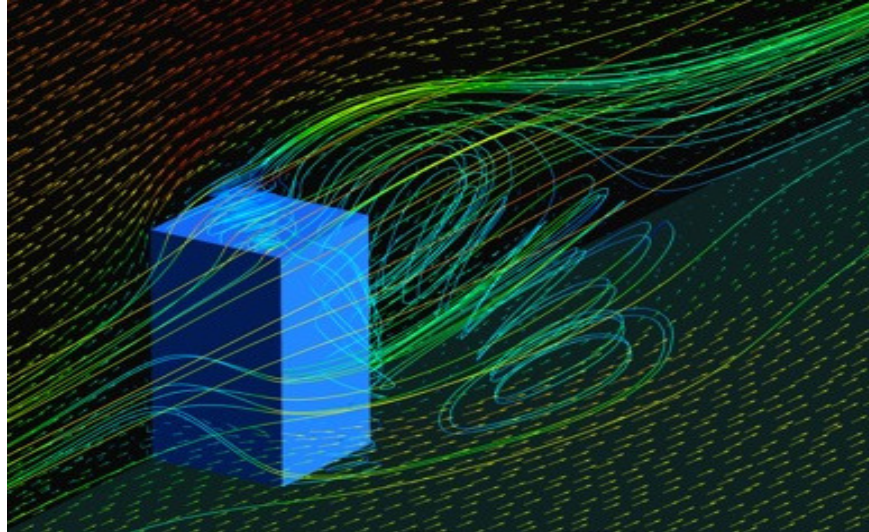




ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Departamento de Engenharia Mecânica



ACÇÃO DO VENTO EM EDIFÍCIOS ALTOS

CAETANO MANUEL MARTINS VIEIRA

(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Mecânica

Orientador (es):

Professor Doutor Fernando Marques da Silva

Professora Doutora Isabel Simões de Carvalho

Presidente:

Professor Doutor João Carlos Quaresma Dias

Vogais:

Professora Doutora Maria Glória Gomes

Professor Doutor Fernando Marques da Silva

Professora Doutora Isabel Simões de Carvalho

Professor Especialista Francisco Manuel Fernandes Severo

Janeiro de 2013

AGRADECIMENTOS

Concluído este trabalho é meu desejo exprimir aqui os mais sinceros agradecimentos a todas as pessoas pelo apoio, orientação, encorajamento e facilidades concedidas que em muito me ajudaram no conteúdo da presente dissertação, permitindo ao mesmo tempo conduzi-la a bom termo.

Em especial, o meu profundo reconhecimento aos meus orientadores científicos, Eng. Fernando Marques da Silva e à Eng. Isabel Simões de Carvalho, pela permanente e inesgotável disponibilidade, compreensão, interesse e orientação, que de modo crucial contribuiu decisivamente para o seu enriquecimento.

PREFÁCIO

Aeolos, embora não fosse um Deus e não tivesse templos na Grécia Antiga, é muitas vezes encontrado na mitologia Grega e nos textos Gregos.

É identificado na Odisseia que, no decorrer de uma viagem, Ulisses chegou à ilha de *Aeolos*. Nas cavernas dessa ilha os ventos estavam presos. *Aeolos* seguia de forma minuciosa o que os Deuses ordenaram: Deixá-los sair sobre a forma de brisas suaves, ventanias, tempestades ou pela forma que os Deuses desejassem.

Ulysses passou um mês com *Aeolos* e entre eles gerou-se uma amizade profunda. Como presente *Aeolos* deu-lhe uma bolsa contendo todos os ventos adversos. Para que pudesse ter os ventos controlados, pediu-lhe para segurar a bolsa de forma firme.

Enquanto dormia homens maliciosos, abriram-lhe a bolsa. Deste modo, todos os ventos adversos puderam escapar. Num modo selvagem tomaram todas as direcções de forma descontrolada e destruidora!

A luta de Ulisses e dos seus homens contra o vento lembra e evidencia a dedicação e o esforço continuado dos Engenheiros contemporâneos, para controlar o poder do vento, com um design nos Edifícios / Estruturas de forma a serem seguras e económicas (in Stathopoulos and Baniotopoulos, 2007 [1]).

RESUMO

A acção do vento é um dos factores mais importantes a considerar na análise do comportamento de estruturas de grandes dimensões e elevada flexibilidade.

Numa construção, a eficácia, a segurança e os custos da construção, são factores que estão directamente relacionados com a exactidão dos cálculos do projecto, devendo a acção do vento ser objecto de uma avaliação detalhada.

O quadro de Países da Comunidade Europeia criou o eurocódigo (procedimento simplificado e determinístico) que é aplicado a todos os Países membro.

Em edifícios, cuja altura supere em duas vezes o valor da largura, o código sugere a divisão da altura do edifício em três zonas, sendo a zona central subdividida em bandas. O código não define o número de bandas, ou as respectivas alturas, a considerar para a realização do cálculo da zona central.

Pretende-se com este trabalho contribuir para o esclarecimento do número e dimensão dessas bandas horizontais (h_{strip}), a adoptar no cálculo.

Como objecto do estudo são utilizados edifícios, com diferentes alturas, geometrias e características estruturais.

Como ferramenta é utilizada a metodologia do código, tendo sido elaborada uma folha de cálculo para o processamento de dados.

Conseguiu-se assim representar o perfil do desvio percentual em relação ao valor óptimo, em função do número de faixas horizontais pretendido para realizar cálculo.

Palavras-chave: Acção do vento; edifícios altos; eurocódigo.

ABSTRACT

The wind action is one of the most important factors to consider in analysing the behaviour of large and high flexible structures.

In construction, the efficiency, safety and construction costs are factors inherent to the accuracy of design calculations. The dynamic wind effects fall within the primary variables requiring a detailed evaluation in order to produce an accurate analysis.

The framework of the European countries created the eurocode (simplified and deterministic) to be applied by all member States.

In buildings, whose height exceeds twice the width, the code suggests the division of the building's height in three zones, the central one being partitioned into a number of stripes. However, it does not define neither the number, nor height, of those stripes to consider in the calculation.

The aim of this work is to contribute to a clarification on the number, or its heights, of the stripes (h_{strip}), to be adopted in the calculation.

In this study different building's heights, geometries and structural characteristics are studied.

As a tool, a spreadsheet was assembled out of the code to perform the procedure evaluations.

It is possible to clearly identify the profile of the deviations, in relation a reference value, depending on the number of horizontal strips selected to perform the calculation.

Keywords: Wind action; buildings; eurocode

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	I
PREFÁCIO	III
RESUMO	V
ABSTRACT	VII
ÍNDICE	IX
NOMENCLATURA	XI
LISTA DE FIGURAS	XVII
LISTA DE TABELAS.....	XIX
CAPÍTULO 1	
INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Considerações Iniciais	1
1.2. Enquadramento com o Assunto em Estudo	2
1.3. Propósito do Trabalho	3
1.4. Estrutura do Trabalho.....	3
CAPÍTULO 2	
CARACTERIZAÇÃO DO VENTO.....	5
2.1. Camada Limite Atmosférica	5
2.2. Velocidade média do vento	8
2.3. Perfil das velocidades médias	9
2.4. Turbulência do vento.....	11
2.5. Acção do vento	12
2.6. Reacção dos Edifícios à Acção dos Ventos	14
2.7. Resposta Longitudinal.....	14
2.8. Resposta Transversal	15
CAPÍTULO 3	
ANÁLISE DA ACÇÃO DO VENTO PELO EUROCÓDIGO.....	17

3.1. Enquadramento.....	17
3.2. Velocidade de Referência do Vento	17
3.3. Perfil Velocidade Média do vento	19
3.4. Intensidade de Turbulência	20
3.5. Pressão de Pico do Vento em Escoamento Livre	21
3.6. Edifícios de Planta Rectangular.....	22
3.7. Cálculo da Acção do Vento	23
3.8. Forças Exteriores	24
3.9. Coeficientes de Força	24
3.10. Factor Estrutural – CsCd	25
3.11. Coeficiente de Resposta Quase - Estática	26
3.12. Determinação do Factor de Ressonância – R2	26
CAPÍTULO 4	
CASOS DE ESTUDO	29
4.1. Metodologia.....	29
4.2. Edifício <i>CAARC</i>	30
4.3. Edifício <i>REN</i>	40
4.4. Torre Monsanto	43
4.5. Edifício Solmar	50
CAPÍTULO 5	
CONCLUSÕES.....	59
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS	61
ANEXOS.....	63

NOMENCLATURA

A – (m ²)	área
A_{fr} – (m ²)	área varrida pelo vento
A_{ref} – (m ²)	área de referência
b – (m)	largura da construção (comprimento da superfície perpendicular à direcção do vento, salvo indicação em contrário)
B_2 – (-)	coeficiente de resposta quase-estática
C – (-)	coeficiente de força aerodinâmica para pontes
C_{alt} – (-)	coeficiente de altitude
C_d – (-)	coeficiente dinâmico
C_{dir} – (-)	coeficiente de direcção
$C_e(z)$ – (-)	coeficiente de exposição
C_f – (-)	coeficiente de força
$C_{f,o}$ – (-)	coeficiente de força para construções ou elementos estruturais sem livre escoamento em torno das extremidades
$C_{f,l}$ – (-)	coeficiente de força de sustentação
C_{fr} – (-)	coeficiente de atrito
C_{lt} – (-)	coeficiente de força lateral
C_M – (-)	coeficiente de momento
C_p – (-)	coeficiente de pressão
C_{pe} – (-)	coeficiente de pressão exterior
C_{pi} – (-)	coeficiente de pressão interior
$C_{p,net}$ – (-)	coeficiente de pressão resultante

C_{prob} – (-)	coeficiente de probabilidade
C_r – (-)	coeficiente de rugosidade
C_o – (-)	coeficiente de orografia
C_s – (-)	coeficiente de dimensão
C_{season} – (-)	coeficiente de estação do ano
d – (m)	profundidade da construção (comprimento da superfície paralela à direcção do vento, salvo indicação em contrário)
e – (-)	excentricidade de uma força ou distância ao bordo
E – (Pa)	módulo de Young
f_L – (-)	frequência adimensional
F_{fr} – (N)	força de atrito resultante
F_j – (N)	força de excitação, associada ao desprendimento de vórtices, no ponto j da estrutura
F_w – (N)	força resultante exercida pelo vento
h – (m)	altura da construção
h_{ave} – (m)	altura de obstrução
h_{dis} – (m)	elevação do nível de referência
H – (m)	altura de um acidente orográfico
I_v – (-)	intensidade de turbulência
k – (-)	rugosidade equivalente
k_1 – (-)	coeficiente de turbulência
k_p – (-)	factor de pico
k_r – (-)	coeficiente de terreno
k_{θ} – (Pa)	rigidez de torção
K – (-)	coeficiente de configuração modal; parâmetro de forma
K_a – (-)	coeficiente de amortecimento aerodinâmico

K_{iv} – (-)	coeficiente de interferência para o desprendimento de vórtices
K_{rd} – (-)	coeficiente de redução para platibandas
K_w – (-)	coeficiente de comprimento de correlação
K_x – (-)	coeficiente adimensional
l – (m)	comprimento de uma construção horizontal
L – (m)	comprimento do tramo do tabuleiro de uma ponte; escala de turbulência
L_d – (m)	comprimento real da vertente virada a sotavento
L_e – (m)	comprimento efectivo da vertente virada a barlavento
L_j – (m)	comprimento de correlação
L_u – (m)	comprimento real da vertente virada a barlavento
m – (kg/m)	massa por unidade de comprimento
m_1 – (kg/m)	massa equivalente por unidade de comprimento
n_i – (Hz)	frequência própria do modo de vibração i da estrutura
$n_{1,x}$ – (Hz)	frequência fundamental de vibração na direcção do vento
$n_{1,y}$ – (Hz)	frequência fundamental de vibração na direcção transversal ao vento
n_0 – (Hz)	frequência de ovalização
N – (-)	número de ciclos causados por desprendimento de vórtices
N_g – (-)	número de carregamentos relativo à resposta a rajadas
p – (-)	probabilidade anual de excedência
q_b – (N/m ²)	pressão dinâmica de referência
q_p – (N/m ²)	pressão dinâmica de pico
r – (m)	raio
R_2 – (-)	coeficiente de resposta em ressonância
Re – (-)	número de Reynolds
$R_{h,r}$, R_b – (-)	funções de admitância aerodinâmica
s – (-)	coeficiente; coordenada

S – (-)	acção do vento
S_L – (-)	função de densidade espectral de potência adimensional
t – (seg)	tempo de integração da velocidade de referência do vento; espessura de uma placa
T – (seg)	tempo de medição das médias da velocidade do vento
W_s – (kg)	peso dos elementos estruturais que contribuem para a rigidez de uma chaminé
W_t – (kg)	peso total de uma chaminé
v_{CG} – (m/s)	velocidade do vento de início do galope
v_{CG} – (m/s)	velocidade crítica do vento para o galope de interferência
v_{crit} – (m/s)	velocidade crítica do vento para o desprendimento de vórtices
v_{div} – (m/s)	velocidade crítica do vento em relação à divergência
v_m – (m/s)	velocidade média do vento
v_b – (m/s)	valor de referência da velocidade do vento
w – (kN/m ²)	pressão exercida pelo vento
x – (m)	distância horizontal entre o local e o topo da vertente
x - <i>direction</i>	direcção horizontal, perpendicular ao tramo
y - <i>direction</i>	direcção horizontal ao longo do tramo
y_{max} – (m)	amplitude máxima na direcção transversal ao vento, para a velocidade crítica do vento
z – (m)	altura acima do solo
z_{ave} – (m)	altura média
z - <i>direction</i>	direcção vertical
z_0 – (m)	comprimento de rugosidade
$z_e(z_i)$ – (m)	altura de referência para a pressão exterior (interior) exercida pelo vento
z_g – (m)	distância entre o solo e o componente considerado
z_{max} – (m)	altura máxima

z_{min} – (m)	altura mínima
z_s – (m)	altura de referência para a determinação do coeficiente estrutural
δ – (-)	decremento logarítmico de amortecimento
δ_a – (-)	decremento logarítmico de amortecimento aerodinâmico
δ_d – (-)	decremento logarítmico de amortecimento devido dispositivos especiais
δ_s – (-)	decremento logarítmico de amortecimento estrutural
ε – (-)	coeficiente
ε_0 – (-)	factor de largura de banda
ε_1 – (-)	factor de frequência
η – (-)	variável
φ – (-)	índice de cheios; obstrução em coberturas isoladas
λ – (N)	esbelteza
μ – (-)	índice de aberturas; permeabilidade de uma superfície
ν – (St)	frequência de passagens ascendentes; coeficiente de Poisson; viscosidade cinemática
θ – (graus)	ângulo de torção; direcção do vento
ρ – (kg/m ³)	massa volúmica do ar
σ_v – (-)	desvio padrão da turbulência
$\sigma_{a,x}$ – (-)	desvio padrão da aceleração na direcção do vento
Φ – (graus)	inclinação da vertente virada a barlavento
$\Phi_{1,x}$ – (-)	configuração do modo fundamental de vibração na direcção do vento
ψ_{mc} – (-)	coeficiente de redução para coberturas isoladas de naves múltiplas
ψ_r – (-)	coeficiente de redução aplicável ao coeficiente de força de secções quadradas com cantos arredondados
ψ_λ – (-)	coeficiente de redução aplicável ao coeficiente de força de elementos estruturais com efeitos de extremidade
$\psi_{\lambda\sigma}$ – (-)	coeficiente de efeitos de extremidade para cilindros de base circular

ψ_s – (-) coeficiente de protecção para paredes e vedações

ζ – (-) expoente da configuração modal

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 -	Turbilhões e perfil de velocidades na camada limite atmosférica [4].....	7
Figura 2.2 –	Variação da velocidade do vento ao longo do tempo [4].....	9
Figura 2.3 –	Gradiente de velocidades do vento [4].....	10
Figura 2.4 –	Variação da altura da camada limite, conforme o terreno [6].....	11
Figura 2.5 –	Acção do vento em secções prismáticas e em edifícios altos [4].....	12
Figura 2.6 –	Acção do vento nas superfícies a montante e jusante de corpo [8].....	13
Figura 2.7 –	Acção do vento, onde F_y é a reacção transversal e F_x é a reacção longitudinal.....	14
Figura 3.1 -	Edifício com $h \leq b$ [2].....	22
Figura 3.2 -	Edifício com $2b \geq h > b$	22
Figura 3.3 -	Edifício com $h > 2b$	23
Figura 3.4 –	Função de densidade espectral do vento SL normalizada: Norma Portuguesa NP EN 1991-1-4, 2009.....	26
Figura 4.1 –	Distribuição do coeficiente de pressão nas faces de um cubo [5].....	31
Figura 4.2 –	Variações percentuais da carga exercida pelo vento na zona central.....	33
Figura 4.3 –	Variações percentuais da carga exercida pelo vento na zona central, para os diferentes valores de $H_{central}$	39
Figura 4.4 –	Imagem do Edifício REN (Lisboa).....	40

Figura 4.5 - Variações percentuais da carga exercida pelo vento na zona central do Edifício da REN.....	42
Figura 4.6 – Imagem do Edifício Torre de Monsanto (Lisboa)	43
Figura 4.7 – Distribuição do coeficiente de pressão nas faces de uma superfície em L [5].	45
Figura 4.8 - Variações percentuais da carga exercida pelo vento na zona central do Edifício de Monsanto 0°; 90° 180°.....	49
Figura 4.9 – Imagem do Edifício Solmar	50
Figura 4.10 – Identificação conjunta das quatro curvas (0°; 30°; 45° e 90°).....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 –	Categorias de terreno e respectivos parâmetros.....	19
Tabela 4.1 –	Características básicas do Edifício <i>CAARC</i>	30
Tabela 4.2 -	Valores de C_{pT} do Edifício <i>CAARC</i>	30
Tabela 4.3 –	Valores do Edifício <i>CAARC</i> que respeitam a cálculo.....	32
Tabela 4.4 –	Características do Edifício <i>CAARC</i> , para $5/6 H_{central}$	34
Tabela 4.5 –	Edifício <i>CAARC</i> , valores que respeitam ao cálculo, para $5/6$ na $H_{central}$	34
Tabela 4.6 –	Características do Edifício <i>CAARC</i> , para $4/6 H_{central}$	35
Tabela 4.7 –	Edifício <i>CAARC</i> , valores que respeitam ao cálculo, para $4/6 H_{central}$	35
Tabela 4.8 –	Características do Edifício <i>CAARC</i> , para $3/6 H_{central}$	36
Tabela 4.9 –	Valores do Edifício <i>CAARC</i> que respeitam ao cálculo para $3/6 H_{central}$	36
Tabela 4.10 –	Características do Edifício <i>CAARC</i> , para $2/6 H_{central}$	37
Tabela 4.11 –	Valores do Edifício <i>CAARC</i> que respeitam ao cálculo para $2/6 H_{central}$	37
Tabela 4.12 –	Valores do Edifício <i>CAARC</i> que respeitam ao cálculo para $1/6$ na $H_{central}$	38
Tabela 4.13 –	Valores do Edifício <i>CAARC</i> que respeitam ao cálculo para $1/6 H_{central}$	38
Tabela 4.14 –	Características básicas do Edifício <i>REN</i>	41
Tabela 4.15 -	Valores de C_{pT} do Edifício <i>REN</i>	41
Tabela 4.16 –	Edifício <i>REN</i> , valores que respeitam ao cálculo.....	41
Tabela 4.17 –	Características básicas do Edifício Torre de Monsanto para 0°	44

Tabela 4.18 - Valores de C_{pT} do Edifício Torre de Monsanto para 0°	45
Tabela 4.19 – Edifício Torre de Monsanto para 0° , valores que respeitam ao cálculo.....	45
Tabela 4.20 – Características básicas do Edifício Torre de Monsanto para 90°	46
Tabela 4.21 - Valores de C_{pT} do Edifício Torre de Monsanto para 90°	46
Tabela 4.22 - Edifício Torre de Monsanto para 90°	47
Tabela 4.23 – Características básicas do Edifício Torre de Monsanto para 180°	47
Tabela 4.24 - Valores de C_{pT} do Edifício Torre de Monsanto para 180°	48
Tabela 4.25 – Edifício Torre de Monsanto para 180°	48
Tabela 4.26 – Características básicas do Edifício Solmar para 0°	51
Tabela 4.27 - Valores de C_{pT} do Edifício Solmar, para 0°	51
Tabela 4.28 – Edifício Solmar para 0°	52
Tabela 4.29 – Características básicas do Edifício Solmar para 30°	52
Tabela 4.30 - Valores de C_{pT} do Edifício Solmar, para 30°	53
Tabela 4.31 – Edifício Solmar para 30°	53
Tabela 4.32 – Características básicas do Edifício Solmar para 45°	54
Tabela 4.33 - Valores de C_{pT} do Edifício Solmar, para 45°	54
Tabela 4.34 – Edifício Solmar para 45°	55
Tabela 4.35 – Características básicas do Edifício Solmar para 90°	55
Tabela 4.36 - Valores de C_{pT} do Edifício Solmar, para 90°	56
Tabela 4.37 – Edifício Solmar para 90°	56

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A acção do vento tem vindo a constituir ao longo da história da humanidade uma manifestação ambiental da maior importância, condicionando o comportamento do homem e das suas realizações.

