

Dimensionamento da Estrutura em Casca de uma Torre Tubular de Aço para Aero gerador de Eixo Horizontal

Iálysson da Silva Medeiros¹, Douglas Mateus de Lima², Luis Ernesto de Medeiros Alas³, Pablo Aníbal López-Yáñez⁴

¹ UFPE – Universidade Federal de Pernambuco / Centro Acadêmico do Agreste / Núcleo de Tecnologia / ialysson.medeiros@ufpe.br

² UFPE – Universidade Federal de Pernambuco / Centro Acadêmico do Agreste / Núcleo de Tecnologia / douglas.mlima@ufpe.br

³ UFPE – Universidade Federal de Pernambuco / Centro Acadêmico do Agreste / Núcleo de Tecnologia / luis.alas@ufpe.br

⁴ UFPE – Universidade Federal de Pernambuco / Centro de Tecnologia e Geociências / Departamento de Engenharia Civil / lopez.yanez@yahoo.com.br

Resumo

Nos últimos anos, cresce a utilização da energia oriunda da ação do vento, que, para aumentar a potência gerada, é necessário utilizar torres mais altas buscando ventos mais fortes. Visando o desenvolvimento das análises estruturais dessas torres com as características das solicitações presentes no Brasil, e, ainda, buscando nacionalizar e normatizar os projetos, este trabalho tem como objetivo realizar o projeto estrutural da estrutura em casca de uma torre de aço S355J2 com 80 m de altura (modelo MM92) compatível a um aerogerador SWT-2.3-93. A torre possui formato tronco-cônico vazado com diâmetro externo variando linearmente ao longo da altura, e consiste em três seções montadas com conexões intermediárias. Os casos de cargas exercidas pelo vento são previstos no IEC 61400-1:2019 partindo da combinação dos modos operacionais ou situações externas ligadas ao funcionamento e condições normais de projeto ou extremas apropriadas, situações de falha e condições adequada de vento e transporte, instalação e manutenção. As verificações de projeto preveem a comparação entre as tensões solicitantes e resistentes nas direções meridional, circunferencial e cisalhamento, conforme as recomendações da EN 1993-1-6:2007. Comparando as tensões meridionais, observa-se uma taxa de utilização de 99,94% considerando a influência da pressão interna. As tensões circunferenciais possuem uma taxa de utilização insignificante comparadas às tensões meridionais. Já as tensões cisalhantes tem seu comportamento praticamente constante ao longo da torre, possuindo uma taxa de utilização de 52,31%. Na interação, observa-se que a tensão meridional é preponderante, devido ao fato de estar ligada aos esforços axiais causados pelo peso próprio da estrutura, dos equipamentos, carga eólica decorrente do funcionamento do gerador e do desaprumo da torre, chegando a uma taxa de 99,91%. Conclui-se que esses resultados contribuem para o interesse prático, uma vez que é perceptível a ampliação da implantação de novas torres para a geração de energia.

Palavras-chave

Energia eólica; torre do aerogerador; estrutura de aço; estrutura em casca; segurança estrutural.

Introdução

Existe uma tendência para o crescimento na demanda energética mundial principalmente devido a melhoria da qualidade de vida da sociedade, elevando a preocupação com vários aspectos de planejamentos de políticas energéticas (MARTINS, GUARNIERI; PEREIRA, 2008). O estudo e a pesquisa sobre fontes energéticas é um dos tópicos mais comentados e relevantes da atualidade. A preocupação com o meio ambiente e os esforços para a redução das emissões de Gases de Efeito

Estufa (GEE), permitiram analisar e buscar alternativas para que pudessem suprir as necessidades econômicas, e paralelamente gerar menos impacto ambiental.

É nesse contexto, que ao longo dos anos têm sido desenvolvidas algumas alternativas em relação a geração de energia, sempre levando em consideração os impactos ambientais gerados, as questões tecnológicas, políticas e sociais, como as hidroelétrica, termoelétrica, biomassa, de marés, eólica, entre outras (ABRAMOWSKI; POSORSKI, 2000; MARTINS, GUARNIERI; PEREIRA, 2008; BRASIL, 2010). Dentro de várias possibilidades de fontes de energias renováveis que gerem menos impactos ambientais e que não emitam gases para o efeito estufa, as fontes de energia eólicas têm se destacado devido algumas de suas características em termos de produção, segurança de fornecimento e sustentabilidade ambiental (EWEA, 2010).

Tendo em vista esses aspectos, atrelado a ausência de normas regulamentadoras nacionais específicas e a busca cada vez maior do aperfeiçoamento dos estudos acerca da estrutura das torres eólicas, torna-se necessário o desenvolvimento de pesquisas que visem um detalhamento estrutural e um aprimoramento no desempenho dos componentes constituintes das estruturas dessas torres.

