

Avaliação da Vulnerabilidade de Sistema Estruturais de Transmissão de Energia Elétrica à Ação do Vento

JOÃO PAULO MAGALHÃES LUCAS

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Orientador: Professor Doutor Xavier das Neves

Orientador: Professor José Miguel de Freitas Castro

Orientador: Professor Rui Pedro Carrapatoso Figueiredo

JULHO DE 2021

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2020/2021

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2020/2021 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2021*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais

“A gratidão é o único tesouro dos humildes.”

William Shakespeare

AGRADECIMENTOS

Os primeiros agradecimentos são vocacionados para as figuras que me guiaram ao longo da elaboração da presente tese: aos meus co-orientadores, Professor José Freitas Castro, e Rui Pedro Figueiredo, e em especial ao orientador Professor Doutor Xavier das Neves Romão, pelo tempo que me dedicou e pela paciência demonstrada, ao esclarecer-me as vezes que fossem necessárias as questões que lhe apresentava, pela disponibilidade e amabilidade que teve comigo nas respostas às dúvidas colocadas por via eletrónica, e por todas as horas que dedicou em reunião, acompanhando e orientando, em todos os aspetos, a tese ora apresentada.

De seguida, e como não poderia deixar de ser, há pessoas na vida que são a nossa base. São os pilares sobre os quais sonhamos, definimos os nossos objetivos, e construímos a nossa realidade. Não podia deixar de registar neste trabalho – que marca o fim de uma etapa importantíssima – os meus mais profundos e sinceros agradecimentos aos meus pais e à minha irmã. Por me incentivarem a prosseguir os estudos. Ensinarão-me que desistir não é, nunca, uma opção. Motivaram-me nas horas difíceis, deram-me força e alento quando eu mais precisei, e festejaram do meu lado as horas dignas de celebração. Um obrigado não seria suficiente, mas parece-me ser um bom começo.

Por muito que a família seja, de facto, um dos valores que prezo mais fielmente, a verdade é que a amizade não tem preço. E como tal, não podia faltar um agradecimento aos amigos que levo para a vida e que marcaram esta jornada.

Um especial agradecimento à minha querida amiga Sara Garcia, que apesar de não ter qualquer conhecimento na área da engenharia civil em geral, e na ação do vento em particular, leu e releu o presente trabalho, ajudou-me a estruturar o pensamento e a transformar ideias abstratas em argumentos concretos. Sem ti, esta tese teria sido uma confusão de boas ideias, mas descontextualizadas. Obrigada por tudo. Ao meu grande amigo Francisco Valente, pelo mútuo incentivo e apoio que partilhamos ao longo dos últimos anos, e ainda, ao Daniel Cardoso, pela disponibilidade a qualquer hora do dia, por me tirar tão pacientemente todas dúvidas que surgiam em último momento.

Não podia deixar de agradecer, ainda que brevemente, a Levi Peseta, Ana Mendes, Francisca Futuro, Luís Duarte, Inês Vieira e Bernardo Belchior, pela amizade, pelo carinho, e pelo suporte.

É um orgulho para mim olhar para trás e reconhecer que o caminho, nem sempre linear, foi totalmente percorrido. E que hoje, começa uma nova fase da vida.

Mais uma vez, obrigado.

RESUMO

Considerando que é cada vez menos rara a ocorrência de fenômenos de rajadas fortes, devido as alterações climáticas, que acarretam consequências nas infraestruturas existentes, e consequentemente, repercussões socioeconômicas, o presente trabalho foi desenvolvido tendo em vista o estudo da ação do vento no contexto de torres de transmissão de energia. Dessa forma o estudo analisa as características e as diferentes variáveis existentes na definição da ação do vento, bem como o comportamento das torres de transmissão de energia perante esta ação.

Como se referiu, as rajadas fortes podem causar danos nas infraestruturas existentes. Realça-se, portanto, a especial importância das torres metálicas objeto de estudo, pois resulta da experiência, da vida em sociedade como a conhecemos nos dias de hoje, acompanhada pelo desenvolvimento tecnológico. Observado encontra-se direta e indissociavelmente dependente do fornecimento e distribuição de energia, considerada hoje um bem básico e essencial, necessário até para as mais elementares tarefas do quotidiano.

Como as rajadas de vento não são suscetíveis de controlo, é de extrema importância controlar os seus possíveis efeitos, evitando, o mais possível, quebras no fornecimento e distribuição da indispensável energia.

O vento por seu turno, por se tratar da ação mais dinâmica que atua sobre as infraestruturas em geral, e sobre as torres metálicas em concreto, exige, portanto, um estudo atento e aprofundado. Para tal, abordaremos a ação do vento quer de uma perspetiva estática, quer de uma perspetiva dinâmica. Desde uma análise teórica dos conceitos base, até à aplicação prática das fórmulas contidas nas normas aplicáveis, incluindo casos de estudo, e posteriormente aplicação e modelação da estrutura metálica transportadora de energia.

Assim, o presente trabalho encontra-se organizado em 5 capítulos, desde num primeiro momento, de uma introdução geral ao tema, avançando para a conceitualização e explicação de variáveis a considerar no estudo da ação do vento, passando por uma análise detalhada de fórmulas concedidas pelo Eurocódigo 1 e pela Norma 50341.

Além do mais, explicar-se-á como o desenvolvimento e progresso tecnológico impactou e promoveu a celeridade no estudo e análise das consequências da ação do vento, nomeadamente a criação de um programa Autodesk Robot Structural Analysis, com capacidade de simular o teste de túnel de vento: o túnel de vento virtual. Através dele, é possível obter resultados quase instantâneos, ou seja, existe uma celeridade evidente, cujos custos se revelam diminutos, permite uma análise detalhada, e possibilita uma avaliação com segurança, revelando-se, portanto, um desenvolvimento tecnológico de extrema importância.

Por fim, terminar-se-á a exposição concluindo pela existência - ou não -, de uma relação direta entre os resultados dos cálculos que realizados com base nas fórmulas concedidas pelo Eurocódigo, e os resultados obtidos pelo Robot Structural.

PALAVRAS-CHAVE: ação dinâmica do vento, força do vento, estrutura metálica de transporte de energia, EN50341, EN1991:1-4;

ABSTRACT

Considering that the occurrence of strong gusts phenomena is less and less rare, which have consequences on the existing infrastructure, and consequently, socioeconomic repercussions, the present work was developed with a view to the study of the action of the wind: what are its characteristics, the different existing variables, what are their consequences. In this way, it will be possible to analyze how infrastructures – in this case, metal towers for transporting energy – react to wind strength, and how wind strength can vary as a function of countless variables.

As mentioned, strong gusts can cause harm to existing infrastructure, the special importance of the metal towers being studied is highlighted, as, as is clear from experience, life in society as we know it today, accompanied by the observed technological development, it is directly and inseparably dependent on the supply and distribution of energy, today considered a basic and essential good, necessary for even the most elementary daily tasks.

As wind gusts are not susceptible to control, it is extremely important to control their possible effects, avoiding, as much as possible, interruptions in the supply and distribution of the indispensable energy.

The wind, in turn, as it is the most dynamic action that acts on infrastructure in general, and more specifically on metal towers, requires a careful and in-depth study. To this end, we will approach the action of the wind from both a static and a dynamic perspective. From a theoretical analysis of the basic concepts, to the practical application of the formulas contained in the applicable standards, including basic case studies, and later application and modeling of the energy-carrying metallic structure.

Thus, the present work is organized into 5 chapters, starting from a general introduction to the subject, advancing to the conceptualization and explanation of variables to be considered in the study of the action of the wind, passing through a detailed analysis of formulas granted by the Eurocode and other Standards.

Furthermore, it will be explained how the development and technological progress has impacted and promoted the speed in the study and analysis of the consequences of the wind action, namely the creation of an Autodesk Robot Structural Analysis program, capable of simulating the tunnel test of wind: the virtual wind tunnel. Through it, it is possible to obtain almost instantaneous results, that is, there is an evident speed, whose costs are low, allows a detailed analysis, and enables a safe evaluation, thus revealing an extremely important technological development.

KEYWORDS: dynamic action of the wind, wind strength, metallic structure for energy transportation; EN50341, EN1991:1-4;

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
1 INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2. PRINCIPAIS OBJETIVOS	1
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	2
2 MODELAÇÃO – SIMULAÇÃO DA AÇÃO DO VENTO	3
2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	3
2.2. TIPOS DE PERFIL	3
2.2.1. PERFIL LOGARÍTMICO	4
2.2.2. PERFIL TIPO POTÊNCIA	5
2.3. MODELAÇÃO DO VENTO UTILIZANDO AÇÕES ESTÁTICAS	7
2.3.1. PRESSÃO MÉDIA DO VENTO	7
2.3.2. PERFIL DE VELOCIDADE MÉDIA DO VENTO	8
2.3.2.1. Estudo da influência da Orografia	8
2.3.2.2. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA ZONA/TERRENO	9
2.3.3. TURBULÊNCIA DO VENTO	12
2.3.4. PRESSÃO DINÂMICA DE PICO	13
2.3.5. FORÇA DO VENTO	13
2.3.5.1. Cálculo através do Eurocódigo 1	14
2.3.5.2. Cálculo através da Norma	17
2.3.6. FORÇAS EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS-MÉTODO 1	18
2.4. O FENÓMENO DE DESPRENDIMENTO DE VÓRTICE OU VORTEX SHEDDING	19
2.4.1. O EFEITO DAS VIBRAÇÕES PROVOCADAS POR DESPRENDIMENTO DE VÓRTICES	20
2.4.1.1. Ação de desprendimento de vórtices	21
2.5. MODELAÇÃO DO VENTO UTILIZANDO AÇÕES DINÂMICAS	22
2.5.1. SERIES TEMPORAIS DE VENTO	22
2.5.2. SERIES TEMPORAIS DE FORÇAS AERODINÂMICAS	23
2.5.3. MÉTODO DE CÁLCULO DA RESPOSTA DINÂMICA	24
2.5.4. CÁLCULO DE AMORTECIMENTO TOTAL	26

3 CARACTERIZAÇÃO DA AÇÃO DO VENTO EM TORRES METÁLICAS.....	28
3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	28
3.2. CARACTERIZAÇÃO/ DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA	29
3.2.1. TORRE.....	29
3.2.2. CONDUTORES	29
3.2.3. CADEIAS DE ISOLADORES E ACESSÓRIOS.....	31
3.2.4. PERFIS DO AÇO E SECÇÃO	31
3.2.5. FUNDAÇÕES	32
3.3. AÇÕES A CONSIDERAR	33
3.4. CÁLCULO DA AÇÃO DO VENTO NA ESTRUTURA	33
3.5. MODELAÇÃO DA ESTRUTURA.....	34
3.6. INFLUÊNCIA DA MODELAÇÃO DOS NÓS NA ESTABILIDADE E VIBRAÇÃO DA ESTRUTURA.....	38
3.6.1. EFEITOS DE SEGUNDA ORDEM.....	38
4 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS À AÇÃO DO VENTO	40
4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	40
4.2. TÚNEL DE VENTO- ROBOT STRUCTURAL	40
4.3. CASOS DE ESTUDO- ROBOT STRUCTURAL.....	41
4.4. DESCRIÇÃO DA TORRE ESTUDADA	46
4.5. ANÁLISE DOS DOIS MODELOS	51
5 CONCLUSÃO	62
BIBLIOGRAFIA	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 – Esquema da translação do perfil de velocidades, para elevada rugosidade	5
Fig. 2.2 – Comparação entre as leis logarítmicas e tipos de potência para um mesmo terreno	6
Fig. 2.3 - Efeito da orografia.....	8
Fig. 2.4 – Dimensões de uma colina e de uma falésia	9
Fig. 2.5 – Coeficiente de Rugosidade, C_r	12
Fig. 2.6 – Valores de λ recomendados para perfis com arestas vivas e estruturas treliçadas	15
Fig. 2.7 – Valores indicativos do coeficiente de efeitos de extremidade $\Psi\lambda$ em função do índice de cheios ϕ e da esbelteza λ	15
Fig. 2.8 – Definição do índice de cheios ϕ	16
Fig. 2.9 – Secções estruturais com arestas vivas.....	16
Fig. 2.10 – Definição da face do painel da torre	19
Fig. 2.11 – Ajuste da densidade espectral $S_v(n)$ entre von Karman e o Eurocódigo 1	23
Fig. 2.12 - Função modeladora de início e fim das séries temporais de forças	24
Fig. 3.1 – Exemplo de torre para fornecimento de energia.....	28
Fig. 3.2 – Diversos tipos de torres de estrutura metálicas	29
Fig. 3.3 - condutor com 61 fios em alumínio	30
Fig. 3.4 – Fio terra com 7 fios de aço e 12 fios de alumínio no exterior	31
Fig. 3.5 – Pormenor de uma cadeia de isoladores	31
Fig. 3.6 – Configurações e sistemas de eixos da cantoneira	32
Fig. 3.7 – Apoio da torre.....	32
Fig. 3.8 – Desenho esquemático de uma planta.....	33
Fig. 3.9 - Exemplo de um modelo articulado e de um modelo encastrado.....	35
Fig. 3.10 - Ponto de ligação dos fios com a estrutura.....	36
Fig. 3.11 – Braço	36
Fig. 3.12 - Modelação para os apoios	37
Fig. 3.13 – Efeitos de 2ª ordem: (a) configuração deformada, (b) efeito P- Δ , (c) efeito P- δ	39
Fig. 4.1 – Modo 2	60
Fig. 4.2 – Modo 4	61
Fig. 4.3 - Consola simples 20m - Deformada.....	41
Fig. 4.4 – Perspetivas diferentes da torre	46
Fig. 4.5 – Braços com 1,825 m	47
Fig. 4.6 – Travamento horizontal.....	47
Fig. 4.7 – Travamento na diagonal.....	48

Fig. 4.8 – Parte superior da torre.....	48
Fig. 4.9 – Configurações e sistemas de eixos da cantoneira.....	49
Fig. 4.10 - Representação do tipo de perfis na torre.....	50
Fig. 4.11 – Deformação lateral obtida com o modelo de barras contínuas e com as forças do vento calculadas pelo EC1	52
Fig. 4.12 – Deformação lateral obtida com o modelo de barras contínuas e com as forças do vento calculadas pela simulação túnel do vento	52
Fig. 4.13 – Deformação lateral obtida com o modelo de barras articuladas e com as forças do vento calculadas pelo EC1	53
Fig. 4.14 – Deformação lateral obtida com o modelo de barras articuladas e com as forças do vento calculadas pela simulação túnel do vento	54
Fig. 4.15 – Secção em estudo	55
Fig. 4.16 – Evolução do esforço axial devido à ação do vento para as duas modelações consideradas 150x150	56
Fig. 4.17 – Secção em estudo	56
Fig. 4.18 – Evolução do esforço axial devido à ação do vento para as duas modelações consideradas 60x60	57
Fig. 4.19 – Secção em estudo	57
Fig. 4.20 Evolução do esforço axial devido à ação do vento para as duas modelações consideradas 90x90	58
Fig. 4.21 – Secção em estudo	58
Fig. 4.22 – Evolução do esforço axial devido à ação do vento para as duas modelações consideradas 70x70	59

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Valor básico da velocidade de referência do vento (Fonte:EC1-1-4)	10
Tabela 2.2 - Categorias e parâmetros do terreno	10
Tabela 3.1 - Propriedades do material do condutor e do fio terra.....	30
Tabela 4.1 – Análise modal	59
Tabela 4.2 - Estudo de um caso.....	42
Tabela 4.3 - Estudo de um caso.....	43
Tabela 4.4 – Casos de estudo.....	43

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

$\dot{y}_n$	Velocidade;
$\ddot{y}_n$	Deslocamento;
A_C	Área limitada pelo contorno
A_{ref}	Área de referência do elemento de construção;
$A_{t1}A_{t2}$	Área efetiva dos elementos;
B^2	Coeficiente de resposta quase-estática;
C_n	Coeficiente de amortecimento;
C_r	Coeficiente de rugosidade;
$C_{t1}C_{t2}$	Fator de arrasto;
F_n	Força modal;
G_t	Fator estrutural;
H_t	Altura total da torre;
$I_v(z_s)$	Intensidade de turbulência à altura de referência;
L_d	Colinas o comprimento da vertente sotavento;
L_u	Comprimento da vertente a barlavento;
M_n	Massa modal do n-ésimo modo de vibração;
R^2	Coeficiente de resposta em ressonância;
U_{ref}	Velocidade média da cota de referência z_{ref} ;
V_D	Velocidade do vento projetada;
$V_{b,0}$	Velocidade base do vento;
V_b	Velocidade do vento;
$V_m(z)$	Velocidade média do vento;
c_0	Coeficiente de orografia;
c_{dir}	Coeficiente associado à direção do vento;
c_f	Coeficiente de força relativo ao elemento de construção;
$c_r(z)$	Coeficiente de rugosidade;
$c_s c_d$	Coeficiente estrutural;
c_{season}	Coeficiente de sazão;
f_l	Frequência adimensional;
f_v	Frequência de vibração do desprendimento de vórtice;
k_I	Coeficiente de turbulência (valor recomendado = 1);

k_p	Fator de pico;
k_r	Coeficiente de terreno dependente do comprimento de rugosidade z_0 ;
k_v	Constante de Von Kàrmàn;
n_1	Frequência do modo fundamental de vibração;
$n_{i,y}$	Frequência própria da estrutura;
$q_p(z_e)$	Pressão dinâmica de pico à altura de referência z_e ;
u_*	Velocidade de atrito;
$v_{crit,i}$	Velocidade crítica
v_m	Velocidade média do vento
$y_{F,máx}$	Deslocamento máximo ao longo do tempo, do ponto em que $\phi_{i,y}(s)$ é igual a 1;
y_n	Aceleração;
$z_{0,II} = 0.05m$	(categoria de terreno II);
z_0	Comprimento de rugosidade;
z_{min}	Altura mínima;
z_{ref}^*	Altura de referência;
z_s	Altura de referência para a determinação do coeficiente estrutural;
b	Largura de referência da secção transversal
H	Altura;
A	Soma das áreas projetas dos elementos;
C	Matriz de amortecimento;
D	Diâmetro do elemento ou estrutura;
K	Matriz de rigidez;
$L(z)$	Escala de comprimento turbulento;
M	Matriz de massa;
St	Número de Strouhal
V	Velocidade média do fluido;
k_I	Coeficiente de turbulência;
k_r	Coeficiente de terreno;
l	Comprimento do elemento estrutural considerado;
$m(s)$	Massa oscilante da estrutura por unidade de comprimento [Kg/m];
z	Altura acima do solo;

Letras gregas:

$\phi_{i,y}(s)$	Configuração modal da estrutura,
δ_a	Decremento logaritmo de amortecimento aerodinâmico para o modo funcional;
δ_s	Decremento logaritmo de amortecimento estrutural;
Ψ_λ	Coeficiente de efeitos de extremidade;
μ_e	Massa equivalente por unidade de área da construção;
ρ_{ar}	Densidade do ar por Kg/m^3
τ_0	Tensão na superfície;
Φ	Inclinação;
α	é uma função de rugosidade do terreno;
σ_v	Desvio padrão de turbulência;
φ	Ângulo entre a direção do vento e o eixo longitudinal do braço;

1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O estudo dos diversos efeitos do vento e das suas componentes contribui frequentemente no que toca ao dimensionamento e construção de estruturas de transporte de energia. A verdade é que se verificam cada vez mais incidentes nas redes de transporte. Portanto, e de forma a colmatar potenciais futuros incidentes, e a garantir que são tomados todos os cuidados necessários para assegurar um serviço de qualidade, aprofundou-se e dinamizou-se o estudo dos efeitos do vento nas estruturas de transporte de energia.

Ora, a vida em sociedade como a conhecemos hoje encontra-se fortemente dependente da energia elétrica, sendo certo que, os incidentes que ocorrem nas linhas de transporte de energia são causadores de grandes constrangimentos com consequências económicas e sociais.

Como se sabe, as condições climáticas são forças da natureza, e como tal, não se encontram sob o controlo do ser humano, que, como se vê impedido de controlar a causa, opta por tentar controlar os efeitos, estudando-os e analisando-os.

Os desenvolvimentos tecnológicos, as inovações materiais e a inteligência artificial proporcionaram toda uma panóplia de variáveis suscetíveis de influenciar os resultados da ação do vento, que é considerada a mais condicionante pois que ocorre em todos os elementos da estrutura.

Assim, o desenvolvimento tecnológico impactou o estudo da ação do vento e as suas inerentes consequências, tendo sido criados programas próprios atualmente considerados uma ferramenta essencial nos estudos realizados, pois se revelou um meio próprio e competente para a demonstração de resultados, e além disso, um meio célere com reduzidos custos.

1.2. PRINCIPAIS OBJETIVOS

Os principais objetivos do presente trabalho consistem no estudo e análise aprofundada da ação do vento, incluindo as suas diversas componentes, iniciando por uma abordagem teórica da mesma, passando por um momento comparativo de diferentes métodos, como a comparação da modelação através do regulamento do Eurocódigo 1 com a modelação através da simulação do túnel de vento e a comparação entre barras contínuas com barras articuladas, terminando com aplicação prática das conclusões obtidas.

A ação do vento é dinâmica, contudo, é possível proceder à sua análise de uma forma sub-dividida: como ação estática – assumindo-se sempre como uma força fixa e constante –, e como uma ação dinâmica – assumindo-se como uma série temporal num determinado intervalo de tempo.