Uma estrutura imersa num escoamento fica sujeita a cargas associadas à sua acção. Este facto deu origem ao aparecimento de importantes áreas científicas que se ocupam da compreensão dos movimentos atmosféricos, bem como da Aerodinâmica, como parte da Mecânica dos Fluidos, que procura caracterizar e quantificar a interacção entre os escoamentos de massas de ar e os corpos neles imersos. Conhecimentos de mecânica dos fluidos e estruturas é fundamental para compreensão dos detalhes daquela interacção.

A caracterização do vento num dado local, entendido como escoamento de uma massa de ar na camada limite atmosférica (CLA), exige um leque de conhecimento em várias vertentes, como sejam a orografia, a rugosidade local e a turbulência. Em particular, a turbulência, com características essencialmente dinâmicas, pode influenciar significativamente as cargas a que as estruturas estão sujeitas. Este facto aliado à complexidade da interacção escoamento versus estrutura é um dos principais problemas nesta área da engenharia.

1.2. ENQUADRAMENTO COM O ASSUNTO EM ESTUDO

Nas áreas urbanas, devido à rugosidade provocada pelos edifícios, o vento possui um carácter instável pelo que da interacção com os edifícios, e dependendo das características do fluxo e da heterogeneidade dos edifícios (dimensões, altura, arquitectura e localização), se geram forças de intensidade variada.

No decurso do projecto/construção de qualquer tipo de estrutura, os projectistas têm de cumprir as disposições regulamentares vigentes no país onde a construção terá lugar, nomeadamente o Regulamento de Segurança de Acções em Estruturas de Edifícios e Pontes (RSA) vigente no caso Português. No entanto, e numa óptica de uniformização de critérios e normativas de cálculo e dimensionamento de estruturas surgiram um conjunto de normas europeias, designadas por Eurocódigos, que, embora não se sobrepondo actualmente aos regulamentos de cada país, descrevem de forma unívoca as práticas correntes nos domínios da engenharia por si abrangidos. Assim sendo, torna-se fundamental a adequação dos projectos de engenharia às referidas normas, servindo estas como guia para uma boa conduta do engenheiro, seja pela determinação dos métodos a seguir ou pelos limites impostos ao projectista.

Engenheiros integrados no Espaço Europeu, ao realizarem cálculo de estruturas deverão utilizar como documentação de referência o Eurocódigo.

Os detalhes inerentes à acção do vento estão contidos em [2].

O Código abrange uma vasta gama de formas e dimensões da construção. No entanto, em muitos casos ainda não existem ou o Euro código não dá respostas satisfatórias. A solução deste problema por ensaios em túnel de vento, ou em casos especiais, ensaios em modelos de escala real poderão conduzir a uma resposta. O registo de dados obtidos nos testes leva a um conjunto de cálculos que permite a aleatoriedade da velocidade do escoamento bem como a indução de efeitos dinâmicos no sistema estrutural.

A resolução matemática deste fenómeno exige o domínio de diversos conceitos de dinâmica estrutural estocástica e da teoria da probabilidades de variáveis aleatórias.

Na NP EN 1991-1-4, 2009, parte integrante do denominado Eurocódigo [2], no capítulo 7.2.2, "**Paredes verticais de edifícios de planta rectangular**", para cálculo da força do vento em edifícios em que o valor da altura é superior a duas vezes o da largura, não existe detalhe para o cálculo da zona central.

1.3. PROPÓSITO DO TRABALHO

O propósito desta Tese consiste em avaliar a influência no valor global da acção do vento, de um número variável das bandas em que é recomendado subdividir a zona central de um edifício com altura superior ao dobro da sua largura. Para tal recorreu-se ao estudo de quatro edifícios de diferentes alturas, geometrias e características estruturais, a que foram aplicados os correspondentes coeficientes aerodinâmicos.

A metodologia seguida no trabalho, rege-se pela Norma Portuguesa NP EN 1991-1-4, 2009 [2] para edifícios em que a altura é superior a duas vezes a dimensão da largura.

1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta Tese está dividida em cinco capítulos. No primeiro Capítulo faz-se o enquadramento do tema abordado e define-se a estrutura do trabalho, bem como os seus principais objectivos.

No segundo Capítulo abordam-se matérias relacionadas com a Camada Limite e descrevem-se alguns conceitos fundamentais necessários para a compreensão dos efeitos Aerodinâmicos e da interacção do vento com os edifícios.

O terceiro Capítulo engloba a descrição das metodologias de cálculo que constam no Eurocódigo 1 Parte 4-1 (EC1) para todos os parâmetros necessários à avaliação do comportamento da estrutura, incluindo fórmulas expeditas para obtenção imediata dos valores das características dinâmicas da estrutura em causa.

O quarto Capítulo é dedicado à apresentação dos casos de estudo que consiste em efectuar um conjunto de cálculos em torno da acção do vento sobre a zona central em edifícios altos.

No quinto Capítulo são apresentadas as principais conclusões do trabalho

Capítulo 2

CARACTERIZAÇÃO DO VENTO

2.1. CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA

A atmosfera ao ser perturbada tende naturalmente para o movimento, originando aquilo que se convencionou chamar vento. Estas perturbações são constituídas fundamentalmente por gradientes de pressão que resultam de aquecimentos diferenciais em diferentes locais. Tais desequilíbrios provocados quer por fenómenos termodinâmicos, quer por fenómenos mecânicos, tornam a atmosfera instável, obrigando esta a uma procura incessante de equilíbrio e originando as circulações atmosféricas [3].

A energia necessária ao desencadeamento destes fenómenos tem fundamentalmente origem no sol. Este emite energia sob a forma de radiação solar, chegando uma pequena parcela desta radiação à superfície terrestre depois de atravessar a atmosfera. Parte desta radiação é absorvida pela superfície terrestre, aquecendo-a. Posteriormente parte dessa energia absorvida é emitida sob a forma de radiação terrestre. Esta radiação é captada por sua vez pela atmosfera local, obrigando a um deslocamento, reemitido noutra local a energia antes adquirida, provocando diferenças de temperatura e pressão atmosférica [3]. Os deslocamentos das altas para as baixas pressões estão na origem do movimento das massas de ar. Assim estamos na presença de uma deslocação horizontal do ar atmosférico relativamente à superfície da Terra.

Os deslocamentos das massas de ar atmosférico podem ser considerados como resultantes da sobreposição de escoamentos independentes, caracterizados pelas respectivas escalas horizontais de comprimento, variando a ordem de grandeza das suas dimensões de milímetros a milhares de quilómetros.

A força de atrito gerada entre uma superfície e o fluido que sobre ela se escoar, resulta da viscosidade do fluido e tende a retardar o movimento. Este efeito do atrito faz-se sentir numa região do escoamento próxima da superfície, denominada Camada Limite Atmosférica (CLA), e tem como principal característica a variação da velocidade do escoamento entre o valor zero, na camada aderente à superfície, e o valor da velocidade do escoamento não perturbado (no exterior da CLA).

Uma camada limite turbulenta pode considerar-se, para efeitos de análise, como sendo constituída por duas camadas com características distintas:

- Uma camada interior, em condições de equilíbrio local, também denominada camada de parede. É nesta região que se colocam a maioria dos problemas de Engenharia do Vento.
- Uma camada exterior onde se faz sentir a influência do escoamento médio.

A análise da camada exterior de uma CLA turbulenta apresenta-se mais complexa que a da camada interior, devido ao facto de o seu comportamento ser controlado pelos turbilhões de grandes dimensões, com capacidade para transportar as características do campo médio a grandes distâncias e transferir energia para o interior da CLA. O gradiente de velocidades do vento que existe entre o topo e o nível mais baixo desta camada limite é objecto inicial da formação de turbilhões de larga escala, com um tamanho equivalente à altura da camada limite, como representado na Figura 2.1.

As principais características de escoamentos em regime turbulento são a sua grande capacidade de difusão e o carácter aleatório. A turbulência surge com a formação de grandes turbilhões e dissipa-se nos pequenos turbilhões. Entre os vórtices de grande dimensão e os de dimensão reduzida, verifica-se a existência de uma gama contínua de escalas de vórtices.

Estes turbilhões são instáveis por natureza, sendo progressivamente destruídos e transformados em turbilhões cada vez menores. Por fim, quando se encontram numa dimensão reduzida, que pode chegar à ordem dos milímetros, acabam por ser completamente dissipados em calor pela viscosidade dinâmica do ar.

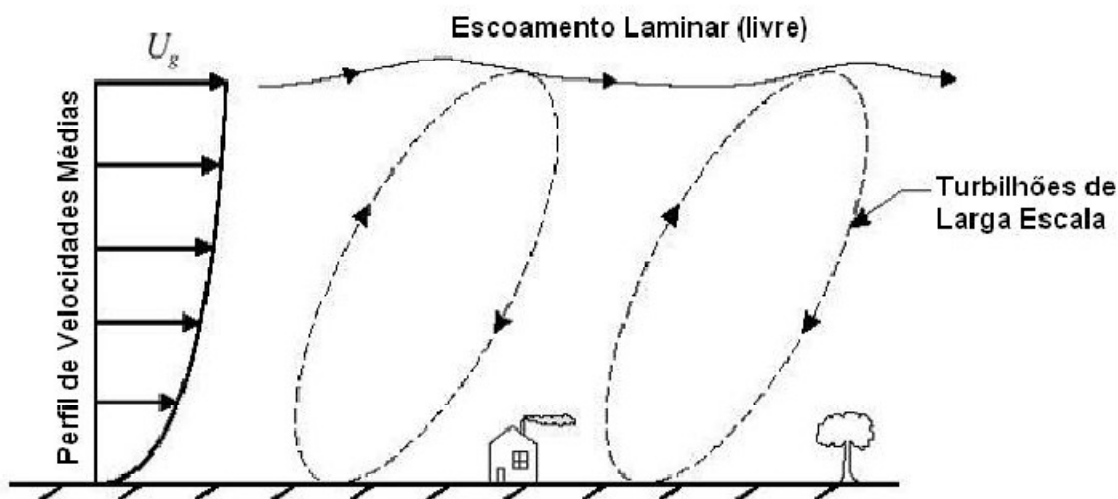


Figura 2.1 - Turbilhões e perfil de velocidades na camada limite atmosférica [4]

Desta forma, a CLA pode ser entendida como uma camada de ar em movimento, contendo turbilhões de diferentes tamanhos que se podem movimentar a diferentes velocidades e direcções, em relação à camada principal. Para aplicações em Engenharia Civil são de maior interesse os ventos fortes, os quais têm características equivalentes às condições da CLA em estabilidade neutra, sendo influenciados pela rugosidade da superfície terrestre.

As duas principais consequências da existência da camada limite atmosférica, em termos de projecto estrutural, são:

- Variação da velocidade média do vento em função da altitude;
- Geração de rajadas de vento, ao longo do escoamento.

A presença das rajadas, que ocorrem numa sequência aleatória de frequências e intensidades, impõem uma variação aleatória da velocidade do ar, quer em termos de espaço quer em termos de tempo. As rajadas mais velozes são de menor duração e actuam sobre uma pequena região, correspondendo à chegada simultânea ao ponto em estudo de turbilhões de diversas dimensões, em condições tais que seus efeitos se sobrepõem.

A espessura da camada limite atmosférica depende de alguns factores, tais como: rugosidade do terreno, variação da temperatura do ar com a altitude e da localização geográfica. As construções por sua vez encontram-se imersas nesta camada, tendo que ser projectadas e construídas de acordo com as normas vigentes.

A natureza aleatória do vento dentro da camada limite atmosférica torna-o de difícil caracterização, para critérios de projecto estrutural. Contudo, algumas simplificações são

adoptadas, de modo a que se considerem separadas as suas componentes médias (devidas à velocidade média) e flutuantes (devidas às rajadas).

2.2. VELOCIDADE MÉDIA DO VENTO

Pela natureza turbulenta da camada limite atmosférica, a velocidade do vento num dado ponto, está em constante flutuação. Contudo, uma avaliação da intensidade do vento pode ser obtida pela sua velocidade média, que é definida pela equação 2.1,

$$U = \frac{1}{T} \int U(t) dt \quad (2.1)$$

onde $U(t)$ é a velocidade instantânea e t é o período de tempo sobre o qual a média é tomada.

O valor máximo obtido a partir de um registo de velocidades de vento $U(t)$ não é único, sendo dependente da duração do período de amostragem t . Como pode ser verificado na Figura 2.2, períodos longos de amostragem ($T1$) tendem a absorver efeitos de rajadas, resultando numa menor velocidade média (U_1). Por outro lado, períodos menores de amostragem ($T2$) podem ser dominados pelos efeitos de uma rajada de curta duração, conduzindo a valores maiores de velocidades médias (U_2).

No Eurocódigo [2], a velocidade média do vento é referida a períodos de 10 minutos com uma probabilidade anual de ser excedida igual a 0,02, independentemente da direcção do vento, a uma altura de 10 m acima de terreno plano em campo aberto e tendo em conta os efeitos da altitude (se necessário).

No Canadá, a velocidade média usada no projecto de estruturas é definida como sendo a máxima velocidade média registada sobre o período de 1 hora.

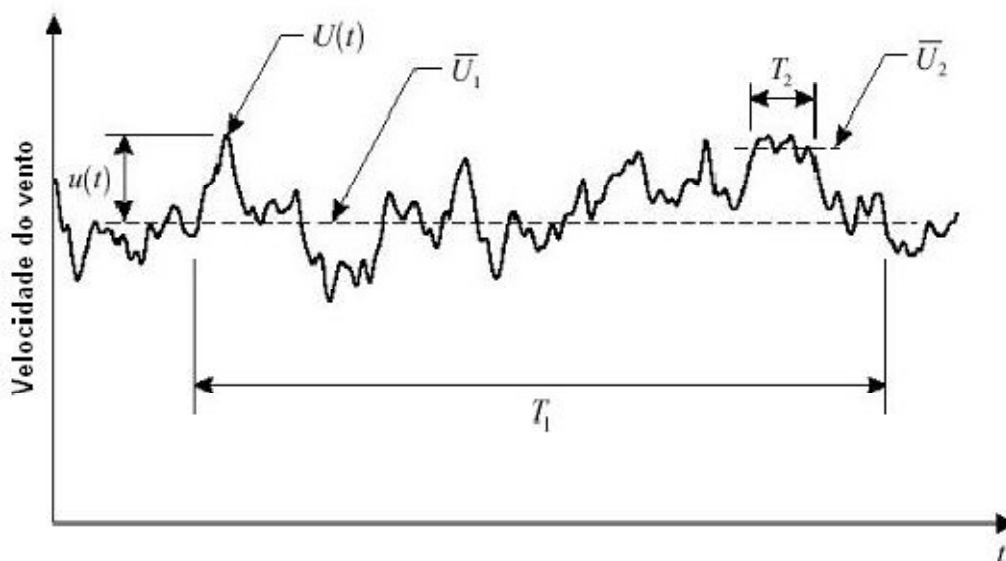


Figura 2.2 – Variação da velocidade do vento ao longo do tempo [4]

Nos Estados Unidos, as velocidades de projecto são calculadas a partir do mínimo período de tempo que uma massa de ar com uma milha de comprimento leva para passar por um ponto de registo, tendo sido denominado como *fastest mile of wind*.

Nota-se que o significado do termo *velocidade média do vento* varia de país para país. Necessita de ser cuidadosamente definido, a fim de permitir uma comparação credível entre estudos realizados em diferentes países. Factores de conversão simples são usados nas transformações de uma base de tempo média para outra.

No projecto estrutural, considera-se a pressão de pico à cota Z [$q_p(Z)$], como produto da acção do vento incidente na estrutura.

2.3. PERFIL DAS VELOCIDADES MÉDIAS

O atrito do ar ao longo da superfície da Terra causa uma variação na sua velocidade em altitude: zero ao nível do solo, até um valor máximo igual à velocidade gradiente, U_g , a uma altitude variável constituindo a camada limite atmosférica (CLA), cuja altura varia entre $200 < \delta < 600$ m. Devido ao facto das pressões do vento utilizadas em projecto variarem com o quadrado da sua velocidade, este gradiente (Figura 2.3) causa um impacto significativo nas cargas inerentes ao efeito vento por acção da pressão estática, dinâmica e total.

A pressão estática é a pressão que actua da mesma forma em todas as direcções e é inerente à secção do escoamento para um determinado fluxo. A tomada da pressão estática é perpendicular ao escoamento.

A pressão dinâmica obtém-se pela conversão da energia cinética em energia de pressão.

A pressão total (p_0), representa a soma da pressão estática com a pressão dinâmica.

A intensidade com que esta variação da velocidade média ocorre, está directamente ligada à rugosidade do terreno sobre o qual a massa de ar se desloca. Superfícies mais rugosas tendem a reduzi-la, aumentando a altura da Camada Limite Atmosférica.