Diversos autores vêm desenvolvendo pesquisas relacionadas à projeto, análise e otimização estrutural das torres tubulares de aço para aerogeradores de eixo horizontal, e seus componentes, podendo destacar os estudos de Negm e Maalawi (2000), Lima (2011), Feijó (2010), Lima (2018), Hernandez-Estrada (2021), Li *et al.* (2018), Axisa *et al.* (2017).

Visto a importância dos estudos e realização de projetos de torres tubulares de aerogeradores, o presente trabalho visa o desenvolvimento de um projeto estrutural detalhado da geometria em casca de uma torre tubular de aço com cerca de 80 m de altura de suporte a um aerogerador de eixo horizontal. Ademais, serão obtidos resultados acerca do projeto em âmbito nacional, observado que há necessidade de conteúdos no setor de torres tubulares, por haver ausência de normas nacionais e também escassez de projetos estruturais com detalhamentos.

Parâmetros de Projeto

Foi adotado para o presente trabalho uma torre tubular de aço modelo MM92 de aço S355J2 com uma altura cerca de 80 m, que consiste em três seções montadas com duas conexões intermediárias de flange-L. Para efeito de cálculo, esses segmentos que possuem alturas determinadas, foram considerados como quatro torres de comprimentos iguais aos dos segmentos, porém, a seção localizada na base teve seu comprimento dividido em dois segmentos, resultando em um total de quatro torres no formato tronco-cônico vazado de comprimentos conhecidos. A torre é compatível com um aerogerador padrão modelo SWT-2.3-93 de acordo com SIEMENS (2018), sendo suas características especificadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Dados padrões do aerogerador.

Tipo de parâmetro	
Classe segundo IEC (<i>Internation Electrotechnical Commission</i>)	IIA
Potência nominal (MW)	2,3
Diâmetro do rotor (m)	93,0
Número de pás	3,0
Área varrida pelo rotor (m ²)	6793
Altura do cubo do rotor (m)	82,0
Regulação de potência	Ângulo de passo regulado
Peso da nacele (tf)	82
Peso do rotor (tf)	60

Os comprimentos determinados para cada segmento de torre estão diretamente associados com os valores dos esforços atuantes em alturas conhecidas, definidos por Veljkovic et al. (2015), em que os casos de cargas são previstos no padrão internacional IEC 61400-1:2019 a partir da combinação de modos operacionais ou situações externas que estão ligadas ao funcionamento e condições normais

de projeto ou extremas apropriadas, situações de falha e condições adequada de vento e transporte, instalação e manutenção.

Esforços Solicitantes

O carregamento que o vento exerce nas pás do rotor durante escoamentos constantes e simétricos são determinadas pela velocidade efetiva do vento, havendo uma variação da raiz até a ponta da lâmina e pela geometria das pás do rotor. Para efeito de cálculo, foi levado em consideração a velocidade média em um tempo de 10 minutos de ação do vento em função da altura acima do solo (ABNT NBR 6123:1988), tomando como base a altura do Hub do gerador (Figura 1), que foi considerado de 82,0 m.

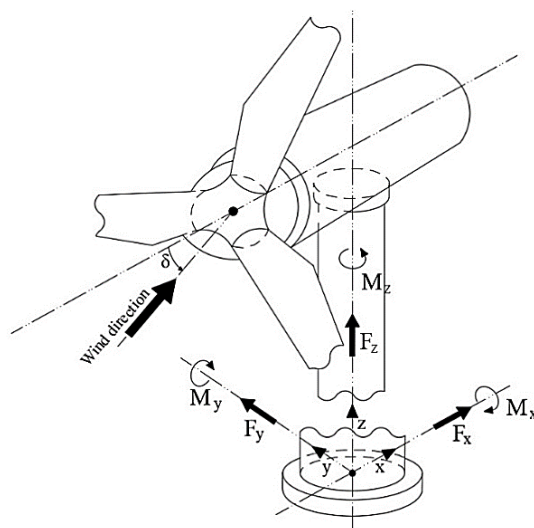


Figura 1 - Sistema de coordenadas usado para definir o carregamento e a direção do vento.

As avaliações extremas das cargas atuantes na torre, tiveram seus resultados incluindo os fatores de segurança parciais estabelecidos pela norma IEC 61400-1:2019, sendo definidas para as posições investigadas (por exemplo seções da lâmina, eixo do rotor, sistema da guinada, torre etc.). As cargas atuantes (forças e momentos) para seções transversais na parte inferior e superior da torre e para seções transversais intermediárias, são apresentadas na Tabela 2, no qual são definidos valores extremos (máximo e mínimo) do componente de carga correspondente ao longo da altura da torre, sendo, para este projeto, utilizados os dados que geram efeitos mais desfavoráveis para a estrutura.

Tabela 2 - Cargas extremas atuando na torre.

