



AValiação de Métodos Teóricos para Estimativa do
Comportamento de Edifícios Altos sob a Ação de Vento
Turbulento

Fernando Guerra Algaba

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadores: Michèle Schubert Pfeil

Ronaldo Carvalho Battista

Rio de Janeiro

Março de 2016

AValiação de Métodos Teóricos para Estimativa do
Comportamento de Edifícios Altos sob a Ação de Vento
Turbulento

Fernando Guerra Algaba

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

Prof^a. Michèle Schubert Pfeil, D.Sc.

Prof. Ronaldo Carvalho Battista, Ph.D.

Prof. Acir Mércio Loredo-Souza, Ph.D.

Prof^a. Eliane Maria Lopes Carvalho, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2016

Guerra Algaba, Fernando

Avaliação de Métodos Teóricos para Estimativa de Comportamento de Edifícios Altos Sob a Ação de Vento Turbulento / Fernando Guerra Algaba. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.

XXIV, 133 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Michèle Schubert Pfeil

Ronaldo Carvalho Battista

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 112-115.

1. Engenharia do vento. 2. Estruturas flexíveis 3. NBR 6123/1988. I. Pfeil, Michèle Schubert *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

À minha mãe Laura

AGRADECIMENTOS

À minha mãe Laura, por tudo o que ela fez por mim na sua vida, especialmente o interesse por aprender, conhecer e me superar que ela me transmitiu.

À minha família, pelo amor e apoio nas minhas decisões.

À minha orientadora, Prof. Michèle Schubert Pfeil pela dedicação, ensinamentos e suporte durante a elaboração de cada etapa desta dissertação. Assim como à meu orientador Ronaldo Carvalho Battista pela motivação no trabalho.

Aos professores do PEC pelos importantes ensinamentos transmitidos ao longo deste período de convivência.

Aos meus amigos da COPPE, pela ajuda e os momentos vividos.

À COPPE, por oferecer a oportunidade deste trabalho.

Ao CNPq, pela concessão de bolsa de apoio financeiro que permitiu a realização desta dissertação de março de 2014 até março de 2016.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

AVALIAÇÃO DE MÉTODOS TEÓRICOS PARA ESTIMATIVA DO
COMPORTAMENTO DE EDIFÍCIOS ALTOS SOB A AÇÃO DE VENTO
TURBULENTO

Fernando Guerra Algaba

Março/2016

Orientadores: Michèle Schubert Pfeil

Ronaldo Carvalho Battista

Programa: Engenharia Civil

As normas de projeto que tratam da ação de vento em estruturas de edificações indicam, em geral, procedimentos dinâmicos baseados no clássico Método de Davenport mas, em virtude de diferentes hipóteses e valores para os parâmetros básicos, os resultados apresentam divergências. Daí a importância de se efetuar estudos comparativos entre estes resultados e os obtidos de ensaios experimentais de modelos reduzidos em túnel de vento e de monitoração de protótipos.

Neste trabalho os resultados experimentais do “*International HFBB Comparison Project*” em que diversos laboratórios de túnel de vento em todo o mundo utilizaram a técnica HFBB para determinação de respostas em termos de esforços solicitantes na base de um prédio padrão, e os obtidos da literatura em termos de deslocamentos no topo de um prédio similar, são comparados aos resultados de procedimentos normativos para as mesmas condições de vento. As normas utilizadas foram a brasileira (NBR 6123/1988) e a europeia (Eurocódigo 1-4/2005). Além disso, foi aplicada também a solução modal no domínio da frequência para o modelo discretizado da estrutura.

Pode-se concluir com os dados obtidos que os Métodos do Eurocódigo 1-4/2005 e a solução modal implementada geram valores similares aos dos resultados experimentais enquanto que os da NBR 6123/1988 subestimam a resposta em 50% aproximadamente.

Assim sendo, apresenta-se uma proposta de atualização dos ábacos que compõem o procedimento da NBR 6123/1988, de modo a que se obtenham resultados compatíveis aos experimentais.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

VALIDATION OF THEORETICAL METHODS FOR THE ESTIMATION OF TALL BUILDING'S BEHAVIOUR UNDER TURBULENT WIND LOADS

Fernando Guerra Algaba

March/2016

Advisors: Michèle Schubert Pfeil
Ronaldo Carvalho Battista

Department: Civil Engineering

Design codes for buildings under wind forces are generally based on the classic Davenport's Method in order to estimate the dynamic response of buildings under turbulent wind loads. Different methods, hypothesis and parameters obviously generate different responses. That is why it is so important to do comparative studies between the theoretical outcomes and the experimental results obtained from wind tunnel tests, as well as from prototypes monitoring.

For the comparative studies, this work makes use of the experimental results given by the International HFBB Comparison Project in terms of base bending moments in a standardized building. The results were carried out by eight different wind tunnel facilities around the world by means of the HFBB technique. Other experimental results were also considered in terms of displacements at the top of a very similar building. These experimental results are compared to those obtained for the same wind conditions from theoretical procedures given by the Brazilian code NBR 6123/1988 and the Eurocode 1-4/2005. For this comparative studies it was also used the results from a modal analysis in the frequency domain performed with a finite element model.

The theoretical – experimental comparison shows that the Eurocode 1-4/2005 procedures and the frequency domain modal solution yield results that correlate favorably with the experimental counterpart for the cases studied. On the other hand, the NBR 6123/1988 procedure underestimates the dynamic wind responses by approximately 50%.