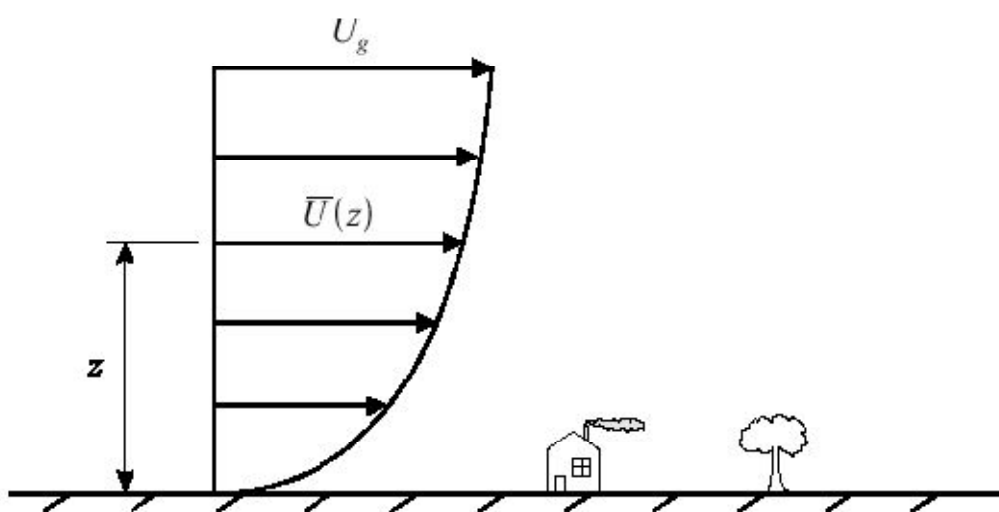


Figura 2.3 – Gradiente de velocidades do vento [4]

Na NP EN 1991-1-4, a velocidade de referência do vento, v_{br0} , é definida com base na rugosidade tipo II, de acordo com as classes de rugosidades, representadas na Tabela 3.1. Das diversas expressões matemáticas, que têm sido utilizadas com o propósito de se modelar o perfil de velocidades do vento na Camada Limite Atmosférica, a mais comum é o Perfil velocidades logaritmo, representado pela equação (2.2)

$$U(z) = U_{10} \times \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{10}{z_0}\right)} \quad (2.2)$$

Onde $U(z)$ é a velocidade média do vento na cota z e U_{10} é a velocidade média do vento na cota de referência (10 metros acima do solo), e z_0 é altura característica da rugosidade da superfície.

Camada Limite Atmosférica é a parte da atmosfera, diretamente influenciada pela superfície e sobre as cidades é chamada CLA urbana e a rugosidade da superfície, turbulência térmica e mecânica, produção antrópica de calor e pelo armazenamento de calor pelas estruturas físicas urbanas, estão com ela directamente relacionados. CLA urbana forma-se na direcção do vento envolvendo toda a estrutura da cidade, como uma redoma cuja altura depende da rugosidade da superfície e da estabilidade atmosférica, sendo o fluxo de ar fortemente modificado pela geometria dos edifícios. Assim, a direcção e a velocidade do vento são alteradas o que pode causar dificuldade na dispersão de poluentes nas grandes cidades.

A Figura 2.4 representa vários perfis de CLA urbana.

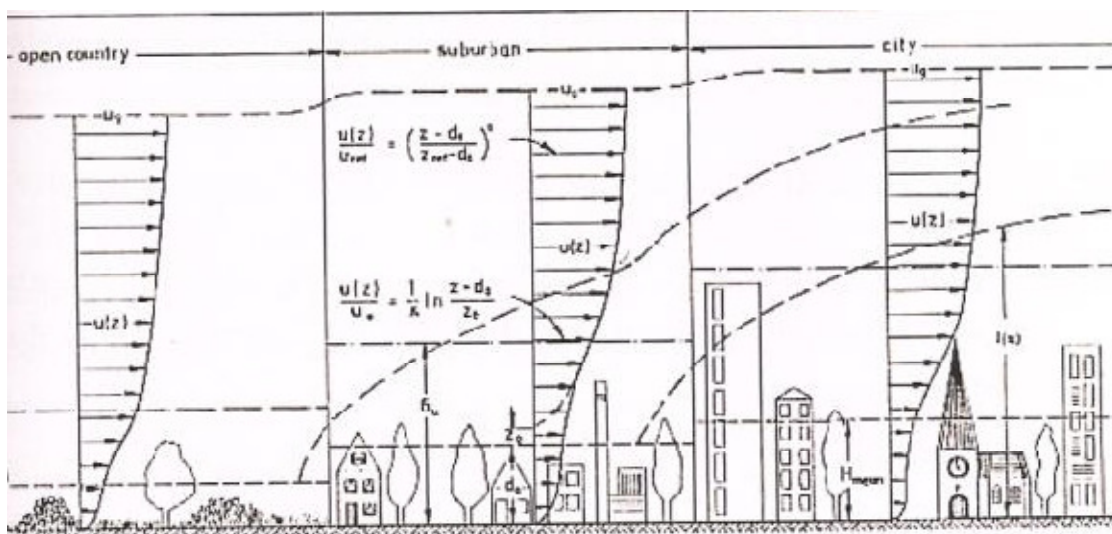


Figura 2.4 – Variação da altura da camada limite, conforme o tipo de terreno [6]

2.4. TURBULÊNCIA DO VENTO

A estatística proporcionou ferramentas matemáticas ao pioneirismo de *Theodore von Kármán* levando-o a definir a turbulência do vento como sendo "flutuações irregulares da velocidade, governadas por equilíbrio estatístico".

A irregularidade destas flutuações não permite um tratamento definido, conduzindo a uma abordagem através da teoria da probabilidade e de médias estatísticas. Por ser um fenómeno aleatório, as amostras ao longo do tempo diferem entre si, podendo, entretanto, apresentar alguma regularidade no sentido estatístico, quando o número de amostras é suficientemente grande.

Um processo aleatório é estacionário se os seus parâmetros estatísticos (média, variância, auto correlação, etc.), determinados sobre a totalidade dos registos possíveis, forem invariantes para qualquer deslocamento da origem dos tempos.

Assim, pode-se representar matematicamente a turbulência do vento considerando-se a sua velocidade instantânea $U(t)$ como a soma de uma componente média, \bar{U} , e uma flutuante, $u(t)$, equação (2.3)

$$U(t) = \bar{U} + u(t) \quad (2.3)$$

2.5. ACÇÃO DO VENTO

Com o ar a deslocar-se em torno de um corpo, as linhas de corrente do escoamento separam-se deste em pontos chamados *pontos de separação*, num processo usualmente chamado de desprendimento *da camada limite*. Para objectos prismáticos rectangulares, estes pontos de separação ocorrem geralmente nas arestas vivas expostas à acção do vento, tal como representado na Figura 2.5.

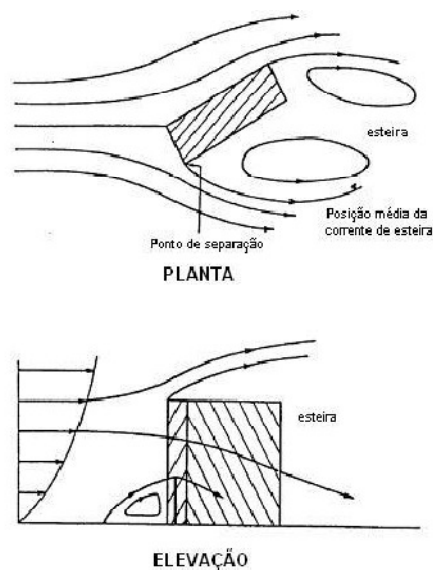


Figura 2.5 – Acção do vento em secções prismáticas e em edifícios altos [4]

Na face de barlavento, o vento exerce uma pressão positiva, com uma amplitude que varia em função da sua velocidade de aproximação e aumenta de acordo com a altura sobre o solo, devido ao perfil vertical de velocidades da CLA.

Estas pressões são caracterizadas por coeficientes adimensionais que relacionam a diferença entre a pressão local e a ambiente com a pressão dinâmica do escoamento,

$$C_p = \frac{P_i - P_e}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (2.4)$$

Estes coeficientes podem, assim, assumir valores positivos e negativos, tal como ilustrado na Figura 2.6.

Da interacção entre um escoamento e um obstáculo com arestas vivas a face de barlavento experimenta valores de $C_p > 0$ (sobrepessão), variáveis vertical e longitudinalmente, ficando todas as outras faces sob $C_p < 0$ (sucção), com valores aproximadamente uniformes em cada face (dependendo do seu comprimento, uma vez que, o escoamento pode aderir às faces laterais e de topo). Formas mais complexas implicam maiores variações na distribuição de pressões, como referido em [5].

AERODINÂMICA

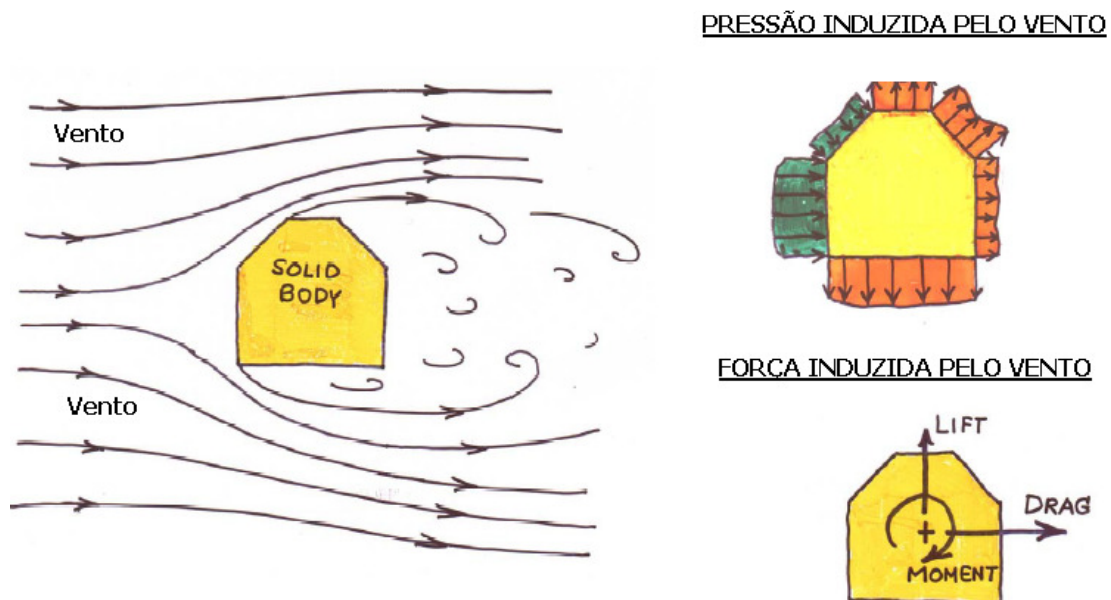


Figura 2.6 – Acção do vento nas superfícies a montante e jusante de corpo [8]

A força resultante que actua no edifício, é então a combinação dos efeitos das pressões positivas a montante e das pressões negativas que actuam a jusante. Em superfícies com raio de curvatura o ponto de separação varia em função de alguns factores, como: a velocidade do escoamento, a turbulência, a rugosidade da superfície do corpo e a curvatura.

2.6. REACÇÃO DOS EDIFÍCIOS À ACÇÃO DOS VENTOS

As pressões do vento, e as cargas produzidos por estas, não são estáticas na natureza, mas flutuam constantemente. A natureza dinâmica destas cargas pode, de facto, fazer com que estes entrem em ressonância com estruturas esbeltas e flexíveis, gerando respostas dinâmicas que podem ser muito maiores do que aquelas produzidas pelas cargas estáticas. Para edifícios baixos e rígidos, esta resposta dinâmica é menos significativa e o projecto pode ser seguramente baseado nas equivalentes estáticas das cargas do vento. Entretanto, em edifícios altos estas respostas desempenham um papel fundamental.

Os edifícios altos em função da força aplicada pelo vento, reagem com oscilações transversais e longitudinais, tal como representado na Figura 2.7.

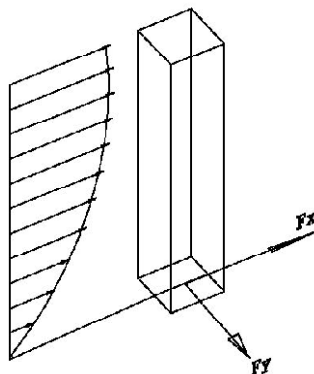


Figura 2.7 – Acção do vento, onde F_y é a reacção transversal e F_x é a reacção longitudinal

2.7. RESPOSTA LONGITUDINAL

O efeito da turbulência em termos de produção de cargas numa estrutura depende em grande escala da relação entre a dimensão dos turbilhões do vento e da dimensão estrutura. Nas componentes de alta frequência (turbilhões de pequena dimensão) as cargas produzidas são locais. Desta forma, o seu efeito total sobre toda a estrutura é reduzido, dado que enquanto em algumas regiões há incremento de pressões noutros há redução. Assim as

pressões devido às componentes de alta frequência do vento são fracas, quando correlacionadas ao longo da estrutura como um todo.

Outro elemento determinante na eficiência da acção do vento em termos de produção de cargas é a frequência própria ou natural do edifício. Em edifícios com frequência natural igual ou inferior a 1 Hz, em particular aquelas fracamente amortecidas, podem apresentar uma importante resposta flutuante na direcção do vento.

Um grande número de códigos internacionais utiliza o *factor de rajada*, para o cálculo das respostas longitudinais de edifícios altos em função da acção dos ventos. Entretanto, diferem na maneira como caracterizam as condições do escoamento e a sua influência nas reacções da estrutura. Desta forma, é muito comum encontrarem-se diferenças nos resultados obtidos pelos diferentes processos para um mesmo edifício, sob as mesmas condições.

2.8. RESPOSTA TRANSVERSAL

Tomando como referência a resposta longitudinal, as estruturas apresentam um comportamento bem mais complexo quando se abordam as respostas transversais. Um esforço continuado está presente no desenvolvimento dos métodos analíticos, para se calcular a resposta transversal de edifícios.

Entre os critérios de projecto, a reacção transversal em edifícios altos à acção do vento, é um factor de critério a ter em consideração. Desta forma, recorre-se à determinação desta reacção a partir de ensaios em modelos aeroelásticos em túneis de vento.

Provavelmente, uma das razões, para o facto de métodos teóricos de cálculo da reacção transversal em estruturas altas não tenha atingido os valores espectáveis, passará pela existência da sobreposição de diversos mecanismos de excitação.

Tendo por base a documentação em referência, os mecanismos de excitação estão associados a:

- a) Excitação de esteira devido ao desprendimento de vórtices;
- b) Turbulência do vento;
- c) Características do escoamento;
- d) Velocidade do vento;

-
- e) Características geométricas e dinâmicas da estrutura em estudo;
 - f) Deslocamento lateral da estrutura.

No entanto neste trabalho apenas se analisam cargas estáticas equivalentes longitudinais.

Capítulo 3

ANÁLISE DA ACÇÃO DO VENTO PELO EUROCÓDIGO

3.1. ENQUADRAMENTO

A Norma Europeia EN 1991-1-4 procura criar um conjunto de linhas orientadoras para a determinação das acções do vento sobre estruturas, tanto local com globalmente, aplicável a edifícios com alturas inferiores a 200m.

O documento de referência, não é aplicável a edifícios com alturas superiores a 200m. No mesmo documento são referidos os anexos nacionais, que determinam um conjunto de condições físicas e climáticas, características de cada região. O código é, ainda, composto por um conjunto de anexos que permitem de forma simplificada definir um leque de características da acção do vento bem como algumas propriedades dinâmicas dos edifícios.

O objectivo deste capítulo é resumir os principais passos e métodos de cálculo adoptados no âmbito deste trabalho.

3.2. VELOCIDADE DE REFERÊNCIA DO VENTO

A velocidade de referência do vento $v_{b,0}$ é definida a uma altura de 10m acima do solo, numa zona de terreno aberto com vegetação baixa e obstáculos isolados de pelo menos 20 vezes a sua altura ($Z_0 = 0,05$). O valor de referência da velocidade do vento, definido em função da direcção do vento e da época do ano pode ser calculado através da equação (3.1);

$$V_b = C_{dir} \times C_{season} \times V_{b,0} \quad (3.1)$$

Pelo exposto no Anexo Nacional do EC1, quadro N.A-4.1, $C_{dir} = C_{season} = 1$.

Para Portugal admite-se para $V_{b,0}$ o valor de 27 m/s ou 30m/s, consoante o edifício em análise se encontre na zona A (todo o território, excepto a zona B), ou na zona B (arquipélagos, cotas superiores a 600 m e a faixa costeira com 5 km de largura). Neste estudo vamos considerar o valor de 30 m/s.

A transformação da velocidade fundamental na velocidade básica é feita pela afectação de coeficientes relativos à direcção do vento e época do ano. Estes coeficientes de afectação da velocidade básica deverão ser consultados no Anexo Nacional. Na ausência desta informação e em casos gerais, o valor 1.0 pode ser adoptado.

Note-se ainda que $v_{b,0}$ se refere ao valor característico de uma média de 10 minutos com uma probabilidade anual de ser ultrapassada de 0,02, o que equivale a um período de retorno de 50 anos.

No caso de análise de estruturas temporárias, as propriedades de $V_{b,0}$ deverão ser afectadas pelo coeficiente de probabilidade (equação 3.2), que permite a transformação do período de retorno equivalente à probabilidade 0,02 para a probabilidade p .

A velocidade média do vento, referida a períodos de 10 minutos, com a probabilidade anual p de ser excedida é determinada multiplicando o valor de referência da velocidade do vento V_b , pelo coeficiente de probabilidade calculado pela equação (3.2); (ver também a EN 1991-1-4).

$$C_{Prob} = \left(\frac{1-k \times \ln(-\ln(1-p))}{1-k \times \ln(-\ln(0,98))} \right)^n \quad (3.2)$$

A velocidade é afectada do coeficiente de probabilidade

$p =$ probabilidade anual de excedência

$k =$ 0,2

$n =$ 0,5

No caso de uma época bastante restrita do ano a velocidade básica deverá ser também afectada pelos coeficientes referidos acima.

3.3. PERFIL VELOCIDADE MÉDIA DO VENTO

A velocidade média do vento $V_m(Z_s)$ a uma altura de referência Z_s acima do terreno, está directamente relacionada com o coeficiente de rugosidade do terreno $C_r(Z_s)$, o coeficiente de orografia $C_0(Z_s)$, e com valor de referência da velocidade do vento V_b , sendo determinada pela equação (3.3):

$$V_m(Z_s) = C_r(Z) \times C_0(Z) \times V_b \quad (3.3)$$

O factor de rugosidade $C_r(Z)$ depende das características de rugosidade do terreno, cujas classes se apresentam na Tabela 3.1 [2], onde Z_0 representa o comprimento de rugosidade e Z_{\min} a altura mínima.

Tabela 3.1 – Categorias de terreno e respectivos parâmetros

CATEGORIA DE TERRENO		Z_0 [m]	Z_{\min} [m]
I	Mar ou zona costeira exposta aos ventos de mar, lagos extensos	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: aldeias, 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

Com recurso aos parâmetros da Tabela 3.1 define-se o coeficiente de rugosidade (C_r), dado pelas equações (3.4 e 3.5):

$$C_r = K_r \times \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{para} \quad z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \quad (3.4)$$

$$C_r(z) = C_r(z_{\min}) \quad \text{para} \quad z \leq z_{\min} \quad (3.5)$$

sendo o factor do terreno (K_r), dado pela equação (3.6):

$$K_r = 0,19 \times \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0.07} \quad (3.6)$$

em que:

$z_{0,II} = 0,05$ m (categoria de terreno II, Tabela 3.1);

z_{\min} => altura mínima definida na Tabela 3.1;

z_{\max} a ser considerada é igual a 200 m.

