

AÇÃO DO VENTO EM EDIFÍCIOS ESBELTOS NO ÂMBITO DO EUROCÓDIGO



Fernando Márques
da Silva

Inv. Aux.
LNEC
Lisboa
fms@lnec.pt

SUMÁRIO

A ação do vento é um fator importante a considerar na análise do comportamento de estruturas de esbeltas e, em particular, flexíveis.

A Norma Portuguesa - NP EN 1991-1-4, EUROCÓDIGO 1: Ações em estruturas, Parte 1-4: Ações gerais – Ações do vento – aborda o tema para edifícios com alturas inferiores a 200m mas em que a altura é superior ao dobro da dimensão transversal, no sentido do vento incidente. Na metodologia proposta define-se a velocidade do vento a considerar, a vários níveis do desenvolvimento vertical da estrutura, sendo a dimensão e o número de níveis a considerar função da altura total.

Estando claramente definidas as cotas a usar, na definição da velocidade do vento, para os níveis inferior e superior da estrutura, para a zona central é preconizada a subdivisão em bandas cuja dimensão (ou número) não é especificada. Este trabalho analisa a influência do número de bandas a utilizar, em função da dimensão da zona central, no cálculo da ação do vento sobre a estrutura. Para tal aplicaram-se os procedimentos prescritos na NP EN 1991-1-4 a edifícios com diferentes alturas, geometrias e características estruturais.

Palavras-chave: vento, EUROCÓDIGO, edifícios esbeltos.

1. INTRODUÇÃO

A ação do vento é um fator importante a considerar na análise do comportamento de edifícios esbeltos e, em particular, flexíveis.

A Norma Portuguesa - NP EN 1991-1-4, EUROCÓDIGO 1: Ações em estruturas, Parte 1-4: Ações gerais – Ações do vento (EC1) [1] – cujo campo de aplicação se restringe a edifícios com altura inferior a 200 m, dedica o §7.2.2 à definição da velocidade do vento a considerar em função da cota acima do solo.

Em edifícios cuja altura supere em duas vezes o valor da dimensão transversal b , o EC1 sugere a divisão da altura do edifício em três zonas, sendo a zona central subdividida em bandas, cada uma com a respetiva velocidade característica. Quer a zona inferior, quer a superior, são definidas com alturas iguais a b , mas é omissa quanto ao número de bandas (ou as respetivas alturas) a considerar para a definição das velocidades características da zona central.

Pretende-se com este trabalho contribuir para o esclarecimento do número (e dimensão, h_{strip}^1) dessas bandas horizontais a adotar no cálculo da verificação da ação do vento.

Para tal recorreu-se a um conjunto de edifícios, com diferentes alturas, geometrias e características estruturais a que foi aplicada a metodologia do código, fazendo variar a dimensão das referidas bandas e avaliando a variação da ação.

2. METODOLOGIA

2.1 Velocidade do vento

No presente estudo, para a definição da velocidade do vento de referência, admitiu-se que o edifício está situado em terrenos de zona A a que, de acordo com o Anexo Nacional (AN) do EC1, corresponde uma velocidade do vento de $v_{b,0}=27$ m/s. Admitiu-se também que os coeficientes de direção e sazonal são unitários, obtendo-se para a velocidade média em 10 minutos, à cota de 10 m acima do solo, característica de terreno de categoria II, cuja rugosidade é representada por $z_0=0,05$ m, o valor de,

$$v_b=27 \text{ m/s}$$

O desenvolvimento típico de camada limite depende da orografia, da rugosidade do terreno e, naturalmente, da distância ao solo. A velocidade do vento a uma cota genérica z é, portanto, função destes três parâmetros, admitindo-se neste trabalho que o coeficiente representativo da orografia é unitário, isto é, que não se verificam desníveis no terreno circundante ao edifício. No que respeita à rugosidade do terreno considerou-se a categoria IV representada por $z_0=1,00$ m.

