14,6	16,0
$\tau_{x\theta,Ed,EWM}$	10,7	11,2	12,4	12,2	14,3	16,4	17,7	19,9	22,6	24,7
Buckling check										
Interaction parameters										
k_x	1,820	1,814	1,799	1,799	1,784	1,779	1,776	1,767	1,746	1,730
k_θ	1,288	1,290	1,295	1,271	1,275	1,278	1,280	1,266	1,268	1,270
k_τ	1,895	1,889	1,876	1,876	1,861	1,856	1,853	1,845	1,830	1,820
k_i	0,001	0,002	0,002	0,000	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000
Check EOG	0,79	0,75	0,75	0,53	0,66	0,57	0,51	0,41	0,36	0,22
Check EWM	0,97	0,94	0,97	0,74	0,95	0,93	0,91	0,88	0,95	0,85

Tabelas 5.1- Verificação da encurvadura

5.2 - Fadiga

Efectuada a análise de resistência à fadiga de acordo com a EN1993-1-9 e a IEC 61600. Verifica-se só para a Flange 1 por ser a mais desfavorável.

A resistência de referência à fadiga considera intervalos de tensões de amplitude constante $\Delta\sigma_c$, correspondente a uma duração à fadiga de $N=2 \times 10^6$ ciclos para uma dada categoria de pormenores.

Para os domínios de tensões nominais de amplitude constante, as resistências à fadiga foram obtidas através de curvas de resistência à fadiga para intervalos de tensões normais ($m=3$ para $N \leq 5 \times 10^6$).

As categorias de resistência à fadiga são determinados de acordo com os pormenores dos elementos em causa, neste caso soldaduras transversais de topo para chapas curvas, isto é categoria $\Delta\sigma_c=71$ (Quadro 8.3 do EC 3).

No estado limite de fadiga para as cargas de fadiga o número de ciclos N a 20 anos é $N=800 \times 10^6$ ciclos e a tensão de alcance $\Delta\sigma$ é retirada de gráficos da EN 1993 - 1 - 9

Na análise de fadiga e projeto aplicada a torres eólicas, a resistência à fadiga é representada pelas curvas "SN" e a variação da resistência à fadiga por tensão nominal é representado por uma série de Curvas $(\log \Delta\sigma_R) - (\log n)$.

A avaliação da fadiga deve ser levada a cabo usando intervalos nominais de tensão para detalhes apresentados em tabelas.

$\Delta\sigma$: faixa de tensão (tensão normal)

$\Delta\tau$: faixa de tensão (tensão de corte)

$\Delta\sigma_{E2}$ e $\Delta\tau_{E2}$ faixa gama de tensão de amplitude constante equivalente relacionada a 2×10^6 ciclos.

O valor gama de tensão a ser utilizado para a avaliação de fadiga devem ser as tensões gama $\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E2}$ correspondendo a $NC = 2 \times 10^6$ ciclos.

Da IEC 61600 são retirados os seguintes parâmetros:

- Factor de segurança parcial para cargas **(7.6.3.1)**: O factor de segurança parcial para cargas para todas as situações normais e anormais de projeto é $\gamma_{Ff} = 1,0$
- Factores de segurança parciais relativos aos materiais onde os códigos reconhecidos não estão disponíveis **(7.6.3.2)**, assim o factor de segurança parcial é $\gamma_n = 1,15$ porque temos componentes da classe 2.

Resultados obtidos:

D.C.	$\Delta\sigma_c$	$\Delta\sigma_D$	$\Delta\sigma_L$	ΣDi
Flange 1	71	52	29	0,868