Ora, a ação do vento, pela sua dinamicidade, é composta por inúmeras condicionantes, das quais estudar-se-á a altura, a pressão, a velocidade, a turbulência, a orografia, a categoria de terreno, a localização geográfica, entre outras. O conjunto das diversas variáveis resulta na força do vento, que consagra o fator mais preponderante pois que interage diretamente com a estrutura.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho encontra-se sistematizado em 5 capítulos:

O Capítulo 1 consiste na Introdução na qual se expõe sucintamente as considerações iniciais, os principais objetivos a alcançar e a organização geral do trabalho.

Por seu turno, no Capítulo 2 inicia-se o estudo da modelação da ação do vento, explicitando quer a sua vertente estática, quer a sua vertente dinâmica, simulando assim a sua ação, demonstrando-se o cálculo da força da ação do vento, e baseando-se no Eurocódigo 1 (CEN, 2010). Neste ponto serão estudados os dois tipos de perfis, que se explicarão. Além do mais, neste Capítulo será abordado pela primeira vez o Eurocódigo 1 e a EN50341(50341-1, 2012), que acompanharão todo o desenvolvimento do assunto aqui em estudo.

De seguida, o Capítulo 3 é dedicado à modelação numérica dos efeitos da ação do vento em torres metálicas, consistindo assim, na explicação dos conceitos e fórmulas apresentadas, calculadas no capítulo anterior. Aqui, será analisado com maior detalhe a estrutura metálica, as suas características incluindo os seus isoladores, acessórios e fundações.

No Capítulo 4 consta a simulação numérica do comportamento de estruturas à ação do vento, no qual se estuda a experiência de túnel de vento, e a sua versão computadorizada utilizando o programa Robot Structural. É ainda abordada a vertente prática deste trabalho, onde se explica todo um conjunto de casos de estudo, cujo objeto numa primeira abordagem consistiu numa consola simples de 20 m de altura, e num segundo momento, de modo a confirmar os valores obtidos, uma consola simples de 40 m de altura. Posteriormente, com base nos resultados obtidos, avançou-se para a análise da ação do vento na estrutura metálica, principal objeto do presente estudo. Além disso, será aqui mencionada a existência de dois possíveis modelos: barras articuladas, e barras contínuas, com o objetivo de concluir pelo modelo mais próximo da realidade.

Por fim, o Capítulo 5 é dedicado à apresentação das conclusões gerais retiradas das análises, cálculos e comparações efetuadas.

2

MODELAÇÃO – SIMULAÇÃO DA AÇÃO DO VENTO

2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O vento é uma ação variável que é considerada condicionante, por causa da sua ocorrência em todos os elementos da torre e pela maneira como nela atua. É, portanto, uma variável caracteristicamente aleatória, pois que, não se revela de igual forma, com a mesma intensidade ou por períodos iguais. Consequentemente, não é possível fazer uma análise 100% correta do efeito da ação. Um ponto relevante que importa salientar em relação à referida ação do vento, é o efeito que este provoca na estrutura da torre, pois que se traduz numa oscilação das tensões, e que inevitavelmente origina fadiga. A fadiga ocorre porque a ação não tem o mesmo nível de intensidade nem atua uniformemente, o que origina gradualmente fendas na estrutura da torre, e que poderá ter como consequência a rotura da estrutura.

Apesar da sua importancia na determinação de carregamento incidente na estrutura, a verdade é que a velocidade do vento não consiste no único fator a ter em conta. O tempo é igualmente um fator determinante, pois que, a duração das rajadas de vento influencia o desenvolvimento das forças aerodinâmicas, causando reações na estrutura e tensões nos materiais.

As reações que a estrutura apresentará divergem igualmente consoante o tamanho das mesmas: numa estrutura mais alta, será necessário um período de duração de vento maior para provocar a sua reação, do que seria necessário para obter a mesma reação em estruturas de menor dimensão.

A rugosidade do terreno é outro aspeto que influencia a velocidade do vento. Por seu turno, a rugosidade do terreno é variável, consoante elementos de ordem natural e de ordem humana; a topografia do local e as construções humanas, respetivamente.

No estudo do comportamento do vento, este é considerado como uma ação dominante.

2.2. TIPOS DE PERFIL

Existem dois tipos de perfil: logarítmico e do tipo potência, cujas diferenças se explicarão. O perfil do tipo logarítmico tem-se tornado o mais frequentemente utilizado, apesar de, por exemplo, o Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSA), atualmente ainda em vigor em Portugal, utilizar perfis do tipo potência. Comparando com os perfis do tipo potência, o perfil logarítmico apresenta as seguintes vantagens: ajusta-se melhor na zona inferior do perfil (que é onde se situam a maior parte dos edifícios) e é conservativo na zona exterior (apesar de não se ajustar tão correctamente ao perfil). Apesar disso, tende de uma forma mais

assimptótica para a velocidade gradiente, o que é mais próximo do comportamento real.

2.2.1. PERFIL LOGARÍTMICO

Caso estejamos perante um terreno homogêneo, e numa situação de vento forte, entre o intervalo de 50m a 100m de altura, é expressa a lei da variação da velocidade média do vento em altura. Pois, logicamente a velocidade do vento difere consoante a cota que for tida em consideração para efeito de cálculo (Alonso, 2013).

$$\bar{U}(z) = \frac{u_*}{k_v} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (2.1)$$

Na qual,

k_v = 0,4 (representando a constante de *Von Kàrmàn*);

z Altura acima do solo;

z_0 Escada de rugosidade – como se compreende, o solo apresenta diversos tipos de rugosidade, como se poderá retirar da Tabela 2.2;

u_* Velocidade de atrito;

A incógnita u_* resulta da seguinte expressão:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho_{ar}} = \frac{k_v}{\ln \left(\frac{z}{z_0} \right)} \cdot \bar{U}(z)} \quad (2.2)$$

Em que,

τ_0 Tensão na superfície;

ρ_{ar} Massa volúmica do ar;

Necessitamos também da equação (2.3):

$$K^* = \left(\frac{u_*}{U_{ref}} \right)^2 = \left(\frac{k_v}{\ln \left(\frac{z_{ref}}{z_0} \right)} \right)^2 \quad (2.3)$$

Sendo:

U_{ref} Velocidade média da cota de referência z_{ref} (assumida com 10m);

Para retirar as seguintes expressões (2.4) e (2.5), que se afiguram essenciais para a determinação da velocidade média do vento.

$$z_0 = \frac{z_{ref}}{e^{\frac{k_v}{K^2}}} \quad (2.4)$$

$$\bar{U}(z) = U_{ref} \frac{\ln(\frac{z}{z_0})}{\ln(\frac{z_{ref}}{z_0})} \quad (2.5)$$

Se pelo contrário estivermos perante um terreno heterogéneo, como por exemplo, uma área arborizada ou urbanizada, a altura z , é substituído por uma altura efetiva $(z - z_h)$, onde z_h representa a altura da área arborizada ou urbanizada. Quer isto dizer, que a altura se determinará a partir do limite máximo dos elementos que compõem a heterogeneidade do terreno.

$$\bar{U}(z) = \frac{u_s}{k_v} \ln\left(\frac{z - z_h}{z_0}\right) \quad (2.6)$$

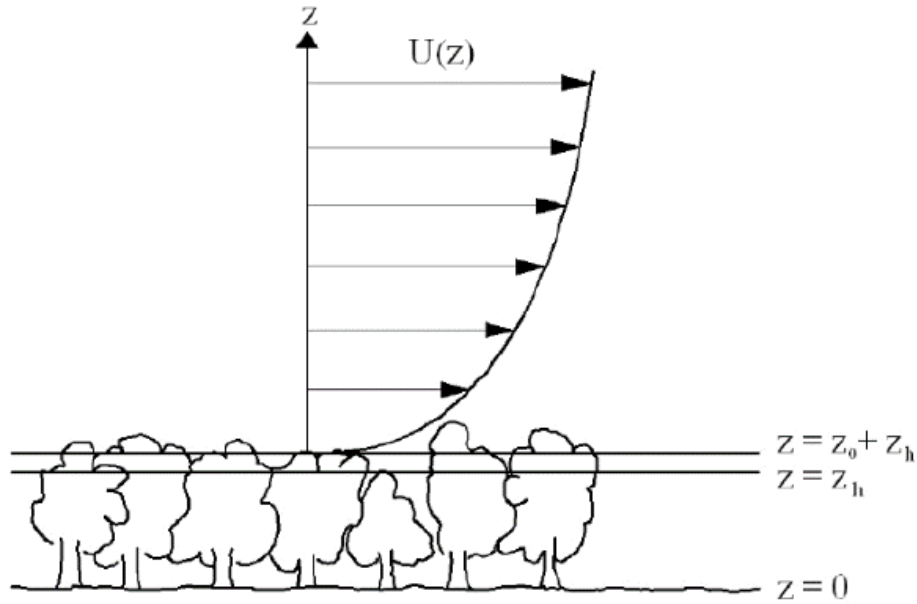


Fig. 2.1 – Esquema da translação do perfil de velocidades, para elevada rugosidade

2.2.2.PERFIL TIPO POTÊNCIA

Por outro lado, este perfil, que analisa e determina a lei de potência, não obstante não possuir bases teóricas, o seu carácter empírico justificado pela simplicidade de aplicação, é preferido por diversos autores de forma a determinar a velocidade média do vento em altura.

É caracterizado pela seguinte equação:

$$\bar{U}(z) = U_{ref} \left(\frac{z}{z_{ref}}\right)^\alpha \quad (2.7)$$

Sendo que o expoente α é uma função de rugosidade do terreno, determinável pela expressão seguinte:

$$\alpha = \left(\frac{1}{\ln\left(\frac{z_{ref}^*}{z_0}\right)} \right) \quad (2.8)$$

Onde,

z_{ref}^* É a altura de referência na qual os dois perfis ora estudados – logarítmico e de potência – se igualam.

É possível corroborar graficamente o supra explanado através da seguinte figura:

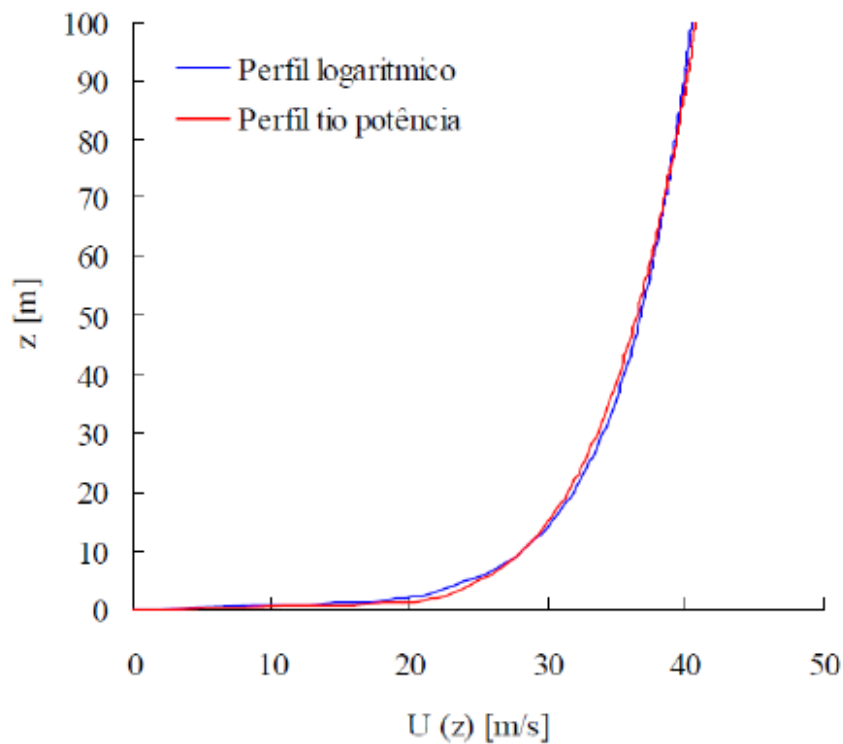


Fig. 2.2 – Comparação entre as leis logarítmicas e tipos de potência para um mesmo terreno

Na comparação alcançada por este gráfico, foi tida em consideração a lei logarítmica prevista no (2.5), e a lei de potência determinada no (2.7), para tal foi utilizado uma altura de referência de comparação

z_{ref} que toma o valor de 10m, e para a mesma categoria de terreno, ainda atendendo ao Eurocódigo 1.

2.3.MODELAÇÃO DO VENTO UTILIZANDO AÇÕES ESTÁTICAS

Nas subsecções seguintes serão descritos os procedimentos para determinar as forças da ação do vento com base no Eurocódigo 1 (CEN, 2010) e a Norma EN50341 (EN, 2012).

2.3.1. PRESSÃO MÉDIA DO VENTO

A pressão média do vento, $q_b(z)$, em função da altura pode ser calculado a partir de $V_b(z)$ como:

$$q_b(z) = \frac{1}{2} \rho V_b^2(z) \quad (2.9)$$

Na qual:

ρ Densidade do ar por Kg/m^3 sendo que pode variar dependendo da altura, temperatura e pressão, mas pode ser assumida como $1,25 \text{ Kg/m}^3$ a 15°C e $1013hPa$.

V_b Velocidade de referência do vento, definido em função da direção do vento, da época do ano e a uma altura de 10 m acima da superfície.

$$v_b = c_{dir} * c_{season} * v_{b,0} \quad (2.10)$$

Em que,

c_{dir} Variável da direção do vento (valor recomendado de 1,0);

c_{season} Coeficiente de sazão;

$V_{b,0}$ Velocidade básica do vento, conforme Tabela 2.1;

Note-se que,

c_{dir} tem geralmente, o valor de 1,0, contudo, existem exceções, como descrito no Anexo Nacional 4.2, nota 2 do Eurocódigo 1.

Já relativamente à variável c_{season} é considerado como um valor unitário, ou seja, 1,0. Pois que, a torre se encontra no mesmo local o ano inteiro. Imaginemos que a torre só estaria situada no referido local entre os meses de maio a agosto. Nesse cenário, então seria razoável atribuir um valor ao c_{season} inferior a 1,0, uma vez que se tratam, em teoria, dos meses menos ventosos do ano.

Por fim, a variável $V_{b,0}$ é a velocidade base do vento, que é definida como velocidade média do vento no período de 10 minutos, independentemente da direção do vento e da estação do ano a que se refere, a 10 m acima do solo em campo aberto com vegetação rasteira e objetos isolados entre si de, pelo menos, 20 vezes a sua altura.(Brewer, 2017)

2.3.2. PERFIL DE VELOCIDADE MÉDIA DO VENTO

Nesse seguimento, importa descobrir $V_m(z)$ – a velocidade média do vento em 10 minutos sobre uma certa altura acima do solo, na sua perpendicularidade até um determinado elemento da estrutura.

Como facilmente podemos perceber, e como já anteriormente referimos, a velocidade do vento não é uniforme ao longo da altura da estrutura, como consequência deste facto, é calculado um valor médio, em certos pontos considerados relevantes. Nos termos da Norma EN1991-1-4 é expressa a equação:

$$V_m(z) = c_r(z) * c_o(z) * V_b \quad (2.11)$$

Em que:

$c_r(z)$ Coeficiente de rugosidade;

$c_o(z)$ Coeficiente de orografia tem geralmente o valor de 1,0, com as exceções que serão posteriormente explanadas em 2.3.2.1.

2.3.2.1. Estudo da influência da Orografia

A superfície da terra não se manifesta sempre no seu estado plano. A orografia é a parte da geografia física que se dedica à descrição e análise do relevo da superfície terrestre.

De acordo com o Eurocódigo 1, 1-4, na circunstância em que a área alvo de estudo seja dotada de colinas ou falésias, devemos considerar o coeficiente de orografia, no qual as velocidades do vento são aumentadas em mais de 5%. (Filipe, 2012)

Note que, os efeitos de orografia só são tidos em conta nos cálculos a efetuar quando o declive médio do terreno a barlavento, numa distância até 10 vezes a altura do elemento isolado, for igual ou superior a 3.º. Quando tal não acontece – ou seja, quando o declive médio for inferior a 3.º, então é considerado o valor de 1,0 como coeficiente de orografia.

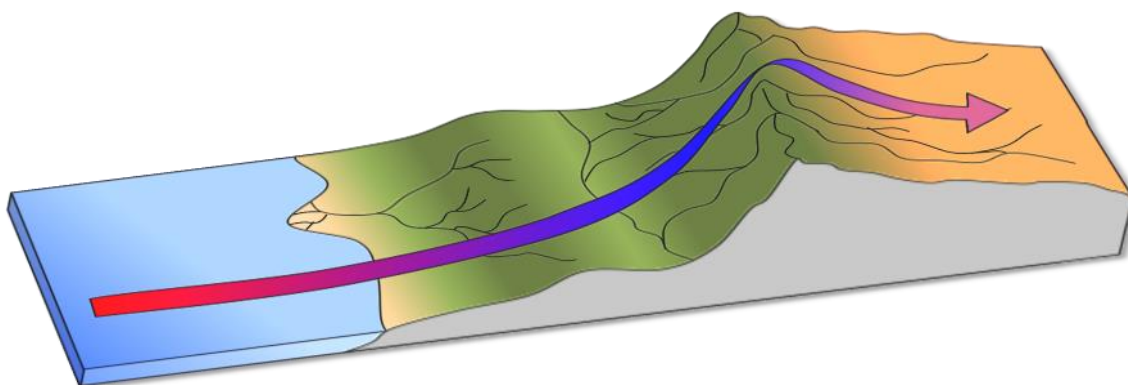


Fig. 2.3 - Efeito da orografia (adaptado de PNGWING, 2021)

Com o estudo realizado neste subcapítulo, podemos determinar os valores máximos dos esforços, deslocamentos e rotações numa torre metálica de transporte e distribuição de energia. Para tanto, é realizada uma análise atenta das diferentes variáveis que permitem caracterizar o acidente orográfico, como por exemplo, a inclinação Φ , o comprimento da vertente a barlavento, L_u e a altura H , e no caso de colinas o comprimento da vertente sotavento, L_d , como se pode ver na Fig. 2.5 2.4.Fig. 2.3

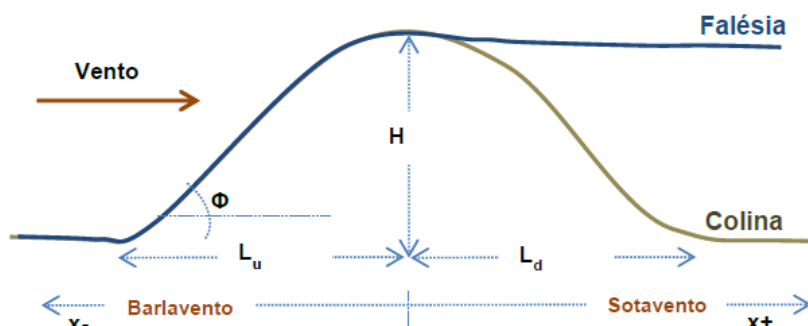


Fig. 2.4 – Dimensões de uma colina e de uma falésia

Concretizando, o barlavento corresponde ao sentido de onde sopra o vento – de onde o vento vem –, já o sotavento corresponde ao sentido para onde sopra o vento – direção na qual o vento vai.

2.3.2.2. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA ZONA/TERRENO

A velocidade média do vento alterna consoante o tipo de zona e categoria de terreno no qual se localiza a torre metálica, além disso, ainda difere em função da altura da estrutura da torre em relação ao solo, conforme demonstrado na Fig. 2.2.

Ao longo do território português e analisando o Eurocódigo 1, 1-4, concluímos que existem duas zonas distintas em Portugal, como demonstrado na Tabela 2.1: o tipo de zona A e tipo de zona B – ora, o tipo de zona B cobre áreas muito restritas e específicas do território português, sendo estas os arquipélagos dos Açores e da Madeira, as regiões costeiras situadas até 5km da linha oceânica, e por fim, regiões nas quais a altitude supera a cota dos 600m.

Existem quatro tipos de terrenos: categoria I, II, III e IV, como melhor explicado através da Tabela 2.2. Estas categorias são caracterizadas pela rugosidade do terreno, mas não só. A oposição ao escoamento do vento na superfície é um índice igualmente ponderado.

O tipo de terreno permite determinar o valor básico de referência do vento ($V_{b,0}$), já a categoria do terreno determina os valores do comprimento de rugosidade, e da altura mínima.

O objetivo a atingir com o estudo deste tema é compreender qual o efeito que as variações destes dois parâmetros – tipo e categoria –, podem ter nos valores dos esforços, dos deslocamentos e da rotação no topo da estrutura.

Para tal, é possível elaborar um estudo rigoroso, no qual se consegue demonstrar a amplitude de um leque de combinações possíveis entre tipos de zonas e categorias de terreno onde poderá ser instalada uma torre.

Tabela 2.1 - Valor básico da velocidade de referência do vento (Fonte:EC1-1-4)

Zona	$v_{b,0}$ [m/s]
A	27
B	30

No quadro seguinte podemos analisar as categorias de terreno:

Tabela 2.2 - Categorias e parâmetros do terreno

Categoria de terreno		z_0 [m]	z_{min} [m]
I	Zona costeira exposta aos ventos de mar	0,005	1
II	Zona de vegetação rasteira, tal como erva, e obstáculos isolados (árvores, edifícios) com separações entre si de, pelo menos, 20 vezes a sua altura	0,05	3
III	Zona com uma cobertura regular de vegetação ou edifícios, ou com obstáculos isolados com separações entre si de, no máximo, 20 vezes a sua altura (por exemplo: zonas suburbanas, florestas permanentes)	0,3	8
IV	Zona na qual pelo menos 15 % da superfície está coberta por edifícios com uma altura média superior a 15 m	1,0	15
NOTA 1: As categorias de terreno II, III e IV estão ilustradas em A.1.			
NOTA 2: O coeficiente de rugosidade, $c_r(z)$, é ilustrado na Figura NA.1.			