O coeficiente de orografia $C_0(z)$, deve ser considerado quando o declive do terreno for superior a 5% [2]. Neste trabalho não vai ser considerada esta possibilidade.

Os procedimentos sugeridos no Anexo A para casos específicos em que os edifícios em estudo se encontram bastante próximos de edifícios vizinhos, podendo ficar sujeitos a efeitos secundários e induzir elevadas velocidades do vento segundo algumas direcções (v. 4.3.4 EN 1991-1-4). Estes efeitos podem inclusive criar situações de desconforto junto aos edifícios.

3.4. INTENSIDADE DE TURBULÊNCIA

A escala de comprimento do turbilhão de interesse $L(z_s)$, para a altura de referência z_s , é dada pela equação (3.7):

$$L(z_s) = L_t \times \left(\frac{z}{z_t}\right)^\alpha \quad (3.7)$$

Com uma altura de referência $Z_t = 200 \text{ m}$, uma escala de comprimentos de referência $L_t = 300 \text{ m}$ e com $\alpha = 0,67 + 0,05 \times \ln(Z_0)$ em que, admitindo o comprimento de rugosidade $Z_0 = 1,0 \text{ m}$, se obtém $\alpha = 0,6$.

A intensidade de turbulência $I_{v(z)}$ é definida a determinada altura z como a razão entre o desvio padrão das flutuações e da velocidade média, equações (3.8 e 3.9) [2].

$$I_{v(z)} = \left(\frac{\sigma_v}{V_{m(z)}} \right) = \left(\frac{K_I}{C_{0(z)} \times \ln \frac{z}{Z_0}} \right) \quad \text{para } z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \quad (3.8)$$

$$I_{v(z)} = I_{v(z_{\min})} \quad \text{para } z \leq z_{\min} \quad (3.9)$$

Onde K_I é denominado o factor de turbulência, com valor sugerido de 1.0, salvo indicação do Anexo Nacional.

3.5. PRESSÃO DE PICO DO VENTO EM ESCOAMENTO LIVRE

A pressão de pico do vento em escoamento livre, é uma grandeza que reúne as propriedades médias e flutuantes do vento, como uma pressão estática equivalente. A pressão de pico é assim definida como a soma de duas parcelas, uma de carácter médio e outra função da turbulência do escoamento, equação (3.10);

$$q_p(z) = [1 + 7 \times I_{v(z)}] \times \frac{1}{2} \times \rho \times v_{m(z)}^2 \quad (3.10)$$

O valor "7" na expressão baseia-se num factor de pico igual a 3,5 e é consistente com os valores dos coeficientes de pressão e de força.

É corrente comparar-se esta grandeza à pressão estática da velocidade básica, q_b , definindo-se assim uma nova grandeza, o factor de exposição, $C_{e,z}$, que não é mais do que a amplificação da pressão estática devido à velocidade básica, resultado da diferença de altura z e da turbulência do escoamento nesse ponto.

$$C_e = \frac{q_p(z)}{q_b} = [1 + 7 \times I_{v(z)}] \times \frac{1}{2} \times \rho \times v_{m(z)}^2 / \frac{1}{2} \times \rho \times v^2 \quad (3.11)$$

Em casos de rugosidade baixa (zonas costeiras) e grandes alturas como estão sujeitos os edifícios altos, o coeficiente de exposição chega a atingir valores de 5 unidades.

3.6. EDIFÍCIOS DE PLANTA RECTANGULAR

As alturas de referência Z_e para as paredes de barlavento em edifícios de planta rectangular, dependem da relação altura/largura (h/b) e correspondem aos três casos seguintes:

- a) Um edifício com $h \leq b$ deverá ser considerado como tendo uma única zona vertical, tal como representado na Figura 3.1.

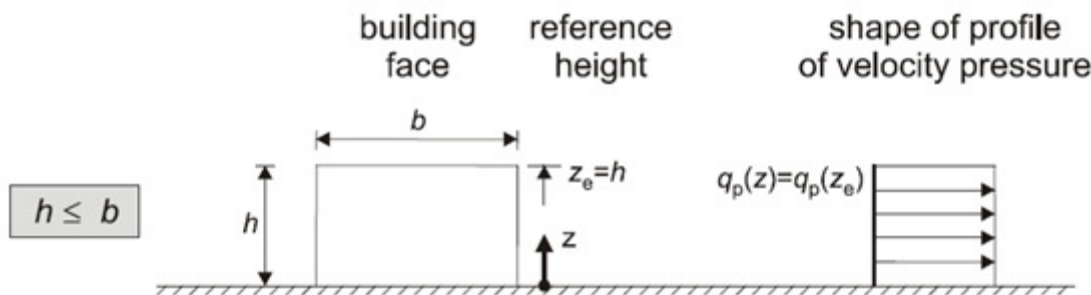


Figura 3.1 - Edifício com $h \leq b$ [2]

- b) Para edifícios com $2b \geq h > b$, poderá considerar-se que o edifício é constituído por duas zonas, compreendendo: uma inferior que se prolonga na vertical, a partir do solo, até uma altura igual a b , e uma superior constituída pelo restante (Figura 3.2);

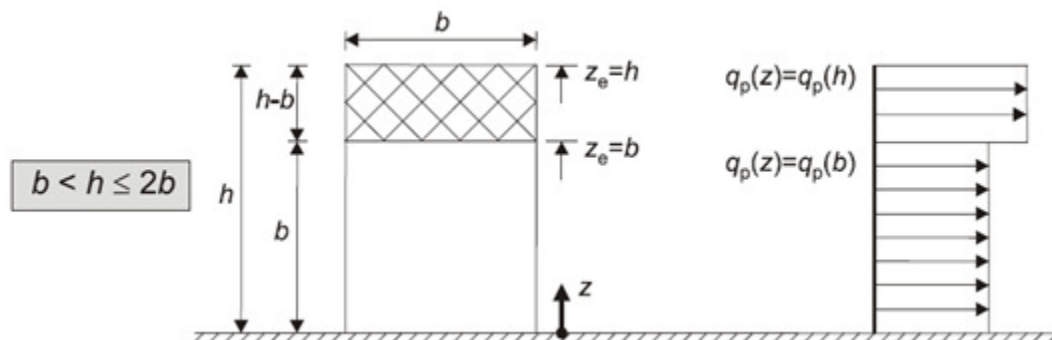


Figura 3.2 - Edifício com $2b \geq h > b$ [2]

- c) Se $h > 2b$ poderá considerar-se que o edifício é constituído por três zonas, compreendendo: i) uma inferior que se prolonga na vertical, a partir do solo, até uma altura igual a b ; ii) uma superior que se estende, desde o topo, numa altura igual a b ; e iii) uma zona intermédia, entre as partes superior e inferior, que poderá ser

dividida em bandas horizontais com uma altura h_{strip} , conforme representado na Figura 3.3.

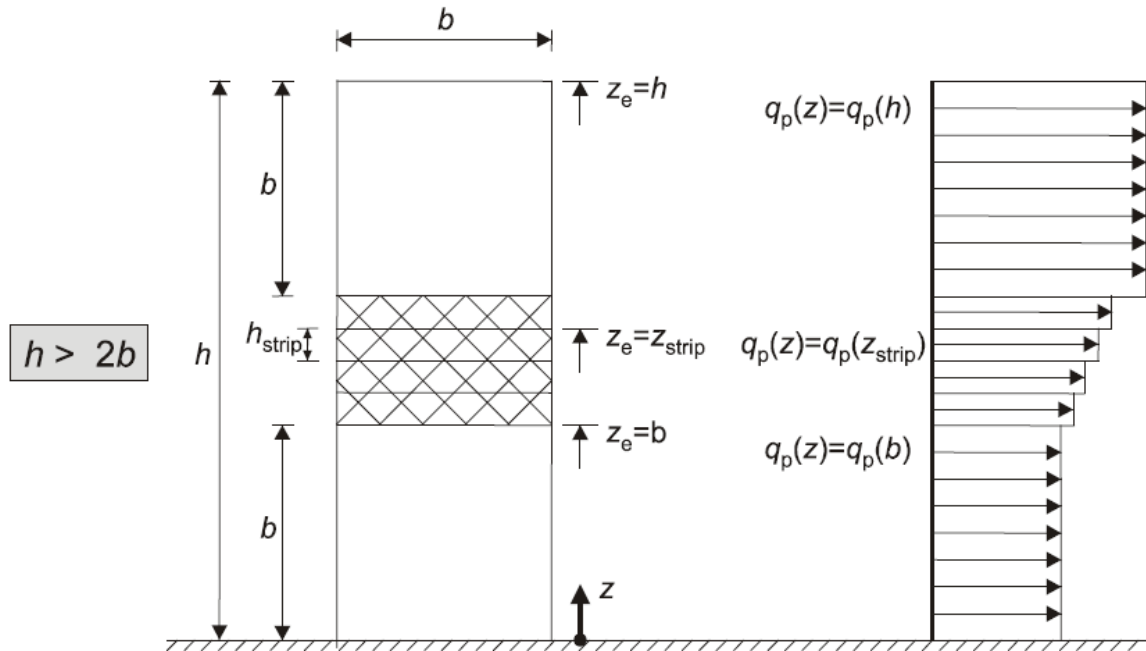


Figura 3.3 - Edifício $h > 2b$ [2]

No entanto, e conforme referido, o código não especifica o valor de h_{strip} , nem o número de bandas a considerar.

3.7. CÁLCULO DA ACÇÃO DO VENTO

A força exercida pelo vento, F_w , sobre uma construção ou um elemento de construção poderá ser calculada pela equação (3.12)

$$F_w = C_s C_d \times C_f \times q_p(z) \times A_{ref} \quad (3.12)$$

Na equação (3.12), $C_s C_d$ é denominado factor estrutural e contempla os efeitos aleatórios do vento na ocorrência de picos não simultâneos em toda a superfície do edifício bem como as vibrações induzidas no edifício devido à turbulência do vento.

O coeficiente de força (C_f), depende da forma do edifício e da posição da incidência do vento.

A acção do vento é calculada pela pressão dinâmica do vento em escoamento livre, $q_p(Z)$, multiplicada pela área de referência do elemento estrutural que é carregada pela acção do vento, A_{ref} .

3.8. FORÇAS EXTERIORES

As força exercida pelo vento, $F_{w,e}$, sobre uma construção ou um elemento de construção poderá ser determinada pela soma vectorial das forças $F_{w,e}$, $F_{w,i}$ e $F_{w,at}$, calculadas a partir das pressões exteriores e interiores e as forças de atrito, resultantes do atrito do vento paralelamente às superfícies exteriores, calculadas utilizando a equação (3.15)

$$\text{Forças exteriores} \quad F_{w,e} = C_s C_d \times \sum_{w,e} \times A_{ref} \quad (3.13)$$

$$\text{Forças interiores} \quad F_{w,i} = \sum_{w,i} \times A_{ref} \quad (3.14)$$

$$\text{Forças atrito} \quad F_{w,at} = C_{fat} \times A_{fat} \times q_p(z_e) \quad (3.15)$$

Em que:

- C_s coeficiente estrutural;
- w_e pressão exterior na superfície individual à altura z_e ;
- w_i pressão interior na superfície individual à altura z_i ;
- A_{ref} área de referência da superfície individual;
- C_{fat} coeficiente de atrito;
- A_{fat} área de superfície exterior paralela ao vento.

3.9. COEFICIENTES DE FORÇA

O coeficiente de força C_f para elementos estruturais de secção rectangular, com o vento incidindo perpendicularmente a uma face, deverá ser determinado através da equação (3.16)

$$C_f = C_{f,0} \times \psi_l \times \psi_r \quad (3.16)$$

Em que:

$C_{f,0}$ é o coeficiente de força para elementos de secção rectangular com arestas vivas e sem livre escoamento em torno das extremidades; ψr é o coeficiente de redução para secções quadradas com cantos arredondados; o valor de ψr depende do número de Reynolds, e; $\psi \lambda$ é o coeficiente de efeitos de extremidade para elementos cujas extremidades sejam livremente contornadas pelo vento.

Os coeficientes de força presentes em [2], referem-se sobretudo figuras poligonais e circulares.

3.10. FACTOR ESTRUTURAL – $C_s C_d$

O factor estrutural, contabiliza a aleatoriedade da acção do vento, a perda de correlação dessa acção em vários pontos de forma simultânea e as vibrações induzidas nas estruturas. Este tipo de análise fará apenas sentido para alguns tipos concretos de estruturas, nomeadamente os edifícios altos.

Para edifícios baixos ou com frequências de vibração muito elevadas, superiores a 5Hz, o valor de $C_s C_d$ pode ser tomado como 1.

Edifícios esbeltos, altos e flexíveis, não dispensam o cálculo detalhado do $C_s C_d$, pela equação, (3.17)

$$C_s C_d = \frac{1 + 2 \times K_p \times I_v(Z_e) \times \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 \times I_v(Z_e)} \quad (3.17)$$

Nesta expressão, k_p é o factor de pico definido pela máxima razão entre a flutuação do vento e o seu desvio padrão. B^2 e R^2 representam os factores de fundo e de ressonância, respectivamente. O factor de fundo mede a falta de correlação das pressões em toda a estrutura e o factor de ressonância, por sua vez, mede a turbulência do vento em ressonância com o modo de vibração principal da estrutura.

3.11. COEFICIENTE DE RESPOSTA QUASE - ESTÁTICA

O coeficiente de resposta quase-estática B^2 , que traduz a falta de correlação total na superfície da construção, determinante para o cálculo do coeficiente, pode ser determinado pela equação, (3.18)

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0.9 \times \left(\frac{b+h}{L(Z_e)} \right)^{0.63}} \quad (3.18)$$

onde,

b - Largura do edifício

h - Altura do edifício

$L_{(ze)}$ - Escala de turbulência do vento calculada no ponto Z_e

3.12. DETERMINAÇÃO DO FACTOR DE RESSONÂNCIA – R2

A expressão do factor de ressonância é definida com recurso ao espectro de turbulência do vento, conforme ilustrado na Figura 3.4 [2].

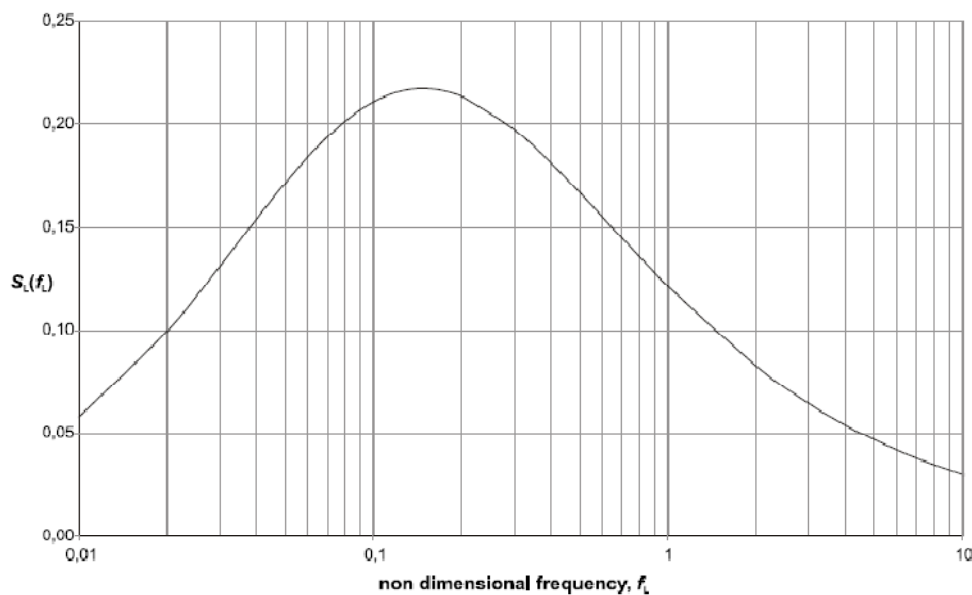


Figura 3.4 – Função de densidade espectral do vento normalizada [2]

A densidade espectral da acção do vento normalizada é descrita pela equação (3.19), em que $S_L(z,n)$ representa a função de densidade espectral da velocidade do vento.

$$S_L(Ze, \eta 1, x) = \frac{6.8 \times fL(Ze, \eta 1, x)}{(1 + 10.2 \times fL(Ze, \eta 1, x))^{\frac{5}{3}}} \quad (3.19)$$

A equação (3.20), é função da frequência adimensional $fL(z,n)$ que por sua vez se relaciona com a escala de comprimentos da turbulência;

$$f_L(Ze, \eta 1, x) = \frac{\eta 1, x \times L(Ze)}{vm(Ze)} \quad (3.20)$$

Destas expressões importa contabilizar o valor espectral da resposta do primeiro modo para a altura de referência Ze . Posto isto, o factor de ressonância é definido pela equação (3.21):

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \times \delta} \times S_L(Ze, \eta 1, x) \times Rh(\eta h) \times Rb(\eta b) \quad (3.21)$$

Onde:

- δ - Representa o decremento logarítmico do amortecimento global da estrutura;
- Rh e Rb - Funções de admitância aerodinâmica, vertical e horizontal respectivamente.

As funções de admitância aerodinâmica para o modo de vibração fundamental são calculadas pelas equações (3.22 e 3.23),

$$R(\eta h) = \frac{1}{\eta h} - \frac{1}{\eta h^2} \times (1 - e^{-2\eta h}) \quad \text{com} \quad \eta h = \frac{4,6h}{L(Ze)} \times fL(Ze, n1, x) \quad (3.22)$$

$$R(\eta b) = \frac{1}{\eta b} - \frac{1}{\eta b^2} \times (1 - e^{-2\eta b}) \quad \text{com} \quad \eta b = \frac{4,6h}{L(Ze)} \times fL(Ze, n1, x) \quad (3.23)$$

Para valores de ηh e ηb nulos, as funções de admitância aerodinâmica tomam o valor unitário.

O factor de pico, k_p , toma o maior dos valores: definido pela equação (3.24), ou $k_p=3$.

$$k_p = \max \left(\sqrt{2 \times \ln(vT)} + \frac{0.6}{\sqrt{2 \times \ln(vT)}} \right) \quad (3.24)$$

onde T é o tempo em segundos da média da velocidade básica considerada no cálculo de $v_m(Z_e)$, ou seja no caso das velocidades definidas pela Norma Europeia $T=600$ (10min) e v a frequência cruzada da interação dos fenómenos de fundo e ressoantes, contabilizando apenas a frequência do modo de vibração fundamental, equação (3.25),

$$v = \eta_{1,x} \sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}} c \quad \text{com} \quad v \geq 0.08 \text{ Hz} \quad (3.25)$$

A grandeza η_1 representa a frequência natural da estrutura.

A frequência natural da estrutura, reveste-se de extrema importância, uma vez que tem influência ao nível de vários cálculos intermédios efectuados. Um valor desajustado poderá conduzir a resultados incoerentes. No Anexo F do EC1 é proposta uma expressão, semi-empírica, para o cálculo desta frequência fundamental de flexão, para edifícios com vários pisos, de altura superior a 50 metros, dada pela equação (3.26),

$$n_1 = \frac{46}{h} \quad (3.26)$$

O número de *Reynolds*, é um parâmetro adimensional importante e calculado pela equação (3.27),

$$Re = \frac{\rho \times v \times D}{\mu} \quad (3.27)$$

Onde v representa a velocidade do escoamento, D representa a dimensão característica (área da face do edifício), ρ representa a massa volúmica do ar e μ a viscosidade dinâmica do ar, ($\mu = 1,8 \times 10^{-5}$ Pa.s).

