

JOÃO CARLOS IRIA FILIPE

**ESTUDO PARAMÉTRICO DA AÇÃO DO VENTO EM
TORRES METÁLICAS DE TELECOMUNICAÇÕES**

Orientador: Manuel José de Andrade Loureiro Pipa

Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias

Faculdade de Engenharia e Ciências Naturais

Departamento de Engenharia Civil

Lisboa

2012

JOÃO CARLOS IRIA FILIPE

**ESTUDO PARAMÉTRICO DA AÇÃO DO VENTO EM
TORRES METÁLICAS DE TELECOMUNICAÇÕES**

Dissertação apresentada para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil no Curso de Mestrado em Engenharia Civil na especialidade de Construção e Estruturas, conferido pela Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias.

Orientador: Prof. Doutor Manuel José de Andrade Loureiro Pipa
Co-Orientador: Doutor António Manuel dos Santos Baptista

Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias
Faculdade de Engenharia e Ciências Naturais
Departamento de Engenharia Civil

Lisboa
2012

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer ao meu orientador e co-orientador, respetivamente, o Prof. Doutor Manuel Pipa e Doutor António Baptista pela condução do desenvolvimento do tema da dissertação, o estímulo de conteúdos relacionados e todo o apoio prestado ao longo da sua evolução.

Quero também agradecer ao Eng.º Rui Travanca e Eng.º Graeme Wood pela discussão de alguns temas da dissertação, bem como opiniões e conselhos dados. Os esclarecimentos concedidos por ambos foram cruciais para o progresso de todo o tema da dissertação.

O meu agradecimento a todo o pessoal do Núcleo de Comportamento de Estruturas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, em especial ao Eng.º João André por todo o tempo e ajuda que dispensou em prol do desenvolvimento da dissertação.

Queria igualmente agradecer à Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias e todas as pessoas ligadas à instituição, em particular do Departamento de Engenharia Civil, que me ajudaram neste processo.

Por último o meu agradecimento à minha família e amigos, que foram sempre um suporte vital no decorrer do trabalho. Obrigado por todo o apoio.

Resumo

As torres de telecomunicações são estruturas que têm como finalidade o suporte de antenas, a alturas elevadas, de modo a permitir uma eficaz transmissão de dados, especialmente no que diz respeito às comunicações móveis. Devido à forte expansão desta tecnologia nos últimos anos, este tipo de estruturas adquiriram uma relevância particular.

O principal objetivo da dissertação é estudar de forma pormenorizada a ação do vento sobre torres metálicas de telecomunicações, do tipo monopolo, em função dos parâmetros mais relevantes e perante diferentes cenários, de modo a quantificar a influência de cada um deles através de cálculos analíticos. A localização da torre, as suas características estruturais e os tipos de equipamentos instalados são alguns dos aspetos abordados no documento.

Para o efeito do estudo, são apresentados os diversos tipos de torres de telecomunicações utilizados em Portugal, as suas características específicas e os equipamentos que geralmente albergam, assim como é estabelecida uma metodologia de cálculo da ação do vento sobre este tipo de estruturas. Esta metodologia, baseada no Eurocódigo 1, ilustra o processo de cálculo e propõe uma uniformização dos critérios a adotar em projeto.

Palavras-chave

Torres de telecomunicações; Antenas; Ação do vento; Monopolo; Eurocódigo 1.

Abstract

The telecommunication towers are structures that are intended for the placement of antennas, at high altitudes, in order to allow an efficient data transmission, especially referring to the mobile communications. Due to the strong growth of this technology in recent years, such structures have acquired a particular relevance.

The main goal of this dissertation is to study in detail the wind action on steel telecommunication towers, of the monopole type, taking into account on the most relevant parameters and considering different scenarios, in order to quantify their influence by analytical calculations. The location of the tower, their structural characteristics and the types of equipment installed are some of the subjects addressed in the document.

For the purpose of this study, the various types of telecommunication towers used in Portugal, their specific features and the equipment that they typically host are shown, and a methodology for calculating the wind action on this type of structures is established. This methodology, based on the Eurocode 1, illustrates the calculation process and proposes a standardization of the criteria to be adopted in project.

Key-words

Telecommunications towers; Antennas; Wind action; Monopole; Eurocode 1.

Abreviaturas, siglas e símbolos

Apresenta-se a lista com as abreviaturas, siglas e símbolos utilizados na dissertação, com o respetivo significado.

Siglas

GSM – Groupe Special Mobile – Sistema Global para Comunicações Móveis;
UMTS - Universal Mobile Telecommunication System;
ESA – Equivalent Sail Area – Área equivalente;

Símbolos

Letras maiúsculas latinas:

A – Soma das áreas projetadas dos elementos;
 A_c – Área limitada pelo contorno exterior;
 A_F – Área frontal de antenas;
 A_{ref} – Área de referência da construção ou do elemento de construção;
 B^2 – Coeficiente de resposta quase-estática;
 C_d – Coeficiente de arrasto;
F – Incidência frontal;
 F_d – Força de arrasto;
 F_w – Força do vento;
H - Altura do acidente orográfico;
 I_v - Intensidade de turbulência;

M – Momento fletor;

M_0 – Momento fletor na base;

$M_{0,i}$ – Influência do elemento i no valor do momento fletor na base;

R^2 – Coeficiente de resposta em ressonância;

R_b – Função de admitância aerodinâmica;

Re – Número de Reynolds;

R_h – Função de admitância aerodinâmica;

S_L – Função de densidade espectral de potência adimensional;

T – Incidência traseira;

V – Esforço transverso; Velocidade média do vento;

V_0 – Esforço transverso na base;

$V_{0,i}$ – Influência do elemento i no valor do esforço transverso na base.

Letras minúsculas latinas:

b – Largura da construção;

b_f – Diâmetro final;

b_i – Diâmetro médio do segmento i ; Diâmetro inicial;

c_{dir} - Coeficiente de direção;

c_f – Coeficiente de força relativo à construção ou ao elemento de construção;

$c_{f,0}$ – Coeficiente de força para elementos estruturais sem livre escoamento em torno das extremidades;

c_{fm} – Coeficiente de força médio;

c_i – Coeficiente de interferência;

c_o - Coeficiente de orografia;

c_r - Coeficiente de rugosidade;

$c_s c_d$ – Coeficiente estrutural;

c_{season} - Coeficiente de sazão;

f_L – Frequência adimensional;

h – Altura da construção;

k – Rugosidade superficial equivalente;

k_l - Coeficiente de turbulência;

k_{M0} – Coeficiente de momento fletor na base;

k_p – Fator de pico;

k_r - Coeficiente de terreno;

k_{V0} – Coeficiente de esforço transverso na base;

l – Comprimento do elemento de construção;

l_i – Comprimento do segmento i ;
 m – Massa;
 m_e – Massa equivalente por unidade de comprimento;
 m_i – Massa por unidade de comprimento do segmento i ;
 $m_{t,i}$ – Massa total no segmento i ;
 n – Número de elementos;
 n_1 – Número de cabos do caminho 1;
 n_{1x} – Número de cabos do caminho 1 na direção x ;
 n_{1y} – Número de cabos do caminho 1 na direção y ;
 n_2 – Número de cabos do caminho 2;
 n_{2x} – Número de cabos do caminho 2 na direção x ;
 n_{2y} – Número de cabos do caminho 2 na direção y ;
 n_F – Número de antenas frontais;
 q_p – Pressão dinâmica de pico;
 r – Raio de curvatura do canto;
 s – Coeficiente;
 u – Deslocamento horizontal;
 u_1 – Deslocamento horizontal no topo;
 $u_{1,i}$ – Influência do elemento i no valor do deslocamento horizontal no topo;
 v – Velocidade de pico do vento;
 v_b - Valor de referência da velocidade do vento;
 $v_{b,0}$ - Valor básico da velocidade de referência do vento;
 v_m - Velocidade média do vento;
 x - Distância horizontal entre o local da construção e o topo da vertente;
 z – Altura acima do solo;
 z_0 - Comprimento de rugosidade;
 $z_{0,II}$ - Comprimento de rugosidade para a categoria de terreno II;
 z_e – Altura de referência;
 z_{max} - Altura máxima;
 z_{min} - Altura mínima;
 z_s – Altura de referência para determinação do coeficiente estrutural;
 z_t – Altura de referência relativo ao coeficiente estrutural.

Letras gregas:

α – Parâmetro relativo ao coeficiente estrutural; Ângulo;
 δ – Decremento logarítmico total de amortecimento;

Δ – Variação;

δ_a – Decremento logarítmico de amortecimento aerodinâmico;

δ_d – Decremento logarítmico de amortecimento devido a dispositivos especiais;

δ_s – Decremento logarítmico de amortecimento estrutural;

η_h – Variável relativa ao cálculo das funções de admitância aerodinâmica;

θ – Rotação; Ângulo de incidência;

θ_1 – Rotação no topo;

$\theta_{1,i}$ – Influência do elemento i no valor da rotação no topo;

λ - Esbelteza efetiva;

ρ - Massa volúmica do ar;

σ_v - Desvio padrão da turbulência;

T – Duração da integração da velocidade média do vento;

v – Frequência de passagens ascendentes; Velocidade cinemática do ar;

Φ - Inclinação, na direção do vento, da vertente virada a barlavento;

φ – Índice de cheios;

Φ_1 – Modo fundamental de flexão;

Φ_i - Modo fundamental de flexão do segmento i ;

Ψ_r – Coeficiente de redução para secções quadradas com cantos arredondados;

Ψ_λ – Coeficiente de efeitos de extremidade.

Índice geral

1. Introdução.....	1
1.1. Considerações iniciais.....	1
1.2. Principais objetivos.....	2
1.3. Organização do documento	2
2. Caracterização das torres de telecomunicações	3
2.1. Tipologias de torres de telecomunicações	3
2.1.1. Torres tubulares.....	4
2.1.2. Torres treliçadas	7
2.2. Equipamentos e acessórios	10
2.2.1. Escadas.....	10
2.2.2. Caminhos de cabos	11
2.2.3. Plataformas.....	13
2.2.4. Interfaces de antenas	14
2.2.5. Antenas	16
3. Ação do vento sobre torres de telecomunicações.....	18
3.1. Considerações iniciais.....	18
3.2. Força exercida pelo vento sobre torres de telecomunicações	18
3.2.1. Pressão dinâmica de pico	20
3.2.1.1. Velocidade média do vento	20
3.2.1.2. Intensidade de turbulência.....	26
3.2.2. Coeficientes de força	27
3.2.2.1. Fuste da torre de telecomunicações.....	27
3.2.2.2. Equipamentos	33
3.2.3. Coeficiente estrutural	37
4. Estudo da ação do vento em torres de telecomunicações.....	45
4.1. Descrição dos modelos de torres	46
4.1.1. Modelo A	46
4.1.2. Modelo B	47
4.1.3. Modelo C	48
4.1.4. Modelo D	49

4.2. Estudo da influência da pressão dinâmica de pico	50
4.2.1. Estudo da influência da zona/terreno	50
4.2.2. Estudo da influência da orografia	56
4.2.2.1. Estudo da inclinação da vertente a barlavento	57
4.2.2.2. Estudo do comprimento da vertente a sotavento	66
4.2.2.3. Estudo do tipo de orografia	68
4.3. Estudo da ação do vento em função das características das torres	72
4.3.1. Estudo da influência da altura da torre	72
4.3.2. Estudo da influência do tipo de secção	77
4.3.2.1. Estudo do tipo de superfície – Secções circulares	78
4.3.2.2. Estudo da geometria da secção – Secções poligonais	81
4.4. Estudo da ação do vento sobre os equipamentos	87
4.4.1. Estudo da ação do vento sobre antenas	87
4.4.1.1. Estudo da influência da quantidade de antenas	91
4.4.1.2. Estudo da posição das antenas	96
4.4.1.3. Relação da quantidade com a posição de antenas	101
4.4.1.4. Estudo das interfaces de antenas	106
4.4.1.4.1. Estudo do efeito de interferência entre interfaces e antenas	117
4.4.2. Estudo da ação do vento sobre os cabos	125
4.4.2.1. Estudo do efeito de grupo dos cabos com a torre	134
4.4.3. Estudo da ação do vento sobre as escadas	137
4.5. Estudo geral da ação do vento	142
5. Conclusão	158
6. Desenvolvimentos futuros	163
Bibliografia	164

Apêndices (ver em formato digital)

Apêndice I - Zona-Terreno

Apêndice II - Orografia

Apêndice III - Torres

Apêndice IV - Antenas

Apêndice V - Interfaces

Apêndice VI - Cabos

Apêndice VII - Escadas

Apêndice VIII - Estudo geral

Nota: Os apêndices encontram-se em formato digital em suporte CD. No nome de cada ficheiro encontra-se a designação utilizada, ao longo do corpo do documento, para fazer referência ao apêndice respetivo.

Índice de quadros

Quadro 2.1 - Distribuição de torres de telecomunicações em Portugal	3
Quadro 3.1 - Zonamento de Portugal quanto à ação do vento.....	21
Quadro 3.2 - Categorias de terreno em Portugal quanto à ação do vento.....	22
Quadro 3.3 - Definição do comprimento efetivo da vertente a barlavento.	24
Quadro 3.4 - Coeficiente de força sem livre escoamento em torno das extremidades, para secções poligonais.	28
Quadro 3.5 - Rugosidade superficial equivalente em função do tipo de superfície.....	30
Quadro 3.6 – Influência da posição da estrutura na esbelteza efetiva, λ	32
Quadro 4.1 - Análises a realizar no âmbito do estudo da ação do vento em torres de telecomunicações.	45
Quadro 4.2 - Situações consideradas para o estudo da influência da zona/terreno.	51
Quadro 4.3 - Variação com o tipo de zona e a categoria de terreno, no modelo B.....	52
Quadro 4.4 - Variação média com tipo de zona e a categoria de terreno, no modelo B.	54
Quadro 4.5 - Variação dos parâmetros da pressão dinâmica de pico, no modelo B, para o estudo da influência da zona/terreno.	55
Quadro 4.6 - Casos considerados para o estudo da variação da inclinação, devida ao aumento da altura do acidente orográfico.	58
Quadro 4.7 - Variação média para a alteração da inclinação, pela altura da falésia, no modelo B.	59
Quadro 4.8 - Variação média para a alteração da inclinação, pela altura da colina, no modelo B.....	60
Quadro 4.9 - Casos considerados para o estudo da variação da inclinação pela alteração do comprimento a barlavento do acidente orográfico.....	61
Quadro 4.10 - Variação média para a alteração da inclinação, pela alteração comprimento a barlavento de uma falésia, no modelo B.	62
Quadro 4.11 - Variação média para a alteração da inclinação, pela alteração do comprimento a barlavento de uma colina, no modelo B.....	62
Quadro 4.12 - Variação média para a alteração da dimensão, no caso de uma falésia, no modelo B.	63
Quadro 4.13 - Variação média para a alteração da dimensão, no caso de uma colina, no modelo B.	64
Quadro 4.14 - Variação média dos parâmetros da pressão dinâmica de pico, para a alteração da inclinação, no modelo B.	65

Quadro 4.15 - Casos considerados para o estudo da variação do comprimento a sotavento, numa colina.	67
Quadro 4.16 - Variação média para a alteração do comprimento a sotavento, numa colina, no modelo B.	68
Quadro 4.17 - Casos considerados para o estudo do tipo de orografia.....	69
Quadro 4.18 - Variação média para o estudo do tipo de orografia, para o modelo B.	70
Quadro 4.19 - Valores das áreas de referência para os modelos A e B.....	73
Quadro 4.20 - Valores das áreas de referência para os modelos C e D.....	73
Quadro 4.21 - Variações obtidas no estudo da influência da altura da torre, entre os modelos A e B.....	74
Quadro 4.22 - Variações obtidas no estudo da influência da altura da torre, entre os modelos C e D.	75
Quadro 4.23 - Variação dos parâmetros da força do vento para o estudo do comprimento da torre.....	76
Quadro 4.24 - Variação dos parâmetros da força do vento entre os modelos C e D.....	77
Quadro 4.25 - Casos considerados para o estudo do tipo de superfície em secções circulares.	78
Quadro 4.26 - Variação para o estudo do tipo de superfície em secções circulares.	79
Quadro 4.27 - Variação dos parâmetros da força do vento para o estudo do tipo de superfície em secções circulares.	80
Quadro 4.28 - Casos considerados para o estudo da geometria da secção, em secções poligonais.	82
Quadro 4.29 - Variação para o estudo da geometria da secção, em secções poligonais.....	83
Quadro 4.30 - Variação dos parâmetros da força do vento para o estudo da geometria da secção, em secções poligonais.	84
Quadro 4.31 - Valores médios do coeficiente de força para cada torre.....	86
Quadro 4.32 - Características das antenas consideradas no estudo.	88
Quadro 4.33 - Força do vento nas antenas quanto à direção de incidência do vento.....	90
Quadro 4.34 - Casos considerados para o estudo da influência da quantidade de antenas.	91
Quadro 4.35 - Variação da quantidade de antenas do tipo 3, aos 40 m de altura, no modelo B.....	92
Quadro 4.36 - Variação da quantidade de antenas do tipo 4, aos 40 m de altura, no modelo B.....	93
Quadro 4.37 - Variação dos parâmetros da pressão dinâmica de pico com a alteração da quantidade de antenas do tipo 3, aos 40 m de altura, no modelo B.	94

Quadro 4.38 - Variação dos parâmetros da pressão dinâmica de pico com a alteração da quantidade de antenas do tipo 4, aos 40 m de altura, no modelo B.	95
Quadro 4.39 - Casos considerados para o estudo da influência da posição de antenas.	96
Quadro 4.40 - Variação da posição de 12 antenas do tipo 3, no modelo B.	97
Quadro 4.41 - Variação da posição de 12 antenas do tipo 4, no modelo B.	98
Quadro 4.42 - Variação dos parâmetros da força do vento com a alteração da posição de 12 antenas do tipo 3, no modelo B.	100
Quadro 4.43 - Variação dos parâmetros da força do vento com a alteração da posição de 12 antenas do tipo 4, no modelo B.	100
Quadro 4.44 - Variação do esforço transversal na base da torre B, na colocação de antenas do tipo 3.	102
Quadro 4.45 - Variação do momento fletor na base da torre B, na colocação de antenas do tipo 3.	102
Quadro 4.46 - Variação do deslocamento no topo da torre B, na colocação de antenas do tipo 3.	103
Quadro 4.47 - Variação da rotação no topo da torre B, na colocação de antenas do tipo 3.	104
Quadro 4.48 - Variação dos parâmetros da força do vento para a variação da quantidade e posição de antenas do tipo 3, no modelo B.	105
Quadro 4.49 - Características dos tipos de interfaces de antenas considerados para o estudo.	107
Quadro 4.50 - Força do vento nas 4 interfaces de antenas para a área mínima e máxima.	108
Quadro 4.51 - Casos de disposições de antenas para as diversas interfaces.	109
Quadro 4.52 - Variação para as diversas disposições de antenas na interface do tipo A, no modelo B.	111
Quadro 4.53 - Variação para as diversas disposições de antenas na interface do tipo B, no modelo B.	112
Quadro 4.54 - Variação para as diversas disposições de antenas na interface do tipo C, no modelo B.	113
Quadro 4.55 - Variação para as diversas disposições de antenas na interface do tipo D, no modelo B.	114
Quadro 4.56 - Influência das antenas e interface do tipo A na força do vento, para a área mínima.	115
Quadro 4.57 - Influência das antenas e interface do tipo A na força do vento, para a área máxima.	116
Quadro 4.58 – Resultados obtidos para as antenas	119

Quadro 4.59 - Área equivalente ESA por m ² , por elemento.	120
Quadro 4.60 - Coeficientes de interferência para as diversas situações de antenas.....	121
Quadro 4.61 - Coeficiente de interferência para as diversas situações.....	124
Quadro 4.62 - Efeito de interferência na interface do tipo A, no modelo B.	124
Quadro 4.63 - Casos considerados para o estudo da ação do vento sobre os caminhos de cabos.....	126
Quadro 4.64 - Variação para a ação do vento sobre os caminhos de cabos, no modelo B	128
Quadro 4.65 - Variação do coeficiente de força e da área de referência para as diversas disposições de cabos, no modelo B.....	129
Quadro 4.66 - Características das configurações de cabos otimizadas consideradas no estudo.....	131
Quadro 4.67 - Variação obtida no estudo da otimização dos caminhos de cabos, no modelo B.....	132
Quadro 4.68 - Análise do efeito de bloco nos caminhos de cabos, no modelo B.	135
Quadro 4.69 - Características dos tipos de escadas considerados para o estudo.	137
Quadro 4.70 - Variações obtidas para os diversos tipos de escadas, no modelo B.	138
Quadro 4.71 - Variação obtida no estudo do efeito de escudo nas escadas, no modelo B.	141
Quadro 4.72 - Descrição geral dos casos de torres considerados no estudo.....	142
Quadro 4.73 - Influência relativa média na ação global do vento, no modelo A.	143
Quadro 4.74 - Influência relativa média na ação global do vento, no modelo B.	144
Quadro 4.75 - Influência relativa média na ação global do vento, no modelo C.	145
Quadro 4.76 - Influência relativa média na ação global do vento, no modelo D.	145
Quadro 4.77 - Influência relativa média dos diferentes fatores na ação do vento sobre a estrutura.	146
Quadro 4.78 - Parâmetros considerados para os 4 modelos de torres.	147
Quadro 4.79 - Coeficientes de esforço transversal para o modelo A.	148
Quadro 4.80 – Coeficientes de momento fletor para o modelo A.	149
Quadro 4.81 – Coeficientes de esforço transversal para o modelo B.....	150
Quadro 4.82 – Coeficientes de momento fletor para o modelo B.	151
Quadro 4.83 – Coeficientes de esforço transversal para o modelo C.	152
Quadro 4.84 – Coeficientes de momento fletor para o modelo C.....	153
Quadro 4.85 – Coeficientes de esforço transversal para o modelo D.	154
Quadro 4.86 – Coeficientes de momento fletor para o modelo D.....	155
Quadro 4.87 - Influência da alteração dos parâmetros no esforço transversal e no momento fletor.	156

Índice de gráficos

Gráfico 4.1 – Variação com o tipo de zona e a categoria de terreno, no modelo B.	52
Gráfico 4.2 - Variação média com tipo de zona e a categoria de terreno, no modelo B.	54
Gráfico 4.3 - Variação dos parâmetros da pressão dinâmica de pico, no modelo B, para o estudo da influência da zona/terreno.	55
Gráfico 4.4 - Variação média para a alteração da inclinação, pela altura da falésia, no modelo B.	59
Gráfico 4.5 - Variação média para a alteração da inclinação, pela altura da colina, no modelo B.	59
Gráfico 4.6 - Variação média para a alteração da inclinação, pela alteração comprimento a barlavento de uma falésia, no modelo B.	61
Gráfico 4.7 - Variação média para a alteração da inclinação, pela alteração do comprimento a barlavento de uma colina, no modelo B.	62
Gráfico 4.8 - Variação média para a alteração da dimensão, no caso de uma falésia, no modelo B.	63
Gráfico 4.9 - Variação média para a alteração da dimensão, no caso de uma colina, no modelo B.	64
Gráfico 4.10 - Variação média dos parâmetros da pressão dinâmica de pico, para a alteração da inclinação, no modelo B.	65
Gráfico 4.11 - Variação média para a alteração do comprimento a sotavento, numa colina, no modelo B.	67
Gráfico 4.12 - Variação média para o estudo do tipo de orografia, no caso 1, para o modelo B.	70
Gráfico 4.13 - Variação média para o estudo do tipo de orografia, no caso 2, para o modelo B.	70
Gráfico 4.14 - Variações obtidas no estudo da influência da altura da torre, entre os modelos A e B.	74
Gráfico 4.15 - Variações obtidas no estudo da influência da altura da torre, entre os modelos C e D.	74
Gráfico 4.16 - Variação dos parâmetros da força do vento entre os modelos A e B.	76
Gráfico 4.17 - Variação dos parâmetros da força do vento entre os modelos C e D.	76
Gráfico 4.18 - Variação para o estudo do tipo de superfície em secções circulares.	79
Gráfico 4.19 - Variação dos parâmetros da força do vento para o estudo do tipo de superfície em secções circulares.	80
Gráfico 4.20 - Variação para o estudo da geometria da secção, em secções poligonais.	83

Gráfico 4.21 - Variação dos parâmetros da força do vento para o estudo da geometria da secção, em secções poligonais.	84
Gráfico 4.22 - Variação do coeficiente de força com a geometria da secção.	85
Gráfico 4.23 - Força do vento nas antenas quanto à direção de incidência do vento.	90
Gráfico 4.24 – Variação da quantidade de antenas do tipo 3, aos 40 m de altura, no modelo B.	92
Gráfico 4.25 - Variação da quantidade de antenas do tipo 4, aos 40 m de altura, no modelo B.	92
Gráfico 4.26 - Variação dos parâmetros da pressão dinâmica de pico com a alteração da quantidade de antenas do tipo 3, aos 40 m de altura, no modelo B.	94
Gráfico 4.27 - Variação dos parâmetros da pressão dinâmica de pico com a alteração da quantidade de antenas do tipo 4, aos 40 m de altura, no modelo B.	95
Gráfico 4.28 - Variação da posição de 12 antenas do tipo 3, no modelo B.	97
Gráfico 4.29 - Variação da posição de 12 antenas do tipo 4, no modelo B.	98
Gráfico 4.30 - Variação dos parâmetros da força do vento com a alteração da posição de 12 antenas do tipo 3, no modelo B.	99
Gráfico 4.31 - Variação dos parâmetros da força do vento com a alteração da posição de 12 antenas do tipo 4, no modelo B.	100
Gráfico 4.32 - Variação do esforço transversal na base da torre B, na colocação de antenas do tipo 3.	101
Gráfico 4.33 - Variação do momento fletor na base da torre B, na colocação de antenas do tipo 3.	102
Gráfico 4.34 - Variação do deslocamento no topo da torre B, na colocação de antenas do tipo 3.	103
Gráfico 4.35 - Variação da rotação no topo da torre B, na colocação de antenas do tipo 3.	103
Gráfico 4.36 - Variação dos parâmetros da força do vento para a variação da quantidade e posição de antenas do tipo 3, no modelo B.	105
Gráfico 4.37 - Força do vento nas 4 interfaces de antenas para a área mínima e máxima.	108
Gráfico 4.38 - Variação para as diversas disposições de antenas na interface do tipo A, no modelo B.	111
Gráfico 4.39 - Variação para as diversas disposições de antenas na interface do tipo B, no modelo B.	112
Gráfico 4.40 - Variação para as diversas disposições de antenas na interface do tipo C, no modelo B.	113

Gráfico 4.41 - Variação para as diversas disposições de antenas na interface do tipo D, no modelo B.	114
Gráfico 4.42 - Influência das antenas e interface do tipo A na força do vento, para a área mínima.....	115
Gráfico 4.43 - Influência das antenas e interface do tipo A na força do vento, para a área máxima.....	116
Gráfico 4.44 - Coeficiente de interferência em interfaces.....	123
Gráfico 4.45 - Efeito de interferência na interface do tipo A, no modelo B.....	124
Gráfico 4.46 - Variação para a ação do vento sobre os caminhos de cabos, no modelo B.	128
Gráfico 4.47 - Variação do coeficiente de força e da área de referência para as diversas disposições de cabos, no modelo B.....	129
Gráfico 4.48 - Variação obtida no estudo da otimização dos caminhos de cabos, no modelo B.....	132
Gráfico 4.49 - Análise do efeito de bloco nos caminhos de cabos, no modelo B.....	135
Gráfico 4.50 - Variações obtidas para os diversos tipos de escadas, no modelo B.....	138
Gráfico 4.51 - Variação obtida no estudo do efeito de escudo nas escadas, no modelo B.	140
Gráfico 4.52 - Influência relativa média na ação global do vento, no modelo A.....	143
Gráfico 4.53 - Influência relativa média na ação global do vento, no modelo B.....	144
Gráfico 4.54 - Influência relativa média na ação global do vento, no modelo C.....	144
Gráfico 4.55 - Influência relativa média na ação global do vento, no modelo D.....	145

Índice de figuras

Figura 2.1 - Exemplos de dois tipos de torres de telecomunicações tubulares.....	4
Figura 2.2 - Ligação entre troços de torres tubulares cilíndricas.	5
Figura 2.3 - Tronco e tipos de secção de torres tubulares cónicas.....	6
Figura 2.4 – Diferentes tipos de ligação à fundação em torres tubulares.	6
Figura 2.5 - Exemplos dos dois tipos de torres de telecomunicações treliçadas.	7
Figura 2.6 - Pormenor da estrutura de uma torre treliçada.....	8
Figura 2.7 - Exemplo de uma torre treliçada espiada no topo de um edifício.	9
Figura 2.8 - Ligação de torre treliçada à fundação.	9
Figura 2.9 - Exemplos de alguns tipos de escadas em torres de telecomunicações.	10
Figura 2.10 - Sistema anti-queda em escadas de torres de telecomunicações.....	11
Figura 2.11 - Diferentes colocações dos caminhos de cabos na torre.	12
Figura 2.12 - Exemplos de disposições típicas de cabos em torres de telecomunicações. ...	12
Figura 2.13 - Plataformas de acesso a vários níveis da torre.....	13
Figura 2.14 - Interface de antenas no topo de uma torre de telecomunicações.	14
Figura 2.15 - Exemplos de configurações típicas de interfaces de topo, em torres de telecomunicações.	15
Figura 2.16 - Agrupamento de interfaces no topo de uma torre de telecomunicações, mostrando a complexidade possível nestes elementos.	16
Figura 2.17 - Diversos tipos de antenas, com diferentes formatos.	17
Figura 3.1 - Exemplo de aplicação da força do vento numa secção de comprimento L.	19
Figura 3.2 - Efeitos da orografia na ação do vento.....	23
Figura 3.3 - Determinação do coeficiente s , no caso de uma falésia.....	24
Figura 3.4 - Determinação do coeficiente s , no caso de uma colina.....	25
Figura 3.5 - Exemplo de determinação do diâmetro da circunferência circunscrita de uma secção poligonal.	28
Figura 3.6 - Coeficiente de força sem livre escoamento em torno das extremidades, para secções circulares.	29
Figura 3.7 - Coeficiente de efeitos de extremidade, Ψ_λ	31
Figura 3.8 - Exemplo de determinação do índice de cheios.....	31
Figura 3.9 - Método para determinação do coeficiente de força em antenas por retroanálise.	33
Figura 3.10 - Coeficiente de força sem livre escoamento em torno das extremidades, para secções retangulares.....	34
Figura 3.11 - Coeficiente de redução para secções quadradas com cantos arredondados..	35

Figura 3.12 - Método para determinação do coeficiente de força em caminhos de cabos. ...	36
Figura 3.13 - Determinação da altura de referência.	37
Figura 3.14 - Exemplo de determinação da massa equivalente num troço da estrutura.....	41
Figura 4.1 - Representação da torre correspondente ao modelo A.	46
Figura 4.2 - Representação da torre correspondente ao modelo B.	47
Figura 4.3 - Representação da torre correspondente ao modelo C.	48
Figura 4.4 - Representação da torre correspondente ao modelo D.	49
Figura 4.5 - Localização das situações consideradas para o estudo da influência da zona/terreno.	51
Figura 4.6 - Exemplo da variação da ação do vento com a alteração do tipo de zona e da categoria de terreno.	53
Figura 4.7 - Efeito da orografia sobre uma torre de telecomunicações.	56
Figura 4.8 - Definição das dimensões de uma colina e de uma falésia.	57
Figura 4.9 - Representação da variação da inclinação, devida ao aumento da altura do acidente orográfico.	58
Figura 4.10 - Representação da variação da inclinação pela alteração do comprimento a barlavento do acidente orográfico.	61
Figura 4.11 - Representação da variação do comprimento a sotavento numa colina.	67
Figura 4.12 - Representação dos dois tipos de acidentes orográficos.	69
Figura 4.13 - Representação do escoamento do vento, na vertente a sotavento, nos diferentes tipos de orografia.	71
Figura 4.14 - Representação das diferenças em termos de altura entre as torres.	72
Figura 4.15 - Representação da variação do coeficiente de força com a alteração do tipo de revestimento.	81
Figura 4.16 - Diversos tipos de secções poligonais em torres de telecomunicações.	82
Figura 4.17 - Tipos de antenas considerados no estudo.	88
Figura 4.18 - Posições de incidência do vento nos diversos tipos de antenas.	89
Figura 4.19 - Tipos de interfaces de antenas considerados para o estudo.	106
Figura 4.20 - Áreas de referência mínima e máxima para os 4 tipos de interfaces.	107
Figura 4.21 - Representação da consideração da direção de incidência do vento sobre as antenas.	110
Figura 4.22 - Exemplos da direção considerada para a incidência do vento sobre as antenas.	110
Figura 4.23 - Incidência do vento para a interface do tipo A.	111
Figura 4.24 - Incidência do vento para a interface do tipo B.	112
Figura 4.25 - Incidência do vento para a interface do tipo C.	113

Figura 4.26 - Incidência do vento para a interface do tipo D.	114
Figura 4.27 - escoamento do vento em torno de uma interface de antenas.....	117
Figura 4.28 - Exemplo da determinação da área equivalente ESA para a situação teórica e real.	118
Figura 4.29 - Ângulo de incidência do vento.	119
Figura 4.30 - Valor da área equivalente ESA por m ² , para a interface triangular.....	119
Figura 4.31 - Configuração de 6 antenas do tipo A.	120
Figura 4.32 - Área frontal de antenas nas diversas configurações.....	122
Figura 4.33 - Incidência do vento na interface do tipo A.....	123
Figura 4.34 - Incidência do vento sobre os caminhos de cabos.....	126
Figura 4.35 - Direção de incidência do vento sobre os caminhos de cabos.	127
Figura 4.36 - Representação das disposições de cabos considerados para o estudo.....	129
Figura 4.37 - Valores do coeficiente de força e da área de referência para diferentes caminhos de cabos.....	130
Figura 4.38 - Representação das configurações de cabos originais e otimizadas consideradas no estudo.....	131
Figura 4.39 - Variação do coeficiente de força com a forma do caminho de cabos.....	133
Figura 4.40 - Representação do escoamento do ar sobre os caminhos de cabos.	134
Figura 4.41 - Incidência do vento considerando o conjunto dos cabos com a torre.....	134
Figura 4.42 - Conjunto de cabos considerados como um bloco único.....	135
Figura 4.43 - Coeficientes de força atribuídos aos caminhos de cabos singulares e considerando o efeito de bloco com a torre, aos 20 m no modelo B.	136
Figura 4.44 - Representação dos quatro tipos de escadas considerados no estudo.....	137
Figura 4.45 - Representação da sobreposição das superfícies expostas da escada e da torre no caso de uma incidência frontal do vento.	139

1. Introdução

1.1. Considerações iniciais

As telecomunicações são hoje em dia um dos principais meios de comunicação entre pessoas, permitindo uma rápida e eficiente troca de informação em todo o Mundo, sendo crucial em quase todos os sectores de atividade profissional e também a nível pessoal. Não será de esperar, portanto, um menor desempenho em termos de eficácia e eficiência dos sistemas operadores que gerem as telecomunicações.

As torres de telecomunicações suportam equipamentos que possibilitam a transferência de dados, através da colocação de antenas fixadas à estrutura, bem como outros equipamentos com diversas funções. Existem em Portugal vários tipos de torres de telecomunicações, com diferentes soluções estruturais e tipos de equipamentos.

É assim fácil perceber que estas estruturas assumem um papel vital para o funcionamento deste tipo de comunicação. Cabe ao projetista obter a melhor solução conforme as condições existentes e conceber a estrutura para um correto e eficaz desempenho da mesma.

Com a entrada em vigor dos Eurocódigos, torna-se imperativa uma revisão detalhada do método de abordagem e do cálculo de ações que atuam numa estrutura. Além disso, no caso de torres metálicas de telecomunicações, é ainda mais importante, tentar estabelecer uma uniformização de critérios de acordo com as normas, visto não serem estruturas correntes, o que dificulta a respetiva aplicação do Eurocódigo.

Em Portugal este tipo de estruturas é atualmente bastante utilizado, verificando-se no entanto que os métodos de dimensionamento e de verificação da segurança se encontram desatualizados ou são inapropriados, com a agravante de não existir uma uniformização dos critérios utilizados no seu projeto, o que reforça ainda mais uma necessidade urgente de um conhecimento mais aprofundado do funcionamento das torres de telecomunicações.

Sendo o vento a ação condicionante no dimensionamento das torres de telecomunicações, é importante conhecer a forma como se processa o seu escoamento junto a estas estruturas e que parâmetros poderão ter uma influência decisiva na verificação da sua segurança.

1.2. Principais objetivos

Os objetivos deste trabalho são os seguintes:

- Apresentar os tipos de torres de telecomunicações e os diversos equipamentos que são geralmente utilizados em Portugal;
- Estabelecer métodos de abordagem à NP EN 1991-1-4, Eurocódigo 1 – Acções em estruturas, Parte 1-4: Acções do vento (EC1-1-4), que define a ação do vento em estruturas;
- Analisar e quantificar a influência de cada parâmetro relevante para a ação do vento em torres de telecomunicações.

1.3. Organização do documento

Este documento está dividido em 6 secções principais, incluindo a introdução (Secção 1).

Na segunda secção é feita uma breve caracterização das torres de telecomunicações, nomeadamente quanto às tipologias existentes em Portugal, funcionamento estrutural e componentes que suportam.

Na terceira secção descreve-se de forma detalhada e objetiva o método de cálculo da ação do vento sobre torres de telecomunicações, segundo o EC1-1-4.

Na quarta secção é realizado um estudo sobre a ação do vento em torres de telecomunicações, para obtenção da influência de cada parâmetro. Esta secção divide-se em três secções: a primeira secção, que trata os parâmetros da pressão dinâmica de pico, a segunda secção, referente à ação do vento em função das características das torres, e a terceira secção, relativa ao efeito da ação do vento sobre os diversos tipos de equipamentos frequentemente instalados em torres de telecomunicações.

Na quinta secção encontram-se as conclusões decorrentes do estudo efetuado onde são focados os pontos mais importantes e as principais ideias a reter.

Por último, na sexta secção do documento, são apontados os assuntos passíveis de serem desenvolvidos futuramente, suscitados pela dissertação.

2. Caracterização das torres de telecomunicações

2.1. Tipologias de torres de telecomunicações

Atualmente existem em Portugal vários tipos de torres de telecomunicações, com diferentes características. A partir dessas características podem ser definidas diferentes classificações e agrupamentos.

Neste trabalho são considerados apenas dois tipos principais de estruturas de torres metálicas de telecomunicações, nomeadamente torres treliçadas e torres tubulares, sendo estas vulgarmente designadas por monopolos.

Com base na recolha de dados relativos a 385 torres de telecomunicações existentes em Portugal, Travanca [1] agrupou estas torres em 6 grupos, com diferentes características, indicados no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Distribuição de torres de telecomunicações em Portugal

Tipologia	Torres
Torre metálica auto-suportada treliçada, de base quadrada	42
Torre metálica auto-suportada treliçada, de base triangular	96
Monopolo metálico auto-suportado, com secção transversal poligonal	136
Monopolo metálico auto-suportado, com secção transversal circular	80
Torre metálica treliçada espiada, de base triangular ou quadrada	18
Outras	13

Verifica-se que as torres treliçadas representam cerca de 41% do total de torres investigadas, e os monopolos aproximadamente 56%, o que demonstra um ligeiro equilíbrio entre estes dois grupos de torres, constituindo no entanto as torres tubulares o maior grupo.

Serão seguidamente caracterizados, de forma resumida, os principais grupos de torres de telecomunicações, quanto ao tipo de elementos, geometria e ligação à fundação, para se conhecerem os respetivos aspetos essenciais. As características enunciadas foram obtidas através da recolha de dados de um grupo genérico de torres, podendo existir algumas variantes.

2.1.1. Torres tubulares

As torres tubulares ou monopolos caracterizam-se por serem constituídas por troços retos de secção tubular, podendo subdividir-se em dois tipos principais: as torres tubulares de secção circular e as torres tubulares de secção poligonal (Figura 2.1).

É importante salientar, como se pode verificar nas figuras abaixo, que os troços das torres de secção circular são geralmente cilíndricos, enquanto que nas torres de secção poligonal os troços são cónicos.



Figura 2.1 - Exemplos de dois tipos de torres de telecomunicações tubulares.

Estas torres têm secções transversais metálicas ocas, com diâmetros exteriores que, genericamente, podem variar entre os 1300 mm na base e 300 mm no topo, e espessuras entre 9 mm e 6 mm. Os troços de maiores dimensões são utilizados na base, verificando-se uma redução do diâmetro e da espessura à medida que aumenta a altura da secção em relação à base da torre.

O comprimento das torres tubulares toma usualmente valores compreendidos entre 30 m e 40 m. A altura dos troços que as constituem varia habitualmente entre 6 m e 15 m, podendo no entanto ultrapassar estes valores em alguns casos.

Relativamente aos monopolos de secção circular, já se referiu que o tronco é cilíndrico, ou seja, não existe variação do diâmetro exterior nem da espessura ao longo da altura de cada troço. A ligação entre os diferentes troços é flangeada e aparafusada, como se pode ver na Figura 2.2.



Figura 2.2 - Ligação entre troços de torres tubulares cilíndricas.

Cada troço tem uma chapa de topo em cada extremidade. Estando os troços assentes, é feita a ligação, por aparafusamento, entre as chapas horizontais de topo e, de seguida, a ligação entre as paredes laterais verticais, por via de uma chapa de gousset, conferindo-se assim maior solidez à ligação. Todas as juntas devem ser seladas, de forma a se impedir a entrada de água e posteriores danos por corrosão.

Quanto aos monopolos com secção poligonal, a ligação entre troços é feita por um encaixe próprio, que se encontra no interior do tubo. Aqui reside uma diferença fundamental entre os dois tipos de torres tubulares, especialmente no tipo de ligação utilizado. Como nas torres constituídas por troços cilíndricos existe uma mudança brusca de diâmetro entre troços, é necessária uma ligação mais complexa, que garanta a perfeita continuidade da estrutura, enquanto que nas torres constituídas por troços cónicos de secção poligonal a ligação é conseguida de uma forma mais simples.

Nos monopolos de secção poligonal o tronco de cada troço é geralmente cónico, ou seja, existe uma redução das diagonais das secções transversais ao longo do comprimento do troço, fazendo um ângulo aproximado de $0,65^\circ$ com a vertical, quaisquer que sejam as dimensões da torre, como se pode observar na Figura 2.3. A espessura da parede mantém-se constante ao longo de cada troço, apesar da diminuição gradual do perímetro da secção. As secções transversais deste tipo de monopolos são geralmente octogonais (8 faces), dodecagonais (12 faces) ou hexadecagonais (16 faces).

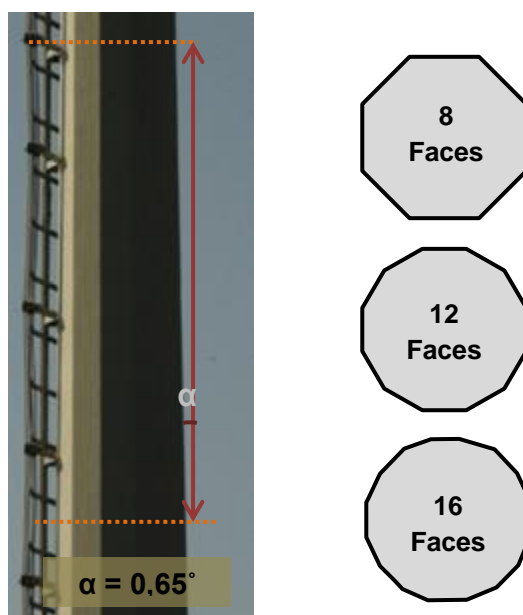


Figura 2.3 - Tronco e tipos de secção de torres tubulares cónicas.

A fundação de ambos os tipos de monopolos é direta, constituída em geral por uma sapata de betão. A torre é fixada através de chumbadouros, ligados à chapa de base, sendo reforçada por meio de cutelos metálicos, como se pode observar pela Figura 2.4.

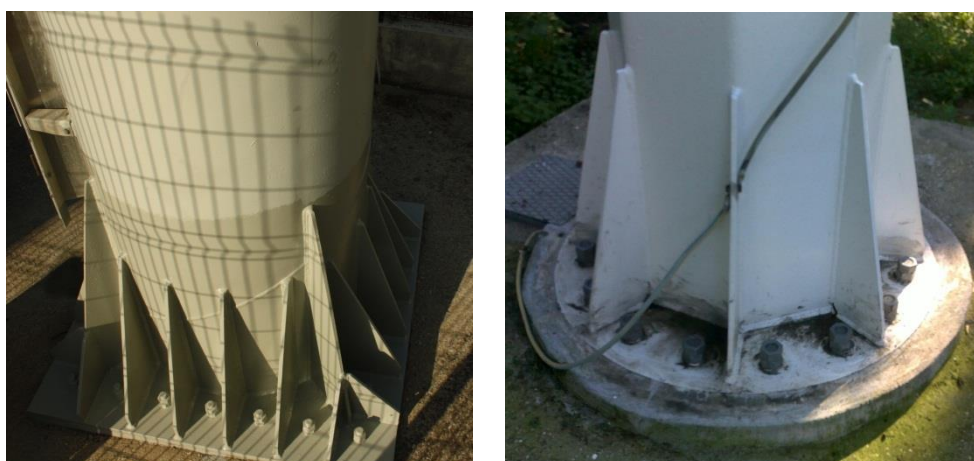


Figura 2.4 – Diferentes tipos de ligação à fundação em torres tubulares.

2.1.2. Torres treliçadas

As torres treliçadas apresentam uma estrutura em treliça, e podem ser divididas em dois grupos fundamentais, auto-suportadas e espiadas (Figura 2.5).

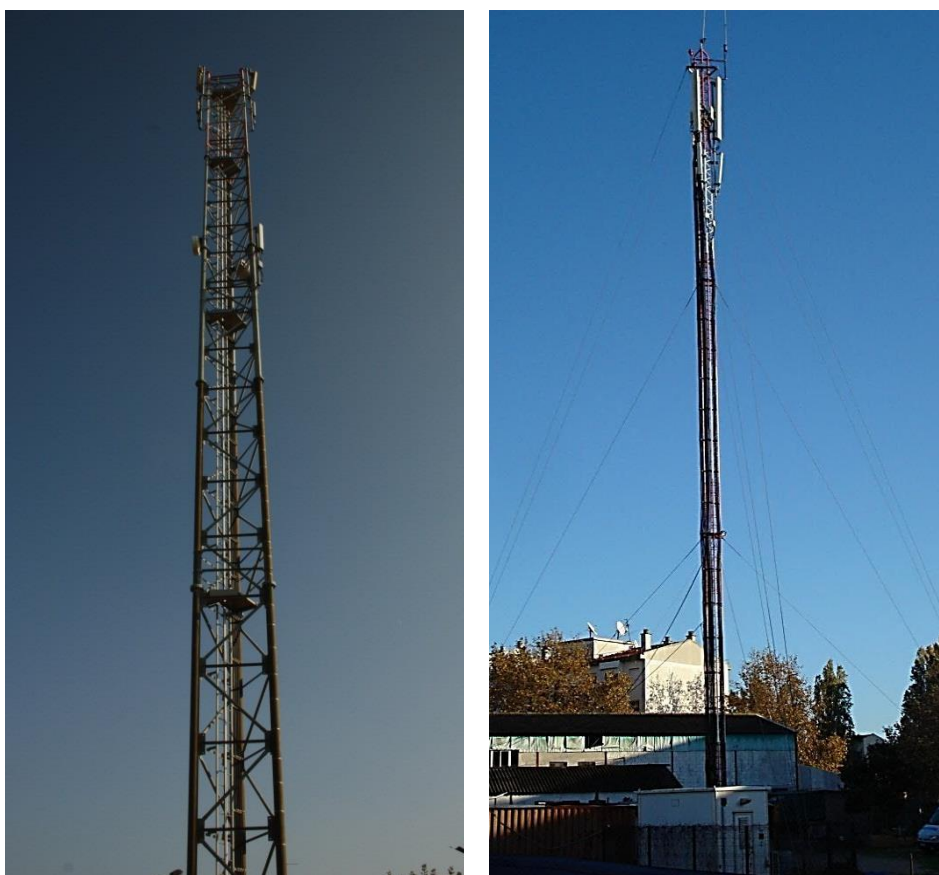


Figura 2.5 - Exemplos dos dois tipos de torres de telecomunicações treliçadas.

Genericamente, este tipo de torres de telecomunicações têm secções transversais de base quadrada ou triangular, sendo a treliça composta por elementos tubulares metálicos de secção circular, respetivamente, montantes, travessas e diagonais, com diâmetros que variam geralmente entre os 10 mm e os 50 mm.

Estas torres podem alcançar alturas superiores à das torres tubulares, devido principalmente ao seu menor peso. Enquanto que as torres treliçadas auto-suportadas poderão ter uma massa de cerca 70 kg/m, os monopolos atingir mais de 200 kg/m, nos troços de maiores dimensões. Este facto deve-se ao grande índice de vazios das estruturas em forma de treliça. No entanto, em torres de telecomunicações, para suporte de antenas,

as alturas dos monopolos e das torres treliçadas, situam-se habitualmente entre os 30 m a 40 m.

Em ambos os tipos de torres treliçadas, as ligações entre troços é geralmente flangeada, entre montantes. Nas extremidades dos troços dos montantes existe uma flange com ligação por aparafusamento, como se pode observar na Figura 2.6.

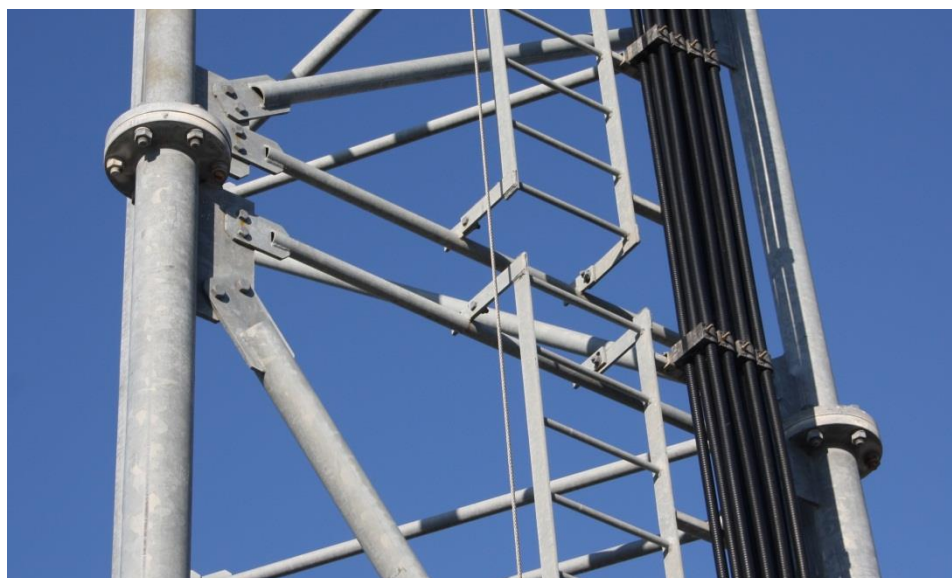


Figura 2.6 - Pormenor da estrutura de uma torre treliçada.

A grande diferença entre os dois tipos de torres treliçadas, auto-suportadas ou espiadas, reside seu funcionamento estrutural. As torres treliçadas auto-suportadas não precisam de qualquer suporte adicional para garantir a sua estabilidade, sendo naturalmente mais robustas que as espiadas. É usual que, em torres treliçadas auto-suportadas, a largura dos troços iniciais seja variável nas torres mais altas e constante nas torres mais baixas.

As torres treliçadas espiadas são geralmente mais esbeltas que as torres auto-suportadas, podendo atingir maiores alturas. Enquanto que nas torres auto-suportadas a sua estabilidade é garantida pela própria estrutura e pela fundação, nas espiadas existe um reforço adicional, por via da utilização de espias.

As espias são cabos de aço tracionados, destinados a limitar os deslocamentos da torre e a aumentar a sua capacidade resistente. Nas torres de telecomunicações poderão existir entre 3 a 5 níveis de espias, constituídas por cabos de aço com 6 mm a 10 mm de diâmetro. Apesar de as espias apresentarem algumas vantagens, tais como a maior esbelteza da torre e o menor custo da estrutura, a sua utilização requer suficiente espaço livre ao nível do solo para efetuar a sua ancoragem, que aumenta com a altura da torre.

Devido ao menor peso das torres treliçadas espiadas, é habitual a sua colocação no topo de edifícios, como se verifica na Figura 2.7.



Figura 2.7 - Exemplo de uma torre treliçada espiada no topo de um edifício.

As fundações das torres treliçadas são efetuadas, em geral, da mesma forma que as fundações das torres tubulares, com a diferença de dispensarem a chapa de base. Como se pode observar na Figura 2.8, cada montante é fixado através de chumbadouros a um maciço de betão armado, que por sua vez está ligado a uma sapata.



Figura 2.8 - Ligação de torre treliçada à fundação.

No caso de torres treliçadas espiadas, a torre poderá assentar num maciço de betão armado, ficando as restantes exigências de estabilidade a cargo das espigas. Este facto é evidente no caso da colocação de torres treliçadas espiadas no topo de edifícios, onde é impossível a construção de qualquer elemento de fundação.

2.2. Equipamentos e acessórios

As torres de telecomunicações têm como principal função possibilitar a elevação necessária às antenas para que a transmissão de dados seja possível sem qualquer interferência. Para além das antenas, as torres suportam ainda outros equipamentos e acessórios tais como os caminhos de cabos, interfaces, escadas de acesso e plataformas de trabalho. É evidente que qualquer destes componentes tem uma certa influência na resposta da estrutura às diferentes ações a que é sujeita e é por isso importante conhecer, com o maior detalhe possível, a tipologia de cada equipamento.

Neste capítulo é feita uma breve análise aos principais equipamentos que existem numa torre de telecomunicações e são descritas as suas características fundamentais.

2.2.1. Escadas

As escadas têm como função garantir o acesso a qualquer ponto da estrutura e são geralmente colocadas junto à torre e ao longo de todo o comprimento da mesma. Poderão existir diferentes tipos de escadas, dependendo da utilização de corrimão, de guarda-corpos, de calha anti-queda, ou mesmo de degraus descontínuos.



Figura 2.9 - Exemplos de alguns tipos de escadas em torres de telecomunicações.

A utilização de guarda-corpos tem vindo a decair nos últimos anos e tem sido substituída pela colocação de uma calha anti-queda ao longo do comprimento da torre. Nesta calha é colocado um dispositivo que segura o utilizador à torre, prevenindo a sua queda accidental, como se pode ver na Figura 2.10. A maior segurança conferida por este dispositivo, e a possibilidade de redução de elementos e conseqüente área de exposição fazem com que atualmente este equipamento prevaleça sobre a utilização de guarda-corpos.



Figura 2.10 - Sistema anti-queda em escadas de torres de telecomunicações.

A utilização de corrimão é meramente opcional em qualquer um dos sistemas referidos, assim como a utilização de degraus descontínuos.

Estes elementos têm pequenos diâmetros, com secção angulosa ou circular, e áreas de exposição compreendidas entre os $0,060 \text{ m}^2$ a $0,200 \text{ m}^2$, aproximadamente.

2.2.2. Caminhos de cabos

A principal função dos cabos é estabelecer a comunicação entre as antenas e as centrais de receção de dados, através de uma estação colocada junto à base da torre. Cada antena poderá ter, em termos médios, até 4 cabos ligados, o que mostra a elevada densidade destes elementos numa torre de telecomunicações.

Os cabos são normalmente agrupados, formando blocos. Tendo em conta que cada cabo tem geralmente cerca de 22 mm de diâmetro, os blocos podem ser algo volumosos.

Para a execução do caminho de cabos pode-se optar por colocar uma estrutura metálica relativamente esbelta junto à torre, que percorre todo o comprimento da estrutura onde são fixados os cabos. Os cabos também podem ser colocados diretamente sobre o fuste da torre ou então no interior da mesma.

Os caminhos de cabos são geralmente colocados ao lado das escadas, no mesmo plano, existindo no máximo até 2 caminhos. Contudo, podem ocorrer exceções e os caminhos de cabos serem colocados na direção perpendicular às escadas, diretamente sobre a superfície da torre, como se pode observar na Figura 2.11.



Figura 2.11 - Diferentes colocações dos caminhos de cabos na torre.

A disposição dos cabos muda consideravelmente com as diferentes torres, não existindo um critério uniforme para a colocação dos mesmos. Na Figura 2.12 apresentam-se alguns exemplos de disposições de cabos em monopolos, no plano das escadas.

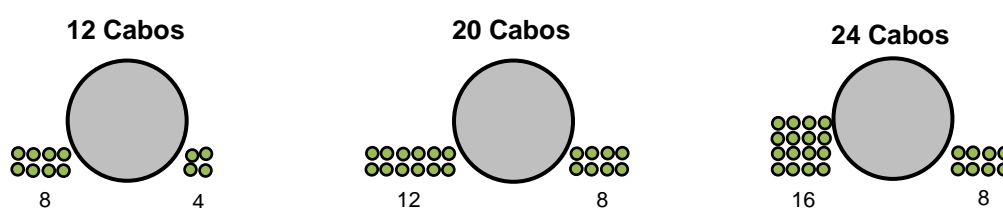


Figura 2.12 - Exemplos de disposições típicas de cabos em torres de telecomunicações.

Para além destes exemplos de disposições de cabos, existem atualmente muitos outros que se podem encontrar nas torres de telecomunicações existentes em Portugal. Se a variedade do número de cabos por torre já é grande, devido ao número de antenas e à quantidade de cabos que cada antena necessita, esta dispersão ainda é mais acentuada devido ao número de diferentes combinações de conjuntos de cabos que se consegue fazer, para o mesmo número de antenas.

2.2.3. Plataformas

Para um fácil acesso às antenas e outros equipamentos acessórios é comum instalar plataformas de trabalho em torres de telecomunicações. Estas plataformas são colocadas em zonas onde a densidade de antenas assim o exija, permitindo que o utilizador se consiga mover com maior liberdade e conforto, num maior raio de ação, e garantindo a sua segurança. As plataformas poderão assim ser colocadas a diferentes níveis, na mesma torre, como pode ser observado na Figura 2.13.



Figura 2.13 - Plataformas de acesso a vários níveis da torre.

As plataformas, em termos genéricos, são compostas por elementos metálicos, com uma base circular porosa, um guarda-joelhos e um corrimão. Em termos de dimensão, as plataformas têm diâmetros entre 1,2 m e 2,0 m e cerca de 1,0 m de altura, e são constituídas por elementos de secção angulosa e circular, com diâmetros geralmente compreendidos entre 20 mm e 25 mm.

É comum a fixação de antenas às plataformas, funcionando não só como base de trabalho mas também como braços de afastamento entre antenas, podendo, no entanto, co-existir com as interfaces, dependendo do afastamento que se pretende para as antenas, e, obviamente, das próprias dimensões da plataforma.