Seção (m)	Linhas	F_x (kN)	F_y (kN)	F_z (kN)	M_x (kN.m)	M_y (kN.m)	M_z (kN.m)	V_{Hub} (m/s)	Fator
0	L3-máx	188,3	-495,9	-2220,2	35316,9	6203,4	24573,0	57,8	1,10
	L3-min	56,9	-249,6	-3507,7	18529,1	-234,7	590,7	37,5	1,50
	L4-máx	177,6	958,3	-2495,2	-64868,0	10167,4	-1043,1	55,8	1,10
	L4-min	0,1	-0,1	-3205,9	18,5	-962,5	-70,0	0,8	1,35
	L8-máx	-873,2	27,6	-3174,7	521,1	-67796,0	-1363,1	9,0	1,35
	L8-min	17,1	4,8	-2629,3	-3,4	-0,3	-132,5	14,0	1,10
6,99	L3-máx	175,6	-495,5	-1974,6	31849,8	4928,1	2458,2	57,8	1,10
	L3-min	50,1	-248,5	-3172,8	16787,0	-610,3	591,1	37,5	1,50
	L4-máx	171,9	950,8	-2249,6	-58192,0	8944,2	-1043,2	55,8	1,10
	L4-min	0,0	0,0	-2838,0	-440,0	-2069,7	-521,6	21,9	1,35
	L8-máx	-878,1	28,1	-2873,3	715,3	-61675,0	-1364,5	9,0	1,35
	L8-min	30,5	63,3	-2895,3	-1,0	2,7	-360,8	9,0	1,35
21,46	L3-máx	136,9	-485,9	-1630,0	24721,7	2652,1	2466,0	57,8	1,10

	L3-min	31,1	-243,9	-2703,0	13220,2	-1199,7	592,5	37,5	1,50
	L4-máx	154,3	919,0	-1905,0	-44624,0	6577,1	-1048,3	55,8	1,10
	L4-min	0,2	0,0	-2475,7	2648,9	-1057,8	-96,2	11,0	1,35
	L8-máx	-885,8	26,7	-2450,5	1121,0	-48892,0	-1367,7	9,0	1,35
	L8-min	25,6	-2,9	-2464,3	-5,6	-2,8	67,1	11,0	1,35
48,08	L3-máx	55,7	-436,5	-1140,8	12349,4	95,8	2490,7	57,8	1,10
	L3-min	0,8	-239	-2035,9	6806,5	-1580,4	596,0	37,5	1,50
	L4-máx	-865,8	16,9	-1848,5	1933,7	-25350,0	-1406,5	9,0	1,35
	L4-min	0,1	-0,1	-1872,4	-63,6	-970,2	14,5	8,0	1,35
	L8-máx	-865,9	5,2	-1850,1	1603,6	-25436,0	-1373,5	9,0	1,35
	L8-min	31,3	2,5	-1880,5	-0,7	-0,7	-12,1	2,6	1,35
75,64	L3-máx	-37,4	-383,1	-820,8	1089,3	-177,3	2506,9	57,8	1,10
	L3-min	-37,7	-221,5	-1599,5	408,2	-1098,5	599,3	37,5	1,50
	L4-máx	-808,3	-9,2	-1457,3	1480,7	-2248,3	-1378,9	9,0	1,35
	L4-min	0,0	0,1	-1094,4	109,4	-347,2	50,4	31,0	1,10
	L8-máx	-115,1	103,5	-1471,7	206,7	-7054,7	-2115,1	26,0	1,35
	L8-min	139,9	-29,1	-1034,4	-0,1	0,0	-636,0	40,3	1,10

Formulações de Resistência e Estabilidade da Estrutura em Casca

As verificações de estabilidade da estrutura em casca sujeitam a compressão axial, cisalhamento, compressão circunferencial, compressão meridional, pressão interna e força de flambagem, foram realizadas segundo as especificações da norma EN 1993-1-6:2007. Na Figura 2 pode-se observar o fluxograma de cálculo utilizado para a verificação da resistência a flambagem da estrutura.