Capítulo 4

CASOS DE ESTUDO

4.1. METODOLOGIA

A metodologia seguida no trabalho, adopta o procedimento indicado em [2], para edifícios altos cuja altura é superior a duas vezes a dimensão da largura, mas inferior a 200m.

A força resultante da acção do vento no Edifício será calculada só na zona central (Figura 4.1), uma vez que as outras duas zonas estão bem definidas.

Como ponto de partida para a referência de cálculos, foi definido como número mínimo uma (1) banda horizontal (zona central no seu todo) e como número máximo a subdivisão desta zona em vinte e sete (27) bandas.

Os resultados são apresentados graficamente em termos da variação percentual, P_{CCP} , da força total aplicada, F_w , em função do número de bandas centrais, e tomando como referência o caso de uma única zona central, de acordo com o Diagrama de Cálculo apresentado em Anexo.

$$P_{CCP} = \frac{F_{w1} - F_{wn}}{F_{w1}} \times 100 \quad (4.1)$$

O valor de F_{w1} corresponde à força exercida pela acção do vento para uma faixa (zona central total) e F_{wn} é a força exercida pela acção do vento na zona central, dada pelo somatório das n forças parciais relativas a cada banda.

4.2. EDIFÍCIO CAARC

Para o primeiro caso de estudo recorreu-se ao Edifício *CAARC* (*Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council*). Este edifício é uma estrutura teórica (1970) que serviu de padrão para a uniformização de ensaios em túneis de vento [7].

As características deste edifício resumem-se na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Características básicas do Edifício *CAARC*

Características do Edifício CAARC	
Altura do Edifício (h)	182,7 m
Comprimento do Edifício (b)	45,9 m
Largura do Edifício (l)	30,6 m
Massa Equivalente (m)	225238 kg/m
Velocidade fundamental do vento (v)	30 m/s
Massa volúmica do ar (μ)	1,225 kg/m ³
Nº de Pisos (n)	61
Altura da Zona Central ($l_{central}$)	90,9 m
Área da zona Central ($A_{central}$)	4172 m ²
Frequência de vibração Fundamental ($n1$)	0,25 Hz
Decremento Logarítmico Total de Amortecimento (δ)	0,0509

A Tabela 4.2 resume os valores de C_p da zona central [5], correspondentes a cada uma das 9 áreas em que foi fraccionada. Os valores apresentados são resultantes da diferença entre o valor do C_p a montante da fachada (C_{pM}), e o valor do C_p a jusante da mesma (C_{pJ}). A equação 4.2, representa o modo de cálculo do C_{pT} .

$$C_{pT} = C_{pM} - C_{pJ} \quad (4.2)$$

Tabela 4.2 - Valores de C_{pT} do Edifício *CAARC*

$H_{central}$ superior esquerdo- 1,4	$H_{central}$ superior- 1,75	$H_{central}$ superior direito- 1,4
$H_{central}$ centro esquerdo- 1,4	$H_{central}$ centro- 1,75	$H_{central}$ centro direito- 1,4
$H_{central}$ inferior esquerdo- 1,4	$H_{central}$ inferior- 1,75	$H_{central}$ inferior direito- 1,4

Por se tratar de um prisma rectangular valores de C_p identificados na Tabela 4.2, irão ser utilizados em todos os cálculos para o Edifício *CAARC*.

Os valores de C_p utilizados neste trabalho, para as incidências do vento a zero (0) graus, foram obtidos por extrapolação e interpolação, aos dos testes realizados a um cubo quando exposto a um fluxo de linhas de corrente num túnel vento [5], representado na Figura 4.1.

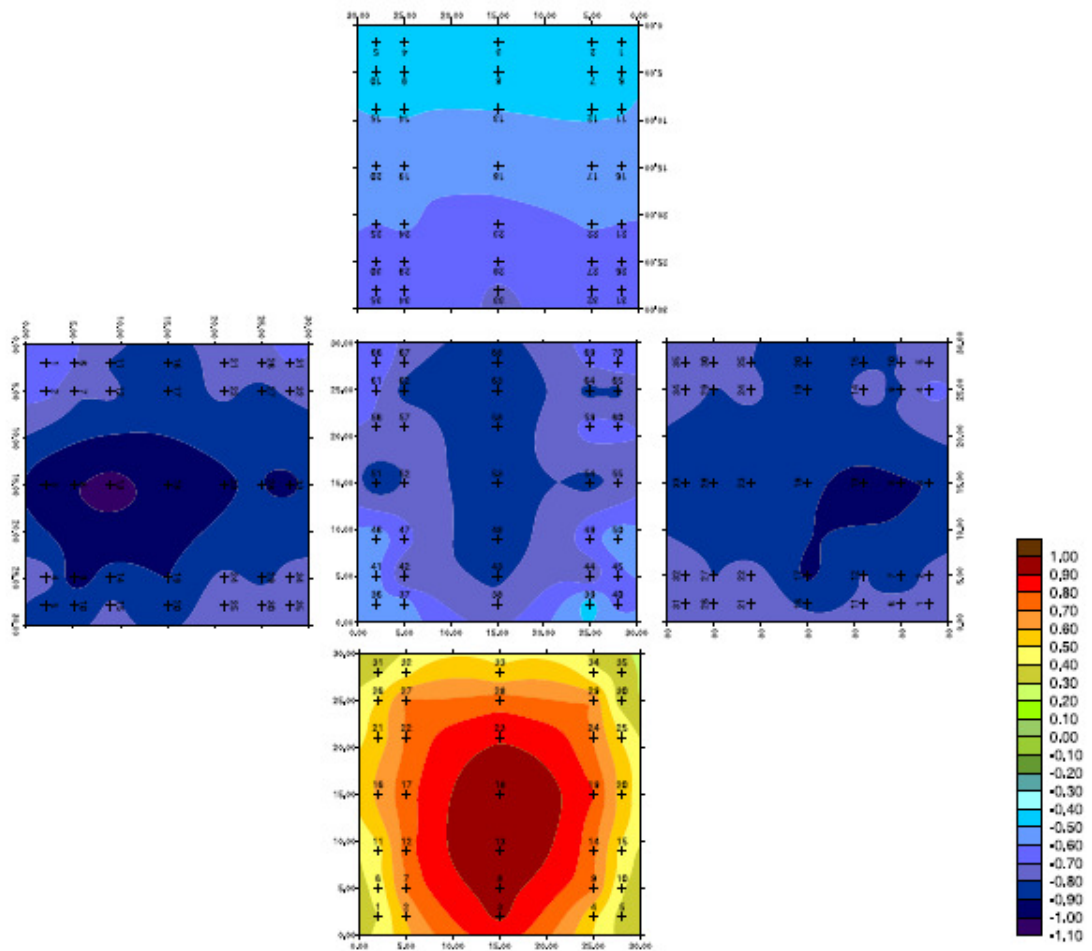


Figura 4.1 – Distribuição do coeficiente de pressão nas faces de um cubo [5]

A Tabela 4.3, lista os valores da altura de cada faixa horizontal, a força total aplicada na zona central pela acção do vento, em função do somatório dos valores parciais de cada banda.

Tabela 4.3 – Valores do Edifício *CAARC* que respeitam a cálculo

Bandas	Altura Banda (m)	Força do Vento $H_{central}$ (kN)
1	90,9	18864,3
2	45,5	18146,7
3	30,3	17875,0
4	22,7	17732,1
5	18,8	17644,0
6	15,5	17584,3
9	10,1	17482,9
12	7,6	17431,3
15	6,06	17400,1
18	5,05	17379,1
21	4,33	17364,1
24	3,80	17352,8
27	3,36	17344,0

Representa-se na Figura 4.2 a evolução das variações percentuais da carga exercida pelo vento, eq. (4.1), em função do número de bandas considerado. Recorrendo aos valores da tabela 4.3 e com a aplicação da equação (4.1), o primeiro ponto da curva é de 3,8%.

$$P_{CCP} = \frac{18864,3 - 18146,7}{18864,3} \times 100 = 3,8\%$$

A evolução é do tipo assintótico, reduzindo-se a variação da carga com o aumento do número de bandas. Para uma variação total ($F_{w1} - F_{w27}$) de 8%, obtém-se um valor de 6% com apenas quatro bandas, isto é 75% da variação total.

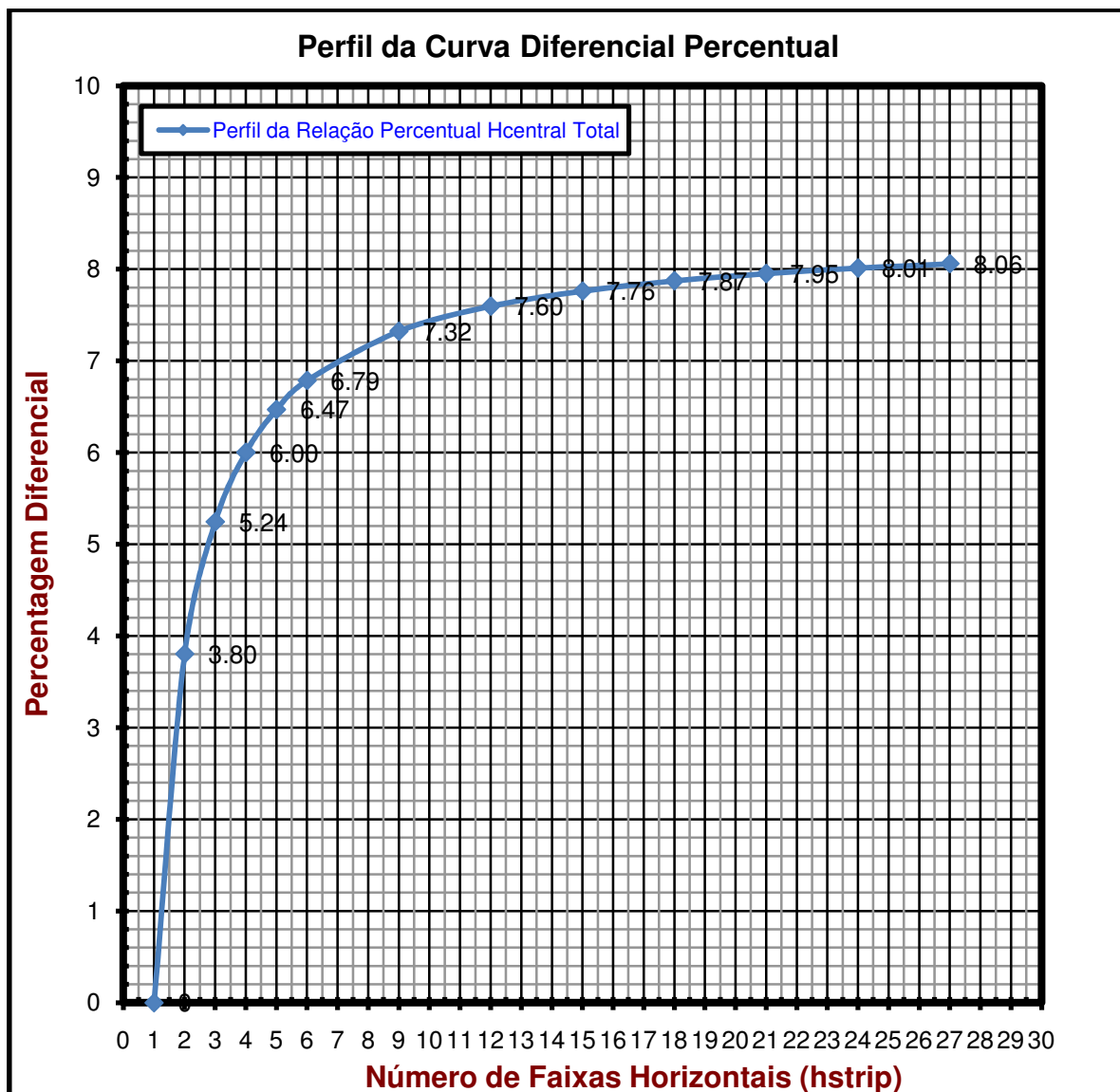


Figura 4.2 - Variações percentuais da carga exercida pelo vento na zona central

EDIFÍCIO CAARC - INFLUÊNCIA DA DIMENSÃO DA ZONA CENTRAL

A altura da zona central é um parâmetro importante na avaliação da carga exercida pelo vento. Importa, pois, avaliar a influência da subdivisão desta zona em bandas, para diferentes alturas totais. Assim, simulou-se uma redução progressiva da altura da zona central com um passo de 1/6 da altura inicial. Manteve-se os valores do comprimento, largura, massa equivalente, velocidade do vento e massa volúmica do ar.

As tabelas seguintes resumem as correspondentes características do edifício, bem como as cargas aplicadas. Na figura 4.3 representam-se as evoluções das variações percentuais para todos os casos considerados com recurso ao edifício do CAARC.

Tabela 4.4 – Características do Edifício *CAARC*, para 5/6 H_{central}

Características do Edifício <i>CAARC</i>	
Altura do Edifício (h)	167,55 m
Nº de Pisos (n)	56
Altura da zona Central (l_{central})	75,8 m
Área da zona Central (A_{central})	3476,9 m ²
Frequência de vibração Fundamental (n_1)	0,275 Hz
Decremento Logarítmico Total de Amortecimento (δ)	0,0509

Tabela 4.5 – Edifício *CAARC*, valores que respeitam ao cálculo, para 5/6 na H_{central}

Bandas	Altura Banda (m)	Força do Vento H_{central} (kN)
1	75,8	15694,0
2	37,9	15135,1
3	25,3	14926,1
4	18,9	14816,8
5	15,2	14749,7
6	12,6	14704,2
9	8,4	14627,3
12	6,3	14588,2
15	5,1	14564,6
18	4,2	14548,8
21	3,6	14537,5
24	3,2	14528,9
27	2,8	14522,3

Tabela 4.6 – Características do Edifício CAARC, para 4/6 H_{central}

Características do Edifício CAARC	
Altura do Edifício (h)	152,4 m
Nº de Pisos (n)	51
Altura da zona Central (l_{central})	60,6 m
Área da zona Central (A_{central})	2781,5 m ²
Frequência de vibração Fundamental (n_1)	0,301 Hz
Decremento Logarítmico Total de Amortecimento (δ)	0,0508

Tabela 4.7 – Edifício CAARC, valores que respeitam ao cálculo, para 4/6 H_{central}

Bandas	Altura Banda (m)	Força do Vento H_{central} (kN)
1	60,6	12523,4
2	30,3	12116,4
3	20,2	11966,6
4	15,2	11888,7
5	12,1	11841,1
6	10,1	11808,1
9	6,7	11754,5
12	5,1	11727,2
15	4,1	11710,3
18	3,4	11699,2
21	2,9	11691,2
24	2,5	11685,2
27	2,2	11680,6

Tabela 4.8 – Características do Edifício CAARC, para $3/6 H_{\text{central}}$

Características do Edifício CAARC	
Altura do Edifício (h)	137,25 m
Nº de Pisos (n)	46
Altura da zona Central (l_{central})	45,5 m
Área da zona Central (A_{central})	2086,2 m ²
Frequência de vibração Fundamental (n_1)	0,335 Hz
Decremento Logarítmico Total de Amortecimento (δ)	0,0508

Tabela 4.9 – Valores do Edifício CAARC que respeitam ao cálculo para $3/6 H_{\text{central}}$

Bandas	Altura Banda (m)	Força do Vento H_{central} (kN)
1	45,5	9355,1
2	22,7	9090,0
3	15,2	8994,2
4	11,4	8944,7
5	9,1	8914,6
6	7,6	8894,2
9	5,1	8860,1
12	3,8	8842,8
15	3,0	8832,4
18	2,5	8825,4
21	2,2	8820,4
24	1,9	8816,6
27	1,7	8813,7

Tabela 4.10 – Características do Edifício *CAARC*, para $2/6 H_{\text{central}}$

Características do Edifício <i>CAARC</i>	
Altura do Edifício (h)	122,1 m
Nº de Pisos (n)	41
Altura da zona Central (l_{central})	30,3 m
Área da zona Central (A_{central})	1390,8 m ²
Frequência de vibração Fundamental (n_1)	0,377 Hz
Decremento Logarítmico Total de Amortecimento (δ)	0,0508

Tabela 4.11 – Valores do Edifício *CAARC* que respeitam ao cálculo para $2/6 H_{\text{central}}$

Bandas	Altura Banda (m)	Força do Vento H_{central} (kN)
1	30,3	6192,3
2	15,5	6056,6
3	10,1	6007,2
4	7,6	5981,9
5	6,1	5966,5
6	5,1	5956,2
9	3,4	5939,0
12	2,5	5930,2
15	2,0	5925,0
18	1,7	5921,5
21	1,4	5919
24	1,3	5917,1
27	1,2	5915,6

Tabela 4.12 – Características do Edifício *CAARC*, para $1/6 H_{\text{central}}$

Características do Edifício <i>CAARC</i>	
Altura do Edifício (h)	106,95 m
Nº de Pisos (n)	36
Altura da zona Central (l_{central})	15,2 m
Área da zona Central (A_{central})	695,4 m ²
Frequência de vibração Fundamental (n_1)	0,430 Hz
Decremento Logarítmico Total de Amortecimento (δ)	0,0508

Tabela 4.13 – Valores do Edifício *CAARC* que respeitam ao cálculo para $1/6 H_{\text{central}}$

Bandas	Altura Banda (m)	Força do Vento H_{central} (kN)
1	15,2	3063,8
2	7,6	3021,0
3	5,1	3006,3
4	3,8	2998,9
5	3,0	2994,4
6	2,5	2991,3
9	1,7	2986,3
12	1,3	2983,8
15	1,0	2982,3
18	0,84	2981,3
21	0,72	2980,5
24	0,63	2980,0
27	0,56	2979,6