Após a análise da relação entre o tipo de zona e a categoria de terreno, podemos afirmar que os fatores objeto de estudo, se afirmam determinantes na ação do vento.

Contudo, um ponto curioso especialmente digno de nota, é o resultado prático na escolha da categoria do terreno. Ora bem, não obstante as variáveis apresentadas terem consequências práticas na ação do vento, a verdade é que a escolha da categoria de terreno revela uma consequência.

Pois que, analisando os valores supra apresentados, resulta claro que os valores expostos por z_0 , são muito próximos, consequentemente, podemos afirmar que a variação da ação do vento se mantém semelhante quando se altere a categoria de terreno para um local mais amplo (por exemplo, categoria I, na qual se admite z_0 como 0,005), ou quando o terreno se enquadre numa zona de vegetação rasteira e obstáculos isolados (por exemplo, categoria II, na qual se admite z_0 como 0,05).

Se a localização da estrutura em estudo, for numa zona do tipo A, e por algum motivo, for transferida para uma zona do tipo B só dois parâmetros se alterariam. A saber: o valor de referência da velocidade do vento e a velocidade média do vento.

Ao invés, na circunstância concreta de alteração da categoria de terreno, para um terreno que seja dotado de uma menor rugosidade, então quatro parâmetros sofrerão alterações no seu valor, sendo eles o coeficiente de rugosidade e a intensidade de turbulência – que inevitavelmente diminuem –, e o coeficiente de terreno e a velocidade do vento – que sofrem um aumento.

Note-se que, ao contrário dos parâmetros anteriormente referidos, o coeficiente de orografia, por seu turno não se altera perante uma mudança quer do tipo de zona, quer da sua categoria de terreno.

Cumprir dar uma nota relativamente à característica rugosidade do terreno:

O coeficiente de rugosidade $C_r(z)$ tem em conta a variação da velocidade média do vento no local tendo em consideração os seguintes parâmetros:

- A altura acima do nível do solo;
- A rugosidade do terreno a barlavento da construção, na direção do vento considerada;

O procedimento recomendado para a determinação do coeficiente de rugosidade, C_r , passa pela expressão (2.12) que difere consoante a altura, z .

$$C_r(z) = k_r * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{para} \quad z_{min} \leq z \leq z_{max} \quad (2.12)$$

$$C_r(z) = c_r(z_{min}) \quad \text{para} \quad z \leq z_{min}$$

Em que:

z_0 – Comprimento da rugosidade, definido para as cinco categorias de terreno tal como exposto na norma EN50341-1:2012 e ainda, conforme à EN1991-1-4.

k_r – Coeficiente de terreno dependente do comprimento de rugosidade z_0 , calculado através de:

$$K_r = 0.19 * \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0.07} \quad (2.13)$$

Em que:

$z_{0,II} = 0.05\text{m}$ (categoria de terreno II), ver Tabela 2.2;

z_{min} – Altura mínima definida na Tabela 2.2;

z_{max} – A ser considerado igual a 200m;

Note que, k_r e z_0 estão ligados entre si.

z_0 e $z_{\min}$ dependem da categoria do terreno. Os valores são fornecidos na Tabela 2.2 em função das cinco categorias terreno representativas.

É de concluir, portanto, que estando na posse do conhecimento da altura acima do solo da torre metálica (z) e a categoria do mesmo, é possível desde logo determinar o coeficiente de rugosidade (C_r).

O valor correspondente à velocidade média do vento é obtido através do produto do valor do coeficiente de rugosidade, pelo valor de referência da velocidade do vento V_b .

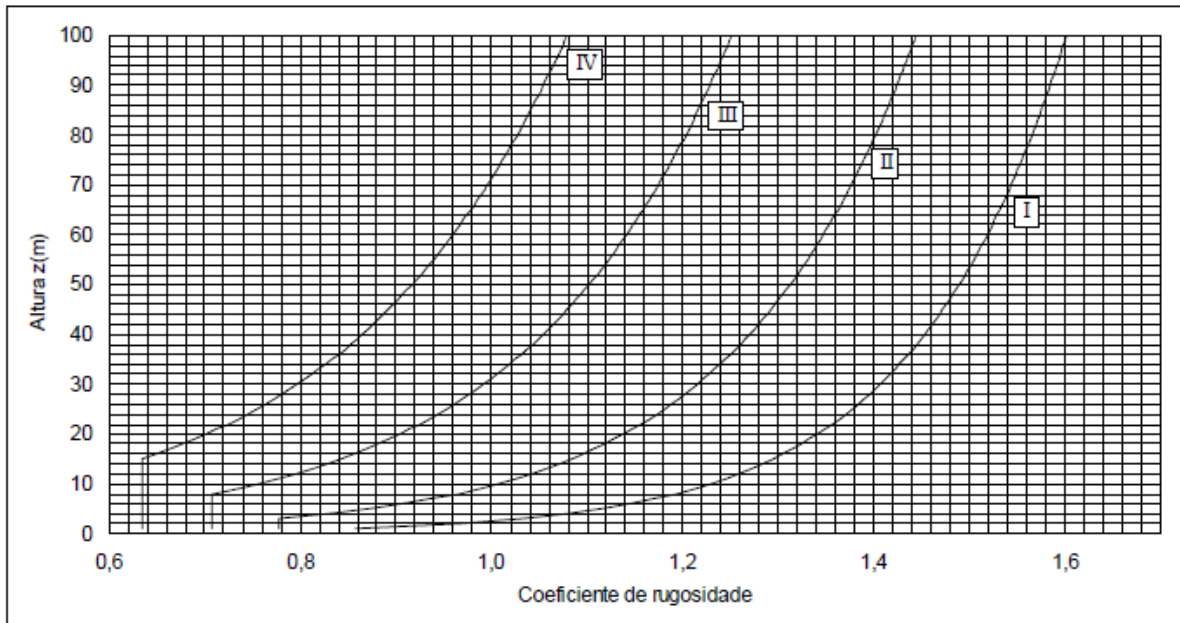


Fig. 2.5 – Coeficiente de Rugosidade, C_r

2.3.3. TURBULÊNCIA DO VENTO

A turbulência do vento à altura z , é definida pelo quociente entre o desvio padrão da turbulência de vento, e a velocidade média do vento:

$$\sigma_v = k_r * v_b * k_I \quad (2.14)$$

Em que,

σ_v Desvio padrão de turbulência;

k_r Coeficiente de terreno

k_I Coeficiente de turbulência

De forma a determinar o I_v é fornecida a seguinte expressão:

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{V_m} = \frac{k_I}{c_0(z) \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad \text{para } z_{min} \leq z \leq z_{max} \quad (2.15)$$

$$I_v(z) = I_v(z_{min}) \quad \text{para } z \leq z_{min}$$

Sendo,

- k_I Coeficiente de turbulência (valor recomendado = 1);
- c_0 Coeficiente de orografia – descrito em 2.3.2.1;
- z_0 Comprimento de rugosidade – demonstrado na Tabela 2.1;

2.3.4. PRESSÃO DINÂMICA DE PICO

Na equação (2.16) está implícita a velocidade do vento projetada, V_D que é definida com a velocidade média do vento, mais 3,5 desvios padrões da turbulência do vento, σ_u .

$$V_D = V_m + 3.5\sigma_v \quad (2.16)$$

Para encontrar a pressão de pico do vento $q_p(h)$ usamos a seguinte expressão:

$$q_p(z) = \frac{1}{2} \rho V_D^2 = \frac{1}{2} \rho \cdot (V_m + 3.5\sigma_v)^2 \approx \frac{1}{2} \rho V_m^2 \cdot (1 + 7I_v(z)) \quad (2.17)$$

Simplificando, a pressão dinâmica de pico, que resulta da velocidade média e das flutuações de curta duração da velocidade do vento, obtém-se pela seguinte equação:

$$q_p(z) = [1 + 7I_v(z)] \frac{1}{2} \rho \cdot v_m^2(z) \quad (2.18)$$

Sendo a pressão de pico uma incógnita chave da carga estática do vento.

2.3.5. FORÇA DO VENTO

De modo a realizar um cálculo – o mais correto e aproximado da realidade da força do vento –, a estrutura da torre deverá ser dividida em secções iguais, ou extremamente semelhantes. No entanto, além disso, é necessário ter em consideração que, na determinação da área projetada, devem ainda ser omitidas as projeções de elementos de contraventamento das faces paralelas à direção do vento e, contraventamento horizontal. (Brewer, 2017)

A força do vento pode ser calculada através de duas formas, que apesar de distintas, apresentam diversas semelhanças: através da Norma 50341, e através do Eurocódigo 1. No âmbito do presente estudo, nomeadamente na modelação que irá ser exposta posteriormente no Capítulo 4 utilizou-se o procedimento de cálculo consagrado no Eurocódigo 1 da parte 1-4.

Nesse sentido, serão explanados ambas as formas.

2.3.5.1. Cálculo através do Eurocódigo 1

A ação da força do vento num elemento da estrutura deve ser calculada de acordo com o capítulo 5.3 (2) da parte 1-4 do Eurocódigo 1, que corresponde à expressão (2.19) deste documento.

$$F_w(Z_e) = c_s c_d * c_f * q_p(Z_e) * A_{ref} \quad (2.19)$$

Em que:

- $c_s c_d$ Coeficiente estrutural;
- c_f Coeficiente de força relativo ao elemento de construção;
- $q_p(Z_e)$ Pressão dinâmica de pico à altura de referência z_e ;
- A_{ref} Área de referência do elemento de construção;

O coeficiente de força (c_f) representa o coeficiente aerodinâmico que permite teoricamente o efeito do vento sobre uma estrutura ou o seu elemento, incluindo o efeito de atrito, dependente das características globais da própria estrutura ou elemento estrutural.

$$c_f = c_{f,0} * \Psi_\lambda \quad (2.20)$$

Em que:

- $c_{f,0}$ Coeficiente de força para elementos estruturais;
- Ψ_λ Coeficiente de efeitos de extremidade;

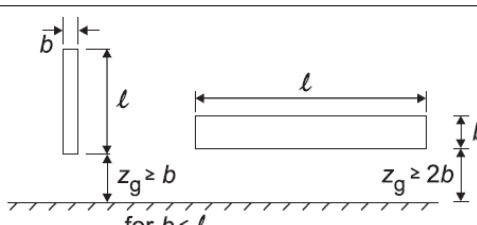
Note-se que,

O valor de $c_{f,0}$ é recomendavelmente 2.0, para todos os elementos sem livre escoamento, em torno das extremidades.

Relativamente à variável, Ψ_λ , esta será determinada pela função da esbelteza efetiva. Dessa forma, o coeficiente resultará na redução da força exercida pelo vento, na circunstância de lhe ser possível contornar as extremidades da construção de uma forma menos rígida.

De forma a determinar a esbelteza efetiva, podem ser utilizados os valores recomendados para perfis com arestas vivas e estrutura treliçada, conferidos pelo Eurocódigo.

Esbelteza efectiva λ

N.º	Posição da estrutura, vento perpendicular ao plano da figura
1	

Para elementos com secção poligonal, perfis com arestas vivas e estruturas treliçadas:

- para $\ell \geq 50$ m, o menor dos valores $\lambda = 1,4 \ell / b$ ou $\lambda = 70$;

- para $\ell < 15$ m, o menor dos valores $\lambda = 2 \ell / b$ ou $\lambda = 70$.

Fig. 2.6 – Valores de λ recomendados para perfis com arestas vivas e estruturas treliçadas

Ultrapassada a determinação da esbelteza efetiva, poderá ser determinado o coeficiente de efeitos de extremidade. Para tal, alicerça-se no índice de cheios, φ , que para o caso ora em estudo, será tido em conta um valor unitário. Este índice de cheios representa a relação entre a soma das áreas projetadas dos elementos e da área limitada pelo contorno exterior, analisando a estrutura como um todo – conforme se depreende através da equação (2.21).

A Fig. 2.7 possibilita a determinação do coeficiente de extremidade em função dos parâmetros mencionados nos parágrafos anteriores.

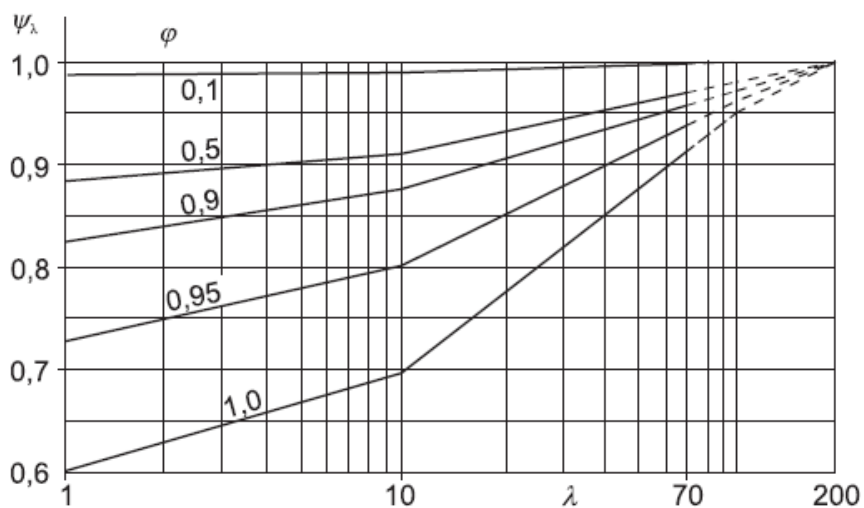


Fig. 2.7 – Valores indicativos do coeficiente de efeitos de extremidade ψ_λ em função do índice de cheios φ e da esbelteza λ

O índice de cheios φ é obtido pela equação (2.21):

$$\varphi = \frac{A}{A_c} \quad (2.21)$$

Em que:

A Soma das áreas projetadas dos elementos;

A_C Area limitada pelo contorno $A_C = l * b$.

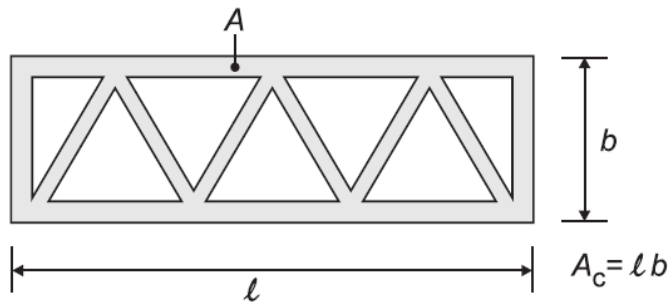


Fig. 2.8 – Definição do índice de cheios φ

As áreas de referência deverão ser consideradas da seguinte forma, conforme a Fig. 2.9.

$$\begin{aligned} \text{Na direção x:} & \quad A_{ref,x} = l * b \\ \text{Na direção y:} & \quad A_{ref,y} = l * d \end{aligned} \quad (2.22)$$

Em que:

l Comprimento do elemento estrutural considerado;

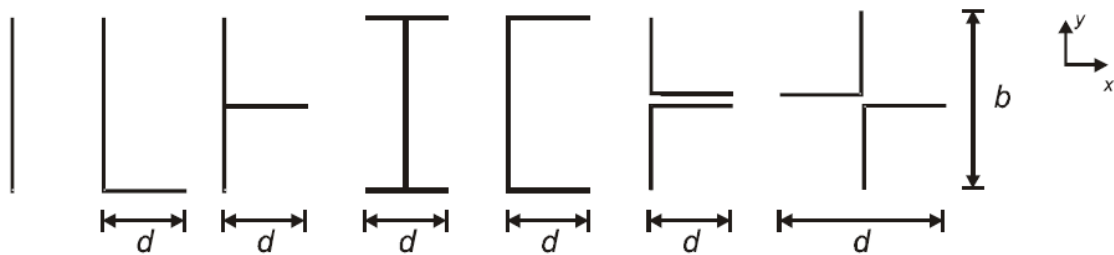


Fig. 2.9 – Seções estruturais com arestas vivas

Já o coeficiente estrutural $c_s c_d$, é uma variável que por seu turno, considera a probabilidade de ocorrência da pressão do vento de rajada, ao longo de toda a estrutura. Resulta do produto do coeficiente de dimensão c_s , e o coeficiente dinâmico relativo ao efeito de vibrações da estrutura ocorridos por causa do fenómeno de turbulência da ação do vento, c_d . Portanto, $c_s c_d$ calcula-se através da seguinte expressão:

$$c_s c_d = \frac{1+2*k_p*I_v(z_s)*\sqrt{B^2+R^2}}{1+7I_v(z_s)} \quad (2.23)$$

Em que:

z_s Altura de referência para a determinação do coeficiente estrutural;

k_p Fator de pico;

$I_v(z_s)$ Intensidade de turbulência à altura de referência;

B^2 Coeficiente de resposta quase-estática, que tem em conta a falta de total correlação das pressões sobre a superfície da construção;

R^2 Coeficiente de resposta em ressonância, que tem em conta o efeito da turbulência em ressonância com o modo de vibração;

O Anexo B constante da parte 1-4 do Eurocódigo 1 fornece o procedimento a utilizar para a determinação de, k_p , B^2 , e R^2 .

Já o Anexo C indica um procedimento alternativo, sendo por isso, distinto. Ora, acontece que as diferenças relativas aos valores de obtidos por ambos os métodos, não excedem cerca de 5%.

Neste tipo de estruturas, por simplificação e por segurança, pode considerar-se o coeficiente $c_s c_d = 1$, pois que, na circunstância da utilização da expressão referida em (2.23), os valores obtidos terão uma diferença da unidade que ronda os 10%, portanto não significativa.

2.3.5.2. Cálculo através da Norma

Como explicado anteriormente é igualmente possível calcular a força do vento que incide na estrutura, com o auxílio da Norma EN50341-1:2012, prevista na cláusula 4.4.3. Esta norma é baseada numa outra – Norma EN1991-1-4.

O estudo da ação do vento em cada torre, varia consoante a localização geográfica da mesma. Contudo, há ainda a ter em conta que a força do vento na própria estrutura pode ser determinada por dois métodos, sendo que pelos motivos que se explicarão, no âmbito do presente estudo fará mais sentido estudar pormenorizadamente o método 1.

No âmbito do método 1, a torre é dividida em secções, e o fator de arrasto está vinculado aos quadros das secções da terra, considerando o lado do barlavento e do sotavento.

Por sua vez, no âmbito do método 2, é analisado cada membro individual da torre, e o fator de arrasto está ligado aos membros da torre, a especificidade relativamente ao método anterior é que neste não se considera o barlavento e sotavento.

O método 2 é recomendado para geometrias de torre irregulares. Ora, a estrutura metálica da torre, como se compreende, não se caracteriza por ser irregular, e por assim não ser, será mais vantajoso o estudo da estrutura com base na aplicação do método 1.

2.3.6. FORÇAS EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS-MÉTODO 1

Como é possível depreender, o cálculo da força do vento através da EN50341 e através do Eurocódigo 1 apresentam diversas semelhanças, porém, existem algumas divergências que apontaremos de seguida.

Ora, se o cálculo for realizado através da Norma, é um dado adquirido de que este se movimenta na horizontal, sendo perpendicular às componentes da torre, com uma altura h .

Para torres de treliça de seções transversais retangulares, a força do vento atua no centro de gravidade de cada seção da torre. Consequentemente, o componente de força, Q_{wt} , que atua na direção do vento é dado pela seguinte expressão:

$$Q_{wt} = q_p(h)G_t(1 + 0.2\sin^2\varphi)(C_{t1}A_{t1} + C_{t2}A_{t2}\sin^2\varphi) \quad (2.24)$$

Em que:

$q_p(h)$ Pressão dinâmica de pico, ver capítulo 2.3.4.

h Altura de referência acima do solo a ser levada em consideração para a torre treliça da secção a ser considerada;

G_t Fator estrutural para torre de treliça. O valor recomendado é 1, pode ainda ser calculado através da equação (2.25), se o valor conservador recomendado de 1 não for obrigatório;

$C_{t1}C_{t2}$ Fator de arrasto para a face 1 do painel da torre de treliça (respetivamente face 2) da secção a ser considerada, com vento perpendicular a este painel;

$A_{t1}A_{t2}$ Área efetiva dos elementos da face 1 do painel da torre de treliça (respetivamente face 2) da secção a ser considerada;

φ Ângulo entre a direção do vento e o eixo longitudinal do braço;

Note-se que, o componente de força transversal à direção do vento pode ser negligenciado.

$$G_t = \frac{1+6I_u(h)\sqrt{B^2}}{1+7I_u(h)} \quad (2.25)$$

Onde

$$B^2 = \frac{1}{1+\frac{3}{2}\times\frac{H_t}{L(h)}} \quad (2.26)$$

Em que:

H_t Altura total da torre;

$L(z)$ Escala de comprimento turbulento;

$$L(z) = 300 \left(\frac{z}{200} \right)^{0.67+0.05 \ln(h_0)} \quad (2.27)$$

C_{t1} e C_{t2} são os fatores de arrasto para o painel da torre em consideração para as faces 1 e 2, respectivamente, considerando o vento perpendicular ao painel.

$$C_{ti} = 3.96(1 - 1.5X_i + X_i^2) \quad (2.28)$$

Os valores C_{t1} e C_{t2} são calculados conforme a razão de solidez, χ , para uma certa secção que se baseia no cálculo com referência à Fig. 2.10:

$$X = A_{ti} \frac{2}{h(b_1 + b_2)} \quad (2.29)$$

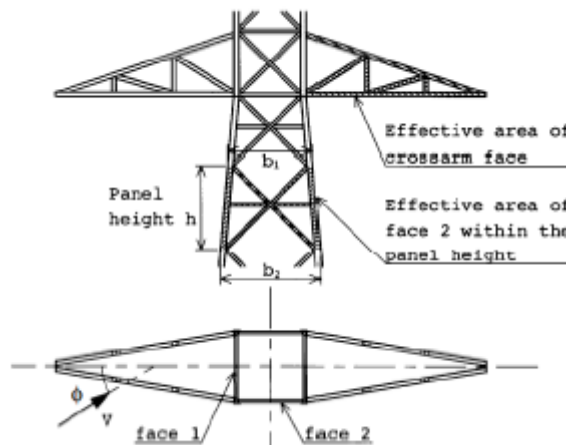


Fig. 2.10 – Definição da face do painel da torre

2.4.O FENÓMENO DE DESPRENDIMENTO DE VÓRTICE OU VORTEX SHEDDING

O desprendimento de vórtice provoca uma força de intensidade inconstante na direção transversal à ação do vento.