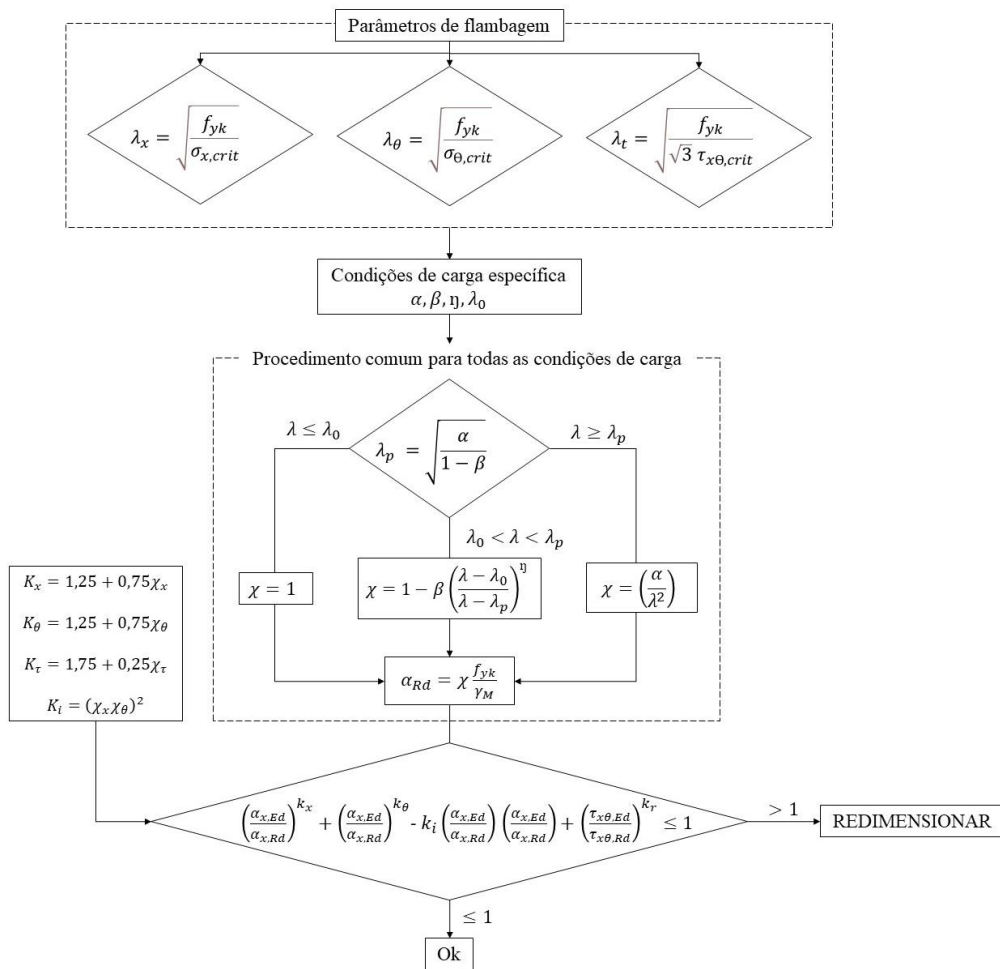


Figura 2 - Verificação da resistência à flambagem.

em que: $\sigma_{x,Rd}$, $\sigma_{\theta,Rd}$, $\tau_{x\theta,Rd}$ significam, respectivamente, a tensão meridional, circunferencial e de cisalhamento resistente à flambagem; $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{\theta,Ed}$, $\tau_{x\theta,Ed}$ representam a tensão de membrana atuante na direção meridional, circunferencial e de cisalhamento; k_x , k_θ , k_i e k_τ são os valores dos parâmetros da interação de flambagem; λ_x , λ_θ e λ_τ são os valores das esbeltezas meridional, circunferencial e de cisalhamento limite; β o fator relativo ao patamar elasto-plástico; η o coeficiente de interação; α é o parâmetro de imperfeição elástica da casca; f_{yk} valor característico da resistência de escoamento do aço; γ_M é o fator de segurança determinado na EN 1993-1-1:2010.

Resultados dos Parâmetros de Esbeltez

O parâmetro de esbeltez é calculado para cada direção da torre (meridional, circunferencial e cisalhamento), para se determinar a característica da torre, podendo variar entre baixa, média ou alta. Esse parâmetro define a condição de colapso de cada elemento estrutural e determina o fator de redução para a flambagem que está relacionada com o resultado da tensão característica, determinante no cálculo da tensão resistente. Os comprimentos e parâmetros podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados geométricos da torre e parâmetros de esbelteza nas direções meridional, circunferencial e de cisalhamento.

Altura da torre (m)	Comprimento efetivo (m)	Espessura efetiva (mm)	Raio (mm)	λ_{x0}		$\lambda_{\theta 0}$		$\lambda_{\tau 0}$	
				0.2		0.4		0.4	
				λ_x	λ_{xp}	λ_θ	$\lambda_{p\theta}$	λ_τ	$\lambda_{p\tau}$
6,99	7,281	29,339	2127,96	0,456	1,05	1,995		0,951	
21,46	25,369	27,333	1986,45	0,519	1,05	3,259	1,275	1,216	1,275
48,08	50,017	24,661	1793,58	0,589	1,05	4,005		1,348	
75,64	75,535	18,537	1595,57	0,641	1,031	5,041		1,556	

Análise das Tensões

Para efeito de análise, foram considerados os maiores esforços solicitantes para verificação entre tensão resistente e atuante, nesse caso, considerando valores dos esforços das linhas 3, 4 e 8 (pares de máximos e mínimos).