A velocidade a considerar nos cálculos será obtida por:

¹ Nomenclatura usada no EUROCÓDIGO.

$$V(z) = 0,19 \left(\frac{z0}{0,05} \right)^{0,07} \ln\left(\frac{z0}{0,05}\right) \quad (1)$$

e a respetiva intensidade de turbulência por:

$$I(z) = \frac{1}{\ln\left(\frac{z0}{0,05}\right)} \quad (2)$$

Ambos os perfis, de velocidade e intensidade de turbulência, encontram-se representados na Figura 1.

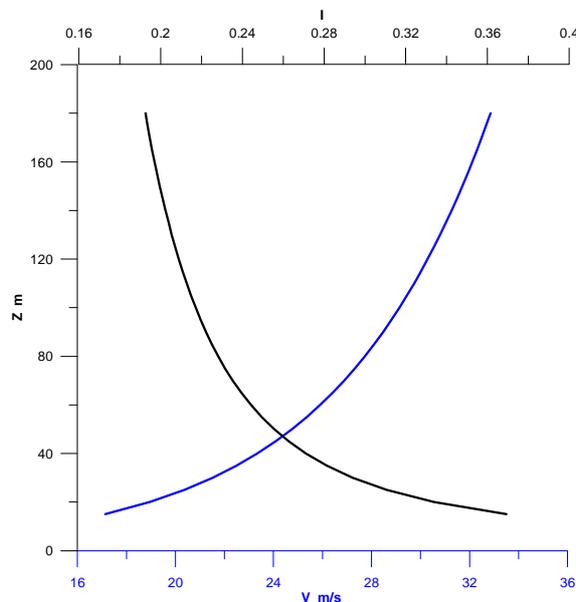


Figura 1. Perfis de velocidade e de intensidade de turbulência.

A pressão de pico atuante sobre as superfícies em análise é função da velocidade V(z) e da intensidade de turbulência I(z),

$$q_p(z) = [1 + 7 I(z)] \frac{1}{2} \rho V^2(z) \quad (3)$$

sendo ρ ($=1,225 \text{ kg/m}^3$) a massa volúmica do ar.

2.2 Caracterização da geometria

Reproduzem-se na Figura 2 as principais características geométricas, e respetiva nomenclatura, do EC1, e que serão utilizadas neste trabalho.

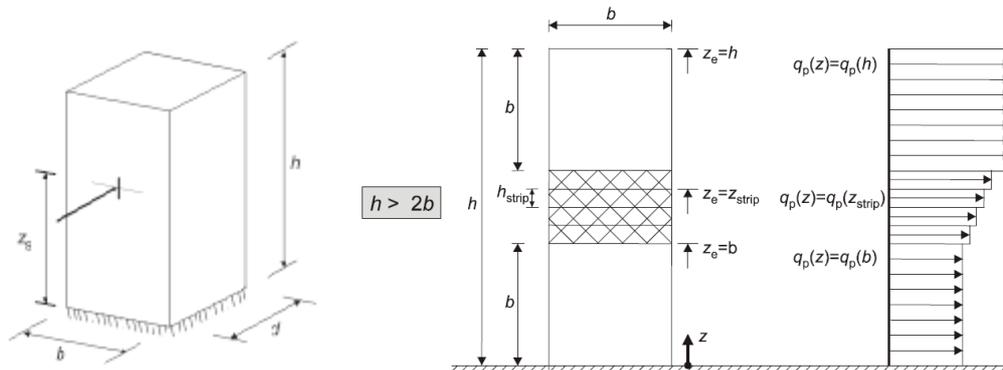


Figura 2. Geometria e nomenclatura [1].

2.3 Metodologia de cálculo

A metodologia de cálculo da ação do vento segue os procedimentos estabelecidos no EC1 sendo a força, F_w , exercida sobre uma dada superfície, A_{ref} , determinada por,

$$F_w(z) = C_s C_d C_p q_p(z) A_{ref} \quad (4)$$

onde $C_s C_d$ é um coeficiente estrutural e C_p o coeficiente de pressão efetivo sobre a área considerada. A força global aplicada será obtida pelo somatório de todas as forças locais.