A instabilidade aerodinâmica ocorre quando existe um escoamento de um fluido, no qual se verifica criação de vórtice. Ora, este fenómeno chama-se instabilidade aerodinâmica. (Pass, 2016)

Diferentemente, quando um corpo está sujeito ao escoamento de um fluido e se deforma em virtude da força originada por esse escoamento, vai consequentemente provocar novos deslocamentos de natureza oscilatória, e assim nasce o fenómeno de instabilidade aeroelástica. O desprendimento de vórtice é então uma forma de instabilidade aeroelástica. Atualmente as estruturas a serem atingidas por este fenómeno

são cada vez mais, independentemente da dimensão das mesmas, ou seja, o fenómeno de desprendimento atua quer em pontes, quer em postes, quer em qualquer outra estrutura.

Como bem se sabe, a ação do vento provoca vibrações criadas pelo desprendimento de vórtice em corpos designados como “bluff bodies”, ou seja, com pouca aerodinâmica, como por exemplo as torres.

Um dos principais parâmetros da mecânica dos fluidos é o número de Strouhal com a sua definição ligada ao fenómeno de desprendimento de vórtices.

2.4.1. O EFEITO DAS VIBRAÇÕES PROVOCADAS POR DESPRENDIMENTO DE VÓRTICES

A ação do vento provoca vibrações que estão associadas ao desprendimento de vórtice em corpos com pouca aerodinâmica.

Através do Eurocódigo EN1991-1-4, previsto do Anexo E é possível determinar o efeito do desprendimento de vórtice para estruturas ou elementos esbeltos. Para sabermos se é necessário fazer uma verificação aos desprendimentos de vórtice teremos de observar se estão cumpridos os seguintes critérios:

- Quando o quociente entre a maior e menor dimensão transversal da construção, ambas consideradas no plano perpendicular à direção do vento, é superior a 6.
- Se a velocidade crítica do vento for inferior a 1,25 vezes a velocidade média ao nível da secção transversal em que se desencadeia o desprendimento de vórtice.

$$v_{crit,i} < 1.25 \cdot v_m \quad (2.30)$$

Onde:

$v_{crit,i}$ Velocidade crítica – que pode ser determinada pela expressão (2.31)

v_m Valor característico da velocidade média do vento referida a períodos de 10 minutos, ao nível da secção transversal em que se desencadeia o desprendimento de vórtice, conforme infra explicado no 2.3.2.

$$v_{crit,i} = \frac{b \cdot n_{i,y}}{St} \quad (2.31)$$

Em que:

b Largura de referência da secção transversal na qual ocorre o desprendimento de vórtice em ressonância, e onde o deslocamento modal é máximo, relativamente à construção ou ao elemento estrutural considerado; no caso de cilindros de base circular a largura de referência é o diâmetro exterior;

$n_{i,y}$ Frequência própria do modo i de vibração em flexão na direção transversal do vento;

St Número de Strouhal – definido na expressão (2.32)

$$St = \frac{f_v \cdot D}{v} \quad (2.32)$$

Em que:

- V Velocidade média do fluido;
 f_v Frequência de vibração do desprendimento de vórtice;
 D Diâmetro do elemento ou estrutura;

Por fim, e de modo a que não seja necessário analisar o efeito do desprendimento de vórtices, está aqui em falta a explicação da variante v_m . Contudo, esta variante já foi anteriormente, profunda e analiticamente estudada no 2.3.2.

2.4.1.1. Ação de desprendimento de vórtices

O efeito das vibrações provocadas pelo desprendimento de vórtice, podem ser calculadas a partir da força de inércia por unidade de comprimento, $F_w(s)$. Esta atua na direção perpendicular à do vento na posição s , ao longo da estrutura. Por conseguinte, a força de inércia numa determinada posição s , pode ser calculada com a seguinte expressão:

$$F_w(s) = m(s) \cdot (2 \cdot \pi \cdot n_{i,y})^2 \cdot \phi_{i,y}(s) \cdot y_{F,m\acute{a}x} \quad (2.33)$$

Em que:

- $m(s)$ Massa oscilante da estrutura por unidade de comprimento $[Kg/m]$;
 $n_{i,y}$ Frequência própria da estrutura;
 $\phi_{i,y}(s)$ Configuração modal da estrutura, normalizada com o valor 1 no ponto de deslocamento máximo;
 $y_{F,m\acute{a}x}$ Deslocamento máximo ao longo do tempo, do ponto em que $\phi_{i,y}(s)$ é igual a 1;

Existem dois métodos distintos aptos a calcular a vibração devida ao desprendimento de vórtices, estes métodos são-nos fornecidos pelo Eurocódigo 1, nomeadamente no ponto E.1.5.2 e E.1.5.3.

Em tom de resumo:

O método E. 1.5.2 pode ser utilizado para vários tipos de estruturas. Inclui os efeitos da turbulência e da rugosidade – já anteriormente explicados –, poderá ainda ser utilizado em condições meteorológicas normais.

O método E. 1.5.3, por seu turno, poderá ser utilizado no cálculo das vibrações em estruturas em consola, nas quais as suas dimensões tenham uma distribuição regular ao longo do seu eixo principal. Enquadram-se neste âmbito tipicamente, as chaminés e os mastros. No entanto, já não poderá ser aplicado a estruturas dispostas em grupo, ou em linha, nem em cilindros. Permite considerar diferentes intensidades de turbulência, que poderão diferir consoante as condições climatéricas.

2.5. MODELAÇÃO DO VENTO UTILIZANDO AÇÕES DINÂMICAS

Como ponto prévio ao presente subcapítulo, é de (re)lembrar que as ações podem ser classificadas conforme as reações estruturais que causam. Assim, as ações estáticas caracterizam-se por não causar uma aceleração significativa nos componentes ou nos elementos da estrutura. Ao invés, as ações dinâmicas causam uma aceleração significativa nos referidos componentes ou elementos. (Oliveira, 2014)

Dessa forma, como se sabe e de acordo com o que foi demonstrado até ao presente momento neste trabalho, o vento é um fenómeno de natureza dinâmica, que esta associado à oscilação da sua velocidade e duração. Portanto, exige uma análise – o mais precisa possível –, de modo a concluir qual a resposta da estrutura da torre à sua ação – dinâmica –, e no decurso do tempo.

Com o objetivo de estudar a resposta daquela, em função do domínio do tempo, é gerada de modo artificial, um conjunto de séries temporais de vento, permitindo desse modo, o cálculo das respetivas forças aerodinâmicas. O processo de geração das referidas séries temporais é brevemente descrito em seguida.

2.5.1. SERIES TEMPORAIS DE VENTO

Através do método harmónico proposto pelo Deodatis, é possível gerar artificialmente séries temporais de vento.

As análises realizadas no domínio do tempo, caracterizam-se na sua generalidade, pela complexidade e dificuldade em implementação. Assim, de modo a possibilitar a consideração da variabilidade da componente da velocidade do vento – no tempo e no espaço –, é criado um conjunto de séries temporais para certos pontos, com determinadas cotas ao longo da estrutura.

Efetivamente, de forma a se proporcionar a criação das séries temporais, é indispensável definir diversos parâmetros. Estes encontram-se definidos pela norma EN1991:1-4.

Todavia, para que seja possível considerar-se a distribuição da força do vento, é ainda necessário ajustá-la em função da densidade espectral de potência adimensional de von Karman, que se traduz na seguinte expressão (2.34).

$$\frac{n S_u(n)}{\sigma_u^2} = \frac{4 f_L}{(1 + 70,8 f_L^2)^{5/6}} \quad (2.34)$$

Em que,

f_l Frequência adimensional, determinada pela equação:

$$f_l = \frac{n^* l_u(z)}{\bar{U}(z)} \quad (2.35)$$

A presente circunstância tem lugar uma vez que o método de Deodatis, implementado em MATLAB, é o espectro do vento de von Karman, e este por sua vez, permite a definição das propriedades dinâmicas do vento para a geração de séries.

As escalas de turbulência $L(z)$, são definidas através da equação (B.1), que se encontra no anexo B, do Eurocódigo 1. São apresentadas em função da densidade espectral de potência adimensional $S_L(z, n)$. Para a função de densidade de potência espectral adimensional de von Karman, as escalas de turbulência foram modificadas, de forma a que a densidade espectral $S_v(z, n)$, do Eurocódigo 1 e de von Karman, fossem coincidentes no intervalo de frequências $[0.10; 5.0]$ (Hz) como mostra na Fig. 2.11.

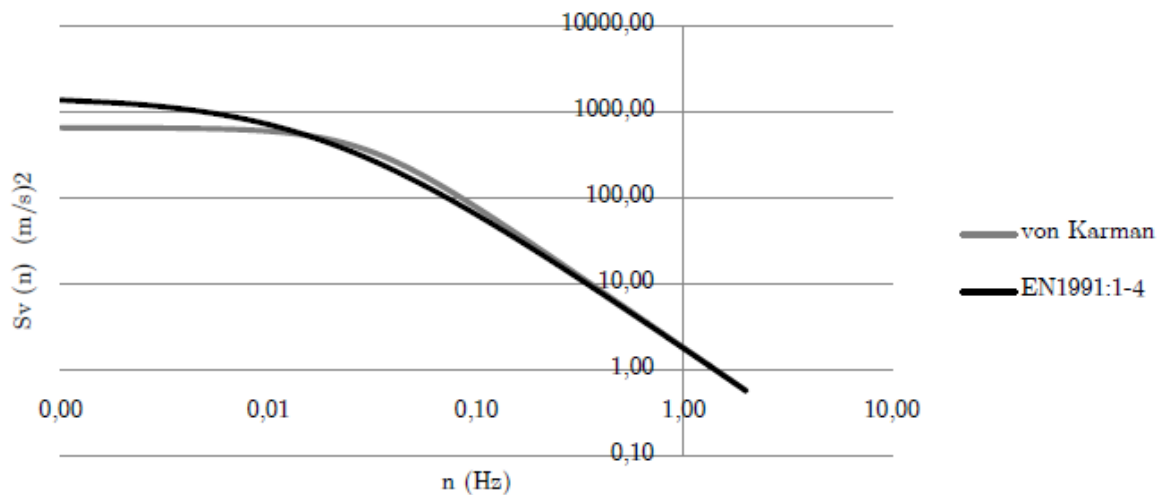


Fig. 2.11 – Ajuste da densidade espectral $S_v(n)$ entre von Karman e o Eurocódigo 1

2.5.2.SERIES TEMPORAIS DE FORÇAS AERODINÂMICAS

Como vimos, o vento caracteriza-se por ser uma ação dinâmica, e como tal surge a necessidade de calcular as respetivas forças aerodinâmicas. Estas foram obtidas recorrendo à equação (2.36)

$$F(t) = \frac{1}{2} \rho_{ar} \cdot C_D \cdot A \cdot \bar{U}^2 + \rho_{ar} \cdot A \cdot \bar{U} \cdot u(t) - \rho_{ar} \cdot C_D \cdot A \cdot \bar{U} \cdot \dot{x}(t) \quad (2.36)$$

Esta força é composta por outras três forças, sendo estas: a força de arrasto associada à velocidade média do vento, a força de arrasto associada à flutuação do vento, e por fim, a força de amortecimento aerodinâmico, associada às oscilações da própria estrutura.

Portanto, tendo como ponto de partida a componente que representa a força de arrasto associada à flutuação do vento, e as séries temporais previamente obtidas, foi possível calcular séries temporais de forças representativas do vento como uma ação dinâmica.

Para que fosse possível modelar o início e o termo das séries temporais, as forças supra elencadas foram afetadas pela função representada na Fig. 2.12.

Como resultado, e de acordo com o Eurocódigo 1, a fase inicial e final de excitação dinâmicas são suavizadas e garante-se entre os 100 e 700 segundos, uma análise para a duração de atuação por um período de 10 minutos.

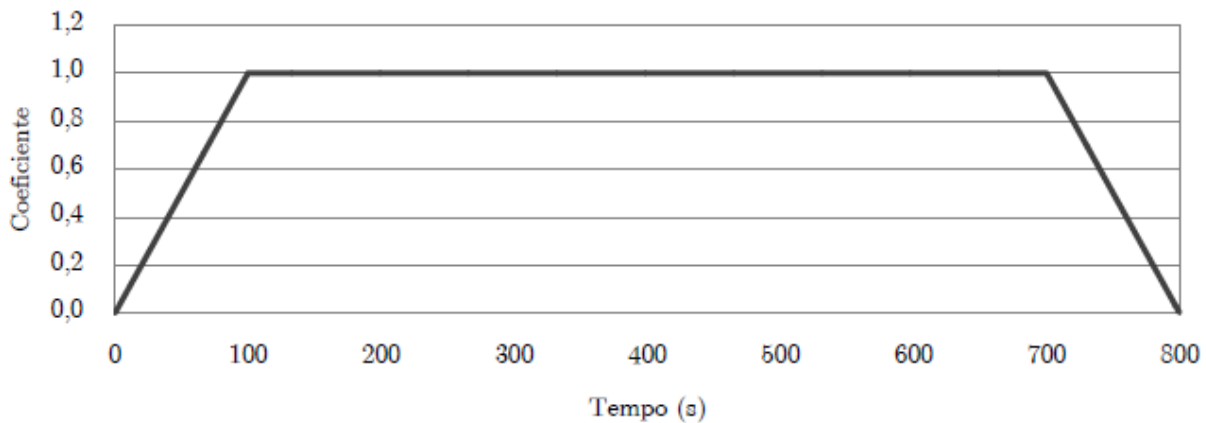


Fig. 2.12 - Função modeladora de início e fim das séries temporais de forças

2.5.3.MÉTODO DE CÁLCULO DA RESPOSTA DINÂMICA

A resposta dinâmica da estrutura em regime elástico é obtida pelo método de sobreposição modal, concretizado com a introdução em cada modelo numérico, das respectivas séries temporais de forças.

O método de sobreposição modal desenvolve-se através da transformação das equações de movimento a partir de um conjunto de N equações diferenciais simultâneas, para um conjunto de N equações independentes. Esta interligação é provocada pela transformação dos deslocamentos de coordenadas geográficas, para coordenadas modais.

As equações são resolvidas para as respostas de cada um dos modos de vibração e a resposta total do sistema é obtida então pelo método de sobreposição modal, ou seja, pela sobreposição das soluções individuais.

Concluimos portanto, que o produto da matriz dos modos de vibração Φ com o vetor das amplitudes modais Y , resulta na obtenção do deslocamento total x , através da equação (2.37).

$$x = \sum_{i=1}^N \phi_i y_i = \Phi Y \quad (2.37)$$

Note-se que, a variável que corresponde aos modos de vibração Φ , é constante ao longo do tempo, para um dado amortecido é dada a equação (2.38).

$$M\Phi\ddot{Y}(t) + C\Phi\dot{Y}(t) + K\Phi Y(t) = F(t) \quad (2.38)$$

Em que:

M Matriz de massa;

- C Matriz de amortecimento;
 K Matriz de rigidez;

Multiplicando os termos que compõem a equação anterior por Φ^T , e tendo em consideração as condições de ortogonalidade dos modos de vibração, a equação (2.38) é dada na sua forma desligada para o n -ésimo modo de vibração segundo a equação (2.39).

$$m_n \ddot{y}(t) + c_n \dot{y}(t) + k_n y(t) = F_n(t) \quad (2.39)$$

Em que:

- y_n Aceleração;
 $\dot{y}_n$ Velocidade;
 $\ddot{y}_n$ Deslocamento;
 C_n Coeficiente de amortecimento;
 F_n Força modal;
 M_n Massa modal do n -ésimo modo de vibração;

O coeficiente de amortecimento do n -ésimo modo de vibração, para um oscilador de um grau de liberdade é fornecido pela equação (2.40). Ora, este método é dotado pela vantagem de possibilitar a definição do coeficiente de amortecimento estrutural para cada modo de vibração da estrutura. No entanto, para que este seja alcançado, é ainda necessário determinar – previamente –, as frequências próprias da estrutura.

$$c_n = 2 \xi_n m_n w_n \quad (2.40)$$

Ao dividir os termos da equação (2.39) por m_n , é possível obter a equação de equilíbrio dinâmico: a expressão (2.41), sendo esta idêntica à equação obtida para um oscilador independente com um grau de liberdade.

$$\ddot{y}(t) + \xi_n 2w_n \dot{y}(t) + w_n^2 y(t) = \frac{F_n(t)}{m_n} \quad (2.41)$$

Acresce que, é através da equação anteriormente apresentada, que são obtidos os valores de amplitude modais. E, somando o contributo dos vários modos calcula-se os deslocamentos totais como demonstrado em (2.37). Podem ainda ser apresentados em função de y_n , de acordo com a expressão (2.42).

$$x(t) = \phi_1 \cdot y_1(t) + \phi_2 \cdot y_2(t) + \dots + \phi_n \cdot y_n(t) \quad (2.42)$$

2.5.4. CÁLCULO DE AMORTECIMENTO TOTAL

Com o auxílio do Anexo F do Eurocódigo 1, é possível calcular o amortecimento total, conforme demonstrado pela equação (2.43), este resulta na soma do amortecimento estrutural com o amortecimento aerodinâmico, na ausência do amortecimento devido a dispositivos especiais.

$$\delta = \delta_s + \delta_a \quad (2.43)$$

Em que:

δ_s Decremento logaritmo de amortecimento estrutural;

δ_a Decremento logaritmo de amortecimento aerodinâmico para o modo funcional;

Assim, com base na consulta do Anexo F, concretamente analisando o Quadro F.2, resulta um valor aproximado de 0,05 para o decremento logaritmo de amortecimento estrutural de edifícios de aço. Já relativamente ao cálculo do decremento logaritmo de amortecimento aerodinâmico não foi utilizada a mesma expressão, mas sim a expressão contida no ponto F.16 do referido anexo, no presente estudo com a referência de equação (2.44).

$$\delta_a = \frac{c_f \cdot \rho \cdot v_m(Z_s)}{2 \cdot n_1 \cdot \mu_e} \quad (2.44)$$

Na qual,

c_f Coeficiente de força para a ação do vento na direção deste;

μ_e Massa equivalente por unidade de área da construção;

z_s Altura de referência considerada para o cálculo do coeficiente estrutural $c_s c_d$;

n_1 Frequência do modo fundamental de vibração;

ρ Densidade do ar;

v_m Velocidade média do vento

Com base no Eurocódigo 1, este decremento estimado para o modo fundamental de vibração e para as vibrações nas direções do vento, optou-se por estimar da mesma forma que os restantes decrementos relativos a modos de vibração superior. A opção pela explicada escolha considerou que na circunstância de uma estrutura excitada dinamicamente pelo vento, o modo de vibração fundamental, e consequentemente, é o que apresenta maior contributo para a resposta dinâmica. Em comparação, os modos superiores apresentam um contributo bastante inferior.

Terminamos este capítulo da nossa exposição, informando que o coeficiente de amortecimento ξ é obtido pela seguinte equação (2.45).

$$\delta = 2\pi\xi \quad (2.45)$$

3

CARACTERIZAÇÃO DA AÇÃO DO VENTO EM TORRES METÁLICAS

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo será caracterizada detalhadamente a torre metálica objeto de estudo, desde a estrutura da torre, os condutores, as cadeias de isoladores e acessórios, perfis de aço e secção, e por fim, as fundações. Após a caracterização, serão elencadas as ações a considerar, a saber: o peso próprio da estrutura, a pressão dinâmica do vento sobre a torre e ainda, a força dos cabos. A título de exemplo, a Fig. 3.1 e Fig. 3.2, demonstram torres destinadas ao fornecimento de energia. (Brewer, 2017)

Ultrapassado o obstáculo de saber quais as ações a considerar, é necessário proceder ao cálculo da ação do vento, que se revela uma tarefa complexa pelos motivos que se explanarão, mas cuja conclusão é irrefutável: a pressão do vento não é passível de ser representada por uma função matemática como acontece noutras estruturas opacas. Pelo que surgiu a necessidade de adotar um método distinto, através da criação de uma folha de cálculo no Excel que nos indica o valor da força do vento em cada nó, através das propriedades geométricas da torre. Assim, a determinação da força do vento está diretamente relacionada com as propriedades geométricas da torre.