Como a seção da casca está submetida a um estado de tensão meridional linear com valor máximo $\sigma_{x,E}$, esta foi decomposta nas parcelas de compressão uniforme $\sigma_{x,EN}$ causada pelo esforço axial F_z e na flexão global $\sigma_{x,EM}$ causada pelo esforço M_r (valor resultante entre M_x e M_y). Foram comparadas as tensões meridionais atuantes na torre com as tensões meridionais resistentes tomando como base a influência e não influência da pressão interna (Figura 3a).

Verifica-se a relação entre as tensões meridionais solicitantes e resistentes, e são observadas relações relativamente baixas, exceto a Linha 8 (max) que teve sua tensão meridional solicitante quase igual a tensão resistente, já considerando as piores situações. Mas, não deixou de atender as restrições normativas, no qual é solicitado que a tensão solicitante seja inferior a tensão resistente.

A pressão interna é um fator determinante na análise entre a tensão meridional atuante e resistente da torre. Para consideração desse valor, foram calculadas novas tensões críticas de flambagem e conseqüentemente a resistência da casca à flambagem. Assim, foi analisado que as tensões resistentes considerando a parcela da pressão interna tiveram seus valores reduzidos nos dois primeiros segmentos da torre, já para os dois últimos segmentos as tensões aumentaram, garantindo então a estabilidade na seção que antes não era estável.

As relações entre as tensões circunferenciais solicitantes e a resistente, são observadas na Figura 3b, no qual é verificado que as tensões atuantes são quase insignificativas quando comparadas com as tensões resistentes.

Para efeito de projeto, comparou-se os valores referentes as tensões cisalhantes que atuam na torre com a resistência da mesma. Nessa análise, pode-se observar que as tensões de cisalhamento resistentes da torre chegam a ser aproximadamente quatro vezes maiores que os esforços que estão atuando na torre, ou seja, as tensões atuantes na torre são quase desprezíveis.

A relação entre as tensões de cisalhamento solicitantes e resistentes, são observadas na Figura 3c, em que é verificado na relação, que as tensões atuantes na torre é tem uma parcela muito pequena da tensão resistente da torre, nessa condição, a torre suporta os esforços solicitados.

Após serem realizadas as verificações das tensões meridional, circunferencial e de cisalhamento, obteve-se o resultado da interação descrita pela normal EN 1993-1-6:2007, no qual, deve-se comparar o valor de interação com o valor limite = 1 (Figura 3d).