Tabela 5.2.1 – Verificação da fadiga

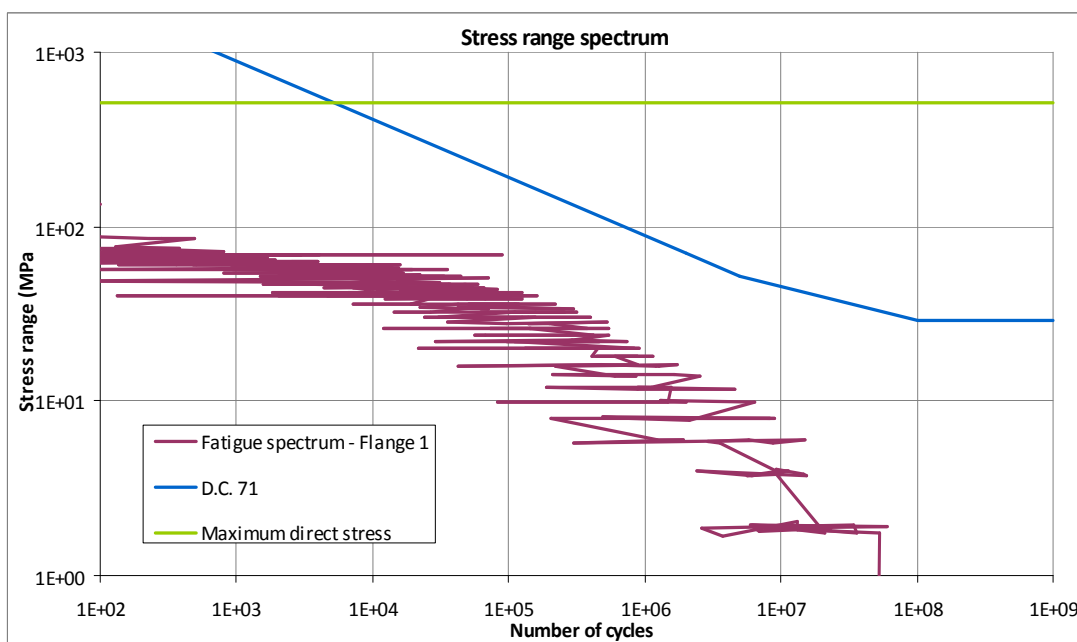


Gráfico 5.2.1 – Curvas da Fadiga

5.3 - Vento

Efectuada a análise de resistência ao vento de acordo com a IEC61400 e a carga de vento na torre de acordo com a EC1-1-4.

Duas situações extremas são consideradas:

- Condições de operação (DLC2.3)
- Condição não-operacional (DLC6.1)

Condição Extrema Operacional:

- É considerada a situação da produção de energia e a ocorrência de falhas ou perda de conexão de rede elétrica (DLC 2.3) ou seja, o vento potencialmente significativo, EOG, é combinado com uma falha de sistema elétrico interno ou externo (incluindo perda de conexão com a rede elétrica) e considerada como um evento anormal;
- As cargas ao longo da altura da torre são obtidas a partir de EC1-1-4 considerando a velocidade de base obtida a partir da velocidade do vento na altura do cubo V_{hub} ;
- O tipo de análise estrutural será a análise de estado limite último relacionado a materiais e para a estabilidade estrutural com cargas anormais (A). Assim teremos fatores parciais de segurança aplicados a carga iguais a 1.1 (desfavoráveis) e 0.9 (favoráveis).

Condição Extrema não-operacional :

- Nesta condição a turbina está em posição de repouso e o efeito do vento é obtido apenas a partir da pressão sobre a torre;
- O Modelo de vento extremo (EWM) é utilizado com a velocidade de referência e factor de turbulência para a classe II-A;

O tipo de análise estrutural será a análise de estado limite último relacionado a materiais e para a estabilidade estrutural usando carga normal (N). Assim os fatores de segurança parciais aplicados a carga são 1,35 (desfavoráveis) e 0,9 (favoráveis).

A escolha da classe da turbina eólica (6.2), depende das condições do local. As classes de turbinas eólicas são definidas em termos de velocidade do vento e parâmetros de turbulência.

A Tabela 1 especifica os parâmetros básicos, que definem as classes de turbinas eólicas. Os valores dos parâmetros aplicam-se em função da altura do cubo onde V_{ref} é a velocidade de referência do vento com 10 min de velocidade média extrema do vento à altura do cubo com um período de retorno de 50 anos e densidade do ar 1.225 kg/m^3 e I_{ref} é a intensidade de referência turbulência: valor esperado de intensidade de turbulência da altura do cubo (coeficiente de variação da velocidade do vento), a uma velocidade média do vento de 10 min a 15 m/s.

Neste caso a velocidade básica do vento v_b (m/s) para uma altura de referência de 10m é em função do modelo de velocidade extrema do vento EWM (6.3.2.1) onde os modelos de vento baseiam-se na velocidade de referência vento V_{ref} e num desvio padrão de turbulência fixo σ_1 .

Para o modelo de vento extremo constante, a velocidade extrema do vento, V_{e50} , com um período de recorrência de 50 anos, e a velocidade do vento extremo, V_{e1} , com um período de recorrência de um ano, será calculada em função da altura, z , usando as seguintes equações:

$$V_{e50}(z) = V_{ref} (z/z_{hub})^{0,11} \quad (12) \quad \text{e} \quad V_{e1}(z) = 0,8 V_{e50}(z) \quad (13)$$

Para o modelo de velocidade extrema do vento turbulento, a velocidade do vento média 10min como funções de z com períodos de recorrência de 50 anos e um ano, respectivamente, será dado por:

$$V_{50}(z) = V_{ref} (z/z_{hub})^{0,11} \quad (14)$$

$$V_1(z) = 0,8 V_{50}(z) \quad (15)$$

O desvio padrão longitudinal da turbulência será: $\sigma_1 = 0,11 V_{hub}$ (16)