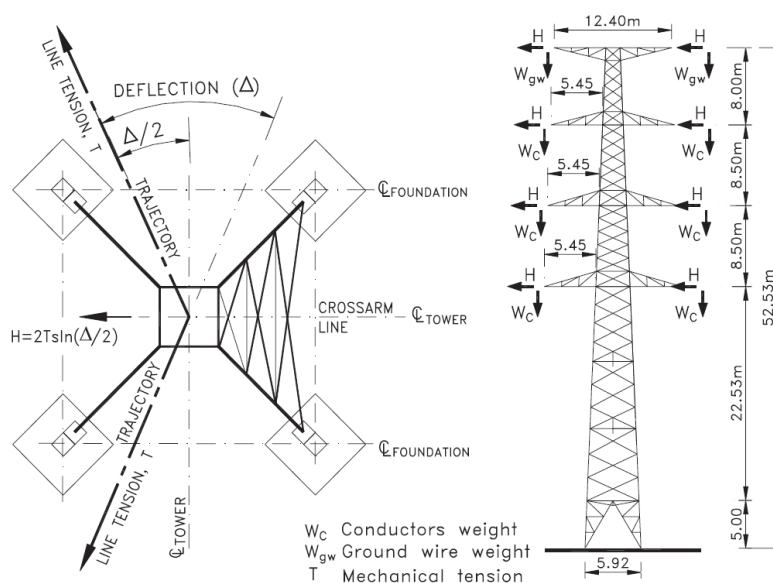


Fig. 3.1 – Exemplo de torre para fornecimento de energia.

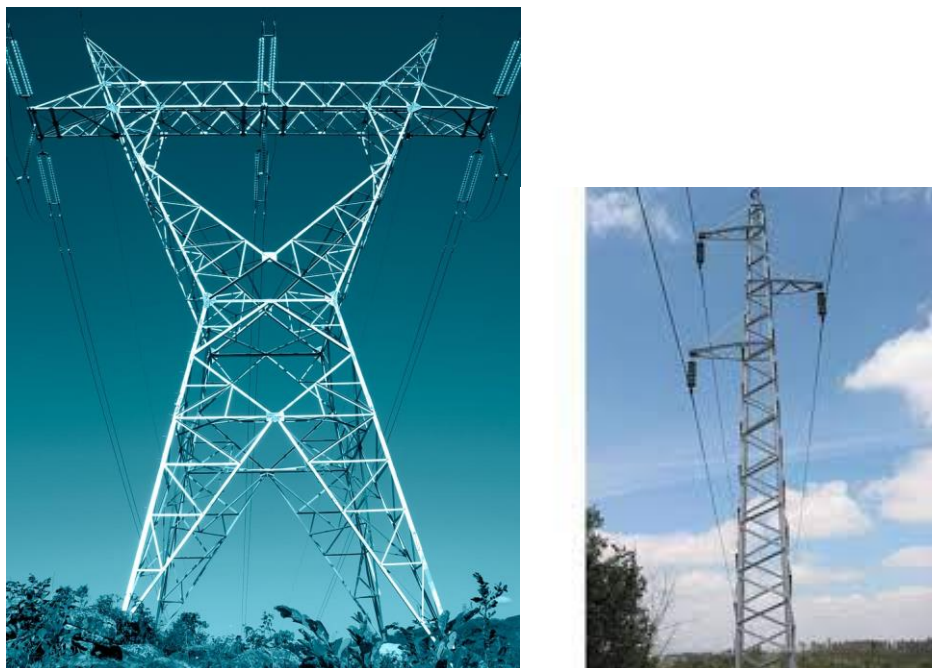


Fig. 3.2 – Diversos tipos de torres de estrutura metálicas

3.2. CARACTERIZAÇÃO/ DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA

3.2.1. TORRE

As torres metálicas de transporte de energia podem ter várias configurações, quer de planta, quer em altura. Grande parte das torres de distribuição de energia são compostas por uma estrutura treliçada com base quadrangular e/ou retangular, geralmente são constituídas por vários tipos de cantoneiras, de diversas dimensões. Menos frequentemente, são constituídas por tubos metálicos. (Em, 2016)

É possível constatar que ao longo da altura da torre, o formato da treliça também é suscetível de variação, sendo por vezes composta apenas por uma diagonal, ou por cruzamento de duas diagonais. Acontece que, há torres nas quais se observam as duas situações, que é o caso da torre que iremos analisar posteriormente, no capítulo 4.4.

Um outro aspeto a digno de menção, será o acréscimo de várias barras horizontais ao longo da estrutura, de forma a proporcionar um travamento horizontal. Outra característica variável numa torre, é o número de braços que esta pode conter na parte superior, dependendo da quantidade de cabos a transportar, e da tensão dos mesmos.

3.2.2. CONDUTORES

Uma torre é composta por vários tipos de cabos na sua direção longitudinal, desde os cabos condutores ao cabo terra.

O cabo condutor tem como principal objetivo o transporte da energia elétrica, que o faz de uma torre para a outra, formando assim uma linha de transmissão conectando-se a várias torres, e consequentemente distribuindo a energia para onde for necessário. Os mais recentes condutores são feitos de bobinas de alumínio – dotadas de uma condutividade elétrica de 62% -, são também materiais mais baratos

comparativamente com o cobre, cuja condutividade é de 100%. Contudo, não obstante o alumínio ser dotado de uma condutividade elétrica menor, a verdade é que corresponde a um condutor mais satisfatório, pois que é de extrema leveza e facilidade de montagem e de manutenção. Entende Sidnei Ueda - engenheiro especialista da Alubar - que “Quando aumentamos a secção do cabo de alumínio em 28%, temos a mesma capacidade de condução do cabo de cobre e, ainda assim, a metade do seu peso. Além disso, o custo do metal com base no London Metal Exchange (LME) corresponde a apenas 1/5 do cobre. É um grande diferencial, tornando a aplicação desses cabos muito mais vantajosa”. (Vantagens Do Alumínio: Metal Oferece Excelente Condutividade Elétrica | Revista Alumínio, n.d.)

Assim sendo, o fio de cobre tem, nos dias de hoje, a sua mais comum aplicação nas linhas de baixa tensão.

O condutor é um material flexível, que detém uma massa constante por unidade de comprimento. Pela sua natureza flexível, quando se encontra esticado terá um formato de catenária, significando isto, que a curvatura do cabo pode ser calculada, e normalmente é um fator crítico no projeto de uma linha de transmissão.

Por outro lado, o fio terra tem como objetivo fornecer uma ligação direta do topo da torre ao solo, isolando assim a estrutura no caso de queda de um raio. Habitualmente, nas torres de alta tensão de linha, devido à sua própria natureza, é usual serem utilizados dois fios terra.

A tabela seguinte demonstra as propriedades de cada cabo:

Tabela 3.1 - Propriedades do material do condutor e do fio terra

Wire type	Name	Material	Area			No. Of wire		Diameter		Mass per unit length
			Al	Steel	Total	Al	Steel	Core	Cond.	
[-]	[-]	[-]	[mm ²]	[mm ²]	[mm ²]	[-]	[-]	[mm]	[mm]	[kgm ⁻¹]
Earthwire	152-AL1/89-ST1A	Aluminium and Steel	152.3	88.8	241.2	12	7	12.1	20.1	1.115
Conductor	911-AL59	Aluminium	910.7	-	910.7	61	-	-	39.2	2.517

Ambos os fios do cabo são protegidos do fio central com o propósito de aumentar a resistência e evitar a erosão, como é possível observar na Fig. 3.3. O fio terra ainda é composto por um núcleo de aço cuja finalidade é reforçar os próprios cabos, conforme ilustrado na Fig. 3.4.

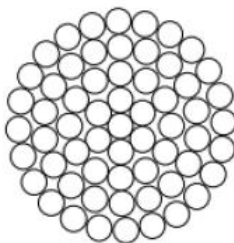


Fig. 3.3 - condutor com 61 fios em alumínio

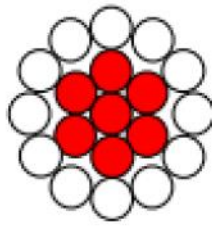


Fig. 3.4 – Fio terra com 7 fios de aço e 12 fios de alumínio no exterior

3.2.3. CADEIAS DE ISOLADORES E ACESSÓRIOS

As cadeias de isoladores – ver Fig. 3.5 - que são instaladas na extremidade de um braço são o ponto de ligação entre o condutor e fio terra à torre. Estes podem ser constituídos por vários conjuntos, podendo ser duplos ou unitários consoante o que for pretendido.



Fig. 3.5 – Pormenor de uma cadeia de isoladores

3.2.4. PERFIS DO AÇO E SECÇÃO

Como anteriormente explicado, a maior parte das estruturas são construídas com perfis de seção em L, que se designam como cantoneiras de abas iguais, ao longo das estruturas treliçadas, conforme a Fig. 3.6. As suas dimensões vão variando em função da altura, e o mesmo ocorre com a sua rigidez.

De forma a designar e distinguir entre as diversas cantoneiras adotou-se a seguinte exposição: L é o tipo de secção, o primeiro e segundo número corresponde a largura das abas e o último a sua espessura (valores em m).

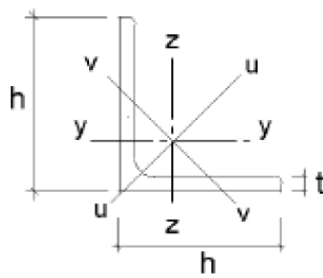


Fig. 3.6 – Configurações e sistemas de eixos da cantoneira

É prática comum a dimensão das barras ir diminuindo da parte inferior para a parte superior da torre. Por outro lado, é igualmente notório que os elementos verticais apresentam na sua maioria, dimensões superiores às dimensões dos elementos horizontais e diagonais.

3.2.5.FUNDAÇÕES

Existem vários tipos de fundações para torres de estrutura metálicas, tais como fundações diretas, profundas e especiais. A escolha do tipo de fundação é baseada em diversos fatores, entre os quais, a viabilidade técnica e econômica, o tempo de execução e a disposição de equipamentos.(Maria, 2014)

As fundações diretas são executadas em concreto armado de forma a distribuir as cargas nelas aplicadas através no solo. Habitualmente são produzidas com laje na parte inferior, de altura constante ou variável.

As sapatas podem assumir qualquer forma, sendo as mais comuns, as sapatas quadradas ou retangulares, como se verifica através da Fig. 3.7 e Fig. 3.8. São as mais utilizadas quando o solo apresenta uma boa resistência a baixa profundidade. Frequentemente o assentamento é feito entre os 2 a 4 m de profundidade.



Fig. 3.7 – Apoio da torre

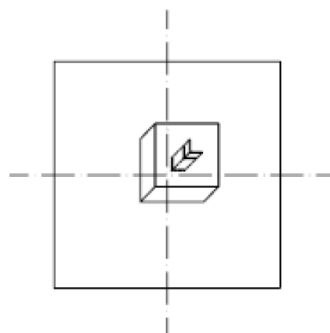


Fig. 3.8 – Desenho esquemático de uma planta

3.3. AÇÕES A CONSIDERAR

No presente modelo de cálculo de esforços comportados pelas espécies de estruturas em estudo, são considerados três tipos de ações sobre a torre.

A primeira ação a considerar é o peso próprio. Este, por seu turno, é calculado com base no respetivo peso de aço de 72,5 kN/m³, consequentemente, o peso da estrutura vai diferir em função das secções da barra. É uma ação permanente que atua sempre no sentido da gravidade, ou seja, verticalmente. O valor total desta ação é calculado automaticamente pelo programa Robot Structural, que calcula o resultado com base no peso específico do material e a sua respetiva geometria. Significa isto que, o peso do material e a geometria das suas secções consubstanciam pressupostos essenciais para a determinação do valor da ação, pelo que devem ser introduzidos corretamente de modo a garantir a fiabilidade do resultado pretendido. Note-se que é de extrema importância não esquecer o peso próprio das porcas, dos parafusos e das chapas de ligação (chapas “gusset”), que consequentemente, afetarão o peso da estrutura, e por isso, o peso desta poderia ser aumentado em cerca de 5%, que corresponde ao valor normalmente adotado.

A segunda ação a considerar é a pressão dinâmica do vento sobre a torre. Para a simular é utilizado um programa de cálculo pensado especificamente para este efeito, as forças nos pontos de ligação das barras (nós) que correspondem à pressão dinâmica do vento sobre as barras. Este efeito vai ser explicado no ponto seguinte.

Por último, importa ainda considerar uma terceira: a força dos cabos. Esta assume-se como uma carga concentrada aplicada nos quatro nós onde os cabos estão conectados à estrutura, como vai ser explanado no capítulo 3.5.

3.4. CÁLCULO DA AÇÃO DO VENTO NA ESTRUTURA

Como mencionado no capítulo anterior, uma das ações a considerar na modelação da torre é a ação do vento, esta consubstancia a ação mais condicionante por ser a mais variável, não existindo, portanto, um valor “fixo” a aplicar. Ao contrário de outras estruturas do tipo “opaco”, a estrutura em estudo não apresenta um cálculo de pressão de vento simples.

Ora, não existe um cálculo de pressão de vento simples pois que, em primeiro lugar, e como já se explicou, a pressão do vento não é a mesma ao longo de toda a estrutura. Além disso, a área exposta ao vento é também diferente consoante a altura. Assim, a pressão do vento não é passível de ser representada por uma função matemática como acontece noutras estruturas opacas. Nas estruturas aqui em estudo, a pressão do vento varia consoante os nós, as barras e a geometria da estrutura.

Explicando a distinção: numa estrutura opaca com geometria exterior igual, para a mesma altura o valor da pressão do vento será igual no mesmo ponto; já no caso de se tratar de uma estrutura treliçada e a forma geométrica exterior ser diversa, para a mesma altura, o valor da pressão do vento não é igual, devido à disposição das barras, e do número de nós.

Por força dos fatores supra mencionados, foi necessário adotar um método distinto, de modo a possibilitar o cálculo da pressão do vento na estrutura. Para isso, foi criada uma folha de cálculo no Excel que nos indica o valor da força do vento em cada nó, através das propriedades geométricas da torre.

Desse modo, com auxílio da folha de cálculo é possível determinar o valor da força do vento apenas nos nós, através da introdução no Robot Structural dessas mesmas forças. Podemos então afirmar que a melhor forma de simular uma pressão sobre um objeto é aplicar pequenas forças em todos os pontos notáveis desse mesmo objeto.

Assim sendo, é determinável as forças do vento nos nós da torre, o que está diretamente relacionado com as propriedades geométricas.

3.5.MODELAÇÃO DA ESTRUTURA

Ao analisar uma torre metálica de distribuição de energia, rapidamente concluímos que é composta por um elevado número de barras, de baixa, média e/ou alta tensão, pelo que é frequente realizar a sua modelação com base em modelos mais simples e de menor complexidade. (Rodrigues Dias, 2007)

Como veremos posteriormente, existem dois modelos de barras metálicas: as barras contínuas e as barras articuladas, conforme ilustrado na Fig. 3.9.

Por outro lado, como as barras em secção cantoneira são dotadas de baixa rigidez de torção, então o momento torsor assume-se pouco relevante neste tipo de estrutura.

Com base no explicado, o modelo mais usual para analisar o comportamento estrutural destas torres metálicas tem por base nós totalmente rotulados, assim é de considerar, que cada barra seja articulada e consequentemente são libertados esforços nas ligações das barras, com exceção dos esforços axiais. Assim, as barras funcionam apenas à tração ou à compressão.

No entanto, facilmente se compreende que, este modelo articulado não é realista, uma vez que as ligações são sempre caracterizadas por alguma rigidez e resistência. Sendo então necessário simular igualmente um modelo de torres com barras contínuas, para que seja possível efetuar uma análise comparativa com o modelo articulado.

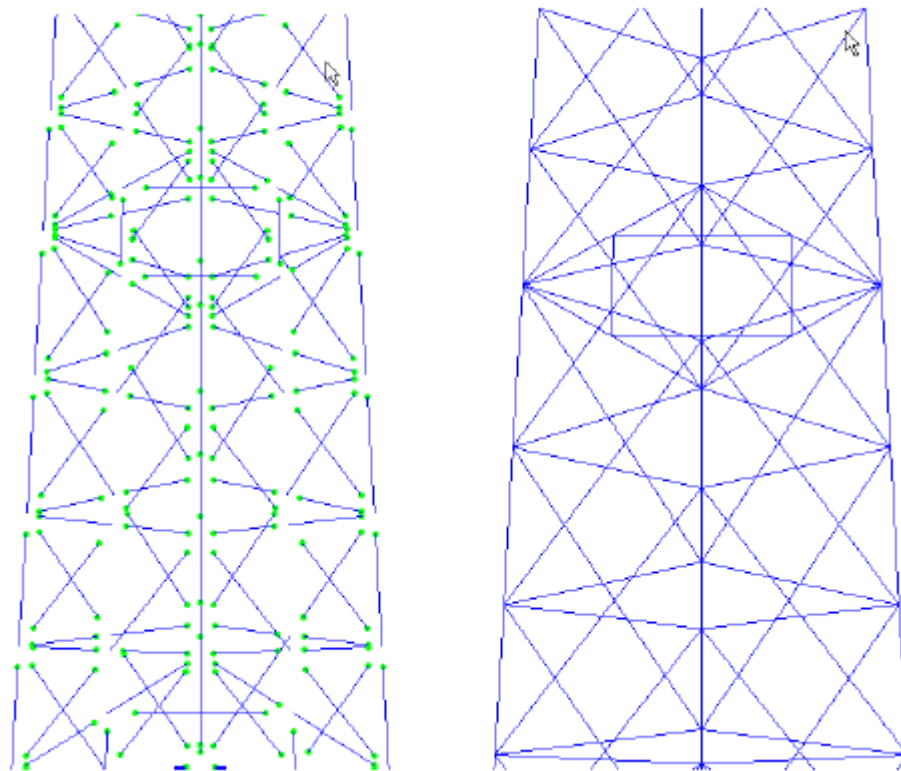


Fig. 3.9 - Exemplo de um modelo articulado e de um modelo encastrado – Adaptado de (Rodrigues Dias, 2007)

Uma vez que a estrutura é tridimensional, surge para cada barra seis esforços: esforço axial, dois esforços transversos, momento torsor, dois momentos fletores.

Os valores reais dos esforços das barras deverão encontrar-se entre os resultados obtidos nos dois modelos, pois que as ligações entre as barras deverão ser articuladas por pequenas rotações, ou seja, quer isto dizer que as mesmas não são totalmente continuas nem totalmente articuladas.

Foram já realizados estudos relativos ao comportamento das ligações entre barras de uma estrutura metálica e a conclusão daí retirada foi que, modelando a estrutura corretamente, as ligações do tipo semirígida são sempre maiores do que um modelo em que as barras se encontram totalmente continuas.

Na estrutura, são os isoladores cerâmicos que sustentam as linhas elétricas, estas por seu turno, encontram-se ligadas por objetos metálicos com uma forma muito diferente das barras. Os isoladores – exemplificados na Fig. 3.10 por não pertencerem à parte estrutural, não serão objetos de estudo deste trabalho.



Fig. 3.10 - Ponto de ligação dos fios com a estrutura

Na realização do modelo em estudo, existe um conjunto de barras cuja finalidade consiste em ligar a estrutura ao ponto de aplicação das forças concentradas provocadas pelos cabos. Esta ligação é feita por uma peça metálica compacta e não por um conjunto de barras – ver Fig. 3.11.

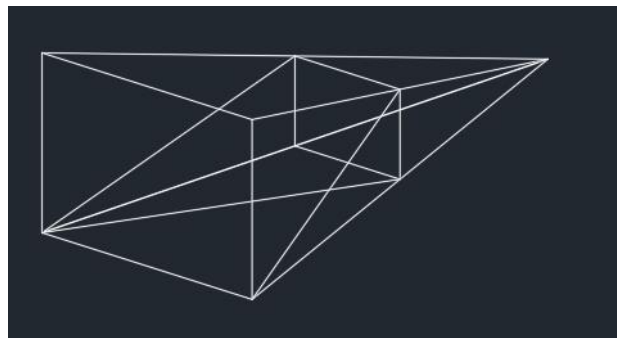


Fig. 3.11 – Braço

Ao optar por uma modelação de estrutura com barras articuladas, é necessário uma especial atenção e cuidado com os excessos de libertações pois pode causar um mecanismo.

Assim sendo não se devem libertar os esforços por torção em ambas as extremidades da mesma barra. Importa notar que a libertação de momentos flectores nas barras concorrentes no mesmo nó pode originar mecanismos localizados.

O primeiro aspeto a ter em consideração na simulação de uma estrutura, num programa de elementos finitos é a sua construção geométrica. Esta pode ser definida dentro do programa Sap2000 ou o Robot Structural, esta definição tem sido desenvolvida de modo a facilitar a construção dos modelos. De seguida, a construção de modelos passa pela criação da estrutura em programa CAD, e por fim, a posterior exportação para o programa de cálculo.

Esta forma de construção é mais cômoda para estruturas com alguma complexidade, pois os programas como o Autocad ou Cypacad permitem uma maior velocidade no desenho, por serem programas específicos para este efeito.

A construção de modelos pode ser feita em duas ou três dimensões no programa CAD, sendo que posteriormente, será necessário a introdução no programa Robot Structural. No caso de se tratar de uma estrutura com geometria complexa, é aconselhável fazê-la num primeiro momento, em CAD, e só depois, passar para o programa Robot Structural.

Relativamente a modelos considerados mais simplificados, por uma questão de celeridade e simplicidade, a melhor solução consiste em desenhar a estrutura diretamente no programa de cálculo.

No caso estudado em apreço, por se tratar de uma estrutura com elevado número de barras, o desenho foi feito em Autocad. A estrutura foi assim desenhada em três dimensões, sendo que as barras são representadas por linhas no seu eixo, e os nós por pontos onde as linhas se intersectam.

Por uma questão de praticabilidade, na introdução posterior em Robot Structural todos os objetos do desenho permanecerão no mesmo layer sendo também o desenho feito a uma escala real. Após o desenho se encontrar concluído, este é importado para o programa Robot Structural onde são definidos os tipos de ligações da estrutura e os suportes. São também definidos os materiais e os tipos de secção para as diversas barras da estrutura.