O coeficiente estrutural, $C_s C_d$, depende, num primeiro passo, da altura do edifício e da frequência do seu modo fundamental de vibração, n_1 , tomando o valor unitário se $h < 15$ m ou $n_1 > 5$ Hz. No presente caso este coeficiente é função:

- da frequência, $n_1 (\approx 46/h)$;
- do decremento logarítmico total do amortecimento, δ , composto por três parcelas: estrutural, δ_s (betão armado); aerodinâmico, δ_a , função, entre outros parâmetros, da massa distribuída equivalente, m_e , e; dispositivos especiais, δ_d ;
- da função da densidade espectral, $S_L(z, n)$, e da escala integral, $L(z)$, da turbulência atmosférica;
- do tempo da duração de integração da velocidade média, T , e;
- das dimensões, h e b , do edifício.

Os deslocamentos obtêm-se a partir da configuração modal, $\phi(z)$, função de z , h e de um expoente, ζ , representativo do tipo de estrutura (esbelta com núcleo central em betão), da carga aplicada, da frequência do modo de vibração e da cota, z .

No Quadro 1 resumem-se os valores invariáveis usados no conjunto de expressões definidas no EC1, para a o cálculo do coeficiente estrutural e dos deslocamentos associados à carga aplicada.

Quadro 1. Valores usados no cálculo das ações.

m_e	225238	kg/m
δ_s	0.1	----
ζ	1.5	----
T	600	s

O termo por definir na equação (4) é o coeficiente de pressão em cada área e que, tratando-se da carga aplicada à estrutura, deve ser contabilizado como a diferença,

$$\Delta C_p = C_{p_{\text{montante}}} - C_{p_{\text{jusante}}}$$

No caso presente, de edifícios de planta retangular, com $h/d > 1,5$, tem-se:

$$\Delta C_p = 0,8 - (-0,7) = 1,5$$

2.4 O edifício CAARC

O edifício *CAARC* (*Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council*) é uma estrutura teórica [3], de planta retangular, que serviu (e continua a ser usada) como padrão para a uniformização de ensaios em túneis de vento, e, mais recentemente, também para análises numéricas.

As suas dimensões são de $h=182,7$ m, largura de $b= 45,9$ m e profundidade de $d=30,6$ m e uma massa distribuída equivalente de $m_e= 225238$ kg/m.

No entanto, e como o propósito do trabalho consiste numa análise paramétrica da ação do vento para várias dimensões da zona central, fez-se variar quer a altura total quer a largura entre os seguintes limites,

$$50 < h < 180 ; 20 < b < 60$$

Obtiveram-se, assim, valores da esbelteza na gama, $2,2 < \lambda=h/b < 9,0$.

A variação das dimensões do edifício tem óbvias implicações na altura da zona central e, portanto, no número e dimensão, h_{strip} , das bandas em que é subdividida, Figura 2. Tomou-se como limites de variação da altura da banda $(h-2b) < h_{\text{strip}} < \sim 3m$, isto é, entre uma única banda para toda a zona central e o correspondente à dimensão típica do pé-direito de um piso.

2.5 Exemplos de aplicação

Apresentam-se, a título de exemplo, os valores obtidos para duas configurações diferentes.

No Quadro 2 apresentam-se os valores parciais do cálculo da ação do vento para o edifício referido com altura de 100 m, largura de 20 m e uma única banda na zona central. A carga total aplicada foi de 3440 kN e o deslocamento máximo no topo de 25,8 mm.