Considerando também uma rajada extrema em EOG (6.3.2.2), onde a rajada de magnitude da altura do cubo V_{gust} será dada para as classes de turbinas eólicas convencionais pela seguinte relação: $V_{gust} = \text{Min}(1,35(V_{e1} - V_{hub}); 3,3(\sigma_1/1+0,1(D/\Lambda_1)))$, (17), com D = diâmetro do rotor em que o parâmetro de escala de turbulência longitudinal Λ_1 é dado por:

$$\Lambda_1 = 0,7z \quad z \leq 60\text{m} \quad \text{ou} \quad \Lambda_1 = 42\text{m} \quad z \geq 60\text{m} \quad (5)$$

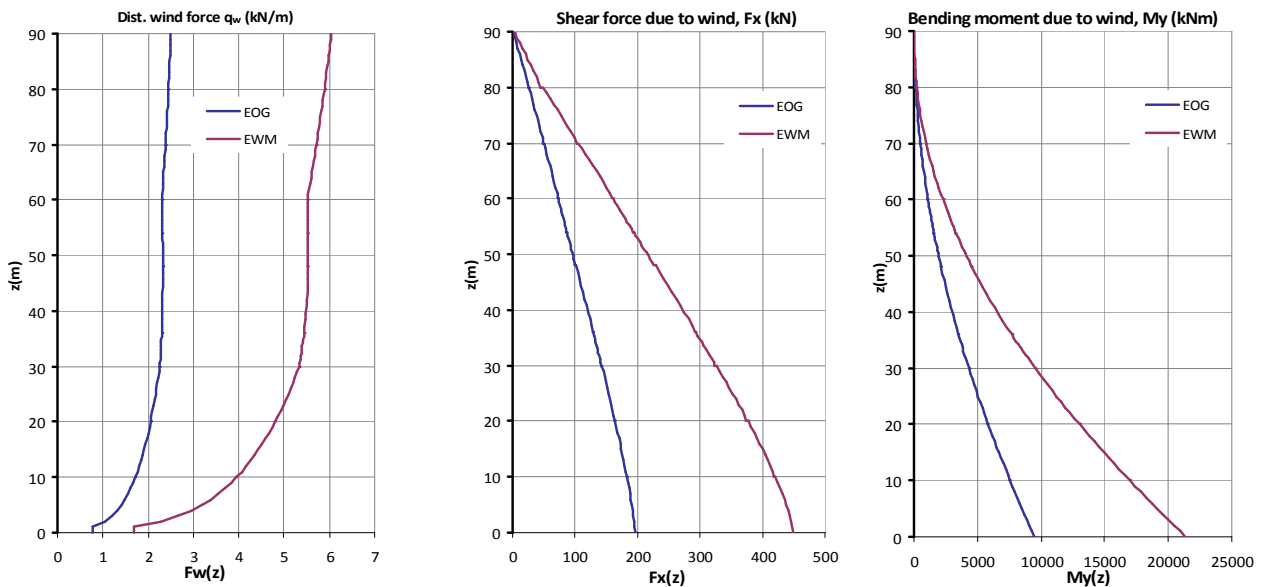


Gráfico 5.3.1 a, b e c – Resultados das forças do vento

5.4 - Cálculo da 1ª frequência própria e frequências de trabalho

Foi empregue o método de Rayleigh (método de determinação da 1ª frequência natural) com a utilização da seguinte equação:

$$\omega = \sqrt{g \frac{\sum_{i=1}^M m_i d_i}{\sum_{i=1}^M m_i d_i^2}}$$

Obteve-se:

ω (rad/s)	1,776	Angular frequency
f (Hz)	0,283	Frequency
T (s)	3,539	Period

Quadro 5.4.1 1ª frequência por Rayleigh

Modo	-	Unid.	Valor
1P	Velocidade mínima do rotor	rpm	7
	Velocidade máxima do rotor		22,0
	Mínima frequência do rotor	Hz	0,12
	Máxima frequência do rotor		0,37
1P+0,1(1P)	Mínima frequência do rotor	Hz	0,13
	Máxima frequência do rotor		0,40
1P-0,1(1P)	Mínima frequência do rotor	Hz	0,11
	Máxima frequência do rotor		0,33
3P	Mínima frequência do rotor	Hz	0,35
	Máxima frequência do rotor		1,10
3P+0,1(1P)	Mínima frequência do rotor	Hz	0,36
	Máxima frequência do rotor		1,14
3P-0,1(1P)	Mínima frequência do rotor	Hz	0,34
	Máxima frequência do rotor		1,06
Modo 1 - análise por Rayleigh	Frequência modal		0,283