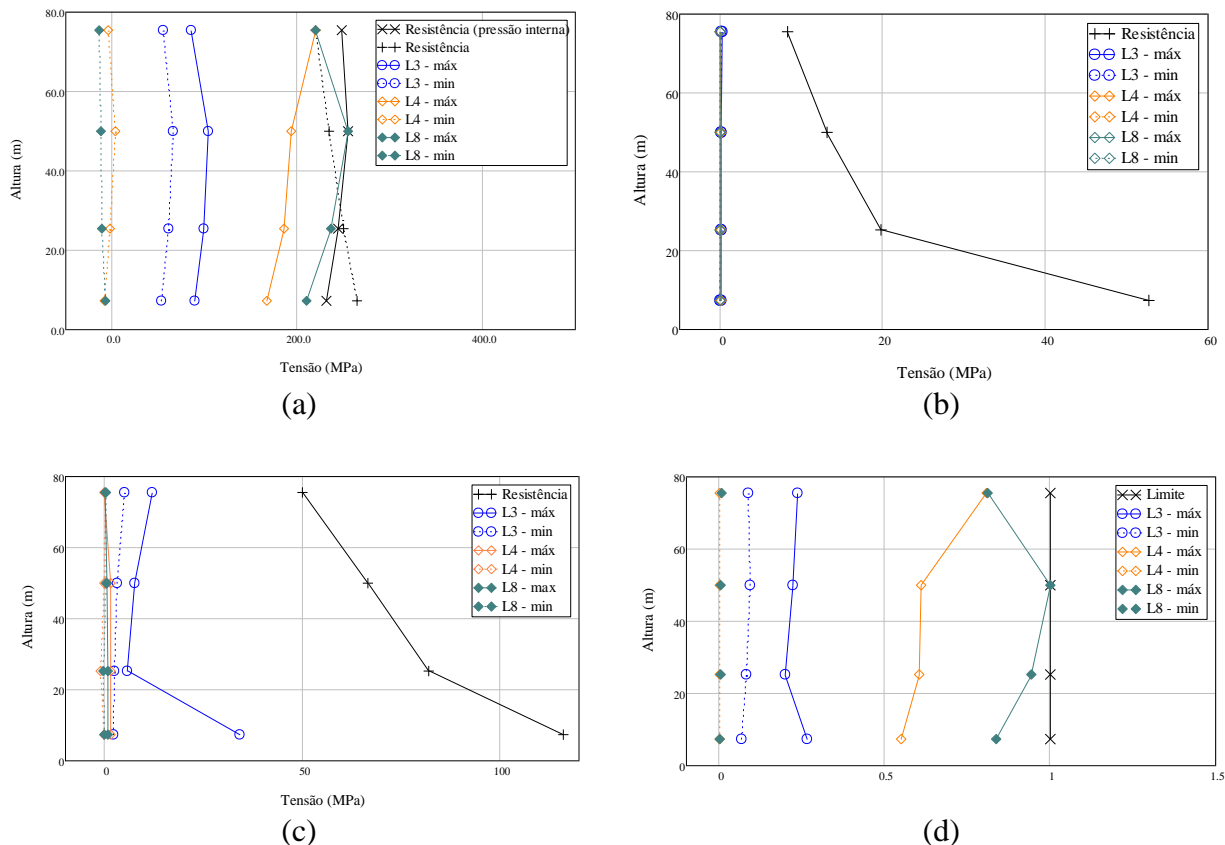
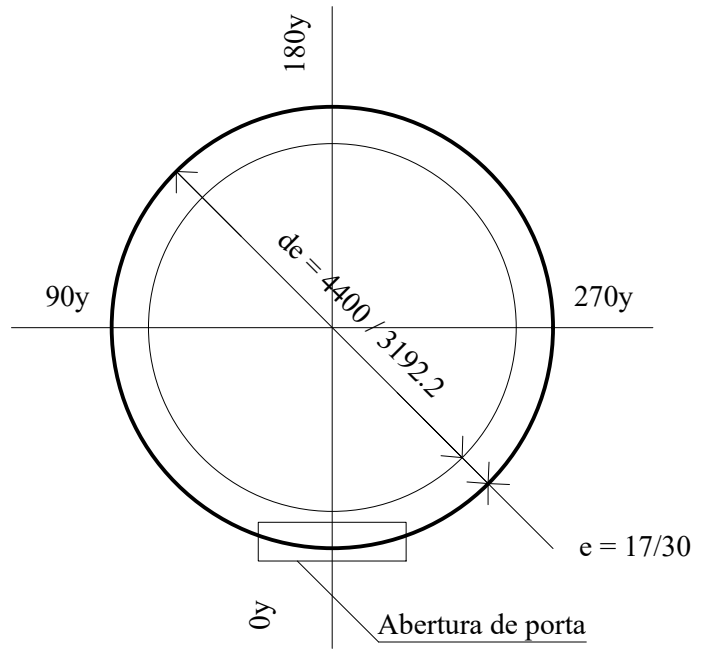
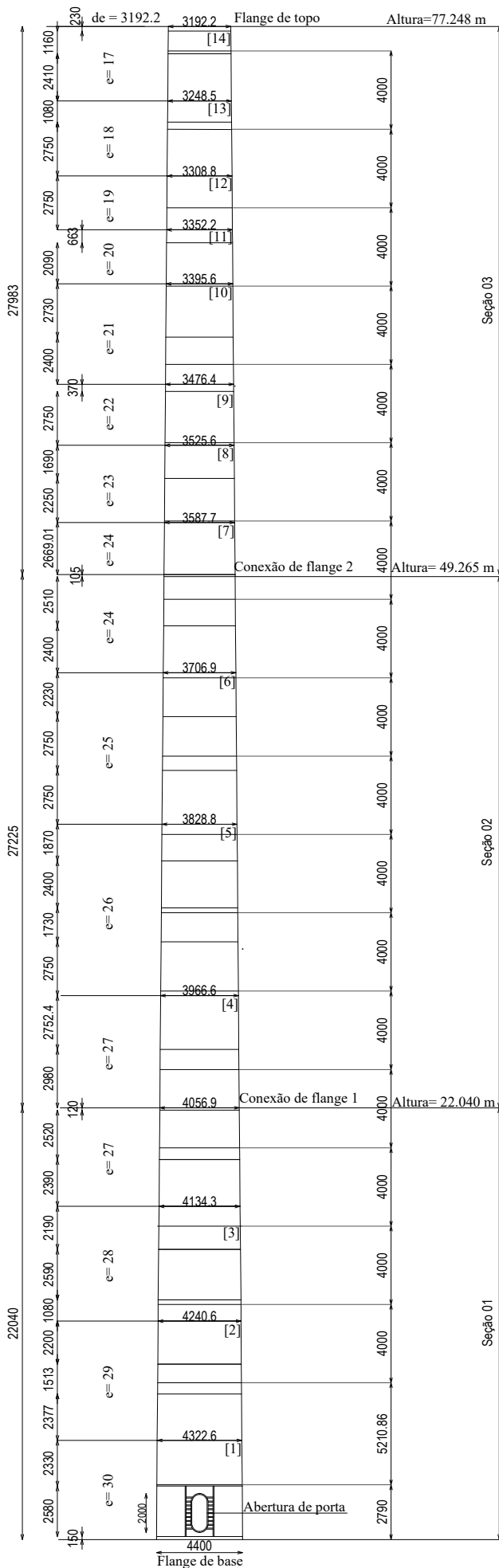


Figura 3 - Gráficos das análises de tensões: (a) tensão meridional; (b) tensão circunferencial; (c) tensão de cisalhamento; (d) interação para o estado combinado de tensão.