Este equipamento não existe em todas as torres e é mais frequente nos monopólos, enquanto que nas torres treliçadas, devido à facilidade de movimentos entre os elementos da própria estrutura, poderão existir, também a vários níveis, plataformas com a mesma função, a preencher o interior da treliça.

2.2.4. Interfaces de antenas

Para afastar e fixar as antenas às torres, devido a exigências próprias da instalação desses equipamentos, são normalmente utilizadas interfaces, com uma configuração e complexidade que depende sobretudo da quantidade de antenas que se pretende instalar, para uma mesma altura. As interfaces mais simples são constituídas apenas por um braço de afastamento, enquanto que as mais complexas permitem a colocação de múltiplas antenas, em diferentes direções, estando geralmente posicionadas no topo, onde são colocadas mais antenas.



Figura 2.14 - Interface de antenas no topo de uma torre de telecomunicações.

As interfaces de antenas são constituídas por elementos metálicos de secção angular e circular, com diâmetros variáveis entre cerca de 20 mm e 25 mm. Geralmente, para qualquer configuração, verifica-se um afastamento da torre de 1 m a 3 m.

Nas torres treliçadas não é habitual a utilização de interfaces, pois a fixação aos montantes da estrutura garante o afastamento necessário entre as antenas.

Existem diferentes tipos de interfaces de antenas, que variam essencialmente com a quantidade de antenas que suportam. Como já foi visto, os tipos mais simples são colocados a alturas inferiores e os mais complexos no topo da torre, devido à necessidade de colocação de um maior número de antenas nesta zona. A Figura 2.15 mostra alguns exemplos de configurações de interfaces utilizadas no topo das torres.

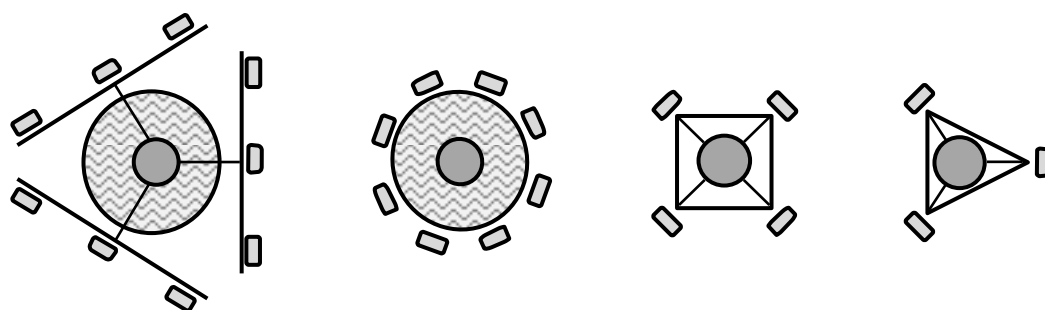


Figura 2.15 - Exemplos de configurações típicas de interfaces de topo, em torres de telecomunicações.

Nos exemplos indicados considera-se a colocação do número máximo de antenas que cada tipo de interface pode albergar; contudo, é frequente encontrar estas interfaces apenas com apenas algumas destas antenas colocadas, não totalizando o máximo possível. Neste caso, as antenas encontram-se geralmente colocadas de forma simétrica e ordenada, de modo a que todas tenham a mesma distância entre si e ao fuste da torre, mas no entanto é óbvio que este facto depende do número de antenas e da própria interface.

É também importante referir que a interface para colocação de antenas pode ser a plataforma de acesso, como é típico no caso da interface circular.

Para além das interfaces exemplificadas, existe uma grande variedade de outras configurações para disposição das antenas, bastando para isso que se juntem braços de afastamento a uma das interfaces previamente referidas. Como se pode observar na Figura 2.16, a uma interface do tipo circular juntaram-se outras estruturas, permitindo a colocação de um maior número de antenas e alterando completamente a disposição típica numa interface deste tipo.



Figura 2.16 - Agrupamento de interfaces no topo de uma torre de telecomunicações, mostrando a complexidade possível nestes elementos.

É também comum encontrar diferenças na disposição das próprias antenas, para a mesma configuração, quer seja pela sua colocação a diferentes níveis, em posições não convencionais ou rodadas de diferentes ângulos. Estes fatores contribuem ainda mais para a variedade já verificada dos diferentes tipos de interfaces que se podem encontrar, não existindo uma uniformização de critérios para a instalação destes equipamentos.

2.2.5. Antenas

Sendo o principal propósito das torres de telecomunicações possibilitar a elevação das antenas a alturas requeridas para o seu perfeito funcionamento, pode-se afirmar que este equipamento é o mais importante neste tipo de estruturas. Esta situação é reforçada pelo facto de todos os outros equipamentos e acessórios serem colocados em função da quantidade, altura de elevação e tipo de antenas que se pretendem instalar numa torre de telecomunicações.

Existem diferentes tipos de antenas de telecomunicações, quanto às suas funções, nomeadamente do tipo UMTS, GSM, Dualband, entre outros.

As antenas do tipo GSM («Groupe Special Mobile» – Sistema Global para Comunicações Móveis) fazem parte do grupo da tecnologia de 2ª geração, em que o sinal e os canais de voz são digitais. O formato destas antenas é tipicamente um painel retangular e são colocadas no topo da torre.

Por sua vez, as antenas do tipo UMTS («Universal Mobile Telecommunication System») pertencem ao grupo de 3ª geração, baseado no grupo GSM de 2ª geração, em tecnologias de comunicação em telemóveis, tendo por norma um formato em painel retangular e sendo colocadas no topo da torre de telecomunicações, à semelhança das antenas do tipo GSM.

O tipo de tecnologia Dualband permite estabelecer ligação de ambos os tipos anteriormente enunciados, GSM e UMTS. As antenas têm geralmente um formato de um painel retangular e são colocadas perto do topo da torre.

Para além dos tipos e das funcionalidades de antenas descritos, existem outros tipos conforme as necessidades e objetivos da telecomunicação pretendida. Assim, as antenas poderão estar colocadas a maiores ou menores alturas, conforme as exigências próprias, e assumir diferentes geometrias para além do formato em painel retangular, como as antenas com forma parabólica, como se pode ver na Figura 2.17.



Figura 2.17 - Diversos tipos de antenas, com diferentes formatos.

3. Ação do vento sobre torres de telecomunicações

3.1. Considerações iniciais

A ação do vento em torres de telecomunicações é, em geral, a ação de dimensionamento condicionante. Tal deve-se a vários fatores, como a altura e a esbelteza das torres e à sua grande exposição ao vento devido à sua colocação em terrenos abertos e de cota elevada.

Em Portugal, a ação do vento sobre as estruturas é definida no Eurocódigo 1, Parte 1-4 (EC1-1-4), que inclui no respetivo Anexo Nacional os valores a adotar para o território português. A ação do vento pode igualmente ser definida segundo a regulamentação anterior, estipulada no Regulamento de Segurança e Acções, em vigor desde 1983.

Neste capítulo descreve-se, o processo de cálculo da ação do vento sobre torres tubulares metálicas de telecomunicações, principalmente para determinar a ação do vento sobre o fuste e sobre os equipamentos instalados na estrutura. O método descrito refere-se apenas a monopolos, não se considerando, além disso, as ações na direção transversal da incidência do vento, tais como o desprendimento de vórtices, o galope e outros efeitos adicionais como a influência das construções vizinhas.

3.2. Força exercida pelo vento sobre torres de telecomunicações

A força exercida pelo vento sobre uma torre de telecomunicações é dada, de forma simplificada, pela soma das forças que atuam em cada componente separado. Assim, a expressão para determinar a força exercida pelo vento sobre o conjunto da construção ou sobre um seu componente, F_w , é a seguinte:

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \quad (3.1)$$

em que:

F_w – Força do vento;

$c_s c_d$ – Coeficiente estrutural;

c_f – Coeficiente de força relativo à construção ou ao elemento de construção;

$q_p(z_e)$ – Pressão dinâmica de pico à altura z_e ;

A_{ref} – Área de referência da construção ou do elemento de construção.

Para aplicar a força que o vento exerce sobre a torre, de forma simplificada, esta pode ser dividida em secções semelhantes, com um comprimento L menor que 6 m. Os coeficientes de força e pressão dinâmica de pico são calculados para a maior cota da secção (z_3), aplicando-se a força do vento a meio da secção (z_2). O coeficiente estrutural ($c_s c_d$) é definido através de um valor único, igual para qualquer secção da torre.

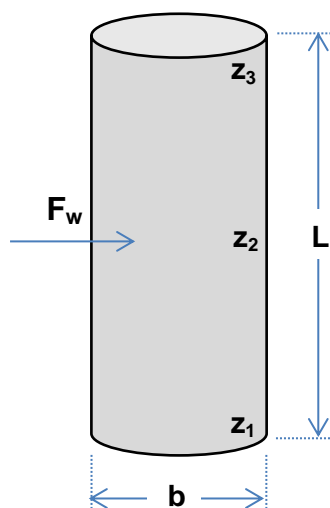


Figura 3.1 - Exemplo de aplicação da força do vento numa secção de comprimento L .

A força exercida pelo vento nos equipamentos (antenas, interfaces, plataformas, escadas e caminhos de cabos) deve também ser calculada. Para elementos singulares existentes a uma dada altura, tais como as antenas, plataformas e interfaces, todos os termos são calculados relativamente a essa altura. No caso de equipamentos colocados ao longo da torre, pode-se adotar um método idêntico ao seguido para a própria torre, ou seja, dividindo esses equipamentos em troços semelhantes e calculando o coeficiente de força e pressão dinâmica de pico da mesma forma.

Seguidamente, vão ser explicitados os métodos de cálculo de cada um dos diferentes parâmetros necessários para o cálculo da força exercida pelo vento sobre uma torre de telecomunicações, respetivamente, pressão dinâmica de pico, coeficiente de força e coeficiente estrutural.

3.2.1. Pressão dinâmica de pico

A pressão dinâmica de pico é o único parâmetro, no cálculo da força exercida pelo vento, que é totalmente independente da estrutura em que atua. A pressão dinâmica de pico, q_p , resulta da velocidade média e das flutuações de curta duração da velocidade do vento, e é calculada através da seguinte expressão:

$$q_p = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) \quad (3.2)$$

em que:

$I_v(z)$ - Intensidade de turbulência à altura z ;

$v_m(z)$ - Velocidade média do vento a uma altura z acima do solo.

ρ - Massa volúmica do ar. Depende da altitude, da temperatura e da pressão atmosférica previstas para a região durante situações de vento intenso, podendo ser tomada igual ao valor recomendado de $1,25 \text{ kg/m}^3$;

Os métodos de cálculo a adotar para os dois primeiros parâmetros, para além da massa volúmica do ar, para a qual deve ser tomado o valor recomendado, são descritos nas secções seguintes.

3.2.1.1. Velocidade média do vento

A velocidade média do vento à altura z acima do solo, $v_m(z)$, depende da rugosidade do terreno, da orografia e do valor de referência da velocidade do vento, e é determinada segundo a expressão:

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b \quad (3.3)$$

em que:

$c_r(z)$ - Coeficiente de rugosidade;

$c_o(z)$ - Coeficiente de orografia;

v_b - Valor de referência da velocidade do vento.

O valor de referência do vento, v_b , deve ser calculado da seguinte forma:

$$V_b = C_{dir} \cdot C_{season} \cdot V_{b,0} \quad (3.4)$$

em que:

C_{dir} - Coeficiente de direção, cujo valor recomendado é igual a 1,0.

C_{season} - Coeficiente de sazão, cujo valor recomendado é igual a 1,0.

$v_{b,0}$ - Valor básico da velocidade de referência do vento.

Para efeitos da quantificação do valor básico da velocidade de referência do vento, $v_{b,0}$, considera-se o País dividido nas duas zonas indicadas no Quadro 3.1, adotando-se os valores referidos neste quadro, de acordo com a informação fornecida no Anexo Nacional do EC1-1-4.

Quadro 3.1 - Zonamento de Portugal quanto à ação do vento.

Zona	Descrição	$v_{b,0}$ [m/s]
A	Generalidade do território, exceto as regiões pertencentes à zona B.	27
B	Arquipélagos dos Açores e da Madeira, e regiões do continente situadas numa faixa costeira com 5 km de largura ou a altitudes superiores a 600 m.	30

O coeficiente de rugosidade, $c_r(z)$, tem em conta a variabilidade da velocidade média do vento no local da construção, em resultado da altura acima do nível do solo e da rugosidade do terreno a barlavento da construção, na direção considerada para o vento, e é calculado do seguinte modo:

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{para } z_{min} \leq z \leq z_{max} \quad (3.5)$$

$$c_r(z) = c_r(z_{min}) \quad \text{para } z \leq z_{min} \quad (3.6)$$

em que:

k_r - Coeficiente de terreno;

z_0 - Comprimento de rugosidade (ver Quadro 3.2);

z_{min} - Altura mínima (ver Quadro 3.2);

z_{max} - Altura máxima. A altura máxima deve ser considerada igual a 200 m.

Os valores do comprimento de rugosidade, z_0 , e altura mínima, z_{\min} , dependem da categoria de terreno e devem ser tomados segundo o Quadro 3.2, retirado do Anexo Nacional do EC1-1-4.

Quadro 3.2 - Categorias de terreno em Portugal quanto à ação do vento.

Categoria	Descrição	z_0 [m]	z_{\min} [m]
I	Zona costeira exposta aos ventos do 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

O coeficiente de terreno, k_r , depende do comprimento de rugosidade e é calculado através da seguinte expressão:

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} \quad (3.7)$$

em que:

z_0 - Comprimento de rugosidade;

$z_{0,II}$ - Comprimento de rugosidade para a categoria de terreno II. O comprimento de rugosidade para a categoria de terreno II é igual 0,05 m.

Nos casos em que, devido à orografia (em colinas e falésias, por exemplo), as velocidades do vento sejam aumentadas em mais de 5%, os efeitos correspondentes deverão ser considerados utilizando o coeficiente de orografia, c_o , sendo este efeito desprezado quando a inclinação do terreno é inferior a 3°. O terreno a barlavento pode ser considerado até uma distância de 10 vezes a altura do acidente orográfico isolado.

Em colinas isoladas ou em cadeia, ou em falésias e escarpas, a velocidade do vento varia em função da inclinação, na direção do vento, da vertente virada a barlavento. A altura H e o comprimento da vertente a barlavento L_u são definidos na Figura 3.2.

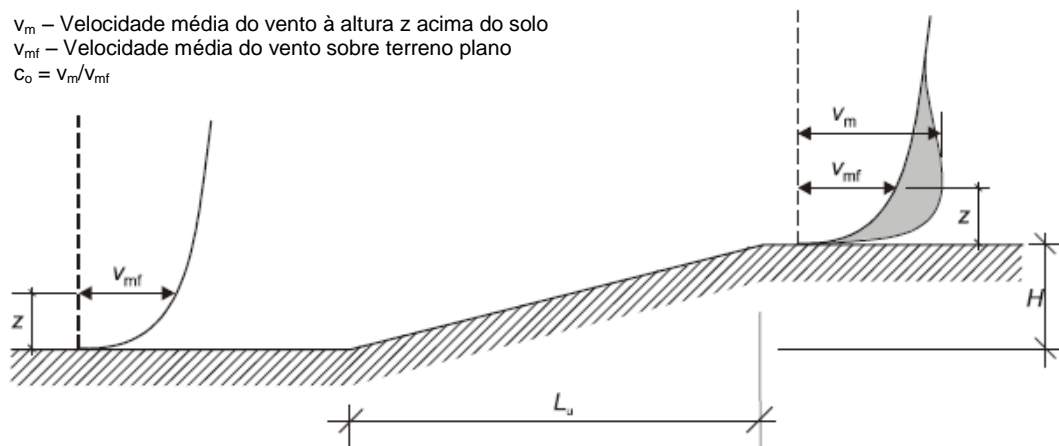


Figura 3.2 - Efeitos da orografia na ação do vento.

De forma simplificada, o cálculo numérico do coeficiente de orografia, c_o , pode ser obtido através das seguintes expressões:

$$c_o = 1 \quad \text{para } \Phi < 0,05 \quad (3.8)$$

$$c_o = 1 + 2 \cdot s \cdot \Phi \quad \text{para } 0,05 < \Phi < 0,3 \quad (3.9)$$

$$c_o = 1 + 0,6 \cdot s \quad \text{para } \Phi > 0,3 \quad (3.10)$$

em que:

s - Coeficiente que tem em conta as dimensões do acidente orográfico;

Φ - Inclinação, na direção do vento, da vertente virada a barlavento.

A inclinação, Φ , na direção do vento, da vertente virada a barlavento é obtida através da seguinte forma:

$$\Phi = \frac{H}{L_u} \quad (3.11)$$

em que:

H - Altura do acidente orográfico;

L_u - Comprimento real, na direção do vento, da vertente virada a barlavento.

O comprimento efetivo da vertente virada a barlavento, L_e , é obtido através do Quadro 3.3, retirado do EC1-1-4.

Quadro 3.3 - Definição do comprimento efetivo da vertente a barlavento.

Tipo de declive ($\Phi = H/L_u$)	
Declive moderado ($0,05 < \Phi < 0,3$)	Declive acentuado ($\Phi > 0,3$)
$L_e = L_u$	$L_e = H/0,3$

em que:

Φ - Inclinação, na direção do vento, da vertente virada a barlavento;

H- Altura efetiva do acidente orográfico;

L_u - Comprimento real, na direção do vento, da vertente virada a barlavento.

O coeficiente s , pode ser determinado graficamente através das Figuras 3.3 e 3.4, ou analiticamente através de expressões próprias.

No caso de uma falésia, com apenas uma vertente virada a barlavento, a análise gráfica do coeficiente s é feita a partir da Figura 3.3.

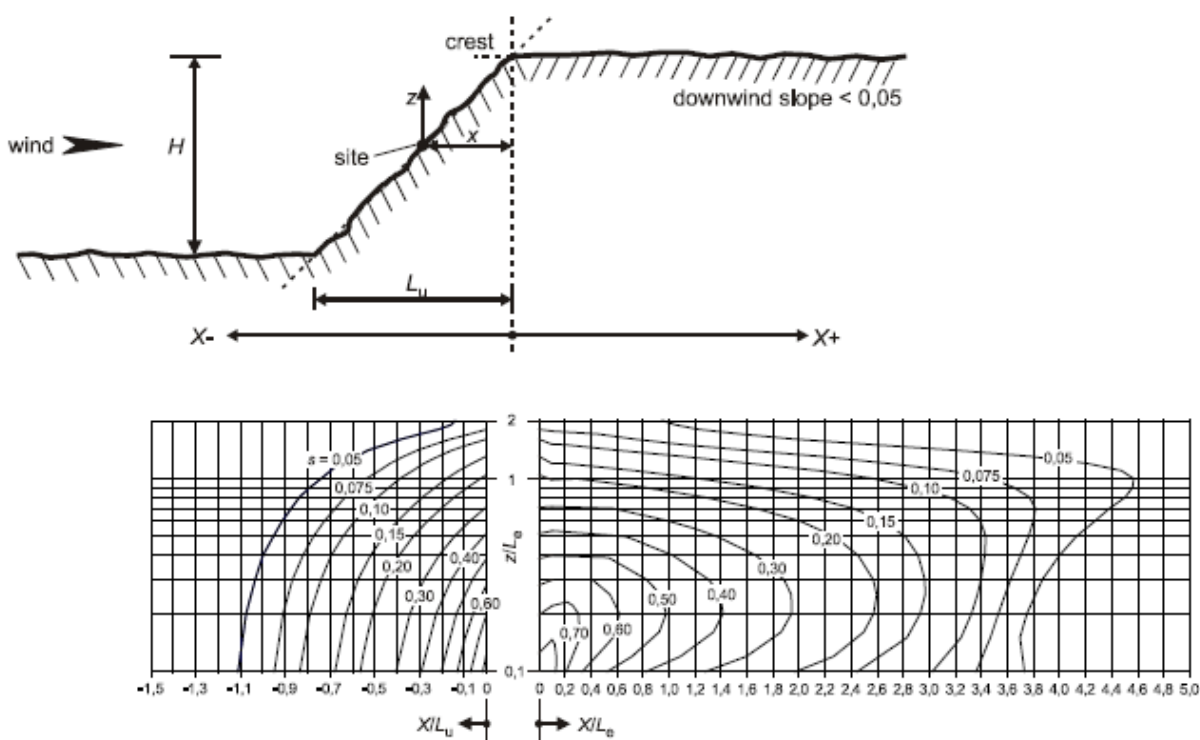


Figura 3.3 - Determinação do coeficiente s , no caso de uma falésia.

em que:

x - Distância horizontal entre o local da construção e o topo da vertente;

L_u - Comprimento real, na direção do vento, da vertente virada a barlavento;

L_e - Comprimento efetivo da vertente virada a barlavento;

z - Distância vertical medida a partir do nível do solo no local considerado.

Se o acidente orográfico for uma colina, com uma vertente virada a barlavento e outra virada a sotavento, o coeficiente s é determinado graficamente através da Figura 3.4.

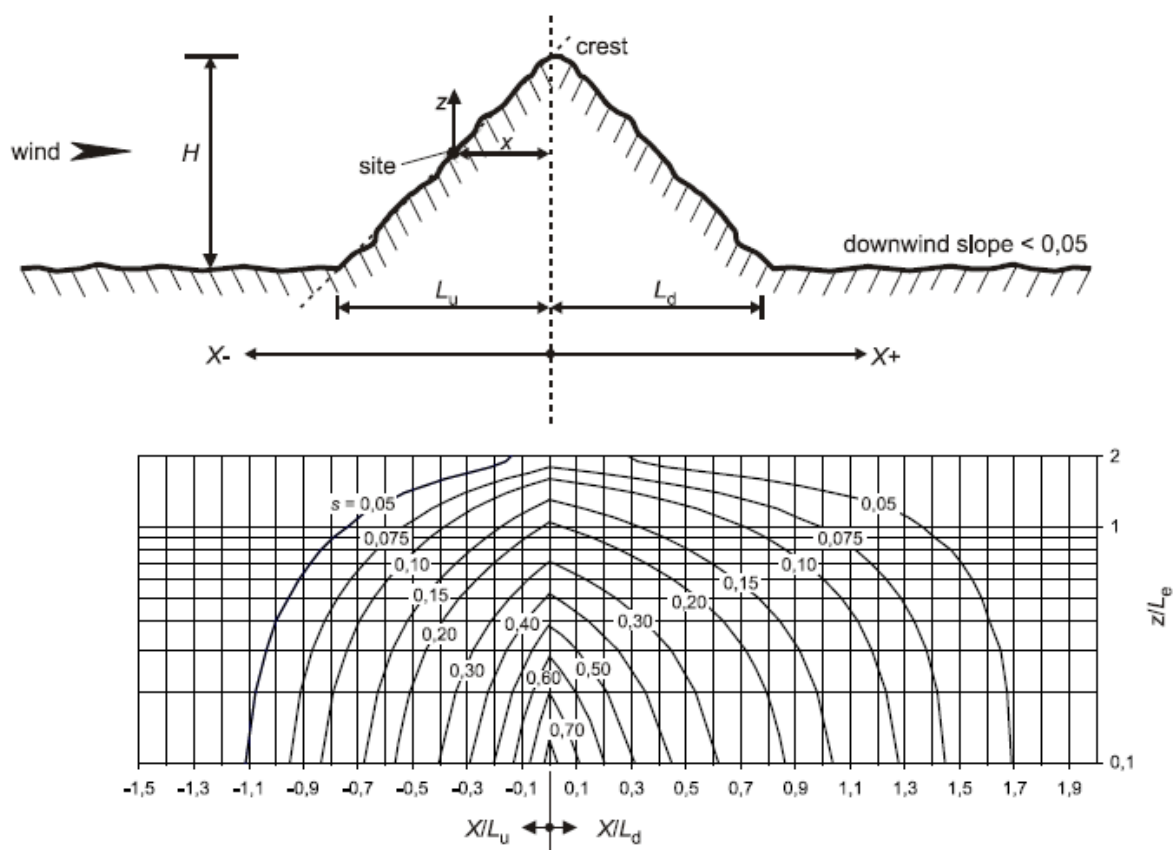


Figura 3.4 - Determinação do coeficiente s , no caso de uma colina.

em que:

x - Distância horizontal entre o local da construção e o topo da vertente;

L_u - Comprimento real, na direção do vento, da vertente virada a barlavento;

L_e - Comprimento efetivo da vertente virada a barlavento;

L_d - Comprimento real, na direção do vento, da vertente virada a sotavento;

z - Distância vertical medida a partir do nível do solo no local considerado.

3.2.1.2. Intensidade de turbulência

A intensidade de turbulência, I_v , que é definida como o quociente entre o desvio padrão da turbulência e a velocidade média do vento, é obtida através das seguintes expressões:

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_I}{c_o(z) \cdot \ln(z/z_0)} \quad \text{para } z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \quad (3.12)$$

$$I_v(z) = I_v(z_{\min}) \quad \text{para } z < z_{\min} \quad (3.13)$$

em que:

σ_v - Desvio padrão da turbulência;

v_m - Velocidade média do vento;

k_I - Coeficiente de turbulência;

c_o - Coeficiente de orografia;

z - Altura acima do solo;

z_0 - Comprimento de rugosidade;

z_{\min} - Altura mínima;

z_{\max} - Altura máxima.

O desvio padrão da turbulência, σ_v , é calculado através da seguinte expressão:

$$\sigma_v = k_r \cdot v_b \cdot k_I \quad (3.14)$$

em que:

k_r - Coeficiente de terreno;

v_b - Valor de referência da velocidade do vento;

k_I - Coeficiente de turbulência, que se considera igual a 1,0.

Todos os restantes parâmetros necessários à determinação da intensidade de turbulência encontram-se definidos na secção anterior, que descreve o método de cálculo da velocidade média do vento.

3.2.2. Coeficientes de força

A interação da ação do vento com as características da superfície em que atua é representada através de um valor que afeta a força do vento, designado de coeficiente de força, que depende essencialmente do tipo de revestimento, geometria e dimensões da superfície.

O Eurocódigo define diversos métodos para determinação dos coeficientes de força, que variam sobretudo em função da forma geométrica do elemento em questão. Assim, nesta secção serão descritos os processos de cálculo que devem ser aplicados aos elementos de uma torre de telecomunicações, tais como o fuste da torre e os equipamentos.

Para além dos coeficientes de força podem também ser obtidos os coeficientes de pressão para um troço da torre, cujo método se encontra igualmente indicado no EC1-1-4. Os coeficientes de pressão são obtidos para o cálculo da pressão exercida pelo vento sobre a torre de telecomunicações. Neste documento apenas são mencionados os métodos de determinação dos coeficientes de força, utilizados no cálculo da força do vento.

3.2.2.1. Fuste da torre de telecomunicações

Como foi já referido, o fuste das torres de telecomunicações tem usualmente uma forma circular ou poligonal, pelo que, segundo o EC1-1-4, o método de cálculo muda conforme a geometria da secção da estrutura.

Para secções poligonais ou circulares a determinação do coeficiente de força, c_f , é feita através da mesma expressão:

$$c_f = c_{f,0} \cdot \Psi_\lambda \quad (3.15)$$

em que:

c_f – Coeficiente de força;

$c_{f,0}$ – Coeficiente de força para elementos estruturais sem livre escoamento em torno das extremidades;

Ψ_λ – Coeficiente de efeitos de extremidade.

O que difere entre os dois tipos de secção é a forma como se obtém o coeficiente de força para elementos estruturais sem livre escoamento em torno das extremidades.

Para uma secção poligonal da torre de telecomunicações, o coeficiente de força para elementos estruturais sem livre escoamento em torno das extremidades, $c_{f,0}$, é obtido através do Quadro 3.4, que consta da secção 7.8 do EC1-1-4.

Quadro 3.4 - Coeficiente de força sem livre escoamento em torno das extremidades, para secções poligonais.

Número de lados	Secções	Condições da superfície e dos cantos	Número de Reynolds	$c_{f,0}$
5	Pentágono	Todas	Todos	1,80
6	Hexágono	Todas	Todos	1,60
8	Octógono	Superfície lisa $r/b < 0,075$	$Re \leq 2,4 \cdot 10^5$	1,45
			$Re \geq 3 \cdot 10^5$	1,30
		Superfície lisa $r/b \geq 0,075$	$Re \leq 2 \cdot 10^5$	1,30
			$Re \geq 7 \cdot 10^5$	1,10
10	Decágono	Todas	Todos	1,30
12	Dodecágono	Superfície lisa cantos arredondados	$2 \cdot 10^5 < Re < 1,2 \cdot 10^6$	0,90
			$Re < 4 \cdot 10^5$	1,30
		Todas as outras condições	$Re > 4 \cdot 10^5$	1,10
16-18	Hexadecágono - Octodecágono	Superfície lisa cantos arredondados	$Re < 2 \cdot 10^5$	Considerar como um cilindro de base circular.
			$2 \cdot 10^5 < Re < 1,2 \cdot 10^6$	0,70

r – Raio de curvatura do canto; b – Diâmetro da circunferência circunscrita; Re – Número de Reynolds

O diâmetro da circunferência circunscrita, b , de uma secção poligonal, é obtido do seguinte modo, como indica a Figura 3.5.

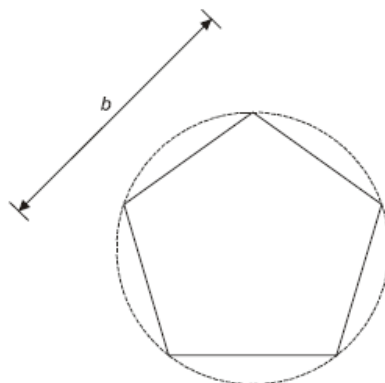


Figura 3.5 - Exemplo de determinação do diâmetro da circunferência circunscrita de uma secção poligonal.

Para a determinação do coeficiente de força em secções poligonais com recurso ao Quadro 3.4, o número de Reynolds, Re , deve ser calculado através da velocidade média do vento, como indicado na seguinte expressão:

$$Re = \frac{b \cdot v_m(z_e)}{\nu} \quad (3.16)$$

em que:

b – Diâmetro da circunferência circunscrita;

$v_m(z_e)$ – Velocidade média do vento à altura z_e ;

ν – Velocidade cinemática do ar ($\nu = 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$).

Quanto às secções circulares, o coeficiente de força para elementos estruturais sem livre escoamento em torno das extremidades, $c_{f,0}$, é obtido através da Figura 3.6, apresentada na secção 7.9.2 do EC1-1-4.

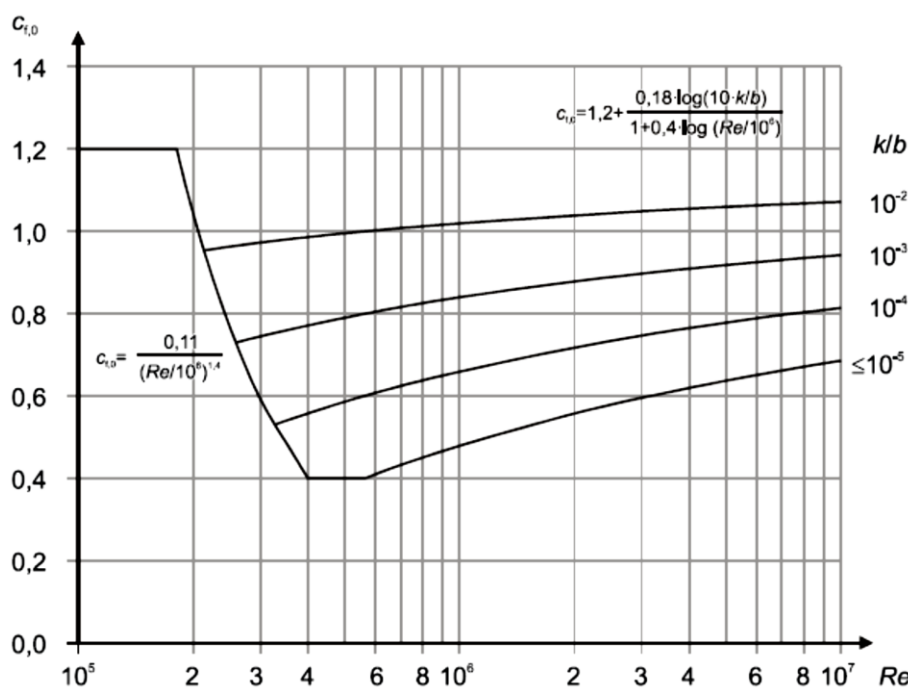


Figura 3.6 - Coeficiente de força sem livre escoamento em torno das extremidades, para secções circulares.

em que:

Re – Número de Reynolds;

k – Rugosidade superficial equivalente;

b – Diâmetro da secção circular.

A rugosidade superficial equivalente, k , depende do tipo de superfície do elemento e é obtida através do quadro seguinte:

Quadro 3.5 - Rugosidade superficial equivalente em função do tipo de superfície.

Tipo de superfície	k [mm]	Tipo de superfície	k [mm]
Vidro	0,0015	Betão liso	0,2
Metal polido	0,002	Madeira aplainada	0,5
Revestimento por pintura liso	0,006	Betão rugoso	1,0
Pintura aplicada à pistola	0,02	Madeira serrada, rugosa	2,0
Aço – Superfície lisa	0,05	Superfície com ferrugem	2,0
Ferro fundido	0,2	Alvenaria de tijolo	3,0
Aço galvanizado	0,2		

O número de Reynolds, Re , para a determinação do coeficiente de força em secções circulares, é obtido através da seguinte forma:

$$Re = \frac{b \cdot v(z_e)}{u} \quad (3.17)$$

em que:

b – Diâmetro da circunferência circunscrita;

$v(z_e)$ – Velocidade de pico do vento à altura z_e ;

ν – Velocidade cinemática do ar ($\nu = 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$).

No caso da determinação dos coeficientes de força em secções circulares através da Figura 3.6 a velocidade de pico, v , deve ser obtida através do seguinte modo:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot q_p}{\rho}} \quad (3.18)$$

em que:

v – Velocidade de pico;

q_p – Pressão dinâmica de pico;

ρ – Massa volúmica do ar ($\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$).

O coeficiente de efeitos de extremidade, Ψ_λ , é obtido do mesmo modo para as secções circulares e poligonais, em função da esbelteza efetiva, λ , e do índice de cheios, φ . Para isso, recorre-se à Figura 3.7, apresentada na secção 7.13 do EC1-1-4.

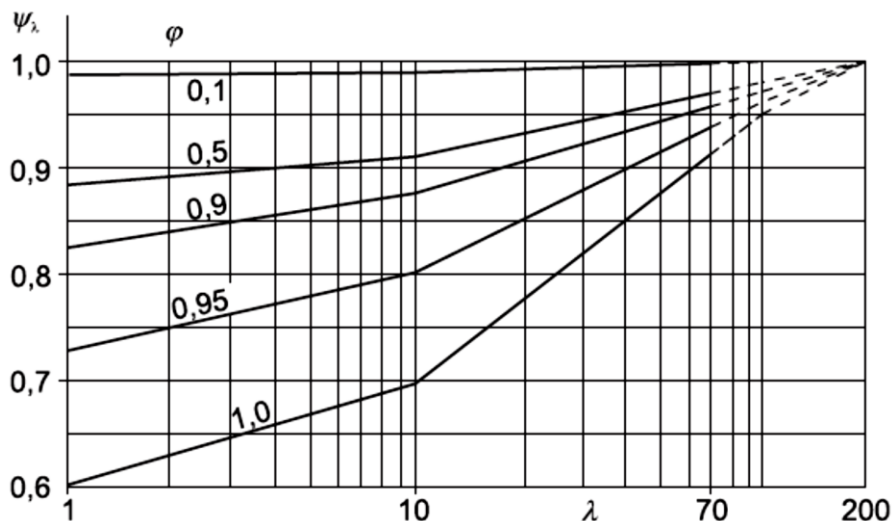


Figura 3.7 - Coeficiente de efeitos de extremidade, Ψ_λ .

O índice de cheios, φ , é determinado através da seguinte expressão, com recurso ao exemplo dado na Figura 3.8.

$$\varphi = \frac{A}{A_c} \quad (3.19)$$

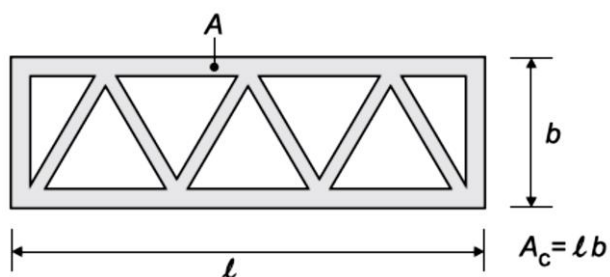


Figura 3.8 - Exemplo de determinação do índice de cheios.

em que:

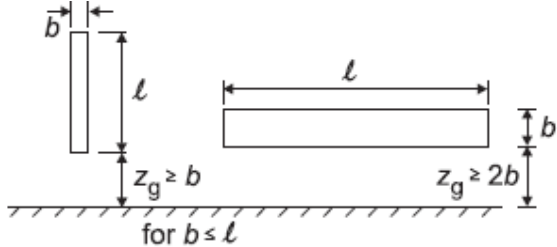
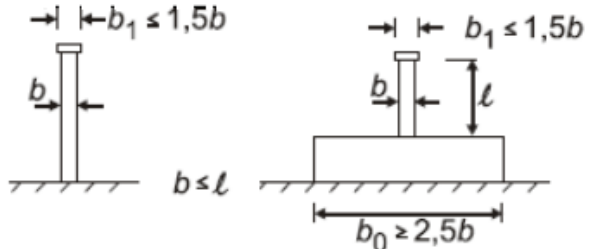
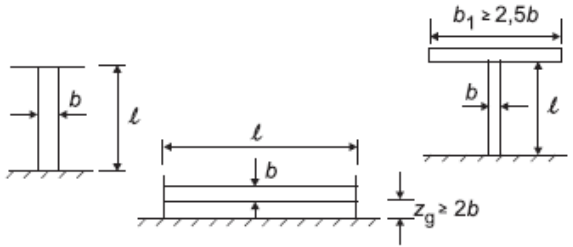
A – Soma das áreas projetadas dos elementos;

A_c – Área limitada pelo contorno exterior ($A_c = l \cdot b$)

Nota: Como no caso das torres tubulares as secções são cheias, a soma das áreas projetadas dos elementos é igual à área limitada pelo contorno exterior ($A=A_c$), o que significa que o índice de cheios é igual a 1,0 em todos os casos de torres tubulares de telecomunicações.

Quanto à esbelteza efetiva, λ , o EC1-1-4 remete a sua determinação para a alínea p) da secção NA.2.3 do Anexo Nacional:

Quadro 3.6 – Influência da posição da estrutura na esbelteza efetiva, λ .

Nº	Posição da estrutura, sendo o vento perpendicular ao plano da figura	Esbelteza efetiva, λ
1		$\lambda = l / b$
2		$\lambda = 2 l / b$
3		$\lambda = \infty$ ($\Psi_\lambda = 1$)

A opção para o caso do fuste de uma torre de telecomunicações recai sobre o 2º caso, pois é o que mais se assemelha ao desta estrutura. O diâmetro b pode ser considerado igual ao diâmetro mínimo, de forma conservativa. Assim, à exceção de outras considerações que se considerem válidas, a esbelteza efetiva, λ , deve ser obtida através da seguinte expressão:

$$\lambda = \frac{2 \cdot l}{b} \quad (3.20)$$

em que:

l – Comprimento da torre;

b – Diâmetro mínimo da torre.

3.2.2.2. Equipamentos

Existem diversos equipamentos numa torre de telecomunicações, com diferentes formas geométricas e disposições relativamente à incidência do vento. Estes fatores influenciam naturalmente a atribuição do valor do coeficiente de força, pelo que os métodos de determinação do mesmo variam conforme as diversas situações.

É comum, no entanto, os fabricantes fornecerem informações sobre o coeficiente de força dos equipamentos. No caso de antenas, geralmente são atribuídos valores da força atuante, segundo diferentes direções, para uma certa velocidade do vento. Neste caso os valores dos coeficientes de força devem ser calculados por retroanálise.

De um modo simples, o processo de **retroanálise** para obtenção do coeficiente de força em antenas, é efetuado do seguinte modo:

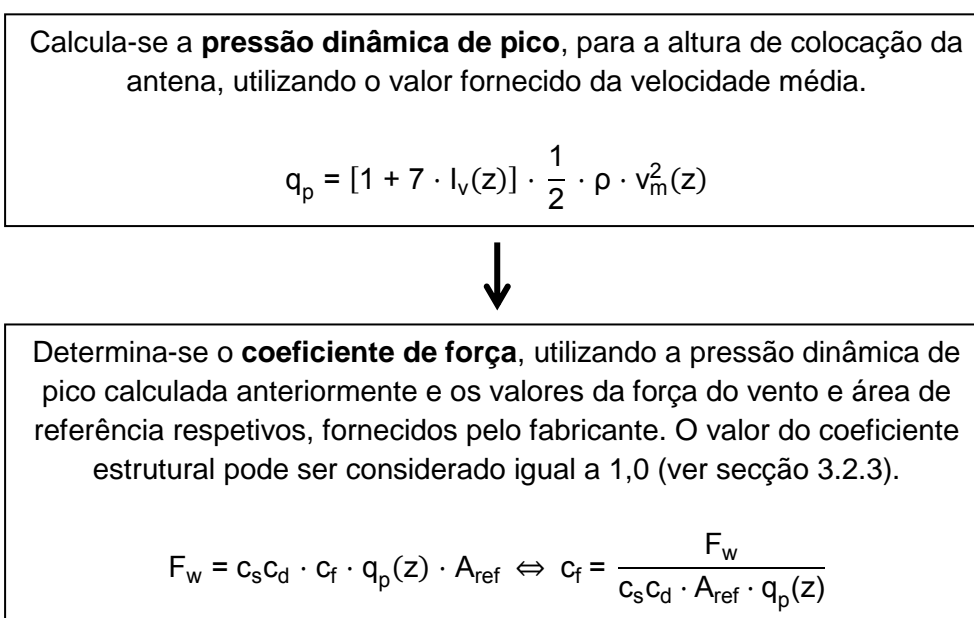


Figura 3.9 - Método para determinação do coeficiente de força em antenas por retroanálise.

No caso de não ser fornecido qualquer informação sobre os coeficientes de força do equipamento, deve-se tentar estimá-lo através dos métodos indicados no EC1-1-4. Conforme a geometria e disposição do equipamento, a norma indica métodos próprios para determinação do coeficiente de força, como referido para a aplicação deste mesmo coeficiente ao fuste da torre de telecomunicações. Seguidamente são descritos alguns métodos recomendados para os vários equipamentos.

As antenas utilizadas nas torres de telecomunicações têm geralmente uma geometria aproximadamente retangular. No caso de o fornecedor não disponibilizar qualquer informação sobre os coeficientes de força, c_f , da antena, estes podem ser obtidos através da secção 7.6 do EC1-1-4, da seguinte forma:

$$c_f = c_{f,0} \cdot \Psi_r \cdot \Psi_\lambda \quad (3.21)$$

em que:

c_f – Coeficiente de força;

$c_{f,0}$ - Coeficiente de força para elementos estruturais sem livre escoamento em torno das extremidades;

Ψ_r – Coeficiente de redução para secções quadradas com cantos arredondados;

Ψ_λ – Coeficiente de efeitos de extremidade.

O coeficiente de força para elementos estruturais sem livre escoamento em torno das extremidades, $c_{f,0}$, para elementos de secção retangular é obtido através da Figura 3.10.

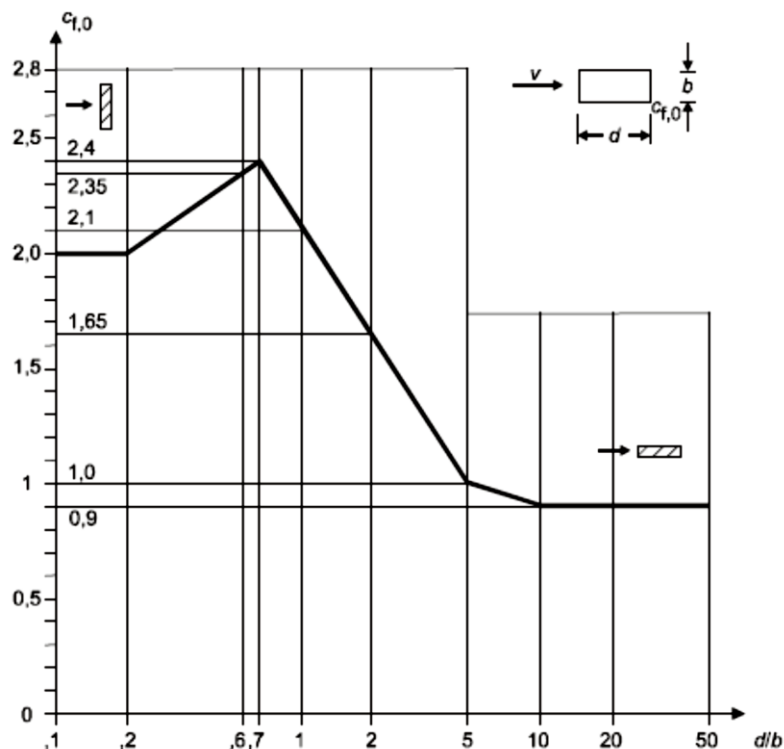


Figura 3.10 - Coeficiente de força sem livre escoamento em torno das extremidades, para secções retangulares.

Para secções quadradas com cantos arredondados, o coeficiente de redução, Ψ_r , obtém-se através da definição do raio de curvatura de canto r , como indicado na Figura 3.11.

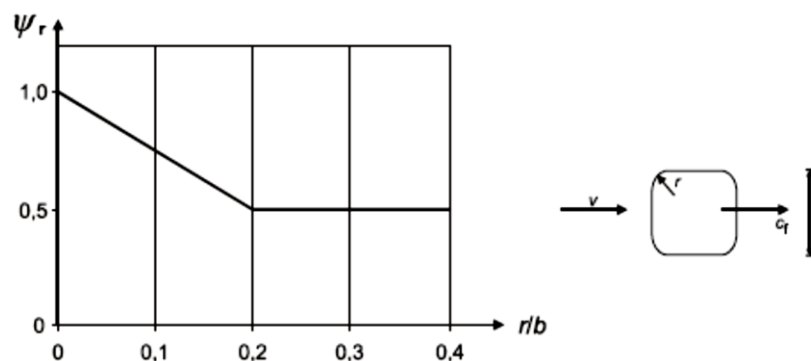


Figura 3.11 - Coeficiente de redução para secções quadradas com cantos arredondados.

No caso das antenas, é comum os cantos da secção serem arredondados, pelo que o coeficiente de força poderá ser influenciado de forma significativa pelo coeficiente de redução, dependendo da relação entre o comprimento da superfície perpendicular à direcção do vento e o raio de curvatura do canto.

Quanto ao coeficiente de efeitos de extremidade, Ψ_λ , utiliza-se o mesmo método descrito na secção anterior, relativamente aos coeficientes de força no fuste da torre de telecomunicações, que remete para o ponto 7.13 do EC1-1-4. No caso das antenas, considera-se o 1º caso (ver Quadro 3.6) para a definição da esbelteza efetiva, λ , sendo que o índice de cheios é constante e de valor unitário.

$$\lambda = \frac{l}{b} \quad (3.22)$$

em que:

l – Altura da antena;

b – Largura da superfície perpendicular à direcção do vento.

No caso de outros equipamentos discretos, como as interfaces e plataformas de trabalho, pode-se utilizar a soma dos efeitos de cada componente, ou seja, procede-se à determinação do coeficiente de força de cada componente isolado e posteriormente à correspondente força atuante do vento. Logo a força total sobre um equipamento deste tipo será o somatório de todas as forças em cada elemento singular.

Quanto aos equipamentos com desenvolvimento linear que se encontram colocados ao longo do comprimento das torres de telecomunicações, como as escadas e os caminhos de cabos, os métodos de determinação dos coeficientes de força são semelhantes aos descritos até agora.

No caso das escadas, pode ser utilizado o mesmo processo de determinação dos efeitos isolados, ou seja, determinando o coeficiente de força para cada elemento singular e somando todas as forças do vento, para a mesma altura.

Quanto aos caminhos de cabos, os mesmos são colocados na estrutura sob a forma de um agrupamento de vários elementos, pelo que para a determinação do coeficiente de força pode ser utilizado o método descrito na secção 7.6 do EC1-1-4 para elementos estruturais de secção retangular.

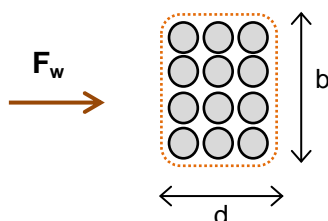


Figura 3.12 - Método para determinação do coeficiente de força em caminhos de cabos.

Como representado na Figura 3.12, os comprimentos das superfícies, respetivamente perpendicular e paralela, à direção do vento são os referentes ao conjunto de cabos, e não a cada elemento singular.

Quanto ao coeficiente de redução, considera-se que os blocos de cabos são arredondados nos cantos. Para o raio de curvatura de canto do grupo considera-se o valor do diâmetro do cabo considerado.

Por último, para a determinação do coeficiente de efeitos de extremidade deve-se considerar o comprimento total do caminho de cabos, recorrendo ao ponto 7.13 do EC1-1-4. Considera-se que os agrupamentos de cabos são blocos impermeáveis ao escoamento do vento, sendo que o índice de cheios é, assim, igual a 1,0, que corresponde a uma secção cheia, em que a soma das áreas projetadas dos elementos é igual à área limitada pelo contorno exterior. Para determinação da esbelteza efetiva pode ser considerado, de forma aproximada, o 2º caso (ver Quadro 3.6), como no exemplo do fuste da torre. Já que os caminhos de cabos se encontram normalmente ao longo de todo o comprimento da torre, toma-se o mesmo caso da determinação da esbelteza efetiva do fuste da torre.

3.2.3. Coeficiente estrutural

O coeficiente estrutural tem em conta o efeito, na ação do vento, da não simultaneidade da ocorrência das pressões de pico sobre a superfície, em conjunto com o efeito das vibrações da estrutura devidas à turbulência.

A determinação do coeficiente estrutural, $c_s c_d$, é realizada através da secção 6.3.1 do EC1-1-4, de acordo com a seguinte expressão:

$$c_s c_d = \frac{1 + 2 \cdot k_p \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 \cdot I_v(z_s)} \quad (3.23)$$

em que:

z_s – Altura de referência para a determinação do coeficiente estrutural;

k_p – Fator de pico;

I_v – Intensidade de turbulência;

B^2 – Coeficiente de resposta quase-estática;

R^2 – Coeficiente de resposta em ressonância.

Para a determinação da altura de referência, z_s , recorre-se igualmente à secção 6.3.1 do EC1-1-4, que estabelece uma expressão para cada situação distinta. De entre as várias opções, a escolhida para descrever a torre de telecomunicações é a correspondente a construções verticais, como se pode ver no exemplo da Figura 3.13.

$$z_s = 0,6 \cdot h \geq z_{\min} \quad (3.24)$$

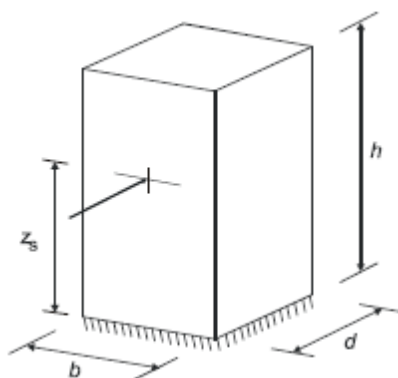


Figura 3.13 - Determinação da altura de referência.

Quanto aos outros parâmetros, segue-se o Anexo B do EC1-1-4, que descreve um procedimento para a determinação do coeficiente estrutural.

O coeficiente de resposta quase-estática, B^2 , que traduz a falta de total correlação das pressões na superfície, é obtido através da seguinte expressão:

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot \left(\frac{b+h}{L(z_s)}\right)^{0,63}} \quad (3.25)$$

em que:

b – Largura da construção;

h – Altura da construção;

$L(z_s)$ – Escala de turbulência à altura de referência z_s .

Em relação ao valor considerado da largura da construção, admite-se, de forma simplificada, o diâmetro exterior da torre à altura de referência z_s . A altura da construção é o comprimento total da torre de telecomunicações.

A escala de turbulência à altura de referência z_s , $L(z_s)$, representa a dimensão média dos turbilhões do vento natural e é calculada através do seguinte modo:

$$L(z_s) = \left(\frac{z_s}{z_t}\right)^\alpha \cdot L_t \quad \text{para } z_s \geq z_{\min} \quad (3.26)$$

$$L(z_s) = L(z_{\min}) \quad \text{para } z_s < z_{\min} \quad (3.27)$$

em que:

z_s – Altura de referência z_s ;

z_t – Altura de referência z_t ($z_t = 200$ m);

α – Parâmetro obtido através de: $\alpha = 0,67 + 0,05 \cdot \ln(z_0)$ (z_0 em metros);

z_{\min} – Altura mínima;

z_0 – Comprimento de rugosidade;

L_t – Escala de referência ($L_t = 300$ m).

O comprimento de rugosidade, z_0 , e a altura mínima, z_{\min} , encontram-se definidos na secção que descreve o método de determinação da pressão dinâmica de pico, sendo estes parâmetros independentes da estrutura.

O coeficiente de resposta em ressonância, R^2 , que descreve o efeito da turbulência em ressonância com o modo de vibração da estrutura considerado, é obtido através da seguinte expressão:

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \cdot \bar{\delta}} \cdot S_L(z_s, n_{1,x}) \cdot R_h(\eta_h) \cdot R_b(\eta_h) \quad (3.28)$$

em que:

$\bar{\delta}$ – Decremento logarítmico total de amortecimento;

S_L – Função de densidade espectral de potência adimensional;

z_s – Altura de referência para a determinação do coeficiente estrutural;

$n_{1,x}$ – Frequência própria da estrutura;

$R_h(\eta_h)$ – Função de admitância aerodinâmica;

$R_b(\eta_h)$ - Função de admitância aerodinâmica.

O valor do decremento logarítmico total de amortecimento, $\bar{\delta}$, relativo ao modo fundamental de flexão da estrutura, é determinado através da seguinte forma:

$$\bar{\delta} = \bar{\delta}_s + \bar{\delta}_a + \bar{\delta}_d \quad (3.29)$$

em que:

$\bar{\delta}_s$ – Decremento logarítmico de amortecimento estrutural;

$\bar{\delta}_a$ – Decremento logarítmico de amortecimento aerodinâmico para o modo fundamental;

$\bar{\delta}_d$ – Decremento logarítmico de amortecimento devido a dispositivos especiais (amortecedores de massa sintonizados (tuned mass dampers), amortecedores de líquido (sloshing tanks), etc).

No caso do decremento logarítmico de amortecimento devido a dispositivos especiais, $\bar{\delta}_d$, como nas torres de telecomunicações não é frequente o recurso a este tipo de equipamentos auxiliares, considera-se o valor do decremento nulo, salvo exceção.

Quanto ao decremento logarítmico de amortecimento aerodinâmico de amortecimento estrutural, $\bar{\delta}_s$, o valor respetivo encontra-se estabelecido em função do tipo

de estrutura. Não existindo nenhum caso aplicado diretamente a torres de telecomunicações, pode ser tomado o valor de 0,012, correspondente a chaminés de aço, com ligações soldadas, sem revestimento interior e sem isolamento térmico exterior.

Em relação ao decremento logarítmico de amortecimento aerodinâmico para o modo fundamental, $\bar{\delta}_a$, o valor respetivo é determinado através da seguinte expressão:

$$\bar{\delta}_a = \frac{c_f(z_s) \cdot \rho \cdot b \cdot v_m(z_s)}{2 \cdot n_{1,x} \cdot m_e} \quad (3.30)$$

em que:

$c_f(z_s)$ – Coeficiente de força para a altura de referência z_s ;

ρ – Massa volúmica do ar ($\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$);

b – Diâmetro da estrutura;

$v_m(z_s)$ – Velocidade média do vento para a altura de referência z_s ;

$n_{1,x}$ – Frequência própria da estrutura;

m_e – Massa equivalente por unidade de comprimento.

A determinação dos valores do coeficiente de força e da velocidade média do vento, para a altura de referência z_s , é efetuada segundo os métodos descritos na secção referente à pressão dinâmica de pico.

Quanto à frequência própria da estrutura, $n_{1,x}$, o EC1-1-4 fornece um método para a sua determinação. O valor pode ser determinado por outros métodos, como o recurso a programas de cálculo automático.

Para a determinação da massa equivalente por unidade de comprimento, m_e , pode ser utilizada a seguinte expressão:

$$m_e = \frac{\int_0^l m(s) \cdot \Phi_1^2(s) \, ds}{\int_0^l \Phi_1^2(s)} \quad (3.31)$$

em que:

Φ_1 – Modo fundamental de flexão;

$m(s)$ – Massa por unidade de comprimento.

No entanto, para a determinação da massa equivalente por unidade de comprimento, m_e , pode ser utilizado um método simplificado. Dividindo a estrutura em vários segmentos de igual comprimento, pode-se fazer o quociente entre os somatórios das duas parcelas da expressão da massa equivalente por unidade de comprimento.

Por conveniência, também se pode agregar o valor do diâmetro no cálculo da massa equivalente, o que dispensa o mesmo da expressão da massa equivalente, utilizada no cálculo do decremento logarítmico de amortecimento aerodinâmico para o modo fundamental. Este passo é fundamental para uma aproximação mais correta do valor do decremento, pois é frequente que nas torres de telecomunicações o diâmetro varie com a altura.

Assim, para a determinação da massa equivalente, m_e , pode ser utilizada a seguinte expressão:

$$m_e = \frac{\sum (m_i \cdot \Phi_i^2)}{\sum (\Phi_i^2)} \quad (3.32)$$

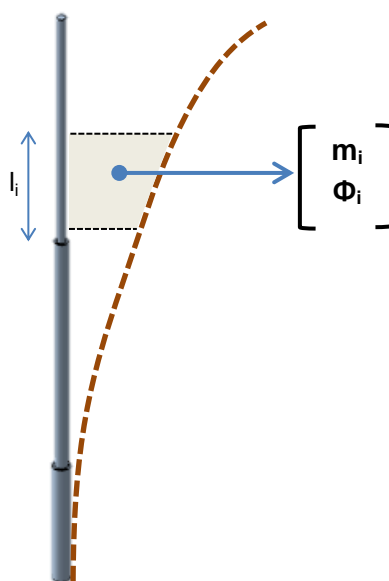


Figura 3.14 - Exemplo de determinação da massa equivalente num troço da estrutura.

em que:

m_i – Massa por unidade de comprimento do segmento i ;

Φ_i - Modo fundamental de flexão do segmento i .

A massa por unidade de comprimento para um segmento i , m_i , calcula-se a partir da seguinte expressão. O diâmetro de cada segmento é incluído na expressão de forma a simplificar o cálculo, pelas razões acima referidas. Deve-se ter em conta a massa dos equipamentos e da estrutura, de forma a se obter uma melhor aproximação do valor.

$$m_i = \frac{m_{t,i}}{l_i \cdot b_i} \quad (3.33)$$

em que:

$m_{t,i}$ – Massa total no segmento i ;

l_i – Comprimento do segmento i ;

b_i – Diâmetro médio do segmento i .