Quadro 5.4.2 - Verificação das frequências

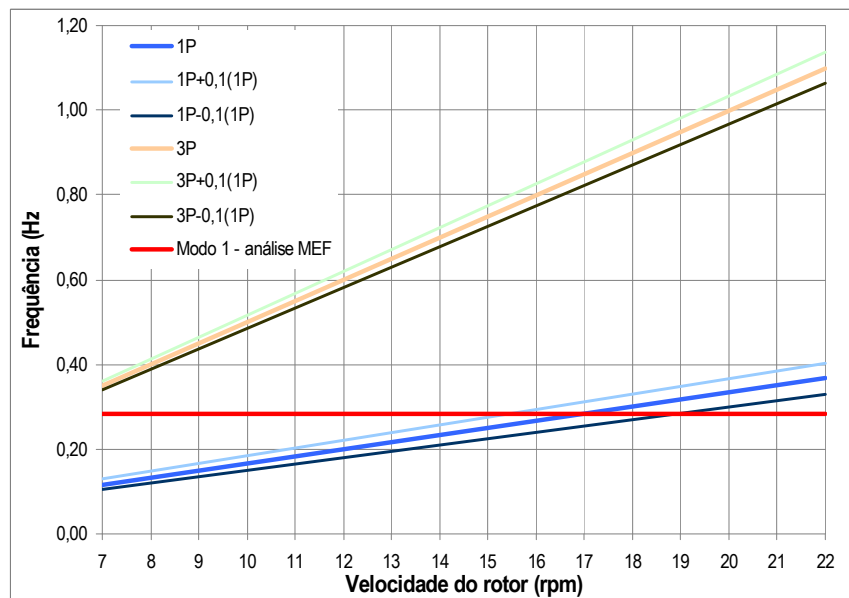


Gráfico 5.4.1 - Frequências na gama de trabalho

A torre apresentará um funcionamento suave (Erich Hau), ainda mais que adiante se verificará com o Abaqus que a 1ª frequência será 0,205Hz, um valor inferior ao obtido pelo método de Rayleigh.

5.5 – Ligações por atrito – flanges e parafusos

O tipo de ligação é identificado pela imagem seguinte.

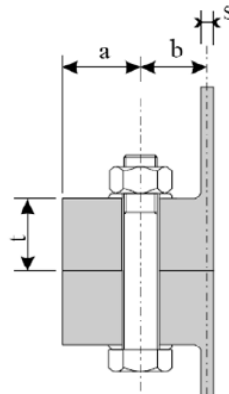


Fig 19 – Ligação por flange

No dimensionamento das flanges optou-se para dar mais resistência às mesmas, pelo aumento das dimensões (a e t da fig.19), como tem feito a empresa Vestas, pelos motivos:

- Com as soldaduras há sempre tensões residuais que podiam deformar a face da flange e com o aperto iriam agravar-se;
- Maior protecção contra deformações em qualquer fase do processo desde o seu fabrico, durante a fabricação da torre, no transporte, na montagem e em funcionamento.
- Necessitarem de menor aperto pelos parafusos quando se aumenta unicamente o comprimento – a (da Fig. 19);
- Proporcionarem maior resistência à encurvadura nas proximidades;
- Elas têm de facilitar a montagem e não podem haver muita folga nos furos destinados aos parafusos, pelo que não podem sofrer deformações no seu diâmetro, caso contrário para a montagem que se podia complicar, no mínimo seria necessário um hidráulico, dentro da torre com 4m de comprimento, para ajudar a montagem, o que não é muito prático;
- As deformações também podem facilitar a corrosão, pela entrada de humidade e ou pelas tensões geradas o que é de evitar;

Também se procurou minimizar o comprimento b de modo que uma chave de caixa entre.

a	Distance from the bolt axis to the flange edge
A_s	Core area of the bolt
b	Distance from the bolt axis to the shell mid-plane
b_{fl}	Flange width
c	Arc length between two consecutive bolts (segment width)
c'	Segment width reduced of the bolt hole
d_0	Bolt hole diameter
d_w	Washer diameter
f_{yb}	Yield strength of the bolt

f_{ub}	Tensile strength of the bolt
$f_{y, fl}$	Flange yield stress
F_{Ed}	Design load
$F_{t,Rd}$	Design tensile resistance of bolt (acc. to EC3-1-8)
$M_{pl,Rd,sh}$	Plastic bending resistance of shell
$M_{N,pl,Rd,sh}$	Plastic bending resistance of shell considering M-N interaction
$M_{pl,Rd,fl,net}$	Plastic bending resistance of the net cross-section of the flange
$N_{pl,Rd,sh}$	Plastic axial resistance of shell
n_B	No. of bolts
t	Flange thickness
s	Shell thickness
$Z_{ult,1}$	Failure of the bolt
$Z_{ult,2}$	Bolt failure and plastic mechanism in the shell
$Z_{ult,3}$	Plastic hinges in the shell and flange