Analisando os resultados obtidos na interação, conclui-se que a parcela da tensão meridional é preponderante nos resultados obtidos, devido aos elevados valores correspondentes. Na verificação de interação no estado combinado de tensão, verificou-se que a combinação das tensões na altura de 48,08 m possui maior valor de interação, sendo muito próximo de 1. O feito é justificado devido aos carregamentos correspondentes nesta altura, pois, é o local onde estão presentes os maiores esforços axiais (F_z) e momentos fletores totais (M_T), tornando a parcela da tensão meridional, que têm maior influência na interação, com valores mais elevados.

Detalhamento da Estrutura

Na Figura 4 encontra-se o detalhamento da estrutura dimensionada, que consiste em três seções montadas com duas conexões intermediárias de flange.



LISTA DE MATERIAIS DA CASCA						
Nº	Descrição	Diâmetro externo (mm)	Altura (mm)	Massa específica (kg/m³)	Volume (m³)	Peso (kg)
14	Casca: e= 17mm	3210.5	1160	7860	0.10	778.14
		3248.5	2410		0.21	1642.74
13	Casca: e= 18mm	3265.5	1080		0.10	778.14
		3308.8	2750		0.26	2020.02
12	Casca: e= 19mm	3352.2	2750		0.27	2153.64
		3362.6	663		0.07	550.2
11	Casca: e= 20mm	3395.6	2090		0.22	1744.92
		3438.6	2730		0.11	888.18
10	Casca: e= 21mm	3476.4	2400		0.27	2153.64
		3482.2	370		0.04	345.84
9	Casca: e= 22mm	3525.6	2750		0.33	2625.24
		3552.2	1690		0.22	1697.76
8	Casca: e= 23mm	3587.7	2250		0.29	2287.26
		3629.6	2669.01		0.36	2861.04
7	Casca: e= 24mm	3669.1	2510	0.35	2719.56	
		3706.9	2400	0.34	2703.84	
		3742.1	2230	0.37	2876.76	
6	Casca: e= 25mm	3787.4	2750	0.27	2090.76	
		3828.8	2750	0.43	3356.22	
		3858.2	1870	0.29	2310.84	
5	Casca: e= 26mm	3896	2400	0.38	2986.8	
		3923.3	1730	0.28	2169.36	
		3966.6	2750	0.44	3458.4	
		4009.9	2752.4	0.47	3694.2	
4	Casca: e= 27mm	4056.9	2980	0.51	4008.6	
		4096.6	2520	0.44	3458.4	
		4134.3	2390	0.42	3301.2	
		4169.8	2190	0.40	3144	
3	Casca: e= 28mm	4226.6	2590	0.48	3772.8	
		4240.6	1080	0.20	1572	
		4261.3	2200	1.71	13440.6	
2	Casca: e= 29mm	4285.2	1513	1.18	9274.8	
		4322.6	2377	1.87	14698.2	
		4359.3	2330	1.91	15012.6	
1	Casca: e= 30mm	4400	2580	0.53	4189.38	
					Total	126766.1

de = Diâmetro externo
e = Espessura de casca

Figura 4 - Detalhamento da torre.

Conclusões

Com o objetivo de simular os esforços ocasionados devido à ação do vento sobre a estrutura, foi implementado um modelo de carregamento representativo das ações do vento, no qual está diretamente relacionado com a altura do cubo.

As espessuras das paredes de cada segmento de torre que variam ao longo da altura, foram empregadas como variáveis de projeto, pois estas estão diretamente relacionadas com as tensões desenvolvidas em cada seção. Ainda como funções de restrições, foram consideradas as exigências normativas empregadas pela Eurocode 3 aos valores máximos de tensões Meridional, Circunferencial e de Cisalhamento, além das condições de interação. Estabeleceu-se todos os critérios utilizados para dimensionamento do projeto e verificação, além de terem sido definidas todas as cargas extremas atuantes nas seções transversais, considerando a velocidade do vento atuante.