Para determinação do modo fundamental de flexão de um segmento i , Φ_i , procede-se à determinação da área formada pela deformada da estrutura correspondente ao primeiro modo de vibração. Pode-se considerar, de forma simplificada, a deformada como linear, o que torna o cálculo da área mais fácil. Se forem considerados troços de pequeno comprimento o efeito do erro induzido por esta aproximação é reduzido.

A função de densidade espectral de potência adimensional, $S_L(z_s, n_{1,x})$, exprime a distribuição da energia do vento em frequência, através do seguinte modo:

$$S_L(z_s, n_{1,x}) = \frac{6,8 \cdot f_L(z_s, n_{1,x})}{(1 + 10,2 \cdot f_L(z_s, n_{1,x}))^{5/3}} \quad (3.34)$$

em que:

f_L – Frequência adimensional;

z_s – Altura de referência z_s ;

$n_{1,x}$ – Frequência própria da estrutura.

A frequência adimensional, $f_L(z_s, n_{1,x})$, é função da altura de referência z_s e da frequência própria da estrutura $n_{1,x}$, sendo obtida pela seguinte expressão:

$$f_L(z_s, n_{1,x}) = \frac{n_{1,x} \cdot L(z_s)}{v_m(z_s)} \quad (3.35)$$

em que:

$n_{1,x}$ – Frequência própria da estrutura.

$L(z_s)$ – Escala de turbulência à altura de referência z_s .

$v_m(z_s)$ – Velocidade média à altura de referência z_s .

As funções de admitância aerodinâmica, R_h e R_b , para uma configuração de modo fundamental, são calculadas através das seguintes expressões:

$$R_h = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2 \cdot \eta_h^2} \cdot (1 - e^{-2 \cdot \eta_h}) \quad \text{com } R_h=1,0 \text{ se } \eta_h=0 \quad (3.36)$$

$$R_b = \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2 \cdot \eta_b^2} \cdot (1 - e^{-2 \cdot \eta_b}) \quad \text{com } R_b=1,0 \text{ se } \eta_b=0 \quad (3.37)$$

Os dois parâmetros, η_h e η_b , necessários ao cálculo das funções de admitância, R_h e R_b , são obtidos da seguinte forma:

$$\eta_h = \frac{4,6 \cdot h}{L(z_s)} \cdot f_L(z_s, n_{1,x}) \quad (3.38)$$

$$\eta_b = \frac{4,6 \cdot b}{L(z_s)} \cdot f_L(z_s, n_{1,x}) \quad (3.39)$$

em que:

h – Comprimento da estrutura. Considera-se a altura total da torre;

b – Diâmetro da estrutura. Considera-se o diâmetro na secção à altura z_s ;

$L(z_s)$ – Escala de turbulência à altura de referência z_s ;

$f_L(z_s, n_{1,x})$ – Frequência adimensional.

Por último, o fator de pico, k_p , é definido como o quociente entre o valor máximo da parte flutuante da resposta e o desvio padrão desta e é igual ao valor máximo entre o obtido através da próxima expressão e o valor 3,0.

$$k_p = \sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)}} \quad \text{ou} \quad k_p = 3,0 \quad (3.40)$$

em que:

v – Frequência de passagens ascendentes;

T – Duração da integração da velocidade média do vento ($T = 600$ s).

A frequência de passagens ascendentes, v , é obtida através da seguinte expressão, não devendo ser menor que 0,08 Hz.

$$v = n_{1,x} \cdot \sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}} \quad \text{com} \quad v \geq 0,08 \text{ Hz} \quad (3.41)$$

em que:

$n_{1,x}$ – Frequência própria da estrutura;

R^2 – Coeficiente de resposta em ressonância;

B^2 - Coeficiente de resposta quase-estática.

O método de determinação dos parâmetros necessários para o cálculo da frequência de passagens ascendentes, v , como a frequência própria da estrutura, $n_{1,x}$, e os coeficientes de resposta em ressonância, R^2 , e quase-estática, B^2 , encontram-se referidos anteriormente, neste mesmo capítulo.

No caso dos equipamentos, o valor do coeficiente estrutural pode ser considerado igual a 1,0, para qualquer tipo de equipamento e em qualquer situação.

4. Estudo da ação do vento em torres de telecomunicações

A ação do vento sobre uma torre de telecomunicações, segundo o Eurocódigo 1, Parte 1-4 (EC1-1-4), depende de vários parâmetros que traduzem a localização da estrutura e condições do terreno, e a geometria dos elementos, entre outros. Cada um destes parâmetros tem influência na ação global do vento sobre a estrutura. O objetivo deste estudo é analisar o modo como a variação de cada parâmetro, de forma isolada, influencia a ação do vento. Os diferentes parâmetros e respetivas análises são indicados no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 - Análises a realizar no âmbito do estudo da ação do vento em torres de telecomunicações.

Análise	Parâmetros
Pressão dinâmica de pico	Tipo de zona; Tipo de terreno; Orografia
Características da torre	Altura; Tipo de secção.
Equipamentos	Antenas; Interfaces; Caminhos de cabos; Escadas

O estudo paramétrico da ação do vento em torres de telecomunicações vai ser dividido em três partes principais, sobre a pressão dinâmica de pico, onde se estuda a ação isolada do vento, sobre as características da torre e sobre os equipamentos que normalmente se encontram neste tipo de estruturas. Em cada uma destas partes abordam-se diferentes questões relevantes, relacionadas com os parâmetros descritos.

Em cada uma das análises efetuadas são calculados os esforços atuantes na estrutura, bem como deslocamentos e rotações, e comparadas as influências dos parâmetros estudados nos resultados obtidos. Em particular, são determinados os valores máximos do esforço transversal (V_0) e do momento fletor (M_0), que ocorrem na base da torre, e o deslocamento horizontal (u_1) e a rotação (θ_1) no topo da torre. Estes cálculos são efetuados para vários modelos de torres de telecomunicações, com disposições típicas de equipamentos e de antenas, para se compreender a influência global de cada parâmetro.

4.1. Descrição dos modelos de torres

Para o estudo da ação do vento em torres de telecomunicações consideram-se quatro modelos de torres metálicas, com diferentes características, constituídas por troços tubulares, representativos de torres reais existentes. Estes quatro modelos consistem em duas torres, com 30 m e 40 m de altura, constituídas por troços de tronco cilíndrico e secção transversal circular, e em duas outras torres, também com 30 m e 40 m de altura, constituídas por troços de tronco cónico e secção transversal poligonal.

4.1.1. Modelo A

O modelo A consiste numa torre tubular metálica (monopolo), composta por três troços de tronco cilíndrico, com secção transversal circular oca e comprimentos de 6 m, 12 m e 12 m, respetivamente, perfazendo uma altura total de 30 m. Todos os troços têm dimensões constantes ao longo do seu comprimento: o primeiro troço tem 812,8 mm de diâmetro e 7,92 mm de espessura, o segundo troço tem 609,6 mm de diâmetro e 7,92 mm de espessura, e o terceiro troço tem 406,4 mm de diâmetro e 6,35 mm de espessura.

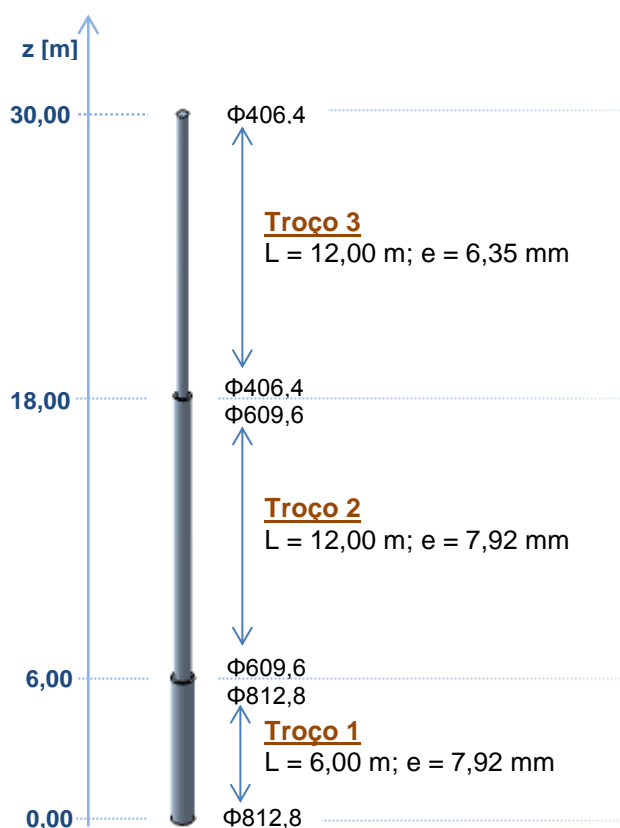


Figura 4.1 - Representação da torre correspondente ao modelo A.

4.1.2. Modelo B

A torre correspondente ao modelo B é composta por quatro troços metálicos de tronco cilíndrico, com comprimentos de 6 m, 12 m, 12 m e 10 m, respetivamente, perfazendo uma altura total de 40 m. Tal como no modelo A, todos os troços têm dimensões constantes ao longo do seu comprimento: o primeiro troço tem um diâmetro de 1016,0 mm e 9,52 mm de espessura, o segundo troço tem um diâmetro de 812,8 mm e 7,92 mm de espessura, o terceiro troço tem 609,6 mm de diâmetro e 7,92 mm de espessura e o quarto troço tem um diâmetro de 406,4 mm e 6,35 mm de espessura.

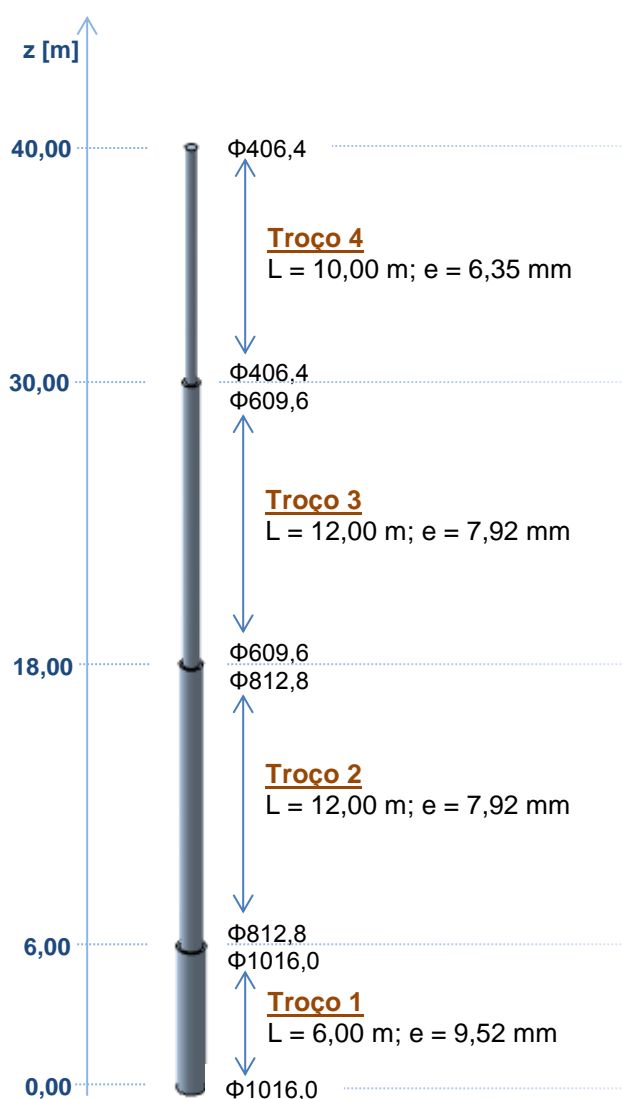


Figura 4.2 - Representação da torre correspondente ao modelo B.

4.1.3. Modelo C

O modelo C consiste numa torre tubular metálica de tronco cónico, e é formada por três troços com comprimentos de 6 m, 12 m e 12 m, respetivamente, perfazendo uma altura total de 30 m. A secção transversal dos troços da torre é hexadecagonal (ou seja, é constituída por um polígono de 16 faces) e o diâmetro da respetiva circunferência circunscrita varia linearmente ao longo do seu comprimento. No primeiro troço, este diâmetro varia entre 990,0 mm e 852,0 mm, sendo a sua espessura constante e igual a 6,00 mm; no segundo troço o diâmetro varia entre 852,0 mm a 576,0 mm, sendo a sua espessura constante e igual a 5,00 mm; no terceiro troço, o diâmetro varia entre 576,0 mm e 300,0 mm, e a espessura é constante e igual a 4,00 mm.

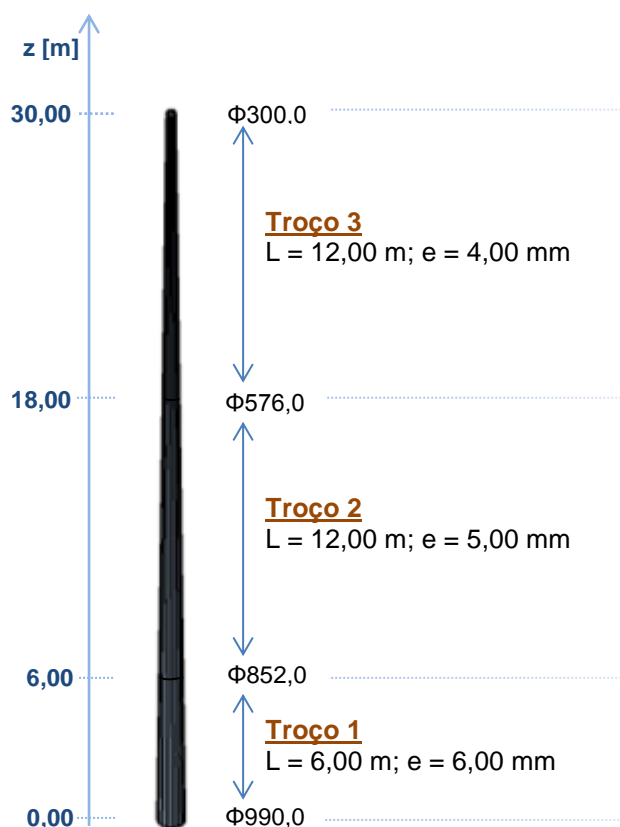


Figura 4.3 - Representação da torre correspondente ao modelo C.

4.1.4. Modelo D

O modelo D é um monopolo composto por 6 troços metálicos de comprimentos de 5,75 m, 5,75 m, 6,50 m, 7,00 m, 7,50 m e 7,50 m, respetivamente. À semelhança da torre representada pelo modelo C, os troços que compõem a torre têm um formato cónico e espessura constante. Todos os troços têm secção poligonal com 16 faces, tendo o primeiro troço diâmetro variável de 1304,0 a 1173,0 mm, o segundo troço de 1173,0 a 1044,0 mm, o terceiro troço de 1044,0 a 897,0 mm, o quarto troço de 897,0 a 739,0 mm, o quinto troço de 739,0 a 569,0 mm e o sexto troço de 569,0 a 400,0 mm. Os três primeiros troços têm espessura constante de 6,00 mm, o quarto troço tem espessura de 5,00 mm e os dois últimos troços espessura de 4,00 mm.

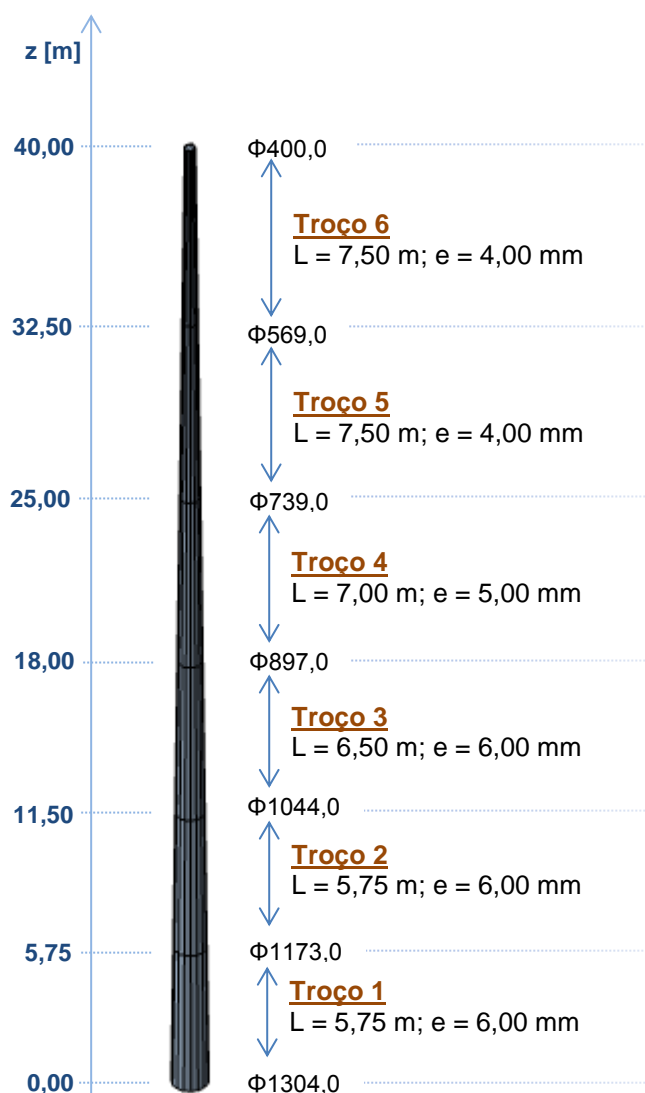


Figura 4.4 - Representação da torre correspondente ao modelo D.

4.2. Estudo da influência da pressão dinâmica de pico

A pressão dinâmica de pico é um dos fatores que influencia de forma direta o cálculo da força do vento que atua sobre a estrutura.

Cada uma das variáveis que entram no cálculo da pressão dinâmica de pico é influenciada por três parâmetros: i) o tipo de zona, ii) a categoria de terreno em que a estrutura se encontra localizada, e efeito agravante de um iii) acidente orográfico, se a torre estiver sob a influência do mesmo.

Visto o tipo de zona e a categoria do terreno terem de ser obrigatoriamente definidos, estes parâmetros vão ser estudados em conjunto. O estudo da influência da orografia é estudado em capítulo próprio, pois só é aplicável em situações pontuais.

4.2.1. Estudo da influência da zona/terreno

A definição do tipo de zona e da categoria de terreno em que se encontra a torre de telecomunicações influencia o valor da pressão dinâmica do vento, que varia em função da altura em relação ao solo.

Como foi visto no terceiro capítulo, de acordo com o EC1-1-4 existem, em território português duas zonas, do tipo A e B, que dependem sobretudo da altitude e da distância à costa marítima, e quatro tipos de terreno, da categoria I, II, III e IV, que dependem da rugosidade do terreno e da oposição ao escoamento do vento na referida superfície. A definição do tipo de zona estabelece o valor básico de referência do vento, enquanto a definição da categoria do terreno determina os valores do comprimento de rugosidade e da altura mínima, para caracterização do terreno em questão.

O objetivo desta secção é compreender a influência que a variação destes dois parâmetros tem nos valores dos esforços na base, e deslocamento e rotação no topo da estrutura. Para isso, são tomadas em conta todas as combinações possíveis de tipos de zona e de categorias de terreno onde uma torre de telecomunicações poderá estar instalada.

Os casos estudados são indicados no Quadro 4.2. Para melhor compreensão das diferenças entre si, dão-se exemplos reais de localizações que cumprem os requisitos de cada situação.

Quadro 4.2 - Situações consideradas para o estudo da influência da zona/terreno.

Situação		Descrição
Zona	Terreno	
A	IV	Leiria, a 19 km da costa e 50 m de altitude, em local rodeado de edifícios com mais de 15 m de altura.
A	III	Torres Vedras, a 10 km da costa e cota 150 m, em zona suburbana com cobertura constante de edifícios baixos.
A	II	Évora, a 85 km da costa e 253 m de altitude, em zona com vegetação rasteira e edifícios com boa distância entre si.
B	IV	Porto, a 4,5 km da costa e 90 m de altitude em local circundado por edifícios com altura superior a 15 m.
B	III	Bragança, a 176 km da costa e a 670 m de altitude, em zona suburbana, rodeada por edifícios de pouca altura.
B	II	Vila Pouca de Aguiar, a 95 km da costa e 750 m de altitude, em local com vegetação rasteira e edifícios distanciados.
B	I	Sagres, a poucos metros da faixa costeira a 30 m de altitude, em zona exposta aos ventos marítimos.

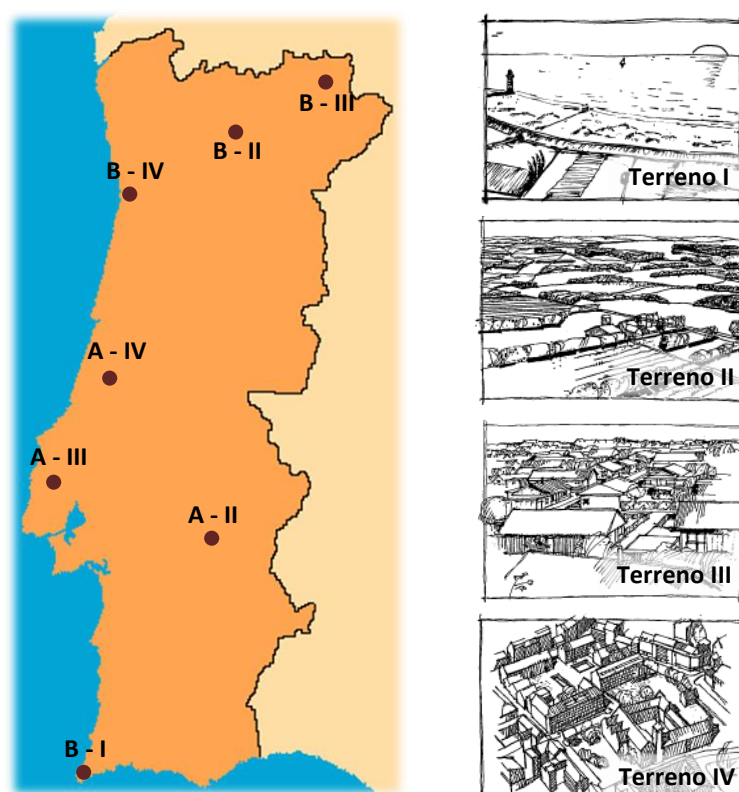


Figura 4.5 - Localização das situações consideradas para o estudo da influência da zona/terreno.

Para além das 7 situações que foram definidas, existiria ainda o caso de um local situado em zona A e terreno de categoria I, que foi ignorado pois as duas condições são

incompatíveis. Como a categoria de terreno I prevê que a estrutura se encontre numa zona costeira exposta aos ventos de mar e a zona do tipo A obriga a uma localização a mais de 5 km da costa marítima, esta situação é impossível, significando que este caso não existe.

Os resultados da variação dos valores máximos dos esforços, deslocamento e rotação para o modelo B são a seguir apresentados. Esta variação consiste no acréscimo destes valores em relação à situação de referência, correspondente a uma estrutura localizada numa zona do tipo A e num terreno da categoria IV, que corresponde à menor ação do vento. Os resultados obtidos para os restantes modelos e o cálculo detalhado de cada situação são apresentados no Apêndice I.

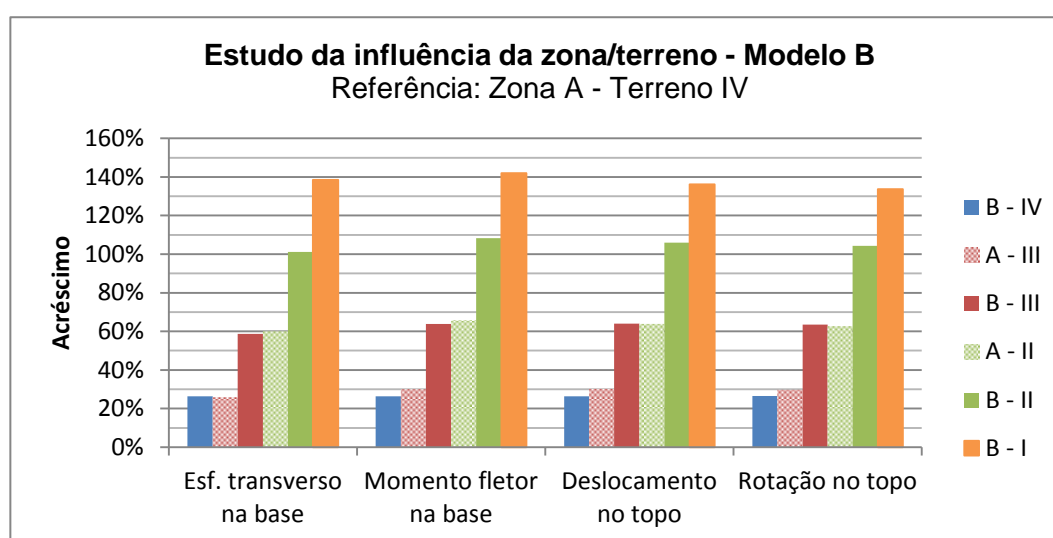


Gráfico 4.1 – Variação com o tipo de zona e a categoria de terreno, no modelo B.

Quadro 4.3 - Variação com o tipo de zona e a categoria de terreno, no modelo B.

Estudo da influência da zona/terreno - Modelo B								
Zona - Terreno	Esf. transverso na base		Momento fletor na base		Deslocamento no topo		Rotação no topo	
	V_0 [kN]	ΔV_0	M_0 [kNm]	ΔM_0	u_1 [m]	Δu_1	θ_1 [rad]	$\Delta \theta_1$
A - IV	14,91	-	271,64	-	0,266	-	0,011	-
B - IV	18,84	26%	343,39	26%	0,336	26%	0,014	26%
A - III	18,77	26%	353,14	30%	0,346	30%	0,014	30%
B - III	23,66	59%	445,08	64%	0,436	64%	0,018	64%
A - II	23,86	60%	450,15	66%	0,436	64%	0,018	63%
B - II	29,99	101%	565,72	108%	0,548	106%	0,023	104%
B - I	35,57	139%	657,21	142%	0,628	136%	0,026	134%

Como é possível constatar, a alteração do tipo de zona e da categoria de terreno são fatores importantes na ação do vento. Analisando os resultados obtidos para a torre representada pelo modelo B, podemos verificar que a situação mais grave, que corresponde a uma localização da estrutura numa zona do tipo B e terreno da categoria I, implica um aumento entre 139% a 142% dos valores máximos do esforço transversal, deslocamento e rotação em relação à situação de referência. Este facto, por si só, atesta a importância que estes parâmetros têm no projeto de estruturas deste tipo. Quanto aos resultados obtidos para os restantes modelos, verifica-se igualmente a relevância do acréscimo, sendo que nas torres mais baixas a variação em relação à situação de referência é ainda maior.

Um aspeto que importa salientar é o facto das consequências da escolha da categoria de terreno serem praticamente idênticas às da escolha do tipo de zona em que se encontra a estrutura. Quer isto dizer que a variação da ação do vento é aproximadamente igual quando se altera a categoria de terreno para um local mais amplo ou quando se muda o tipo de zona, para um local situado na zona B, acima dos 600 m de altitude ou numa faixa de 5 km da costa marítima.

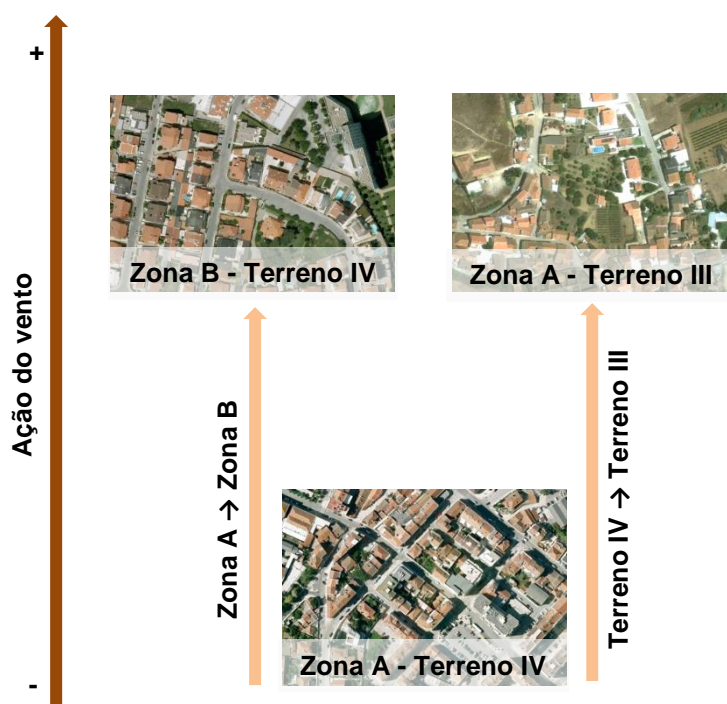


Figura 4.6 - Exemplo da variação da ação do vento com a alteração do tipo de zona e da categoria de terreno.

Utilizando um exemplo prático, verifica-se que no caso de a torre se encontrar situada numa zona do tipo A e num terreno da categoria IV, ou seja, a mais de 5 km da costa marítima e a menos de 600 m de altitude, em terreno rodeado de obstáculos com mais

de 15 m de altura, o acréscimo da ação do vento é praticamente igual se a mesma estrutura for colocada numa zona do tipo B e terreno IV, a menos de 5 km da faixa costeira ou a mais de 600 m de altitude em local rodeado de obstáculos com mais de 15 m de altura, ou se a estrutura for colocada numa zona do tipo A mas com terreno da categoria III, ou seja, a mais de 5 km da costa e a menos de 600 m de altitude, mas num terreno mais amplo, por exemplo, numa zona suburbana.

Com o intuito de averiguar em termos quantitativos a alteração do tipo de zona e da categoria de terreno, estudam-se os acréscimos, em termos médios entre todas as situações consideradas para a localização da torre de telecomunicações.

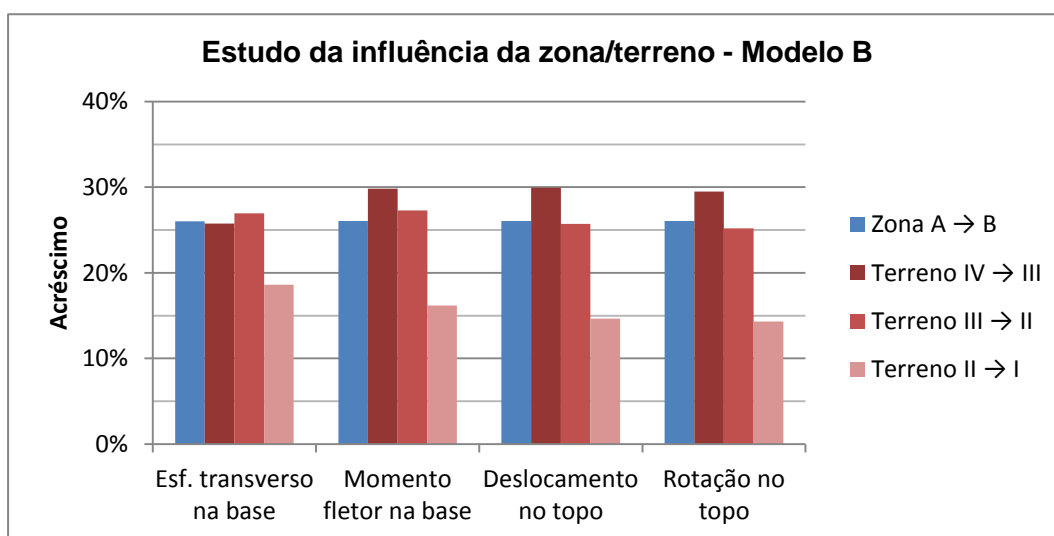


Gráfico 4.2 - Variação média com tipo de zona e a categoria de terreno, no modelo B.

Quadro 4.4 - Variação média com tipo de zona e a categoria de terreno, no modelo B.

Estudo da influência da zona/terreno - Modelo B				
Situação	ΔV_0	ΔM_0	Δu_1	$\Delta \theta_1$
Zona A → B	26%	26%	26%	26%
Terreno IV → III	26%	30%	30%	30%
Terreno III → II	27%	27%	26%	25%
Terreno II → I	19%	16%	15%	14%

É possível observar que a variação média para a alteração da categoria de terreno é aproximadamente igual à variação média para a alteração do tipo de zona, de A para B, exceto na passagem da categoria de terreno II para I.

Em relação aos resultados obtidos para a alteração do tipo de zona, verifica-se que em termos médios, para qualquer categoria de terreno considerado, a variação do tipo A para o tipo B implica um acréscimo de cerca de 26%, para todos os parâmetros. Quanto ao

tipo de terreno, a variação é diferente, conforme a alteração considerada. Observa-se que, mantendo o mesmo tipo de zona, na passagem de um terreno da categoria IV para a categoria III se verifica um acréscimo entre 26% a 30%; da categoria III para a categoria II verifica-se um aumento de 25% a 27%; finalmente, verifica-se um acréscimo entre 14% a 19%, na alteração da categoria II para a categoria I.

Para além dos resultados referentes à variação dos valores máximos dos esforços, deslocamento e rotação, é importante compreender quais são os parâmetros que provocam um aumento da ação do vento, neste caso, através da alteração da pressão dinâmica de pico. Como foi visto no terceiro capítulo, a definição da pressão dinâmica de pico depende de muitos parâmetros, que se relacionam entre si. O objetivo é compreender que parâmetros variam com a mudança do tipo de zona e terreno.

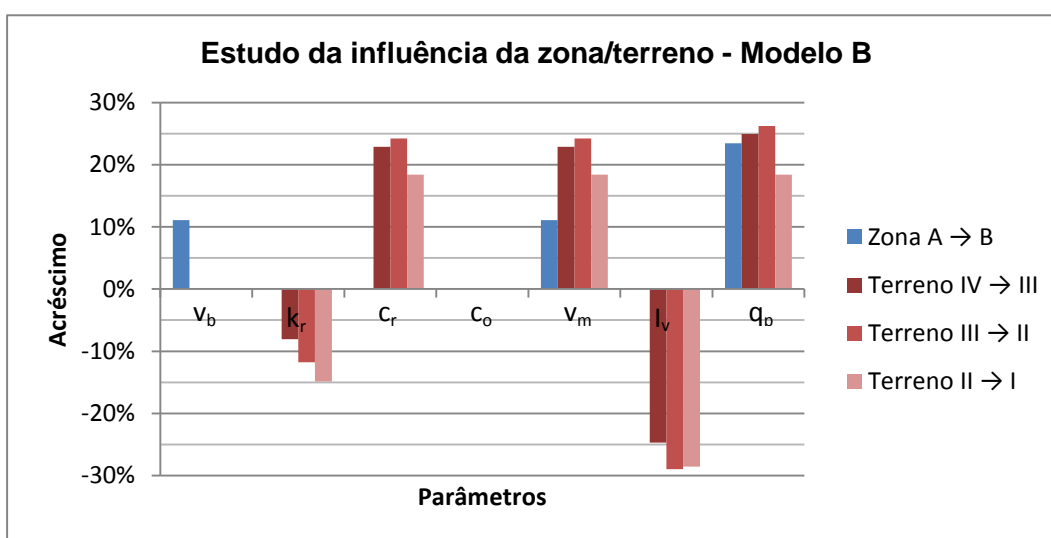


Gráfico 4.3 - Variação dos parâmetros da pressão dinâmica de pico, no modelo B, para o estudo da influência da zona/terreno.

v_b – Valor de referência da velocidade do vento; k_r – Coeficiente de terreno; c_r – Coeficiente de rugosidade médio; c_o – Coeficiente de orografia médio; v_m – Valor médio da velocidade média do vento; I_v – Intensidade de turbulência média; q_p – Pressão dinâmica de pico média.

Quadro 4.5 - Variação dos parâmetros da pressão dinâmica de pico, no modelo B, para o estudo da influência da zona/terreno.

Estudo da influência da zona/terreno - Modelo B							
Situação	Parâmetro						
	v_b	k_r	c_r	c_o	v_m	I_v	q_p
Zona A → B	11%	0%	0%	0%	11%	0%	23%
Terreno IV → III	0%	-8%	23%	0%	23%	-25%	25%
Terreno III → II	0%	-12%	24%	0%	24%	-29%	26%
Terreno II → I	0%	-15%	18%	0%	18%	-29%	18%

A partir da análise dos resultados obtidos, é possível verificar que a forma como os diferentes parâmetros influenciam diretamente a pressão dinâmica de pico é diferente conforme se procede à alteração da zona ou da categoria do terreno.

Quando o tipo de zona onde a estrutura se encontra é modificado, do tipo A para B, apenas dois parâmetros são alterados: o valor de referência da velocidade do vento e a velocidade média do vento. Por outro lado, se for a categoria de terreno a sofrer alteração, para um terreno com menor rugosidade, são quatro os parâmetros que sofrem alteração do seu valor: o coeficiente de terreno e a velocidade do vento aumentam e o coeficiente de rugosidade e a intensidade de turbulência diminuem. O coeficiente de orografia mantém-se constante perante a alteração do tipo de zona ou da categoria de terreno.

4.2.2. Estudo da influência da orografia

Segundo o EC1-1-4, os efeitos da orografia deverão ser considerados, através do coeficiente de orografia, nos casos em que, devido à existência de colinas ou de falésias, as velocidades do vento sejam aumentadas em mais de 5%. Em termos práticos, os efeitos orográficos apenas são contabilizados quando o declive médio do terreno a barlavento da estrutura, numa distância até 10 vezes a altura do elemento orográfico isolado, for igual ou superior a 3°.



Figura 4.7 - Efeito da orografia sobre uma torre de telecomunicações.

O objetivo desta secção é determinar que influência tem a orografia do terreno nos valores máximos dos esforços, deslocamento e rotação numa torre de telecomunicações. Para esse propósito, o estudo é realizado através da análise da influência das diferentes variáveis que permitem caracterizar o acidente orográfico, respetivamente a inclinação Φ , o comprimento da vertente a barlavento L_u e a altura H e, no caso de colinas, como representado na Figura 4.8, o comprimento da vertente a sotavento L_d .

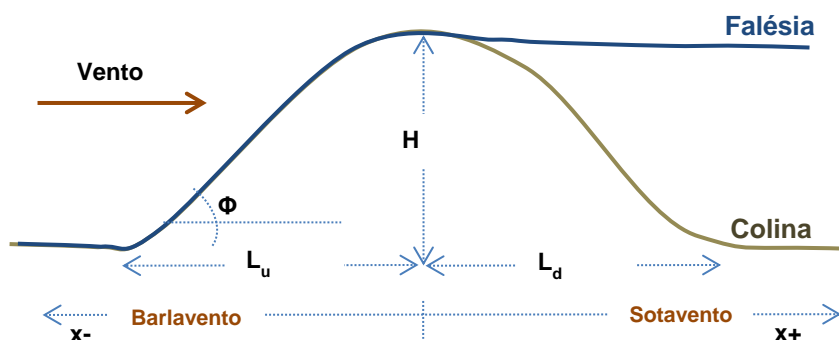


Figura 4.8 - Definição das dimensões de uma colina e de uma falésia.

O estudo é realizado para falésias e colinas com iguais dimensões a barlavento, sendo que no final serão discutidas as principais diferenças entre ambos. Serão utilizados os quatro modelos de torres de telecomunicações definidos na secção anterior. Considera-se que todas as estruturas se encontram localizadas em zona do tipo A e terreno da categoria IV.

4.2.2.1. Estudo da inclinação da vertente a barlavento

Como foi já visto, a inclinação da vertente a barlavento depende da definição de dois valores: o comprimento da vertente a barlavento e a altura do acidente orográfico. Assim, torna-se importante compreender que influências têm ambos os parâmetros na inclinação do terreno e na consequente definição do coeficiente de orografia que, por sua vez, influencia o valor da pressão dinâmica de pico.

Para cada estudo são definidos três correspondentes a diferentes inclinações, respetivamente de 0,1 (relativa a um ângulo de cerca de $5,7^\circ$), de 0,2 (cerca de $11,3^\circ$) e de 0,3 (cerca de $16,7^\circ$) e registadas as variações dos valores máximos dos esforços, deslocamento e rotação, em relação ao caso de uma torre localizada num terreno com inclinação nula, que não é afetada pelo efeito da orografia.

Os resultados são obtidos até uma distância de 450 m a barlavento e a sotavento do topo do acidente orográfico, de forma a caracterizar a variação ao longo das vertentes que se verifica com a alteração da inclinação do terreno a barlavento.

No caso da alteração da inclinação da vertente a barlavento por variação da altura do acidente orográfico, o comprimento a barlavento e a sotavento são mantidos com o mesmo valor em todos os casos considerados. Foram definidos os seguintes casos para o estudo em questão.

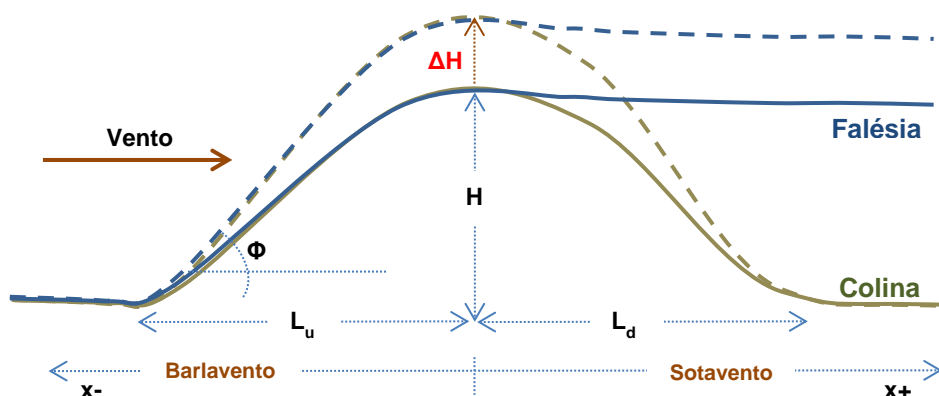


Figura 4.9 - Representação da variação da inclinação, devida ao aumento da altura do acidente orográfico.

Quadro 4.6 - Casos considerados para o estudo da variação da inclinação, devida ao aumento da altura do acidente orográfico.

Caso	H [m]	L_u [m]	L_d [m]	Φ
Falésia	50	500	0	0,1
	100	500	0	0,2
	150	500	0	0,3
Colina	50	500	400	0,1
	100	500	400	0,2
	150	500	400	0,3

Através dos resultados obtidos verificou-se que a variação dos valores máximos dos esforços, deslocamento e rotação da estrutura são aproximadamente semelhantes em todas as situações, pelo que os resultados médios apresentados são representativos de todos os parâmetros. Os resultados, a seguir apresentados para o modelo B, ilustram o tipo de variação que ocorre nos outros modelos. Os resultados da variação dos valores dos esforços na base, e deslocamento e rotação no topo para os restantes modelos, são apresentados no Apêndice II.

Observando os resultados da variação no modelo B, ao longo de 450 m a barlavento e a sotavento do topo, para o caso de uma falésia, temos:

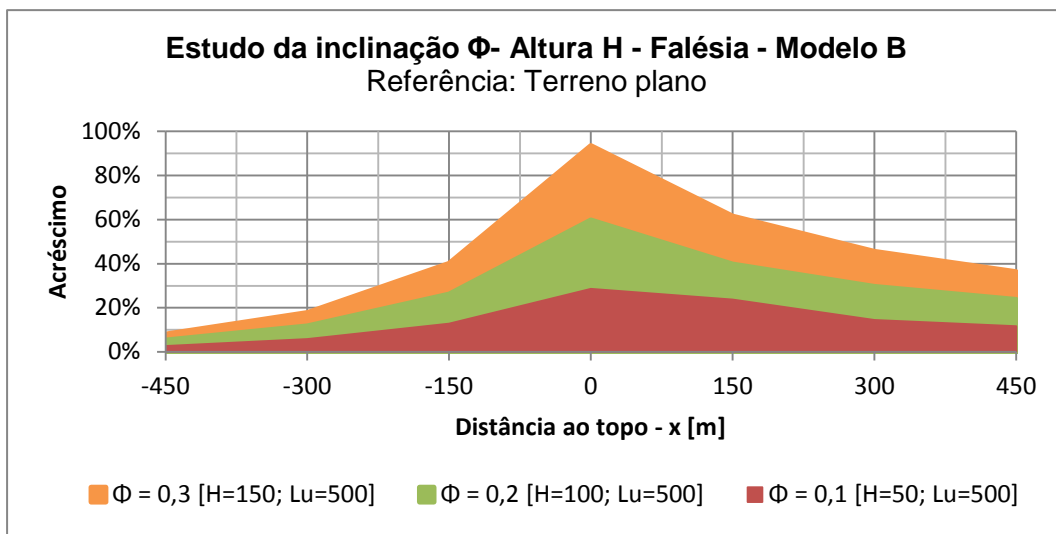


Gráfico 4.4 - Variação média para a alteração da inclinação, pela altura da falésia, no modelo B.

Quadro 4.7 - Variação média para a alteração da inclinação, pela altura da falésia, no modelo B.

Estudo da inclinação Φ - Altura H - Falésia - Modelo B							
Caso	Distância ao topo - x [m]						
	-450	-300	-150	0	150	300	450
$\Phi = 0,1$	3%	6%	13%	29%	24%	14%	12%
$\Phi = 0,2$	5%	12%	26%	60%	40%	30%	24%
$\Phi = 0,3$	8%	18%	40%	94%	62%	46%	36%

Os resultados obtidos da variação para o caso de uma colina são os seguintes:

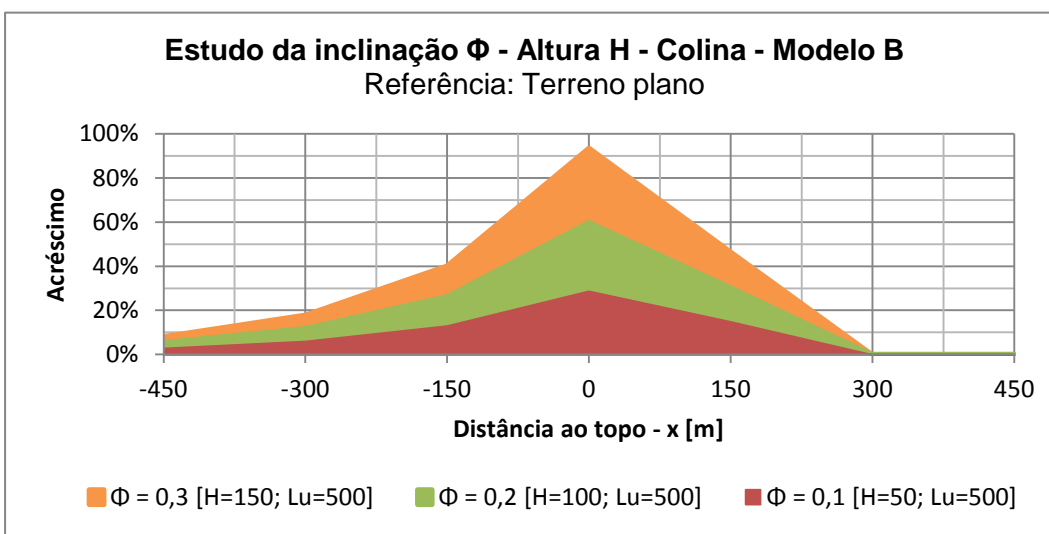


Gráfico 4.5 - Variação média para a alteração da inclinação, pela altura da colina, no modelo B.

Quadro 4.8 - Variação média para a alteração da inclinação, pela altura da colina, no modelo B.

Estudo da inclinação Φ - Altura H - Colina - Modelo B							
Caso	Distância ao topo - x [m]						
	-450	-300	-150	0	150	300	450
$\Phi = 0,1$	3%	6%	13%	29%	15%	0%	0%
$\Phi = 0,2$	5%	12%	26%	60%	30%	0%	0%
$\Phi = 0,3$	8%	18%	40%	94%	46%	0%	0%

Pela observação dos resultados obtidos verifica-se que quanto maior for a inclinação da vertente a barlavento, maior é a variação dos valores máximos dos esforços, deslocamento e rotação, relativamente à situação de referência (orografia nula, em terreno plano). Os valores dos aumentos são bastante significativos: no caso da localização da torre no topo de um acidente orográfico com uma inclinação da vertente a barlavento de 0,3, seja numa falésia ou colina, os valores dos esforços, deslocamento e rotação aumentam até cerca de 94%, relativamente à situação de orografia nula.

Os maiores valores da variação verificam-se no topo do acidente orográfico, sendo que à medida que a localização da estrutura se afasta do mesmo, o nível de variação é cada vez menor até a influência da orografia se perder.

Em ambos os tipos de orografia, falésia e colina, a variação a barlavento é idêntica, o que significa que a ação do vento nesta vertente é independente do tipo de acidente orográfico. Já a sotavento não se passa o mesmo. Enquanto que no caso de uma falésia, ainda se observam variações de 12% a 36% a 450 m do topo, no caso de uma colina o efeito da orografia perde-se a cerca de 300 m do topo, independentemente da inclinação a barlavento.

Nos restantes modelos de torres a variação dos esforços na base, e deslocamento e rotação no topo é semelhante, sendo que nas torres que sofrem uma menor ação por parte do vento (torres com menor altura, por exemplo), a variação é ligeiramente superior.

Por outro lado, como foi já referido, a inclinação da vertente a barlavento também pode ser alterada mantendo a altura do acidente orográfico constante e variando o comprimento da vertente a barlavento. Tal como no estudo anterior, definem-se igualmente três casos distintos, com as mesmas inclinações anteriormente utilizadas (0,1, 0,2 e 0,3) e registam-se os valores da variação dos valores máximos dos esforços, deslocamento e rotação da estrutura, em relação ao caso da torre em terreno plano, sem estar sob o efeito da orografia.

Assim, os casos considerados no estudo da influência da inclinação pela alteração do comprimento da vertente a barlavento são os seguintes:

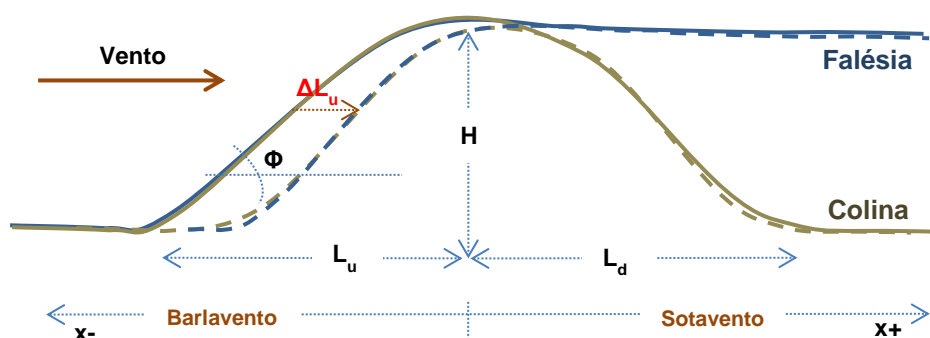


Figura 4.10 - Representação da variação da inclinação pela alteração do comprimento a barlavento do acidente orográfico.

Quadro 4.9 - Casos considerados para o estudo da variação da inclinação pela alteração do comprimento a barlavento do acidente orográfico.

Caso	H [m]	L_u [m]	L_d [m]	Φ
Falésia	150	1500	0	0,1
	150	750	0	0,2
	150	500	0	0,3
Colina	150	1500	400	0,1
	150	750	400	0,2
	150	500	400	0,3

Os valores da variação obtidos para o modelo B no caso de uma falésia, ao longo de 450 m a barlavento e a sotavento do topo, são aqui apresentados. Os valores obtidos para os restantes casos são apresentados no Apêndice II.

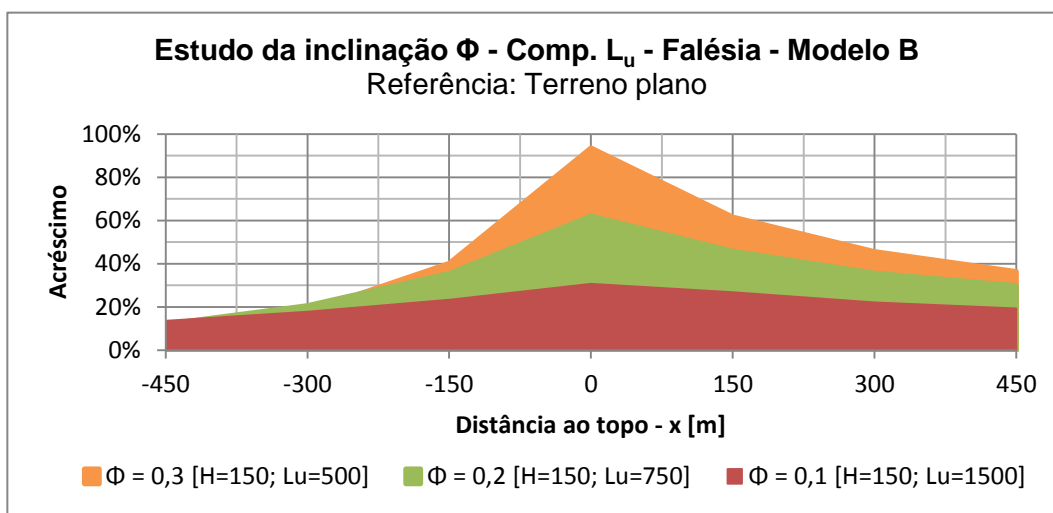


Gráfico 4.6 - Variação média para a alteração da inclinação, pela alteração comprimento a barlavento de uma falésia, no modelo B.

Quadro 4.10 - Variação média para a alteração da inclinação, pela alteração comprimento a barlavento de uma falésia, no modelo B.

Estudo da inclinação Φ - Comprimento L_u - Falésia - Modelo B							
Caso	Distância ao topo - x [m]						
	-450	-300	-150	0	150	300	450
$\Phi = 0,1$	14%	18%	23%	31%	27%	22%	19%
$\Phi = 0,2$	12%	21%	35%	62%	46%	36%	30%
$\Phi = 0,3$	8%	18%	40%	94%	62%	46%	36%

Quanto aos resultados da variação obtidos no caso de uma colina, temos:

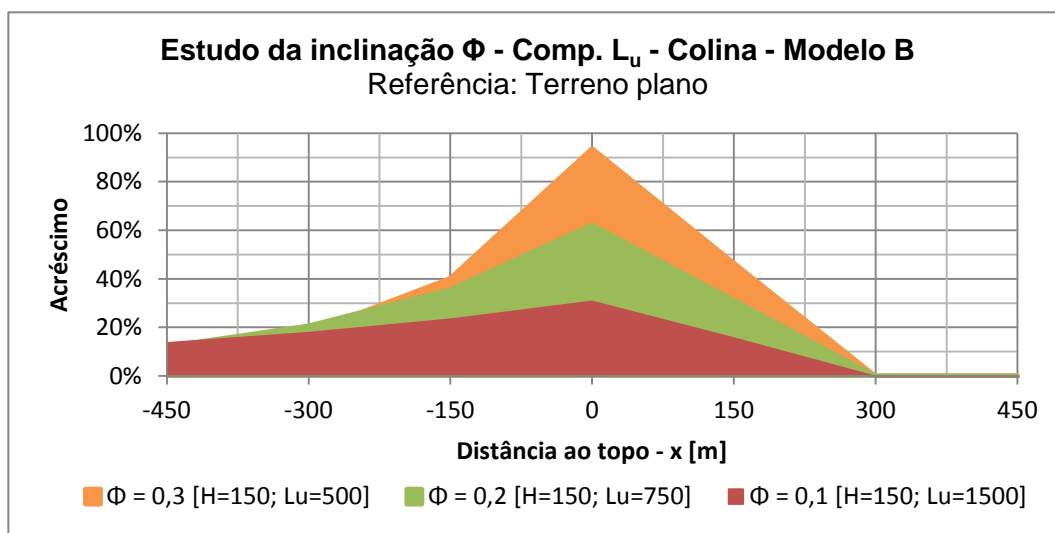


Gráfico 4.7 - Variação média para a alteração da inclinação, pela alteração do comprimento a barlavento de uma colina, no modelo B.

Quadro 4.11 - Variação média para a alteração da inclinação, pela alteração do comprimento a barlavento de uma colina, no modelo B.

Estudo da inclinação Φ - Comprimento L_u - Colina - Modelo B							
Caso	Distância ao topo - x [m]						
	-450	-300	-150	0	150	300	450
$\Phi = 0,1$	14%	18%	23%	31%	16%	0%	0%
$\Phi = 0,2$	12%	21%	35%	62%	31%	0%	0%
$\Phi = 0,3$	8%	18%	40%	94%	46%	0%	0%

A par do verificado com a alteração da inclinação a barlavento pela variação da altura do acidente orográfico, constatam-se em geral os mesmos factos com a variação do comprimento a barlavento, mantendo o valor da altura constante. A maior variação, em relação à situação de orografia nula, verifica-se no topo do acidente orográfico, sendo que à medida que a distância horizontal da estrutura aumenta os efeitos da orografia vão diminuindo gradualmente.

Verifica-se que a variação dos valores máximos dos esforços, deslocamento e rotação (29% a 94%), no topo do acidente orográfico, é aproximadamente igual aos mesmos valores obtidos para a alteração da inclinação por via da altura (31% a 94%), para as diversas inclinações. No entanto, a forma como se desenvolve a variação dos esforços ao longo das vertentes é diferente para inclinações do terreno semelhantes a barlavento (vejam-se os casos de inclinação da vertente a barlavento igual a 0,2, por exemplo). Assim, comparando acidentes orográficos com iguais inclinações da vertente a barlavento, e diferentes dimensões, consegue-se compreender esse facto.

No caso de uma falésia, com uma torre correspondente ao modelo B, obtemos os seguintes resultados:

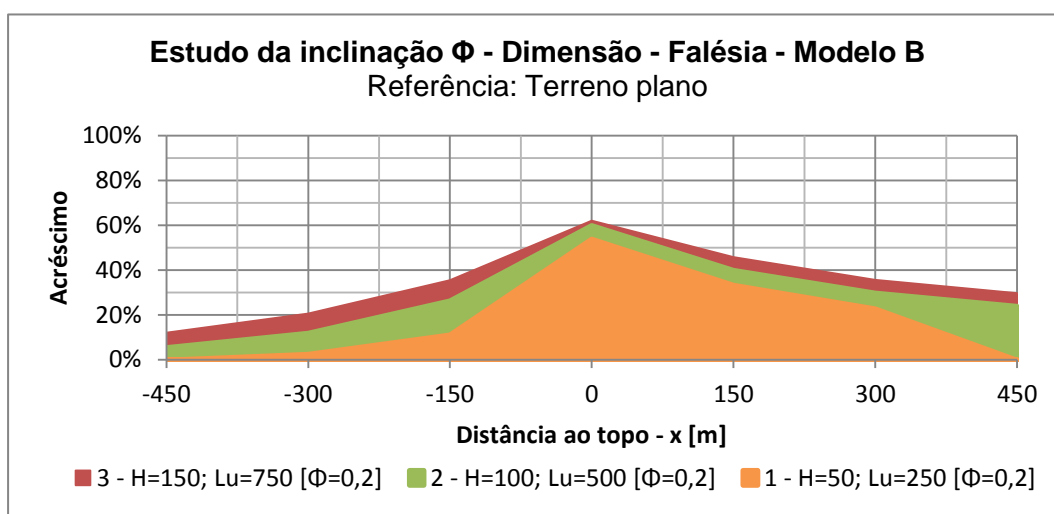


Gráfico 4.8 - Variação média para a alteração da dimensão, no caso de uma falésia, no modelo B.