Tabela 5.5.1 – Simbologia utilizada

Section	z (m)	D (m)	A (m ²)	I (m ⁴)	s (mm)	$\sigma_{x,Ed}$ (T)	$f_{y,sh}$ (MPa)	$f_{y,fl}$ (MPa)
Flange 1	30	4,000	0,399	0,785	32	-176,2	345	335
Flange 2	60	3,500	0,251	0,380	23	-181,5	345	335

Quadro 5.5.1 – Características por cada flange

Bolts	Grade	Bolt	A_s (mm ²)	f_{yb}	f_{ub}	d_0
Flange 1	10,9	M42	1121	900	1000	45
Flange 2	10,9	M36	817	900	1000	39

Quadro 5.5.2 – Parafusos (Bolts)

Geometry	b_{fl} (mm)	t (mm)	a (mm)	b (mm)	n_B	c (mm)	c' (mm)	b-s/2 (mm)
Flange 1	240	125	155	69,0	140	85,9	40,9	53
Flange 2	240	110	165	63,5	120	87,7	48,7	51

Quadro 5.5.3 – Geometria da flange

	$F_{t,Rd}$ (kN)	$N_{pl,Rd,sh}$	$M_{pl,Rd,sh}$	$M_{N,pl,Rd,sh}$	$M_{pl,Rd,fl,net}$	$Z_{ult,1}$	$Z_{ult,2}$	$Z_{ult,3}$	$Z_{ult,min}$
Flange 1	807,1	948,8	7,6	4,8	53,58	807,1	579,7	807,0	579,7
Flange 2	588,2	695,9	4,0	2,4	49,35	588,2	435,4	764,2	435,4

Quadro 5.5.4 – Mecanismos de falha

c_{sh} (mm)	F_{Ed} (kN)	Ratio	
89,8	506,1	87%	OK
91,6	382,5	88%	OK

Quadro 5.5.5 – Confirmação da resistência

5.6- Acção sísmica

O Espectro de resposta elástica horizontal segundo a NP EN1998-1: 2010 é obtido por:

$$0 \leq T \leq T_B: S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \left[1 - \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2.5 - 1) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C: S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5$$

$$T_C \leq T \leq T_D: S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \cdot \left[\frac{T_C}{T} \right]$$

$$T_D \leq T \leq 4s: S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \cdot \left[\frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right]$$

Zona Sísmica - Ação Tipo 1	-	1.6
$a_{gR, \text{Tipo 1}}$	m/s^2	0,35
Zona Sísmica - Ação Tipo 2	-	2.4
$a_{gR, \text{Tipo 2}}$	m/s^2	1,10
Tipo de terreno	-	A
Amortecimento ξ	%	1
Fator de correção η	-	1,29
$\gamma_{I, \text{Tipo 1}}$	-	1,00
$\gamma_{I, \text{Tipo 2}}$	-	1,00
$q_{\text{horizontal}}$	-	1,50
q_{vertical}	-	1,50
β	-	0,20
$S_{\text{MAX, Tipo 1}}$	-	1,00
$S_{\text{MAX, Tipo 2}}$	-	1,00
$T_{B, \text{Tipo 1}}$	s	0,10
$T_{B, \text{Tipo 2}}$	s	0,10
$T_{C, \text{Tipo 1}}$	s	0,60
$T_{C, \text{Tipo 2}}$	s	0,25
$T_{D, \text{Tipo 1}}$	s	2,00
$T_{D, \text{Tipo 2}}$	s	2,00
$a_{g, \text{Tipo 1}}$	m/s^2	0,35
$a_{g, \text{Tipo 2}}$	m/s^2	1,10
$S_{\text{Tipo 1}}$	-	1,00
$S_{\text{Tipo 2}}$	-	1,00
v_s	m/s	800

Tabela 5.4.1 - Dados para este projecto, a ser instalado na zona de Coimbra.