Um ponto digno de nota é que, em ambos os modelos, os apoios da torre no solo foram simulados por quatro ligações que impedem qualquer deslocamento, mas não impedem as rotações.

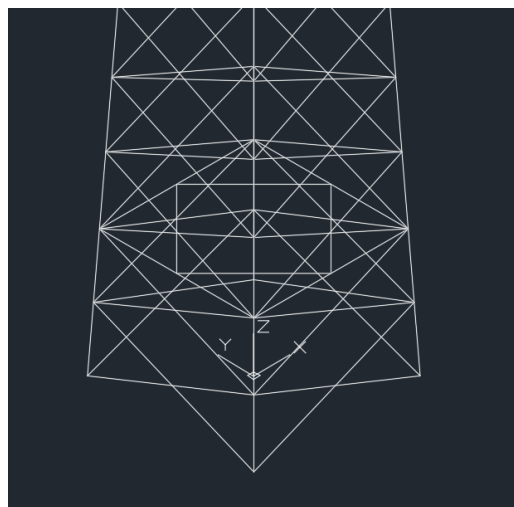


Fig. 3.12 - Modelação para os apoios

No momento seguinte, foram definidos os tipos de ligações entre as barras. Assim, foram criados dois modelos em ficheiros separados: num deles todas as barras seriam contínuas (modelo contínuo) e no outro todas as barras são articuladas (modelo articulado).

3.6. INFLUÊNCIA DA MODELAÇÃO DOS NÓS NA ESTABILIDADE E VIBRAÇÃO DA ESTRUTURA

O programa Robot Structural é utilizado para estudar o efeito da influência da modelação da estrutura em relação ao seu comportamento de estabilidade e vibração. É possível estudar o comportamento da vibração da estrutura, determinando assim a frequência da mesma.

Todavia para se proceder ao dimensionamento de estruturas treliçadas, de transporte e distribuição de energia, não é necessário o conhecimento das frequências. Contudo, a sua determinação pode ser bastante útil, caso exista o objetivo de proceder a uma análise dinâmica da estrutura, como por exemplo uma excitação da base (ação sísmica).

Além disso, a determinação das frequências é relevante no âmbito do estudo da aerodinâmica da estrutura, ou seja, da ação do vento. Porém, uma vez que a estrutura objeto de estudo é caracterizada por uma opacidade muito reduzida, consequentemente, os fenómenos de instabilidade aerodinâmicas são de diminuta relevância.

Com referimos, com auxílio do programa Robot Structural é, portanto, possível fazer um estudo da importância da modelação na vibração da estrutura. Para tal, basta adicionar a informação necessária sobre a massa e a rigidez da estrutura, e efetua-se uma análise modal, separando os vários modos de vibração e indicando os seus respetivos períodos de vibração.

Após a obtenção dos períodos de vibração, é possível determinar os valores da frequência da vibração, uma vez que são o inverso. Sendo assim, é apenas necessário fazer este tipo de análise, pois basta exportar os dados para o Excel, e facilmente obtém-se os valores de frequência da vibração.

O estudo do comportamento de estabilidade, que inclui determinar os modos de instabilidade (encurvadura) da estrutura e os correspondentes parâmetros da carga crítica. Apesar disso, a análise ou dimensionamento de uma estrutura metálica treliçada para transporte e distribuição de energia não necessita do conhecimento da carga crítica da estrutura. Contudo, a sua resolução pode ser útil se for pretendido uma análise que tenha em consideração os efeitos de P-delta (3.6.1). O Eurocódigo 3 obriga à inclusão dos efeitos P-delta sempre o parâmetro da carga crítica α_{cr} de uma certa estrutura seja inferior a 10^{14} . Esta inclusão poderá ser aplicada através da ampliação da parcela “sway” dos esforços, que utiliza um fator, (3.1), em função de α_{cr} .

$$\text{Fator de amplificação} = \frac{1}{1 - \frac{1}{\alpha_{cr}}} \quad (3.1)$$

De modo a estudar a estabilidade da estrutura, é apenas necessário conhecer o valor da carga crítica. Porém, a verdade é que existem várias combinações de ações associadas às cargas existentes, e como tal, devem realizar-se tantas análises de estabilidade quantas as combinações de ações existentes.

3.6.1. EFEITOS DE SEGUNDA ORDEM

Os efeitos de 2ª ordem (ou efeito P-delta) estão relacionados com deslocamentos, reações e esforços internos da estrutura. Podem-se distinguir de duas formas:

- (i) Efeitos P- Δ – Têm a ver com os deslocamentos relativos entre as extremidades da barra com configurações retilíneas, apesar de deformada, ver Fig. 3.13 (b).

- (ii) Efeitos $P-\delta$ – Têm a ver com os seus deslocamentos entre a configuração da deformada da barra e a respetiva posição, ver Fig. 3.13 (c).

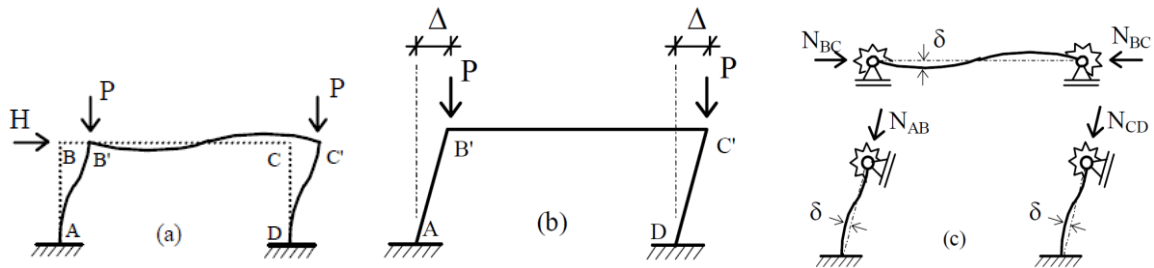


Fig. 3.13 – Efeitos de 2ª ordem: (a) configuração deformada, (b) efeito $P-\Delta$, (c) efeito $P-\delta$

4

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS À AÇÃO DO VENTO

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O objetivo do presente capítulo é o estudo da torre que será detalhadamente descrita em 4.4. Contudo, considerando o seu elevado grau de complexidade, e de forma a melhor entender e utilizar o Robot Structural, estudar-se-á duas outras estruturas, mais simples, consolas de 20 m e de 40 m.

O Robot Structural utilizado neste capítulo baseia-se na experiência túnel de vento, que por seu turno, não utiliza as fórmulas propostas pelo Eurocódigo 1, pelo que se fará uma exposição sucinta da experiência.

Serão também explanadas no presente capítulo as diferenças entre os modelos com barras contínuas e com barras articuladas – caracterizadas pelo facto das rotações das suas extremidades se encontrarem libertas –, comparando por fim, os resultados obtidos por ambos os modelos.

Serão realizados dois casos de estudo distintos relacionados com os tipos de modelos de barras: primeiramente, o caso de estudo n.º 1 cujo objeto serão barras metálicas contínuas, e foi analisado numa primeira abordagem pelas fórmulas concedidas pelo Eurocódigo 1, e posteriormente, analisado pela introdução dos dados necessários no programa, que calculou, autonomamente, a deformada. E posteriormente, o caso de estudo n.º 2 cujo objeto serão barras metálicas articuladas, seguindo-se o mesmo procedimento.

Efetuar-se-á ainda, um estudo do esforço axial, em quatro secções diferentes da torre metálica, procedendo-se à comparação de resultados entre a torre constituída por barras contínuas, e a torre constituída por barras articuladas.

Além disso, será ainda realizada uma análise modal, composta por 10 modos da estrutura metálica de forma a obter a frequência de cada modo de vibração e os seus respetivos fatores de participação modal.

E por fim, será criada uma combinação entre do peso próprio da estrutura e a força do vento baseado no Eurocódigo 1, de forma a entender qual a sua relevância e impacto no valor da deformada.

4.2. TÚNEL DE VENTO- ROBOT STRUCTURAL

O teste em túnel de vento tem como finalidade a possibilidade de análise e compreensão dos efeitos do vento na estrutura em estudo. É uma etapa fundamental pois permite uma análise detalhada dos efeitos da força do vento e das respetivas consequências na estrutura. Contudo, é-lhe associado todo um conjunto de desvantagens, desde logo, é uma experiência muito dispendiosa, e considerando determinadas estruturas, carece de praticabilidade. (Autodesk, 2015)

Assim, com o progresso da ciência e da programação foi possível criar um programa –Robot Structural – capaz de simular o teste de túnel de vento: o túnel de vento virtual. Este programa foi objeto de um

estudo de validação no qual foram alcançados outros objetivos complementares, sendo eles a geometria complexa e o fluxo de trabalho simples.

Como tal, o simulador é capaz de obter resultados quase instantâneos, tratando-se de uma alternativa cujos custos são diminutos, permitindo uma análise detalhada, e possibilitando a avaliação da segurança, e identificação de problemas e oportunidades da estrutura. Além do mais, é dotado por uma rapidez e precisão dos resultados, sendo portanto uma mais valia.

4.3.CASOS DE ESTUDO- ROBOT STRUCTURAL

Antes de nos debruçarmos sobre a exposição dos diversos casos de estudo e os seus resultados, cumpre informar que através dos cálculos fornecidos pelas fórmulas presentes no Eurocódigo 1, o valor expectável de deslocamento, de uma consola simples – na vertical, um quadrado com 50 cm de lado, e espessura de 0,1 cm, com 20 m de altura, conforme a Fig. 4.1 –, é de 73,5 cm.

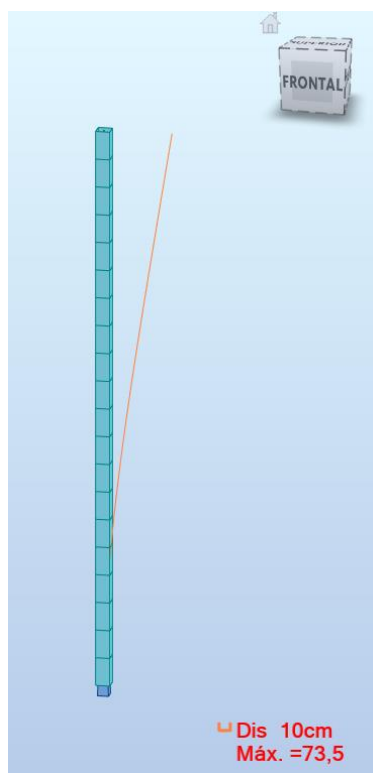


Fig. 4.1 - Consola simples 20m - Deformada

A relação entre a pressão e a velocidade indicadas pelo Robot Structural não corresponde à relação que resulta da equação constante do Eurocódigo 1, supra referida no Capítulo 2.3.4

Como tal, e de forma a obter o valor mais próximo do valor expectável de deslocamento, foi necessário o estudo das diversas conjugações possíveis dos fatores em causa, e análise dos resultados obtidos.

De forma a melhor compreender e interpretar a metodologia de trabalho do Robot Structural e da sua funcionalidade, foram estudados 7 casos distintos, nos quais a estrutura objeto de estudo é uma consola

supra descrita. Os casos de estudo encontram-se divididos em grupos: 1 a 3, 4 a 6, e por fim, isoladamente, caso 7 por motivos que posteriormente se explicarão.

Ponto prévio:

Durante a utilização do programa Robot Structural, surgiram algumas incongruências.

A título de exemplo, foi introduzido o valor de 1,3 kPa de pressão, que calculou automaticamente o valor da velocidade 45,61 m/s, perfil do vento, e relativamente ao indicador “Fator de desvio de carga” introduziu-se o valor de 0,50%. Como resultado, o programa calculou um valor de 61,3 cm de deformada.

Ora, até este momento não se vislumbrou qualquer anomalia. Porém, por mero acaso, mais tarde repetiu-se exatamente a mesma operação. E, com os mesmos pressupostos – valor de pressão, velocidade média, perfil do vento e fator de desvio de carga –, o resultado apresentado pelo programa para o deslocamento, foi 53,9. O que claramente se conclui ser um valor distinto do já obtido.

Por assim ser, foi realizado um estudo-experiência, no qual foi introduzido no programa, ao longo do dia, os mesmos valores, numa tentativa de compreender e interpretar os resultados, conforme a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Estudo de um caso

	Pressão	Vm	Horas	Deslocamento	Dia da Semana	Fator de desvio de carga:
caso 6	1,3	45,61	10:24	61,3	terça	0,50%
caso 7	1,3	45,61	10:27	61,3	terça	0,50%
caso 8	1,3	45,61	12:20	61,3	terça	0,50%
caso 9	1,3	45,61	12:47	54,1	terça	0,50%
caso 10	1,3	45,61	14:33	53,9	terça	0,50%
caso 11	1,3	45,61	17:40	53,9	terça	0,50%
caso 12	1,3	45,61	00:36	53,9	terça	0,50%
caso 13	1,3	45,61	10:26	53,9	quarta	0,50%
caso 14	1,3	45,61	19:03	54,4	quarta	0,50%

Como facilmente se depreende, os valores apresentados são distintos e dispersos. O que na verdade não se compreende, pois que, sendo os pressupostos de cálculo sempre os mesmos, o expectável era que os resultados também fossem.

Inconformado com os resultados apresentados, procedeu-se à repetição do estudo-experiência, em que foi introduzido o valor de 1,3 kPa de pressão, que calculou automaticamente o valor da velocidade 45,61, e relativamente ao indicador “Fator de desvio de carga” introduziu-se o valor de 1%.

Contudo, como se pode constatar na Tabela 4.2 os valores apresentados como valor de deslocamento continuaram sem igualarem.

Tabela 4.2 - Estudo de um caso

	Pressão	Vm	Horas	Deslocamento	Fator de desvio de carga:
caso 6	1,3	45,61	13:55	58,9	1%
caso 7	1,3	45,61	14:13	59	1%
caso 8	1,3	45,61	16:03	63,8	1%
caso 9	1,3	45,61	18:00	63,8	1%
caso 10	1,3	45,61	19:10	63,8	1%
caso 11	1,3	45,61	21:03	63,8	1%
caso 12	1,3	45,61	23:40	63,8	1%

A explicação alcançada de modo a justificar as incongruências do programa encontra-se intimamente relacionada com o indicador “Fator de desvio de carga”. Este indicador consiste numa janela de erro.

Tabela 4.3 – Casos de estudo

	Vm	Pressão	Perfil	deslocamento (cm)
caso 1	30	0,56	x1	24,9
caso 2	60	2,25	x1	95,7
caso 3	30	0,56	x2	97,8
caso 4	45,61	1,3	x1	63,8
caso 5	64,5	2,6	x1	121,5
caso 6	45,61	1,3	x2	245,1
caso 7	45,61	1,3	1,15	73,5

No conjunto de casos 1 a 3, as variáveis com as quais se trabalhou foram: a velocidade média e o perfil relacionado com a velocidade. Assim, foi possível estudar 3 conjugações de forma a obter o valor de deslocamento.

Primeiramente, no caso de estudo 1, utilizou-se o valor de velocidade média 30, e perfil base:

- Velocidade média: 30;
- Pressão: 0,56;

- O Robot Structural através do valor da velocidade média calcula automaticamente o valor da pressão. Note-se que, o valor de pressão obtido pelo programa difere dos valores obtidos através das fórmulas constantes do Eurocódigo, uma vez que, tal como já mencionamos, o Robot Structural baseia-se na experiência túnel de vento.

- Perfil base;

Com base dos dados supra indicados, o programa apresentou o valor de 24,9 cm de deslocamento.

De seguida, no caso de estudo 2, duplicou-se o valor da velocidade média, e manteve-se o perfil base:

- Velocidade média: 60;

- Pressão: 2,25;

- Perfil base;

Neste caso, o valor apresentado pelo programa de deslocamento, foi de 95,7 cm. Ora, é de constatar que se trata de um valor excessivamente elevado face ao valor expectável.

Por fim, no caso de estudo 3, regressou-se ao valor inicial de velocidade, e optou-se por duplicar o perfil base:

- Velocidade média: 30;

- Pressão: 0,56;

- Perfil: dobro do perfil base;

Com base nos valores indicados, o programa calculou um deslocamento de 97,8 cm.

Como é possível observar, os valores apresentados pelos casos de estudo 2 e 3 são aproximados, e portanto, comparando os valores atribuídos às variáveis velocidade média e perfil nestes casos, ou seja, 30 e 60, e base e dobro do base, concluiu-se que existe uma relação entre as duas variáveis, o que significa que, quando se procede à duplicação apenas de um deles de cada vez, o valor do deslocamento calculado pelo programa, é similar. Contudo, ambos os valores são mais elevados do que o valor expectável.

Como se verá de seguida, nos casos de estudo 4 a 6, nos quais as variáveis trabalhadas são a pressão e o perfil relacionado com a pressão, esta relação já não existe.

No caso de estudo 4, o valor de pressão inserido no programa foi de 1,3, e perfil base:

- Pressão: 1,3;

- Velocidade média: 45,61;

- O Robot Structural através da indicação do valor de pressão calcula automaticamente o valor de velocidade média.

- Perfil base;

Com base dos dados supra indicados, o programa apresentou o valor de 63,8 cm de deslocamento. Ora, o valor de deslocamento é o valor mais aproximado do valor expectável. Contudo, a diferença é ainda de 10 cm, pelo que, numa tentativa de aproximar ainda mais os valores, procedemos à multiplicação do valor de pressão no caso seguinte.

Portanto, no caso de estudo 5, como se referiu, procedeu-se à multiplicação do valor de pressão, e manteve-se o perfil base:

- Pressão: 2,6;
- Velocidade média: 64,5;
- Perfil base;

Neste caso, o valor apresentado pelo programa de deslocamento, foi de 121,5 cm. Depreendemos que a tentativa se revelou frustrada, pois que o valor obtido demonstrou-se ainda mais distante do valor expectável. Assim, numa derradeira tentativa, procedeu-se à multiplicação do perfil.

Para tal, no caso de estudo 6, regressou-se ao valor inicial de pressão, e optou-se por duplicar o perfil base:

- Pressão: 1,3;
- Velocidade média: 45,61;
- Perfil: dobro do perfil base;

Com base nos valores indicados, o programa calculou um deslocamento de 245,1 cm.

Apesar dos esforços, o valor indicado pelo programa ao invés de se aproximar do valor expectável, afastou-se total e desproporcionalmente dele.

Assim, e tal como anteriormente referido, é de concluir, com base nos valores de deslocamento obtidos nos casos de estudo 5 e 6, ou seja, 121,5 cm e 245,1 cm, por se demonstraram dispares, que não existe qualquer relação entre a pressão e o perfil.

Por último, o caso de estudo 7 seguiu uma metodologia de estudo distinta. Como de todos os casos estudados, o caso 4 foi o que apresentou valores mais aproximados do valor expectável, sendo 63,8 cm o valor obtido mais próximo de 73,5 cm.

Portanto, a finalidade do caso de estudo 7 é alcançar um valor empírico que, quando multiplicado pelo valor de deslocamento obtido no caso de estudo 4, resultasse no valor expectável de 73,5.

Assim, o valor empírico alcançado foi de 1,15:

$$63,8 \times 1,15 = 73,5;$$

Ora, de forma a confirmar e validar o valor empírico determinado pelo caso de estudo 7, procedeu-se ao estudo de outra estrutura, uma consola vertical com o dobro da altura – 40 m.

Contudo, no estudo desta consola de 40 m, não se confirmou o valor empírico utilizado anteriormente. Pelo que, não se demonstrou a existência de uma relação entre os valores conseguidos pelas fórmulas do Eurocódigo e os valores atribuídos pelo Robot Structural. Assim, conclui-se que o valor empírico vai variando.

4.4. DESCRIÇÃO DA TORRE ESTUDADA

A base da torre consiste num quadrado, com 3,850 m de lado, e é dotada de 40,61 m de altura, conforme ilustrado na Fig. 4.2.