Quadro 4.12 - Variação média para a alteração da dimensão, no caso de uma falésia, no modelo B.

Estudo da inclinação Φ - Dimensão - Falésia - Modelo B							
Caso	Distância ao topo - x [m]						
	-450	-300	-150	0	150	300	450
1	0%	2%	11%	54%	33%	23%	0%
2	5%	12%	26%	60%	40%	30%	24%
3	12%	21%	35%	62%	46%	36%	30%

No caso de uma colina, com uma torre correspondente ao modelo B, obtemos os seguintes resultados:

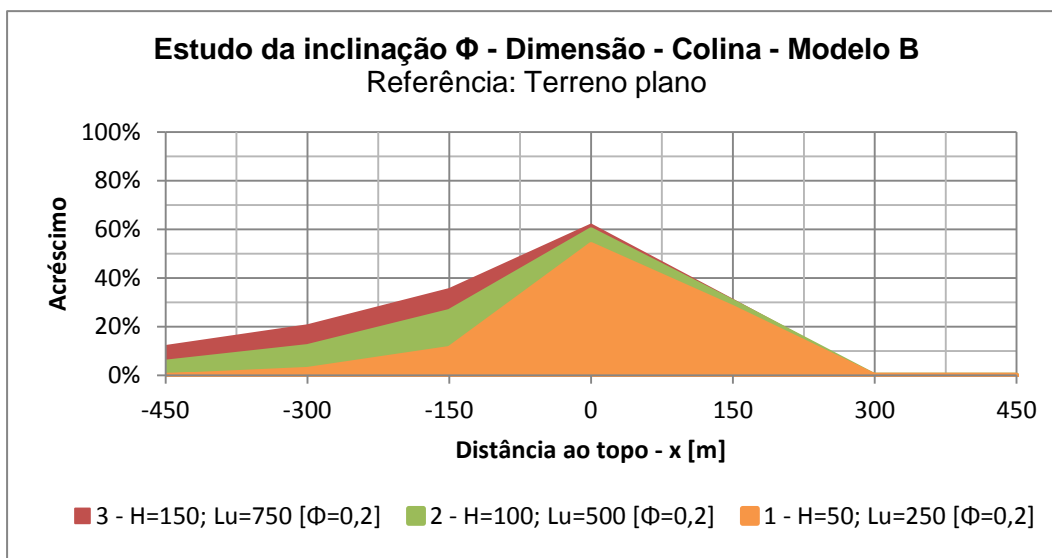


Gráfico 4.9 - Variação média para a alteração da dimensão, no caso de uma colina, no modelo B.

Quadro 4.13 - Variação média para a alteração da dimensão, no caso de uma colina, no modelo B.

Estudo da inclinação Φ - Dimensão - Colina - Modelo B							
Caso	Distância ao topo - x [m]						
	-450	-300	-150	0	150	300	450
1	0%	2%	11%	54%	28%	0%	0%
2	5%	12%	26%	60%	30%	0%	0%
3	12%	21%	35%	62%	31%	0%	0%

Apesar de nos três casos analisados, de falésias e de colinas, a inclinação da vertente a barlavento ser a mesma, verifica-se que a variação dos valores máximos dos esforços, deslocamento e rotação é diferente, conforme as dimensões da orografia.

À medida que aumenta a dimensão do acidente orográfico também acresce a ação do vento, para uma igual inclinação a barlavento. Através dos resultados obtidos é possível verificar que, no topo do acidente orográfico, enquanto o caso 1 ($H=50$ m; $L_u=250$ m) tem um acréscimo de 54%, o caso 3 ($H=150$ m; $L_u=750$ m) apresenta um aumento de 62% dos valores máximos dos esforços, deslocamento e rotação.

Apesar de se verificar que a ação do vento muda para diferentes acidentes orográficos com a mesma inclinação a barlavento, quando se comparam estes resultados com os obtidos para falésias ou colinas com outras inclinações, verifica-se uma variação drástica. No topo de acidentes orográficos com uma inclinação igual a 0,2, por exemplo,

observam-se aumentos dos valores máximos dos esforços, deslocamento e rotação, de 54% a 62%, enquanto que no topo de acidentes orográficos com inclinações a barlavento de 0,1 e 0,3 os aumentos são de 29% a 31% e de 94%, respetivamente. Estes valores indicam que os efeitos das variações da orografia são significativos sobretudo no caso de existirem alterações da inclinação da vertente a barlavento.

É importante estudar a variação dos parâmetros que influenciam a pressão dinâmica de pico, por via da alteração da inclinação da vertente do acidente orográfico virada a barlavento. Os resultados obtidos para uma torre de telecomunicações situada no topo do acidente orográfico são aqui mostrados para o modelo B, sendo os restantes apresentados no Apêndice II. Os valores destes parâmetros são iguais para ambos os tipos de orografia, falésia ou colina; no caso da alteração da inclinação da vertente a barlavento obtiveram-se os seguintes resultados:

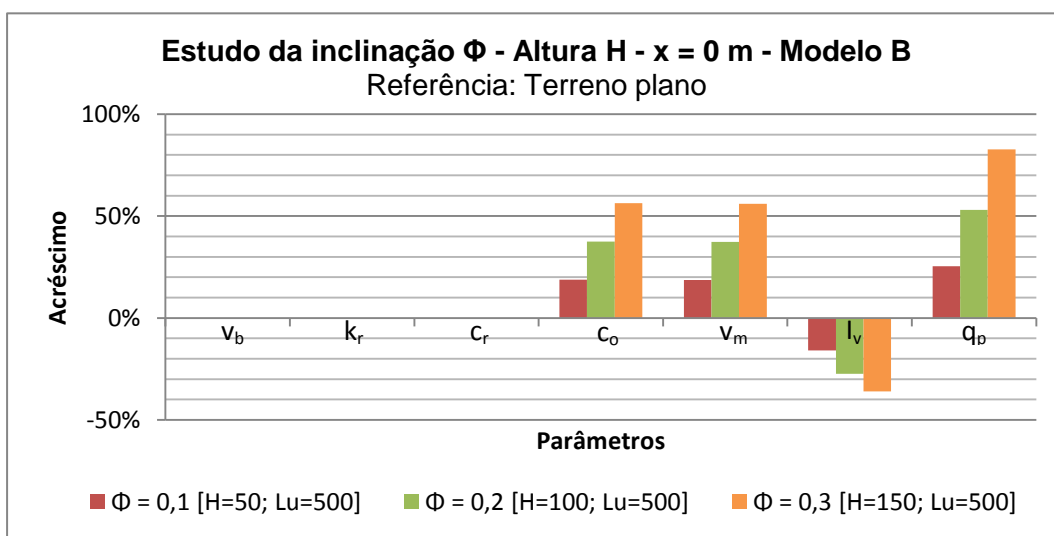


Gráfico 4.10 - Variação média dos parâmetros da pressão dinâmica de pico, para a alteração da inclinação, no modelo B.

v_b – Valor de referência da velocidade do vento; k_r – Coeficiente de terreno; c_r – Coeficiente de rugosidade médio; c_o – Coeficiente de orografia médio; v_m – Valor médio da velocidade média do vento; I_v – Intensidade de turbulência média; q_p – Pressão dinâmica de pico média.

Quadro 4.14 - Variação média dos parâmetros da pressão dinâmica de pico, para a alteração da inclinação, no modelo B.

Estudo da inclinação Φ - Altura H - x = 0 m - Modelo B							
Caso	Parâmetro						
	v_b	k_r	c_r	c_o	v_m	I_v	q_p
$\Phi = 0,1$	0%	0%	0%	19%	19%	-16%	25%
$\Phi = 0,2$	0%	0%	0%	38%	37%	-27%	53%
$\Phi = 0,3$	0%	0%	0%	56%	56%	-36%	83%

Verifica-se que os parâmetros que influenciam a pressão dinâmica de pico são três: i) o coeficiente de orografia, ii) a velocidade média do vento e iii) a intensidade de turbulência. O coeficiente de orografia e a velocidade média do vento aumentam com o acréscimo da pressão dinâmica de pico, resultante do aumento da inclinação do terreno a barlavento, enquanto que a intensidade de turbulência diminui com o referido acréscimo da pressão dinâmica de pico. Os restantes parâmetros, nomeadamente o valor de referência da velocidade do vento, o coeficiente de terreno e o coeficiente de rugosidade, são independentes do efeito da orografia.

Resumindo de forma breve o estudo dos efeitos da alteração da inclinação da vertente a barlavento, vê-se que esta tem uma influência significativa na variação da ação do vento sobre a estrutura. Quanto maior for a inclinação, maior é a ação do vento sobre a estrutura, sendo que os valores maiores ocorrem no topo do acidente orográfico. O efeito da orografia vai diminuindo à medida que a localização da estrutura se afasta do topo. A principal diferença entre a alteração da inclinação pelo comprimento a barlavento ou pela altura, mantendo uma destas variáveis constantes, reside no facto de a influência da orografia se fazer sentir a uma maior distância do topo no caso de acidentes orográficos com maior comprimento a barlavento, já que no topo os valores são idênticos, para vertentes com igual inclinação a barlavento.

4.2.2.2. Estudo do comprimento da vertente a sotavento

O comprimento da vertente a sotavento só é considerado no caso de colinas, que têm duas vertentes, sendo independente da inclinação da vertente a barlavento. Interessa pois estudar a influência da alteração deste comprimento na variação da ação do vento sobre uma torre de telecomunicações.

Assim, para este estudo consideram-se três comprimentos distintos da vertente a sotavento, respetivamente de 200 m, 400 m e 600 m, mantendo-se constantes as dimensões a barlavento (comprimento de 500 m e altura de 100 m), para uma inclinação desta vertente igual a 0,2. Tal como no estudo anterior, registam-se as variações dos valores máximos dos esforços, deslocamento e rotação (relativamente a uma situação de referência em que a estrutura não se encontra sob o efeito da orografia) até uma distância de 450 m do topo da colina, para diferentes posições da estrutura ao longo das duas vertentes.

Deste modo, foram considerados os seguintes casos para o estudo da alteração do comprimento a sotavento, em colinas:

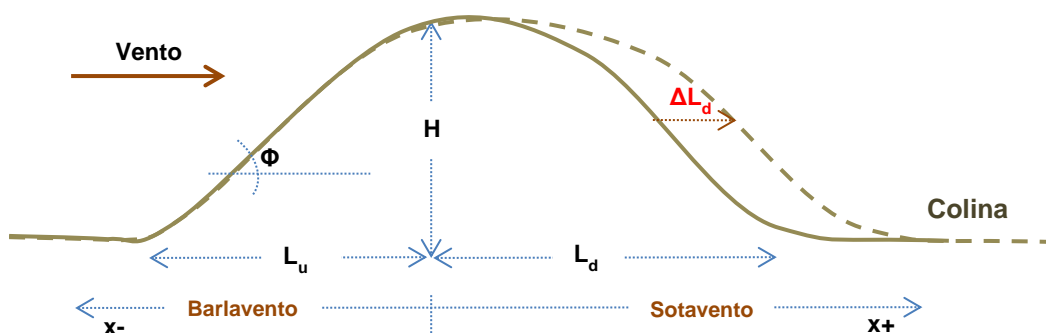


Figura 4.11 - Representação da variação do comprimento a sotavento numa colina.

Quadro 4.15 - Casos considerados para o estudo da variação do comprimento a sotavento, numa colina.

Caso	H [m]	L_u [m]	L_d [m]	Φ
Colina	100	500	200	0,2
	100	500	400	0,2
	100	500	600	0,2

À semelhança do verificado no estudo anterior, constatou-se que as variações dos valores máximos dos esforços, deslocamento e rotação da torre são praticamente iguais, pelo que se apresentam aqui os seus valores médios, referentes ao modelo B, encontrando-se no Apêndice II os resultados obtidos para os restantes modelos de torres de telecomunicações.

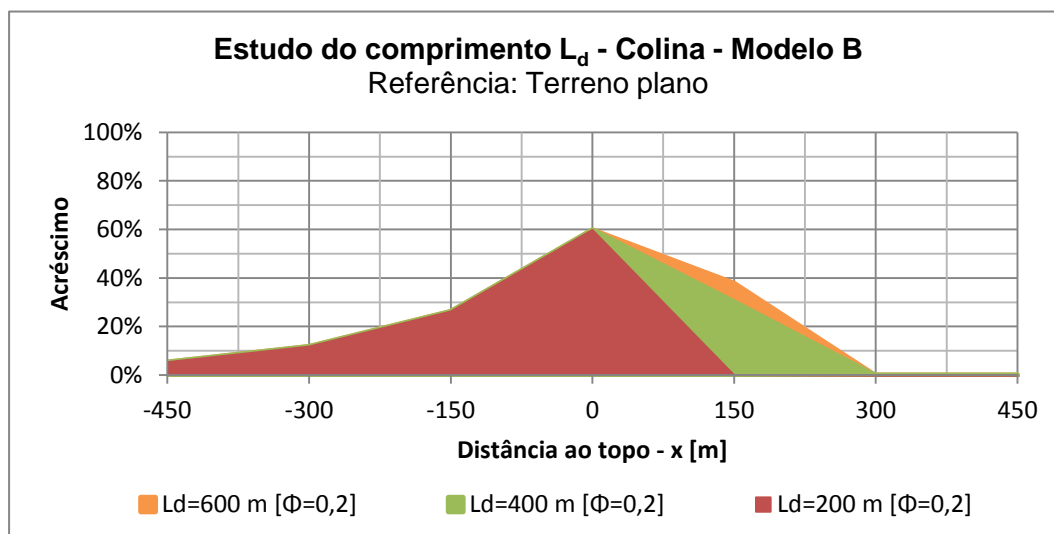


Gráfico 4.11 - Variação média para a alteração do comprimento a sotavento, numa colina, no modelo B.

Quadro 4.16 - Variação média para a alteração do comprimento a sotavento, numa colina, no modelo B.

Estudo do comprimento L_d - Colina - Modelo B							
Caso	Distância ao topo – x [m]						
	-450	-300	-150	0	150	300	450
$L_d = 200$ m	5%	12%	26%	60%	0%	0%	0%
$L_d = 400$ m	5%	12%	26%	60%	30%	0%	0%
$L_d = 600$ m	5%	12%	26%	60%	38%	0%	0%

Como se pode observar pelos resultados obtidos, o aumento do comprimento da vertente a sotavento nas colinas faz com que a ação do vento seja maior para iguais distâncias do topo. Vemos que numa colina com 200 m de comprimento, na vertente a sotavento, a orografia já não tem qualquer influência na ação do vento sobre uma torre localizada nesta vertente a 150 m de distância do topo, enquanto que no caso de colinas com comprimentos de 400 m e de 600 m na vertente a sotavento se verificam aumentos de 30% e de 38%, respetivamente, para a mesma distância do topo (150 m).

Na vertente a barlavento, até ao topo da colina, não se obteve qualquer variação com a alteração do comprimento da vertente a sotavento, pelo facto de as dimensões da vertente a barlavento se terem mantido constantes. Este facto atesta que apenas a alteração da inclinação a barlavento faz variar a ação do vento nesta vertente, até ao topo do acidente orográfico, onde se verificam os valores máximos da ação do vento.

A forma como variam os parâmetros da pressão dinâmica de pico é semelhante à referida na secção anterior (4.2.2.2), durante a análise dos resultados relativos à influência da inclinação da vertente a barlavento. Os resultados da variação dos parâmetros da pressão dinâmica de pico, obtidos no estudo da influência do comprimento da vertente a sotavento, são apresentados no Apêndice II, para todos os modelos de torres de telecomunicações considerados.

4.2.2.3. Estudo do tipo de orografia

Por último, interessa comparar os valores das variações obtidos nos diferentes casos estudados para os dois tipos de acidentes orográficos, falésias e colinas. Apesar de ser já conhecida a forma como varia a ação do vento ao longo das vertentes, para diversas situações, interessa comparar os valores obtidos, para analisar as diferenças entre falésias e colinas.

Consideram-se então dois casos de falésias e colinas com iguais dimensões a barlavento. Num dos casos, a vertente a barlavento de ambos os acidentes orográficos apresenta uma inclinação de 0,1, com 1500 m de comprimento e 150 m de altura, e no outro caso a mesma vertente apresenta uma inclinação de 0,3, com 500 m de comprimento e 150 m de altura. Além disso, considera-se que o comprimento da vertente a sotavento das colinas é igual a 400 m.

Com base na variação dos valores máximos dos esforços, deslocamento e rotação, em relação a uma situação de referência em que os efeitos da orografia são nulos, comparam-se os dois casos acima referidos, de falésias e de colinas.

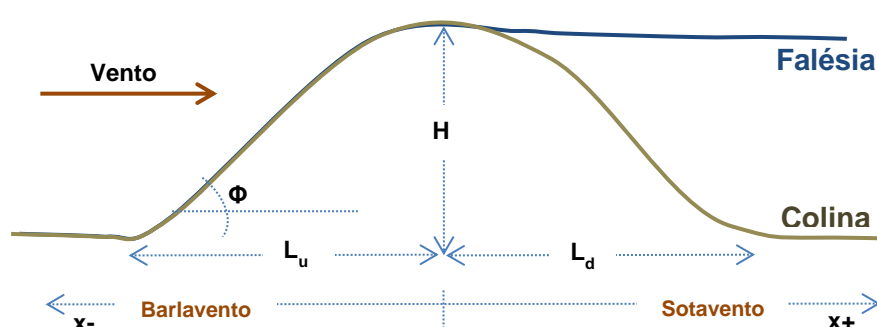


Figura 4.12 - Representação dos dois tipos de acidentes orográficos.

Quadro 4.17 - Casos considerados para o estudo do tipo de orografia.

Caso	H [m]	L_u [m]	L_d [m]	Φ
Falésia	150	1500	0	0,1
	150	500	0	0,3
Colina	150	1500	400	0,1
	150	500	400	0,3

De notar que, à semelhança do verificado nos estudos anteriores, os valores obtidos para a variação dos valores máximos dos esforços, deslocamento e rotação são semelhantes, pelo que se apresentam aqui apenas os valores médios das referidas variações, para o conjunto dos esforços, deslocamento e rotação analisados em cada situação. O estudo é feito para todos os modelos, embora se apresentem de seguida apenas os resultados obtidos para a torre do modelo B. Todos os restantes resultados são apresentados no Apêndice II.

Os resultados obtidos para o modelo B, em cada um dos casos de falésias e colinas com inclinações da vertente a barlavento iguais, são os seguintes:

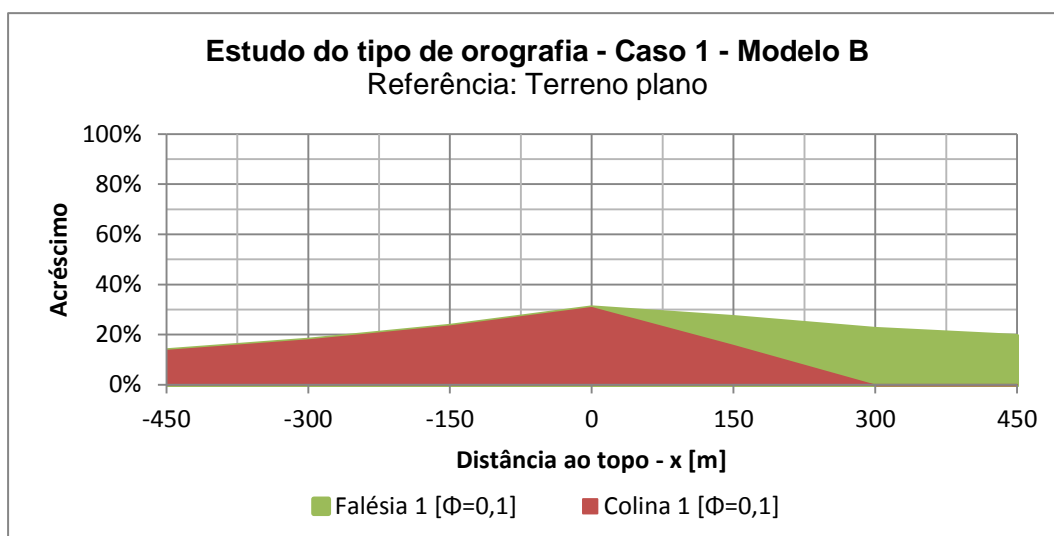


Gráfico 4.12 - Variação média para o estudo do tipo de orografia, no caso 1, para o modelo B.

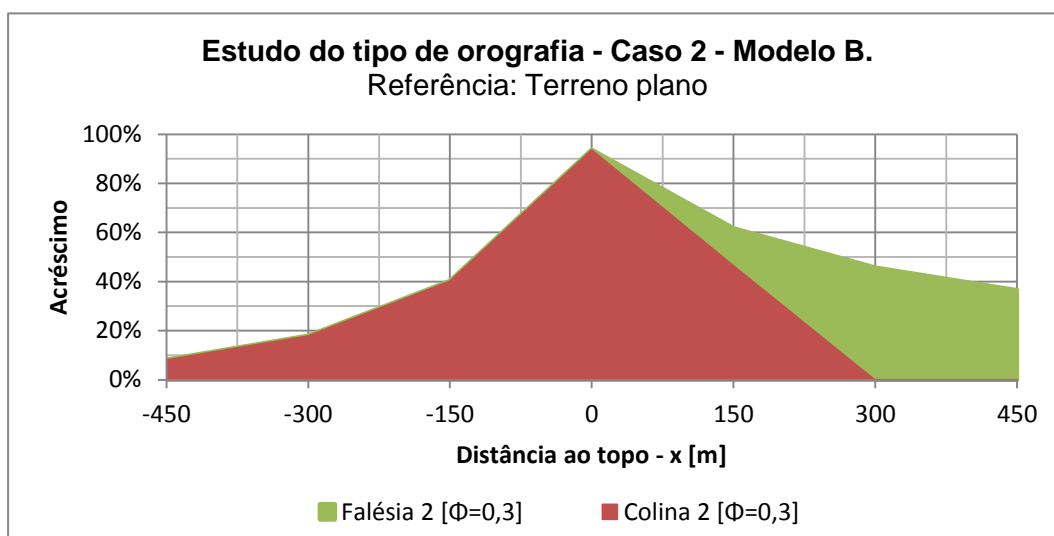


Gráfico 4.13 - Variação média para o estudo do tipo de orografia, no caso 2, para o modelo B.

Quadro 4.18 - Variação média para o estudo do tipo de orografia, para o modelo B.

Estudo do tipo de orografia - Modelo B							
Caso	Distância ao topo – x [m]						
	-450	-300	-150	0	150	300	450
Colina 1	14%	18%	23%	31%	16%	0%	0%
Falésia 1	14%	18%	23%	31%	27%	22%	19%
Colina 2	8%	18%	40%	94%	46%	0%	0%
Falésia 2	8%	18%	40%	94%	62%	46%	36%

Como se pode ver em ambos os casos, a única diferença entre os dois tipos de acidentes orográficos, colinas e falésias, reside na ação do vento na vertente a sotavento. Enquanto que na vertente a barlavento as variações dos valores máximos dos esforços, deslocamento e rotação são idênticas, na vertente a sotavento verifica-se que o efeito da orografia numa falésia se prolonga por uma distância bastante superior, quando comparado com o efeito da orografia numa colina. Este facto resulta das diferentes condições de escoamento do ar na vertente a sotavento, nos casos de uma colina e de uma falésia.

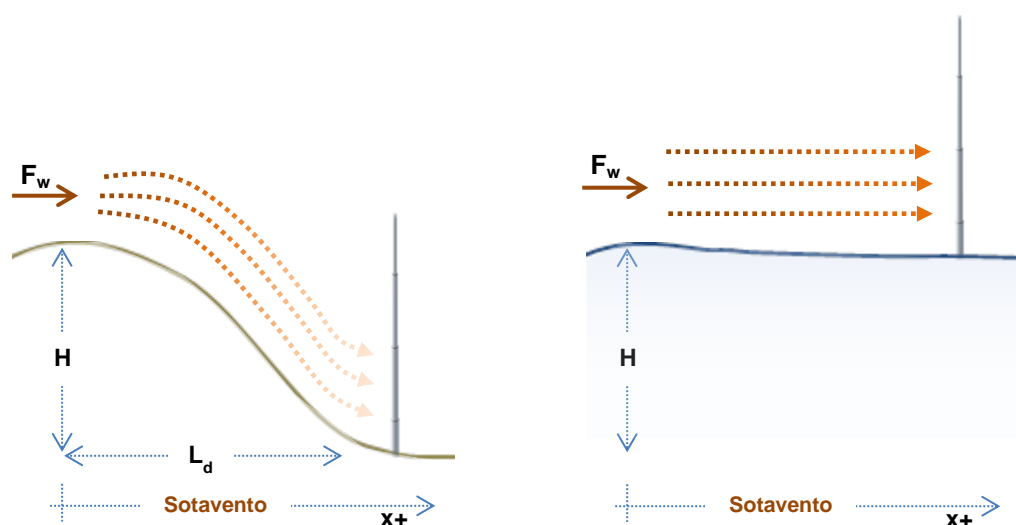


Figura 4.13 - Representação do escoamento do vento, na vertente a sotavento, nos diferentes tipos de orografia.

Apesar de no topo do acidente orográfico a intensidade do vento ser igual em ambos os casos, respetivamente numa colina e numa falésia, o facto de o seu escoamento sofrer alterações na trajetória faz com que a sua intensidade seja menor, para a estrutura colocada à mesma distância do topo, no caso de uma colina. No entanto, na impossibilidade de se determinar com precisão o regime local de ventos na zona onde é colocada a torre de telecomunicações, este é um facto que deve ser ignorado, devendo-se admitir que a torre se encontra na vertente em que a ação do vento é superior. Generalizando, para torres de telecomunicações que não estejam colocadas no topo do acidente orográfico, deve-se sempre optar pela maior ação do vento, nas vertentes a barlavento e a sotavento.

4.3. Estudo da ação do vento em função das características das torres

Como foi já referido, as torres de telecomunicações apresentam diferentes características, sendo por isso importante compreender como varia a ação do vento em função destas diferenças. Assim, neste capítulo, vão ser comparados os valores dos esforços atuantes em quatro modelos de torres, anteriormente definidos, com tronco cónico e secção transversal poligonal, ou com tronco cilíndrico e secção transversal circular, com o objetivo de verificar a influência do comprimento da torre e da geometria do tronco, bem como da forma da sua secção transversal.

4.3.1. Estudo da influência da altura da torre

A maioria das torres tubulares de telecomunicações tem uma altura total compreendida entre 30 m e 40 m, sendo desde logo evidente que entre torres com comprimentos diferentes existe uma diferença fundamental, que consiste na área de referência em que o vento incide. O objetivo deste estudo é a comparação das diferenças dos valores dos esforços na base da estrutura, e do deslocamento e da rotação no seu topo, em torres do mesmo tipo mas com alturas diferentes. Para tal, estes valores serão comparados entre os modelos de torres A e B, que correspondem a torres constituídas por troços de tronco cilíndrico e secção transversal circular, e entre os modelos C e D, relativos a torres compostas por troços de tronco cónico e secção transversal poligonal.

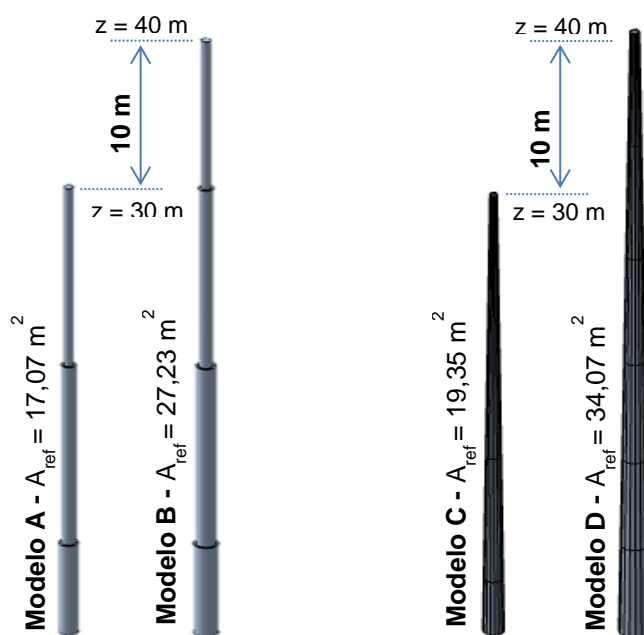


Figura 4.14 - Representação das diferenças em termos de altura entre as torres.

Os valores das áreas de referência para os diferentes modelos, de ambos os tipos, são os indicados nos Quadros 4.19 e 4.20.

Quadro 4.19 - Valores das áreas de referência para os modelos A e B.

Torres de tronco cilíndrico e secção circular							
Modelo	H [m]	Troço		L [m]	b_i [m]	b_f [m]	A_{ref} [m ²]
A	30	1	0 - 6 m	6,00	0,8128	0,8128	4,88
		2	6 - 18 m	12,00	0,6096	0,6096	7,32
		3	18 - 30 m	12,00	0,4064	0,4064	4,88
							17,07
B	40	1	0 - 6 m	6,00	1,0160	1,0160	6,10
		2	6 - 18 m	12,00	0,8128	0,8128	9,75
		3	18 - 30 m	12,00	0,6096	0,6096	7,32
		4	30 - 40 m	10,00	0,4064	0,4064	4,06
							27,23

L – Comprimento do troço; b_i – Diâmetro inicial do troço; b_f – Diâmetro final do troço.

Quadro 4.20 - Valores das áreas de referência para os modelos C e D.

Torres de tronco cónico e secção poligonal							
Modelo	H [m]	Troço		L [m]	b_i [m]	b_f [m]	A_{ref} [m ²]
C	30	1	0 - 6 m	6,00	0,9900	0,8520	5,53
		2	6 - 18 m	12,00	0,8520	0,5760	8,57
		3	18 - 30 m	12,00	0,5760	0,3000	5,26
							19,35
D	40	1	0 - 5,75 m	5,75	1,3040	1,1730	7,12
		2	5,75 - 11,5 m	5,75	1,1730	1,0440	6,37
		3	11,5 - 18 m	6,50	1,0440	0,8970	6,31
		4	18 - 25 m	7,00	0,8970	0,7390	5,73
		5	25 - 32,5 m	7,50	0,7390	0,5690	4,91
		6	32,5 - 40 m	7,50	0,5690	0,4000	3,63
							34,07

L – Comprimento do troço; b_i – Diâmetro inicial do troço; b_f – Diâmetro final do troço.

Como se pode verificar, existe uma clara diferença entre as áreas de referência dos modelos A e B, relativos a torres de tronco cilíndrico e secção circular, e dos modelos C e D, relativos a torres de tronco cónico e secção poligonal. Torna-se, pois, importante quantificar a influência relativa destas diferenças entre áreas de referência, que aparentam ser significativas, quanto à ação do vento sobre a estrutura.

Para o cálculo dos esforços na base, e do deslocamento e da rotação no topo, em cada um dos modelos, considera-se que as torres se encontram localizadas numa zona do tipo A, em terreno plano da categoria IV. Todos os resultados encontram-se no Apêndice III.

Os resultados obtidos para a variação da altura da torre entre os modelos A e B são os seguidamente apresentados.

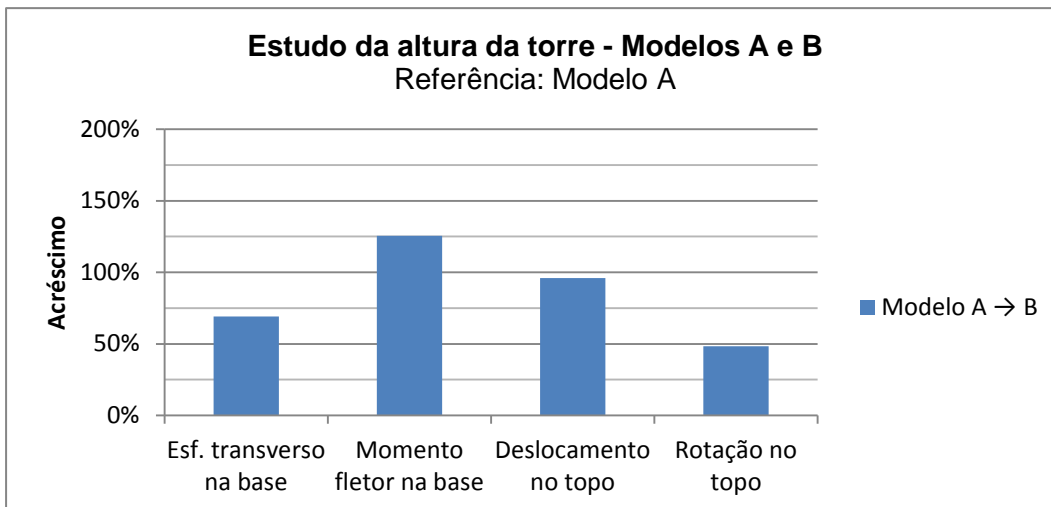


Gráfico 4.14 - Variações obtidas no estudo da influência da altura da torre, entre os modelos A e B.

Quadro 4.21 - Variações obtidas no estudo da influência da altura da torre, entre os modelos A e B.

Estudo da altura da torre - Modelos A e B								
Modelo	Esf. transversa na base		Momento fletor na base		Deslocamento no topo		Rotação no topo	
	V_0 [kN]	ΔV_0	M_0 [kNm]	ΔM_0	u_1 [m]	Δu_1	θ_1 [rad]	$\Delta \theta_1$
A	8,81	-	120,40	-	0,136	-	0,007	-
B	14,91	69%	271,64	126%	0,266	96%	0,011	48%

Os resultados obtidos para a variação da altura da torre entre os modelos C e D são os seguintes.

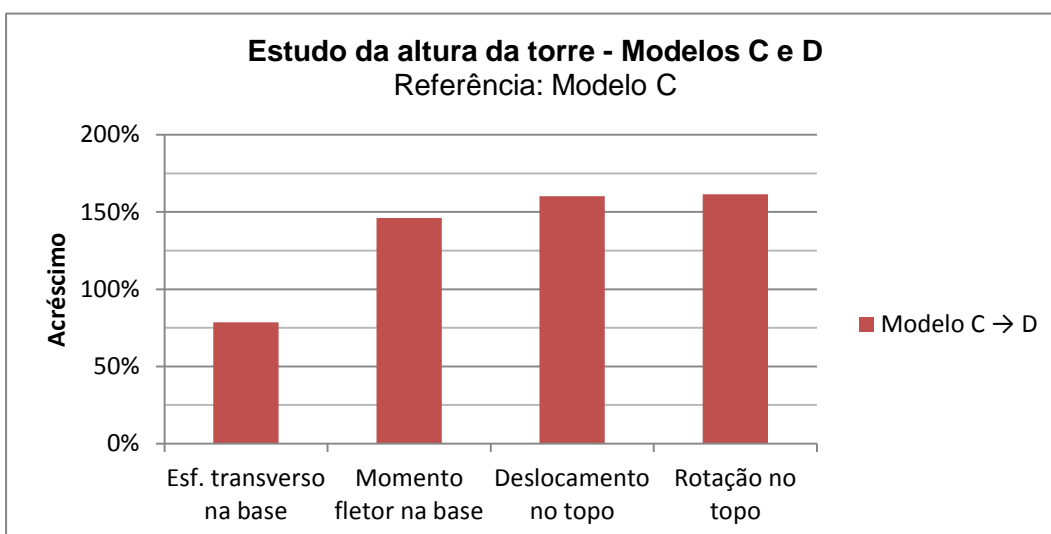


Gráfico 4.15 - Variações obtidas no estudo da influência da altura da torre, entre os modelos C e D.

Quadro 4.22 - Variações obtidas no estudo da influência da altura da torre, entre os modelos C e D.

Estudo da altura da altura da torre - Modelos C e D								
Modelo	Esf. transverso na base		Momento fletor na base		Deslocamento no topo		Rotação no topo	
	V_0 [kN]	ΔV_0	M_0 [kNm]	ΔM_0	u_1 [m]	Δu_1	θ_1 [rad]	$\Delta \theta_1$
C	9,49	-	123,74	-	0,126	-	0,007	-
D	16,95	79%	304,53	146%	0,327	160%	0,018	162%

Com base na observação dos resultados, verifica-se que, no mesmo tipo de torre, um aumento do comprimento da estrutura implica um aumento significativo dos valores máximos dos esforços, do deslocamento e da rotação.

Relativamente aos modelos de tronco cilíndrico e secção transversal circular, é possível ver que, do modelo A para B, um aumento de 10 m no comprimento total da estrutura e de 10,16 m² na sua área exposta ao vento, implica um aumento de 69% e de 126% no esforço transverso e no momento fletor na base, respetivamente, e um aumento de 96% e de 48% no deslocamento e na rotação no topo da torre.

No caso das de tronco cónico e secção transversal poligonal (neste caso com 16 faces), é possível verificar que, do modelo C para D, um igual acréscimo de 10 m no comprimento e de 14,72 m² na área de referência implica aumentos maiores nos valores máximos das mesmas variáveis, devido à maior área de exposição: 79% e 146% no esforço transverso e no momento fletor na base da torre, respetivamente, 160% no deslocamento do topo da torre e 162% na rotação do mesmo topo.

Como no caso das torres compostas por troços de tronco cilíndrico, existe uma variação brusca de diâmetro nas fronteiras entre troços, a força do vento a aplicar nas secções de fronteira pode igualmente ser muito diferente. Isto deve-se ao facto de a área de referência de dois troços com diâmetros diferentes ter uma variação significativa. No entanto, através da observação dos diagramas de esforços e de deslocamentos para as situações em estudo, apresentados no Apêndice III, verifica-se que a diferença entre as áreas de referência dos diferentes troços não interfere significativamente na evolução dos esforços e do deslocamento ao longo da altura das torres, para estes casos de estudo.

Apesar do aumento global dos valores para um aumento do comprimento total da torre, e do conseqüente acréscimo da área de referência, é necessário analisar a forma como variam os valores dos diferentes parâmetros que entram no cálculo da força do vento, nomeadamente a pressão dinâmica de pico, o coeficiente estrutural, os coeficientes de força e a área de referência da torre.

Os resultados obtidos para os modelos A e B são os seguintes.

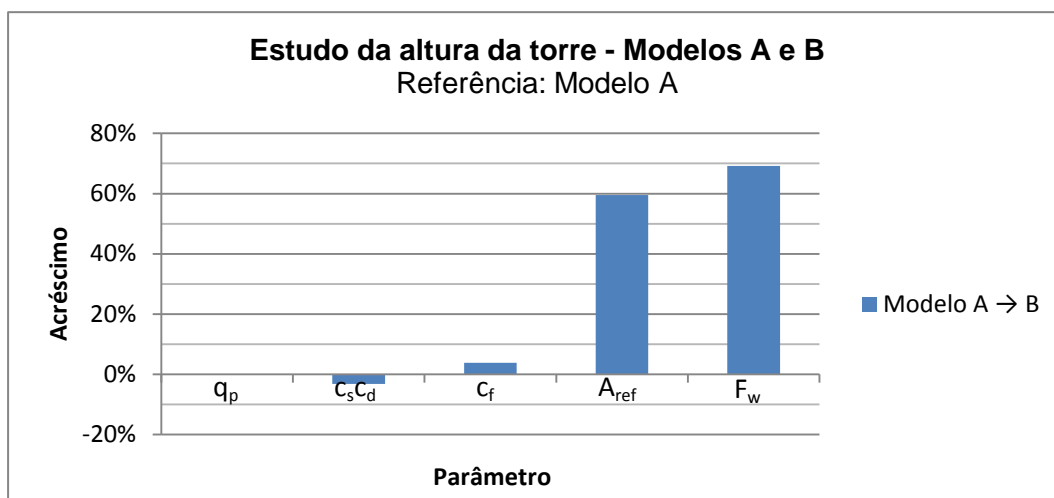


Gráfico 4.16 - Variação dos parâmetros da força do vento entre os modelos A e B.

q_p – Pressão dinâmica de pico aos 30 m; $c_s c_d$ – Coeficiente estrutural; c_f – Coeficiente de força médio da torre; A_{ref} – Área de referência total; F_w – Força do vento total.

Quadro 4.23 - Variação dos parâmetros da força do vento para o estudo do comprimento da torre.

Estudo da altura da torre - Modelos A e B										
Modelo	Parâmetro									
	q_p [Pa]	Δq_p	$c_s c_d$	$\Delta c_s c_d$	c_f	Δc_f	A_{ref} [m ²]	ΔA_{ref}	F_w [kN]	ΔF_w
A	885,06	-	1,12	-	0,65	-	17,07	-	8,81	-
B	885,06	0%	1,08	-3%	0,68	4%	27,23	60%	14,91	69%

Quanto aos resultados obtidos para os modelos C e D, temos o seguinte.

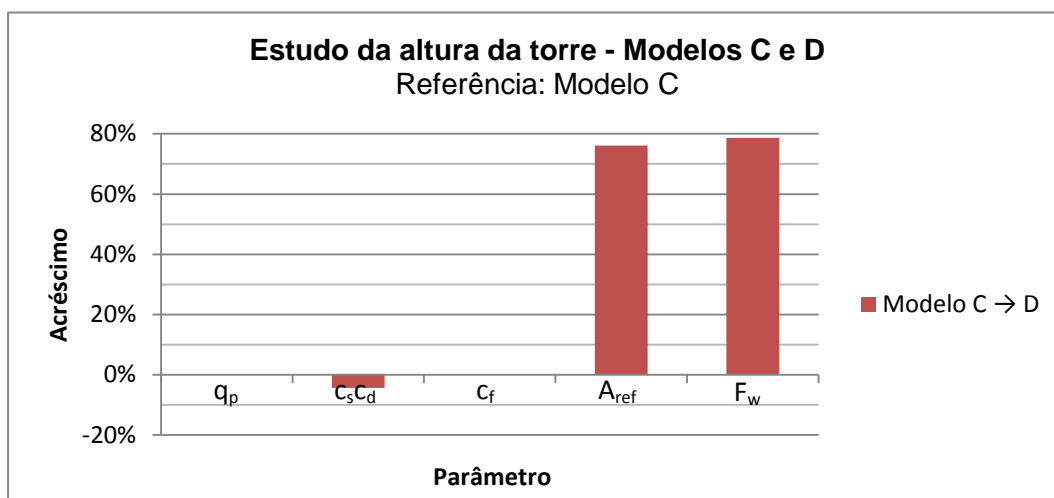


Gráfico 4.17 - Variação dos parâmetros da força do vento entre os modelos C e D.

q_p – Pressão dinâmica de pico aos 30 m; $c_s c_d$ – Coeficiente estrutural; c_f – Coeficiente de força médio da torre; A_{ref} – Área de referência total; F_w – Força do vento total.

Quadro 4.24 - Variação dos parâmetros da força do vento entre os modelos C e D.

Estudo da altura da torre - Modelos C e D										
Modelo	Parâmetro									
	q_p [Pa]	Δq_p	$c_s c_d$	$\Delta c_s c_d$	Δc_f	Δc_f	A_{ref} [m ²]	ΔA_{ref}	F_w [kN]	ΔF_w
C	885,06	-	1,00	-	0,70	-	19,35	-	9,49	-
D	885,06	0%	0,96	-4%	0,70	0%	34,08	76%	16,95	79%

Pela análise dos resultados observa-se que o aumento de 60% ou de 76% na área de referência total, resultante do aumento de 10 m no comprimento da torre na passagem da torre A para a torre B e da torre C para a torre D, é o parâmetro mais influente no acréscimo dos valores da área de referência.

Como a pressão dinâmica de pico é completamente independente das características da estrutura, definindo apenas a ação do vento de forma isolada, que varia conforme o tipo de zona, categoria e orografia do terreno, o seu valor mantém-se constante para a mesma cota, neste caso aos 30 m de altura.

Da análise dos resultados, verifica-se que o coeficiente estrutural em ambos os casos diminui com o aumento da altura da torre, respetivamente com uma diminuição de 3% entre os modelos A e B e de 4% entre os modelos C e D, e conseqüentemente diminui também a força do vento sobre a estrutura. No entanto, esta variação é pouco significativa, comparativamente com a alteração da área de referência, e por isso não tem grande influência na variação dos valores dos esforços, deslocamento e rotação.

Por último, quanto aos coeficientes de força, que são calculados em função do tipo de secção transversal da torre, verifica-se um pequeno acréscimo de 4%, quanto aos seus valores médios para o comprimento total da torre, da torre A para a torre B, enquanto que da torre C para a torre D não se verifica qualquer alteração do coeficiente de força médio, pelo que facilmente se conclui que a área de referência é o parâmetro condicionante na comparação de torres com diferentes alturas.

4.3.2. Estudo da influência do tipo de secção

Como foi já visto, existem dois tipos principais de torres tubulares de telecomunicações, as compostas por troços de tronco cónico e secção transversal poligonal e as compostas por troços de tronco cilíndrico e secção transversal circular. Entre os dois tipos, para além da geometria longitudinal do troço, destaca-se a diferença entre o tipo de

secção transversal, que pode alterar o escoamento do vento em torno da superfície da estrutura, por via da variação dos coeficientes de força.

Para cada tipo de secção, circular e poligonal, são utilizados diferentes métodos de obtenção dos valores dos coeficientes de força. Segundo o EC1-1-4, os coeficientes de secções circulares dependem sobretudo do revestimento da superfície, enquanto que as secções poligonais regulares dependem do número de lados do polígono.

Neste capítulo serão analisadas as variações entre os valores dos esforços na base, e do deslocamento e da rotação no topo de cada torre, para diferentes revestimentos de superfícies das secções, entre modelos com secção circular, e para distintas secções poligonais, entre os modelos de torres com secção poligonal.

4.3.2.1. Estudo do tipo de superfície – Secções circulares

Como foi já referido, os coeficientes de força atribuídos às secções circulares dependem principalmente do revestimento da sua superfície. Assim, para os modelos A e B, relativos a monopolos de tronco cilíndrico e secção transversal circular, serão comparados os valores dos esforços na base, e do deslocamento e da rotação no topo, para três tipos de revestimento, conforme indicado no Quadro 4.25.

Quadro 4.25 - Casos considerados para o estudo do tipo de superfície em secções circulares.

Modelo	L [m]	Tronco	Secção	Superfície
A	30	Cilíndrico	Circular	Revestimento por pintura liso
				Pintura aplicada à pistola
				Aço - Superfície lisa
B	40	Cilíndrico	Circular	Revestimento por pintura liso
				Pintura aplicada à pistola
				Aço - Superfície lisa

Consideram-se então, para ambos os modelos, os troços da torre com revestimento por pintura liso, por pintura aplicada à pistola e com uma superfície lisa de aço.

Visto os valores obtidos não sofrerem alterações significativas conforme o modelo, exibem-se assim os valores médios para a variação do tipo de superfície, entre ambos os modelos A e B, relativos a torres de secção circular, de 30 m e 40 m, sendo os resultados

apresentados em detalhe, para cada modelo, no Apêndice III. Os valores das variações são calculados em relação à situação de referência, que corresponde a uma torre com um revestimento por pintura liso.

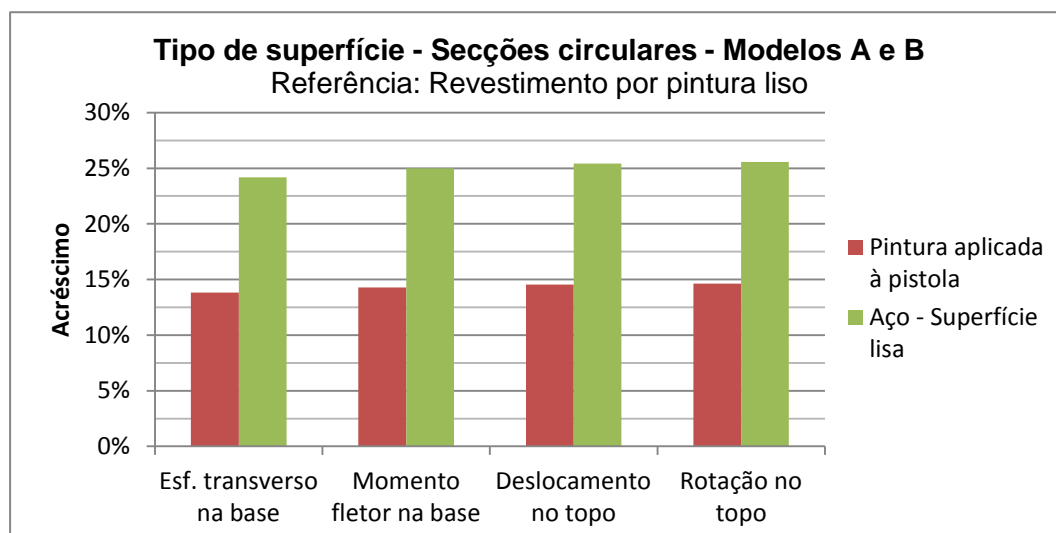


Gráfico 4.18 - Variação para o estudo do tipo de superfície em secções circulares.

Quadro 4.26 - Variação para o estudo do tipo de superfície em secções circulares.

Tipo de superfície – Secções circulares - Modelos A e B				
Tipo de superfície	Parâmetro			
	ΔV_0	ΔM_0	Δu_1	$\Delta \theta_1$
Revestimento por pintura liso	-	-	-	-
Pintura aplicada à pistola	14%	14%	15%	15%
Aço - Superfície lisa	24%	25%	25%	26%

Pela análise dos resultados verifica-se que, se o tipo de superfície da secção for alterado numa torre de secção circular, os valores dos esforços na base, e do deslocamento e da rotação no topo da estrutura podem sofrer um acréscimo significativo.

Pela observação dos valores médios das variações constata-se, em ambos os modelos, que o simples facto de se realizar a pintura dos troços da torre por pistola, em vez de se utilizar uma pintura com revestimento liso, acresce os valores das variações entre 14% e 15%. Se, por outro lado, a torre não apresentar qualquer revestimento por pintura e tiver uma superfície lisa, os valores aumentam entre 24% e 26%, em relação à situação de um revestimento por pintura liso, o que atesta a importância da escolha do tipo de superfície para a torre.

Para a determinação das causas deste aumento, analisam-se os valores dos parâmetros que entram diretamente no cálculo da força do vento. Assim, temos:

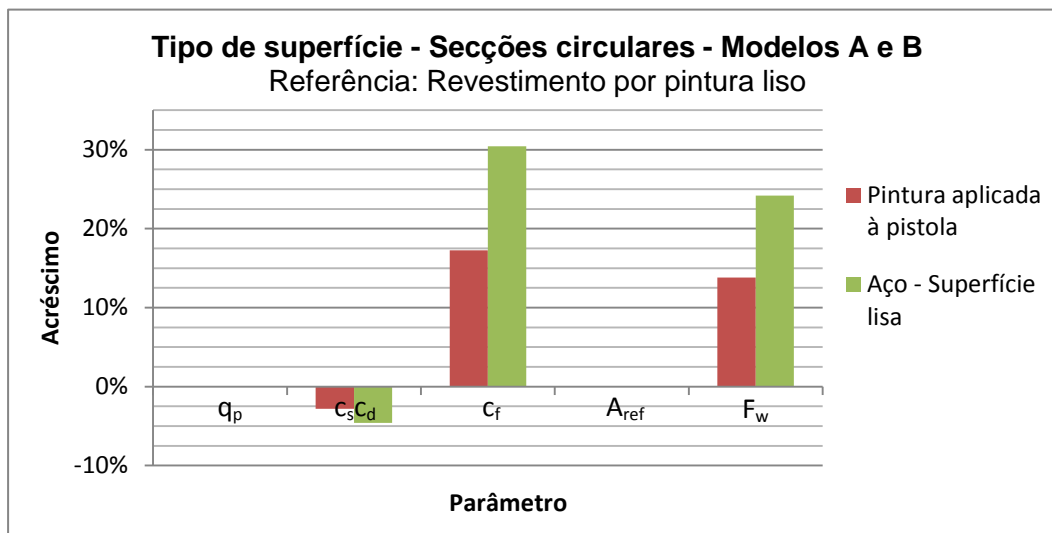


Gráfico 4.19 - Variação dos parâmetros da força do vento para o estudo do tipo de superfície em secções circulares.

q_p – Pressão dinâmica de pico aos 30 m; $c_s c_d$ – Coeficiente estrutural; c_f – Coeficiente de força médio; A_{ref} – Área de referência total; F_w – Força do vento total.

Quadro 4.27 - Variação dos parâmetros da força do vento para o estudo do tipo de superfície em secções circulares.

Tipo de superfície – Secções circulares - Modelos A e B					
Tipo de superfície	Parâmetro				
	q_p	$c_s c_d$	c_f	A_{ref}	F_w
Revestimento por pintura liso	-	-	-	-	-
Pintura aplicada à pistola	0%	-3%	17%	0%	14%
Aço - Superfície lisa	0%	-5%	30%	0%	24%

Analisando os resultados, verifica-se que o aumento dos valores da força do vento deve-se apenas ao aumento dos coeficientes de força considerados para cada secção.

Verifica-se uma pequena redução dos valores do coeficiente estrutural, de 3% para uma superfície com pintura aplicada à pistola e de 5% para uma superfície lisa, em relação a um revestimento por pintura liso, que é, contudo, insuficiente para alterar de forma significativa o efeito da variação dos coeficientes de força.

Quanto à pressão dinâmica de pico, a variação é nula, para qualquer altura ao longo do comprimento da torre, pois esta é completamente independente da estrutura.

Por último, os coeficientes de força, sofrem uma importante variação com a alteração do tipo de superfície. De facto, ao se alterar a superfície para um tipo mais rugoso, o escoamento do vento processa-se com maior dificuldade e os valores dos coeficientes de força agravam a ação do vento de forma significativa. De entre as superfícies enunciadas, verifica-se um aumento de cerca de 17% e de 30%, em relação a um revestimento por pintura liso, para uma superfície pintada com aplicação à pistola e para uma superfície de aço lisa, não pintada.

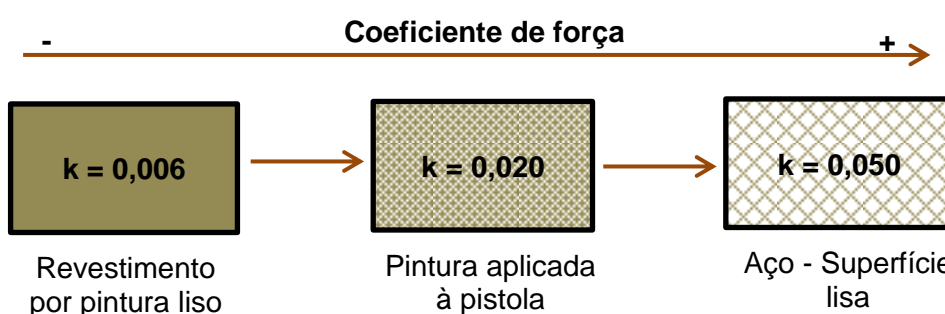


Figura 4.15 - Representação da variação do coeficiente de força com a alteração do tipo de revestimento.

Conforme representado na Figura 4.15, com o aumento da rugosidade da superfície da secção, o valor da rugosidade equivalente k aumenta, o que provoca um aumento dos coeficientes de força e, conseqüentemente, um aumento da ação global do vento sobre a estrutura. Como se pode verificar no Apêndice III, respeitante à variação dos parâmetros dos coeficientes de força com a alteração do tipo de superfície, é possível verificar que, para o mesmo troço, o número de Reynolds se mantém constante e que o valor do quociente entre a rugosidade equivalente e o diâmetro do troço k/b , aumenta, provocando um acréscimo do valor do coeficiente de força respeitante ao mesmo troço.

4.3.2.2. Estudo da geometria da secção – Secções poligonais

A atribuição dos coeficientes de força, em torres compostas por troços de secção transversal poligonal depende sobretudo da sua geometria, ou seja, do número de lados do polígono definido pelo contorno exterior da secção transversal. Em torres de telecomunicações tubulares de tronco cónico, as secções poligonais mais frequentes são as

hexadecagonais (polígono de 16 lados), mas também existem torres com secções dodecagonais (polígono de 12 lados) ou octogonais (polígono de 8 lados). Deste modo, é necessário compreender a importância deste fator na ação do vento sobre as torres de telecomunicações.

Neste capítulo é estudada a variação dos valores dos esforços na base, e do deslocamento e da rotação no topo da estrutura nos modelos C e D, que correspondem a torres de tronco cónico e secção poligonal, com 16 lados, 12 lados ou 8 lados, para se compreender a influência deste fator nos valores referidos.



Figura 4.16 - Diversos tipos de secções poligonais em torres de telecomunicações.

Como foi referido, os casos que serão objeto de estudo, nos modelos C e D, são os indicados no Quadro 4.28.

Quadro 4.28 - Casos considerados para o estudo da geometria da secção, em secções poligonais.

Modelo	L [m]	Tronco	Geometria da secção
C	30	Cónico	Hexadecagonal - 16 Lados
			Dodecagonal - 12 Lados
			Octogonal - 8 Lados
D	40	Cónico	Hexadecagonal - 16 Lados
			Dodecagonal - 12 Lados
			Octogonal - 8 Lados

Como os valores da variação das variáveis controladas (esforços na base, deslocamento e rotação no topo da torre), são praticamente semelhantes em ambos os modelos C e D, apresentam-se em seguida os valores médios da referida variação nos dois modelos de torres, relativamente à situação de referência que corresponde a uma secção com 16 faces. O conjunto dos resultados obtidos para os modelos C e D são apresentados em pormenor no Apêndice III.

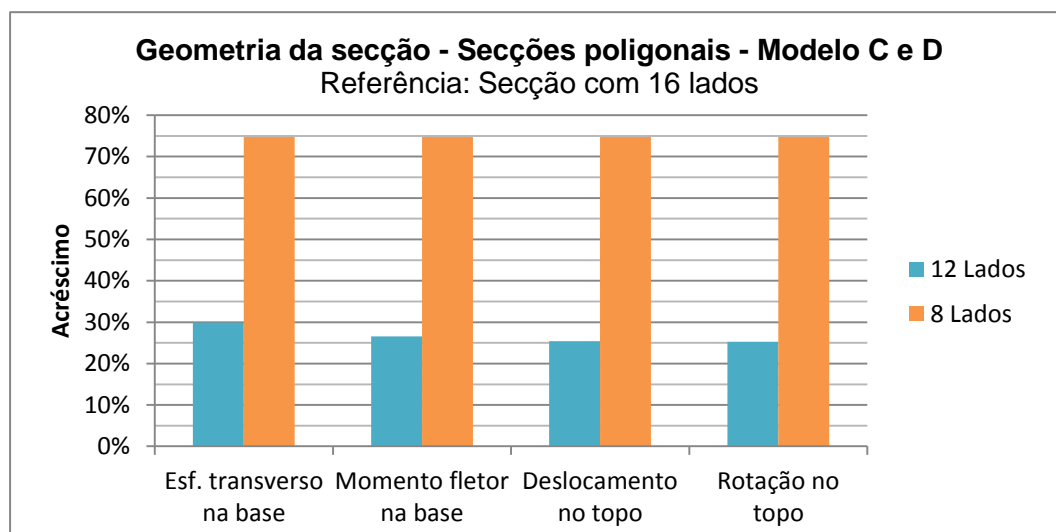


Gráfico 4.20 - Variação para o estudo da geometria da secção, em secções poligonais.