Quadro 2. Valores de cálculo para $h=100$ m, $b=20$ m e 1 banda central.

h	100	m
b	20	m
d	30.6	m
n_1	0.46	Hz
m_e	225238	kg/m
nº de pisos	33	
λ	5	
h_{zc}/H	0.6	
h_{zc}/b	3	
n_{strip}	1	
h_{strip}	60	m

	$z_e=h$	$z_e= z_{strip}$	$z_e=b$
Z_e m	100	80	20
Cr	1.08	1.03	0.7
v_m m/s	29.14	27.72	18.95
$I_v(z)$	0.22	0.23	0.33
$q_p(z)$ kPa	1.31	1.22	0.73
L(z) m	188.55	162.37	64.14
$S_L(z,n)$	0.06	0.07	0.1
δ_a	0.0052	0.0049	0.0034
δ	0.1052	0.1049	0.1034
CsCd	1.01	1.01	0.99
A_{ref} m ²	400	1200	400
F_w kN	791.5	2214.25	434.28
$q(z)$	1	0.72	0.09
$X_{max}(z)$ mm	6.88	17.24	1.71

Quadro 3. Valores de cálculo para $h=100$ m, $b=20$ m e 6 bandas centrais.

h	100	m
b	20	m
d	30.6	m
n_1	0.46	Hz
m_e	225238	kg/m
nº de pisos	33	
λ	5	
h_{zc}/H	0.6	
h_{zc}/b	3	
n_{strip}	6	
h_{strip}	10	m

	$z_e=h$	$z_e= z_{strip}$						$z_e=b$
Z_e m	100	80.0	70.0	60	50	40	30	20
Cr	1.08	1.03	1.00	0.96	0.92	0.86	0.80	0.70
v_m m/s	29.1	27.7	26.9	25.9	24.8	23.3	21.5	19.0
$I_v(z)$	0.22	0.23	0.24	0.24	0.26	0.27	0.29	0.33
$q_p(z)$ kPa	1.310	1.223	1.172	1.114	1.047	0.967	0.867	0.734
L(z) m	188.55	162.37	148.47	133.90	118.51	102.05	84.16	64.14
$S_L(z,n)$	0.065	0.069	0.071	0.074	0.078	0.082	0.088	0.095
δ_a	0.0052	0.0049	0.0048	0.0046	0.0044	0.0041	0.0038	0.0034
δ	0.1052	0.1049	0.1048	0.1046	0.1044	0.1041	0.1038	0.1034
CsCd	1.0067	1.0059	1.0052	1.0041	1.0024	0.9997	0.9950	0.9859
A_{ref} m ²	400	200	200	200	200	200	200	400
F_w kN	791.50	369.04	353.34	335.48	314.74	289.93	258.91	434.28
$q(z)$	1	0.72	0.59	0.46	0.35	0.25	0.16	0.09
$X_{max}(z)$ mm	6.88	2.87	2.58	2.27	1.94	1.60	1.24	1.71

Aumentando o número de bandas da zona central para seis a carga total aplicada passou a 3147 kN e o deslocamento máximo no topo de 21,1 mm, quadro 3.

Quadro 4. Valores de cálculo para $h=180$ m, $b=46$ m e 1 banda central.

h	180	m
b	46	m
d	30.6	m
n_1	0.26	Hz
m_e	225238	kg/m
nº de pisos	60	
λ	3.9	
h_{zc}/H	0.5	
h_{zc}/b	1.9	
n_{strip}	1	
h_{strip}	88	m

	$z_e=h$	$z_e= z_{strip}$	$z_e=b$
Z_e m	180	134	46
Cr	1.22	1.15	0.90
v_m m/s	32.86	30.99	24.22
$I_v(z)$	0.19	0.20	0.26
$q_p(z)$ kPa	1.55	1.43	1.02
L(z) m	279.55	229.40	112.07
$S_L(z,n)$	0.078	0.085	0.111
δ_a	0.024	0.023	0.018
δ	0.124	0.123	0.118
CsCd	0.98	0.98	0.97
A_{ref} m ²	2116.00	4048.00	2116.00
F_w kN	4815.69	8474.82	3121.50
$q(z)$	1.00	0.64	0.13
$X_{max}(z)$ mm	75.21	114.32	24.81

No Quadro 4 apresentam-se os valores parciais do cálculo da ação do vento para o edifício referido com altura de 180 m, largura de 46 m e uma única banda na zona central. A carga total aplicada foi de 16412 kN e o deslocamento máximo no topo de 214,3 mm.