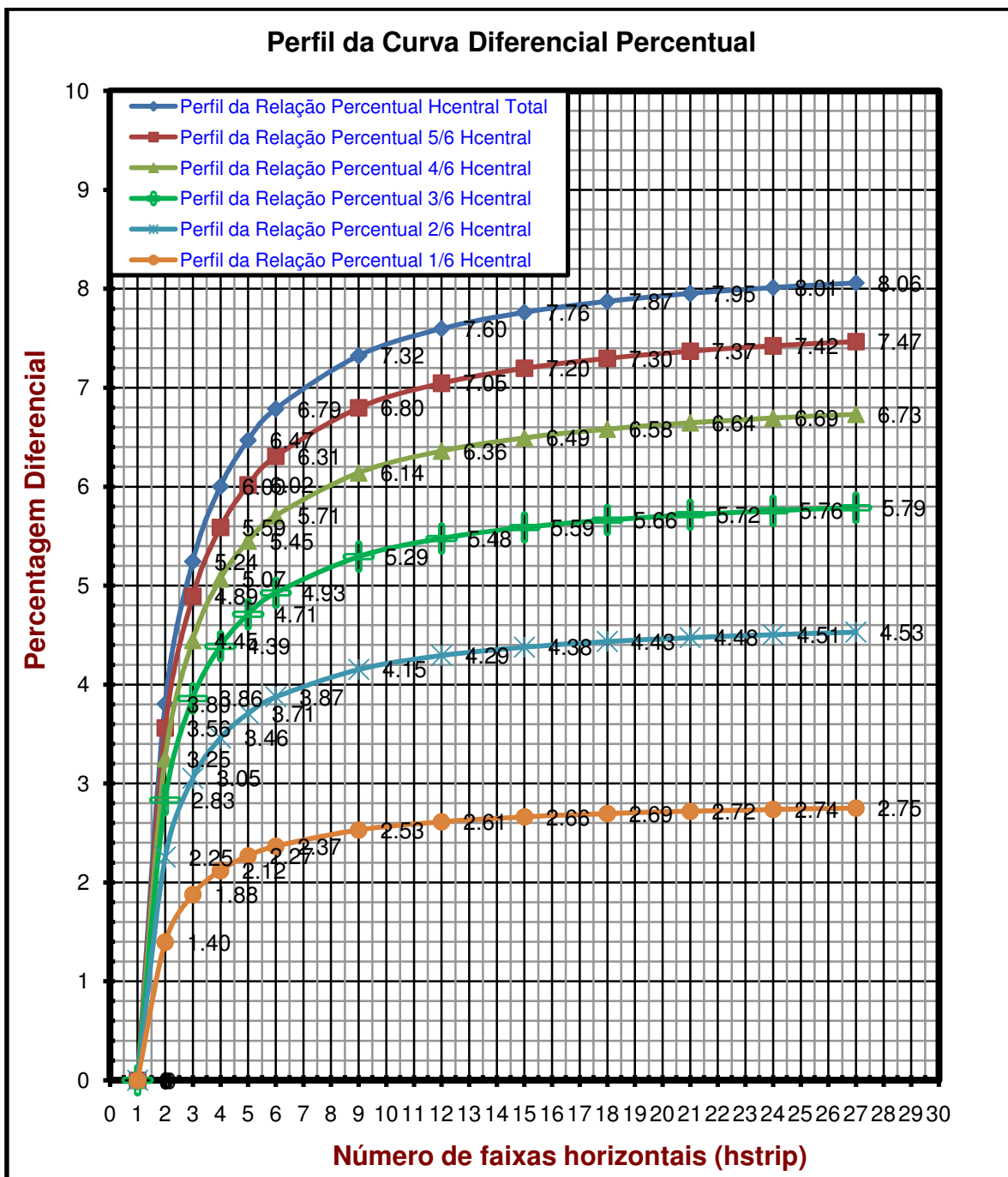


Figura 4.3 – Variações percentuais da carga exercida pelo vento na zona central, para os diferentes valores de H_{central}

As curvas da figura 4.3 apresentam evoluções semelhantes e todas as configurações testadas atingem 75% da variação máxima para quatro bandas. No entanto, à medida que a altura da zona central se reduz, a variação máxima também evolui no mesmo sentido, atingindo-se um máximo de ~3% para 3/6 do valor inicial de H_{central} .

Pela representação dos valores obtidos nas curvas de segregação da zona central em altura, verificamos que ao reduzir a altura da zona central da dimensão de b até zero, a variação percentual compreende um domínio de 6% até 0%.

4.3. EDIFÍCIO REN

Para a terceira fase do estudo serviu o Edifício da REN (Figura 4.4). A altura do Edifício da REN não é superior a duas vezes a largura. Contudo, por se encontrar próximo dessa condição, foi acordado simular a redução do comprimento e da largura do Edifício de forma a se enquadrar no modelo: Altura superior a duas vezes a largura.

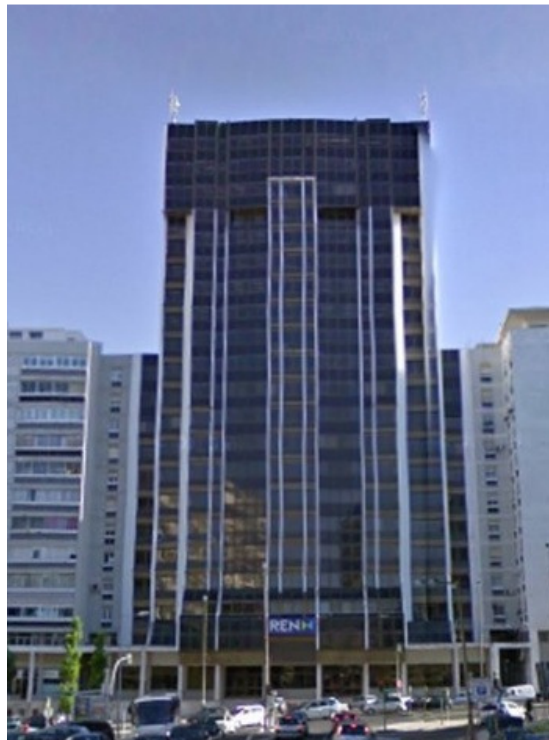


Figura 4.4 – Imagem do Edifício REN (Lisboa)

As características básicas do Edifício REN estão identificadas na Tabela 4.14. A Tabela 4.16, possui os valores da altura de cada banda horizontal e a força total projectada na zona central do edifício, pela acção do vento.

Tabela 4.14 – Características básicas do Edifício REN

Características do Edifício REN		
Altura do Edifício (h)	65	m
Comprimento do Edifício (b)	31	m
Largura do Edifício (l)	17	m
Massa Equivalente (m)	278345	kg/m
Velocidade fundamental do vento (v)	30	m/s
Massa volúmica do ar (μ)	1,225	kg/m ³
Nº de Pisos (n)	23	
Altura da Zona Central ($l_{central}$)	3	m
Área da zona Central ($A_{central}$)	93	m ²
Frequência de vibração Fundamental (n_1)	0,708	Hz
Decremento Logarítmico Total de Amortecimento (δ)	0,1002	

A Tabela 4.15 resume os valores C_p da zona central [5], correspondentes a cada uma das 3 áreas em que foi fraccionada. Os valores apresentados são já os resultantes da diferença entre os de montante, C_{pM} , e jusante, C_{pJ} , equação 4.2, para uma incidência normal à fachada.

Tabela 4.15 - Valores de C_{pT} do Edifício REN, zona central ($H_{central}$)

$H_{central}$ esquerdo-	1,4	$H_{central}$ centro-	1,6	$H_{central}$ direito-	1,4
-------------------------	-----	-----------------------	-----	------------------------	-----

Tabela 4.16 – Edifício REN, valores que respeitam ao cálculo

Bandas	Altura Banda (m)	Força do Vento $H_{central}$ (kN)
1	3	226,8
2	1,5	225,5
3	1,0	225,0
4	0,75	224,8
5	0,6	224,7
6	0,5	224,6
9	0,33	224,4
12	0,25	224,3
15	0,2	224,3
18	0,16	224,3
21	0,14	224,2
24	0,13	224,2
27	0,11	224,2

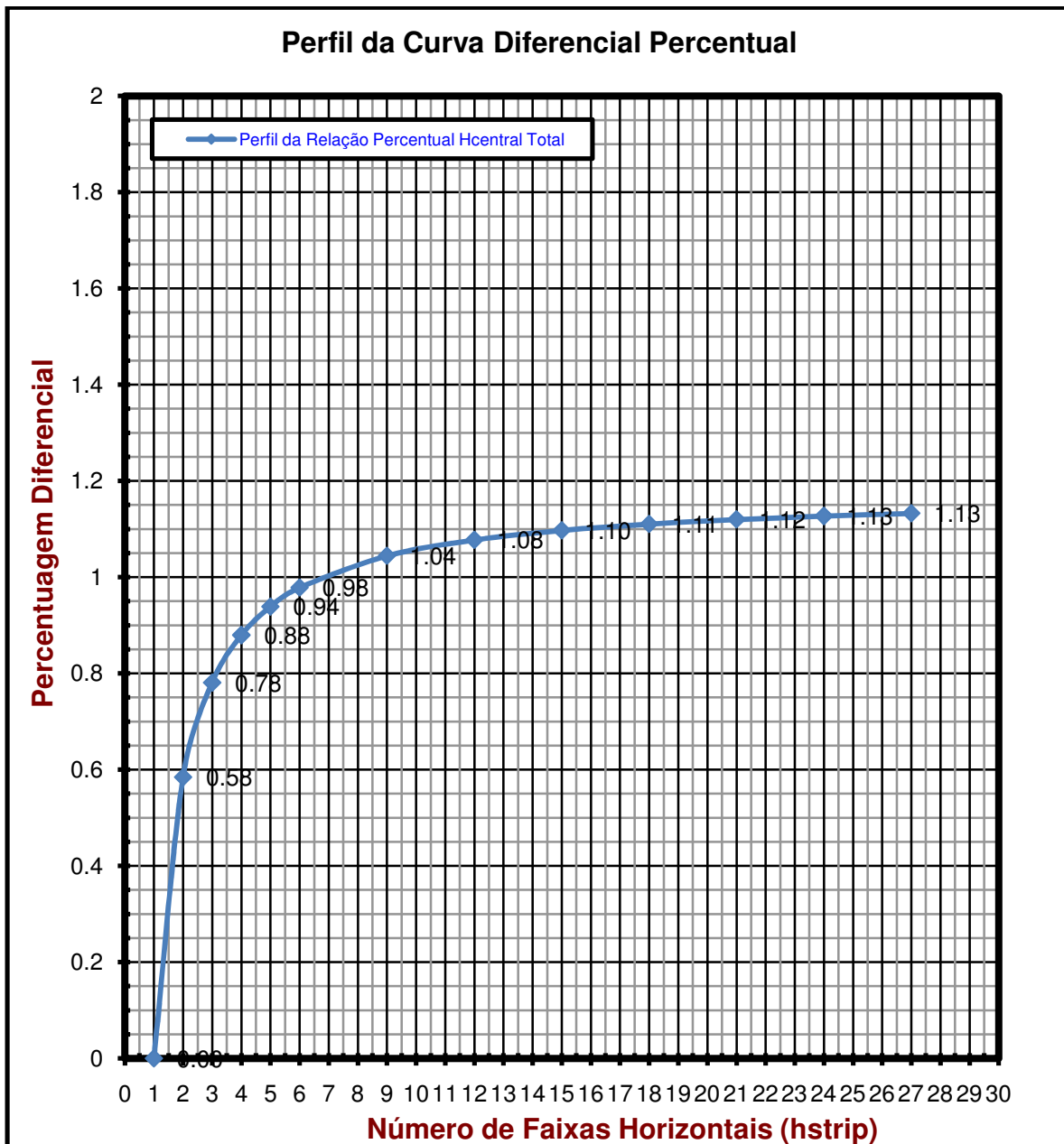


Figura 4.5 - Variações percentuais da carga exercida pelo vento na zona central do Edifício da REN

No Edifício REN, a altura da zona central possui três metros. A subdivisão em vinte e sete (27) bandas deve-se apenas a razões de coerência com o edifício *CAARC*, uma vez que não faz sentido para o cálculo.

Pela leitura da figura 4.5, a curva apresenta uma evolução semelhante, às das configurações testadas no Edifício *CAARC* e aqui também atingem 75% da variação máxima para quatro bandas.

4.4. TORRE MONSANTO

Também para estudo se usou o Edifício Torre de Monsanto (Miraflores), representado na Figura 4.6. A planta do edifício inscreve-se numa parábola cujo vértice é orientado a Norte. O Edifício tem 100 m de altura.

A altura do Edifício da Torre de Monsanto não é superior a duas vezes a largura. Contudo, por se encontrar próximo dessa condição, foi acordado simular a redução do comprimento e da largura do Edifício.

Pelas características geométricas do Edifício, procede-se um estudo para três incidências do vento: 0° ; 90° e 180° , para as quais o valor da largura (b) vai variar, o que implica a área de incidência do vento na zona central a variar também. Também os coeficientes de pressão (C_p) dependem, naturalmente, da incidência.

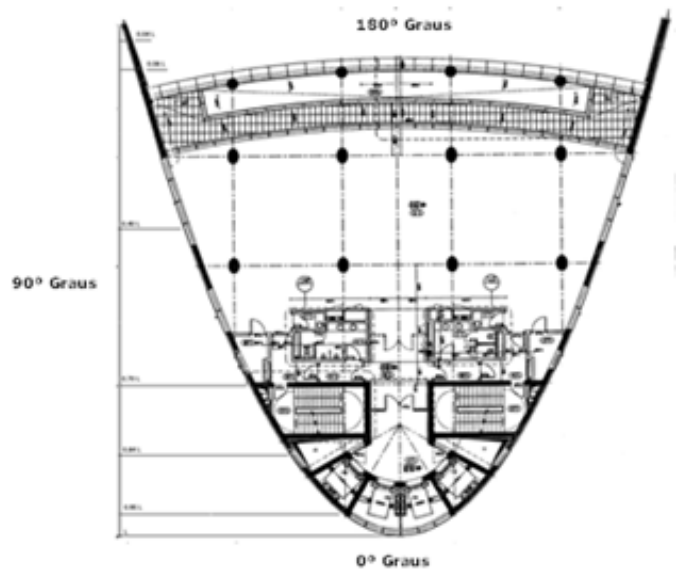


Figura 4.6 – Imagem do Edifício Torre de Monsanto (Lisboa)

As características básicas do Edifício Torre de Monsanto para 0° - incidência segundo o vértice da parábola - estão resumidas na tabela 4.17, apresentando-se na tabela 4.19, os valores da altura de cada banda horizontal e a força total na zona central. Os valores

apresentados são já os resultantes da diferença entre os de montante, C_{pM} , e jusante, C_{pJ} , equação 4.2, para uma incidência normal à fachada.

Tabela 4.17 – Características básicas do Edifício Torre de Monsanto para 0°

Características do Edifício Torre Monsanto	
Altura do Edifício (h)	100 m
Comprimento do Edifício (b)	40 m
Largura do Edifício (l)	40,5 m
Massa Equivalente (m)	531258 kg/m
Velocidade fundamental do vento (v)	30 m/s
Massa volúmica do ar (μ)	1,225 kg/m ³
Nº de Pisos (n)	33
Altura da Zona Central ($l_{central}$)	20 m
Área da zona Central ($A_{central}$)	800 m ²
Ângulo de incidência ao vento (α)	0°
Frequência de vibração Fundamental (n_1)	0,46 Hz
Decremento Logarítmico Total de Amortecimento (δ)	0,1000

A Tabela 4.18 resume os valores C_p da zona central [5], correspondentes a cada uma das 3 áreas em que foi fraccionada. Os valores apresentados são resultantes da diferença entre o valor do C_p a montante da fachada (C_{pM}), e o valor do C_p a jusante da mesma (C_{pJ}). A equação 4.2, representa o modo de cálculo do C_{pT} .

Os valores de C_p utilizados para as incidências do vento diferentes de zero (0) graus, foram obtidos por extrapolação e interpolação, ao dos valores C_p encontrados em testes realizados numa superfície em L, quando exposto a um fluxo de linhas de corrente num túnel vento [5], representado na Figura 4.7.

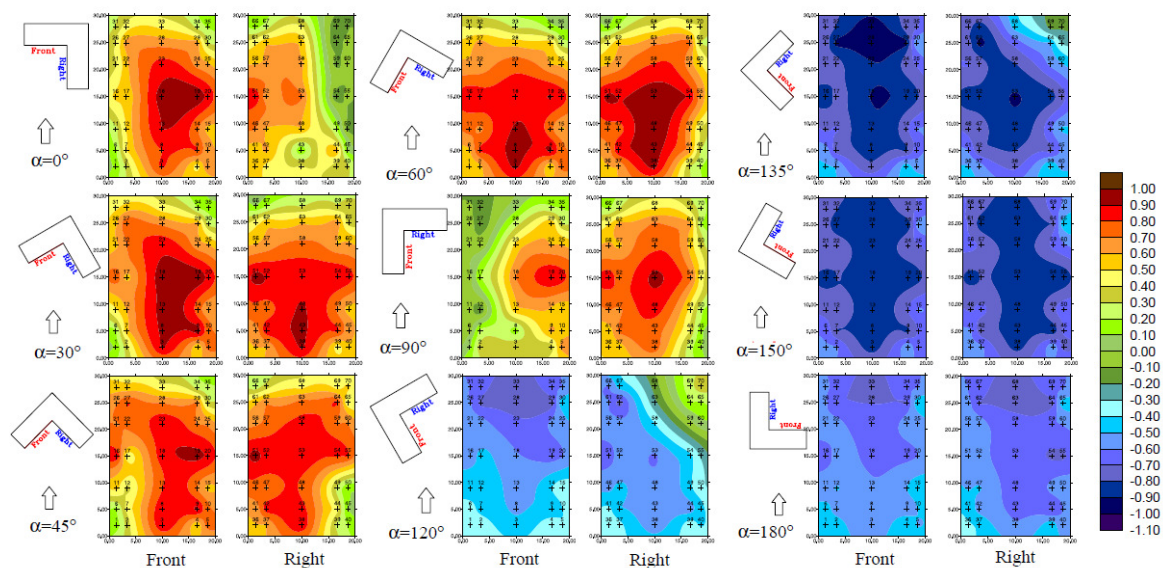


Figura 4.7 – Distribuição do coeficiente de pressão nas faces de uma superfície em L [5]

Tabela 4.18 - Valores de C_{pT} do Edifício Torre de Monsanto para 0° , zona central (H_{central})

H_{central} esquerdo-	0,25	H_{central} centro-	0,65	H_{central} direito-	0,25
--------------------------------	------	------------------------------	------	-------------------------------	------

Tabela 4.19 – Edifício Torre de Monsanto para 0°

Banda	Altura Banda (m)	Força do Vento H_{central} (kN)
1	20,0	533,3
2	10,0	521,2
3	6,7	517,1
4	5,0	514,9
5	4,0	513,7
6	3,3	512,8
9	2,2	511,3
12	1,7	510,6
15	1,3	519,2
18	1,1	509,9
21	0,96	509,7
24	0,81	509,5
27	0,71	509,4

As características básicas do Edifício Torre de Monsanto para 90°, estão resumidas na tabela 4.20. A tabela 4.22, apresenta os valores da altura de cada banda horizontal e a força total na zona central pela acção do vento.

Tabela 4.20 – Características básicas do Edifício Torre de Monsanto para 90°

Características do Edifício Torre Monsanto	
Altura do Edifício (h)	100 m
Comprimento do Edifício (b)	40,5 m
Largura do Edifício (l)	43 m
Massa Equivalente (m)	531258 kg/m
Velocidade fundamental do vento (v)	30 m/s
Massa volúmica do ar (μ)	1,225 kg/m ³
Nº de Pisos (n)	33
Altura da Zona Central ($l_{central}$)	19 m
Área da zona Central ($A_{central}$)	769,5 m ²
Ângulo de incidência ao vento (α)	90°
Frequência de vibração Fundamental (n_1)	0,46 Hz
Decremento Logarítmico Total de Amortecimento (δ)	0,1000

A Tabela 4.21 resume os valores C_p da zona central [5], correspondentes a cada uma das 3 áreas em que foi fraccionada. Os valores apresentados são já os resultantes da diferença entre os de montante, C_{pM} , e jusante, C_{pJ} , equação 4.2, para uma incidência normal à fachada.