Quadro 4.29 - Variação para o estudo da geometria da secção, em secções poligonais.

Tipo de superfície	Parâmetro			
	ΔV_0	ΔM_0	Δu_1	$\Delta \theta_1$
16 Lados	-	-	-	-
12 Lados	30%	27%	25%	25%
8 Lados	75%	75%	75%	75%

Os resultados obtidos permitem verificar que a influência da geometria da secção, nas torres de tronco cónico, é muito importante. Em comparação com um modelo de secção poligonal de 16 lados, a mesma torre com uma secção poligonal com 12 lados apresenta um aumento médio dos valores das variáveis controladas entre cerca dos 25% e 30%; no caso de uma secção poligonal com 8 lados, a mesma torre apresenta um aumento médio de 75% dos valores obtidos para os esforços na base, e para o deslocamento e a rotação no topo da torre.

À semelhança da análise do tipo de superfície, determinou-se igualmente a variação dos parâmetros da força do vento, com o intuito de compreender as causas dos acréscimos observados no Quadro 4.29.

Assim, a variação média, entre os modelos C e D, dos parâmetros da força do vento em relação à secção poligonal de 16 lados é a seguinte.

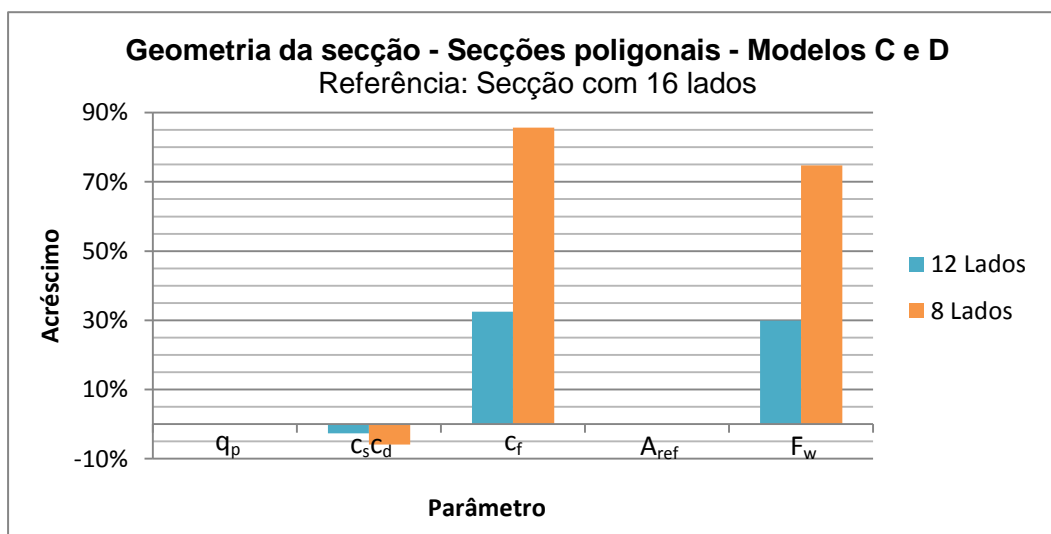


Gráfico 4.21 - Variação dos parâmetros da força do vento para o estudo da geometria da secção, em secções poligonais.

q_p – Pressão dinâmica de pico aos 30 m; $c_s c_d$ – Coeficiente estrutural; c_f – Coeficiente de força médio; A_{ref} – Área de referência total; F_w – Força do vento total.

Quadro 4.30 - Variação dos parâmetros da força do vento para o estudo da geometria da secção, em secções poligonais.

Geometria da secção - Secções poligonais - Modelos C e D					
Geometria da secção	Parâmetro				
	q_p	$c_s c_d$	c_f	A_{ref}	F_w
16 Lados	-	-	-	-	-
12 Lados	0%	-3%	33%	0%	30%
8 Lados	0%	-6%	86%	0%	75%

Observa-se que o aumento dos valores da força do vento se deve apenas ao aumento dos coeficientes de força, associado à alteração da geometria da secção. O tipo de variação de cada um dos parâmetros é semelhante à variação observada no estudo anterior, relativo ao tipo de superfície da secção, tendo em conta que existe uma descida do coeficiente estrutural, uma subida dos coeficientes de força e uma manutenção dos valores da pressão dinâmica de pico e da área de referência.

O coeficiente estrutural diminui 3% e 6%, respetivamente nos casos de uma torre com secção poligonal de 12 lados e de 8 lados, em relação à situação base de uma torre

com secção poligonal de 16 lados. Apesar de a descida do valor do coeficiente estrutural ser diretamente proporcional ao valor da força do vento, os valores desta variação pouco significado têm em comparação com a subida dos valores dos coeficientes de força.

Os valores da área de referência e da pressão dinâmica de pico mantêm-se constantes, visto as dimensões da torre não se alterarem com a variação do tipo de secção e a ação da pressão dinâmica de pico ser independente da estrutura.

O coeficiente de força é, sem dúvida, o principal parâmetro afetado pela mudança de geometria da secção. Em comparação com uma torre de tronco cónico e secção poligonal de 16 faces, os valores dos coeficientes de força, ao longo do comprimento da torre, sofrem um aumento de 33% e de 86% nos casos de secções com 12 lados e 8 lados, respetivamente. São acréscimos bastante significativos e traduzem de forma evidente a extrema importância da geometria da secção.

Como se pode ver no Gráfico 4.22, se incluirmos os valores dos coeficientes de força obtidos para o modelo B, numa torre de secção circular com superfície de aço lisa (atrás considerado durante o estudo da influência do tipo de superfície em secções transversais circulares), observa-se uma clara diferença entre os valores do coeficiente de força obtidos para diferentes tipos de geometria da secção. Neste gráfico são apresentados os valores médios dos coeficientes de força obtidos para os modelos B e D, ambos com 40 m de comprimento.

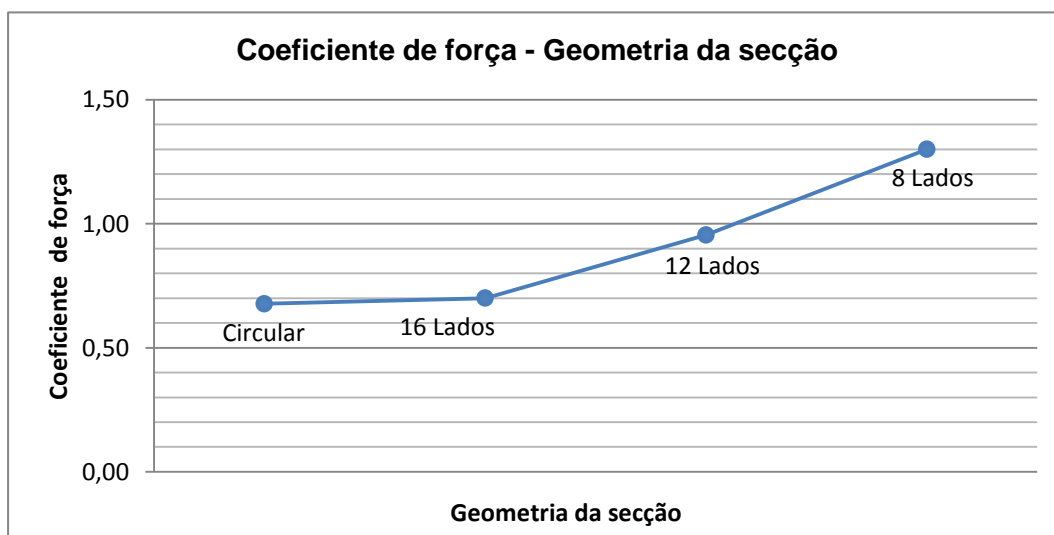


Gráfico 4.22 - Variação do coeficiente de força com a geometria da secção.

Para secções mais angulosas e distantes de uma geometria circular, os coeficientes de força considerados são cada vez maiores e, conseqüentemente, a ação do

vento é agravada. O facto de as secções com geometria mais próxima de uma configuração circular permitirem que o escoamento do vento se processe com maior facilidade é um fator decisivo na atribuição dos coeficientes de força que, como vimos, podem implicar um decréscimo bastante significativo nos esforços na base, bem como no deslocamento e na rotação no topo da estrutura.

Em ambos os estudos, relativos à análise do tipo de secção, concluiu-se que o aumento da ação do vento se deve somente ao aumento dos coeficientes de força. Embora se verifique uma pequena descida do coeficiente estrutural, em ambos os casos de estudo, esta variação é demasiado pequena para alterar significativamente os valores da força do vento. No Quadro 4.31 são apresentados os valores médios dos coeficientes de força, ao longo do comprimento de cada torre, para os diferentes tipos de torres e de secções transversais estudadas.

Quadro 4.31 - Valores médios do coeficiente de força para cada torre.

Coeficiente de força - Secções circulares e poligonais				
Secção	Modelo	Revestimento	Secção	C_f
Circular	A	Rev. por pintura liso	-	0,50
		Pintura aplicada à pistola	-	0,59
		Aço - Superfície lisa	-	0,65
	B	Rev. por pintura liso	-	0,52
		Pintura aplicada à pistola	-	0,61
		Aço - Superfície lisa	-	0,68
Poligonal	C	-	16 lados	0,70
		-	12 lados	0,90
		-	8 lados	1,30
	D	-	16 lados	0,70
		-	12 lados	0,95
		-	8 lados	1,30

As torres de secção circular apresentam, para qualquer tipo de superfície, coeficientes de força menos gravosos que as torres de secção poligonal. O caso mais grave de uma torre composta por troços de tronco cilíndrico e secção transversal circular (coeficiente de força de 0,68) corresponde praticamente ao caso menos grave de uma torre de tronco cónico e secção poligonal (coeficiente de força de 0,70). Como foi já referido, o facto de o contorno exterior da secção transversal assumir uma forma mais perto da circular influencia decisivamente o escoamento do vento.

4.4. Estudo da ação do vento sobre os equipamentos

Uma torre de telecomunicações tem geralmente vários equipamentos instalados, encontrando-se, entre os mais comuns, as antenas com os diversos acessórios de suporte, as plataformas de trabalho, as escadas e os cabos dispostos ao longo do comprimento da torre. A forma como a ação do vento interage com cada um destes equipamentos será certamente diferente, dependendo de vários fatores cuja influência convém estudar.

Este capítulo encontra-se dividido em três partes principais, relativas ao estudo da ação do vento: i) sobre as antenas e interfaces, ii) sobre os caminhos de cabos e iii) sobre as escadas. As plataformas de trabalho são incluídas no estudo sobre as antenas, pois geralmente funcionam como estrutura de ligação de antenas à torre de telecomunicações. O objetivo principal é compreender, em termos qualitativos e quantitativos, a influência de cada tipo de equipamento e as variações que poderão apresentar em relação às soluções vulgarmente mais utilizadas.

4.4.1. Estudo da ação do vento sobre antenas

Em termos funcionais, as antenas são os principais equipamentos numa torre de telecomunicações. Existem diferentes tipos de antenas, consoante a sua forma e dimensões, que são colocadas em diferentes quantidades, conforme as necessidades, a várias alturas ao longo do comprimento da torre, através de estruturas metálicas de suporte, mais ou menos complexas, que ligam estes equipamentos à torre.

Para este estudo são utilizados dados relativos a quatro tipos de antenas, com diferentes características, que foram conjugadas com quatro tipos de interfaces de topo comuns em torres de telecomunicações, verificando-se deste modo a influência que estes equipamentos têm na ação do vento sobre a estrutura e de que forma ela pode variar. Neste capítulo, é estudada a variação da influência das antenas, em função da sua quantidade, da sua posição ao longo do comprimento da torre e do tipo de interface no topo. Além disso, é também apresentado um estudo relativo aos efeitos de interferência entre as interfaces de topo e as antenas. Considera-se que todos os modelos de torres de telecomunicações utilizados se encontram localizados numa zona do tipo A, em terreno da categoria IV, e sem estarem sob o efeito da orografia. Todos os cálculos acessórios são apresentados no Apêndice IV.

Nestes estudos vão ser utilizados quatro tipos de antenas, com as características indicadas no Quadro 4.32. Estes quatro tipos de antenas apresentam diferentes características quanto à sua dimensão, forma e massa e são representativos dos grupos de antenas frequentemente utilizados em torres de telecomunicações.

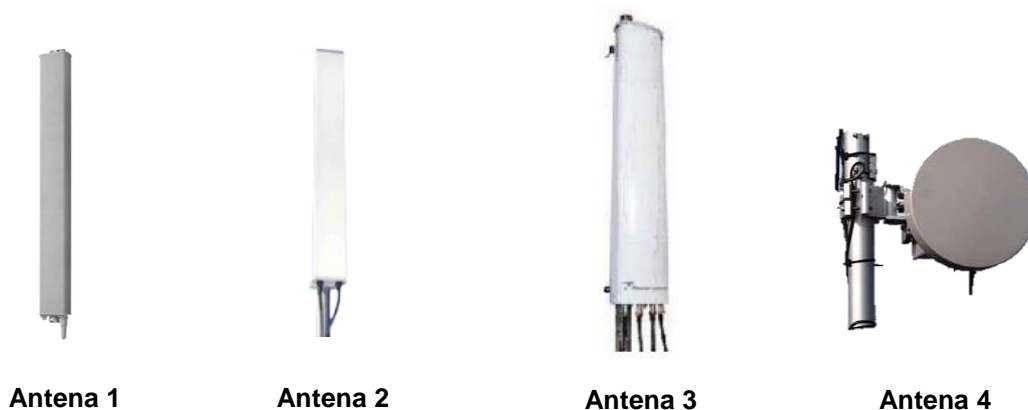


Figura 4.17 - Tipos de antenas considerados no estudo.

Quadro 4.32 - Características das antenas consideradas no estudo.

Antena	Dimensões [mm]	m [kg]	Ação do vento			
			Incidência	v_m [m/s]	A_{ref} [m ²]	F_w [N]
1	1314 x 155 x 70	10	Frontal	41,67	0,204	350
			Lateral	41,67	0,092	90
			Traseira	41,67	0,204	350
2	1349 x 169 x 80	10	Frontal	44,44	0,228	436
			Lateral	44,44	0,014	236
			Traseira	44,44	0,228	196
3	2033 x 280 x 355	25	Frontal	42,00	0,569	653
			Lateral	42,00	0,035	653
			Traseira	42,00	0,569	653
4	Ø600	30	Frontal	50,00	0,471	570
			Lateral	50,00	0,471	570
			Traseira	50,00	0,471	570

No Quadro 4.32 são descritas as características da ação do vento para cada tipo de antena. Conforme a incidência do vento em cada antena é definida, pelo fabricante, uma força do vento associada a uma velocidade média do vento. Posteriormente, através de um processo de retroanálise, referido na secção 3 da dissertação, são obtidos os respetivos coeficientes de força. A área de referência também é diferente para diferentes incidências do vento. Em todos os casos de informação omissa foram sempre considerados os valores mais gravosos. A informação encontrada para cada tipo de antena é apresentada em detalhe no Apêndice IV.

É importante destacar que as antenas dos tipos 1 e 2 são geralmente colocadas apenas no topo da estrutura, através das interfaces usuais, enquanto que as antenas dos tipos 3 e 4 poderão ser dispostas ao longo da altura da torre. Assim, nos estudos relativos à quantidade e posição de antenas, apenas serão utilizadas as que correspondem aos tipos 3 e 4. As antenas dos tipos 1 e 2 serão utilizadas no estudo das interfaces de topo, onde são vulgarmente colocadas.

É importante conhecer a ação do vento sobre os diferentes tipos de antenas considerados, antes de se proceder ao estudo do seu efeito sobre as torres de telecomunicações. Pretende-se desta forma conhecer, numa primeira fase, a variação da força do vento com as características da antena ao longo da sua superfície de incidência.

Assim, a partir dos dados recolhidos para cada tipo de antena, obtiveram-se as diferentes forças do vento para cada uma das antenas, nas três incidências principais. Considera-se a ação do vento numa zona do tipo A, em terreno da categoria IV, sem influência da orografia, e a uma altura de 20 m, à qual corresponde um vento médio de 18,95 m/s e uma pressão dinâmica de pico de 749,16 Pa.

A partir da aplicação da pressão dinâmica de pico à definição da ação do vento respetiva, obtiveram-se os resultados apresentados no Gráfico 4.23 e no Quadro 4.33, para os seguintes tipos de antenas:

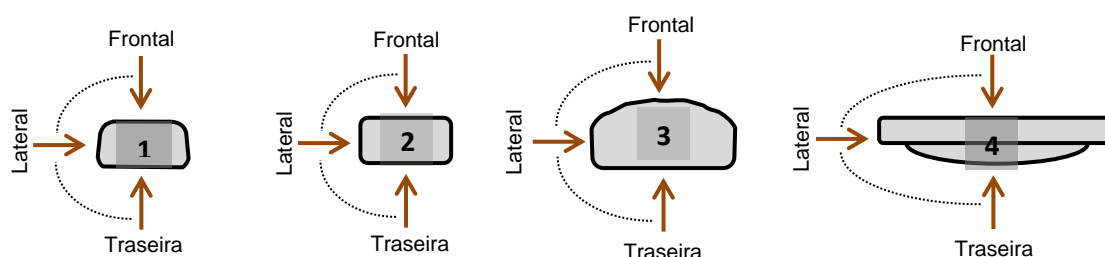


Figura 4.18 - Posições de incidência do vento nos diversos tipos de antenas.

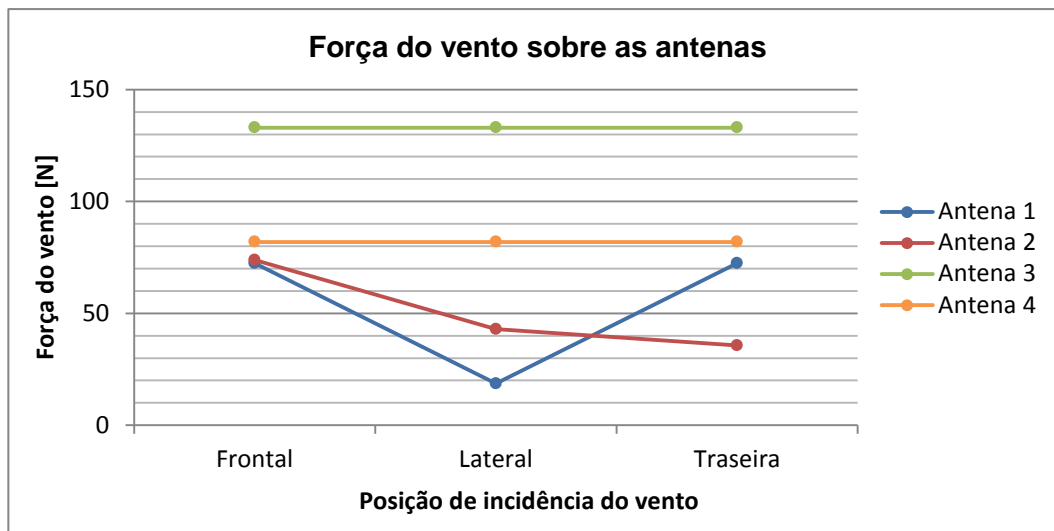


Gráfico 4.23 - Força do vento nas antenas quanto à direção de incidência do vento.

Quadro 4.33 - Força do vento nas antenas quanto à direção de incidência do vento.

Posição	Força do vento [N]			
	Antena 1	Antena 2	Antena 3	Antena 4
Frontal	72,41	73,85	132,98	81,91
Lateral	18,62	42,93	132,98	81,91
Traseira	72,41	35,65	132,98	81,91

Verifica-se que a força do vento varia de forma significativa com a incidência do vento, nas antenas dos tipos 1 e 2. Os maiores valores ocorrem nas faces frontal e traseira de incidência do vento, onde as áreas de referência são maiores. Se se observarem os resultados apresentados com maior detalhe no Apêndice IV, constata-se que, apesar de não se verificar um padrão nas variações dos coeficientes de força, para cada tipo de antena, o aumento significativo da área de referência faz com que a incidência mais grave aconteça nas faces com maior área de referência. A variação dos coeficientes de força, em função da direção, deve-se à variação da forma da área respetiva em que o vento incide.

No estudo relativo à posição ao longo do comprimento da torre e à quantidade de antenas, no qual serão consideradas apenas as antenas dos tipos 3 e 4, pelas razões anteriormente referidas, admitiu-se que todas as antenas se encontram direcionadas para a frente, em relação à ação do vento. Já em relação às antenas dos tipos 1 e 2, utilizadas no estudo das interfaces de topo, é importante verificar a influência da incidência do vento, já que os valores da força atuante variam, como foi visto a partir dos resultados obtidos.

As antenas nas torres de telecomunicações podem variar principalmente quanto a dois aspetos - a sua quantidade e a posição em que são colocadas ao longo da altura da

torre - que vão ser analisados seguidamente. No entanto, também outros aspetos podem variar, tais como o tipo de antena, que já foi abordado, ou a interface de ligação à torre, sobretudo no topo da estrutura, assunto que será abordado mais à frente.

4.4.1.1. Estudo da influência da quantidade de antenas

O estudo da influência da quantidade de antenas tem como objetivo perceber de que forma o acréscimo de antenas, numa posição fixa, faz variar os efeitos da ação do vento na estrutura. Para tal, serão colocadas três quantidades diferentes de antenas 3 e 4 em cada uma das torres, apenas na posição frontal em relação à incidência do vento, e registados os valores dos esforços na base, e do deslocamento e da rotação no topo de cada torre.

Quadro 4.34 - Casos considerados para o estudo da influência da quantidade de antenas.

Modelo	Antena	z [m]	n
A C	Antena 3	20	4
	Antena 4	25	8
		30	12
B D	Antena 3	20	4
	Antena 4	30	8
		40	12

Visto o estudo da influência da variação da quantidade de antenas num modelo ser representativo da forma como os resultados variam de uma forma global, nos diferentes modelos, apresentam-se os resultados apenas para o modelo B, que corresponde a uma torre de telecomunicações composta por troços de tronco cilíndrico e secção transversal circular, com 40 m de altura. Os resultados obtidos para os restantes modelos de torres são apresentados no Apêndice IV.

Mostram-se seguidamente os resultados obtidos para a variação da quantidade de antenas dos tipos 3 e 4 colocadas a uma altura de 40 m. Considera-se que todos os modelos de torres se encontram localizados em zona do tipo A, e em terreno da categoria IV com orografia plana. Todos os resultados da variação são calculados em relação a uma situação de referência, que corresponde a uma torre sem qualquer antena ou outro equipamento instalados. Embora tal não seja típico em torres de telecomunicações, considerou-se a colocação de 8 ou 12 antenas a uma mesma altura, com a face frontal em relação à direção de incidência do vento, para analisar a influência destes elementos.

Assim, no caso da colocação de diferentes quantidades de antenas do tipo 3, a uma altura de 40 m, na torre representada pelo modelo B, foram obtidos os seguintes resultados:

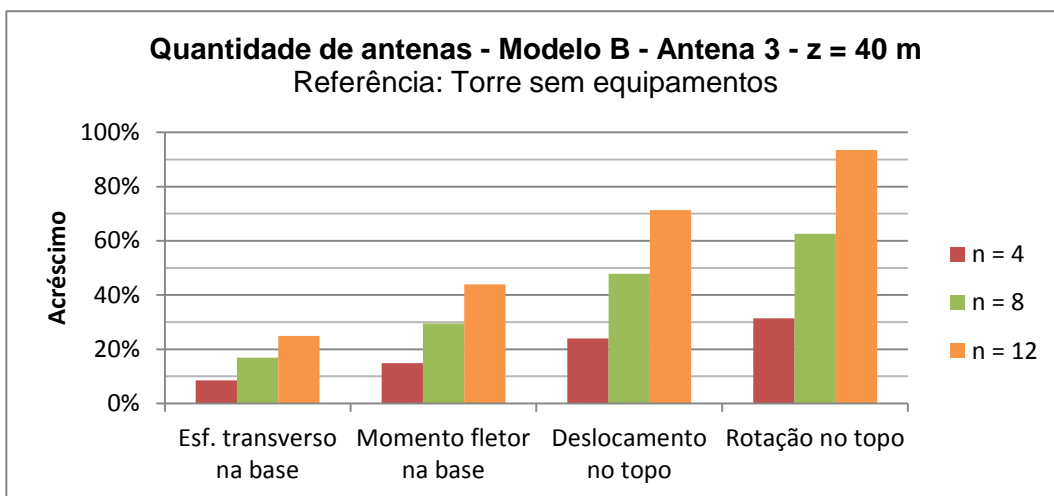


Gráfico 4.24 – Variação da quantidade de antenas do tipo 3, aos 40 m de altura, no modelo B.

Quadro 4.35 - Variação da quantidade de antenas do tipo 3, aos 40 m de altura, no modelo B.

Quantidade de antenas - Modelo B - Antena 3 - z = 40 m								
Quantidade	Esf. transverso na base		Momento fletor na base		Deslocamento no topo		Rotação no topo	
	V_0 [kN]	ΔV_0	M_0 [kNm]	ΔM_0	u_1 [m]	Δu_1	θ_1 [rad]	$\Delta \theta_1$
n = 0	14,91	-	271,64	-	0,266	-	0,011	-
n = 4	16,18	9%	312,03	15%	0,330	24%	0,015	31%
n = 8	17,42	17%	351,73	29%	0,393	48%	0,018	63%
n = 12	18,63	25%	390,84	44%	0,456	71%	0,022	93%

Também no modelo B, os resultados obtidos no estudo da influência da quantidade de antenas do tipo 4, colocadas a uma altura de 40 m, são os a seguir apresentados.

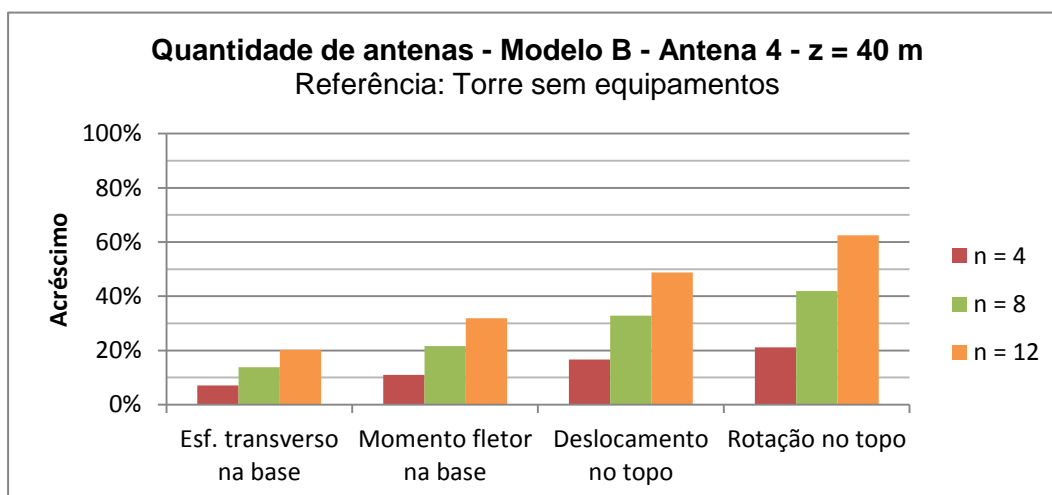


Gráfico 4.25 - Variação da quantidade de antenas do tipo 4, aos 40 m de altura, no modelo B.

Quadro 4.36 - Variação da quantidade de antenas do tipo 4, aos 40 m de altura, no modelo B.

Quantidade de antenas - Modelo B - Antena 4 - z = 40 m								
Quantidade	Esf. transverso na base		Momento fletor na base		Deslocamento no topo		Rotação no topo	
	V_0 [kN]	ΔV_0	M_0 [kNm]	ΔM_0	u_1 [m]	Δu_1	θ_1 [rad]	$\Delta \theta_1$
n = 0	14,91	-	271,64	-	0,266	-	0,011	-
n = 4	15,96	7%	301,41	11%	0,310	17%	0,013	21%
n = 8	16,96	14%	330,23	22%	0,353	33%	0,016	42%
n = 12	17,92	20%	358,24	32%	0,396	49%	0,018	62%

Os resultados obtidos, para o modelo B, relativos à influência da variação da quantidade de antenas dos tipos 3 e 4, colocadas no topo da torre, aos 40 m de altura, mostram que os valores dos esforços na base, e do deslocamento e da rotação no topo aumentam de forma significativa com o acréscimo de antenas. A adição de 12 antenas, aos 40 m de altura, implica um aumento do esforço transversal na base da torre de 25% e de 20%, nos casos de antenas do tipo 3 e do tipo 4 respetivamente, em relação à torre de referência, sem qualquer antena instalada no seu fuste. Os restantes parâmetros, nomeadamente o momento fletor na base, o deslocamento e a rotação no topo, apresentam variações ainda mais significativas que a do esforço transversal na base.

Através da análise dos parâmetros que entram no cálculo da força do vento, consegue-se perceber os motivos da variação dos valores observados. Apresentam-se em seguida os resultados obtidos para a adição de antenas do tipo 3 e 4, a 40 m de altura de uma torre do modelo B. A variação de cada parâmetro é relativa a uma situação da torre sem qualquer antena instalada, exceto no caso dos valores relativos ao coeficiente de força das antenas, em que se considera a variação absoluta dos seus valores em relação à situação da torre com 4 antenas instaladas. Quanto aos restantes parâmetros, considera-se a pressão dinâmica de pico a 40 m de altura, o coeficiente estrutural da torre, o coeficiente de força médio da torre, a soma dos valores da área de referência total e a força do vento total, no conjunto da torre e das antenas.

Os resultados obtidos para os restantes casos estudados são apresentados no Apêndice IV.

No caso da colocação de antenas do tipo 3 a 40 m de altura numa torre do modelo B, foram obtidos os seguintes resultados para os parâmetros da força do vento, em relação a uma situação de referência, da torre sem antenas.

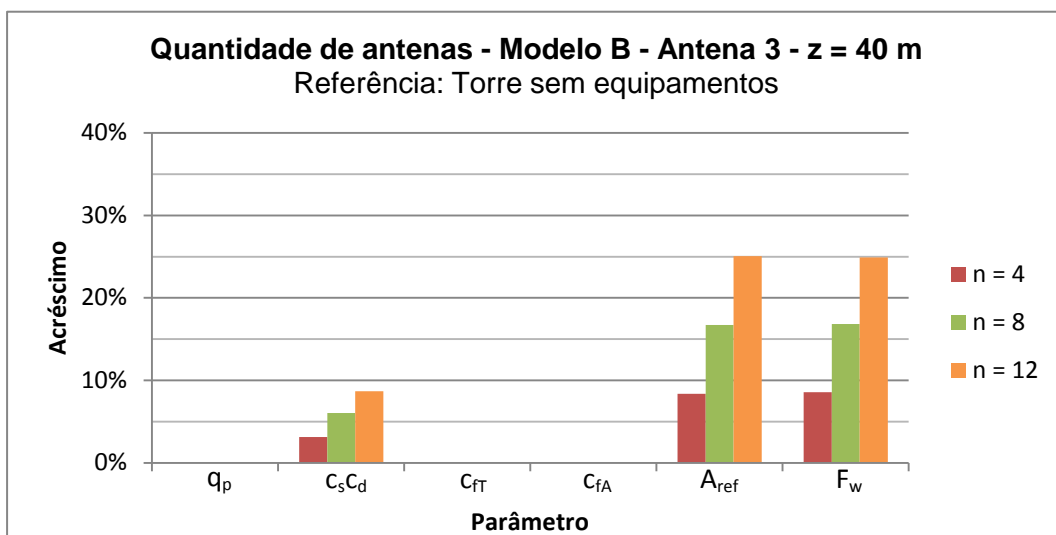


Gráfico 4.26 - Variação dos parâmetros da pressão dinâmica de pico com a alteração da quantidade de antenas do tipo 3, aos 40 m de altura, no modelo B.

q_p – Pressão dinâmica de pico aos 40 m de altura; $C_s C_d$ – Coeficiente estrutural; C_{FT} – Coeficiente de força médio da torre; C_{fA} – Coeficiente de força das antenas; A_{ref} – Área de referência total (Torre + Antenas); F_w – Força do vento total (Torre + Antenas).

Quadro 4.37 - Variação dos parâmetros da pressão dinâmica de pico com a alteração da quantidade de antenas do tipo 3, aos 40 m de altura, no modelo B.

Quantidade de antenas - Modelo B - Antena 3 - z = 40 m												
Quant.	q_p [Pa]	Δq_p	$C_s C_d$	$\Delta C_s C_d$	C_{FT}	ΔC_{FT}	C_{fA}	ΔC_{fA}	A_{ref} [m ²]	ΔA_{ref}	F_w [kN]	ΔF_w
n = 0	986,47	-	1,08	-	0,68	-	0,00	-	27,23	-	14,91	-
n = 4	986,47	0%	1,12	3%	0,68	0%	0,36	-	29,50	8%	16,18	9%
n = 8	986,47	0%	1,15	6%	0,68	0%	0,36	0%	31,78	17%	17,42	17%
n = 12	986,47	0%	1,18	9%	0,68	0%	0,36	0%	34,06	25%	18,63	25%

No caso da colocação de antenas do tipo 4 a 40 m de altura numa torre do modelo B, foram obtidos os seguintes resultados para os parâmetros da força do vento, também em relação a uma situação de referência, da torre sem antenas.

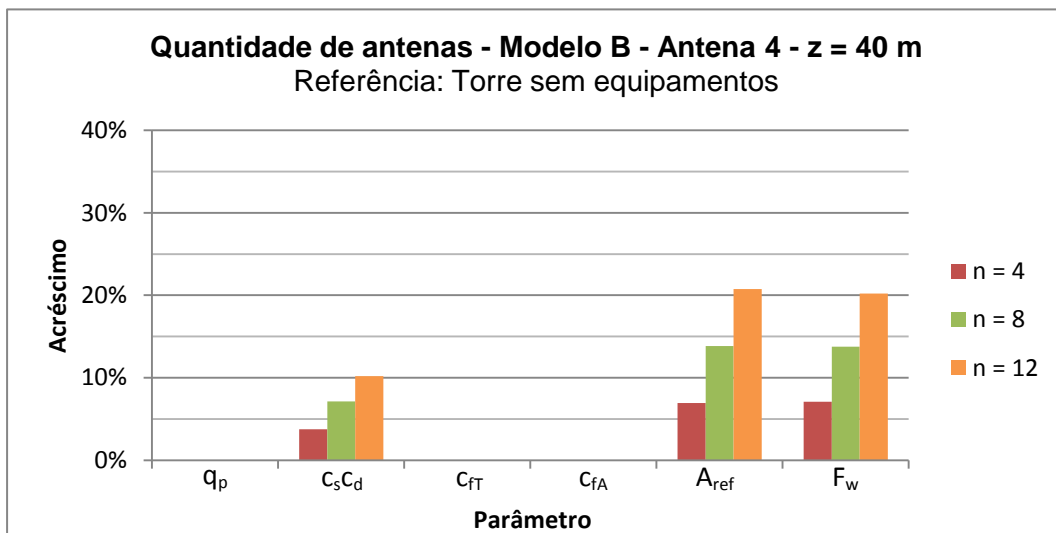


Gráfico 4.27 - Variação dos parâmetros da pressão dinâmica de pico com a alteração da quantidade de antenas do tipo 4, aos 40 m de altura, no modelo B.

q_p – Pressão dinâmica de pico aos 40 m de altura; $c_s c_d$ – Coeficiente estrutural; c_{fT} – Coeficiente de força médio da torre; c_{fA} – Coeficiente de força das antenas; A_{ref} – Área de referência total (Torre + Antenas); F_w – Força do vento total (Torre + Antenas).

Quadro 4.38 - Variação dos parâmetros da pressão dinâmica de pico com a alteração da quantidade de antenas do tipo 4, aos 40 m de altura, no modelo B.

Quantidade de antenas - Modelo B - Antena 4 - z = 40 m												
Quant.	q_p [Pa]	Δq_p	$c_s c_d$	$\Delta c_s c_d$	c_{fT}	Δc_{fT}	c_{fA}	Δc_{fA}	A_{ref} [m ²]	ΔA_{ref}	F_w [kN]	ΔF_w
n = 0	986,47	-	1,08	-	0,68	-	0,00	-	27,23	-	14,91	-
n = 4	986,47	0%	1,12	4%	0,68	0%	0,27	-	29,11	7%	15,96	7%
n = 8	986,47	0%	1,16	7%	0,68	0%	0,27	0%	31,00	14%	16,96	14%
n = 12	986,47	0%	1,19	10%	0,68	0%	0,27	0%	32,88	21%	17,92	20%

Com base nos resultados obtidos, constata-se que o acréscimo de antenas, a uma mesma altura, implica um aumento dos valores da força do vento de cerca de 25% e de 20%, nos casos de antenas dos tipos 3 e 4 respetivamente, em relação a uma situação de referência, de uma torre sem antenas. Este aumento deve-se à variação de dois parâmetros, nomeadamente do aumento da área de referência, devido ao aumento do número de antenas e consequente área de exposição, e do aumento do coeficiente estrutural, pois a massa total da estrutura é maior, o que interfere no valor do coeficiente

estrutural. Por outro lado, quanto aos restantes parâmetros, não se verifica qualquer variação, já que a pressão dinâmica de pico, para uma altura constante, é independente de alterações na configuração da estrutura, e porque as superfícies de contorno do vento não são modificadas, não alterando assim os coeficientes de força, quer da torre quer das antenas.

4.4.1.2. Estudo da posição das antenas

Para além da influência do número de antenas colocadas a uma dada altura, interessa também conhecer a influência da sua posição ao longo da altura da torre. Para tal procedeu-se à colocação de um número fixo de antenas dos tipos 3 e 4, em três alturas distintas, ao longo da altura de cada um dos modelos de torres, e procedeu-se à comparação dos valores obtidos para os esforços na base, e para o deslocamento e a rotação no topo da torre, considerando que as antenas se encontram sujeitas a um vento frontal.

Os casos considerados para o estudo da influência da posição de antenas são os indicados no quadro 4.39.

Quadro 4.39 - Casos considerados para o estudo da influência da posição de antenas.

Modelo	Antena	n	z [m]
A C	Antena 3	4	20
	Antena 4	8	25
		12	30
B D	Antena 3	4	20
	Antena 4	8	30
		12	40

No caso dos modelos de torres com 30 m de altura foram colocadas diferentes quantidades de antenas (4, 8 e 12 antenas) aos 20 m, 25 m e 30 m de altura, enquanto que nos modelos de torres com 40 m de altura se colocaram iguais quantidades de antenas aos 20 m, 30 m e 40 m de altura.

Tal como no estudo apresentado na secção anterior, sobre a influência da quantidade de antenas, considerou-se, para todos os modelos de torres, que se encontram localizadas numa zona do tipo A, em terreno da categoria IV e com orografia plana, sendo a variação dos resultados obtidos calculada em relação a uma situação de referência, de uma

torre sem qualquer antena instalada. Apresentam-se em seguida os resultados obtidos para o modelo B, sendo os restantes resultados obtidos, referentes aos outros modelos de torres, apresentados no Apêndice IV.

Realça-se novamente que, embora a colocação a uma mesma altura de 8 ou 12 antenas, sujeitas a uma incidência frontal do vento, não seja usual em torres de telecomunicações, se optou por este cenário numa perspetiva conservativa dos resultados relativos a este estudo.,

Apresentam-se em seguida os resultados obtidos no caso da alteração da posição de 12 antenas do tipo 3, numa torre do modelo B, para as diferentes alturas consideradas ao longo da estrutura. Os resultados obtidos nos restantes casos são apresentados no Apêndice IV.

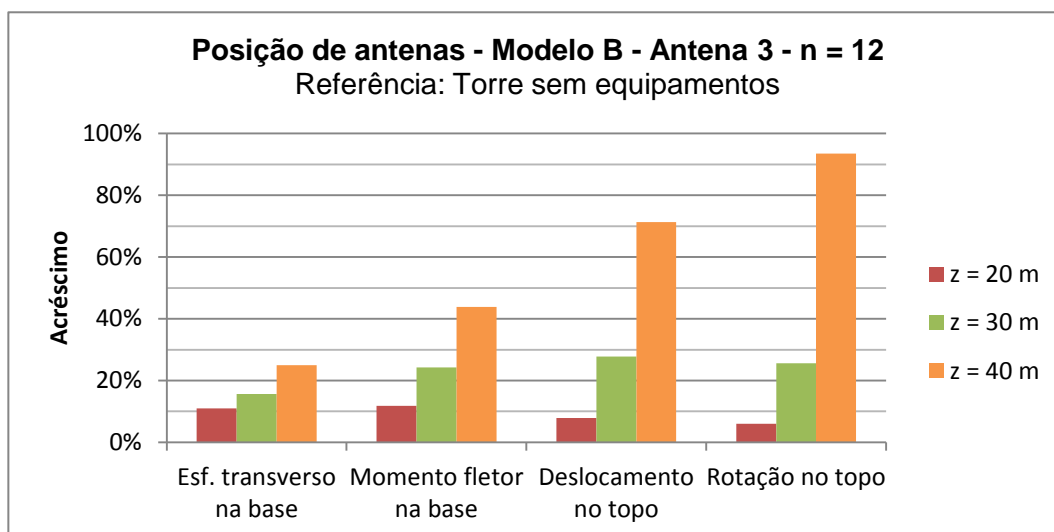


Gráfico 4.28 - Variação da posição de 12 antenas do tipo 3, no modelo B.

Quadro 4.40 - Variação da posição de 12 antenas do tipo 3, no modelo B.

Posição de antenas - Modelo B - Antena 3 - n = 12								
Posição	Esf. transverso na base		Momento fletor na base		Deslocamento no topo		Rotação no topo	
	V_0 [kN]	ΔV_0	M_0 [kNm]	ΔM_0	u_1 [m]	Δu_1	θ_1 [rad]	$\Delta \theta_1$
Sem antenas	14,91	-	271,64	-	0,266	-	0,011	-
z = 20 m	16,55	11%	303,61	12%	0,287	8%	0,012	6%
z = 30 m	17,25	16%	337,44	24%	0,340	28%	0,014	26%
z = 40 m	18,63	25%	390,84	44%	0,456	71%	0,022	93%

No caso da alteração da posição de 12 antenas do tipo 4, ao longo da altura de uma torre do modelo B, obtiveram-se os seguintes resultados.

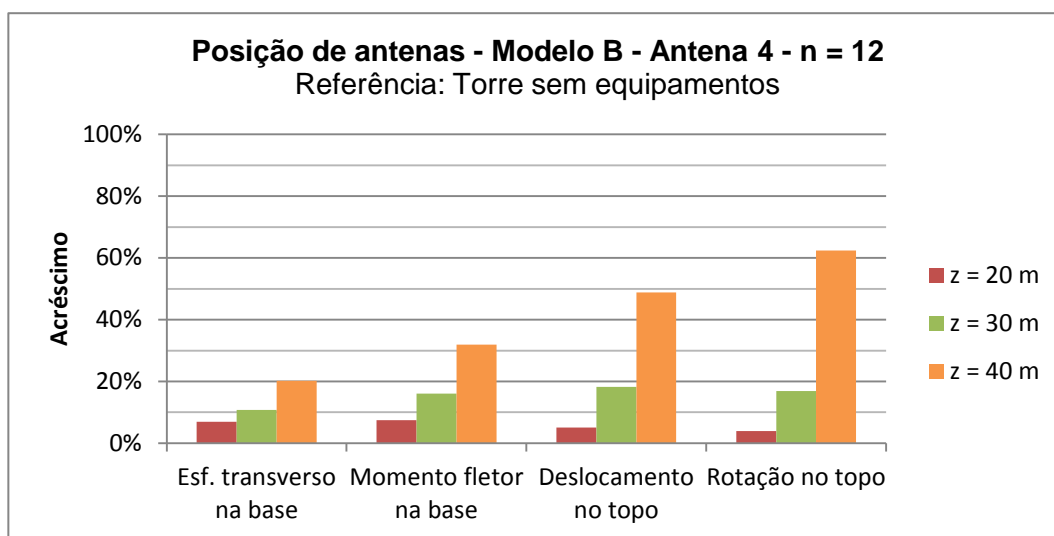


Gráfico 4.29 - Variação da posição de 12 antenas do tipo 4, no modelo B.

Quadro 4.41 - Variação da posição de 12 antenas do tipo 4, no modelo B.

Posição de antenas - Modelo B - Antena 4 - n = 12								
Posição	Esf. transverso na base		Momento fletor na base		Deslocamento no topo		Rotação no topo	
	V_0 [kN]	ΔV_0	M_0 [kNm]	ΔM_0	u_1 [m]	Δu_1	θ_1 [rad]	$\Delta \theta_1$
Sem antenas	14,91	-	271,64	-	0,266	-	0,011	-
z = 20 m	15,95	7%	291,83	7%	0,279	5%	0,012	4%
z = 30 m	16,51	11%	315,12	16%	0,315	18%	0,013	17%
z = 40 m	17,92	20%	358,24	32%	0,396	49%	0,018	62%

A variação dos valores dos esforços na base, e do deslocamento e da rotação no topo da torre, à medida que se altera a posição das 12 antenas, é relativamente significativa. Por exemplo, verifica-se que colocando 12 antenas do tipo 3, na torre B, à altura de 20 m acresce em 11% o valor do esforço transversal na base, em relação a uma situação de referência, da torre sem antenas instaladas. Colocando a mesma quantidade de antenas do tipo 3 aos 40 m de altura da torre, verifica-se um aumento de 25% do esforço transversal na base, em relação à mesma situação de referência. As variações dos restantes parâmetros (momento fletor na base, deslocamento e rotação no topo da torre) com a alteração da posição do grupo de 12 antenas são ainda mais significativas. Este facto atesta que a alteração da posição das antenas, ao longo da altura da torre, tem uma influência importante no efeito da ação do vento sobre a estrutura.

Porém, observando os resultados obtidos na caso da alteração da posição de uma menor quantidade de antenas (grupos de 4 antenas ou de 8 antenas), verifica-se que os acréscimos dos valores dos mesmos parâmetros (esforços na base e deslocamento e rotação no topo da torre) são bastante menores, pelo que se conclui que a influência da posição das antenas ao longo da altura da torre depende fortemente do número de antenas em questão.

Quanto à variação dos parâmetros da força do vento, apresentam-se em seguida os resultados obtidos para o modelo B, no caso da deslocação de 12 antenas dos tipos 3 e 4, ao longo das alturas de 20 m, 30 m e 40 m. Os restantes resultados são apresentados no Apêndice IV. Tal como na análise efetuada na secção anterior, relativamente à influência da quantidade de antenas, a variação de cada parâmetro é calculada em relação a uma situação de referência, de uma torre sem qualquer antena instalada, exceto no caso dos valores relativos ao coeficiente de força das antenas, em que se considera a variação dos seus valores em relação a uma torre com 12 antenas instaladas aos 20 m de altura. Quanto aos restantes parâmetros, considera-se a pressão dinâmica de pico à altura respetiva, o coeficiente estrutural da torre, o coeficiente de força médio da torre, a soma dos valores da área de referência total e a força do vento total, no conjunto da torre e das antenas.

Para a variação da posição de 12 antenas do tipo 3, no modelo B, nas alturas de 20 m, 30 m e 40 m, obtiveram-se os seguintes valores.

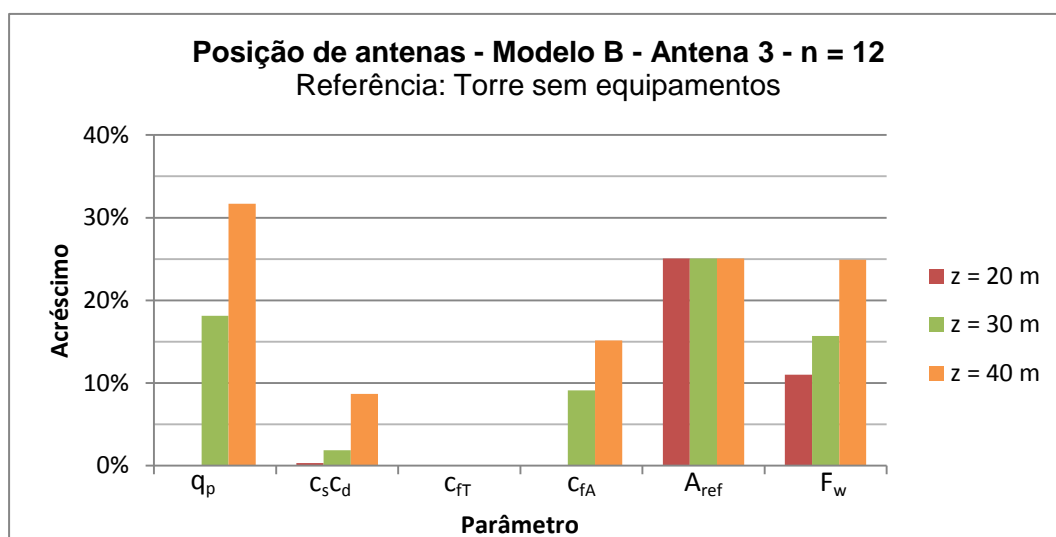


Gráfico 4.30 - Variação dos parâmetros da força do vento com a alteração da posição de 12 antenas do tipo 3, no modelo B.

q_p – Pressão dinâmica de pico à altura respetiva; $c_s c_d$ – Coeficiente estrutural; c_{fT} – Coeficiente de força médio da torre; c_{fA} – Coeficiente de força das antenas; A_{ref} – Área de referência total (Torre + Antenas); F_w – Força do vento total (Torre + Antenas).

Quadro 4.42 - Variação dos parâmetros da força do vento com a alteração da posição de 12 antenas do tipo 3, no modelo B.

Posição de antenas - Modelo B - Antena 3 - n = 12												
Posição	q_p [Pa]	Δq_p	$c_s c_d$	$\Delta c_s c_d$	c_{fT}	Δc_{fT}	c_{fA}	Δc_{fA}	A_{ref} [m ²]	ΔA_{ref}	F_w [kN]	ΔF_w
Sem ant.	749,16	-	1,08	-	0,68	-	0,00	-	27,23	-	14,91	-
z = 20 m	749,16	0%	1,09	0%	0,68	0%	0,31	-	34,06	25%	16,55	11%
z = 30 m	885,06	18%	1,10	2%	0,68	0%	0,34	9%	34,06	25%	17,25	16%
z = 40 m	986,47	32%	1,18	9%	0,68	0%	0,36	15%	34,06	25%	18,63	25%

Quanto à variação dos parâmetros da força do vento, no modelo B, para a alteração da posição de 12 antenas do tipo 4, registaram-se os seguintes valores.

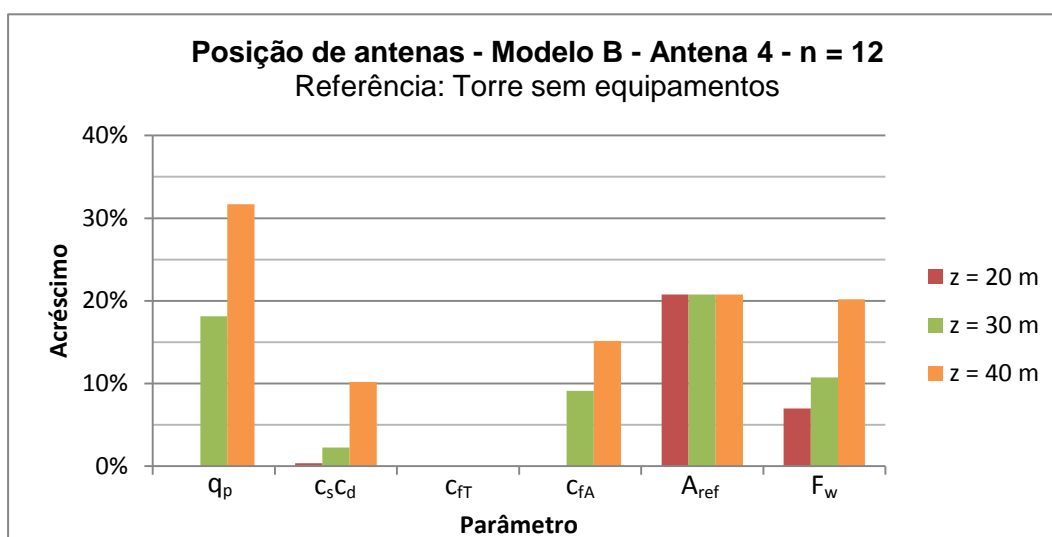


Gráfico 4.31 - Variação dos parâmetros da força do vento com a alteração da posição de 12 antenas do tipo 4, no modelo B.

q_p – Pressão dinâmica de pico à altura respetiva; $c_s c_d$ – Coeficiente estrutural;
 c_{fT} – Coeficiente de força médio da torre; c_{fA} – Coeficiente de força das antenas; A_{ref} – Área de referência total (Torre + Antenas); F_w – Força do vento total (Torre + Antenas).

Quadro 4.43 - Variação dos parâmetros da força do vento com a alteração da posição de 12 antenas do tipo 4, no modelo B.

Posição de antenas - Modelo B - Antena 4 - n = 12												
Posição	q_p [Pa]	Δq_p	$c_s c_d$	$\Delta c_s c_d$	c_{fT}	Δc_{fT}	c_{fA}	Δc_{fA}	A_{ref} [m ²]	ΔA_{ref}	F_w [kN]	ΔF_w
Sem ant.	749,16	-	1,08	-	0,68	-	0,00	-	27,23	-	14,91	-
z = 20 m	749,16	0%	1,09	0%	0,68	0%	0,23	-	32,88	21%	15,95	7%
z = 30 m	885,06	18%	1,11	2%	0,68	0%	0,25	9%	32,88	21%	16,51	11%
z = 40 m	986,47	32%	1,19	10%	0,68	0%	0,27	15%	32,88	21%	17,92	20%

São vários os parâmetros que sofrem alteração com a mudança de posição das antenas ao longo da altura da torre. É possível observar que os coeficientes de força a atribuir a cada antena aumentam com a alteração da sua posição para alturas maiores. Visto a pressão dinâmica de pico aumentar com a altura, a velocidade média do vento é também superior e o valor do número de Reynolds é assim afetado, influenciando os coeficientes de força das antenas. Em relação ao coeficiente de força médio da torre, observa-se que o facto de se movimentar antenas para diferentes alturas não afeta o seu valor.

Por último verifica-se que, ao se alterar a posição de 12 antenas para alturas superiores, aumenta o valor do coeficiente estrutural atribuído à torre, o que contribui igualmente para que a força do vento total, no conjunto do fuste com as antenas, seja maior.

4.4.1.3. Relação da quantidade com a posição de antenas

Depois dos estudos sobre a influência individual da quantidade e da posição das antenas, interessa relacionar os resultados obtidos no conjunto destes casos. Assim, são seguidamente apresentados os resultados da variação dos esforços na base, e do deslocamento e da rotação no topo da torre do modelo B, em relação a uma situação de referência de uma torre sem qualquer equipamento instalado. Apenas se apresentam os valores referentes à antena do tipo 3. Todos os restantes resultados são apresentados no Apêndice IV.

Quanto à variação do esforço transversal na base da torre do modelo B, no caso da utilização de antenas do tipo 3, obtiveram-se os seguintes resultados.

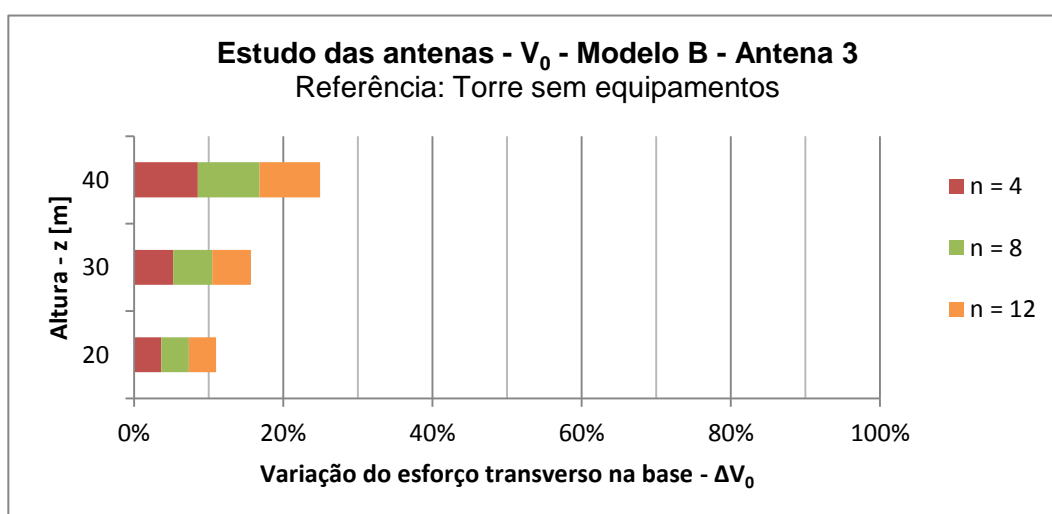


Gráfico 4.32 - Variação do esforço transversal na base da torre B, na colocação de antenas do tipo 3.

Quadro 4.44 - Variação do esforço transversal na base da torre B, na colocação de antenas do tipo 3.

Estudo das antenas - V_0 - Modelo B - Antena 3							
z [m]	n = 0	n = 4		n = 8		n = 12	
	V_0 [kN]	V_0 [kN]	ΔV_0	V_0 [kN]	ΔV_0	V_0 [kN]	ΔV_0
20	14,91	15,46	4%	16,00	7%	16,55	11%
30	14,91	15,69	5%	16,47	10%	17,25	16%
40	14,91	16,18	9%	17,42	17%	18,63	25%

Relativamente à variação do momento fletor na base da torre B, no caso da colocação de antenas do tipo 3, os resultados obtidos são os seguintes.

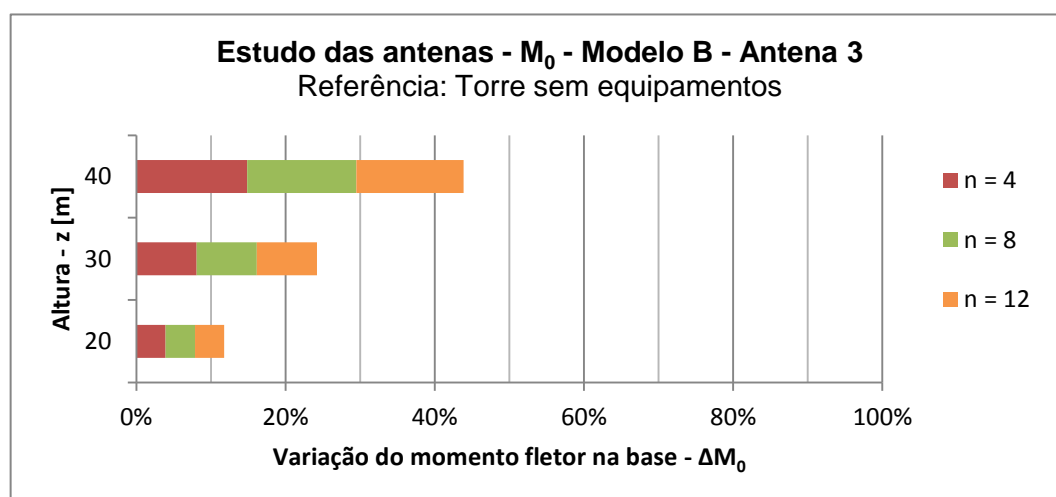


Gráfico 4.33 - Variação do momento fletor na base da torre B, na colocação de antenas do tipo 3.