Aumentando o número de bandas da zona central para seis a carga total aplicada passou a 15559 kN e o deslocamento máximo no topo de 188,0 mm, Quadro 5.

Quadro 5. Valores de cálculo para $h=180$ m, $b=46$ m e 6 bandas centrais.

	$z_e=h$		$z_e=Z_{strip}$					$z_e=b$
	180	134.0	119.3	104.7	90	75.3	60.7	46
Z_e m	180	134.0	119.3	104.7	90	75.3	60.7	46
C_r	1.22	1.15	1.12	1.09	1.05	1.01	0.96	0.90
v_m m/s	32.9	31.0	30.3	29.4	28.5	27.3	26.0	24.2
$I_v(z)$	0.19	0.20	0.21	0.22	0.22	0.23	0.24	0.26
$q_0(z)$ kPa	1.552	1.429	1.381	1.329	1.269	1.200	1.118	1.016
$L(z)$ m	279.55	229.40	212.26	194.40	175.70	155.96	134.90	112.07
$S_{1(z,n)}$	0.078	0.085	0.088	0.091	0.095	0.099	0.104	0.111
δ_a	0.0241	0.0228	0.0222	0.0216	0.0209	0.0201	0.0191	0.0178
δ	0.1241	0.1228	0.1222	0.1216	0.1209	0.1201	0.1191	0.1178
$C_s C_d$	0.9773	0.9769	0.9765	0.9759	0.9750	0.9736	0.9713	0.9675
A_{ref} m ²	2116	674.67	674.67	674.67	674.67	674.67	674.67	2116
F_w kN	4815.69	1412.47	1365.06	1312.05	1251.84	1182.05	1098.81	3121.50
$g(z)$	1	0.64	0.54	0.44	0.35	0.27	0.20	0.13
$X_{max}(z)$ mm	75.21	19.05	17.39	15.66	13.86	11.99	10.01	24.81

Como seria de esperar as ações globais decrescem com o aumento do número de bandas já que a subdivisão da zona central implica valores mais baixos da velocidade do vento, $v_m(z_e)$, e a redução da área de referência que será sempre função de h_{strip} .

2.6 Resultados globais

Os resultados obtidos para a totalidade das configurações testadas são apresentados graficamente, nas Figuras 3 a 5, representando a variação percentual da carga imposta pelo vento na zona central, em função do número de bandas. Cada curva corresponde a um conjunto diferente dos parâmetros λ , h_{zc}/h e h_{zc}/b (sendo h_{zc} a altura da zona central). As linhas oblíquas assinalam os números de bandas a partir dos quais as variações são inferiores a 1%.

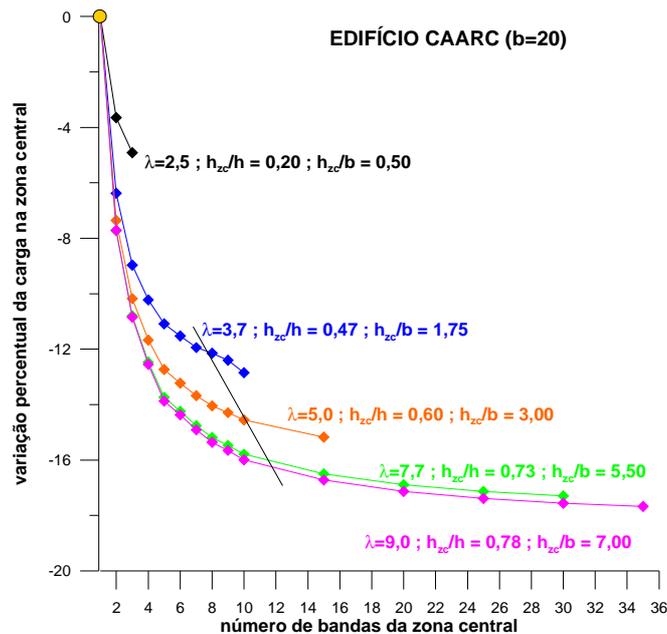


Figura 3. Variação da carga na zona central em função do número de bandas da zona central ($b=20$ m).