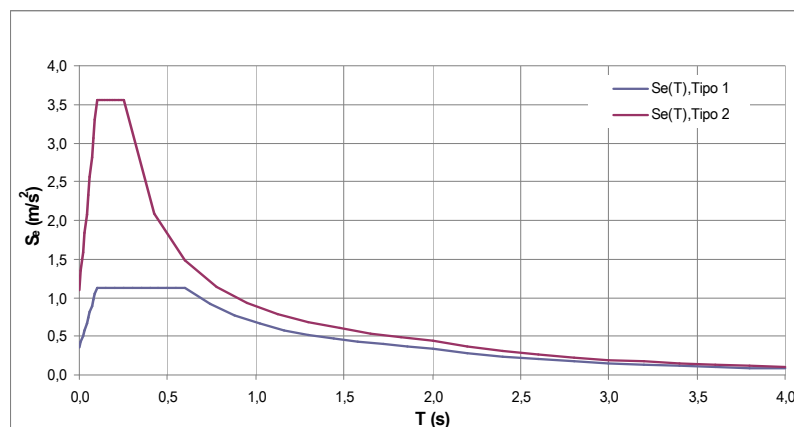


Gráfico 5.6.1 - Espectro de resposta elástica horizontal

O Espectro de resposta elástica vertical segundo a NP EN1998-1: 2010 é obtido por:

$$0 \leq T \leq T_B: S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot \left[1 - \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 3.0 - 1) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C: S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot \eta \cdot 3.0$$

$$T_C \leq T \leq T_D: S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot \eta \cdot 3.0 \cdot \left[\frac{T_C}{T} \right]$$

$$T_D \leq T \leq 4s: S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot \eta \cdot 3.0 \cdot \left[\frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right]$$

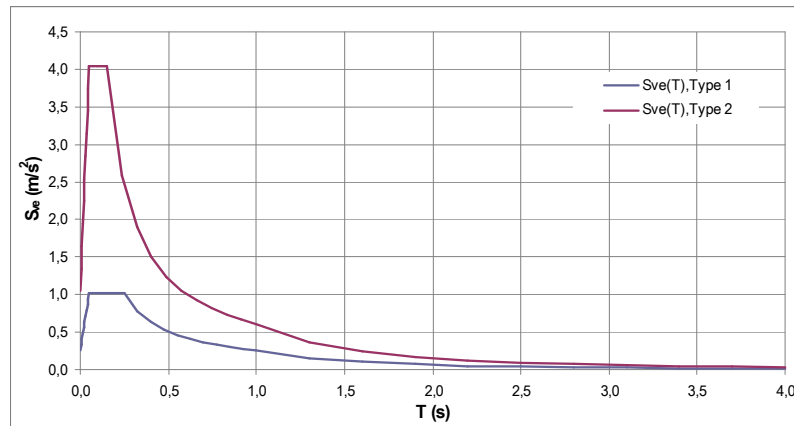


Gráfico 5.6.2 - Espectro de resposta elástica vertical

Para os cálculos o Anexo Nacional NA apresenta os parâmetros determinados a nível nacional (NDP) relativos aos princípios e regras de aplicação onde são permitidas opções nacionais.

No dimensionamento das estruturas em Portugal Continental devem ser considerados dois tipos de acção sísmica que decorre do facto de haver dois cenários de geração dos sismos que podem afectar Portugal. A Acção Sísmica Tipo1 é referente a sismos com epicentro na região Atlânticas e a Acção Sísmica Tipo2 é referente a sismos com epicentro no território Continental ou no Arquipélago dos Açores. Assim para Coimbra tem-se a Acção Sísmica Tipo 1- Zona sísmica 1,6 e aceleração $a_{gR}=0,35$ (m/s²) e para Acção Sísmica Tipo 2 - Zona sísmica 2,4 e aceleração $a_{gR}=1,1$ (m/s²)

Em Portugal os valores da aceleração máxima de referência a_{gR} (m/s²) para as várias zonas sísmicas e para os dois tipos de acção sísmica Tipo1 ou Tipo2 estão indicados no Quadro NA.I.

Para a definição dos espectros de resposta elásticos, o valor do parâmetro S depende de S_{max} e varia em função do valor de cálculo da aceleração à superfície a_g de um terreno do tipo A.

O Quadro NA-3.2 apresenta valores dos parâmetros definidores do espectro de resposta elástico para a Acção Sísmica Tipo 1 e o Quadro NA-3.3 apresenta valores dos parâmetros definidores do espectro de resposta elástico para a Acção Sísmica Tipo 2.

O Quadro NA-3.4 apresenta valores dos parâmetros definidores do espectro de resposta elásticos verticais para a Acção Sísmica Tipo 1 e Tipo 2.

Os coeficientes de importância γ_1 a adotar são indicados no Quadro NA.II e os valores do coeficiente de redução v a adotar mediante o tipo de acção sísmica estão indicados no quadro NA.III.

A acção sísmica de projeto é expressa em termos de acção sísmica de referência associada a uma probabilidade de excedência de referência em 50 anos $P_{NCR} = 10\%$ e um período de retorno de referência $T_{NCR} = 475$ anos.

O perigo é descrito em termos de um único parâmetro, ou seja, o valor da aceleração de pico do solo de referência do tipo A, a_{gr} .

A aceleração de pico do solo em qualquer tipo de terreno é $S \cdot a_{gr}$ onde S é o parâmetro do solo onde cinco tipos de solo padrão são considerados, A - duro a E - suave.