Quadro 4.45 - Variação do momento fletor na base da torre B, na colocação de antenas do tipo 3.

Estudo das antenas - M_0 - Modelo B - Antena 3							
z [m]	n = 0	n = 4		n = 8		n = 12	
	M_0 [kNm]	M_0 [kNm]	ΔM_0	M_0 [kNm]	ΔM_0	M_0 [kNm]	ΔM_0
20	271,64	282,30	4%	292,96	8%	303,61	12%
30	271,64	293,60	8%	315,54	16%	337,44	24%
40	271,64	312,03	15%	351,73	29%	390,84	44%

Quanto à variação do deslocamento no topo da torre B, no caso da colocação de antenas do tipo 3, temos o seguinte.

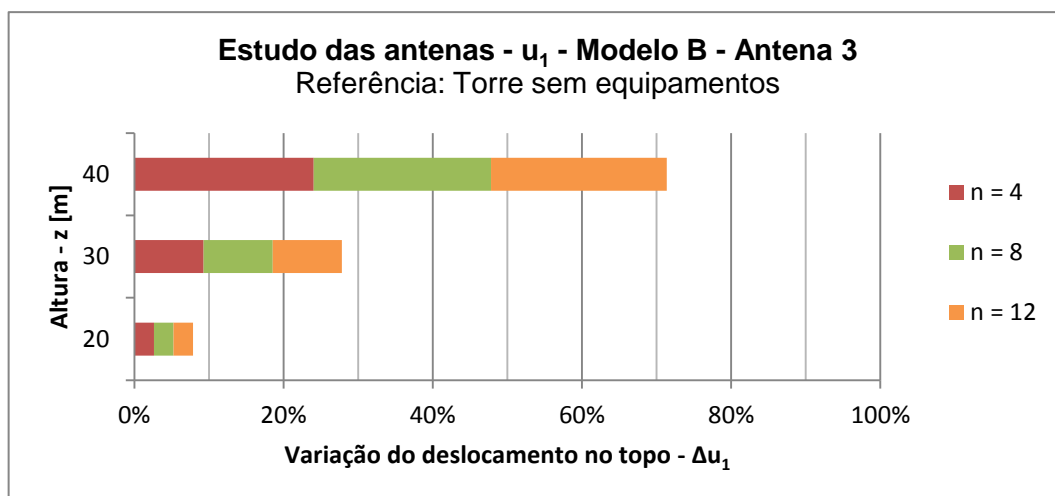


Gráfico 4.34 - Variação do deslocamento no topo da torre B, na colocação de antenas do tipo 3.

Quadro 4.46 - Variação do deslocamento no topo da torre B, na colocação de antenas do tipo 3.

Estudo das antenas - u_1 - Modelo B - Antena 3							
z [m]	n = 0	n = 4		n = 8		n = 12	
	u_1 [m]	u_1 [m]	Δu_1	u_1 [m]	Δu_1	u_1 [m]	Δu_1
20	0,266	0,273	3%	0,280	5%	0,287	8%
30	0,266	0,291	9%	0,315	19%	0,340	28%
40	0,266	0,330	24%	0,393	48%	0,456	71%

Por último, quanto à variação da rotação no topo do modelo B, no caso da colocação de antenas do tipo 3, temos os seguintes resultados.

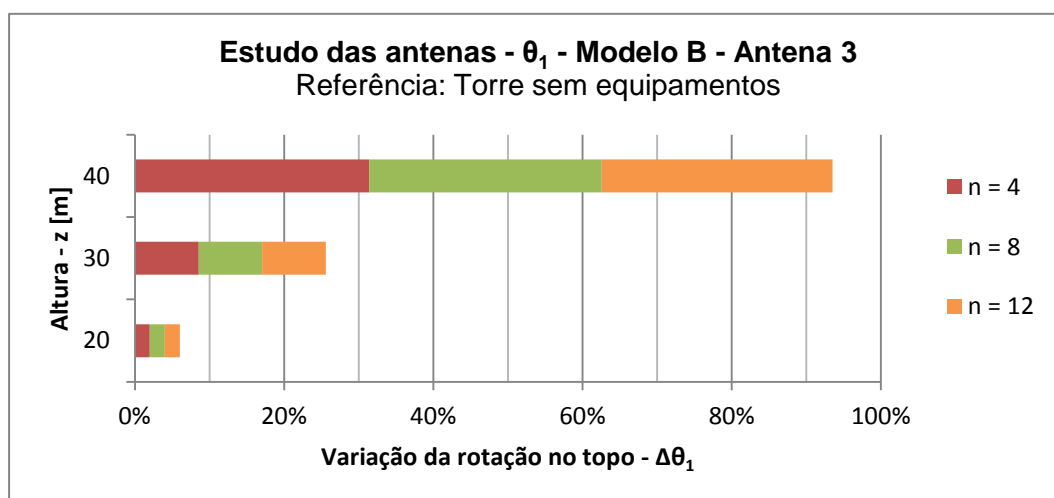


Gráfico 4.35 - Variação da rotação no topo da torre B, na colocação de antenas do tipo 3.

Quadro 4.47 - Variação da rotação no topo da torre B, na colocação de antenas do tipo 3.

Estudo das antenas - θ_1 - Modelo B - Antena 3							
z [m]	n = 0	n = 4		n = 8		n = 12	
	θ_1 [rad]	θ_1 [rad]	$\Delta\theta_1$	θ_1 [rad]	$\Delta\theta_1$	θ_1 [rad]	$\Delta\theta_1$
20	0,011	0,011	2%	0,012	4%	0,012	6%
30	0,011	0,012	9%	0,013	17%	0,014	26%
40	0,011	0,015	31%	0,018	63%	0,022	93%

Pela análise dos resultados, é possível confirmar a variação significativa que se observou no estudo do efeito conjunto destes dois fatores, ou seja, que alterar a quantidade de antenas e a sua posição ao longo da altura da torre, pode influenciar de forma importante os valores dos esforços na base, e do deslocamento e da rotação no topo, por ação do vento.

Tal como nos estudos dos efeitos individuais destes fatores, é possível verificar que a variação é mais significativa nos valores máximos da rotação no topo da estrutura (até 93% de aumento) e tem menor importância nos valores do esforço transversal na base (até 25% de aumento).

Analisando os valores da variação do esforço transversal na base, é possível verificar que a colocação de apenas 4 antenas no topo da estrutura, implicando um acréscimo de 11%, é mais grave que a colocação de 12 antenas aos 20 m de altura, que provoca um acréscimo de 9%. Este facto agrava-se ainda mais se observarmos os valores de qualquer um dos restantes parâmetros, cuja variação se acentua ainda mais. No caso do deslocamento no topo da torre B, por exemplo, verifica-se que ter apenas 4 antenas no topo, aos 40 m de altura, aumenta o valor do deslocamento em 24%, enquanto que a colocação de 12 antenas aos 20 m implica um aumento de apenas 8%, relativamente a uma torre sem qualquer antena colocada, em ambos os casos.

Os resultados obtidos para os restantes modelos, bem como no caso da antena do tipo 4, mostram igualmente que a alteração da posição das antenas para cotas mais altas é mais grave que a colocação de uma maior quantidade de antenas, para a mesma altura.

Esta análise permite atestar a sensibilidade da variação da ação do vento em relação a qualquer um destes aspetos, ou seja, quer a alteração da quantidade de antenas, quer da sua posição ao longo do comprimento da torre, faz com que os valores máximos dos esforços na base, e do deslocamento e da rotação no topo da torre se alterem significativamente.

Quanto aos parâmetros da força do vento, analisada em cada um dos estudos anteriores, compara-se uma situação de alteração da quantidade de antenas com a alteração da posição. Para o modelo relativo à torre B, considera-se então a alteração de 4 para 12 antenas do tipo 3 aos 40 m de altura, e a alteração de 12 antenas do tipo 3 de 20 para 40 m de altura.

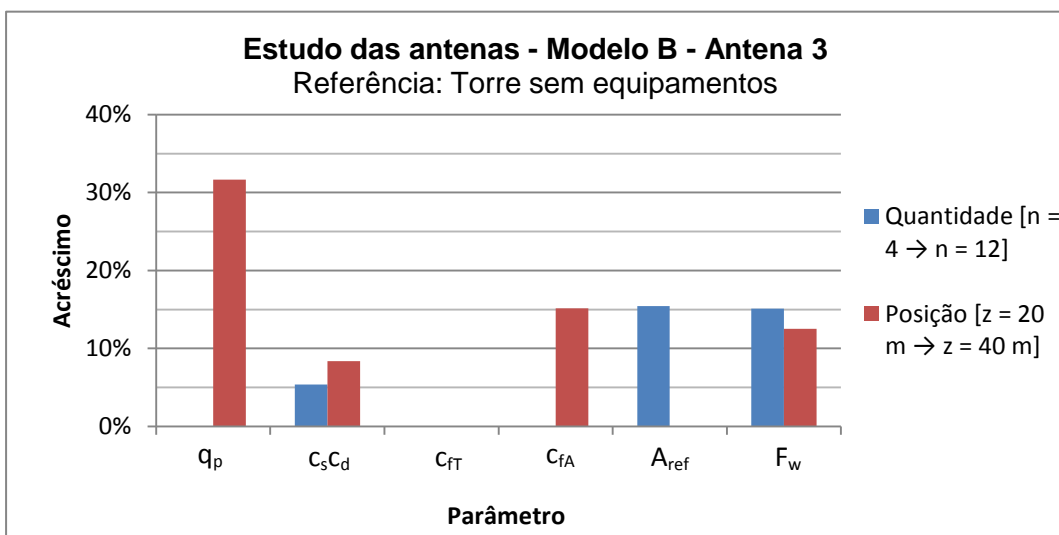


Gráfico 4.36 - Variação dos parâmetros da força do vento para a variação da quantidade e posição de antenas do tipo 3, no modelo B.

q_p – Pressão dinâmica de pico à altura respetiva; $c_s c_d$ – Coeficiente estrutural; c_{FT} – Coeficiente de força médio da torre; c_{fA} – Coeficiente de força das antenas; A_{ref} – Área de referência total (Torre + Antenas); F_w – Força do vento total (Torre + Antenas).

Quadro 4.48 - Variação dos parâmetros da força do vento para a variação da quantidade e posição de antenas do tipo 3, no modelo B.

Estudo das antenas - Modelo B - Antena 3												
Análise da alteração da quantidade de antenas - $n = 4$ à $n = 12$ [$z = 40$ m]												
Quant.	q_p [Pa]	Δq_p	$c_s c_d$	$\Delta c_s c_d$	c_{FT}	Δc_{FT}	c_{fA}	Δc_{fA}	A_{ref} [m ²]	ΔA_{ref}	F_w [kN]	ΔF_w
$n = 4$	986,47	-	1,12	-	0,68	-	0,36	-	29,50	-	16,18	-
$n = 12$	986,47	0%	1,18	5%	0,68	0%	0,36	0%	34,06	15%	18,63	15%
Análise da alteração da posição de antenas - $z = 20$ m à $z = 40$ m [$n = 12$]												
Posição	q_p [Pa]	Δq_p	$c_s c_d$	$\Delta c_s c_d$	c_{FT}	Δc_{FT}	c_{fA}	Δc_{fA}	A_{ref} [m ²]	ΔA_{ref}	F_w [kN]	ΔF_w
$z = 20$ m	749,16	-	1,09	-	0,68	-	0,31	-	34,06	-	16,55	-
$z = 40$ m	986,47	32%	1,18	8%	0,68	0%	0,36	15%	34,06	0%	18,63	13%

Como já havia sido verificado, os valores dos parâmetros da força do vento variam conforme se altera a quantidade ou posição das antenas ao longo do comprimento da torre. A grande diferença reside no facto de a área de referência ser maior, no caso do acréscimo de antenas, enquanto que na mudança para uma posição mais alta, crescem a pressão dinâmica de pico e os coeficientes de força. Em ambos os casos o coeficiente estrutural aumenta. É notório que, para o mesmo número de antenas, numa posição mais alta, a ação do vento será maior, o que acresce igualmente os coeficientes de força. Já no caso do aumento da quantidade de antenas, para a mesma posição, a ação do vento é igual, assim como os coeficientes de força, apenas se alterando a área que se encontra exposta ao vento, o que implica um conseqüente aumento da força do vento.

4.4.1.4. Estudo das interfaces de antenas

O estudo das interfaces de antenas tem como objetivo analisar os diferentes tipos destas estruturas metálicas de ligação das antenas à torre, usualmente colocadas no topo de torres de telecomunicações, e a sua influência na ação do vento sobre a estrutura. Como foi já visto na segunda secção, em que se descreveram as torres de telecomunicações existentes e os seus equipamentos habituais, podem existir vários tipos de interfaces e de combinações destas com braços de afastamento, o que aumenta bastante a diversidade destas estruturas. No entanto, existem algumas interfaces mais comuns, que podem ser englobadas em quatro tipos distintos.

Esta secção é dedicada ao estudo da influência da mudança de interface nos valores dos esforços na base, e no deslocamento e rotação no topo da estrutura. Para tal, são considerados quatro tipos diferentes de interfaces, representadas na Figura 4.19.

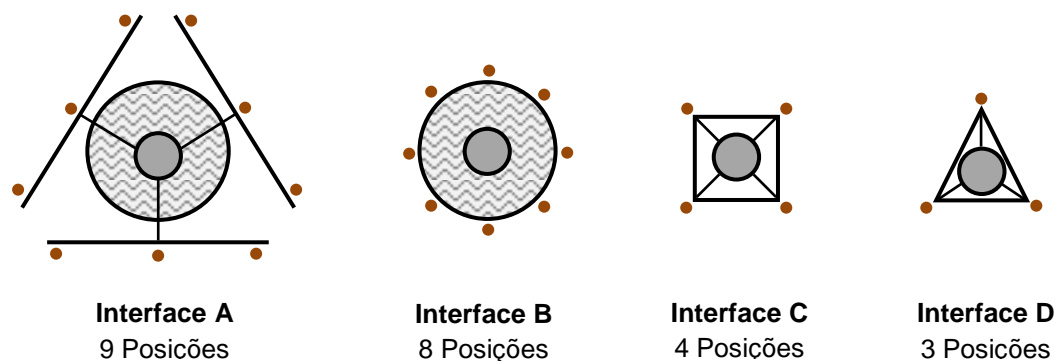


Figura 4.19 - Tipos de interfaces de antenas considerados para o estudo.

Quadro 4.49 - Características dos tipos de interfaces de antenas considerados para o estudo.

Interfaces de antenas					
Interface	$C_s C_d$	C_f	$A_{ref} [m^2]$		m [kg]
			Mínima	Máxima	
A	1,00	1,16	0,695	1,805	300
B	1,00	1,14	0,280	0,560	200
C	1,00	1,04	0,170	0,440	100
D	1,00	1,04	0,170	0,330	80

Para cada interface foi considerada uma área de referência mínima e máxima. A área de referência mínima corresponde à soma das áreas expostas ao vento dos elementos numa das faces da interface, enquanto que a área de referência máxima corresponde à soma das áreas de todos os elementos que compõem a interface. Como se desconhece a forma como o vento atua sobre estas estruturas, consideram-se estas duas áreas como valores extremos da zona onde o vento realmente atua. A Figura 4.20 indica como se consideraram ambas as áreas de referência para cada uma das interfaces. A zona sombreada a verde indica a área de referência mínima. O cálculo mais detalhado é apresentado no Apêndice V.

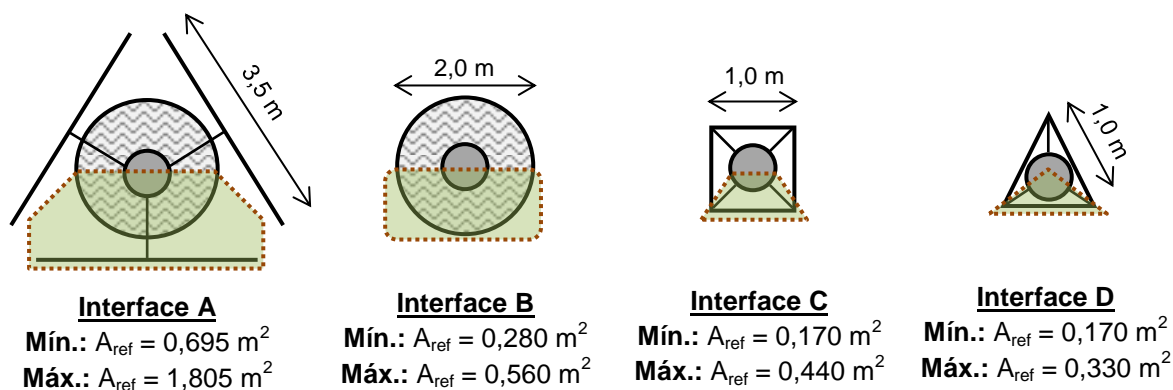


Figura 4.20 - Áreas de referência mínima e máxima para os 4 tipos de interfaces.

O coeficiente estrutural nos equipamentos é sempre considerado igual a 1,0 e os coeficientes de força foram determinados através da média dos valores máximos dos coeficientes de força para cada elemento da estrutura, como se pode ver no Apêndice V.

Entre os vários tipos de interfaces há que destacar principalmente dois aspetos: o número de antenas que cada um pode suportar, que pode ser variável, e as dimensões de cada interface, com áreas de exposição bem distintas.

Este estudo está dividido em duas partes, sendo que a primeira incide sobre a influência de cada interface e sobre diferentes configurações típicas de antenas, e a segunda sobre o fenómeno do efeito de interferência, a partir de estudos já realizados sobre este assunto. Os estudos serão realizados sobre os quatro modelos de torres anteriormente definidos, localizados numa zona do tipo A e em terreno da categoria IV.

Antes de se proceder ao estudo da influência da colocação de interfaces e de diferentes configurações de antenas habituais em torres de telecomunicações, é importante conhecer a sua influência individual e comparar, deste modo, a influência dos diferentes tipos considerados. Para isso, considera-se a atuação do vento aos 20 m de altura, numa zona do tipo A e num terreno da categoria IV, em ambas as áreas, mínima e máxima, correspondendo a uma pressão dinâmica de pico de 0,75 kPa.

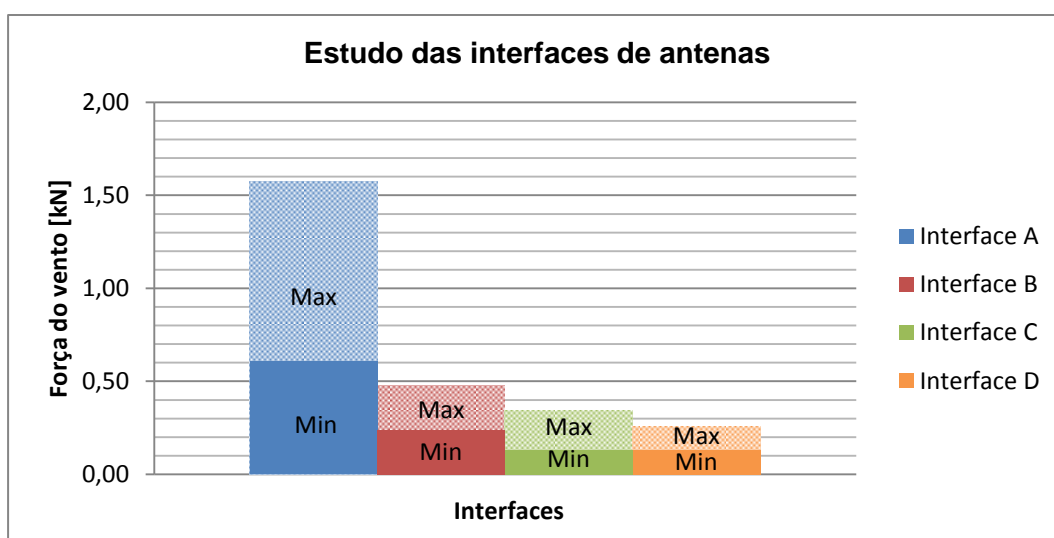


Gráfico 4.37 - Força do vento nas 4 interfaces de antenas para a área mínima e máxima.

Quadro 4.50 - Força do vento nas 4 interfaces de antenas para a área mínima e máxima.

Estudo das interfaces de antenas							
Interface	q_p [kPa]	$c_s c_d$	c_f	A_{ref} [m ²]		F_w [kN]	
				Mínima	Máxima	Mínima	Máxima
A	0,75	1,00	1,16	0,695	1,805	0,61	1,57
B		1,00	1,14	0,280	0,560	0,24	0,48
C		1,00	1,04	0,170	0,440	0,13	0,34
D		1,00	1,04	0,170	0,330	0,13	0,26

Através da análise dos resultados apresentados no Gráfico 4.37, é possível verificar que as diferenças dos valores da força do vento atuante, entre as várias interfaces, são

evidentes. A interface do tipo A é a que mais se destaca: a força exercida na sua área mínima é superior à força nas áreas máximas das restantes interfaces. Comparando estes valores com os obtidos para as antenas, em que o maior valor obtido foi de cerca de 0,13 kN, no caso de uma antena do tipo 3 com a face de incidência frontal, observa-se que os valores obtidos para as interfaces ultrapassam claramente aqueles valores, o que indicia desde logo a influência importante deste tipo de estruturas numa torre de telecomunicações.

Para o estudo de cada interface colocada nos 4 modelos de torres, são tomadas em conta várias disposições de antenas, indicadas no Quadro 4.51.

Quadro 4.51 - Casos de disposições de antenas para as diversas interfaces.

Interface	Antenas		
	Tipo 1	Tipo 2	Total
A	1	2	3
	3	3	6
	3	6	9
B	2	2	4
	2	4	6
	4	4	8
C	1	1	2
	2	2	4
D	1	1	2
	1	2	3

Apresentam-se em seguida os resultados obtidos para a colocação de cada interface no topo da torre do modelo B, sendo os restantes resultados apresentados no Apêndice V, para os restantes modelos de torres.

Para cada interface, a força do vento varia com o seu ângulo de incidência; as direções consideradas no estudo são as mais gravosas e encontram-se descritas no Apêndice V. Os critérios utilizados para a consideração da face de incidência do vento sobre as antenas foram simplificados, pelo que, para direções intermédias de incidência do vento, entre uma face lateral e uma face frontal ou traseira, se consideram sempre os casos limites das áreas de referência e os coeficientes de força referentes às faces frontais e traseiras, que conduzem a forças do vento superiores. Só no caso de o vento atuar numa direção

transversal ao plano da face lateral é que se toma a área desta, que conduz a uma menor força do vento. Embora este método não seja preciso, é uma forma conservativa de quantificar estes valores. As interfaces, seja qual for a direção de incidência do vento, são sempre consideradas com as mesmas áreas e os coeficientes de força apresentados.

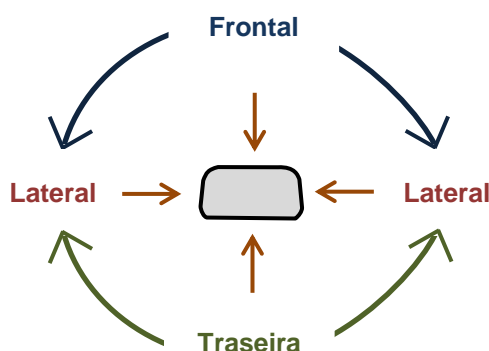


Figura 4.21 - Representação da consideração da direção de incidência do vento sobre as antenas.

No caso da interface do tipo C, por exemplo, pode-se verificar a forma como se considera neste estudo o processo de escoamento do vento, para uma configuração com 4 antenas. No exemplo 1 (Figura 4.22), apesar de o vento não incidir totalmente sobre as faces frontal ou traseira de cada uma das antenas, considera-se uma destas faces como sendo a face incidente. Apenas se considera a superfície lateral quando o vento incidir num plano normal à face, como é possível ver no exemplo 2. Em todo este estudo, a nomenclatura “F”, “L” e “T”, representa a incidência do vento sobre as faces frontal, lateral e traseira, respetivamente.

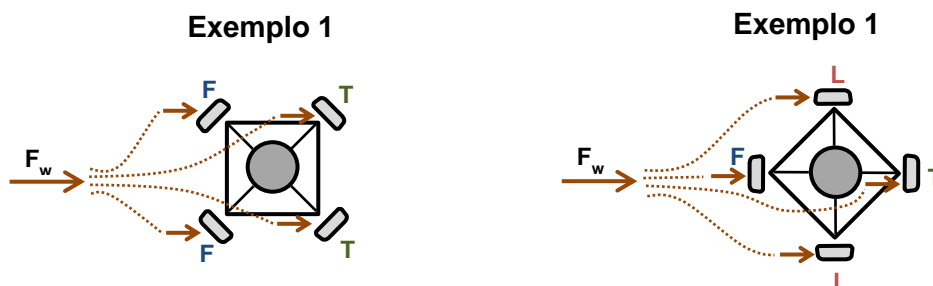


Figura 4.22 - Exemplos da direção considerada para a incidência do vento sobre as antenas.

Em relação aos resultados obtidos para as várias configurações de antenas, na interface do tipo A colocada na torre do modelo B, observou-se o seguinte:

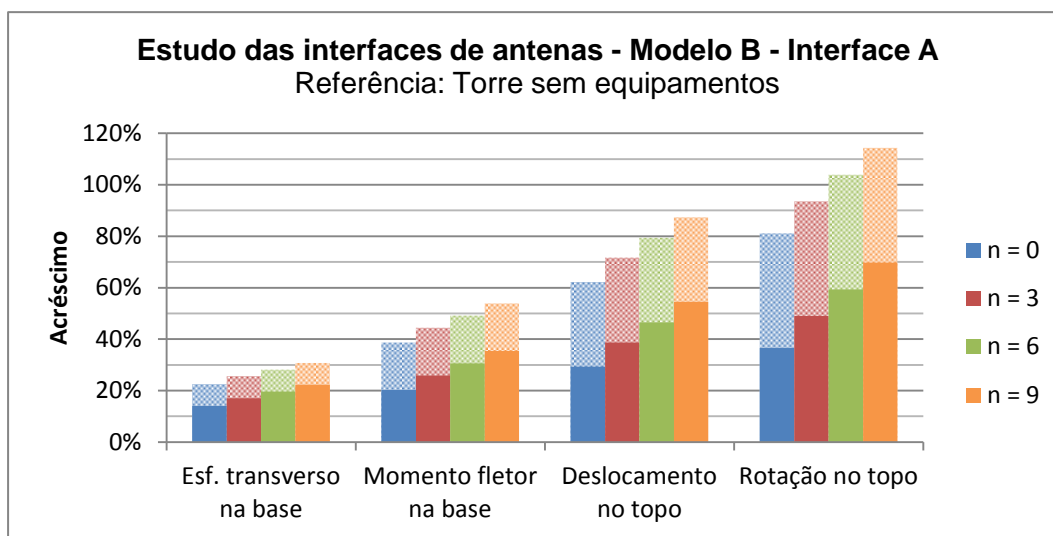


Gráfico 4.38 - Variação para as diversas disposições de antenas na interface do tipo A, no modelo B.

(A cheio indicam-se os valores para a área mínima e a sombreado os valores para a área máxima.)

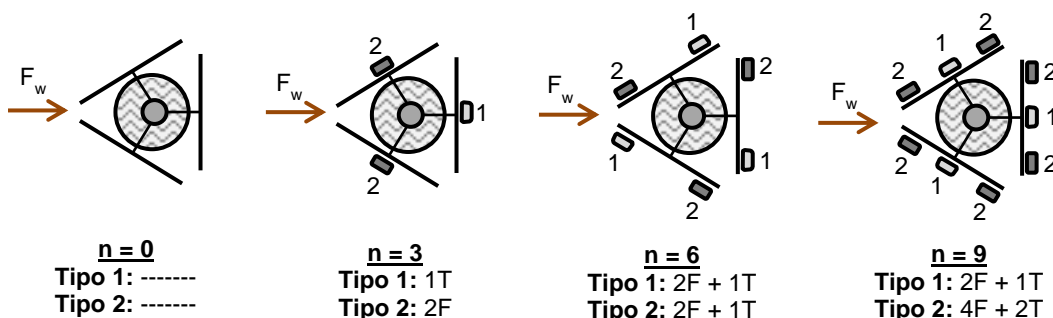


Figura 4.23 - Incidência do vento para a interface do tipo A.

Quadro 4.52 - Variação para as diversas disposições de antenas na interface do tipo A, no modelo B.

Área	Antenas	Esf. transverso na base		Momento fletor na base		Deslocamento no topo		Rotação no topo	
		V_0 [kN]	ΔV_0	M_0 [kNm]	ΔM_0	u_1 [m]	Δu_1	θ_1 [rad]	$\Delta \theta_1$
Torre	n = 0	14,91	-	271,64	-	0,266	-	0,011	-
Mín.	n = 0	17,00	14%	326,68	20%	0,344	29%	0,015	37%
	n = 3	17,45	17%	341,94	26%	0,369	39%	0,017	49%
	n = 6	17,83	20%	354,78	31%	0,390	47%	0,018	59%
	n = 9	18,22	22%	367,75	35%	0,411	54%	0,019	70%
Máx.	n = 0	18,27	23%	376,85	39%	0,431	62%	0,020	81%
	n = 3	18,72	26%	392,11	44%	0,456	72%	0,022	94%
	n = 6	19,10	28%	404,95	49%	0,477	79%	0,023	104%
	n = 9	19,49	31%	417,92	54%	0,498	87%	0,024	114%

Quanto aos resultados obtidos para na interface do tipo B, colocada no topo de uma torre de telecomunicações representada pelo modelo B, verifica-se o seguinte:

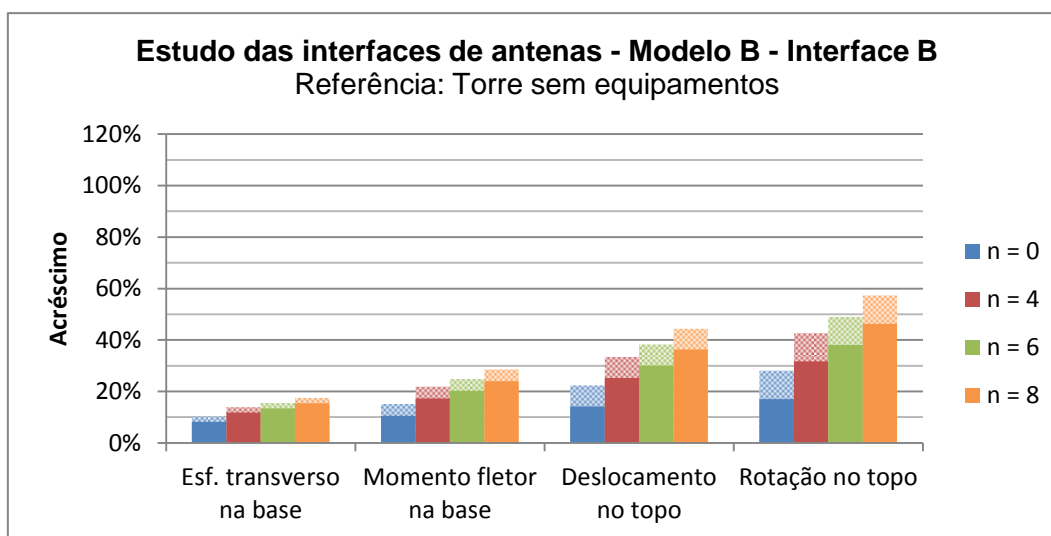


Gráfico 4.39 - Variação para as diversas disposições de antenas na interface do tipo B, no modelo B.

(A cheio indicam-se os valores para a área mínima e a sombreado os valores para a área máxima.)

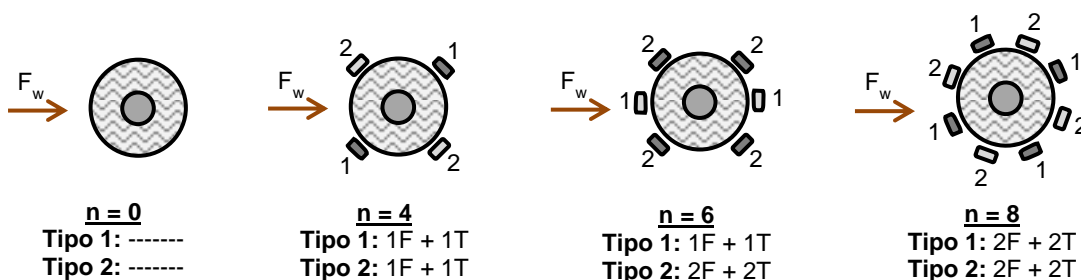


Figura 4.24 - Incidência do vento para a interface do tipo B.

Quadro 4.53 - Variação para as diversas disposições de antenas na interface do tipo B, no modelo B.

Área	Antenas	Esf. transverso na base		Momento fletor na base		Deslocamento no topo		Rotação no topo		
		V_0 [kN]	ΔV_0	M_0 [kNm]	ΔM_0	u_1 [m]	Δu_1	θ_1 [rad]	$\Delta \theta_1$	
Torre	n = 0	14,91	-	271,64	-	0,266	-	0,011	-	
	Mín.	n = 0	16,12	8%	300,45	11%	0,304	14%	0,013	17%
		n = 4	16,67	12%	318,65	17%	0,333	25%	0,015	32%
		n = 6	16,92	13%	326,66	20%	0,346	30%	0,015	38%
Máx.	n = 8	17,21	15%	336,76	24%	0,363	36%	0,016	46%	
	Mín.	n = 0	16,44	10%	312,89	15%	0,325	22%	0,014	28%
		n = 4	16,99	14%	331,09	22%	0,355	33%	0,016	43%
		n = 6	17,23	16%	339,10	25%	0,368	38%	0,017	49%
n = 8	17,53	18%	349,20	29%	0,384	44%	0,017	57%		

No caso da interface do tipo C, colocada no topo de uma torre representada pelo modelo B, a variação dos valores máximos, para as diferentes configurações de antenas, é a seguinte:

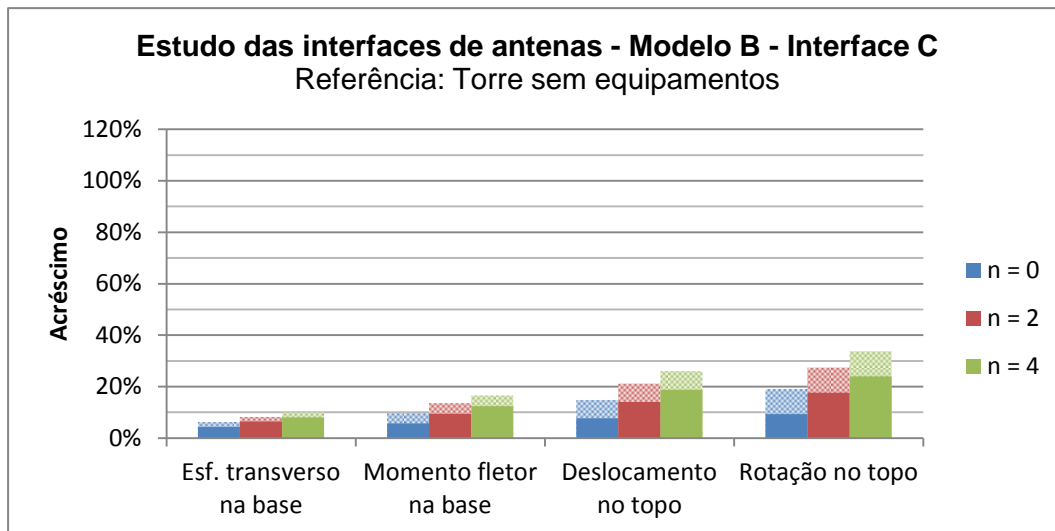


Gráfico 4.40 - Variação para as diversas disposições de antenas na interface do tipo C, no modelo B.

(A cheio indicam-se os valores para a área mínima e a sombreado os valores para a área máxima.)

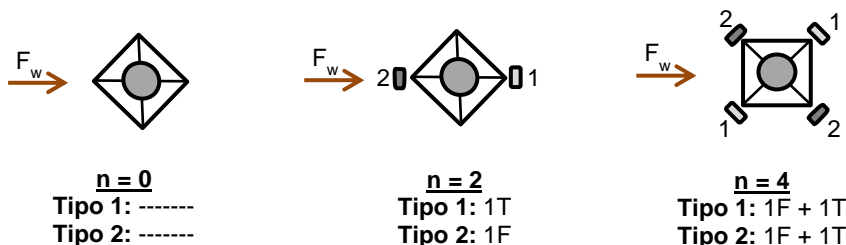


Figura 4.25 - Incidência do vento para a interface do tipo C.

Quadro 4.54 - Variação para as diversas disposições de antenas na interface do tipo C, no modelo B.

Área	Antenas	Esf. transverso na base		Momento fletor na base		Deslocamento no topo		Rotação no topo	
		V_0 [kN]	ΔV_0	M_0 [kNm]	ΔM_0	u_1 [m]	Δu_1	θ_1 [rad]	$\Delta \theta_1$
Torre	$n = 0$	14,91	-	271,64	-	0,266	-	0,011	-
Mín.	$n = 0$	15,55	4%	287,06	6%	0,286	8%	0,012	9%
	$n = 2$	15,86	6%	297,44	9%	0,303	14%	0,013	18%
	$n = 4$	16,11	8%	305,51	12%	0,316	19%	0,014	24%
Máx.	$n = 0$	15,83	6%	298,00	10%	0,305	15%	0,013	19%
	$n = 2$	16,14	8%	308,38	14%	0,322	21%	0,014	27%
	$n = 4$	16,39	10%	316,45	16%	0,335	26%	0,015	34%

Por último, ano caso da interface do tipo D, colocada no topo de uma torre representada pelo modelo B, a variação dos valores máximos observada para as diferentes configurações de antenas, é a seguinte:

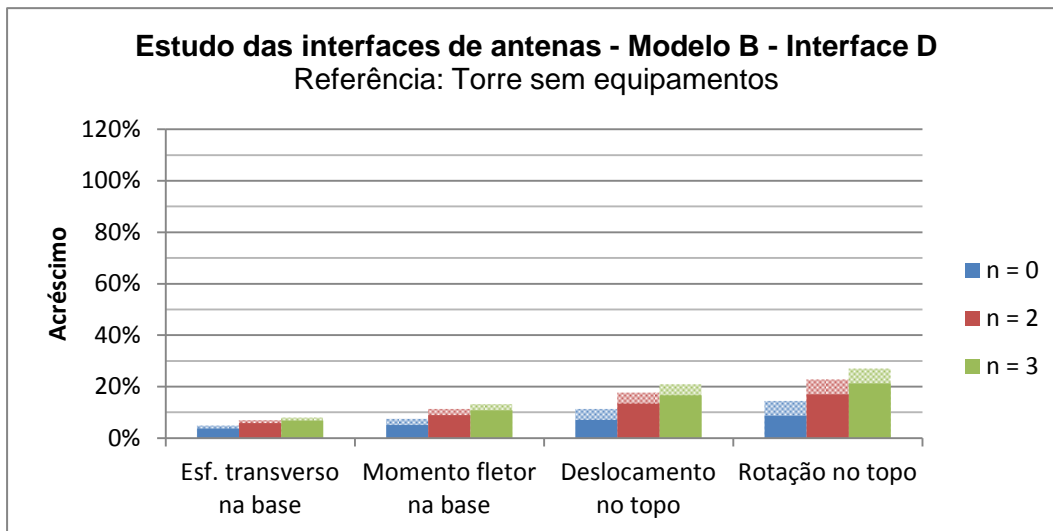


Gráfico 4.41 - Variação para as diversas disposições de antenas na interface do tipo D, no modelo B.

(A cheio indicam-se os valores para a área mínima e a sombreado os valores para a área máxima.)

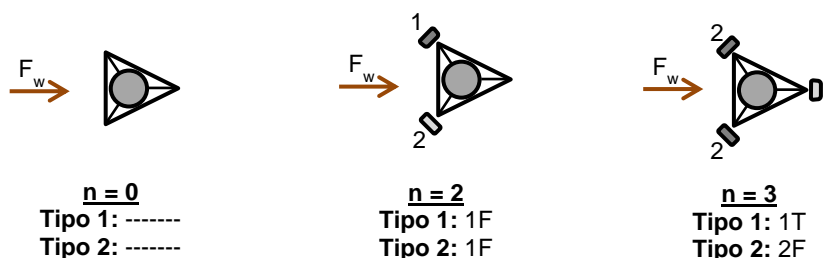


Figura 4.26 - Incidência do vento para a interface do tipo D.

Quadro 4.55 - Variação para as diversas disposições de antenas na interface do tipo D, no modelo B.

Área	Antenas	Esf. transverso na base		Momento fletor na base		Deslocamento no topo		Rotação no topo	
		V_0 [kN]	ΔV_0	M_0 [kNm]	ΔM_0	u_1 [m]	Δu_1	θ_1 [rad]	$\Delta \theta_1$
Torre	$n = 0$	14,91	-	271,64	-	0,266	-	0,011	-
Mín.	$n = 0$	15,46	4%	285,41	5%	0,285	7%	0,012	9%
	$n = 2$	15,77	6%	295,82	9%	0,302	13%	0,013	17%
	$n = 3$	15,93	7%	301,06	11%	0,310	17%	0,013	21%
Máx.	$n = 0$	15,63	5%	291,90	7%	0,296	11%	0,013	14%
	$n = 2$	15,94	7%	302,30	11%	0,313	18%	0,014	23%
	$n = 3$	16,09	8%	307,54	13%	0,321	21%	0,014	27%

Com base na análise dos resultados obtidos verifica-se que as interfaces das antenas, colocadas no topo da torre, têm uma influência considerável nos valores dos esforços na base, e do deslocamento e da rotação no topo da torre. No caso da interface do tipo A com 9 antenas colocadas, por exemplo, verifica-se um aumento de 22% a 31% do esforço transversal na base da torre, em relação à torre sem qualquer equipamento instalado, quando se consideram as áreas mínimas e máximas da interface, respetivamente. Por outro lado, a interface do tipo D, com 3 antenas instaladas, apresenta um acréscimo máximo de apenas 7% e 8%, quando se considera a área mínima e a área máxima, respetivamente. As restantes interfaces apresentam variações intermédias entre os valores referidos, comprovando-se assim a importante influência que estes equipamentos podem apresentar. Os valores do momento fletor na base, e do deslocamento e da rotação no topo da torre apresentam variações ainda maiores que as do esforço transversal.

Conclui-se, assim, que a quantificação da área da interface, nomeadamente através da consideração da área mínima ou da área máxima, pode ter uma grande influência no efeito da ação do vento sobre uma torre de telecomunicações. Os gráficos seguintes mostram a influência das antenas e a da interface na força do vento, para o caso de uma interface do tipo A com 9 antenas colocadas.

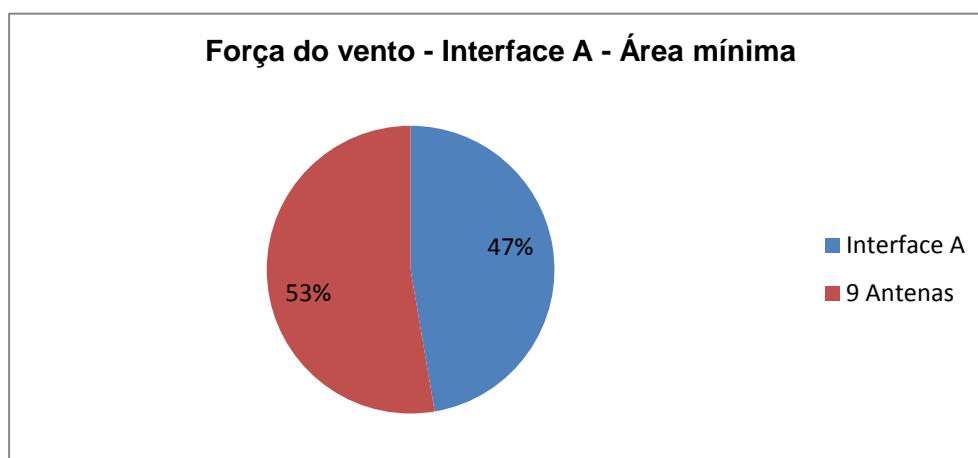


Gráfico 4.42 - Influência das antenas e interface do tipo A na força do vento, para a área mínima.

Quadro 4.56 - Influência das antenas e interface do tipo A na força do vento, para a área mínima.

Força do vento - Interface A - Área mínima				
Área	Elemento		Total	$F_{w,i}$
	Tipo	F_w [kN]	F_w [kN]	
Mínima	Interface A	0,80	1,68	47%
	9 Antenas	0,89		53%

$F_{w,i}$ – Influência na força do vento total.

No caso de se considerar a área máxima da interface, obtiveram-se os seguintes resultados:

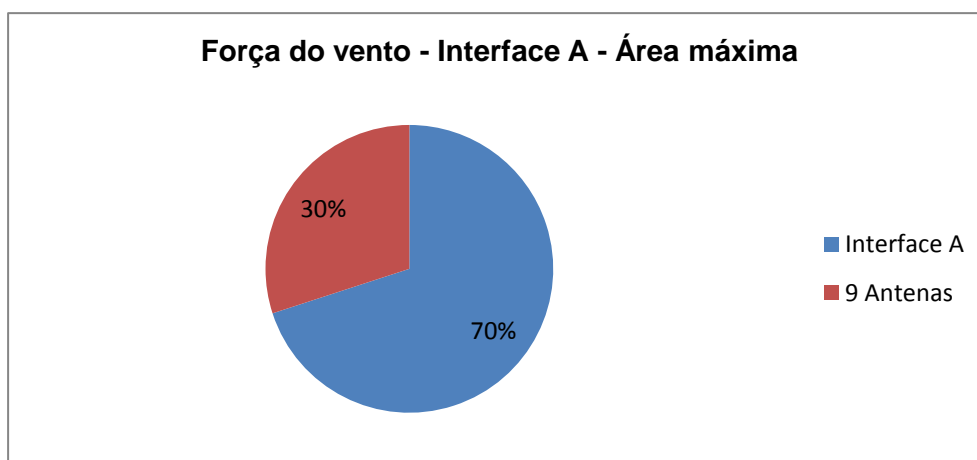


Gráfico 4.43 - Influência das antenas e interface do tipo A na força do vento, para a área máxima.

Quadro 4.57 - Influência das antenas e interface do tipo A na força do vento, para a área máxima.

Força do vento - Interface A - Área máxima				
Área	Elemento		Total	$F_{w,i}$
	Tipo	F_w [kN]	F_w [kN]	
Máxima	Interface A	2,07	2,95	70%
	9 Antenas	0,89		30%

$F_{w,i}$ – Influência na força do vento total.

Enquanto que no caso de se considerar a área mínima da interface, a força do vento nesta e no conjunto de antenas é praticamente equivalente (47% e 53%), quando se toma a área máxima esta diferença é evidente, com o conjunto de 9 antenas a receber apenas 30% da força total do vento sobre o conjunto. Nas outras interfaces este facto perde importância, visto a diferença entre áreas ser menor; contudo deve ser tomado em consideração pois verificam-se casos em que são iguais.

Conclui-se, assim, que existe uma incerteza muito elevada na estimativa da área de referência das interfaces. Este facto requer estudos mais aprofundados sobre esta matéria. Acrescem as dúvidas sobre a legitimidade da soma simples dos efeitos nas interfaces com os efeitos nas antenas, sem ter em conta a sua interação. Na próxima secção (4.4.1.4.1) aborda-se este assunto.

4.4.1.4.1. Estudo do efeito de interferência entre interfaces e antenas

As interfaces, tendo como principal função o suporte de várias antenas numa altura fixa, geralmente no topo da torre de telecomunicações, assumem várias disposições construtivas e albergam diferentes conjugações de antenas. Assim, é fácil compreender que a ação do vento, para a altura a que se encontram estas estruturas, é dividida entre os vários elementos de forma distinta. Este facto leva a que se levantem alguns problemas quanto à forma como se deve considerar a ação do vento nas interfaces. Se não existem dúvidas de que a ação do vento deve ser contabilizada totalmente num elemento que não receba qualquer interferência por parte de outros, em elementos nos quais não se verifique esta situação a ação do vento poderá ser diferente. Representando o escoamento do vento segundo a direção indicada, sobre a interface do tipo D, com três antenas instaladas, consegue-se compreender melhor este assunto.

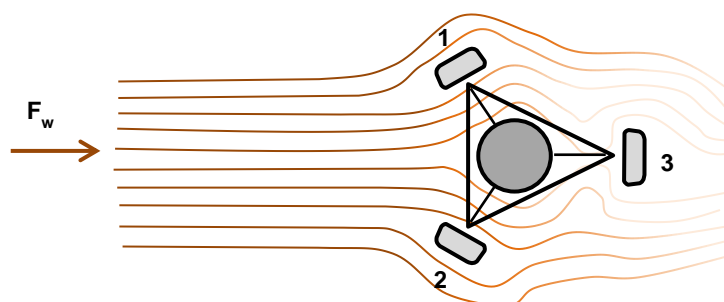


Figura 4.27 - Escoamento do vento em torno de uma interface de antenas.

O facto de a intensidade do vento ir diminuindo ao longo do escoamento em torno das superfícies da interface e das antenas deve-se principalmente ao efeito de escudo que as antenas 1 e 2, em conjunto com a interface e o fuste da torre oferecem. Assim, quando o vento incide na antena 3, a intensidade da ação é menor que seria se esta antena estivesse diretamente exposta ao vento.

A ocorrência do efeito de escudo ou interferência é um facto conhecido; no entanto, não existe um método bem definido para a quantificação deste fenómeno. Assim, poderá existir uma redução importante dos valores reais da ação do vento nos pontos onde se encontram interfaces de antenas, em relação aos valores determinados através dos métodos mais frequentemente utilizados, tais como a soma simples da ação sobre cada um dos elementos (considerando que se encontram diretamente expostos ao vento), que poderão ser demasiadamente conservativos.

Existem poucos estudos realizados sobre este assunto, entre os quais se encontra o estudo realizado por Graeme S. Wood, «Wind Loading of Telecommunication Antennas

and Head Frames» [2], que se centra em resultados obtidos para alguns tipos de interfaces e antenas, através de ensaios em túnel de vento. O objetivo desta secção é, a partir dos resultados do estudo referido, obter alguns coeficientes que permitam expressar o fenómeno de interferência e aplicá-los a uma interface previamente estudada, de forma a comparar os valores obtidos com os resultados fornecidos pelos métodos correntemente utilizados.

O estudo experimental [2] foi realizado sobre modelos a uma escala reduzida, para três tipos de antenas, com formato retangular, e cinco géneros de interfaces, com diferentes geometrias e dimensões. Através dos ensaios às diferentes interfaces, com várias configurações de antenas, obtiveram-se os valores da área equivalente ESA, que consiste na área de referência em que o vento incide, afetada pelo coeficiente de arrasto, conferido pelas características de cada componente, à semelhança do coeficiente de força:

$$ESA = \frac{F_d}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2} = C_d \cdot A_{ref}$$

em que F_d é a força de arrasto, ρ é a massa volúmica do ar, V é a velocidade média do vento, C_d é o coeficiente de arrasto e A_{ref} a área de referência.

No estudo desenvolvido por Graeme S. Wood [2] foram obtidos os valores da área equivalente ESA para cada elemento individual (interfaces e antenas) e, posteriormente, para o conjunto das interfaces com as antenas, segundo várias direções de incidência do vento. Assim, para uma situação específica, se relacionarmos o valor das áreas equivalentes ESA, obtidas para cada elemento individual com o valor da área equivalente ESA obtida para o conjunto da interface com as antenas, conseguimos quantificar o efeito da interferência entre os diversos elementos.

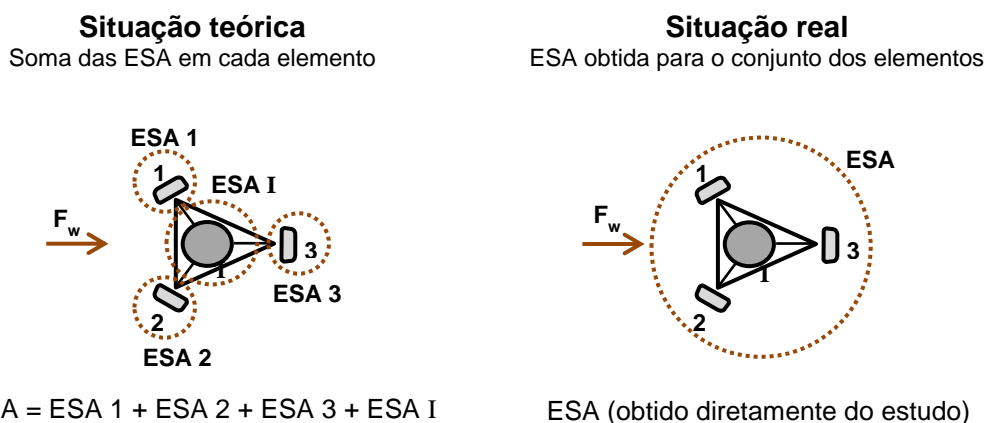


Figura 4.28 - Exemplo da determinação da área equivalente ESA para a situação teórica e real.

Para quantificar o efeito de interferência entre interfaces e antenas define-se o coeficiente de interferência c_i , através do quociente entre a área equivalente ESA da situação real e a área equivalente ESA da situação teórica, como representado na Figura 4.28. A partir deste cálculo é possível definir um coeficiente que exprime o efeito de interferência para as várias configurações de antenas.

$$c_i = \frac{\text{ESA (Situação real)}}{\text{ESA (Situação teórica)}}$$

em que ESA (Situação real) é a área equivalente obtida através da soma das áreas equivalentes para cada elemento e ESA (Situação teórica) é a área equivalente obtida para o conjunto dos elementos.

Nos ensaios efetuados para o estudo da ação do vento sobre interfaces de antenas [2], foram utilizados vários tipos de antenas e interfaces, sendo que para cada elemento isolado foram obtidos os valores da área equivalente ESA por m^2 , para diferentes ângulos de incidência do vento. Para o cálculo dos coeficientes de interferência apenas são utilizadas antenas do tipo X e Y, consideradas no estudo referido [2] como antena A (antena do tipo x) e antena C (antena do tipo Y), respetivamente.

Quadro 4.58 – Resultados obtidos para as antenas

Elemento	$A_{ref} [m^2]$	ESA/ m^2	
		$\theta = 60^\circ$	$\theta = 180^\circ$
Antena X	0,682	0,75	1,00
Antena Y	0,246	0,33	0,42

Dados retirados do estudo da ação do vento sobre interfaces de antenas [2].

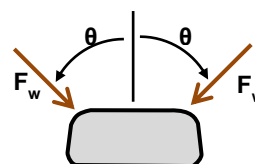


Figura 4.29 - Ângulo de incidência do vento.

A interface escolhida no estudo da ação do vento em interfaces de antenas [2], é semelhante, em termos geométricos, à interface A, com formato triangular em planta, podendo suportar no máximo 9 antenas. Para o caso da interface sem antenas, o valor da área equivalente ESA por m^2 registado é de **2,20**, na direção indicada na Figura 4.30.



Figura 4.30 - Valor da área equivalente ESA por m^2 , para a interface triangular.

Dados retirados do estudo da ação do vento sobre interfaces de antenas [2].

Com base nos valores das áreas equivalentes ESA por m², para cada elemento individual (antenas X e Y e interface triangular), procede-se ao cálculo dos coeficientes de interferência para os diversos casos de configurações de antenas. A título de exemplo mostra-se o cálculo detalhado do coeficiente de interferência para a situação da interface com 6 antenas do tipo X colocadas. Segundo os dados registados anteriormente, para este caso, os valores da área equivalente ESA por m² a adotar para cada elemento são os seguintes.

Quadro 4.59 - Área equivalente ESA por m², por elemento.

Elemento	θ	ESA/m ²
Antena X1	60°	0,75
Antena X2	60°	0,75
Antena X3	180°	1,00
Antena X4	180°	1,00
Antena X5	60°	0,75
Antena X6	60°	0,75
Interface	-	2,20

Dados retirados do estudo da ação do vento sobre interfaces de antenas [2].

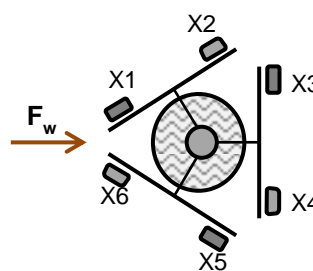


Figura 4.31 - Configuração de 6 antenas do tipo A.

Assim, procede-se ao cálculo da área equivalente ESA por m², para a situação teórica, somando os valores das áreas equivalentes de todos os elementos. O valor da área equivalente real foi retirado diretamente do estudo da ação do vento sobre interfaces de antenas [2], sendo também indicado abaixo.

$$\begin{aligned} \text{ESA}(\text{Situação teórica}) &= \text{ESA}(X1) + \text{ESA}(X2) + \text{ESA}(X3) + \text{ESA}(X4) + \text{ESA}(X5) + \\ &+ \text{ESA}(X6) + \text{ESA}(\text{Interface}) \Leftrightarrow \text{ESA}(\text{Situação teórica}) = 0,75 + 0,75 + 1,00 + 1,00 + \\ &+ 0,75 + 0,75 + 2,20 \Leftrightarrow \text{ESA}(\text{Situação teórica}) = 7,20/\text{m}^2 \end{aligned}$$

$$\text{ESA}(\text{Situação real}) = 5,20/\text{m}^2$$

Valor retirado do estudo da ação do vento sobre interfaces de antenas [2].

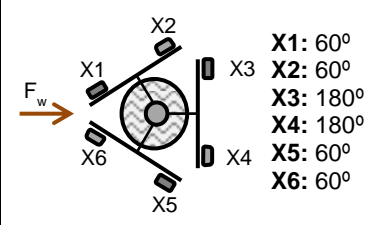
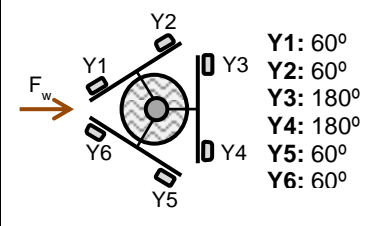
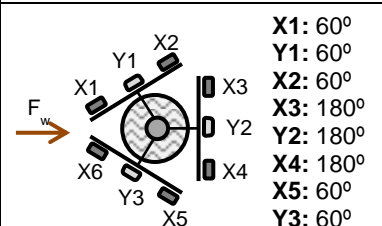
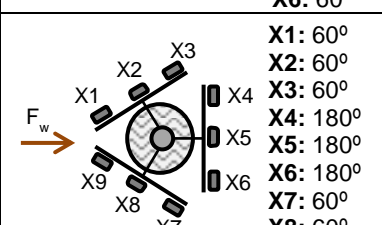
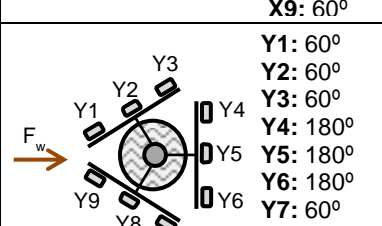
Por último, calcula-se o coeficiente de interferência c_i , para o caso da interface triangular com 6 antenas do tipo X instaladas.

$$c_i = \frac{\text{ESA}(\text{Situação real})}{\text{ESA}(\text{Situação teórica})} \Leftrightarrow c_i = \frac{5,20}{7,20} \Leftrightarrow c_i = 0,72$$

O valor obtido para o coeficiente de interferência revela que apenas 72% da soma da acção do vento sobre cada elemento corresponde à situação real, verificando-se que de facto ocorre o efeito de interferência entre interfaces e antenas.