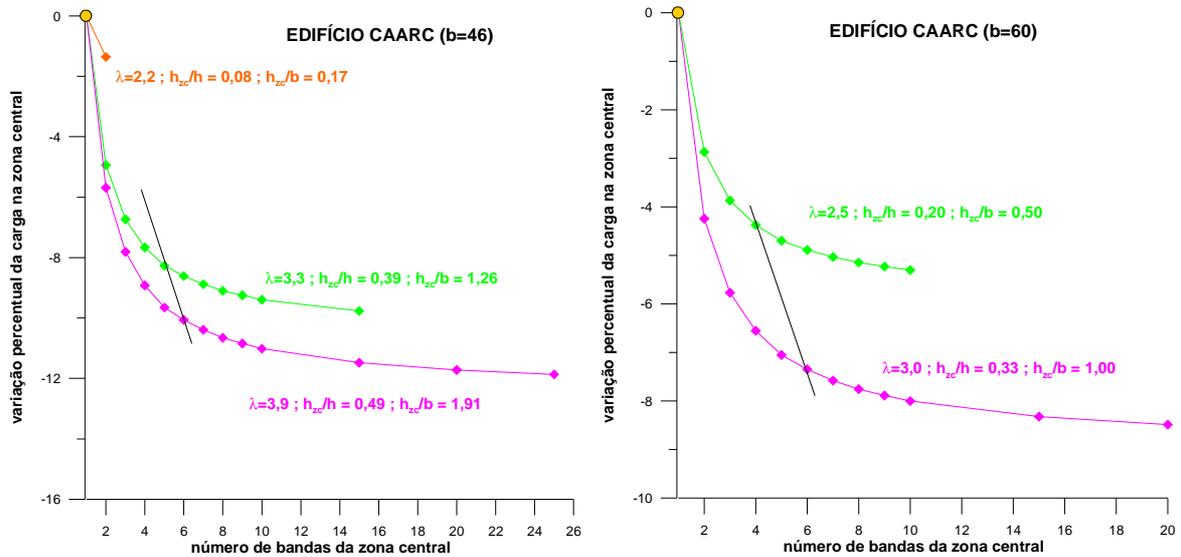


Figura 4. Variação da carga na zona central em função do número de bandas da zona central (b=46 e 60 m).

Os resultados obtidos permitem concluir que, assumindo como significativo o critério (arbitrário) de 1% de variação na carga aplicada na zona central, o número “útil” de bandas varia com esbelteza, Figura 5.

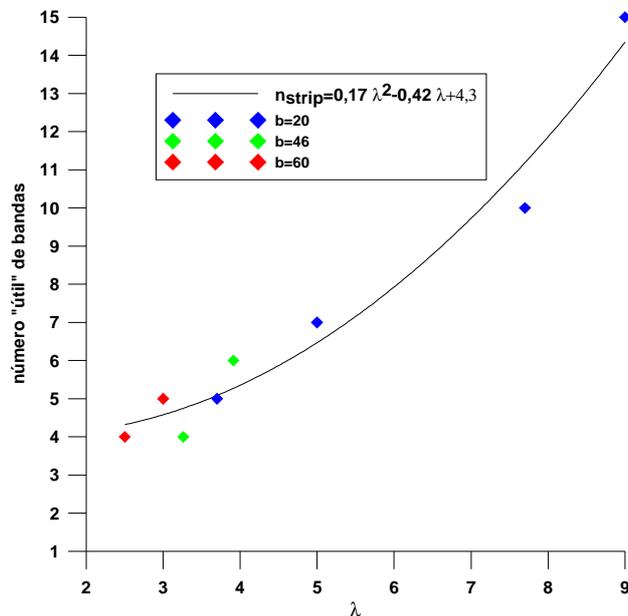


Figura 5. Variação do número “útil” de bandas na zona central em função da esbelteza.

Se se considerar a carga total aplicada, isto é, incluindo as zonas inferior e de topo, as variações são, naturalmente, menores.