O espectro de resposta elástica em termos de aceleração é definida para os componentes de translação horizontal para o componente de translação vertical e para os componentes rotacionais.

Para torres, antenas e chaminés, de acordo com a secção transversal dos membros, o comportamento elástico para o Estado Limite Último apropriado, o factor de q não deve exceder 1,5.

Os limites de deformação são estabelecidos com deslocamento superior $<0,5\%$ da altura da torre, com referência a uma acção sísmica que tem uma probabilidade de ocorrência mais elevada utilizando o seguinte factor de redução v que multiplica a carga sísmica de projeto:

Acção sísmica tipo 1, $v=0,4$

Acção sísmica tipo 2, $v=0,55$

Os valores dos períodos T_B , T_C , T_D e do coeficiente de solo S que descrevem a forma do espectro de resposta elástica dependem do tipo de terreno.

Os Quadros 3.2 e 3.3 apresentam valores recomendados dos parâmetros que descrevem os espectros de resposta elástica do tipo 1 e do tipo 2, respectivamente.

O valor do coeficiente de correlação do amortecimento é dado por $\eta = \sqrt{(10/(5+\xi))} \geq 0,55$, em que ξ é o amortecimento viscoso da estrutura em %.

O espectro der resposta elástica de deslocamento $S_{De}(T)$ é obtido por transformação direta do espectro de resposta elástica de aceleração $S_e(T)$: $S_{De}(T) = S_e(T) \cdot (T/2\pi)^2$, aplicado para períodos de vibração não superiores a 4,0s.

O Quadros 3.4 apresenta valores recomendados dos parâmetros que descrevem espectros de resposta elástica verticais.

O valor de cálculo do deslocamento à superfície do terreno corresponde ao valor de cálculo da aceleração à superfície do terreno: $d_g=0,025*a_g*S*T_C*T_D$.

As acelerações sísmicas previstas para o local não vão exigir qualquer reforço estrutural.

6 – Verificação por elementos finitos - Abaqus

Foram aplicadas as cargas fornecidas no enunciado, cargas permanentes e uma força no topo da torre equivalente à acção sísmica. Concluiu-se que a combinação EWM é a condicionante.

Foi usada uma lei bi-linear para descrever o comportamento do material aço da classe S355. Os elementos finitos utilizados foram de 1ª ordem, do tipo S4R (integração reduzida).

6.1 - Modos de vibração obtidos da análise no Abaqus



Fig. 20 - 1º modo: 0.205Hz (xx)



Fig. 21 - 2º modo: 0.205Hz (yy)



Fig. 22 - 3º modo: 1.01Hz (xx)



Fig. 23 - 4ºmodo: 1,01Hz (yy)

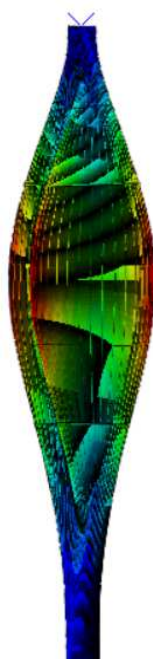


Fig. 24 - 5º modo: 1.71Hz (modo torsional)



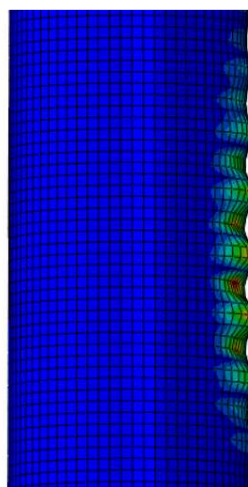
Fig. 25 - 6º modo: 1.71Hz (modo torsional)

6.2 - Modos de encurvadura

Modo 1 de encurvadura



Fig. 26



Pormenor da zona crítica

Fig. 27 - 1º modo de encurvadura: carga crítica horizontal de valor 12117kN

Modo 5 de encurvadura

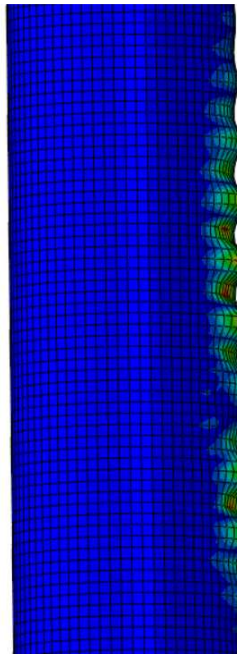


Fig. 28 - 5º modo de encurvadura (a título de exemplo)

6.3 - Tensões máximas na torre (análise GMNIA)