Através do cálculo do coeficiente de interferência para as restantes situações, obtiveram-se os seguintes valores, dispostos no Quadro 4.60.

Quadro 4.60 - Coeficientes de interferência para as diversas situações de antenas.

Coeficientes de interferência						
Situação	Incidência do vento	Área equivalente ESA/m ²			Situação real	C _i
		Situação teórica				
		Interface	Antenas	Total		
6 Antenas X	 <p>X1: 60° X2: 60° X3: 180° X4: 180° X5: 60° X6: 60°</p>	2,20	5,00	7,20	5,20	0,72
6 Antenas Y	 <p>Y1: 60° Y2: 60° Y3: 180° Y4: 180° Y5: 60° Y6: 60°</p>	2,20	2,16	4,36	3,90	0,89
6 Antenas X + 6 Y	 <p>X1: 60° Y1: 60° X2: 60° X3: 180° Y2: 180° X4: 180° X5: 60° Y3: 60° X6: 60°</p>	2,20	6,08	8,28	5,50	0,66
9 Antenas X	 <p>X1: 60° X2: 60° X3: 60° X4: 180° X5: 180° X6: 180° X7: 60° X8: 60° X9: 60°</p>	2,20	7,50	9,70	5,80	0,60
9 Antenas Y	 <p>Y1: 60° Y2: 60° Y3: 60° Y4: 180° Y5: 180° Y6: 180° Y7: 60° Y8: 60° Y9: 60°</p>	2,20	3,24	5,44	4,10	0,75

Pela observação dos resultados verifica-se que o coeficiente de interferência assume valores importantes, com reduções significativas, no que diz respeito a este tipo de interface, para as diferentes configurações de antenas apresentadas. Isto deve-se ao facto de a área equivalente teórica, obtida pela soma dos valores dos elementos individuais ser significativamente maior do que a área equivalente real, o que confirma a suposição prévia da existência do efeito de interferência ou escudo, quando o vento atua sobre um conjunto de elementos situados à mesma altura.

Entre os valores da interferência registados para as várias configurações de antenas, verifica-se que este efeito tem tanto mais importância quanto maior for a área das antenas que interfere no escoamento do ar. De facto, entre as diferentes situações, a maior interferência verifica-se quando estão colocadas 9 antenas do tipo X ($A_{ref} = 0,682 \text{ m}^2$), com um coeficiente de 0,60 e a menor interferência quando estão apenas instaladas, na interface, 6 antenas do tipo Y ($A_{ref} = 0,246 \text{ m}^2$), com um valor do coeficiente de interferência igual a 0,89. Esta ocorrência é normal, pois quanto maior for o número de antenas colocadas na face frontal de incidência do vento maior é o bloqueio oferecido ao escoamento do ar, na respetiva interface e nas restantes antenas.

Considerando que o efeito de escudo verificado no conjunto dos elementos é exclusivo das antenas que estão nas faces frontais da interface, indicadas a vermelho na Figura 4.32, as quais recebem totalmente a ação do vento, verifica-se que o efeito de interferência aumenta com a área das antenas nessa posição. Não se toma em conta a área da interface de incidência frontal do vento, pois é constante entre os vários casos, como se pode ver na figura abaixo.

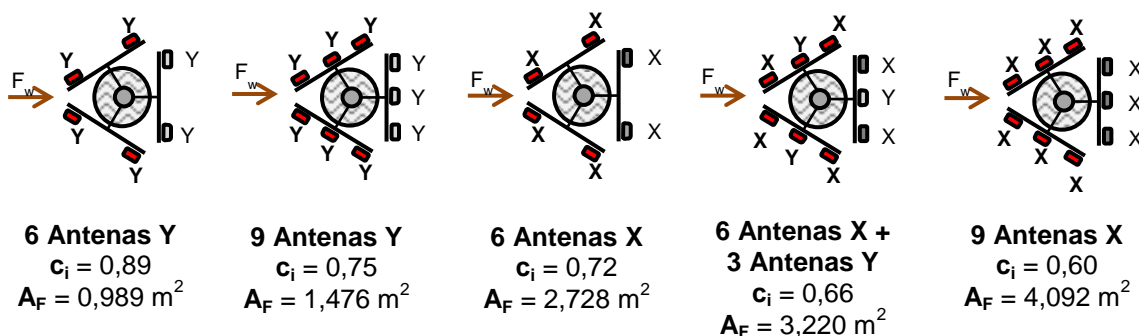


Figura 4.32 - Área frontal de antenas nas diversas configurações.

A_F – Soma das áreas das antenas colocadas nas faces frontais de incidência do vento da interface (indicadas a vermelho).

Através da extrapolação destes valores para diferentes áreas de referência de antenas nas faces frontais da interface, é possível aplicar os coeficientes de interferência a qualquer configuração de antenas, na interface triangular e segundo a direção do vento considerada anteriormente.

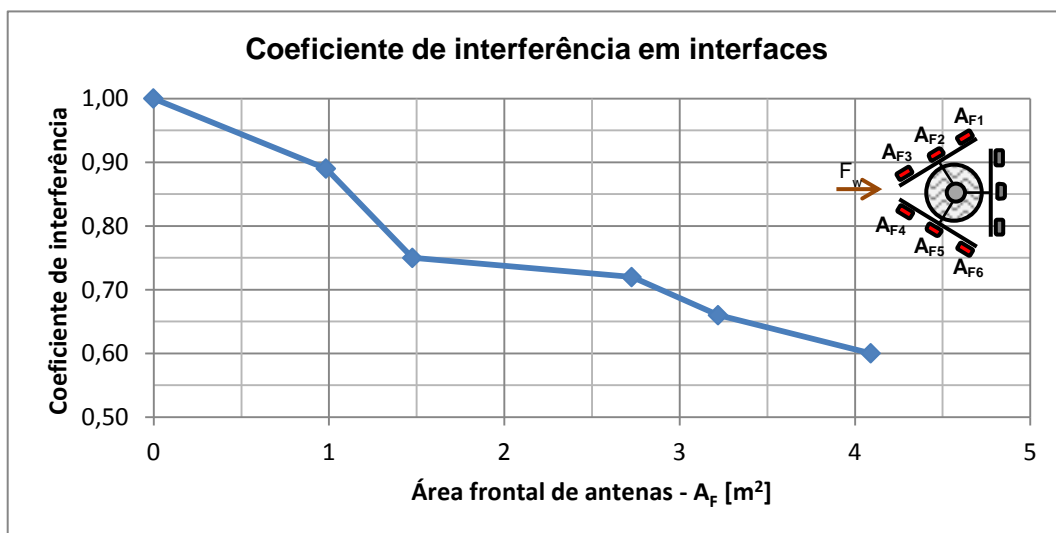


Gráfico 4.44 - Coeficiente de interferência em interfaces.

Há que realçar o facto de este ser um método bastante simplificado de consideração do efeito de interferência entre antenas e respetivas interfaces, pois a interferência pode não depender apenas da área total das antenas na face frontal da interface. No entanto, para a análise efetuada nesta secção considera-se suficiente esta abordagem.

Para se compreender a influência do efeito de escudo numa torre de telecomunicações, determinam-se, através do gráfico 4.44, os coeficientes para a interface A, semelhante à utilizada no estudo atrás referido [2], consoante a área de referência das antenas do tipo 1 e 2, já utilizadas atrás na dissertação, nas faces frontais da interface.

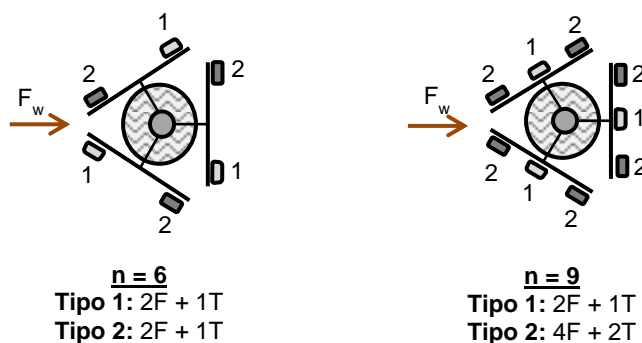


Figura 4.33 - Incidência do vento na interface do tipo A.

Quadro 4.61 - Coeficiente de interferência para as diversas situações.

Situação	Antena 1		Antena 2		A_F [m ²]	c_i
	n_F	A_{ref} [m ²]	n_F	A_{ref} [m ²]		
n = 6	2	0,204	2	0,228	0,864	0,90
n = 9	2	0,204	4	0,228	1,320	0,79

Para analisar a influência da interferência considera-se a colocação da interface do tipo A, com as duas configurações diferentes (6 e 9 antenas), no topo de cada modelo de torre (modelos A, B, C e D). Contudo, apenas são exibidos os resultados obtidos para o modelo B, sendo os referentes aos restantes modelos apresentados no Apêndice V.

Os resultados obtidos para a variação dos esforços na base, e para o deslocamento e a rotação no topo da torre B, em relação à situação da torre sem equipamentos instalados, no caso da colocação da interface do tipo A aos 40 m de altura na torre B, são os seguintes:

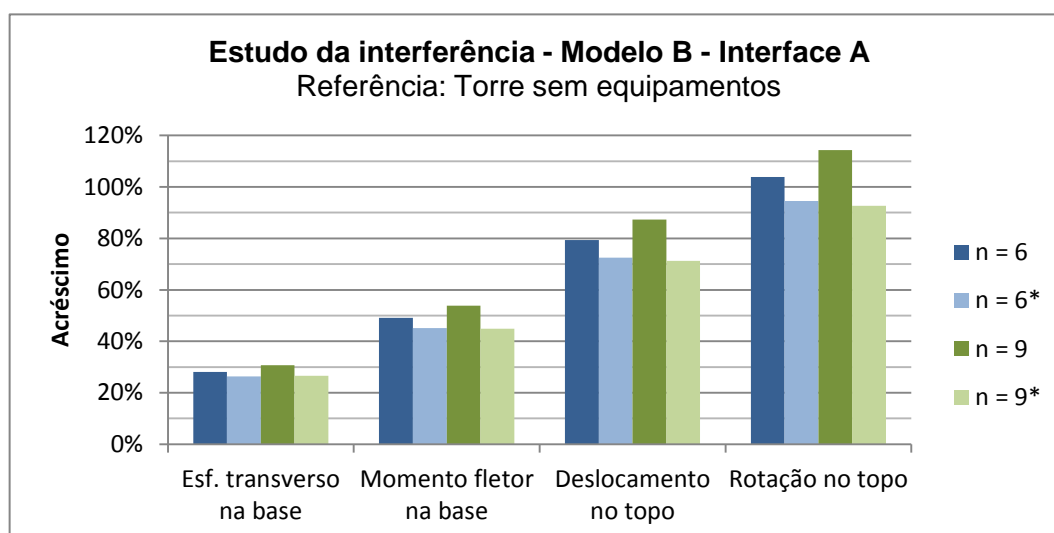


Gráfico 4.45 - Efeito de interferência na interface do tipo A, no modelo B.

(As séries indicadas com um asterisco indicam a aplicação do coeficiente de interferência.)

Quadro 4.62 - Efeito de interferência na interface do tipo A, no modelo B.

Estudo da interferência em interfaces - Modelo B - Interface A								
Antenas	Esf. transverso na base		Momento fletor na base		Deslocamento no topo		Rotação no topo	
	V_0 [kN]	ΔV_0	M_0 [kNm]	ΔM_0	u_1 [m]	Δu_1	θ [rad]	$\Delta \theta_1$
n = 0	14,91	-	271,64	-	0,266	-	0,011	-
n = 6	19,10	28%	404,95	49%	0,477	79%	0,023	104%
n = 6*	18,84	26%	394,39	45%	0,459	73%	0,022	95%
n = 9	19,49	31%	417,92	54%	0,498	87%	0,024	114%
n = 9*	18,87	27%	393,44	45%	0,456	71%	0,021	93%

Observando os resultados obtidos, verifica-se que a aplicação dos coeficientes de interferência não tem uma influência significativa nos valores máximos dos esforços na base, e do deslocamento e da rotação no topo da torre B. No caso do esforço transversal na base verificam-se ligeiras descidas, respetivamente de 2% para o caso de 6 antenas (de 28% para 26%) e de 4% para o caso de 9 antenas (de 31% para 27%), com a aplicação do coeficiente de interferência. Quanto aos restantes valores obtidos para a torre B, verificam-se maiores diferenças e, por conseguinte, uma maior influência dos efeitos da interferência sobre o momento fletor na base, (com reduções de 4% e de 9%), sobre o deslocamento no topo (com reduções de 6% e de 16%), e sobre a rotação no topo (com reduções de 9% e de 21%), após a aplicação do coeficiente de interferência ao conjunto da interface com as antenas, colocado no topo da torre.

Apesar de a influência do efeito de interferência ou escudo ser relativamente reduzida, este não deve ser ignorado. Faz-se notar que este estudo foi feito com base em vários pressupostos e com uma margem de erro possivelmente elevada, pois não se sabe verdadeiramente se o método estabelecido, bem como a determinação e consequente aplicação dos coeficientes de interferência, a partir da extrapolação dos resultados obtidos por Graeme S. Wood [2], são aplicáveis a qualquer tipo de interface, com diferentes formas e dimensões. O simples facto de as áreas de referência, os afastamentos entre antenas e os contornos dos elementos serem diferentes pode implicar variações no escoamento do ar que tornem completamente diferente a forma como se processa o mesmo e, assim, provocar uma alteração significativa na força do vento sobre o conjunto dos elementos.

É, no entanto, inegável que o efeito de interferência ocorre neste tipo de situações, devendo assim ser considerado aquando da análise do vento em torres de telecomunicações, especialmente em situações em que se preveja uma sobreposição de elementos na direção de incidência do vento, como acontece no caso típico das interfaces de topo com várias antenas instaladas.

4.4.2. Estudo da ação do vento sobre os cabos

Os caminhos de cabos são geralmente colocados ao longo do comprimento da torre de telecomunicações, em uma ou mais fiadas, formando conjuntos com diferentes disposições e quantidades. Algumas configurações típicas de caminhos de cabos em que este estudo se centra foram já anteriormente apresentadas. Assim, para cada um dos quatro modelos de torres de telecomunicações (modelos A a D), vão ser colocadas, ao longo do

fuste da torre de telecomunicações, 4 configurações de cabos diferentes, indicadas no Quadro 4.63, e determinados os valores máximos dos esforços na base, e do deslocamento e da rotação no topo. Cada configuração apresenta diferentes características, nomeadamente no que se refere à quantidade e à disposição dos cabos.

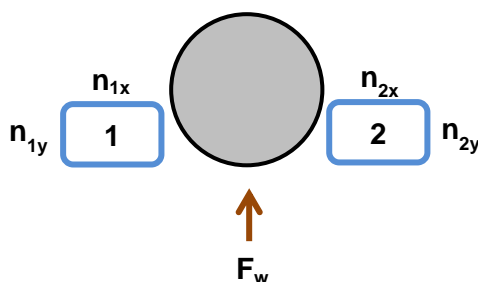


Figura 4.34 - Incidência do vento sobre os caminhos de cabos.

Quadro 4.63 - Casos considerados para o estudo da ação do vento sobre os caminhos de cabos.

Configuração	Caminho 1			Caminho 2			n
	n_{1x}	n_{1y}	n_1	n_{2x}	n_{2y}	n_2	
12 Cabos	4	2	8	2	2	4	12
16 Cabos	4	2	8	4	2	8	16
20 Cabos	6	2	12	4	2	8	20
24 Cabos	6	2	12	6	2	12	24

Para este estudo considera-se que cada cabo tem um diâmetro de 22 mm. Considera-se também que os caminhos de cabos se encontram colocados ao longo da altura total da torre e com o vento a atuar na sua face frontal. Os coeficientes de força respetivos foram determinados através do método dos elementos estruturais de secção retangular, com cantos arredondados. Para a definição do perfil do vento, admitiu-se que a estrutura está localizada numa zona do tipo A, em terreno da categoria IV, sem influência da orografia. Serão apresentados apenas os resultados obtidos para o modelo B, sendo os restantes resultados, referentes aos outros modelos de torres apresentados no Apêndice VI.

Considerando-se cada grupo de cabos como um bloco compacto, não permeável à ação do vento, sabe-se que os dois fatores que podem variar com as diferentes disposições de cabos são os coeficientes de força, devido às várias formas que o grupo pode assumir, e

a área de referência, obtida pela soma das áreas de exposição de cada cabo que integra a face frontal de incidência do vento.

Apesar de se considerar a mesma direção de atuação do vento em todos os casos (direção 0 representada na Figura 4.35), o facto de a disposição dos cabos poder apresentar variações faz com esta nem sempre seja a mais desfavorável, tendo em conta os fatores previamente considerados, nomeadamente o coeficiente de força e área de referência.

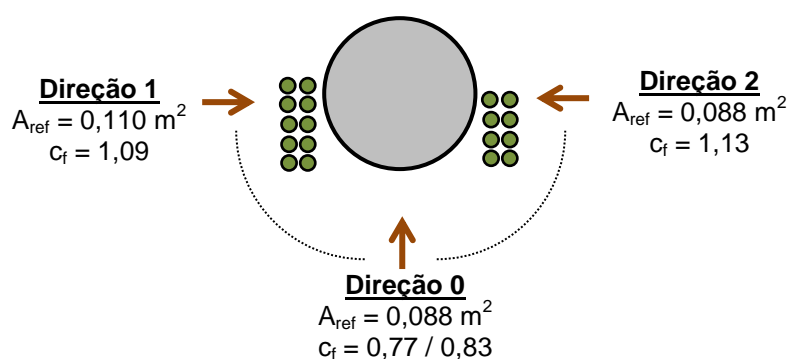


Figura 4.35 - Direção de incidência do vento sobre os caminhos de cabos.

Como se pode observar através do exemplo dado na Figura 4.35, a ação do vento sobre os caminhos de cabos, tanto na direção 1 como na direção 2 é maior que na direção 0, que para o estudo se considera, em todos os casos, como a mais desfavorável. A razão para se considerar sempre a direção 0, representada na Figura 4.35, como a mais desfavorável reside no facto de, em ambas as direções 1 e 2, os caminhos de cabos estarem sobrepostos com o fuste da torre, pelo que será incorreto somar isoladamente a força do vento que atua em cada elemento, situação esta que não se verifica quando se considera a direção 0. Assim, de forma a simplificar o estudo, parte-se do princípio que a esta direção é sempre a mais gravosa, não se considerando qualquer sobreposição dos cabos com a torre.

Esta situação acontece com maior frequência quando são considerados caminhos de cabos com geometrias mais distantes de um formato quadrangular, fazendo com que uma face tenha uma área de referência bastante superior à outra; todavia, estes casos são menos habituais em torres de telecomunicações.

Os resultados obtidos para as diferentes configurações de caminhos de cabos, no modelo B, são a seguir apresentados. A variação dos valores dos diferentes parâmetros foi calculada em relação a uma situação de referência, de uma torre sem qualquer equipamento colocado.

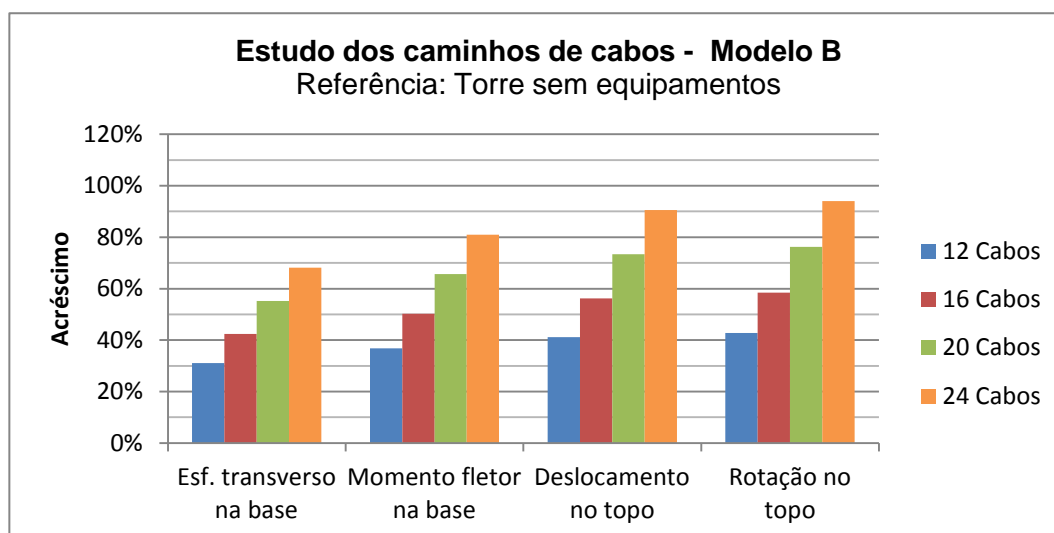


Gráfico 4.46 - Variação para a ação do vento sobre os caminhos de cabos, no modelo B.

Quadro 4.64 - Variação para a ação do vento sobre os caminhos de cabos, no modelo B

Estudo dos caminhos de cabos - Modelo B								
Configuração	Esf. transverso na base		Momento fletor na base		Deslocamento no topo		Rotação no topo	
	V_0 [kN]	ΔV_0	M_0 [kNm]	ΔM_0	u_1 [m]	Δu_1	θ [rad]	$\Delta \theta_1$
Sem cabos	14,91	-	271,64	-	0,266	-	0,011	-
12 Cabos	19,54	31%	371,69	37%	0,376	41%	0,016	43%
16 Cabos	21,23	42%	408,26	50%	0,416	56%	0,018	58%
20 Cabos	23,15	55%	449,91	66%	0,461	73%	0,020	76%
24 Cabos	25,08	68%	491,56	81%	0,507	91%	0,022	94%

Como se pode verificar, a colocação de caminhos de cabos em torres de telecomunicações provoca aumentos muito significativos nos valores dos esforços na base, bem como do deslocamento e da rotação no topo da torre.

Analisando os resultados obtidos para a torre correspondente ao modelo B, observa-se que adicionando apenas 12 cabos se registaram aumentos entre 31% e 43% nos valores dos esforços na base, e do deslocamento e da rotação no topo da torre. A variação destes parâmetros é ainda maior quando se adicionam mais cabos ao fuste da

torre; com a colocação de mais 12 cabos em relação à situação anterior, por exemplo, perfazendo um total de 24 cabos, regista-se um aumento de 68% no valor máximo do esforço transversal na base (Quadro 4.64).

Como já foi visto, a ação do vento sobre os caminhos de cabos varia principalmente em função de dois parâmetros: o coeficiente de força atribuído ao conjunto de cabos, e a área de referência. No caso das configurações utilizadas, obtemos os seguintes resultados para o acréscimo, relativamente à configuração com 12 cabos, dos valores do coeficiente de força médio e da soma das áreas de referência entre os dois caminhos, para a altura total da torre.

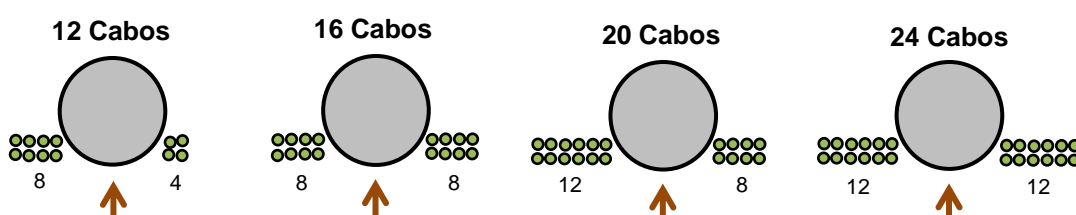


Figura 4.36 - Representação das disposições de cabos considerados para o estudo.

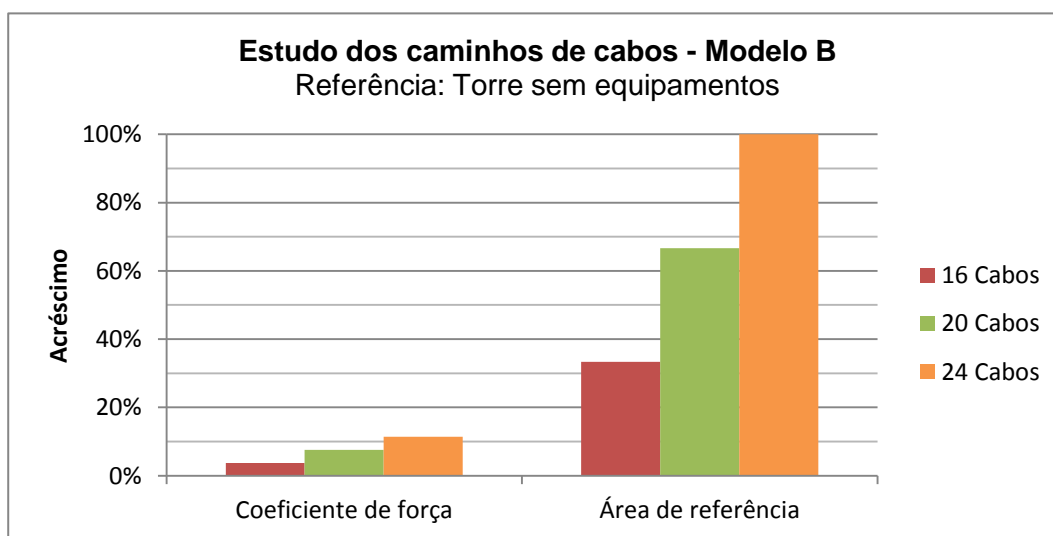


Gráfico 4.47 - Variação do coeficiente de força e da área de referência para as diversas disposições de cabos, no modelo B.

Quadro 4.65 - Variação do coeficiente de força e da área de referência para as diversas disposições de cabos, no modelo B.

Configuração	Total			
	c_f	Δc_f	$A_{ref} [m^2]$	ΔA_{ref}
12 Cabos	1,09	-	0,132	-
16 Cabos	1,13	4%	0,176	33%
20 Cabos	1,17	8%	0,220	67%
24 Cabos	1,22	11%	0,264	100%

O aumento do número de cabos dispostos ao longo da torre faz com que os valores do coeficiente de força e da área de referência aumentem significativamente, para as configurações utilizadas. Quanto aos valores médios do coeficiente de força, entre os dois caminhos, observa-se um aumento até 11%, e em relação à área de referência total, no somatório dos dois caminhos, verifica-se um acréscimo de 100%; estas variações foram, em ambos os casos, calculadas em relação à configuração inicial de 12 cabos.

Tendo em conta as disposições de cabos utilizadas em cada caminho, nos diferentes casos considerados, é possível verificar que apenas são utilizados 3 casos distintos, respetivamente com 4 cabos (2 x 2 cabos), 8 cabos (4 x 2 cabos) e 12 cabos (6 x 2 cabos), sendo o número total de elementos dependente da combinação de 2 caminhos com as disposições referidas. Observando os valores dos coeficientes de força e da área de referência obtidos para cada grupo, verifica-se o seguinte:

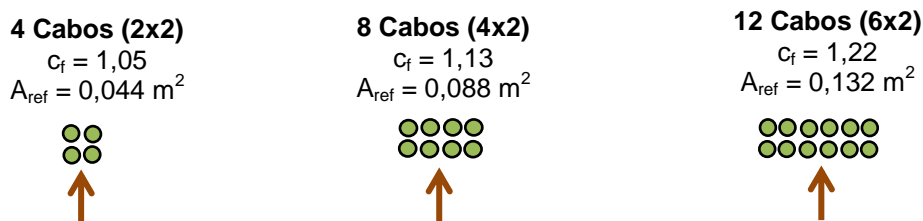


Figura 4.37 - Valores do coeficiente de força e da área de referência para diferentes caminhos de cabos.

De facto, constata-se que não só a área de referência aumenta com a colocação de um maior número de cabos na face de incidência do vento, mas também o valor do coeficiente de força para o conjunto de cabos aumenta. Assim, torna-se óbvio que conjuntos de cabos com menos elementos na face frontal de incidência do vento terão igualmente valores inferiores para estes dois parâmetros. Este facto significa que a simples alteração da forma como os cabos são dispostos poderá permitir encontrar soluções otimizadas, na colocação dos mesmos ao longo da altura da torre.

Com o intuito de averiguar esta situação, consideram-se 4 novas soluções de disposições de cabos, respetivamente de 12, 16, 20 e 24 elementos, com formas otimizadas, nomeadamente com a respetiva redução da área de referência e do coeficiente de força de cada caminho, de modo a se determinar a influência relativa que este efeito poderá ter na variação dos valores dos esforços na base, e do deslocamento e da rotação no topo de uma torre de telecomunicações, sob a ação do vento.

As configurações originais e as otimizadas, consideradas neste estudo, são apresentadas na Figura 4.38.

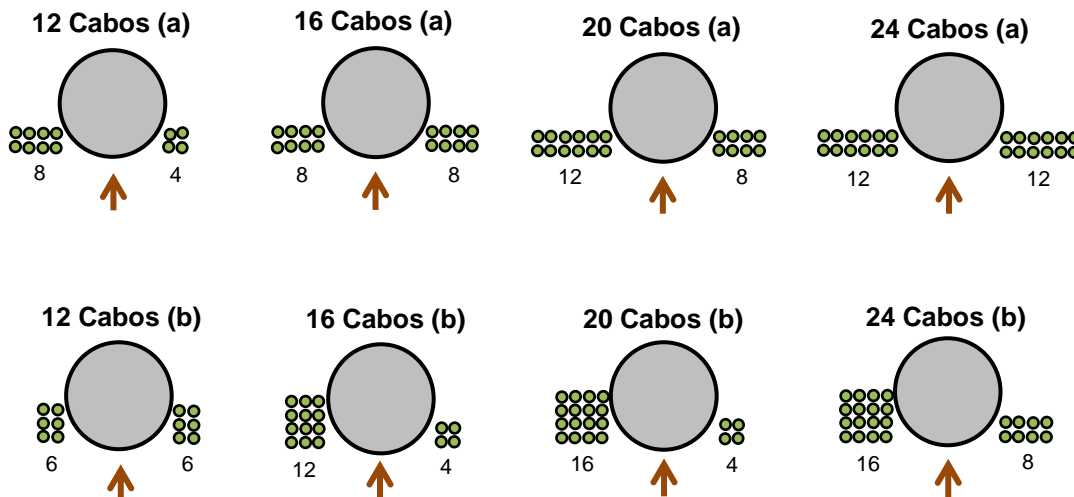


Figura 4.38 - Representação das configurações de cabos originais e otimizadas consideradas no estudo.

(a) – Configuração de cabos original; (b) – Configuração de cabos otimizada

Quadro 4.66 - Características das configurações de cabos otimizadas consideradas no estudo.

Configuração	Caminhos de cabos										Total n
	Caminho 1					Caminho 2					
	n_{1x}	n_{1y}	n_1	c_f	$A_{ref} [m^2]$	n_{2x}	n_{2y}	n_2	c_f	$A_{ref} [m^2]$	
12 Cabos (a)	4	2	8	1,13	0,088	2	2	4	1,05	0,044	12
12 Cabos (b)	2	3	6	0,94	0,044	2	3	6	0,94	0,044	12
16 Cabos (a)	4	2	8	1,13	0,088	4	2	8	1,13	0,088	16
16 Cabos (b)	3	4	12	0,98	0,066	2	2	4	1,05	0,044	16
20 Cabos (a)	6	2	12	1,22	0,132	4	2	8	1,13	0,088	20
20 Cabos (b)	4	4	16	1,05	0,088	2	2	4	1,05	0,044	20
24 Cabos (a)	6	2	12	1,22	0,132	6	2	12	1,22	0,132	24
24 Cabos (b)	4	4	16	1,05	0,088	4	2	8	1,13	0,088	24

(a) – Configuração de cabos original; (b) – Configuração de cabos otimizada

Para cada configuração, foram escolhidas novas disposições dos caminhos de cabos, com a mesma quantidade de cabos mas arrumados de forma diferente, com menores valores dos coeficientes de força e das áreas de referência.

Os valores obtidos para o modelo B são a seguir apresentados, com a indicação das configurações de cabos utilizadas na torre. Os restantes resultados, referentes aos restantes modelos de torres de telecomunicações, são apresentados no Apêndice VI.

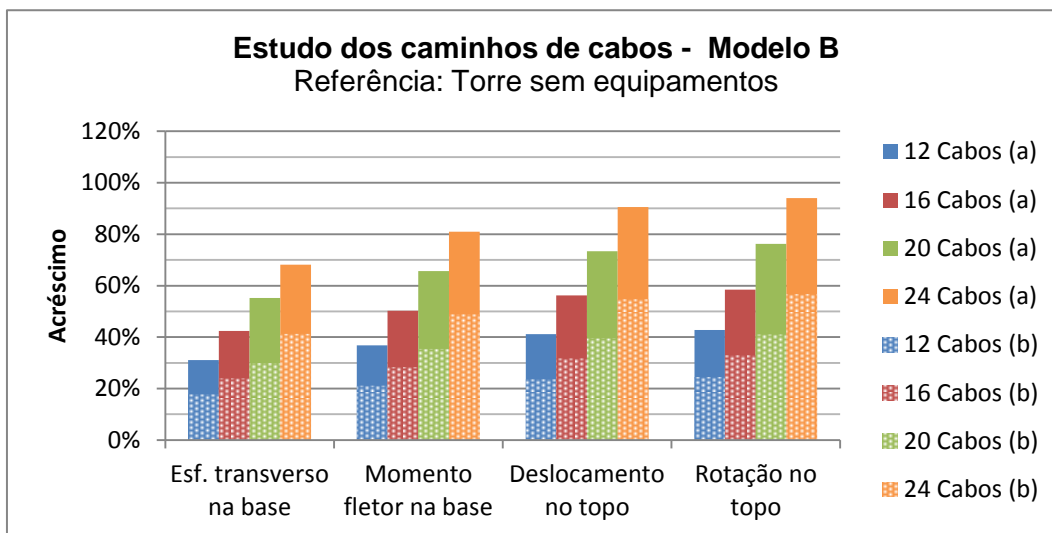


Gráfico 4.48 - Variação obtida no estudo da otimização dos caminhos de cabos, no modelo B.

(a) – Configuração de cabos original; (b) – Configuração de cabos otimizada

Quadro 4.67 - Variação obtida no estudo da otimização dos caminhos de cabos, no modelo B.

Estudo dos caminhos de cabos - Modelo B								
Configuração	Esf. transverso na base		Momento fletor na base		Deslocamento no topo		Rotação no topo	
	V_0 [kN]	ΔV_0	M_0 [kNm]	ΔM_0	u_1 [m]	Δu_1	θ [rad]	$\Delta \theta_1$
Sem cabos	14,91	-	271,64	-	0,266	-	0,011	-
12 Cabos (a)	19,54	31%	371,69	37%	0,376	41%	0,016	43%
12 Cabos (b)	17,57	18%	328,96	21%	0,329	24%	0,014	24%
16 Cabos (a)	21,23	42%	408,26	50%	0,416	56%	0,018	58%
16 Cabos (b)	18,48	24%	348,77	28%	0,350	32%	0,015	33%
20 Cabos (a)	23,15	55%	449,91	66%	0,461	73%	0,020	76%
20 Cabos (b)	19,37	30%	367,91	35%	0,371	40%	0,016	41%
24 Cabos (a)	25,08	68%	491,56	81%	0,507	91%	0,022	94%
24 Cabos (b)	21,06	41%	404,47	49%	0,411	55%	0,017	57%

(a) - Configuração de cabos original; (b) – Configuração de cabos otimizada

Através da análise dos resultados obtidos, verifica-se que a alteração da disposição dos caminhos de cabos provoca importantes reduções nos valores dos esforços na base, e

do deslocamento e da rotação no topo da torre. Este facto deve-se, como foi já visto, à otimização dos valores das áreas de referência, e dos respetivos coeficientes de força, dos caminhos de cabos. Observando, por exemplo, os valores do esforço transversal para as configurações de 12 cabos, verifica-se que, no caso da configuração original, ocorre um aumento de 31% do valor máximo, em relação ao caso da torre sem cabos, enquanto que no caso da configuração otimizada este aumento é apenas de 18%. Esta situação verifica-se igualmente em outras configurações de cabos, para o mesmo número de elementos, podendo a redução ser ainda maior. Relativamente aos restantes parâmetros (momento fletor, deslocamento e rotação) verifica-se a mesma situação, ou seja, reduções relevantes.

A importância da utilização de soluções com melhores desempenhos é tão significativa que é possível ter uma colocação de 12 cabos, numa forma não otimizada, com valores dos diferentes parâmetros (esforços e deslocamentos) idênticos aos de uma colocação de 20 cabos, com preocupações de otimização da sua disposição.

A opção deve assim recair em conjuntos de cabos com menos elementos na face frontal de incidência do vento, juntando-se os cabos adicionais necessários em camadas subsequentes. Se é um facto que deste modo é possível agrupar grandes quantidades de cabos, alterando pouco o valor da correspondente área de referência, o coeficiente de força de cada caminho varia conforme a sua relação entre a largura e comprimento do grupo de cabos.

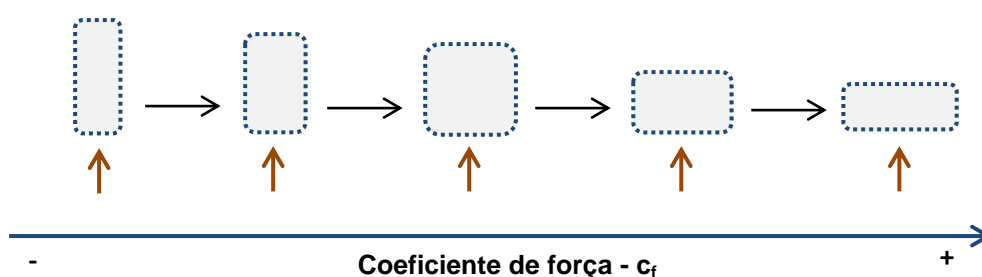


Figura 4.39 - Variação do coeficiente de força com a forma do caminho de cabos.

O coeficiente de força aumenta com a largura do agrupamento de cabos, como exemplificado na Figura 4.39. Atendendo ao facto de a área de referência também acompanhar a variação do coeficiente de força, a otimização do agrupamento de cabos passa pela minimização do número de elementos na face de incidência do vento.

4.4.2.1. Estudo do efeito de grupo dos cabos com a torre

O escoamento do ar, quando o vento sofre desvios devido à presença de elementos que impedem a sua trajetória normal, não se processa da mesma forma, o que afeta sobretudo a sua intensidade. No caso do escoamento em torno da secção de torres, com os caminhos de cabos colocados conforme foi referido, a sua trajetória não é a mesma, conforme a forma como se considera a permeabilidade do conjunto do fuste da torre e dos grupos de cabos.

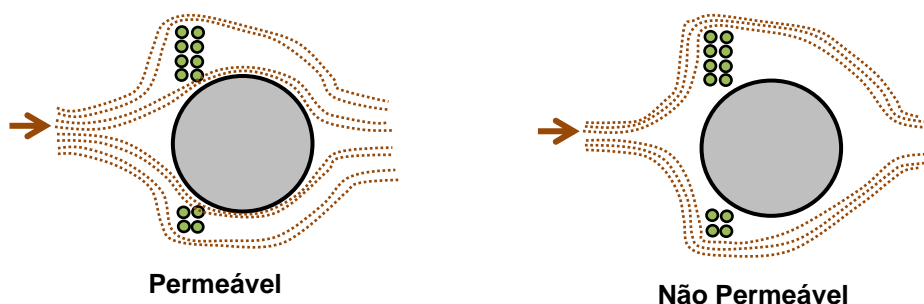


Figura 4.40 - Representação do escoamento do ar sobre os caminhos de cabos.

Até agora, os escoamentos considerados são permeáveis, ou seja, os cabos e a torre constituem elementos sólidos não permeáveis, mas o vento consegue passar entre eles, conforme se indica na Figura 4.40. É atribuído um coeficiente de força aos caminhos de cabos e à torre, e a força do vento é a soma das forças respetivas em cada elemento. No caso de se considerar a hipótese de um escoamento não permeável, admite-se que os caminhos de cabos foram colocados sem qualquer folga em relação à torre, formando assim um bloco “opaco”, em que o escoamento do ar tem obrigatoriamente de se processar em torno do contorno exteriores do bloco. Conforme representado na Figura 4.41, neste caso é atribuído um único coeficiente de força global, a partir do qual se pode calcular a força do vento que atua sobre o bloco, considerando a sua largura b igual à soma das larguras dos seus componentes e a distância d igual à profundidade do conjunto de cabos (Figura 4.41), pois o escoamento só retoma a sua trajetória original alguns metros depois.

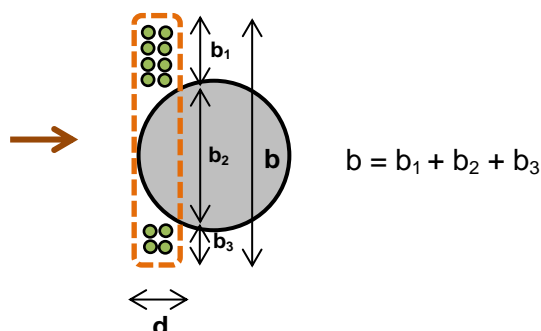


Figura 4.41 - Incidência do vento considerando o conjunto dos cabos com a torre.

Esta situação é analisada para os casos de disposições de cabos otimizados, nomeadamente de 12, 16, 20 e 24 cabos. Na definição do comprimento d considera-se o máximo dos dois caminhos de cabos.

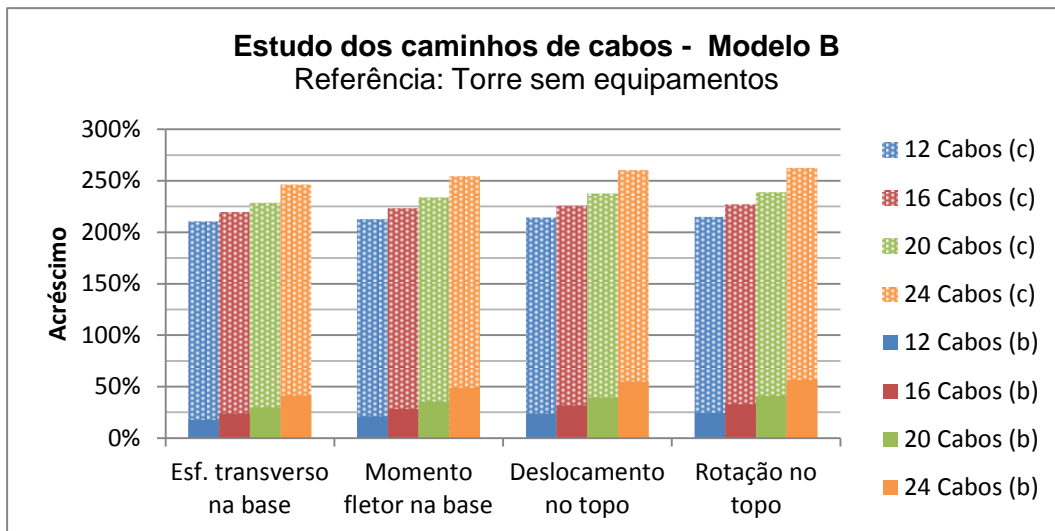


Gráfico 4.49 - Análise do efeito de bloco nos caminhos de cabos, no modelo B.

(b) – Configuração de cabos otimizada; (c) – Caminhos de cabos considerados como bloco

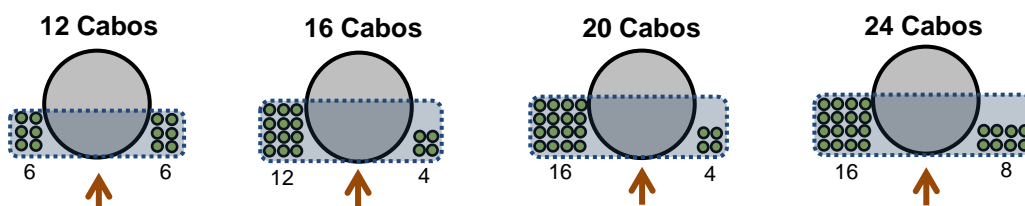


Figura 4.42 - Conjunto de cabos considerados como um bloco único.

Quadro 4.68 - Análise do efeito de bloco nos caminhos de cabos, no modelo B.

Estudo dos caminhos de cabos - Modelo B								
Configuração	Esf. transversa na base		Momento fletor na base		Deslocamento no topo		Rotação no topo	
	V_0 [kN]	ΔV_0	M_0 [kNm]	ΔM_0	u_1 [m]	Δu_1	θ [rad]	$\Delta \theta_1$
Sem cabos	14,91	-	271,64	-	0,266	-	0,011	-
12 Cabos (b)	17,57	18%	328,96	21%	0,329	24%	0,014	24%
12 Cabos (c)	46,31	211%	849,51	213%	0,836	214%	0,035	215%
16 Cabos (b)	18,48	24%	348,77	28%	0,350	32%	0,015	33%
16 Cabos (c)	47,66	220%	878,13	223%	0,867	226%	0,036	227%
20 Cabos (b)	19,37	30%	367,91	35%	0,371	40%	0,016	41%
20 Cabos (c)	49,01	229%	906,74	234%	0,898	237%	0,038	239%
24 Cabos (b)	21,06	41%	404,47	49%	0,411	55%	0,017	57%
24 Cabos (c)	51,62	246%	962,54	254%	0,958	260%	0,040	262%

Pela análise dos resultados obtidos constata-se que o facto de se considerar o conjunto da torre e dos caminhos de cabos como um bloco não permeável aumenta bastante os valores dos esforços na base, e do deslocamento e da rotação no topo da torre. Verifica-se, por exemplo, um aumento de apenas 18% no valor do esforço transversal máximo, considerando o conjunto permeável de 12 cabos com a torre, enquanto que, no caso de se considerar um bloco não permeável, o mesmo esforço sofre um acréscimo de 211%, relativamente à situação da torre sem cabos.

Faz-se notar que a área de referência se mantém constante, conforme se considere o conjunto como permeável ou não permeável, devendo-se as variações registadas à alteração do coeficiente de força. Analisando esta alteração à altura de 20 m, no caso da torre do modelo B, vemos que os coeficientes de força diferem bastante.

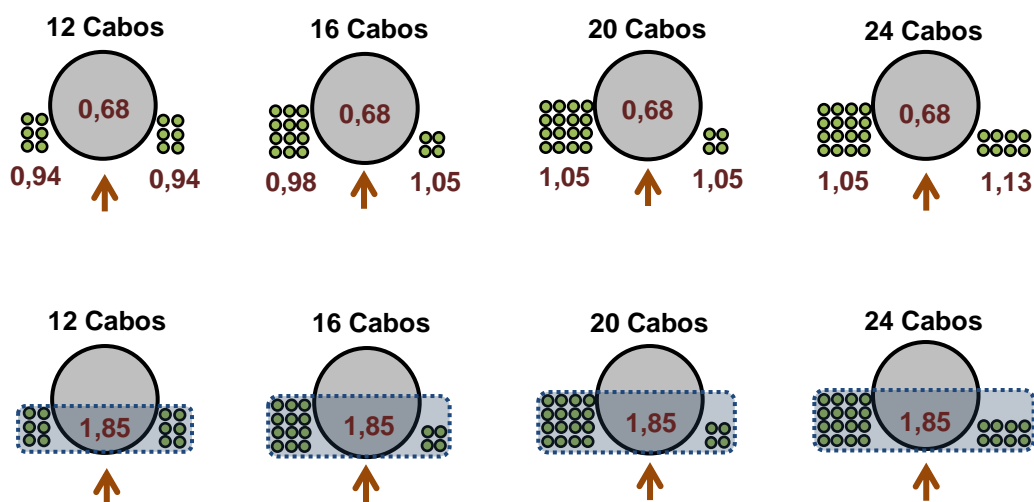


Figura 4.43 - Coeficientes de força atribuídos aos caminhos de cabos singulares e considerando o efeito de bloco com a torre, aos 20 m no modelo B.

Confirma-se que o coeficiente de força global, do bloco não permeável, é bastante superior a qualquer um dos coeficientes aplicáveis a cada elemento individual do conjunto dos caminhos de cabos e da torre. Este facto faz com que os esforços na base, e do deslocamento e da rotação no topo da torre, numa situação deste tipo, sejam muito maiores, pois a ação do vento é maior.

Trata-se, sem dúvida, de uma diferença muito significativa, confirmando que o efeito de bloco, induzido pelo conjunto dos caminhos de cabos e da torre, deve ser tomado em conta na análise da ação do vento. É certo que dificilmente faltarão folgas entre os caminhos de cabos e o fuste da torre, que permitirão o livre escoamento do ar em torno de cada elemento individual, mas o efeito de grupo, mesmo que seja considerado apenas de

forma parcial, terá certamente uma contribuição importante para a ação do vento sobre a torre de telecomunicações.

4.4.3. Estudo da ação do vento sobre as escadas

O último estudo relativo à ação do vento sobre os equipamentos de uma torre de telecomunicações está relacionado com as escadas. À semelhança dos caminhos de cabos, as escadas são colocadas ao longo de toda a altura da torre e têm como função facilitar o acesso do pessoal às antenas e restantes equipamentos instalados. Como foi visto anteriormente, existem diversos tipos de escadas, com diferentes características próprias, nomeadamente no que se refere à utilização, ou não, de dispositivos como o corrimão, guarda-corpos, degrau contínuo e calha anti-queda.

Neste estudo vão ser considerados quatro tipos de escadas correntemente utilizadas, com diferentes áreas de referência. Como existe uma grande variação entre estes elementos, os dados sobre as escadas foram obtidos através de valores aproximados de áreas de referência tipicamente utilizados no projeto de torres de telecomunicações. Segundo dados fornecidos pelo fabricante, considera-se, de forma simplificada, um valor de 1,60 para o coeficiente de força, semelhante para todos os tipos de escadas.

Quadro 4.69 - Características dos tipos de escadas considerados para o estudo.

Tipo	A_{ref} [m ²]	c_f
A	0,057	1,60
B	0,096	1,60
C	0,155	1,60
D	0,218	1,60

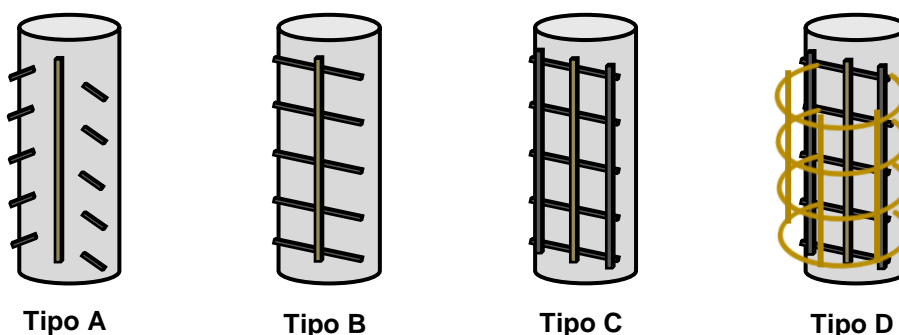


Figura 4.44 - Representação dos quatro tipos de escadas considerados no estudo.

O estudo vai ser realizado através da colocação de cada tipo de escadas em cada um dos 4 modelos de torres de telecomunicações anteriormente definidos. O objetivo consiste em determinar os valores dos esforços na base, e do deslocamento e da rotação no topo da torre, para a ação do vento sobre o conjunto da torre e das escadas, e medir a variação desses mesmos valores.

Os resultados da variação dos valores máximos, obtidos para a colocação de cada tipo de escada ao longo do comprimento da torre identificada como modelo B são a seguir apresentados. Os resultados obtidos para os restantes modelos são apresentados no Apêndice VII.

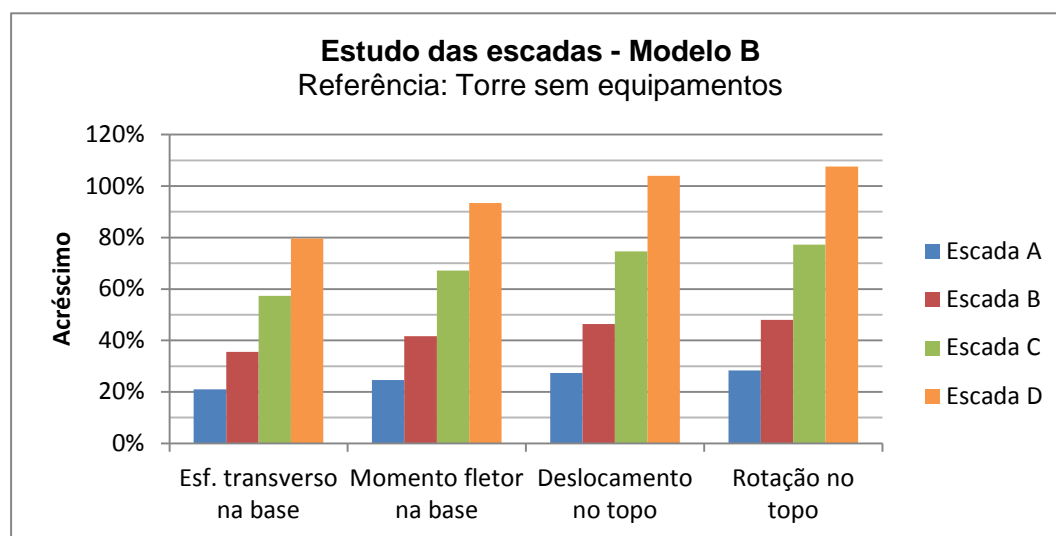


Gráfico 4.50 - Variações obtidas para os diversos tipos de escadas, no modelo B.

Quadro 4.70 - Variações obtidas para os diversos tipos de escadas, no modelo B.

Estudo das escadas - Modelo B								
Configuração	Esf. transverso na base		Momento fletor na base		Deslocamento no topo		Rotação no topo	
	V_0 [kN]	ΔV_0	M_0 [kNm]	ΔM_0	u_1 [m]	Δu_1	θ [rad]	$\Delta \theta_1$
Sem escada	14,91	-	271,64	-	0,266	-	0,011	-
Escada A	18,03	21%	338,46	25%	0,339	27%	0,014	28%
Escada B	20,22	36%	384,95	42%	0,389	46%	0,016	48%
Escada C	23,45	57%	454,03	67%	0,464	75%	0,020	77%
Escada D	26,77	80%	525,51	93%	0,543	104%	0,023	108%

Analisando os resultados obtidos para a torre do modelo B, é possível observar que a colocação de escadas ao longo do comprimento desta torre acresce de forma significativa os valores dos esforços na base, e do deslocamento e da rotação no seu topo.

A simples colocação de uma escada do tipo A, sem degrau contínuo e com calha anti-queda, ao longo do comprimento da estrutura, aumenta os valores referidos entre 21% e 28%, relativamente a uma situação de referência, de uma torre sem qualquer equipamento instalado. Aquando da colocação dos restantes tipos de escadas, com maiores áreas de referência, estes valores ainda se agravam mais; a colocação da escada D na torre, incluindo o corrimão, degraus contínuos, calha anti-queda e guarda-corpos, acresce os valores máximos entre 80% e 108%, também em relação a uma torre sem equipamentos instalados.

Verifica-se, assim, que a colocação de escadas em torres de telecomunicações, ao longo da sua altura total, deve ser tida em conta no projeto deste tipo de estruturas, devido à importância que assume no cálculo da ação do vento. O acréscimo verificado nos resultados obtidos resulta do aumento da área de referência e da ligeira subida do coeficiente estrutural, como é possível verificar nos resultados apresentados no Apêndice VII, uma vez que o coeficiente de força se mantém igual.

Há, entretanto, um facto que não pode ser esquecido, quanto à ação do vento sobre as escadas. Este tipo de equipamentos é disposto diretamente sobre o fuste da estrutura, o que significa que existe uma sobreposição das superfícies expostas da escada e da torre.

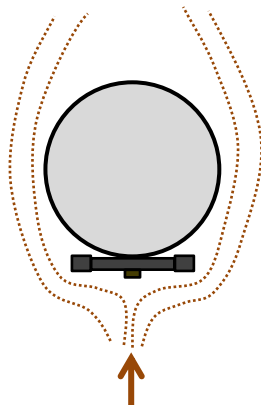


Figura 4.45 - Representação da sobreposição das superfícies expostas da escada e da torre no caso de uma incidência frontal do vento.

Nos cálculos efetuados considerou-se a força total do vento como a soma das forças atuantes sobre a torre e sobre a escada, de forma isolada. Ora, sendo certo que uma parte considerável da escada se sobrepõe ao fuste da torre, este método pode ser considerado demasiado conservativo. À semelhança da situação verificada nas interfaces de antenas, existe um efeito de escudo proporcionado pelo posicionamento em série destes elementos, relativamente à direção de incidência do vento, que faz com que a força total do vento não seja realmente traduzida pelo somatório dos seus efeitos sobre os elementos

isolados. Além disso, no caso das escadas, uma boa parte da sua área encontra-se perfeitamente justaposta ao fuste da torre, pelo que, na soma dos efeitos isolados se está a considerar, de forma errada, duas vezes a mesma área de referência.

Segundo o anexo B.2.3 da EN 1993-3-1:2006 (EC3-3-1), que estabelece a regulamentação aplicável ao projeto de torres e mastros de aço, deve-se aplicar, no cálculo dos coeficientes de força de itens auxiliares com desenvolvimento linear, tais como cabos e outros, um coeficiente de redução K_A , de forma a ter em conta o efeito de escudo que esse elemento oferece à estrutura, ou vice-versa.

Como as escadas têm um desenvolvimento linear ao longo do fuste da torre de telecomunicações, e visto que a sua área de incidência está sobreposta à da estrutura, este método é aplicável se for considerado o efeito de escudo na determinação da acção do vento sobre este tipo de equipamentos.

O EC3-3-1 preconiza que o coeficiente de força do elemento deve ser afectado pelo coeficiente de redução K_A que, para qualquer situação, em termos de posicionamento ou de forma geométrica, toma o seguinte valor.

$$K_A = 0,8$$

Aplicando-se o coeficiente de redução K_A aos tipos de escadas anteriormente utilizados, e considerando os 4 modelos de torres anteriormente definidos, obtiveram-se os seguintes resultados para a variação dos valores dos esforços na base, e do deslocamento e da rotação no topo da torre do modelo B. Os resultados obtidos para os restantes tipos de torres são apresentados no Apêndice VII.