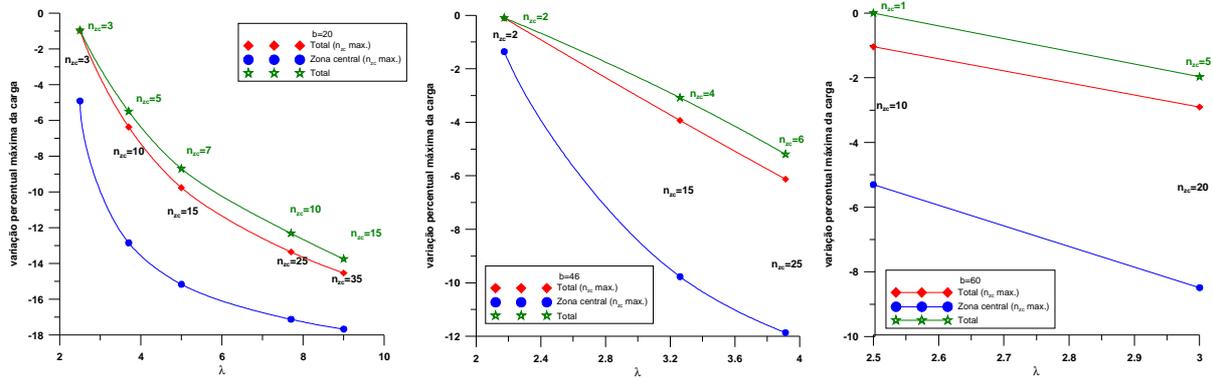


Figura 6. Variação da carga em função da esbelteza.

Na Figura 6 representa-se a variação percentual da carga total (♦), e da zona central (●), com o número máximo de bandas de cada configuração e a variação total considerando o número de bandas correspondente ao critério de $\Delta F_w < 1\%$ (★).

A Figura 6 permite evidenciar a significativa diferença na variação da carga considerando apenas a zona central ou a totalidade do edifício e, também, a irrelevante variação de F_w considerando um número reduzido de bandas.

A dimensão mínima (correspondente ao número significativo de bandas) das bandas a considerar pode ser analisada, sob forma adimensional, em função da esbelteza. Na Figura 7 representa-se a variação de h_{strip}/b e de h_{strip}/h_{zc} em função de λ .

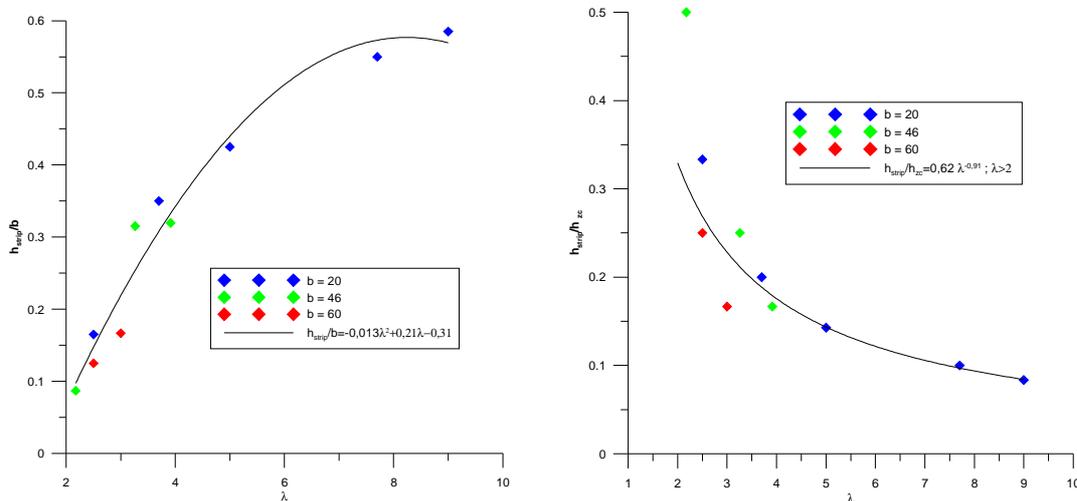


Figura 7. Variação da dimensão das bandas em função da esbelteza.