Foram verificados que os esforços gerados devido as ações do vento, não gerou tensões de flambagem maiores que as tensões resistentes, atendendo as restrições normativas, fato que a princípio não garante, de certa forma, a segurança estrutural da torre. Outras condições de cargas inesperadas devem ser consideradas, como derivadas do posicionamento ou frenagem defeituosa da pá (MA; MARTINEZ-VAZQUEZ; BANIOPOULOS, 2018).

Para a análise de interação, observou-se que a parcela da tensão Meridional é preponderante no resultado, devido ao fato de estar intimamente ligada aos esforços axiais (direção Z) exercidas ao longo da torre, considerando então os esforços causados pelo peso próprio da estrutura, peso de equipamentos, carga eólica decorrente do funcionamento do gerador e do desaprumo da torre. Pode-se concluir que foram obtidos resultados satisfatórios nas análises, no qual, observa-se nas respostas obtidas uma coerência proporcional entre si.

Conclui-se, então, que todos os resultados deste trabalho contribuem ao interesse prático na atualidade, uma vez que é perceptível a ampliação da implantação de novas torres AEH para a geração de energia elétrica não só no estado de Pernambuco, mas em todo o território nacional, fornecendo dados e metodologias confiáveis para a obtenção de parâmetros indispensáveis para os projetos dessas torres.

Referências

- ABRAMOWSKI, J.; POSORSKI, R. **Wind energy in developing countries**. DEWI Magazine, n. 16, p. 46 - 53, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NORMA BRASILEIRA. **NBR 6123:1998**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988. 66p.
- AXISA, R.; MUSCAT, M.; SANT, T.; FARRUGIA, R. N. Structural assessment of a lattice tower for a small, multi-bladed wind turbine. **International Journal of Energy and Environmental Engineering**, v. 8, p. 343 - 358, 2017.
- BRASIL. **Plano decenal de expansão de energia 2019**. Brasília, DF: MME/EPE, 2010.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1993-1-1**. Eurocódigo 3: Projecto de estruturas de aço. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios. Brussels, 2010.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1993-1-6**: Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-6: Strength and Stability of Shell Structures. Brussels, 2007.
- EWEA. **Powering Europe: wind energy and the electricity grid**. Brussels: EWEA, 2010.
- FEIJÓ, P. B. **Otimização de torres de aço para geradores eólicos**. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil – Área de Concentração: Estruturas) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceara, Fortaleza, 2010.
- HERNANDEZ-ESTRADA, E., DANGUILLECOURT, O. L., OCAMPO, J. B. R., LOPEZ, A. L., CAMACHO, P. Y. S., SARINANA, B. Y. P., & PORTELA, J. E. D. Considerations for the structural analysis and design of wind turbine towers: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 137, p. 110447, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110447>.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION – INTERNATIONAL STANDARD. **IEC 61400-1**: Wind Turbines - Part 1: Design Requirements. 4 ed. Genebra (Suíça), 2019.

- LI, H.; HU, Z.; WANG, J.; MENG, X. Short-term fatigue analysis for tower base of a spar-type wind turbine under stochastic wind-wave loads. **International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering**, v. 10, n. 1, p. 9 - 20, 2018.
- LIMA, D. M. **Análise da estabilidade elástica, análise dinâmica e controle de vibração em torres tubulares de aço para aerogeradores de eixo horizontal**. 320 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociência, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.
- LIMA, J. B. C. A. **Contribuições para otimização estrutural de torres tubulares de aço para turbinas eólicas**. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil – Área de Concentração: Estruturas) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceara, Fortaleza, 2011.
- MA, Y.; MARTINEZ-VAZQUEZ, P.; BANIOPOULOS, C. Wind turbine tower collapse cases: a historical overview. Proc. of the Institution of Civil Engineers. **Structures and Buildings**, v. 172, n. 8, p. 547 - 555, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1680/jstbu.17.00167>.
- MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A.; PEREIRA, E. B. **O aproveitamento da energia eólica**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 30, n. 1, p. 1304-1 a 1304-13, 2008.
- NEGM, H. M; MAALAWI, K.Y. Structural Design Optimization of Wind Turbine Towers. **Computers and Structures**, v. 74, p. 649 – 666, 2000.
- SIEMENS. **Siemens D3 platform – MW direct drive wind turbines**: Reduced complexity, increased profitability. Erlangen, Germany, 2018. Disponível em: <https://www.thewindpower.net/turbine_en_22_siemens_swt-2.3-93.php>. Acesso em: 11 jun. 2020.
- VELJKOVIC, M., HEISTERMANN, C., PAVLOVIC, M., FELDMANN, M., PAK, D., RICHTER, C., REBELO, C., PINTO, P., MATOS, R., BANIOPOULOS, C., GKANTOU, M., DEHAN, V., NÜSSE, G. **High-strength tower in steel for wind turbines (HISTWIN_Plus)**. European Commission. Workshop 17-18. Istanbul, Turkey, 2015.