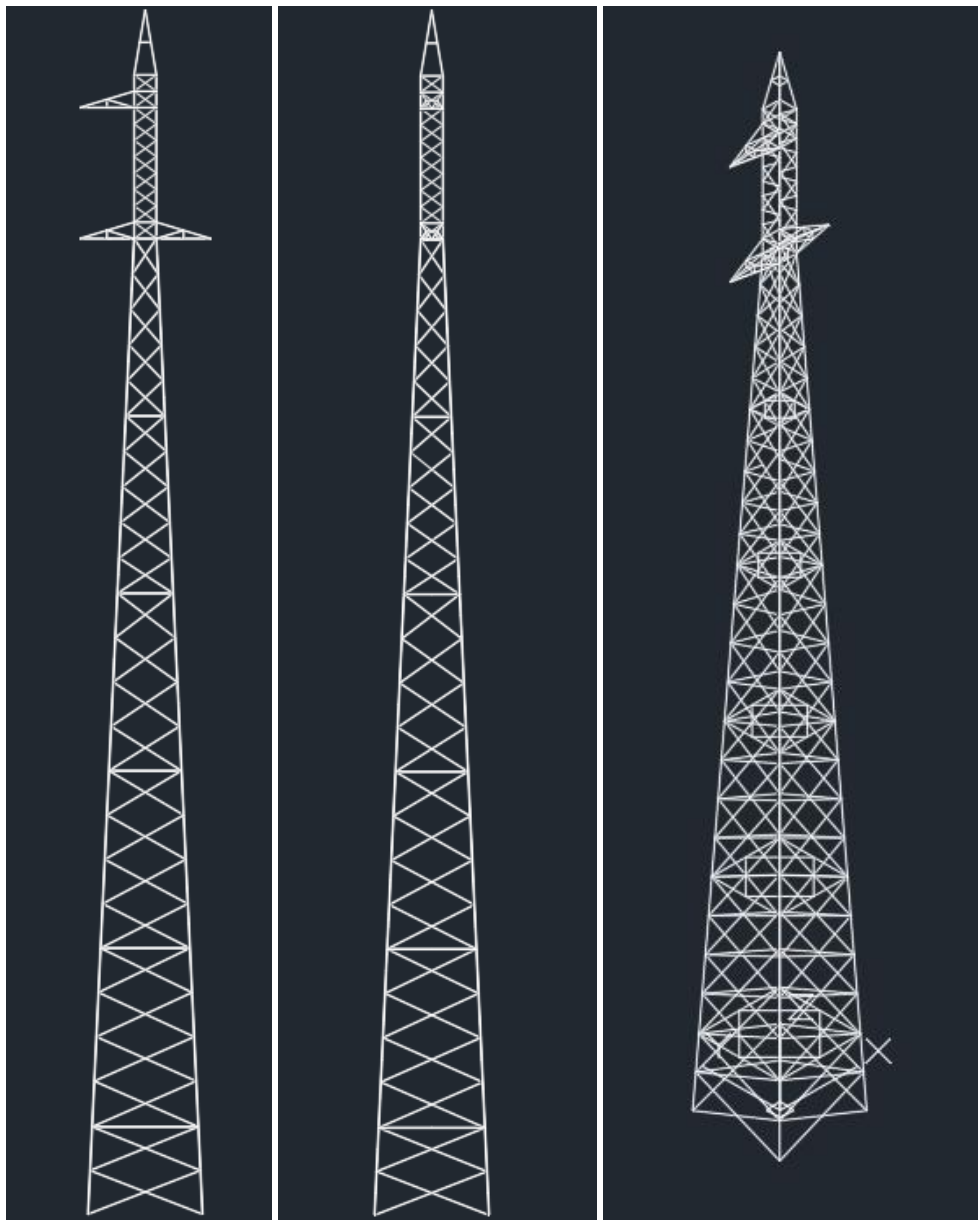


Fig. 4.2 – Perspetivas diferentes da torre

Detém 3 braços: os dois braços inferiores encontram-se a 32,89 m de altura, e o braço superior encontra-se a 37,31 m de altura. Todos eles têm 1,825m de comprimento horizontal, conforme Fig. 4.3.

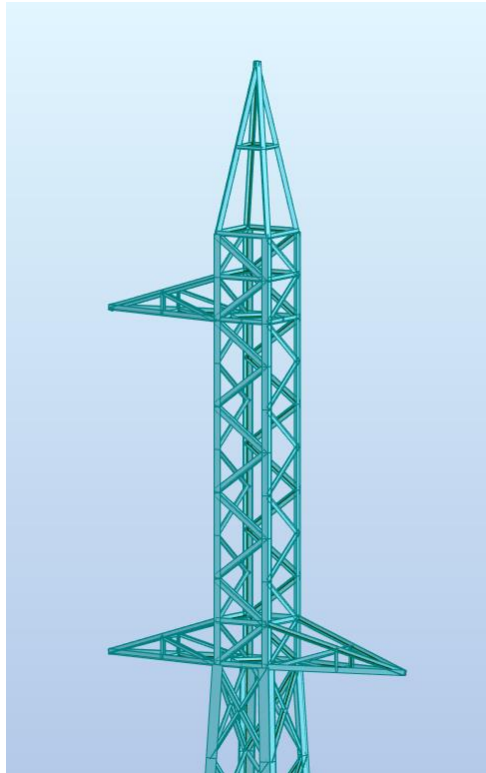


Fig. 4.3 – Braços com 1,825 m

A forma quadrangular da base da torre, vai diminuindo em função da altura, até alcançar os braços inferiores, ou seja, os 32,89 m, sendo que, nesse ponto, a barra horizontal é de 0,75 m. Nesse lapso de comprimento, em cada face, a torre é composta por duas barras diagonais cruzadas, intercaladas com barras de travamento horizontal a cada 5,980 m, sendo que, a primeira barra horizontal se encontra a uma altura de 2,95 m, como é possível constatar através da Fig. 4.4.

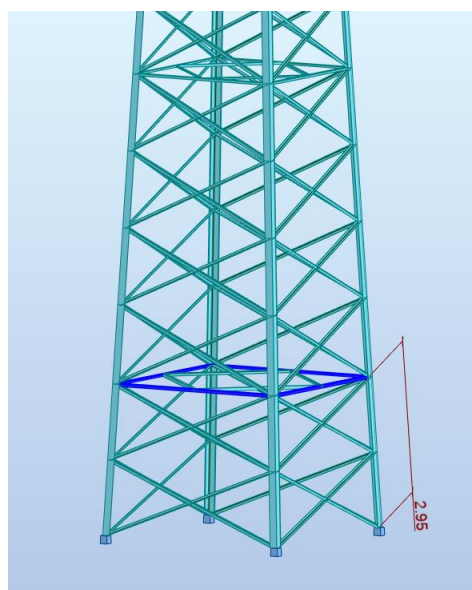


Fig. 4.4 – Travamento horizontal

Entre os braços inferiores e os braços superiores, a forma quadrangular não sofre qualquer alteração. E nesse lapso de comprimento, ou seja, entre os 32,89 m e os 37,31 m, em cada face, o travamento é efetuado por uma única barra diagonal, como ilustrado na Fig. 4.5.

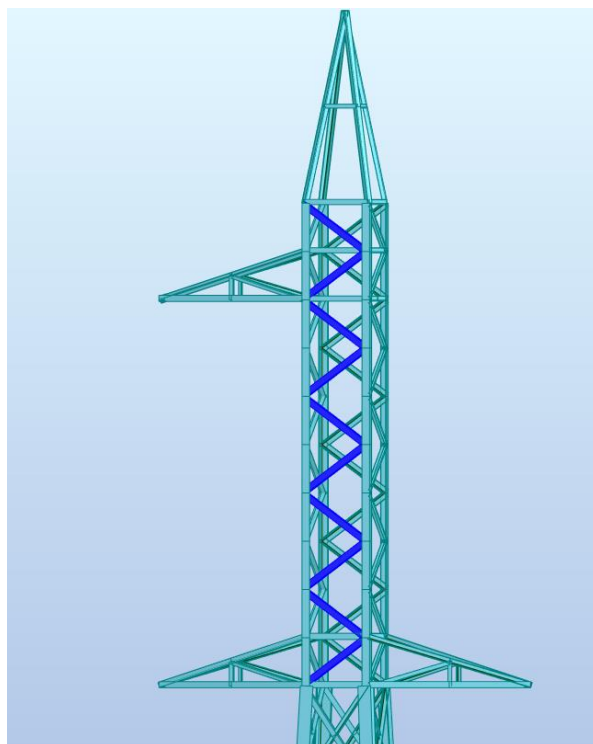


Fig. 4.5 – Travamento na diagonal

A partir dos braços superiores, e até aos 40,61 m de altura, a forma quadrangular diminui até se anular, como é possível corroborar com a Fig. 4.6. Nesse trecho não existem barras diagonais, existindo apenas barras horizontais a meia altura.

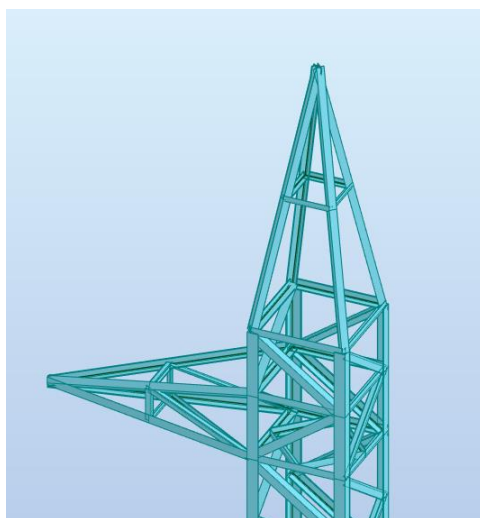


Fig. 4.6 – Parte superior da torre

A estrutura é composta por cantoneiras com abas iguais, foram utilizadas seis geometrias de cantoneiras. De modo a identificar cada uma delas, utilizou-se a seguinte expressão: L que define o tipo de secção, os primeiros dois números são a largura das abas (h) – que são iguais –, e por fim, um terceiro número que define a espessura (t), como explicado na Fig. 4.7.

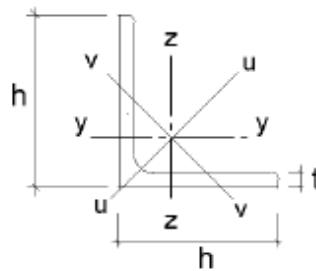


Fig. 4.7 – Configurações e sistemas de eixos da cantoneira

A Fig. 4.8 estão representados em diferentes cores, os seis tipos geometria de cantoneiras. Facilmente se depreende que as suas dimensões vão diminuindo em função da altura.

Também se conclui que as cantoneiras verticais são de maior dimensão comparativamente com as cantoneiras horizontais e diagonais.

As cantoneiras são constituídas em aço S235.

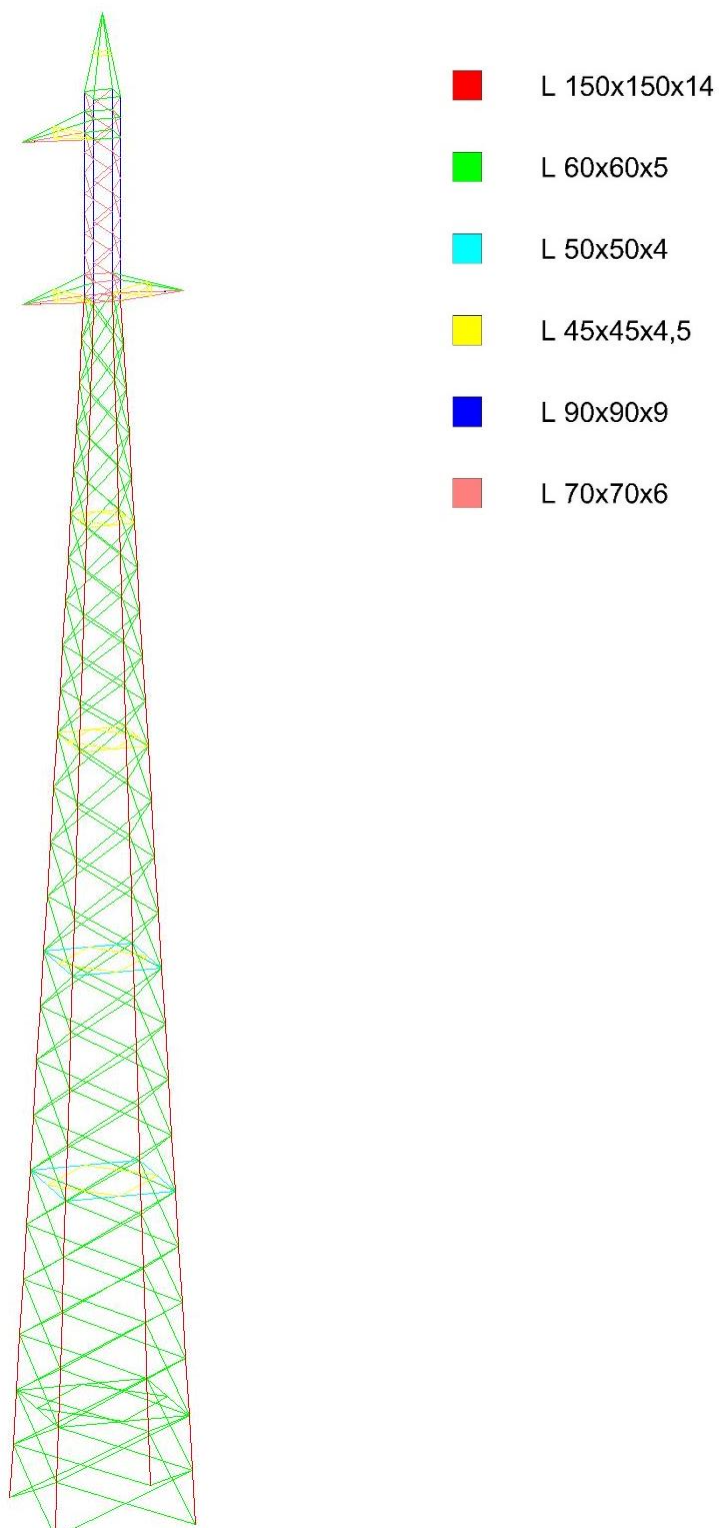


Fig. 4.8 - Representação do tipo de perfis na torre

Por uma questão de relevância diminuta para a modelação, e por critérios de simplificação foram desprezadas as ligações aparafusadas.

4.5. ANÁLISE DOS DOIS MODELOS

Aqui chegados, cumpre analisar dois modelos de barras metálicas: as barras contínuas e as barras articuladas.

Com base nestes dois modelos de barras metálicas, realizou-se dois casos de estudo distintos. Primeiramente, o caso de estudo n.º 1 teve como objeto as barras metálicas contínuas, e foi analisado numa primeira abordagem pelas fórmulas concedidas pelo Eurocódigo 1, e posteriormente, analisado pela introdução dos dados necessários no programa, que calculou, autonomamente, a deformada.

O caso de estudo n.º 2 seguiu a metodologia do caso de estudo n.º 1, sendo que as barras objeto de estudo foram as barras metálicas articuladas.

Do ponto de vista prático, e como ponto prévio, foi introduzido no programa a estrutura metálica objeto de estudo com barras metálicas contínuas, e, antes de avançar com os cálculos, procedeu-se à cópia da estrutura do modelo inicial e alterou-se o modelo de barras, para articuladas, de forma a facilitar a comparação entre os dois modelos. Note-se que, apesar de estarem sob análise dois modelos de barras metálicas, a verdade é que, se realizou uma dupla análise, utilizando o Eurocódigo 1, e posteriormente, utilizando a simulação por túnel de vento. Consequentemente, existirão quatro resultados.

Assim, efetuaram-se quatro análises elásticas lineares, duas ao modelo contínuo e outras duas ao modelo articulado. O objetivo da referida análise é precisar qual dos modelos é o mais adequado para a sua exportação para um caso prático.

Avança-se desde já que os resultados dos casos de estudo dos dois modelos de barras demonstram-se muito próximos, ou seja, com diferenças muito pouco significativas, no que toca aos resultados obtidos quando calculados através das fórmulas concedidas pelo Eurocódigo 1.

Avançaremos então, para os casos de estudo.

Caso de estudo n.º 1: barras metálicas contínuas, como se pode analisar através das Fig. 4.9 e Fig. 4.10.

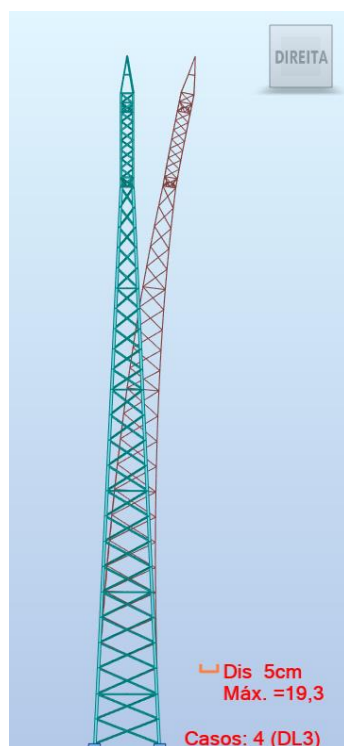


Fig. 4.9 – Deformação lateral obtida com o modelo de barras contínuas e com as forças do vento calculadas pelo EC1

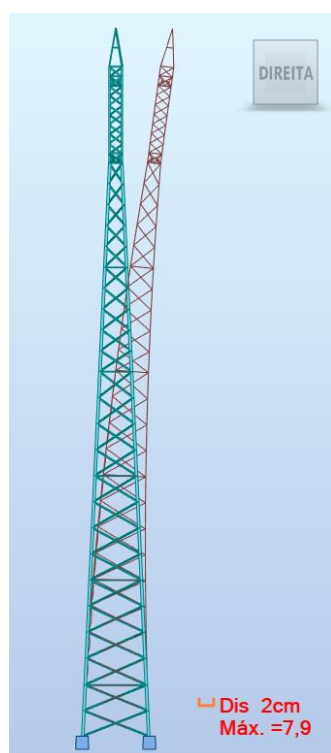


Fig. 4.10 – Deformação lateral obtida com o modelo de barras contínuas e com as forças do vento calculadas pela simulação túnel do vento

Como facilmente se depreende através das figuras supra expostas, os valores da deformada são bastante díspares com base nas duas formas de análise: os cálculos realizados com base nas fórmulas concedidas pelo Eurocódigo 1 resultaram num deslocamento de 19,3cm, e, diferentemente, a simulação de túnel de ventoprograma calculou um deslocamento apenas de 7,9cm.

Ora, os resultados obtidos não foram totalmente surpreendentes, pois que, no estudo da estrutura simplificada – consolas verticais de 20 m e de 40 m –, os resultados obtidos pelos dois métodos, não se demonstraram, tal como neste estudo, coincidentes. Porém, não era expectável que a diferença entre os valores da deformada fossem de tal forma díspares.

Caso de estudo n.º 2: barras metálicas articuladas, como se pode analisar através das Fig. 4.11 e Fig. 4.12.

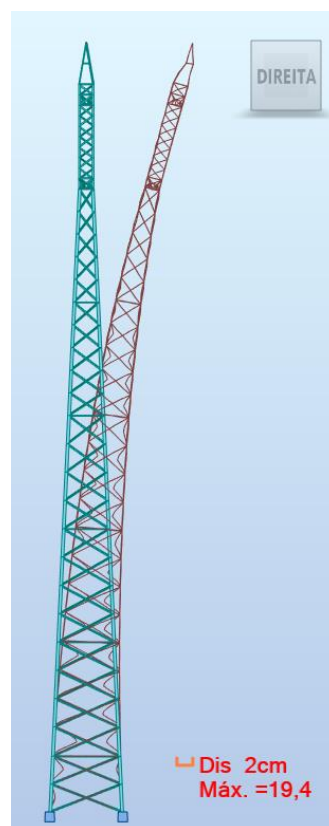


Fig. 4.11 – Deformação lateral obtida com o modelo de barras articuladas e com as forças do vento calculadas pelo EC1

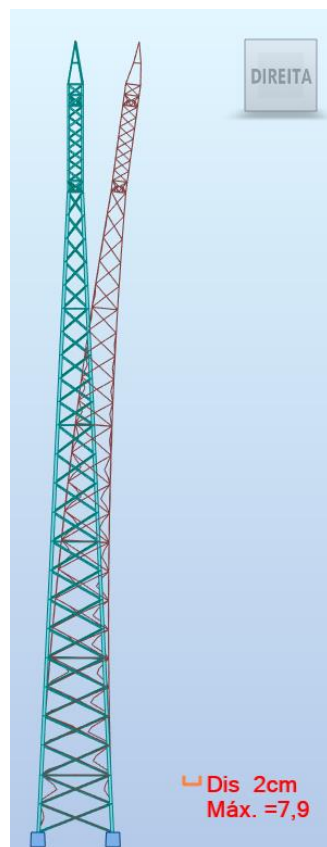


Fig. 4.12 – Deformação lateral obtida com o modelo de barras articuladas e com as forças do vento calculadas pela simulação túnel do vento

Como é possível observar nas figuras supra expostas, os valores da deformada são bastante díspares com base nas duas formas de análise: os cálculos realizados com base nas fórmulas concedidas pelo Eurocódigo 1 resultaram num deslocamento de 19,4cm, e, diferentemente, a simulação de túnel de vento calculou um deslocamento apenas de 7,9cm.

Ora, a conclusão retirada no caso de estudo n.º 1 relativa à disparidade de valores é aplicável na mesma medida ao caso de estudo n.º 2. Ou seja, o facto de os valores não serem coincidentes não consubstancia surpresa, mas a disparidade entre os valores, pelo contrário, não era expectável.

Note-se que, com base nas fórmulas concedidas pelo Eurocódigo 1, o valor da deformada da torre metálica composta por barras contínuas é de 19,3cm, e que, por outro lado, o valor da deformada da torre metálica composta por barras articuladas é de 19,4cm.

Por seu turno, a deformada calculada através da simulação de túnel de vento, para qualquer um dos modelos de barras metálicas, foi de 7,9cm.

Assim, e com base num panorama geral concedido pela análise e comparação dos dois casos de estudo, é possível concluir que as diferenças entre ambos os modelos, conforme avançamos logo no início deste subcapítulo, são mínimas.

De seguida, e de forma a validar as deformadas resultantes das análises realizadas – 19,3cm do modelo de barras contínuas, e 19,4cm do modelo de barras articuladas – efetuou-se um estudo do esforço axial,

para tal agruparemos as barras metálicas da torre em quatro secções: a) barras L 150x150x14 - Fig. 4.13; b) barras obliquas L 60x60x5 - Fig. 4.15; c) barras verticais L 90x90x9 - Fig. 4.17; d) barras obliquas L 70x70x6 - Fig. 4.19.