As curvas da Figura 7 mostram a existência de relações entre as dimensões normalizadas h_{strip}/b e h_{strip}/h_{zc} com λ , permitindo a estimativa expedita da dimensão física das bandas.

Para a estimativa dos deslocamentos máximos no topo do edifício adotou-se um processo simplificado, não considerando a existência de rotações. O deslocamento é obtido por adição dos deslocamentos parciais em cada banda, função da respetiva configuração modal.

Os resultados são expressos relativamente ao deslocamento máximo com uma única banda, Figura 8.

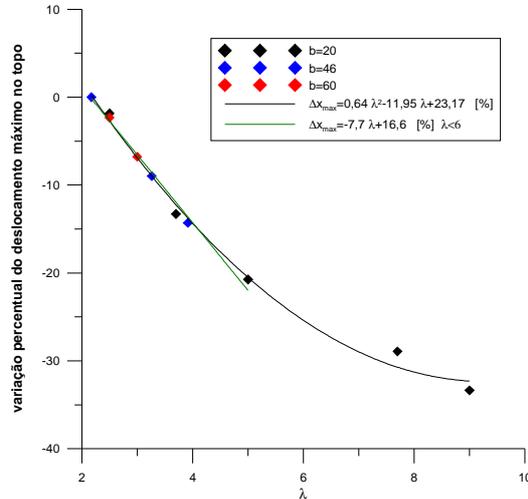


Figura 8. Variação do deslocamento máximo no topo em função da esbeltez.

A Figura 8 mostra que a redução percentual do deslocamento máximo varia linearmente com a esbeltez para valores de $\lambda < 5$, tornando-se suavemente quadrática a partir daí.

3. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta os resultados de uma análise à ação do vento sobre a estrutura de edifícios esbeltos, no âmbito da NP EN 1991-1-4, Eurocódigo 1 [1], isto é edifícios de planta retangular e altura inferior a 200 m mas superior ao dobro da dimensão transversal da empena de barlavento.

Refere aquela Norma que, nas condições indicadas, se devem considerar três zonas em desenvolvimento vertical sendo a inferior e a superior de altura igual à dimensão transversal, devendo a central ser dividida em bandas de altura, ou número, não especificado. Esta divisão em altura tem como objetivo definir a velocidade do vento incidente à cota superior de cada zona ou banda.

Recorrendo à metodologia descrita no EC1 avaliou-se a variação da carga aplicada sobre a estrutura, bem como o deslocamento máximo no topo, relativamente à utilização de uma única banda, com a variação do número de bandas da zona central, e com esbelteza variável.

A estrutura utilizada foi a do edifício CAARC (*Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council*), uma estrutura teórica que serviu (e continua a ser usada) como padrão para a uniformização de ensaios em túneis de vento, e, mais recentemente, também para análises numéricas.

Os resultados mostram que a subdivisão da zona central reduz, como esperado, a carga aplicada mas que o número de bandas, para o qual essa redução é significativa, é limitado e

função da esbelteza. Foi possível estabelecer relações analíticas simples quer entre o número “útil” de bandas, quer entre a altura normalizada das bandas, e a esbelteza, permitindo estimativas rápidas para o número de bandas e para a sua dimensão.

Como consequência os deslocamentos máximos esperados no topo, para o número de máximo e significativo de bandas, também se reduzem com a esbelteza.

REFERÊNCIAS

- [1] Norma Portuguesa NP EN 1991-1-4, 2009; Eurocódigo 1: Acções em Estruturas, Parte 1-4: Acções gerais – Acções do vento.
- [2] 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.
- [3] Wardlaw, R. L.; Moss, G.F. – “A standard tall building model for the comparison of simulated natural winds in wind tunnels”, 1970, CAARC, C.C. 622m Tech.
- [4] Vieira, C. M. (2013). “Acção do vento em edifícios altos.” Tese de Mestrado. ISEL.