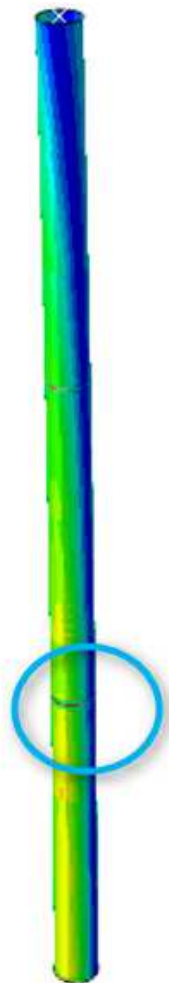


Fig. 28

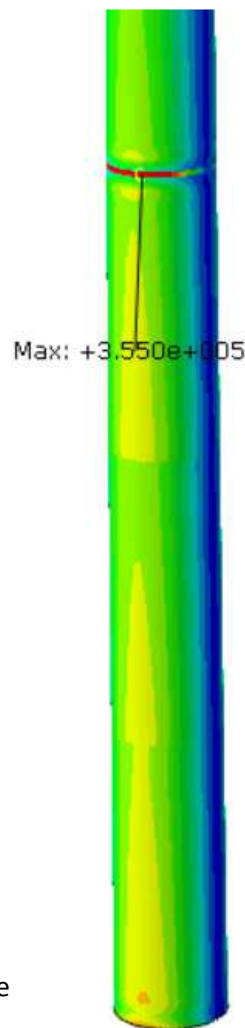


Fig. 29

6.4 - Deslocamento máximo atingido no topo da torre

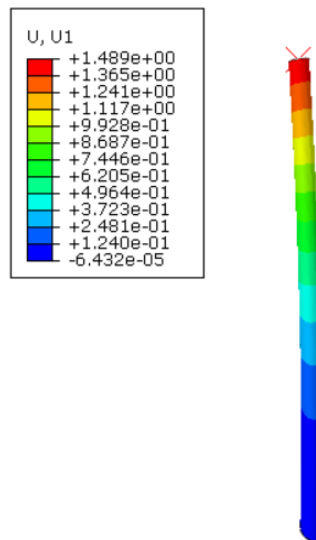


Fig. 30

7 – Conclusão

A estrutura da torre atende o pedido neste trabalho, contudo ela devia ser mais leve.

Foi verificada ainda a utilização de um aço mais resistente como o S450 com $f_y = 430\text{MPa}$, para espessuras $>16\text{mm}$, de acordo com a EN10025, mas não se chegava aos 10% de poupança em peso e provavelmente o preço agrava-se mais do que 10% (Chris Dolling).

Há interesse em que haja uma redução do peso para economizar em especial na mão-de-obra e no transporte.

Possivelmente a solução para reduzir custos passará por utilizar um aço mais resistente do que este, apesar de ser mais caro mas, que possibilite a sua deformação na calandra e a soldadura não levante problemas de fissuração. Tal deve ser o que está a fazer a Vestas que reduziu a espessura das chapas nas suas novas torres e está a empregar um cilindro interior antes do topo, que é cheio de areia para absorver as vibrações.

8 - Normas utilizadas na concepção e dimensionamento deste projecto:

IEC61400

EN10025

NP EN1991-1-4

EN 1993-1-6

NP EN 1993-1-8: 2010

NP EN 1993-1-9: 2010

NP EN1998-1: 2010

9 - Bibliografía

Bruno P. Feijó, Otimização de Torres de Aço Tubulares para Geradores Eólicos, Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil, 2010;

Bruno P. Feijó et al, Otimização Estrutural de Torres de Aço Tubulares para Geradores Eólicos, Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil, 2010;

Carlos Rebelo, manuais das aulas de mestrado/doutoramento, 2013/2014, Universidade de Coimbra, Portugal, 2013;

Carlos Rebelo, Training Course – Wind Tower: Design by FEM and Technological Features, Universidade de Coimbra, Portugal, 2011;

Chris Dolling, Material Selection, STEEL MANAGER LIMITED, 2006, <http://steelmanager.eu>;

Erich Hau, Wind Turbines - Fundamentals, Technologies, Application, Economics, Germany, 2nd edition, Translation by Springer, United Kingdom, 2006;

Luís Oliveira, Análise do Comportamento Dinâmico de Torres de Geradores Eólicos, Mestrado Integrado em Engenharia Civil, 2011/2012 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2012

Olivier Hechler et al, Right Choice of Steel, ArcelorMittal Esch, Luxembourg, 2009
Vestas Wind Systems A/S, Description of Standard Gravity Anchor Foundation V80-V90-V100-V112, Denmark, 2011;

Wylliam Husson, Friction Connections with Slotted Holes for Wind Towers, Luleå University of Technology, Department of Civil, Mining and Environmental Engineering, Division of Structural Engineering, 2008;