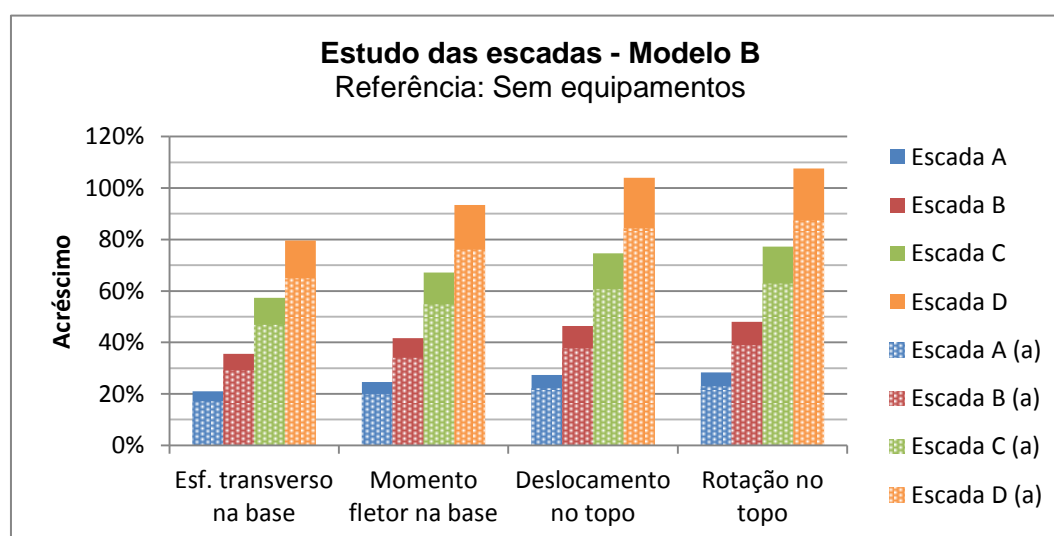


Gráfico 4.51 - Variação obtida no estudo do efeito de escudo nas escadas, no modelo B.

(a) – Aplicado o coeficiente de redução à escada.

Quadro 4.71 - Variação obtida no estudo do efeito de escudo nas escadas, no modelo B.

Estudo das escadas - Modelo B								
Configuração	Esf. transverso na base		Momento fletor na base		Deslocamento no topo		Rotação no topo	
	V_0 [kN]	ΔV_0	M_0 [kNm]	ΔM_0	u_1 [m]	Δu_1	θ [rad]	$\Delta \theta_1$
Sem escada	14,91	-	271,64	-	0,266	-	0,011	-
Escada A	18,03	21%	338,46	25%	0,339	27%	0,014	28%
Escada A (a)	17,47	17%	326,14	20%	0,325	22%	0,014	23%
Escada B	20,22	36%	384,95	42%	0,389	46%	0,016	48%
Escada B (a)	19,26	29%	364,20	34%	0,367	38%	0,015	39%
Escada C	23,45	57%	454,03	67%	0,464	75%	0,020	77%
Escada C (a)	21,90	47%	420,52	55%	0,428	61%	0,018	63%
Escada D	26,77	80%	525,51	93%	0,543	104%	0,023	108%
Escada D (a)	24,60	65%	478,38	76%	0,491	84%	0,021	87%

(a) – Aplicado o coeficiente de redução à escada.

Como se pode observar através dos resultados obtidos, verificam-se ligeiras descidas nos valores dos esforços na base, e do deslocamento e da rotação no topo da torre de telecomunicações, com a aplicação do coeficiente de redução.

Nos tipos de escadas com maior área de referência, a variação é naturalmente maior. É possível ver que, por exemplo, enquanto a aplicação do coeficiente na escada do tipo A faz com que se verifique uma pequena redução na variação do valor máximo do esforço transversal, de 21% para 17%, na escada do tipo D a redução já tem um maior significado, passando de 80% para 65%. No caso dos restantes parâmetros (momento fletor e deslocamentos) observa-se o mesmo tipo de variações, com reduções ainda mais importantes.

Apesar de, muito provavelmente, o valor considerado para o coeficiente de redução traduzir, apenas de forma aproximada, o efeito de escudo proporcionado pela escada ao fuste da torre, verifica-se que a aplicação do valor indicado no EC3-3-1 faz com que ocorram reduções com algum significado. O mesmo se deverá verificar noutros equipamentos que se encontrem sobrepostos com a superfície da torre, como nos casos de antenas isoladas e de caminhos de cabos colocados dessa forma, embora este último caso não seja tão frequente.

4.5. Estudo geral da ação do vento

Após o estudo isolado da influência de cada fator, realizado nos capítulos anteriores, é importante complementar o mesmo com algumas observações sobre a sua influência conjunta. Uma vez que as variações dos valores máximos dos esforços, do deslocamento e da rotação, foram obtidas de forma relativa, para a influência de um único fator, respetivamente pela alteração do tipo de zona e da categoria de terreno, pela consideração da orografia, ou pela colocação de equipamentos, procura-se verificar, de forma simplificada, a sua influência individual em relação ao efeito conjunto de todos estes fatores.

Para aferir a influência individual de cada fator na ação do vento sobre a estrutura, consideraram-se os 4 modelos de torres de telecomunicações utilizados nos estudos precedentes, com diferentes localizações e distribuições de equipamentos, como é possível ver no Quadro 4.72. Considera-se que, em todos estes casos, as torres se encontram localizadas num terreno plano.

Quadro 4.72 - Descrição geral dos casos de torres considerados no estudo.

Torre	Zona	Terreno	Equipamentos					Cabos	Escadas
			Antenas		Interfaces				
			z [m]	n	z [m]	Tipo			
A	B	III	21	1	30	B	12	Tipo B	
			30	5					
B	A	II	16	2	16	C	20	Tipo D	
			18	1					
			32	1	40	A			
			40	9					
C	A	III	20	2	30	B	12	Tipo B	
			30	8					
D	A	IV	30	1	16	C	24	Tipo B	
			35	3	40	A			
			40	9					

Cada uma destas situações foi obtida através de casos reais de torres de telecomunicações existentes em Portugal. O objetivo do estudo é determinar, para cada

caso, os valores dos esforços na base, e do deslocamento e da rotação no topo, e obter assim as influências, de forma individual, de cada fator nos resultados globais. Assim, será possível estudar com maior precisão as respetivas influências, bem como chegar a valores típicos em torres de telecomunicações, embora num universo reduzido de apenas 4 modelos. No caso das interfaces considera-se a área de referência média, entre a máxima e a mínima, como foi referido anteriormente na dissertação.

Os dados relativos aos equipamentos considerados em cada modelo, bem como todo o cálculo relativo à ação do vento, são fornecidos no Apêndice VIII. Para cada modelo apresentam-se apenas os gráficos com os valores médios, encontrando-se os restantes no Apêndice VIII.

No estudo da influência de cada um dos elementos que compõem a torre do modelo A, os resultados obtidos foram os seguintes.

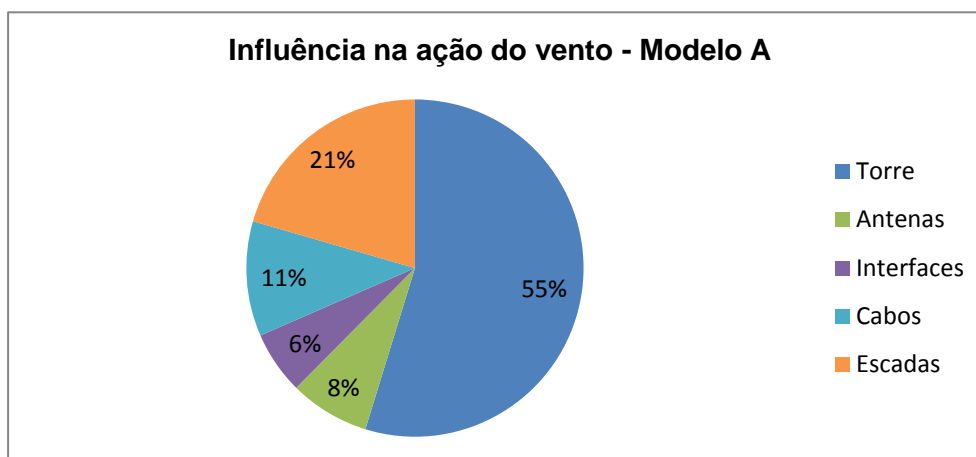


Gráfico 4.52 - Influência relativa média na ação global do vento, no modelo A.

Quadro 4.73 - Influência relativa média na ação global do vento, no modelo A.

Influência na ação do vento - Modelo A									
Elemento	Esf. transverso na base		Momento fletor na base		Deslocamento no topo		Rotação no topo		Média
	V_0 [kN]	$V_{0,i}$	M_0 [kNm]	$M_{0,i}$	u_1 [m]	$u_{1,i}$	θ_1 [rad]	$\theta_{1,i}$	
Torre	15,75	62%	225,57	56%	0,258	51%	0,014	49%	55%
Antenas	0,99	4%	26,80	7%	0,047	9%	0,003	11%	8%
Interfaces	0,67	3%	19,70	5%	0,038	8%	0,003	9%	6%
Cabos	2,75	11%	45,19	11%	0,056	11%	0,003	11%	11%
Escadas	5,13	20%	84,14	21%	0,104	21%	0,006	20%	21%

No caso do modelo B obtiveram-se os seguintes resultados:

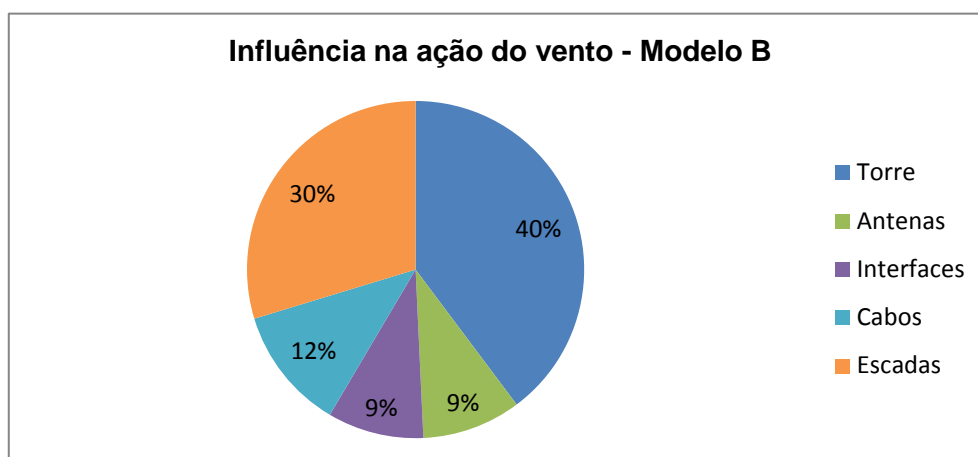


Gráfico 4.53 - Influência relativa média na ação global do vento, no modelo B.

Quadro 4.74 - Influência relativa média na ação global do vento, no modelo B.

Influência na ação do vento - Modelo B									
Elemento	Esf. transverso na base		Momento fletor na base		Deslocamento no topo		Rotação no topo		Média
	V_0 [kN]	$V_{0,i}$	M_0 [kNm]	$M_{0,i}$	u_1 [m]	$u_{1,i}$	θ_1 [rad]	$\theta_{1,i}$	
Torre	27,28	48%	514,66	42%	0,498	36%	0,021	33%	40%
Antenas	3,06	5%	100,41	8%	0,154	11%	0,008	13%	9%
Interfaces	2,57	5%	92,13	7%	0,153	11%	0,009	14%	9%
Cabos	6,81	12%	150,02	12%	0,163	12%	0,007	11%	12%
Escadas	17,13	30%	377,53	31%	0,410	30%	0,018	28%	30%

Os resultados obtidos no estudo do modelo C foram os seguintes:

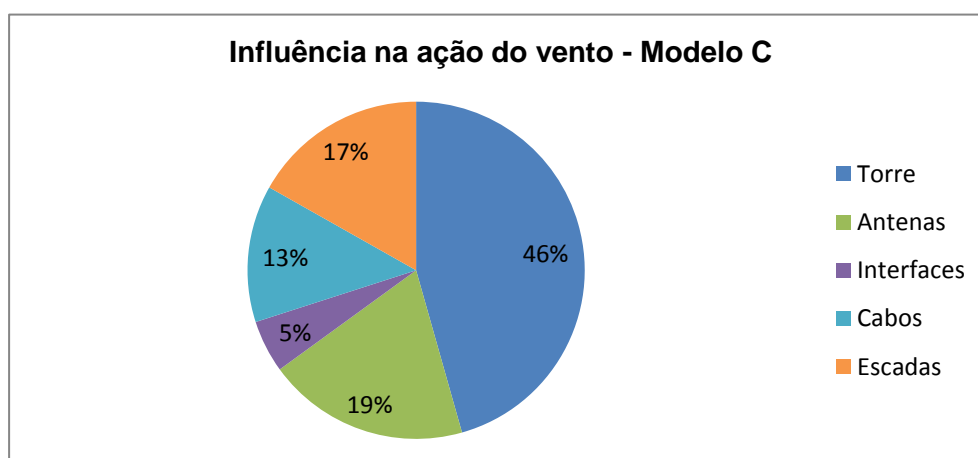


Gráfico 4.54 - Influência relativa média na ação global do vento, no modelo C.

Quadro 4.75 - Influência relativa média na ação global do vento, no modelo C.

Influência na ação do vento - Modelo C									
Elemento	Esf. transverso na base		Momento fletor na base		Deslocamento no topo		Rotação no topo		Média
	V_0 [kN]	$V_{0,i}$	M_0 [kNm]	$M_{0,i}$	u_1 [m]	$u_{1,i}$	θ_1 [rad]	$\theta_{1,i}$	
Torre	13,78	58%	188,22	48%	0,194	40%	0,011	36%	46%
Antenas	2,18	9%	62,92	16%	0,115	24%	0,008	28%	19%
Interfaces	0,54	2%	15,96	4%	0,030	6%	0,002	8%	5%
Cabos	3,24	14%	53,23	14%	0,063	13%	0,004	12%	13%
Escadas	4,15	17%	68,16	18%	0,080	17%	0,005	16%	17%

Por último, apresentam-se os resultados obtidos no estudo da influência relativa de cada elemento, no caso do modelo D.

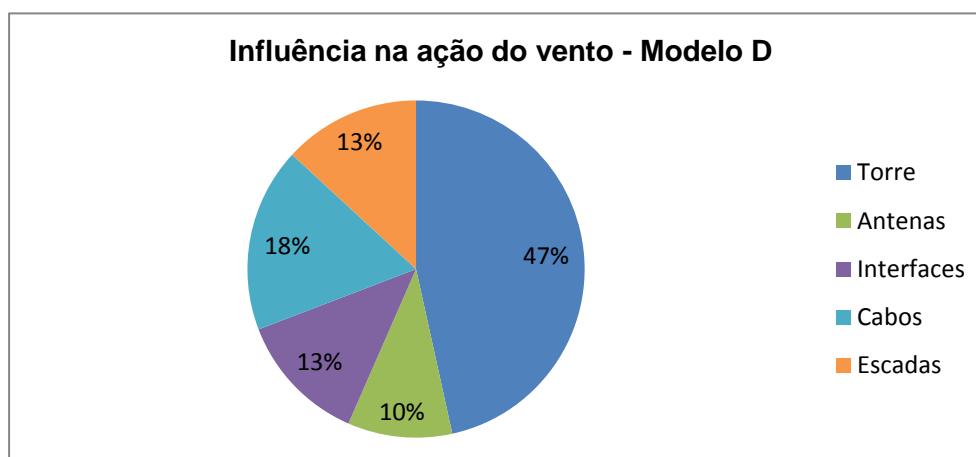


Gráfico 4.55 - Influência relativa média na ação global do vento, no modelo D.

Quadro 4.76 - Influência relativa média na ação global do vento, no modelo D.

Influência na ação do vento - Modelo D									
Elemento	Esf. transverso na base		Momento fletor no topo		Deslocamento no topo		Rotação no topo		Média
	V_0 [kN]	$V_{0,i}$	M_0 [kNm]	$M_{0,i}$	u_1 [m]	$u_{1,i}$	θ_1 [rad]	$\theta_{1,i}$	
Torre	21,44	60%	385,18	51%	0,414	40%	0,023	36%	47%
Antenas	1,55	4%	57,48	8%	0,137	13%	0,010	15%	10%
Interfaces	1,73	5%	66,77	9%	0,175	17%	0,013	20%	13%
Cabos	6,44	18%	139,71	19%	0,183	18%	0,011	17%	18%
Escadas	4,78	13%	103,77	14%	0,136	13%	0,008	12%	13%

No Quadro 4.77, apresenta-se um resumo dos resultados obtidos, para os diferentes modelos de torres, de modo a possibilitar uma melhor comparação dos mesmos.

Quadro 4.77 - Influência relativa média dos diferentes fatores na ação do vento sobre a estrutura.

Influência dos parâmetros na ação do vento						
Modelo	Torre	Equipamentos				
		Antenas	Interfaces	Cabos	Escadas	TOTAL
A	55%	8%	6%	11%	21%	45%
B	40%	9%	9%	12%	30%	60%
C	46%	19%	5%	13%	17%	54%
D	47%	10%	13%	18%	13%	53%

Através da análise dos resultados obtidos para cada modelo estudado observa-se desde logo que o fuste da torre é o elemento que maior influência tem na ação global do vento sobre a torre de telecomunicações. Com efeito, é possível verificar, para os diferentes modelos, uma influência média deste fator, no conjunto dos valores máximos dos esforços, do deslocamento e da rotação, de 40% a 55% na ação global do vento.

Contudo, deve-se ter em conta que os restantes elementos considerados são equipamentos que, no seu conjunto, adquirem uma importância efetiva no cálculo da ação do vento sobre a estrutura. Aliás, em todas as situações de cálculo consideradas para estes 4 modelos de torres (com exceção do modelo A), a influência relativa do conjunto de todos os equipamentos, com valores totais compreendidos entre 45% e 60% da ação global do vento, é sempre maior que a influência do próprio fuste da torre, o que reforça a importância dos equipamentos na ação global do vento sobre este tipo de estruturas. Entre os diversos tipos de equipamentos considerados, observa-se que os elementos lineares, geralmente dispostos ao longo da altura da torre, apresentam os valores mais expressivos.

Estes resultados comprovam a necessidade de um estudo pormenorizado de cada componente e dos diversos parâmetros que influenciam a ação do vento, como a definição do tipo de zona, a categoria do terreno e a orografia, no projeto de uma torre de telecomunicações. Se na definição do tipo de zona e da categoria do terreno, ou mesmo na consideração dos efeitos orográficos, a margem de erro poderá ser menor, pois são fatores obrigatoriamente presentes no processo de cálculo da pressão dinâmica de pico e da consequente força do vento, não podendo assim ser ignorados, no caso dos equipamentos poderão existir elementos omissos ou considerados de forma errada na determinação da ação do vento. O facto de existir uma grande incerteza associada aos valores atribuídos aos parâmetros que definem estes elementos, tais como os coeficientes de força, ou mesmo aos

fenómenos que poderão ocorrer, tais como o efeito de interferência, conduz a um aumento significativo da margem de erro no cálculo da ação do vento.

No entanto, a sobreposição da influência dos vários fatores é essencial para a compreensão dos resultados obtidos até agora, bem como um dos principais objetivos da dissertação. Dessa forma será possível comparar de forma direta algumas configurações típicas de torres de telecomunicações, e assim perceber quais são os parâmetros mais influentes nas diversas situações consideradas.

Para os 4 modelos de torres de telecomunicações utilizados ao longo do estudo consideraram-se algumas situações típicas de distribuição de equipamentos, bem como de localização da estrutura, que são descritas no quadro seguinte.

Quadro 4.78 - Parâmetros considerados para os 4 modelos de torres.

Torre	Localização		Equipamentos			
	Zona-Terreno	Orografia	Interface	Antenas	Cabos	Escadas
A	A - II B - I	Plano $\Phi = 0,2$	Tipo A Tipo B	n = 6	n = 16 n = 20	Tipo B Tipo C
				n = 9		
				n = 12		
B	A - II B - I	Plano $\Phi = 0,2$	Tipo A Tipo B	n = 9	n = 20 n = 24	Tipo B Tipo C
				n = 13		
				n = 17		
C	A - II B - I	Plano $\Phi = 0,2$	Tipo A Tipo B	n = 6	n = 16 n = 20	Tipo B Tipo C
				n = 9		
				n = 12		
D	A - II B - I	Plano $\Phi = 0,2$	Tipo A Tipo B	n = 9	n = 20 n = 24	Tipo B Tipo C
				n = 13		
				n = 17		

Através da combinação das diferentes situações, para cada um dos parâmetros enunciados no Quadro 4.78, são obtidas várias soluções típicas de torres de telecomunicações. Neste estudo apenas serão analisados os valores máximos do esforço transversal e do momento fletor na base da torre. O objetivo é obter um conjunto de valores que permitam avaliar o acréscimo do esforço transversal e do momento fletor entre as diferentes situações definidas para cada modelo de torre.

Para este efeito, são definidos o coeficiente de esforço transversal na base (k_{V0}) e o coeficiente de momento fletor na base (k_{M0}). Estes coeficientes são obtidos através da

relação entre o valor do esforço para a situação em questão e o valor mínimo do mesmo esforço no conjunto de todas as situações consideradas.

Os resultados obtidos, assim como a descrição pormenorizada dos parâmetros considerados, são apresentados no Apêndice VIII. Em cada um dos quadros é indicado o valor mínimo de referência para as diversas situações. Os valores dos coeficientes de esforço transversal obtidos para a torre do modelo A são apresentados no Quadro 4.79.

Quadro 4.79 - Coeficientes de esforço transversal para o modelo A.

Coeficientes de esforço transversal k_{v0} – Modelo A							
Equipamentos				Localização			
Interface	Antenas	Escadas	Cabos	Zona A - Terreno II		Zona B - Terreno I	
				Plano	$\Phi = 0,2$	Plano	$\Phi = 0,2$
Tipo A	n = 6	Tipo B	n = 16	1,06	1,77	1,58	2,68
			n = 20	1,13	1,88	1,67	2,84
		Tipo C	n = 16	1,18	1,97	1,76	2,98
			n = 20	1,25	2,08	1,85	3,15
	n = 9	Tipo B	n = 16	1,09	1,82	1,62	2,76
			n = 20	1,15	1,93	1,72	2,92
		Tipo C	n = 16	1,21	2,02	1,80	3,06
			n = 20	1,28	2,12	1,90	3,23
	n = 12	Tipo B	n = 16	1,11	1,86	1,66	2,83
			n = 20	1,18	1,97	1,76	3,00
		Tipo C	n = 16	1,23	2,06	1,84	3,14
			n = 20	1,30	2,17	1,94	3,30
Tipo B	n = 6	Tipo B	n = 16	1,00	1,67	1,49	2,54
			n = 20	1,07	1,78	1,59	2,70
		Tipo C	n = 16	1,12	1,87	1,67	2,84
			n = 20	1,19	1,98	1,77	3,00
	n = 9	Tipo B	n = 16	1,03	1,72	1,53	2,62
			n = 20	1,09	1,83	1,63	2,78
		Tipo C	n = 16	1,15	1,92	1,72	2,92
			n = 20	1,22	2,03	1,81	3,08
	n = 12	Tipo B	n = 16	1,05	1,76	1,57	2,69
			n = 20	1,12	1,87	1,67	2,86
		Tipo C	n = 16	1,17	1,96	1,75	2,99
			n = 20	1,24	2,07	1,85	3,16

Os valores dos coeficientes de momento fletor obtidos para a torre do modelo A são apresentados no Quadro 4.80.

Quadro 4.80 – Coeficientes de momento fletor para o modelo A.

Coeficientes de momento fletor k_{M0} – Modelo A							
Equipamentos				Localização			
Interface	Antenas	Escadas	Cabos	Zona A - Terreno II		Zona B - Terreno I	
				Plano	$\Phi = 0,2$	Plano	$\Phi = 0,2$
Tipo A	n = 6	Tipo B	n = 16	1,10	1,84	1,61	2,75
			n = 20	1,17	1,95	1,71	2,91
		Tipo C	n = 16	1,22	2,04	1,79	3,05
			n = 20	1,29	2,15	1,89	3,21
	n = 9	Tipo B	n = 16	1,14	1,92	1,69	2,89
			n = 20	1,21	2,03	1,78	3,05
		Tipo C	n = 16	1,27	2,12	1,87	3,19
			n = 20	1,33	2,23	1,96	3,35
	n = 12	Tipo B	n = 16	1,18	1,99	1,74	3,00
			n = 20	1,24	2,10	1,84	3,16
		Tipo C	n = 16	1,30	2,19	1,92	3,29
			n = 20	1,37	2,30	2,02	3,46
Tipo B	n = 6	Tipo B	n = 16	1,00	1,68	1,47	2,52
			n = 20	1,07	1,79	1,57	2,68
		Tipo C	n = 16	1,12	1,88	1,65	2,82
			n = 20	1,19	1,99	1,75	2,98
	n = 9	Tipo B	n = 16	1,05	1,76	1,55	2,66
			n = 20	1,11	1,87	1,65	2,82
		Tipo C	n = 16	1,17	1,96	1,73	2,96
			n = 20	1,23	2,07	1,82	3,12
	n = 12	Tipo B	n = 16	1,08	1,83	1,61	2,77
			n = 20	1,15	1,94	1,70	2,93
		Tipo C	n = 16	1,20	2,03	1,78	3,06
			n = 20	1,27	2,14	1,88	3,23

No Quadro 4.81 apresentam-se os valores dos coeficientes de esforço transversal obtidos para a torre do modelo B.

Quadro 4.81 – Coeficientes de esforço transversal para o modelo B.

Coeficientes de esforço transversal k_{v0} – Modelo B							
Equipamentos				Localização			
Interface	Antenas	Escadas	Cabos	Zona A - Terreno II		Zona B - Terreno I	
				Plano	$\Phi = 0,2$	Plano	$\Phi = 0,2$
Tipo A	n = 9	Tipo B	n = 20	1,04	1,72	1,53	2,59
			n = 24	1,11	1,83	1,62	2,74
		Tipo C	n = 20	1,15	1,90	1,68	2,84
			n = 24	1,21	2,00	1,78	3,00
	n = 13	Tipo B	n = 20	1,06	1,77	1,56	2,65
			n = 24	1,13	1,87	1,66	2,81
		Tipo C	n = 20	1,17	1,94	1,72	2,91
			n = 24	1,23	2,04	1,81	3,06
	n = 17	Tipo B	n = 20	1,08	1,80	1,60	2,71
			n = 24	1,15	1,91	1,69	2,87
		Tipo C	n = 20	1,19	1,97	1,75	2,97
			n = 24	1,25	2,08	1,84	3,12
Tipo B	n = 9	Tipo B	n = 20	1,00	1,66	1,47	2,49
			n = 24	1,06	1,76	1,57	2,65
		Tipo C	n = 20	1,11	1,83	1,63	2,75
			n = 24	1,17	1,94	1,72	2,91
	n = 13	Tipo B	n = 20	1,02	1,70	1,51	2,56
			n = 24	1,09	1,80	1,60	2,72
		Tipo C	n = 20	1,13	1,87	1,66	2,81
			n = 24	1,19	1,98	1,76	2,97
	n = 17	Tipo B	n = 20	1,04	1,74	1,54	2,62
			n = 24	1,11	1,84	1,63	2,78
		Tipo C	n = 20	1,15	1,91	1,69	2,87
			n = 24	1,21	2,01	1,79	3,03

No Quadro 4.82 apresentam-se os coeficientes de momento fletor obtidos para a torre do modelo B.

Quadro 4.82 – Coeficientes de momento fletor para o modelo B.

Coeficientes de momento fletor k_{M0} – Modelo B							
Equipamentos				Localização			
Interface	Antenas	Escadas	Cabos	Zona A - Terreno II		Zona B - Terreno I	
				Plano	$\Phi = 0,2$	Plano	$\Phi = 0,2$
Tipo A	n = 9	Tipo B	n = 20	1,07	1,77	1,55	2,62
			n = 24	1,13	1,88	1,64	2,78
		Tipo C	n = 20	1,18	1,95	1,70	2,87
			n = 24	1,24	2,06	1,80	3,03
	n = 13	Tipo B	n = 20	1,10	1,83	1,60	2,72
			n = 24	1,17	1,94	1,70	2,88
		Tipo C	n = 20	1,21	2,01	1,76	2,97
			n = 24	1,28	2,12	1,85	3,13
	n = 17	Tipo B	n = 20	1,13	1,88	1,64	2,80
			n = 24	1,19	1,99	1,74	2,96
		Tipo C	n = 20	1,24	2,06	1,80	3,06
			n = 24	1,30	2,17	1,89	3,22
Tipo B	n = 9	Tipo B	n = 20	1,00	1,66	1,45	2,46
			n = 24	1,07	1,77	1,55	2,62
		Tipo C	n = 20	1,11	1,84	1,61	2,72
			n = 24	1,18	1,95	1,70	2,88
	n = 13	Tipo B	n = 20	1,03	1,73	1,51	2,57
			n = 24	1,10	1,83	1,60	2,73
		Tipo C	n = 20	1,14	1,90	1,66	2,82
			n = 24	1,21	2,01	1,76	2,98
	n = 17	Tipo B	n = 20	1,06	1,78	1,55	2,65
			n = 24	1,13	1,88	1,65	2,81
		Tipo C	n = 20	1,17	1,95	1,71	2,91
			n = 24	1,24	2,06	1,80	3,07

Quanto à torre representada pelo modelo C, os coeficientes de esforço transversal obtidos são os apresentados no Quadro 4.83.

Quadro 4.83 – Coeficientes de esforço transversal para o modelo C.

Coeficientes de esforço transversal k_{v0} – Modelo C							
Equipamentos				Localização			
Interface	Antenas	Escadas	Cabos	Zona A - Terreno II		Zona B - Terreno I	
				Plano	$\Phi = 0,2$	Plano	$\Phi = 0,2$
Tipo A	n = 6	Tipo B	n = 16	1,06	1,76	1,58	2,67
			n = 20	1,12	1,86	1,67	2,82
		Tipo C	n = 16	1,17	1,95	1,75	2,95
			n = 20	1,24	2,05	1,84	3,11
	n = 9	Tipo B	n = 16	1,08	1,81	1,62	2,74
			n = 20	1,15	1,91	1,71	2,90
		Tipo C	n = 16	1,20	1,99	1,79	3,03
			n = 20	1,26	2,10	1,88	3,19
	n = 12	Tipo B	n = 16	1,11	1,85	1,65	2,81
			n = 20	1,17	1,95	1,75	2,97
		Tipo C	n = 16	1,22	2,04	1,82	3,10
			n = 20	1,28	2,14	1,92	3,26
Tipo B	n = 6	Tipo B	n = 16	1,00	1,66	1,49	2,53
			n = 20	1,06	1,76	1,58	2,68
		Tipo C	n = 16	1,12	1,85	1,66	2,81
			n = 20	1,18	1,95	1,76	2,97
	n = 9	Tipo B	n = 16	1,03	1,71	1,53	2,60
			n = 20	1,09	1,81	1,63	2,76
		Tipo C	n = 16	1,14	1,90	1,70	2,89
			n = 20	1,20	2,00	1,80	3,05
	n = 12	Tipo B	n = 16	1,05	1,75	1,57	2,67
			n = 20	1,11	1,85	1,66	2,83
		Tipo C	n = 16	1,16	1,94	1,74	2,96
			n = 20	1,23	2,04	1,83	3,12

Os resultados obtidos para os coeficientes de momento fletor referentes à torre do modelo C são apresentados no Quadro 4.84.

Quadro 4.84 – Coeficientes de momento fletor para o modelo C.

Coeficientes de momento fletor k_{M0} – Modelo C							
Equipamentos				Localização			
Interface	Antenas	Escadas	Cabos	Zona A - Terreno II		Zona B - Terreno I	
				Plano	$\Phi = 0,2$	Plano	$\Phi = 0,2$
Tipo A	n = 6	Tipo B	n = 16	1,10	1,83	1,61	2,74
			n = 20	1,16	1,93	1,71	2,90
		Tipo C	n = 16	1,22	2,02	1,79	3,03
			n = 20	1,28	2,13	1,88	3,19
	n = 9	Tipo B	n = 16	1,14	1,91	1,69	2,88
			n = 20	1,21	2,02	1,78	3,04
		Tipo C	n = 16	1,26	2,11	1,86	3,17
			n = 20	1,33	2,21	1,96	3,33
	n = 12	Tipo B	n = 16	1,17	1,97	1,74	2,98
			n = 20	1,24	2,08	1,84	3,14
		Tipo C	n = 16	1,29	2,17	1,92	3,27
			n = 20	1,36	2,28	2,01	3,43
Tipo B	n = 6	Tipo B	n = 16	1,00	1,67	1,48	2,51
			n = 20	1,07	1,78	1,57	2,67
		Tipo C	n = 16	1,12	1,86	1,65	2,80
			n = 20	1,19	1,97	1,75	2,96
	n = 9	Tipo B	n = 16	1,04	1,75	1,55	2,65
			n = 20	1,11	1,86	1,64	2,81
		Tipo C	n = 16	1,16	1,95	1,72	2,94
			n = 20	1,23	2,06	1,82	3,10
	n = 12	Tipo B	n = 16	1,08	1,82	1,60	2,75
			n = 20	1,14	1,92	1,70	2,91
		Tipo C	n = 16	1,20	2,01	1,78	3,04
			n = 20	1,26	2,12	1,87	3,20

No Quadro 4.85 apresentam-se os coeficientes de esforço transverso obtidos para a torre do modelo D.

Quadro 4.85 – Coeficientes de esforço transverso para o modelo D.

Coeficientes de esforço transverso k_{v0} – Modelo D							
Equipamentos				Localização			
Interface	Antenas	Escadas	Cabos	Zona A - Terreno II		Zona B - Terreno I	
				Plano	$\Phi = 0,2$	Plano	$\Phi = 0,2$
Tipo A	n = 9	Tipo B	n = 20	1,05	1,71	1,52	2,55
			n = 24	1,10	1,81	1,61	2,69
		Tipo C	n = 20	1,14	1,87	1,66	2,78
			n = 24	1,20	1,96	1,75	2,92
	n = 13	Tipo B	n = 20	1,07	1,75	1,56	2,61
			n = 24	1,12	1,84	1,64	2,75
		Tipo C	n = 20	1,16	1,91	1,69	2,84
			n = 24	1,22	2,00	1,78	2,98
	n = 17	Tipo B	n = 20	1,08	1,78	1,58	2,66
			n = 24	1,14	1,88	1,67	2,80
		Tipo C	n = 20	1,18	1,94	1,72	2,89
			n = 24	1,24	2,03	1,81	3,03
Tipo B	n = 9	Tipo B	n = 20	1,00	1,64	1,46	2,45
			n = 24	1,06	1,74	1,55	2,59
		Tipo C	n = 20	1,10	1,80	1,60	2,68
			n = 24	1,15	1,89	1,69	2,82
	n = 13	Tipo B	n = 20	1,02	1,68	1,49	2,51
			n = 24	1,08	1,68	1,58	2,65
		Tipo C	n = 20	1,12	1,83	1,63	2,74
			n = 24	1,17	1,93	1,72	2,88
	n = 17	Tipo B	n = 20	1,04	1,71	1,52	2,56
			n = 24	1,10	1,80	1,61	2,70
		Tipo C	n = 20	1,13	1,87	1,66	2,79
			n = 24	1,19	1,96	1,75	2,94

Os coeficientes de momento fletor obtidos para a torre do modelo D são indicados no Quadro 4.86.

Quadro 4.86 – Coeficientes de momento fletor para o modelo D.

Coeficientes de momento fletor k_{M0} – Modelo D							
Equipamentos				Localização			
Interface	Antenas	Escadas	Cabos	Zona A - Terreno II		Zona B - Terreno I	
				Plano	$\Phi = 0,2$	Plano	$\Phi = 0,2$
Tipo A	n = 9	Tipo B	n = 20	1,07	1,76	1,54	2,58
			n = 24	1,13	1,86	1,63	2,72
		Tipo C	n = 20	1,17	1,92	1,68	2,82
			n = 24	1,23	2,02	1,77	2,96
	n = 13	Tipo B	n = 20	1,10	1,81	1,59	2,67
			n = 24	1,16	1,91	1,68	2,82
		Tipo C	n = 20	1,20	1,98	1,73	2,91
			n = 24	1,26	2,08	1,82	3,05
	n = 17	Tipo B	n = 20	1,12	1,86	1,63	2,75
			n = 24	1,18	1,96	1,72	2,89
		Tipo C	n = 20	1,22	2,02	1,77	2,98
			n = 24	1,28	2,12	1,86	3,13
Tipo B	n = 9	Tipo B	n = 20	1,00	1,65	1,44	2,43
			n = 24	1,06	1,75	1,53	2,57
		Tipo C	n = 20	1,10	1,81	1,59	2,66
			n = 24	1,16	1,91	1,68	2,81
	n = 13	Tipo B	n = 20	1,03	1,71	1,49	2,52
			n = 24	1,09	1,71	1,58	2,67
		Tipo C	n = 20	1,13	1,87	1,64	2,76
			n = 24	1,19	1,97	1,73	2,90
	n = 17	Tipo B	n = 20	1,06	1,75	1,53	2,59
			n = 24	1,12	1,85	1,62	2,74
		Tipo C	n = 20	1,16	1,91	1,68	2,83
			n = 24	1,22	2,01	1,77	2,98

Analisando de uma forma geral os resultados obtidos, verifica-se uma vez mais a importância da variação dos diversos parâmetros considerados. Nas situações extremas observa-se, em todos os casos, um aumento superior a 3 vezes, em relação ao caso de referência (coeficiente igual a 1,00), dos valores dos coeficientes de esforço transversal e de momento fletor. É óbvio que este aumento se deve à alteração de vários parâmetros, referentes às configurações dos equipamentos ou à localização da estrutura, importando por isso proceder-se à referida sobreposição dos parâmetros.

Para se determinar a influência da mudança de variável de um parâmetro, mantendo os restantes constantes, basta relacionar os valores obtidos em cada modelo. Desta forma consegue-se quantificar de um modo mais concreto, para um número mais alargado de situações, a influência de cada parâmetro nos valores do esforço transversal e do momento fletor na base da estrutura.

Apresentam-se de seguida os valores da variação do esforço transversal e do momento fletor na base, para os diferentes parâmetros e respetivas alterações de variável. Os valores referentes à influência da altura da torre foram obtidos através da relação entre os resultados obtidos para modelos de torres com alturas diferentes (30 m e 40 m); os valores referentes ao tipo de torre foram obtidos através da relação entre os resultados obtidos para diferentes tipos de torres (torres de tronco cónico e de secção hexadecagonal, e torres de tronco cilíndrico e secção circular). No Quadro 4.87 é apresentada a média dos valores obtidos para os 4 modelos de torres. Os restantes resultados são apresentados com maior detalhe no Apêndice VIII.

Quadro 4.87 - Influência da alteração dos parâmetros no esforço transversal e no momento fletor.

Parâmetros		Esforço transversal V_0		Momento fletor M_0	
Parâmetro	Alteração	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Zona-Terreno	A – II → B – I	49,5%	1,4%	47,8%	1,5%
Orografia	Plano → $\Phi = 0,2$	67,5%	1,2%	68,2%	1,3%
Interface	Tipo B → Tipo A	4,5%	0,8%	7,1%	1,4%
Antenas	n = 6 → n = 9	2,6%	0,0%	4,4%	0,0%
	n = 6 → n = 12	4,9%	0,1%	7,8%	0,1%
	n = 9 → n = 13	2,0%	0,2%	3,1%	0,3%
	n = 9 → n = 17	4,0%	0,3%	5,8%	0,3%
Escadas	Tipo B → Tipo C	10,2%	0,9%	10,2%	0,7%
Cabos	n = 16 → n = 20	5,8%	0,2%	5,7%	0,1%
	n = 20 → n = 24	5,5%	0,5%	5,6%	0,4%
Altura da torre	H = 30 m → H = 40 m	65,5%	6,2%	114,4%	8,9%
Tipo de torre	Cil.-Circ. → Cón.-16 Lados	7,0%	4,1%	4,6%	4,5%

Cil. – Cilíndrica; Circ. – Circular; Cón. – Cónica.

Após a análise dos resultados verifica-se que os parâmetros mais importantes são os que estão relacionados com a localização da estrutura, nomeadamente com a definição do tipo de zona e da categoria de terreno, com a definição da orografia, e também com a altura da torre. De facto, registam-se acréscimos significativos da mudança de situação em cada um destes parâmetros, com aumentos entre 49,5% e 67,5% do esforço transversal e entre 47,8% e 68,2% no caso do momento fletor.

No caso dos equipamentos, o acréscimo dos valores do esforço transversal e do momento fletor é bastante inferior, para as alterações consideradas. Entre os equipamentos verifica-se, uma vez mais, a importância relativa dos elementos de distribuição linear ao longo da altura da torre, nomeadamente as escadas e os caminhos de cabos, enquanto que a alteração dos restantes tipos de equipamentos, como as interfaces e antenas, tem menor significado no acréscimo dos valores dos esforços na base da torre.

Os valores obtidos para a alteração do tipo de torre, de tronco cilíndrico e secção circular para tronco cónico e secção hexadecagonal, através da comparação do modelo A com o modelo C (torres de 30 m) e do modelo B com o modelo D (torres de 40 m), também têm pouco significado. Como se havia verificado na secção 4.3.2, que estuda a influência do tipo de secção transversal de uma torre de telecomunicações, o coeficiente de força de uma secção hexadecagonal (16 lados) é ligeiramente superior ao coeficiente de uma secção circular, o que significa que o aumento dos valores registado neste estudo se deve sobretudo à maior área de referência exposta ao vento nas torres com tronco cónico.

Deve-se realçar que os valores dos acréscimos dos esforços na base foram obtidos para situações típicas de disposições de equipamentos, assim como a localização da própria estrutura, nomeadamente o tipo de zona, a categoria de terreno e a orografia local. É importante ter isto em conta pois podem existir diferentes alterações de situação dentro do mesmo parâmetro, para além das situações consideradas.

Compreende-se assim que o estudo de cada parâmetro isolado toma uma importância fulcral. Tanto os fatores externos à estrutura (definição do tipo de zona, categoria do terreno e orografia) como as características próprias da torre (forma, altura e equipamentos que alberga) devem ser considerados na determinação da ação do vento que, como já foi referido, é a ação condicionante neste tipo de estruturas. Mesmo considerando todos os elementos envolvidos na ação do vento, se os mesmos não forem tomados de forma correta, como por exemplo a área de referência e os coeficientes de força sem se ter em conta fenômenos de interferência e de escudo entre elementos, ou o efeito de bloco no caso dos caminhos de cabos, este procedimento pode levar a que sejam acumulados erros, que mesmo sendo pequenos poderão, na sua totalidade, conduzir a valores da ação do vento sobre a estrutura completamente desajustados.

5. Conclusão

Neste capítulo final resumem-se as principais contribuições da investigação efetuada no âmbito da presente dissertação, bem como os resultados obtidos e a consistência dos métodos utilizados.

Retomando o problema inicial, sabe-se que na determinação da ação do vento em torres de telecomunicações existem algumas questões que requerem maior esclarecimento, como a interação do vento com a estrutura e seus componentes, e o próprio processo de cálculo. Foram assim definidos, com o intuito de dar resposta a estes problemas, os objetivos primordiais de i) dar a conhecer os principais tipos de torres existentes em território nacional e as suas diferentes características, ii) formular uma metodologia de cálculo da ação do vento, de acordo com o EC1-1-4 [3], permitindo assim uma homogeneidade de processos, e iii) quantificar os diferentes parâmetros da ação do vento, para se avaliar a influência relativa que cada um deles poderá assumir no projeto deste tipo de estruturas. Pode-se concluir que todos os objetivos foram atingidos de forma satisfatória.

A listagem dos tipos de torres de telecomunicações, efetuada a partir da recolha de dados de vários exemplos existentes em Portugal, é crucial não só para a compreensão de todo o estudo posterior, como para a abordagem a qualquer problemática relacionada com este tema. Apenas com o conhecimento detalhado das características de cada um dos elementos que compõem estas estruturas, quer seja o fuste da torre ou os diversos equipamentos que nelas se podem encontrar, se consegue definir a ação do vento de forma eficaz. Verificou-se que, mesmo entre tipos de torres idênticos, existem características que podem variar e ter um peso significativo na ação do vento. Contudo, apesar da dispersão existente, é possível proceder ao agrupamento de algumas situações típicas, em relação à torre e aos diferentes equipamentos, tais como as interfaces, antenas, escadas e caminhos de cabos.

Com o objetivo de se conseguir uma correta abordagem ao preconizado no EC1-1-4, foi estabelecida uma metodologia de cálculo para as torres de telecomunicações. É importante estabelecer princípios gerais que possam servir de base para o cálculo da ação do vento nestas estruturas. Na medida em que a informação disponibilizada no EC1-1-4 não é, por vezes, diretamente aplicável ao caso das torres de telecomunicações, é natural que surjam frequentemente dúvidas na adaptação dos métodos estipulados nesta norma. Aliado a isto, o facto de o EC1-1-4 ser uma norma recente, e de a regulamentação anterior ainda ser utilizada, aumenta ainda mais a possibilidade da ocorrência de erros na determinação da ação do vento em torres de telecomunicações. Na análise realizada

verificou-se, em alguns casos, uma grande dificuldade na correta adaptação da norma a este tipo de estruturas, o que conduz a uma necessidade de validação da metodologia utilizada. Com o refinamento do processo de cálculo, será possível alcançar mais facilmente uma homogeneidade na abordagem das normas correntes e assim assegurar uma margem de erro substancialmente mais reduzida no projeto deste tipo de estruturas.

Após o estudo da tipologia de torres de telecomunicações e a planificação de uma metodologia de cálculo da ação do vento segundo o EC1-1-4, foi realizada uma análise à ação do vento sobre este tipo de estruturas. Tendo em conta os dados recolhidos no capítulo 2, que caracteriza as torres de telecomunicações, foram definidas algumas situações comuns, referentes às diferentes configurações da torre e seus equipamentos, e aplicada a metodologia de cálculo da ação do vento. Este estudo foi dividido em três partes fundamentais: i) uma primeira parte relativa à ação isolada do vento, ii) uma segunda parte referente às diferentes características do fuste da torre e iii) uma terceira sobre os diversos tipos de equipamentos utilizados em torres de telecomunicações.

Quanto ao estudo da ação isolada do vento sobre torres de telecomunicações, observou-se que os tipos de zona e as categorias de terreno com maior exposição à ação do vento, junto a zonas marítimas ou situadas a altitudes consideráveis, em terrenos que permitam o livre escoamento do vento, aumentam os valores da ação do vento de forma significativa. Também se verificou que, para uma situação base, as consequências da passagem de uma zona do tipo A para uma zona do tipo B são aproximadamente equivalentes às da alteração da rugosidade, quando se passa para um terreno mais amplo, onde o escoamento do vento sofre menor interferência. O facto de existirem 7 cenários de combinações entre o tipo de zona e a categoria de terreno leva a que estes parâmetros possam aumentar bastante a ação do vento sobre a estrutura da torre.

A orografia é o terceiro parâmetro identificado que influencia a ação isolada do vento, para além do tipo de zona e da categoria de terreno. Em termos gerais, a ação do vento aumenta com a inclinação do terreno a barlavento. Verifica-se que a maior influência da orografia ocorre no topo do acidente orográfico, quer seja uma colina ou uma falésia, sendo que à medida que a distância ao mesmo é maior, a sua influência sobre a ação do vento vai diminuindo até se tornar nula. Para inclinações semelhantes do terreno a barlavento, quanto maiores forem os comprimentos das vertentes, maior é a distância ao topo a partir da qual a influência da orografia se faz sentir. Também se verificou que, através da comparação dos dois tipos de acidentes orográficos, colinas e falésias, para iguais dimensões a barlavento, a ação do vento nas vertentes situadas a barlavento é semelhante, em ambos os casos, mas nas vertentes situadas a sotavento é diferente. Enquanto que numa colina se perde a influência da orografia a escassa distância do topo, os efeitos da

orografia numa falésia são relevantes até uma distância superior, dependendo, como é óbvio, do comprimento da vertente a sotavento.

À semelhança da variação do tipo de zona e da categoria de terreno, os valores dos aumentos registados para a influência da orografia são igualmente significativos, o que significa que, independentemente da estrutura, a definição da ação isolada do vento pode ter um peso importante na sua ação global sobre a torre.

A influência das características da torre na ação do vento é também muito importante. Os aumentos dos valores dos esforços na base, e do deslocamento e da rotação no topo da estrutura, através da comparação de modelos do mesmo tipo, para diferentes alturas da estrutura, são bastante significativos. A sua relevância é comprovada na secção anterior, onde se estuda a ação do vento de forma geral, verificando-se acréscimos dos valores dos esforços na base bastante significativos. O aumento da área de referência exposta ao vento é o principal fator que explica os resultados obtidos.

Também relativamente às características da torre, verificou-se que, nos casos considerados, existe um aumento da ação do vento para superfícies do fuste mais rugosas nas torres de secção circular e que, nas torres de secção poligonal, se observa um acréscimo desta ação para geometrias da secção com menos lados. Estas alterações influenciam sobretudo os coeficientes de força atribuídos ao fuste da torre, sendo os valores obtidos relativamente significativos. As torres com o fuste de secção circular e um revestimento da superfície pouco rugoso permitem um melhor escoamento do vento e sofrem, por isso, uma ação do vento muito menor.

Por último, no estudo da ação do vento sobre os equipamentos também se retiraram algumas conclusões importantes, de acordo com os objetivos da dissertação. Quanto às antenas, verificou-se que a ação do vento sobre a estrutura aumenta com o acréscimo da quantidade de elementos, devido ao aumento da área de referência, e com a sua colocação em cotas mais altas, pois a pressão dinâmica de pico aumenta com a distância ao solo. As variações dos valores dos esforços na base, e do deslocamento e da rotação no topo da torre, resultantes da colocação de antenas no fuste são relativamente significativas. Verificou-se também que, para os casos de antenas analisados, é mais gravoso alterar a posição das antenas para uma cota mais alta do que aumentar a quantidade de antenas, para a mesma cota inicial.

Quanto aos restantes equipamentos, nomeadamente as interfaces, os caminhos de cabos e as escadas, as conclusões são semelhantes. Verifica-se que os elementos com maiores áreas de referência sofrem uma maior ação por parte do vento e aumentam assim a ação global sobre a torre. É certo que existem outros parâmetros que influenciam a ação do vento sobre os equipamentos, para os quais se registaram igualmente variações, tais como

os coeficientes de força ou o coeficiente estrutural da torre, mas é principalmente ao aumento da área de referência que se devem os resultados obtidos.

Registaram-se resultados significativos para os diferentes tipos de equipamentos, o que mostra que estes elementos não devem ser menosprezados no projeto de torres de telecomunicações. Além disso, considerando os fenómenos de interferência e de escudo nas interfaces e nas escadas, e o efeito de bloco gerado pelos caminhos de cabos, conclui-se que a influência dos equipamentos, na ação do vento sobre este tipo de estruturas, é bastante importante.

No caso das interfaces comprovou-se a existência do efeito de interferência que se gera neste tipo de equipamentos. Para um mesmo caso, a soma das forças do vento sobre as antenas e sobre a interface é superior ao valor obtido para o seu conjunto. Significa isto que existe uma parcela da ação do vento que diminui com o aumento da quantidade de antenas existentes na face frontal de incidência do vento. Quantos mais elementos existirem nessa situação, maior é o efeito de escudo sobre os elementos sobrepostos.

Quanto às escadas, que em torres de telecomunicações são colocadas diretamente sobre o fuste da torre, é legítimo considerar que ocorre o mesmo efeito de interferência ou escudo, visto existir uma sobreposição de áreas de referência quando o vento incide na face frontal destes elementos. Aplicando o coeficiente de redução para itens auxiliares com desenvolvimento linear, definido no EC3-3-1 aplicável a torres e a mastros de aço, obtiveram-se resultados com algum significado, para os tipos de escadas considerados.

A consideração do efeito de bloco, observado nos caminhos de cabos, parte do princípio que os mesmos, sendo geralmente colocados em fiadas laterais, adjacentes ao fuste da torre, poderão formar blocos opacos ao escoamento do vento e alterar a sua trajetória. Apesar de a soma das áreas de referência ser igual em ambos os casos, verificou-se que, quando se considera o conjunto da torre e dos caminhos de cabos como um bloco único, o coeficiente de força aumenta de forma bastante significativa, observando-se aumentos muito importantes na ação global do vento sobre a estrutura.

Conclui-se assim que os equipamentos têm uma importância decisiva na determinação da ação do vento sobre torres de telecomunicações. No estudo geral da ação do vento, apresentado na secção anterior, verificou-se que a influência destes elementos na ação global do vento era sempre superior à do fuste da torre, exceto num único caso, o que atesta a importância dos mesmos. Como foi referido, o estudo mais detalhado de todas as características singulares de cada tipo de equipamento pode contribuir bastante para que a ação do vento seja considerada de uma forma mais correta, nestas estruturas.

Em termos gerais, verificou-se que praticamente todos os parâmetros são importantes na determinação da ação do vento em torres de telecomunicações. A gama de

variação dos resultados resultante da influência de cada parâmetro é em geral grande, o que significa que nenhum destes parâmetros deve ser ignorado no projeto destas estruturas. Apenas deste modo, e com um estudo mais aprofundado, será possível determinar a ação do vento de uma forma cada vez mais eficaz e conceber estruturas que possam não só responder melhor a este tipo de ação, mas ser também mais eficientes, o que conduz a benefícios em termos económicos e de segurança.

6. Desenvolvimentos futuros

Após o registo das conclusões decorrentes do tema tratado na dissertação, referem-se algumas questões levantadas durante o seu desenvolvimento, a título de contribuição para a elaboração de posteriores estudos.

Assim, sugere-se um aperfeiçoamento futuro dos seguintes aspetos, que se consideram relevantes no âmbito dos assuntos abordados na presente dissertação:

- Validação dos resultados obtidos por análise numérica, através de ensaios em túnel de vento sobre modelos de escala reduzida, nomeadamente os referentes aos fenómenos de interferência e de escudo nas interfaces e nas escadas, e ao efeito de bloco no caso dos caminhos de cabos;

- Aperfeiçoamento da metodologia de cálculo, adotada na dissertação, do efeito da ação do vento sobre torres de telecomunicações segundo o descrito no EC1-1-4, através da revisão de alguns aspetos que se considerem relevantes;

- Estudo de formas mais eficientes de disposição e de conceção dos equipamentos utilizados em torres de telecomunicações, de modo a permitir uma redução da ação do vento sobre este tipo de estruturas;

- Realização de um estudo semelhante ao efetuado na presente dissertação, para as torres de telecomunicações com estrutura em treliça, quantificando todos os parâmetros da ação do vento sobre estas estruturas;

- Estudo das restantes ações, para além do vento, sobre as torres de telecomunicações e verificação da sua importância, tendo em conta os valores recomendados nas normas em vigor em Portugal;

- Avaliação da capacidade resistente dos vários tipos de torres de telecomunicações, tendo em conta os dados obtidos, através da variação dos diferentes parâmetros, para a ação do vento.

Sendo a temática das torres de telecomunicações uma área ainda com bastantes aspetos a explorar, surgirão naturalmente mais aspetos a estudar e desenvolver no futuro, à medida que se for conhecendo melhor este tipo de estruturas.

Bibliografia

1. Travanca, Rui Manuel Carvalho Almas (2010). *Torres para radiocomunicações. Patologias e dimensionamento*. Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro para obtenção do grau de mestre, orientada por Paulo Jorge de Melo Matias Faria de Vila Real.

2. Wood, Graeme S. (2007). *Wind loading of telecommunication antennas and head frames*. Acedido em 2012, em, <http://sydney.edu.au/engineering/civil/publications/r881.pdf>.

3. CEN, Comité Europeu de Normalização, *NP EN 1991-1-4, Eurocódigo 1 – Acções em estruturas, Parte 1-4: Acções do vento*, 2010.

4. CEN, Comité Europeu de Normalização, *NP EN 1993-3-1, Eurocode 3 – Design of steel structures, Part 3-1: Towers, masts and chimneys – Towers and masts*, 2006.

5. Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes. Decreto-Lei n.º 235/83, de 31 de Maio.

6. André J., Pipa M. (2011). *Especificações e cláusulas técnicas para a realização de estudos de estabilidade de torres de antenas de telecomunicações*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Relatório 225/2011 – NCE (CONFIDENCIAL).

7. André J. (2011). *Especificações e cláusulas técnicas para a realização de estudos de estabilidade de torres de antenas de telecomunicações. Exemplo de aplicação a uma torre de aço tubular circular auto-suportada*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Relatório 226/2011 – NCE (CONFIDENCIAL).

8. Kumar, A. R. Shanta, Satishkumar, S. R. (s/d). *Design of steel structures II*. Acedido em 2012, em, http://nptel.iitm.ac.in/courses/IIT-MADRAS/Design_Steel_Structures_II/index.php.

9. Holmes, John D. (2001). *Wind loading on structures*. Nova Iorque: Spon Press.

10. Dyrbye, Claës, Svend, Ole Hansen (1997). *Wind loads on structures*. Chichester: John Wiley & Sons.

11. Kareem, Ahsan, Zhou, Yin (2003). *Gust loading factor – past, present and future*. [versão electrónica] *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Retirado em 2012, em, [http://nathaz.nd.edu/journals/\(2003\)Gustloadingfactor-pastpresentandfuture.pdf](http://nathaz.nd.edu/journals/(2003)Gustloadingfactor-pastpresentandfuture.pdf).

12. Georgakis, C. T., Støttrup-Andersen, U., Johnsen, M., Nielsen, M. G., Koss, H. H. (2009). Drag coefficients of lattice masts from full-scale wind-tunnel tests. European-African Conference on Wind Engineering, acedido em 2012, em, <http://www.iawe.org/Proceedings/5EACWE/154.pdf>.

13. Efthymiou, E., Gerasimidis, S., Baniotopoulos, C. C. (2009). *On the structural response of steel telecommunication lattice masts for wind loading and combined effects*. European-African Conference on Wind Engineering, acedido em 2012, em, <http://www.iawe.org/Proceedings/5EACWE/011.pdf>.

14. Carril Júnior, Célio Fontão (2000). *Análise numérica e experimental do efeito dinâmico do vento em torres metálicas treliçadas para telecomunicações*. Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, orientada por Reyoland M. L. R. da Fonseca Brasil.

15. Klein, Tanise (2004). *Estudo em túnel de vento das características aerodinâmicas de torres metálicas treliçadas*. Dissertação apresentada à Universidade Federal do Rio Grande do Sul para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, orientada por Acir Mércio Loredou-Souza.

16. Støttrup-Andersen, Ulrik (s/d). *Masts and Towers*. Acedido em 2012, em, http://www.inti.gov.ar/cirsoc/pdf/antenas/Mobile_Communications_Masts_Towers.pdf

17. Cook, Brad P. (2007). *Staggering results: Monopole wind testing identifies overly conservative design calculations*. Acedido em 2012, em, http://www.wirelessestimator.com/t_content.cfm?pagename=Monopole%20Wind%20Testing