Esforço axial de barras L 150x150x14:

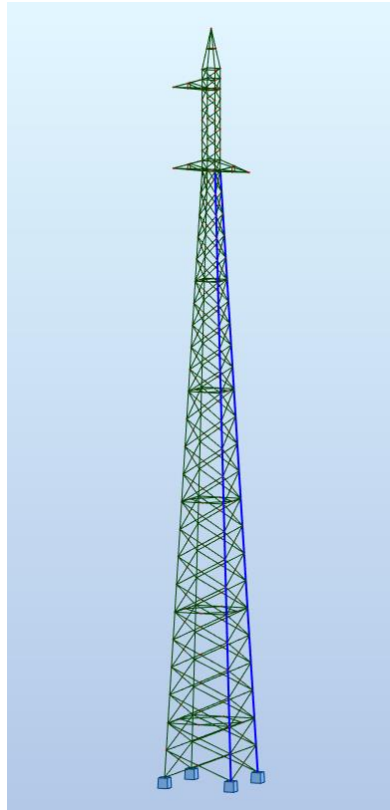


Fig. 4.13 – Secção em estudo

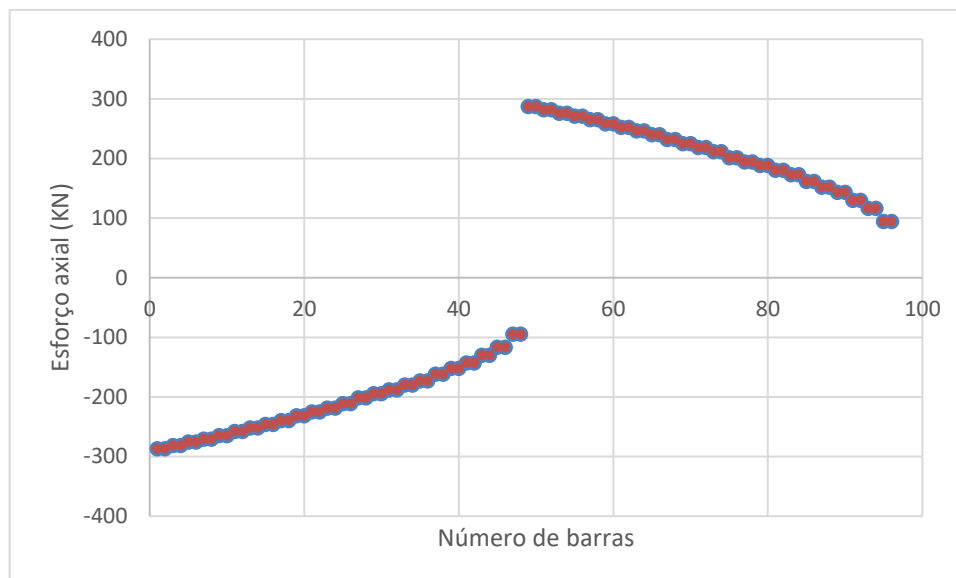


Fig. 4.14 – Evolução do esforço axial devido à ação do vento para as duas modelações consideradas 150x150

Esforço axial de barras obliquas L 60x60x5:

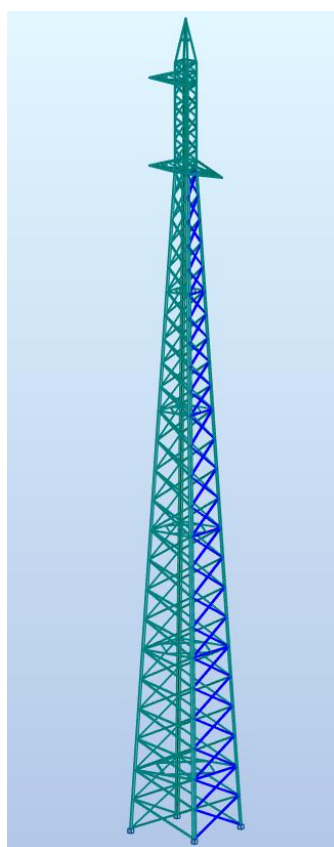


Fig. 4.15 – Secção em estudo

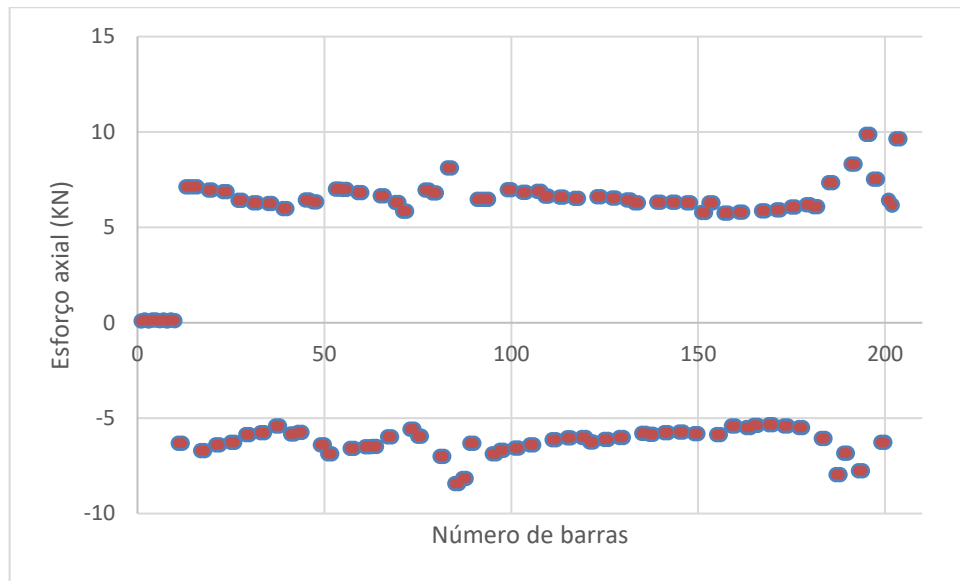


Fig. 4.16 – Evolução do esforço axial devido à ação do vento para as duas modelações consideradas 60x60

Esforço axial de barras verticais L 90x90x9:

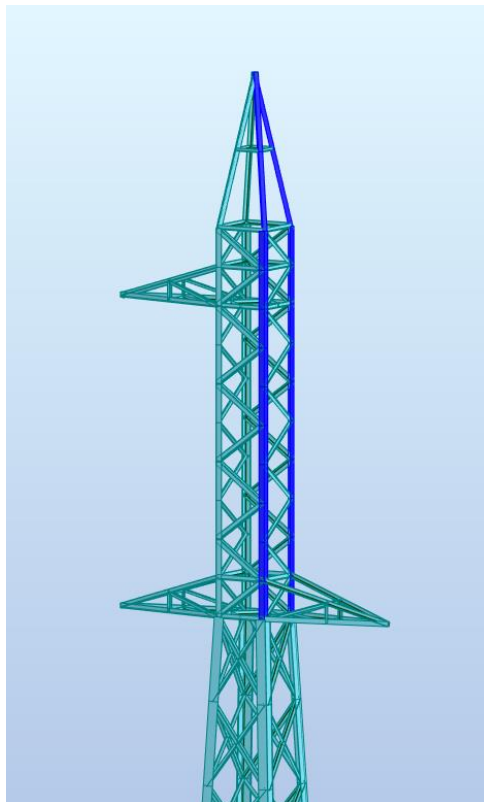


Fig. 4.17 – Secção em estudo

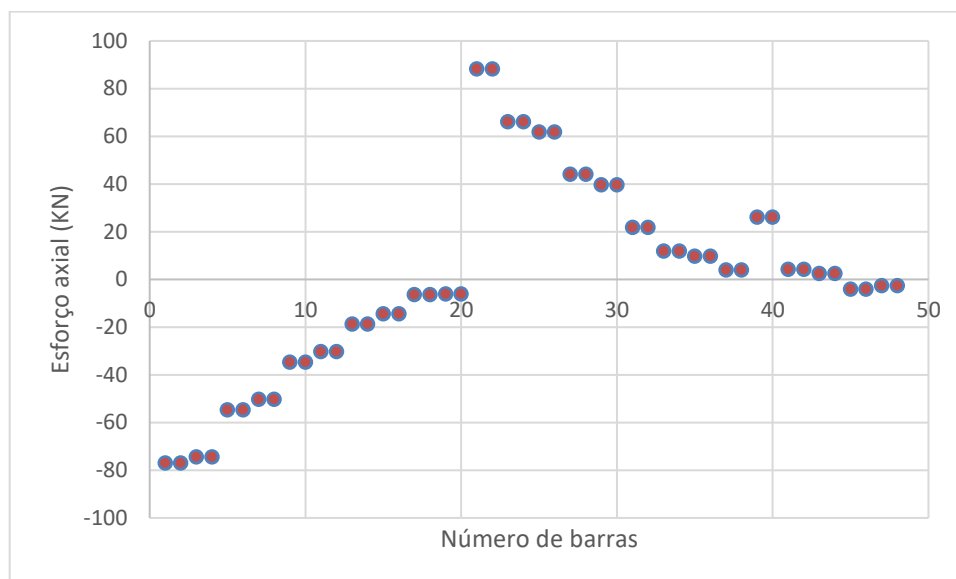


Fig. 4.18 Evolução do esforço axial devido à ação do vento para as duas modelações consideradas 90x90

Esforço axial de barras obliquas L 70x70x6:

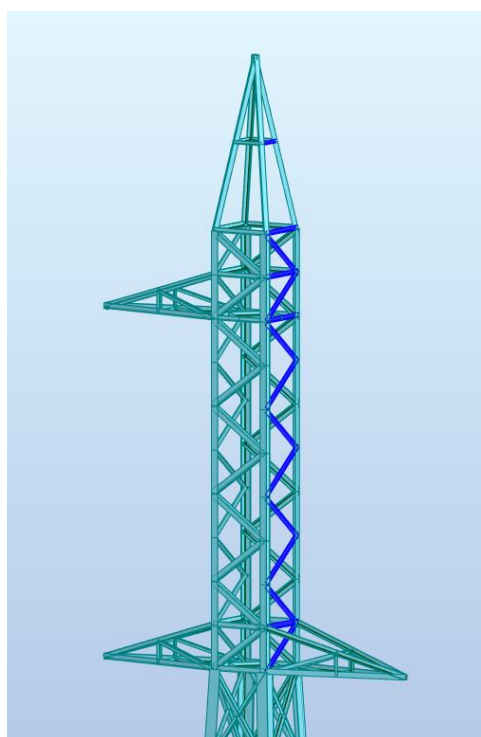


Fig. 4.19 – Secção em estudo

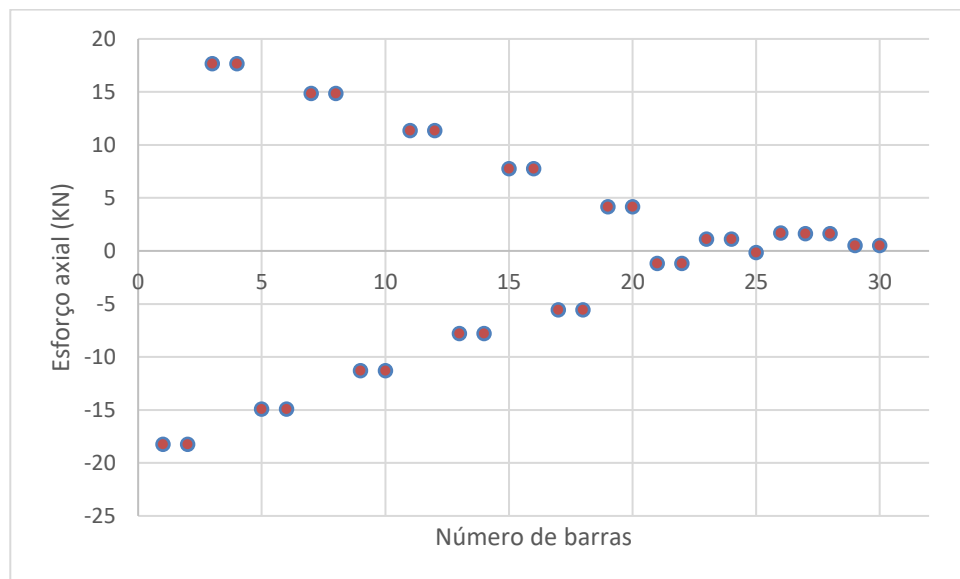


Fig. 4.20 – Evolução do esforço axial devido à ação do vento para as duas modelações consideradas 70x70

Como se compreende, os esforços axiais são muitíssimo semelhantes, o que justifica o facto de a deformada dos dois modelos de barras consistir em valores tão próximos, como se depreende ao analisar as Fig. 4.14, Fig. 4.16, Fig. 4.18 e Fig. 4.20.

Na Tabela 4.4 serão demonstrados os valores das frequências e períodos, assim como os valores isolados e valores acumulativos dos fatores de participação modal. Conforme resulta da análise dos dados obtidos, os casos 1 e 2, 3 e 4 são semelhantes. Este fenómeno é justificado pelo facto de a estrutura ser praticamente bi-simétrica.

Tabela 4.4 – Análise modal

Caso/Modo	Frequência (Hz)	Período (s)	Cur.mas.UX (%)	Cur.mas.UY (%)	Rel.mas.UX (%)	Rel.mas.UY (%)
3/ 1	2,49400	0,40096	51,0	0,1	51,0	0,1
3/ 2	2,49437	0,4009	0,1	51,0	51,1	51,1
3/ 3	8,14227	0,12282	23,6	0,1	74,7	51,2
3/ 4	8,15263	0,12266	0,1	23,6	74,8	74,8
3/ 5	11,20059	0,08928	0,0	0,0	74,8	74,8
3/ 6	11,49104	0,08702	0,0	0,1	74,8	74,9
3/ 7	13,07299	0,07649	0,0	0,0	74,8	74,9

3/ 8	14,64872	0,06827	0,0	0,0	74,8	74,9
3/ 9	14,76633	0,06772	0,0	0,0	74,8	74,9
3/ 10	14,81048	0,06752	0,0	0,0	74,8	74,9

Os modos representados pelas Fig. 4.21 e Fig. 4.22 – modo 2 e modo 4 – são os que mais relevantes para o estudo do vento, uma vez que as suas deformadas se manifestam na direção do vento.

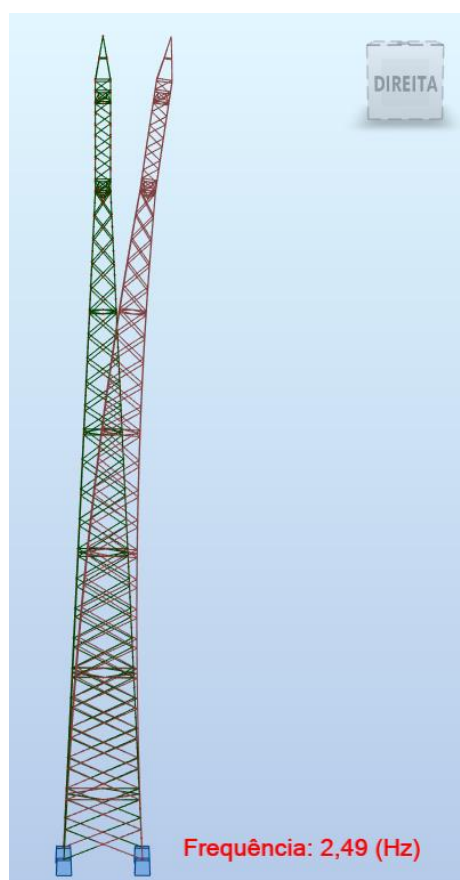


Fig. 4.21 – Modo 2

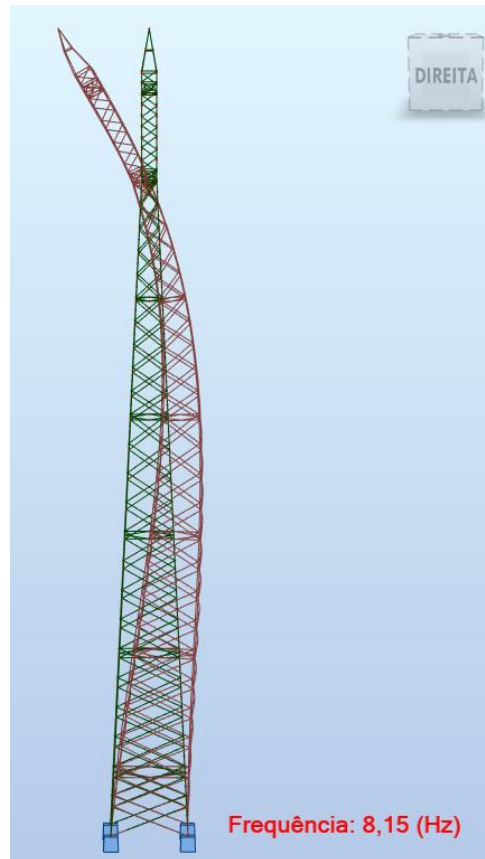


Fig. 4.22 – Modo 4

Ultrapassada a análise modal, e de modo a entender qual a relevância do peso próprio da estrutura, criou-se uma combinação do peso próprio da estrutura com a força do vento, concluindo-se, portanto, que o peso próprio da estrutura em nada influencia a sua deformada, pois que o seu valor se mantém em 19,3cm.

5 CONCLUSÃO

Através do estudo realizado no âmbito desta tese, compreendeu-se o vento, como um fenómeno natural e como a força mais dinâmica que atua sobre as infraestruturas, nomeadamente, as torres metálicas de distribuição de energia. De igual forma, observámos como os desenvolvimentos tecnológicos, as inovações materiais e a inteligência artificial impactaram as possibilidades de cálculo e determinação das forças em estudo.

Cumpriu-se os principais objetivos que foram propostos, analisando aprofundadamente a ação do vento, desde uma abordagem teórica, procedendo a comparações nos momentos oportunos, e por fim, terminando com aplicação prática das conclusões obtidas.

Extraí-se essencialmente e repetidamente que a ação do vento é dinâmica, e que, contudo, é possível proceder à sua análise também de uma perspetiva estática.

Através do estudo de diversas condicionantes e variantes, e com base essencialmente no Eurocódigo 1, foi possível calcular a força da ação do vento.

Além do mais, este trabalho serviu para uma melhor compreensão da estrutura da torre metálica, que por não ser opaca, exigiu uma forma diferente de cálculo da força do vento, e concluímos, claramente, que a mesma dependerá inevitavelmente da geometria da torre.

Já relativamente à modelação da torre propriamente dita, por se tratar de uma estrutura com elevado número de barras, o desenho foi feito em Autocad. Considerando então o seu elevado grau de complexidade, e de forma a melhor entender e utilizar o Robot Structural, foram elaborados casos de estudo sobre consolas de 20 m e de 40 m, de forma a compreender qual a relação entre os cálculos do Eurocódigo 1 e os realizados automaticamente pela a simulação de túnel de vento . Concluimos que, o valor que se tomou como emprírico na consola de 20 m não tem aplicação na consola de 40 m, pelo que não se provou como valor empirico.

Uma característica da torre pela qual se debruçou foram os modelos de barras metálicas, e concluímos não existir grande diferença nos valores de deformada quer a torre seja composta por barras contínuas ou barras articuladas. Note-se que, o estudo teórico, quer de um modelo quer de outro, se demonstrou ligeiramente irrealista, pelo que, na prática devem ser adotadas barras semirrígidas, cujo estudo se mostrou inviabilizado. Posteriormente, concluímos que os esforços axiais são muitíssimo semelhantes, o que justifica o facto de a deformada dos dois modelos de barras consistir em valores tão próximos.

Ora, termina-se a presente exposição com a indicação de que os cálculos realizados com base nas fórmulas concedidas pelo Eurocódigo, não conduzem aos mesmos resultados que são elaborados pelo Robot Structural. Esta não coincidência pode justificar-se com o facto de a simulação de túnel de vento não se encontrar documentado com procedimentos regulamentares, mas sim, com simulações.

BIBLIOGRAFIA

- 50341-1, E. (2012). Overhead electrical lines exceeding AC 1 kV - Part 1: General requirements - Common specifications. *European Standard*, 1–253.
- Alonso, F. J. (2013). *Estudo dinâmico da ação do vento em cimbres autolanzáveis de grande dimensão*.
- Autodesk. (2015). *Autodesk Robot Structural Analysis Professional wind simulator validation brief*. <https://bimandbeam.typepad.com/files/robot-structural-analysis-professional-wind-simulator-validation-brief.pdf?fbclid=IwAR0ampV8aOs2xhNYqCnnQ06WXOc4Hb6YjAnkb43FvsFZfyCISjor0oePS5o>
- Brewer, A. (2017). *Dynamic Wind Load Modelling of High Overhead Transmission Line Towers*. 97.
- CEN. (2010). Eurocodigo 1 : Acções em estruturas — Acções gerais — Part 1-4 : Acções do vento. *Communities*, 4, 1–148.
- Em, E. (2016). *E STUDO DOS E FEITOS D INÂMICOS DO E LÉTRICA A ÉREA DE M UITO A LTA*.
- EN, B. S. (2012). *Overhead Electrical Lines Exceeding AC 1 kV-Part 1: General Requirements-Common Specifications*.
- Filipe, C. I. (2012). *Estudo paramétrico da ação do vento em torres metálicas de telecomunicações*. 165.
- Maria, S. (2014). *Fundações Para Torres Metálicas Autoportantes De Telecomunicações : Aspectos Técnicos E Construtivos Autoportantes De Telecomunicações :*
- Oliveira, B. D. D. C. (2014). *Efeito do Vento como Ação Dinâmica em Edifícios Altos*. 169.
- Pass, P. (2016). *Do v 2 -*. 1–14.
- Rodrigues Dias, J. (2007). *Análise e Dimensionamento de Estruturas Metálicas Trelaçadas de Transporte de Energia Eléctrica de Acordo com o EC3(EN) e a EN50341-1*. 3, 110.
- Vantagens do alumínio: metal oferece excelente condutividade elétrica | Revista Alumínio*. (n.d.). Retrieved July 26, 2021, from <https://revistaaluminio.com.br/VANTAGENS-DO-ALUMINIO-METAL-OFERECE-EXCELENTE-CONDUTIVIDADE-ELETRICA/>