Tabela 4.21 - Valores de C_{pT} do Edifício Torre de Monsanto para 90°, zona central ($H_{central}$)

$H_{central}$ esquerdo- 1,35	$H_{central}$ centro- 0,85	$H_{central}$ direito- 0,50
------------------------------	----------------------------	-----------------------------

Tabela 4.22 – Edifício Torre de Monsanto para 90°

Bandas	Altura Banda (m)	Força do Vento $H_{central}$ (kN)
1	19,0	1201,1
2	9,5	1175,2
3	6,3	1166,2
4	4,8	1161,6
5	3,8	1158,9
6	3,2	1157,0
9	2,2	1153,9
12	1,6	1152,4
15	1,3	1151,4
18	1,06	1150,8
21	0,90	1150,4
24	0,79	1150,0
27	0,70	1149,8

As características básicas do Edifício Torre de Monsanto para 180°, estão resumidas na tabela 4.23. A tabela 4.25, apresenta os valores da altura de cada faixa horizontal e da força total na zona central pela acção do vento.

Tabela 4.23 – Características básicas do Edifício Torre de Monsanto para 180°

Características do Edifício Torre Monsanto	
Altura do Edifício (h)	100
Comprimento do Edifício (b)	43 m
Largura do Edifício (l)	40,5 m
Massa Equivalente (m)	531258 kg/m
Velocidade fundamental do vento (v)	30 m/s
Massa volúmica do ar (μ)	1.225 kg/m ³
Nº de Pisos (n)	33
Altura da Zona Central ($l_{central}$)	14 m
Área da zona Central ($A_{central}$)	602 m ²
Ângulo de incidência ao vento (α)	180°
Frequência de vibração Fundamental (n_1)	0,46 Hz
Decremento Logarítmico Total de Amortecimento (δ)	0,1000

A Tabela 4.24 resume os valores C_p da zona central [5], correspondentes a cada uma das 3 áreas em que foi fraccionada. Os valores são já os resultantes da diferença entre os de montante, C_{pM} , e jusante, C_{pJ} , equação 4.2, para uma incidência normal à fachada.

Tabela 4.24 - Valores de C_{pT} do Edifício Torre de Monsanto, para 180°, zona central ($H_{central}$)

$H_{central}$ esquerdo- 1,40	$H_{central}$ centro- 1,35	$H_{central}$ direito- 1,40
------------------------------	----------------------------	-----------------------------

Tabela 4.25 – Edifício Torre de Monsanto para 180°

Bandas	Altura Banda (m)	Força do Vento $H_{central}$ (kN)
1	14,0	1424,4
2	7,0	1401,4
3	4,7	1393,4
4	3,5	1389,3
5	2,8	1386,9
6	2,3	1385,2
9	1,6	1382,5
12	1,17	1381,1
15	0,93	1380,3
18	0,78	1379,7
21	0,67	1379,3
24	0,58	1379,0
27	0,52	1378,8

Para um melhor enquadramento na análise comparativa, representa-se na Figura 4.8, com as três curvas correspondentes às diferentes disposições do edifício face ao vento.

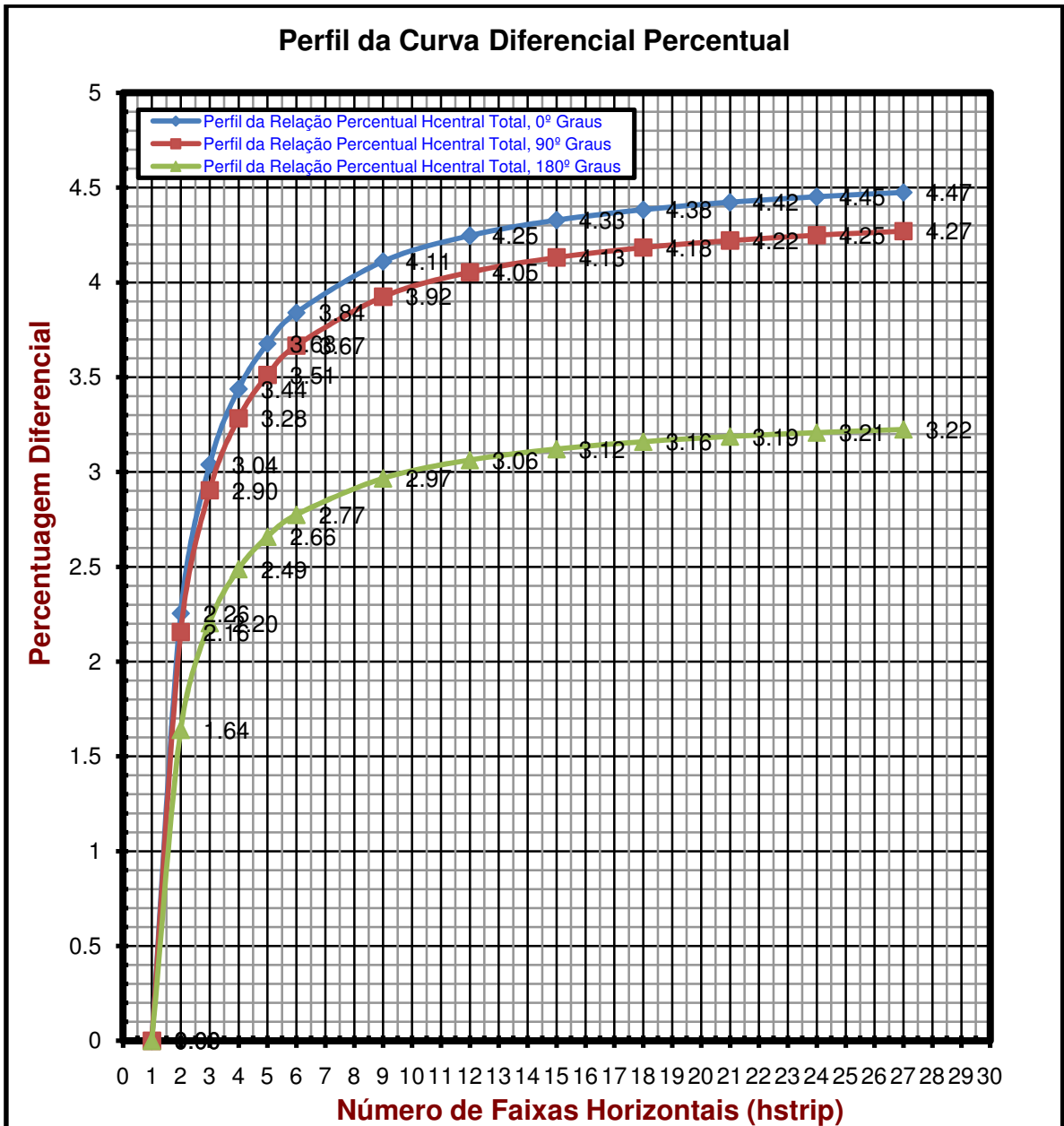


Figura 4.8 - Variações percentuais da carga exercida pelo vento na zona central do Edifício de Monsanto 0°; 90° 180°

As curvas da Figura 4.8 apresentam um perfil semelhante para os três ângulos de incidência ao vento e atinge-se 75% da variação máxima com quatro bandas.

A variação percentual inerente a cada curva, varia em função da área da zona central e é independente dos valores de C_p .

4.5. EDIFÍCIO SOLMAR

Para a quinta fase do estudo serviu o Edifício Solmar (Figura 4.9). O Edifício Solmar foi projectado no início da década de 70. A sua estrutura desenvolve-se em altura e possui 22 pisos acima do plano de referência e 2 no subsolo, somando aproximadamente 75m de altura, Figura 4.16.

O edifício, de corpo único, dispõe-se em três torres independentes e compartimentadas entre si por paredes de betão armado, cada uma das quais servida por elevadores e uma escada.

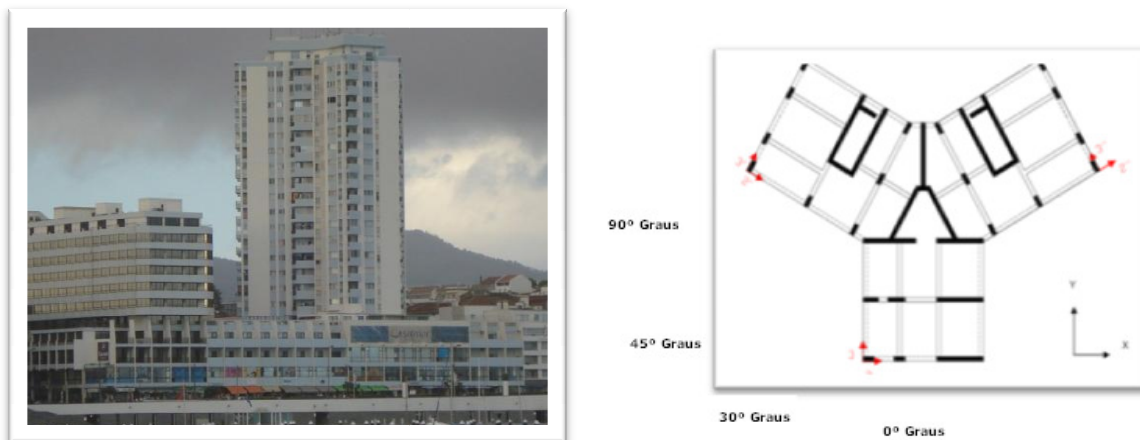


Figura 4.9 – Imagem do Edifício Solmar

A altura do Edifício da Solmar não é superior a duas vezes a largura. Contudo, por se encontrar próximo dessa condição, foi acordado simular a redução do comprimento e da largura do Edifício.

Pelas características geométricas do Edifício, procede-se um estudo para três incidências do vento: 0°; 30°; 45° e 90°. Vamos estar na presença de diferentes áreas de incidência como também diferentes dos coeficientes de pressão (C_p).

As características básicas do Edifício Solmar para as várias incidências estão resumidas nas tabelas 4.26, 4.29, 4.32 e 4.35. As tabelas 4.28, 4.30, 4.33 e 4.36 resumem os valores das alturas de cada banda horizontal e as respectivas forças totais na zona central.

Tabela 4.26 – Características básicas do Edifício Solmar para 0°

Características do Edifício Solmar	
Altura do Edifício (h)	75 m
Comprimento do Edifício (b)	28 m
Largura do Edifício (l)	233 m
Massa Equivalente (m)	181966 kg/m
Velocidade fundamental do vento (v)	30 m/s
Massa volúmica do ar (μ)	1,225 kg/m ³
Nº de Pisos (n)	24
Altura da Zona Central (l_{central})	19 m
Área da zona Central (A_{central})	551 m ²
Ângulo de incidência ao vento (α)	0°
Frequência de vibração Fundamental (n_1)	0,613 Hz
Decremento Logarítmico Total de Amortecimento (δ)	0,1000

A Tabela 4.27 resume os valores C_p da zona central [5], correspondentes a cada uma das 9 áreas em que foi fraccionada.

Os valores apresentados são resultantes da diferença entre o valor do C_p a montante da fachada (C_{pM}), e o valor do C_p a jusante da mesma (C_{pJ}). A equação 4.2, representa o modo de cálculo do C_{pT} .

Tabela 4.27 - Valores de C_{pT} do Edifício Solmar para 0°, zona central (H_{central})

Face 1	H_{central} esq.- 1,35	H_{central} centro- 1,65	H_{central} dir.- 1,35
Face 2	H_{central} esq.- 1,15	H_{central} centro- 0,95	H_{central} dir.- 0,85
Face 3	H_{central} esq.- 0,85	H_{central} centro- 0,95	H_{central} dir.- 1,15

Tabela 4.28 – Edifício Solmar para 0°

Bandas	Altura Banda (m)	Força do Vento $H_{central}$ (kN)
1	19,0	1072,4
2	9,5	1042,1
3	6,3	1031,4
4	4,8	1026,0
5	3,8	1022,7
6	3,17	1020,5
9	2,1	1016,7
12	1,6	1014,9
15	1,3	1013,7
18	1,1	1013,0
21	0,90	1012,5
24	0,79	1012,0
27	0,70	1011,7

As características básicas do Edifício Solmar para 30°, estão identificadas na tabela 4.29. A tabela 4.31, possui os valores da altura de cada faixa horizontal, a força total projectada na zona central pela acção do vento e o Decremento Logarítmico Total de Amortecimento (δ).

Tabela 4.29 – Características básicas do Edifício Solmar para 30°

Características do Edifício Solmar	
Altura do Edifício (h)	75 m
Comprimento do Edifício (b)	23 m
Largura do Edifício (l)	29 m
Massa Equivalente (m)	181966 kg/m
Velocidade fundamental do vento (v)	30 m/s
Massa volúmica do ar (μ)	1,225 kg/m ³
Nº de Pisos (n)	24
Altura da Zona Central ($l_{central}$)	29 m
Área da zona Central ($A_{central}$)	716,3 m ²
Ângulo de incidência ao vento (α)	30°
Frequência de vibração Fundamental (n_1)	0,613 Hz
Decremento Logarítmico Total de Amortecimento (δ)	0,1000

A Tabela 4.30 resume os valores C_p da zona central [5], correspondentes a cada uma das 9 áreas em que foi fracionada. Os valores apresentados são já os resultantes da diferença entre os de montante, C_{pM} , e jusante, C_{pJ} , equação 4.2, para uma incidência normal à fachada.

Tabela 4.30 - Valores de C_{pT} do Edifício Solmar para 30°, zona central ($H_{central}$)

Face 1	$H_{central}$ esq.- 1,15	$H_{central}$ centro- 0,95	$H_{central}$ dir.- 0,85
Face 2	$H_{central}$ esq.- 1,35	$H_{central}$ centro- 1,65	$H_{central}$ dir.- 1,35
Face 3	$H_{central}$ esq.- 0,60	$H_{central}$ centro- 0,70	$H_{central}$ dir.- 0,85

Tabela 4.31 – Edifício Solmar para 30°

Bandas	Altura Banda (m)	Força do Vento $H_{central}$ (kN)
1	29,0	1436,6
2	14,5	1379,4
3	9,7	1358,6
4	7,3	1347,8
5	5,8	1341,1
6	4,8	1336,8
9	3,2	1329,3
12	2,4	1325,6
15	1,9	1325,3
18	1,6	1321,8
21	1,4	1320,7
24	1,2	1319,9
27	1,1	1319,2

As características básicas do Edifício Solmar para 45°, estão identificadas na tabela 4.32. A tabela 4.34, possui os valores da altura de cada faixa horizontal e a força total projectada na zona central pela acção do vento.

Tabela 4.32 – Características básicas do Edifício Solmar para 45°, zona central (H_{central})

Características do Edifício Solmar	
Altura do Edifício (h)	75 m
Comprimento do Edifício (b)	29 m
Largura do Edifício (l)	23 m
Massa Equivalente (m)	181966 kg/m
Velocidade fundamental do vento (v)	30 m/s
Massa volúmica do ar (μ)	1,225 kg/m ³
Nº de Pisos (n)	24
Altura da Zona Central (l_{central})	17,4 m
Área da zona Central (A_{central})	462,4 m ²
Ângulo de incidência ao vento (α)	45°
Frequência de vibração Fundamental (n_1)	0,613 Hz
Decremento Logarítmico Total de Amortecimento (δ)	0,1000

A Tabela 4.33 resume os valores C_p da zona central [5], correspondentes a cada uma das 12 áreas em que foi fraccionada. Os valores apresentados são já os resultantes da diferença entre os de montante, C_{pM} , e jusante, C_{pJ} , equação 4.2, para uma incidência normal à fachada.

Tabela 4.33 - Valores de C_{pT} do Edifício Solmar para 45°, zona central (H_{central})

Face 1	H_{central} esq.- 0,85	H_{central} centro- 0,70	H_{central} dir.- 0,65
Face 2	H_{central} esq.- 1,40	H_{central} centro- 1,35	H_{central} dir.- 1,25
Face 3	H_{central} esq.- 0,85	H_{central} centro- 0,90	H_{central} dir.- 1,15
Face 4	H_{central} esq.- 0,60	H_{central} centro- 0,50	H_{central} dir.- 0,50

Tabela 4.34 – Edifício Solmar para 45°

Bandas	Altura Banda (m)	Força do Vento $H_{central}$ (kN)
1	17,0	787,0
2	8,5	766,8
3	5,7	759,7
4	4,3	756,1
5	3,4	753,9
6	2,8	752,5
9	1,9	750,0
12	1,4	748,8
15	1,1	748,0
18	0,94	747,5
21	0,81	747,2
24	0,71	746,9
27	0,63	746,7

As características básicas do Edifício Solmar para 90°, estão identificadas na tabela 4.35. A tabela 4.37, possui os valores da altura de cada banda horizontal e a força total projectada na zona central pela acção do vento.

Tabela 4.35 – Características básicas do Edifício Solmar para 90°

Características do Edifício Solmar	
Altura do Edifício (h)	75 m
Comprimento do Edifício (b)	24 m
Largura do Edifício (l)	29 m
Massa Equivalente (m)	181966 kg/m
Velocidade fundamental do vento (v)	30 m/s
Massa volúmica do ar (μ)	1.225 kg/m ³
Nº de Pisos (n)	24
Altura da Zona Central ($l_{central}$)	27,0 m
Área da zona Central ($A_{central}$)	783,0 m ²
Ângulo de incidência ao vento (α)	90°
Frequência de vibração Fundamental (n_1)	0,613 Hz
Decremento Logarítmico Total de Amortecimento (δ)	0,1000

Tabela 4.36 resume os valores C_p da zona central [5], correspondentes a cada uma das 9 áreas em que foi fraccionada. Os valores apresentados são já os resultantes da diferença entre os de montante, C_{pM} , e jusante, C_{pJ} , equação 4.2, para uma incidência normal à fachada.

Tabela 4.36 - Valores de C_{pT} do Edifício Solmar, para 90° , zona central ($H_{central}$)

Face 1	$H_{central}$ esq.- 1,15	$H_{central}$ centro- 0,95	$H_{central}$ dir.- 0,90
Face 2	$H_{central}$ esq.- 1,35	$H_{central}$ centro- 1,65	$H_{central}$ dir.- 1,35
Face 3	$H_{central}$ esq.- 0,60	$H_{central}$ centro- 0,50	$H_{central}$ dir.- 0,50

Tabela 4.37 – Edifício Solmar para 90°

Bandas	Altura Banda (m)	Força do Vento $H_{central}$ (kN)
1	27,0	1374,3
2	13,5	1322,5
3	9,0	1303,8
4	6,8	1294,1
5	5,4	1288,2
6	4,5	1284,3
9	3,0	1277,6
12	2,3	1274,3
15	1,8	1272,2
18	1,5	1270,9
21	1,3	1269,9
24	1,1	1269,2
27	1,0	1268,6

Representa-se na Figura 4.10, a análise comparativa, com as quatro casos correspondentes às diferentes disposições que edifício ocupa face ao vento.

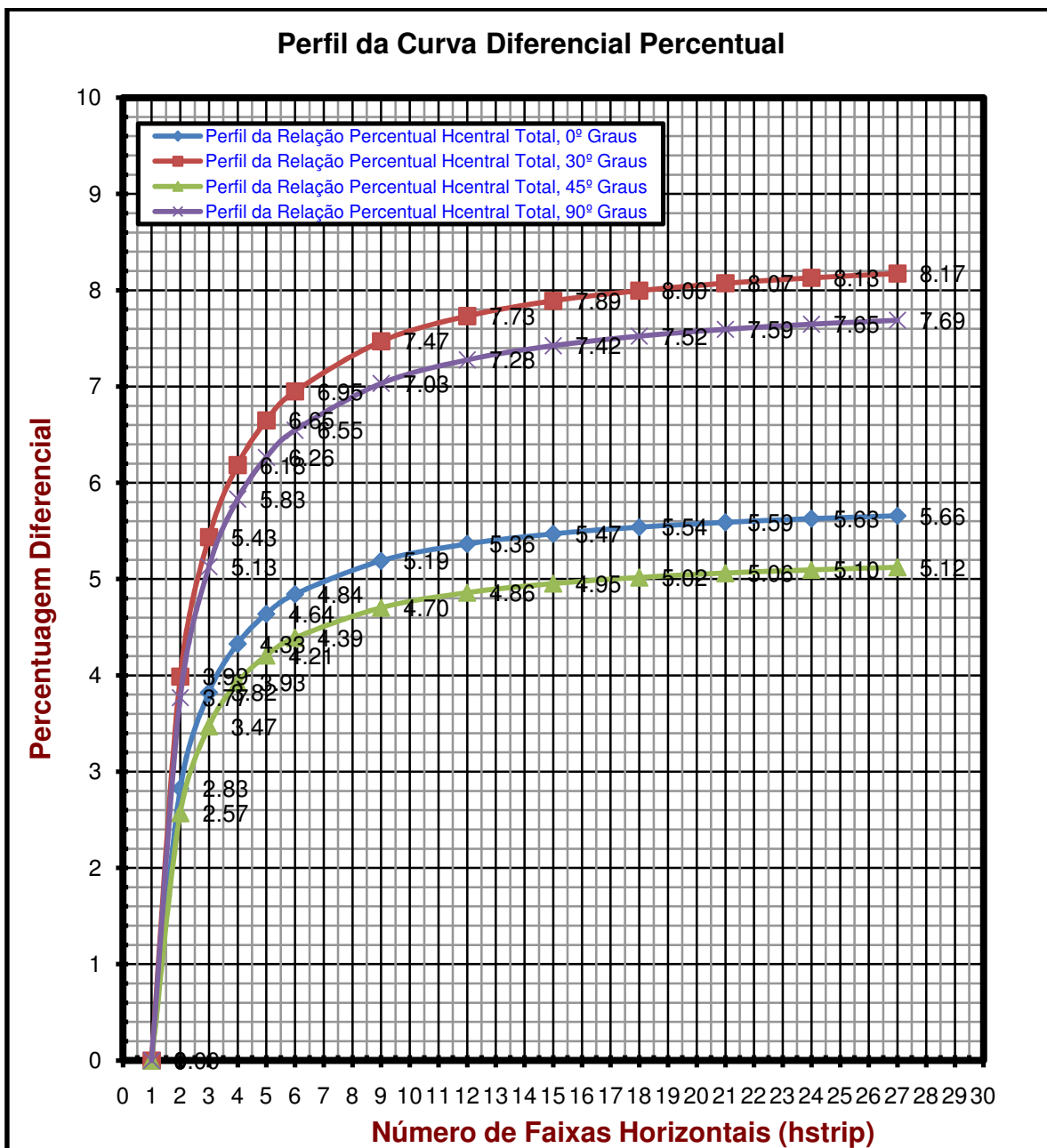


Figura 4.10 – Identificação conjunta das quatro curvas (0°; 30°; 45° e 90°)

As curvas da Figura 4.10 apresentam um perfil semelhante para os quatro ângulos de incidência ao vento e com a aplicação de quatro bandas, atinge-se 75% da variação máxima.

Verifica-se que a diferença entre as alturas na zona central para as quatro curvas representadas, é directamente proporcional à variação de intensidade das respectivas forças

Capítulo 5

CONCLUSÕES

A Norma Portuguesa NP EN 1991-1-4, 2009 (Eurocódigo) define um conjunto de procedimentos para o cálculo da acção do vento sobre estruturas. Um dos casos analisados visa estruturas de edifícios com planta rectangular e altura superior ao dobro da largura, mas inferior a 200 m. Recomenda a Norma que o edifício seja verticalmente dividido em três zonas, sendo que a central deverá, ainda, ser subdividida em bandas. No entanto não é indicada qualquer pista para o número, ou altura, dessas bandas.

Pretendeu-se com este trabalho avaliar a influência de um número variável de bandas, seguindo a metodologia da Norma, tendo-se recorrido ao estudo de quatro edifícios de diferentes alturas, geometrias e características estruturais, a que foram aplicados os correspondentes coeficientes aerodinâmicos.

Concluiu-se que a subdivisão da zona central em bandas reduz a carga global devida ao vento. No entanto para zonas centrais com altura inferior a $1/3$ da largura do edifício não há vantagem nessa subdivisão uma vez que aquelas reduções não são significativas. Para zonas centrais com alturas superiores a $1/3$ da largura do edifício, sugere-se a subdivisão em 4 bandas, obtendo-se a maior parcela de redução (75%).

Da análise feita a edifícios com diferentes formas (influência dos coeficientes de pressão) pode concluir-se, também, as reduções obtidas pela subdivisão da zona central são independentes da forma do edifício.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Stathopoulos, T. Baniotopoulos .CC (2007) Wind Effects on Buildings and Design of Wind-Sensitive StrucTs, Springer, 2007.
- [2] Norma Portuguesa NP EN 1991-1-4, 2009; Eurocódigo 1: Acções em Estruturas
Parte 1-4: Acções gerais – Acções do vento.
- [3] Johnson, G.L. (2001). Wind Energy Systems. Chapter 2, (Consulta em Maio 2012).
www.rpc.com.au/pdf/wind2.pdf.
- [4] Sparling, B.F. Structural Engineering Systems Design. [S.l.:s.n.], 1997. CE 461 – Wind Loads, p.38-46.
- [5] Glória Gomes, M., Moret Rodrigues, A., Mendes, P., (2005). *Experimental and numerical study of wind pressures on irregular-plan shapes*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 93, 741–756.
- [6] Plate, E. J. (1995). Urban climates and urban climate modelling: an introduction. *Wind Climate in Cities, NATO ASI Series, Serie E volume 277*, pp. 23-39.
- [7] Castro, G.L. (2009). Uma Contribuição para a Avaliação dos Efeitos da Acção do Vento em Estruturas Flexíveis. Tese de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Faculdade de Coimbra.
- [8] Warnitchai P (2010), Wind Effects on Buildings and Structures, *Asian Institute of Technology*.
- [9] Simiu, E. and Scanlan R.H.,(1985), Wind Effects on Structures, 3rd Edition.
- [10] Taranath B.S., (2005), Wind and earthquake resistant buildings, Marcel Dekker.

-
- [11] Hunaidi, O. and Tremblay, (1997) M. Traffic induced building vibrations in Montréal . *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 24, No. 5, pp. 736 – 753. DOI:10.1139/cjce-24-5-736
- [12] Kolousek, V., Pirner, M., & Fisher, O. F. (1984). *Wind Effects on Civil Engineering Structures*. Elsevier.
- [13] Sakamoto, H. (1985). Aerodynamic forces acting on a rectangular prism placed vertically in a boundary layer. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, volume 18 , 131-151.

ANEXOS

O diagrama de cálculo apresentado na página seguinte, possui na coluna central as variáveis de entrada, para uma melhor disposição.

As colunas laterais respeitam aos cálculos intemédios, com o propósito de calcular a força na zona central.

O valor de saída (*output*) é o campo FW, indicando o valor da força do vento em cada uma das bandas em que a zona central foi dividida.

Os valores apresentados na tabela, ilustram um exemplo para cálculo de um dos doze pontos, que representam a Hcentral do edifício CAARC, para as vinte e sete bandas.

As variáveis representadas na tabela seguinte respeitam ao último ponto dessa curva e estão identificadas na Nomenclatura.

Pela dimensão da tabela A, houve a necessidade de a dividir em três partes na largura e por sua vez representá-las em três folhas.

DIAGRAMA DE CÁLCULO

Dados Intermedios 1

Dados de Entrada

Dados Intermedios 2

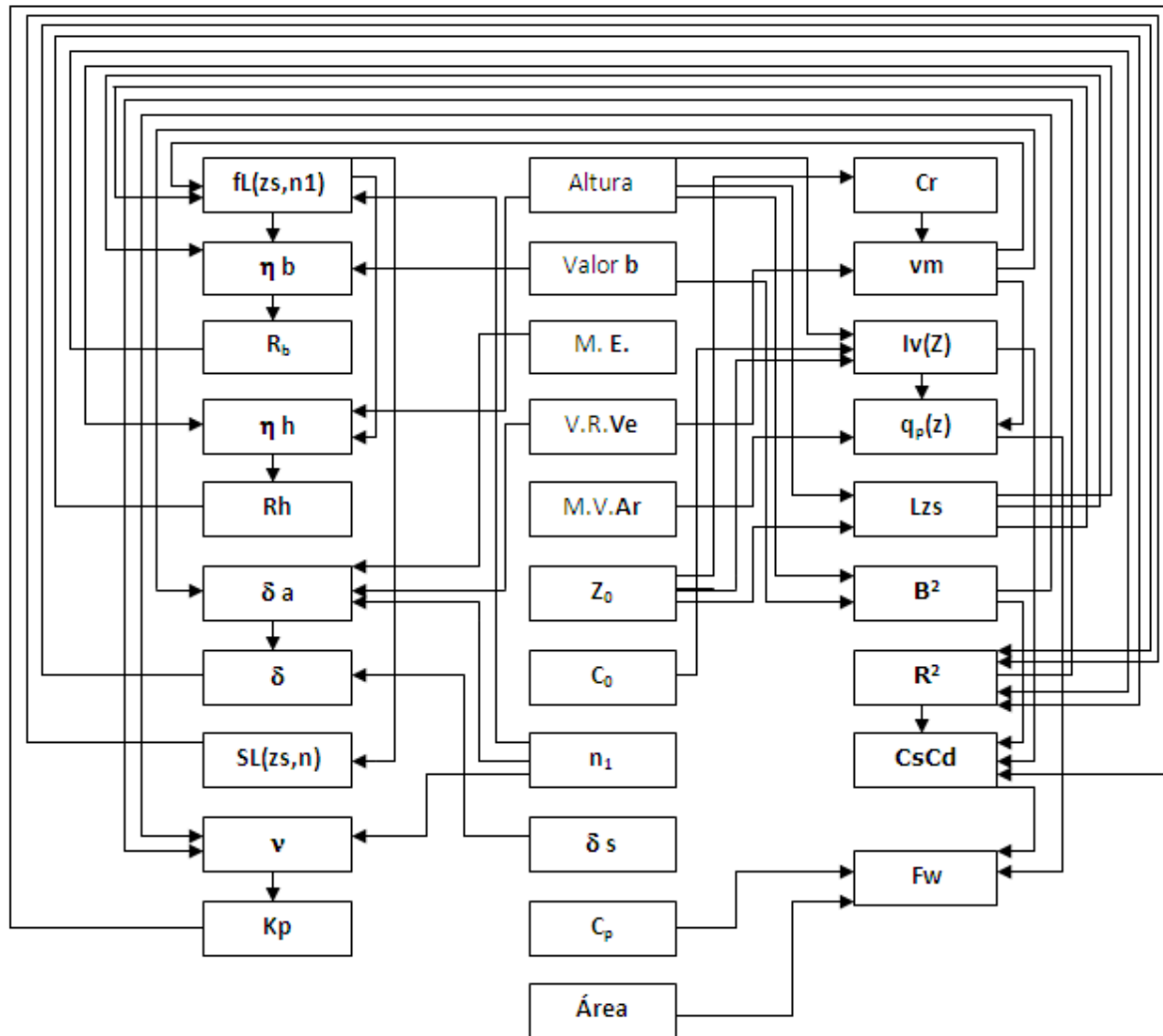


TABELA A1/3

	Ze	Cr	v_m	Iv(Z)	q_p	Lzs	B²	R²
Banda1	136.80	1.50	45.11	0.13	2.35	246.22	0.54	2.32
Banda2	133.43	1.50	44.97	0.13	2.34	243.04	0.54	2.32
Banda3	130.07	1.49	44.82	0.13	2.33	239.83	0.53	2.32
Banda4	126.70	1.49	44.67	0.13	2.31	236.58	0.53	2.32
Banda5	123.33	1.48	44.52	0.13	2.30	233.29	0.53	2.32
Banda6	119.97	1.48	44.36	0.13	2.29	229.96	0.53	2.32
Banda7	116.60	1.47	44.20	0.13	2.28	226.58	0.52	2.32
Banda8	113.23	1.47	44.03	0.13	2.26	223.15	0.52	2.32
Banda9	109.87	1.46	43.86	0.13	2.25	219.67	0.52	2.31
Banda10	106.50	1.46	43.68	0.13	2.24	216.15	0.52	2.31
Banda11	103.13	1.45	43.50	0.13	2.22	212.57	0.51	2.31
Banda12	99.77	1.44	43.31	0.13	2.21	208.93	0.51	2.31
Banda13	96.40	1.44	43.12	0.13	2.19	205.23	0.51	2.31
Banda14	93.03	1.43	42.91	0.13	2.18	201.47	0.51	2.30
Banda15	89.67	1.42	42.70	0.13	2.16	197.64	0.50	2.30
Banda16	86.30	1.42	42.49	0.13	2.14	193.75	0.50	2.30
Banda17	82.93	1.41	42.26	0.13	2.13	189.78	0.50	2.29
Banda18	79.57	1.40	42.02	0.14	2.11	185.73	0.49	2.29
Banda19	76.20	1.39	41.78	0.14	2.09	181.60	0.49	2.29
Banda20	72.83	1.38	41.52	0.14	2.07	177.38	0.49	2.28
Banda21	69.47	1.37	41.25	0.14	2.05	173.07	0.48	2.28
Banda22	66.10	1.37	40.97	0.14	2.03	168.65	0.48	2.27
Banda23	62.73	1.36	40.67	0.14	2.01	164.13	0.47	2.26
Banda24	59.37	1.35	40.35	0.14	1.98	159.48	0.47	2.26
Banda25	56.00	1.33	40.02	0.14	1.96	154.71	0.46	2.25
Banda26	52.63	1.32	39.67	0.14	1.93	149.80	0.46	2.24
Banda27	49.27	1.31	39.29	0.15	1.91	144.74	0.45	2.23

TABELA A2/3

	cp	CsCd	Aref	kp	Altura	fL(zs,n1)	η b	R_b
Banda1	1.51	1.27	154.53	3.26	136.80	1.09	0.94	0.83
Banda2	1.51	1.27	154.53	3.26	133.43	1.08	0.94	0.82
Banda3	1.51	1.27	154.53	3.26	130.07	1.07	0.94	0.82
Banda4	1.51	1.27	154.53	3.26	126.70	1.06	0.95	0.82
Banda5	1.51	1.27	154.53	3.26	123.33	1.05	0.95	0.82
Banda6	1.51	1.27	154.53	3.26	119.97	1.04	0.95	0.82
Banda7	1.51	1.27	154.53	3.26	116.60	1.03	0.96	0.81
Banda8	1.51	1.27	154.53	3.26	113.23	1.01	0.96	0.81
Banda9	1.51	1.27	154.53	3.26	109.87	1.00	0.96	0.81
Banda10	1.51	1.27	154.53	3.26	106.50	0.99	0.97	0.81
Banda11	1.51	1.27	154.53	3.26	103.13	0.98	0.97	0.80
Banda12	1.51	1.27	154.53	3.26	99.77	0.96	0.97	0.80
Banda13	1.51	1.27	154.53	3.26	96.40	0.95	0.98	0.80
Banda14	1.51	1.27	154.53	3.26	93.03	0.94	0.98	0.79
Banda15	1.51	1.27	154.53	3.26	89.67	0.93	0.99	0.79
Banda16	1.51	1.27	154.53	3.26	86.30	0.91	0.99	0.79
Banda17	1.51	1.27	154.53	3.26	82.93	0.90	1.00	0.78
Banda18	1.51	1.27	154.53	3.26	79.57	0.88	1.00	0.78
Banda19	1.51	1.27	154.53	3.26	76.20	0.87	1.01	0.78
Banda20	1.51	1.27	154.53	3.26	72.83	0.85	1.02	0.77
Banda21	1.51	1.27	154.53	3.26	69.47	0.84	1.02	0.77
Banda22	1.51	1.27	154.53	3.26	66.10	0.82	1.03	0.76
Banda23	1.51	1.27	154.53	3.26	62.73	0.81	1.04	0.76
Banda24	1.51	1.27	154.53	3.26	59.37	0.79	1.05	0.76
Banda25	1.51	1.27	154.53	3.26	56.00	0.77	1.06	0.75
Banda26	1.51	1.27	154.53	3.26	52.63	0.76	1.06	0.74
Banda27	1.51	1.26	154.53	3.26	49.27	0.74	1.07	0.74

TABELA A3/3

	ηh	R_h	δa	δ	$SL(zs,n)$	v	F_w
Banda1	3.73	0.25	0.0009	0.05	0.12	0.18	698.68
Banda2	3.74	0.25	0.0009	0.05	0.12	0.18	695.39
Banda3	3.75	0.25	0.0009	0.05	0.12	0.18	692.02
Banda4	3.76	0.25	0.0009	0.05	0.12	0.18	688.56
Banda5	3.78	0.25	0.0009	0.05	0.12	0.18	685.02
Banda6	3.79	0.25	0.0009	0.05	0.12	0.18	681.37
Banda7	3.80	0.25	0.0009	0.05	0.12	0.18	677.62
Banda8	3.82	0.24	0.0009	0.05	0.12	0.18	673.76
Banda9	3.83	0.24	0.0009	0.05	0.12	0.18	669.79
Banda10	3.85	0.24	0.0009	0.05	0.12	0.18	665.69
Banda11	3.86	0.24	0.0009	0.05	0.12	0.18	661.47
Banda12	3.88	0.24	0.0009	0.05	0.12	0.18	657.10
Banda13	3.90	0.24	0.0009	0.05	0.12	0.18	652.59
Banda14	3.92	0.24	0.0009	0.05	0.13	0.18	647.92
Banda15	3.94	0.24	0.0009	0.05	0.13	0.18	643.08
Banda16	3.96	0.24	0.0009	0.05	0.13	0.18	638.06
Banda17	3.98	0.24	0.0009	0.05	0.13	0.18	632.84
Banda18	4.00	0.23	0.0009	0.05	0.13	0.18	627.41
Banda19	4.02	0.23	0.0009	0.05	0.13	0.18	621.74
Banda20	4.05	0.23	0.0009	0.05	0.13	0.18	615.83
Banda21	4.07	0.23	0.0008	0.05	0.13	0.18	609.64
Banda22	4.10	0.23	0.0008	0.05	0.13	0.18	603.15
Banda23	4.13	0.23	0.0008	0.05	0.14	0.18	596.32
Banda24	4.17	0.23	0.0008	0.05	0.14	0.18	589.13
Banda25	4.20	0.22	0.0008	0.05	0.14	0.18	581.52
Banda26	4.24	0.22	0.0008	0.05	0.14	0.18	573.46
Banda27	4.28	0.22	0.0008	0.05	0.14	0.18	564.87