Hence, it is proposed in this work the adoption of a new set of abacuses to update the procedures of the Brazilian code NBR 6123/1988, in order to yield consistent results closer to those obtained in the experimental measurements.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	
INTRODUÇÃO	24
1.1. Motivação	1
1.1.1. Estudos realizados por Carvalho (2015).....	1
1.1.2. Estudos realizados por Cardoso (2011).....	1
1.2. Objetivos e Metodologia	2
1.3. Apresentação do trabalho	2
CAPÍTULO 2	
VENTO NA ENGENHARIA CIVIL	4
2.1. Ventos na atmosfera	4
2.2. Vento nas proximidades da superfície.....	4
2.3. Velocidade média e velocidade flutuante.....	5
2.4. Perfil vertical de velocidade média $U(z)$	6
2.4.1. Lei potencial	6
2.4.2. Lei Logarítmica	7
2.4.3. Correlação entre lei logarítmica e lei potencial.....	7
2.5. Velocidade flutuante (efeito da turbulência).....	8
2.5.1. Desvio padrão, σu	9
2.5.2. Intensidade da turbulência, I_{iz}	10
2.5.3. Espectro da turbulência	12
2.5.4. Espectro cruzado de turbulência, S_{ui}, u_k	14
CAPÍTULO 3	
ANÁLISE DINÂMICA DE ESTRUTURAS SOB AÇÃO DE VENTO	
TURBULENTO	15
3.1. Introdução.....	15
3.2. Resumo da resposta dinâmica de um sistema de um grau de liberdade.....	15
3.3. Formulação modal para um sistema discretizado.....	17

3.4.	Força aerodinâmica de arrasto	20
3.4.1.	Força devida ao vento em estruturas de pequenas dimensões em repouso	20
3.4.2.	Força devida ao vento em estruturas de pequenas dimensões em movimento	22
3.4.3.	Forças devidas ao vento em estruturas alargadas e alteadas	22
3.5.	Processo de Davenport (fator de rajada).....	23
3.5.1.	Conceitos gerais.....	23
3.5.2.	Determinação do desvio padrão da resposta em deslocamentos	26
3.5.3.	Estimativa da resposta máxima ou de pico.....	28
3.6.	Solução modal no domínio da frequência	28
3.6.1.	Desvio padrão de amplitude modal	28
3.6.2.	Forças Nodais Equivalentes.....	29
3.6.3.	Esforços solicitantes de pico da análise no domínio da frequência.....	29
3.7.	Métodos experimentais em túnel de vento	31
3.7.1.	Método HFBB “high frequency based balance”	31
3.7.2.	Método HFPI high frequency pressure integration, integração das pressões.	32
3.7.3.	Modelo aerolástico [Balança 3d tipo “stick” (BD3GDL)]	33
CAPÍTULO 4		
PROCEDIMENTOS NORMATIVOS		
4.1.	Processos da NBR 6123/1988	35
4.1.1.	Análise estática (4.2 da NBR 6123/1988)	35
4.1.2.	Método dinâmico simplificado (9.3.1 da NBR 6123/1988)	36
4.1.3.	Método dinâmico discreto (9.3.2 da NBR 6123/1988)	37
4.2.	Processo do Eurocódigo 1-4/2005	41
4.2.1.	Pressão de vento de pico.....	41
4.2.2.	Forças exercidas pelo vento.....	42
4.2.3.	Coeficiente estrutural cscd	43
4.2.4.	Procedimento 1 para a determinação do Coeficiente estrutural cscd (ANEXO B do Eurocódigo 1-4/2005)	43
4.2.5.	Procedimento 2 para a determinação do Coeficiente estrutural cscd (ANEXO C do Eurocódigo 1-4/2005)	45

CAPÍTULO 5

EXEMPLOS NUMÉRICOS/EXPERIMENTAIS	46
5.1. CHAMINÉ	46
5.1.1. Características da chaminé	46
5.1.2. Características do vento	48
5.1.3. Análise estática da chaminé.....	49
5.1.4. Análise dinâmica da chaminé pelo método simplificado da NBR 6123/1988 (Item 9.3.1)	53
5.1.5. Análise dinâmica da chaminé pelo método dinâmico discreto da NBR 6123/1988 (Item 9.3.2)	53
5.1.6. Análise dinâmica da chaminé pelo método do Eurocódigo 1-4/2005	54
5.1.7. Análise dinâmica da chaminé no domínio da frequência	56
5.1.8. Resultados da chaminé (deslocamentos calculados com o uso de SAP2000).....	58
5.2. PREDIO B “BENCHMARK BUILDING FOR THE INTERNATIONAL HFBB COMPARISON PROJECT”	59
5.2.1. Projeto “ <i>International HFBB Comparison Project</i> ”	59
5.2.2. Características do prédio B.....	60
5.2.3. Características do vento a simular do “HFBB comparison project”	61
5.2.4. Resultados experimentais do “ <i>International HFBB Comparison Project</i> ” ...	61
5.2.5. Parâmetros para o cálculo das forças de arrasto	63
5.2.6. Análise dinâmica do prédio B pelo método da NBR 6123/1988	67
5.2.7. Análise dinâmica do prédio B pelo método do Eurocódigo 1-4/2005	71
5.2.8. Análise dinâmica do prédio B com a solução numérica no domínio da frequência	74
5.2.9. Análise comparativa dos métodos teóricos	77
5.2.10. Comparação teórico-experimental.....	79
5.2.11. Análise estática do prédio B	87
5.3. CAARC (STANDARD TALL BUILDING)	90
5.3.1. Características do prédio CAARC.....	90
5.3.2. Características do vento medido por Oliveira (2009).....	92
5.3.3. Resultados experimentais CAARC	93

5.3.4. Modelos de vento equivalente	95
5.3.5. Comparação teórico-experimental.....	97
CAPÍTULO 6	
PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO MÉTODO DISCRETO	
DA NBR 6123/1988	101
6.1. Método discreto modificado	101
6.1.1. Fundamento teórico do método discreto modificado	101
6.1.2. Estimativa do co-espectro normalizado médio, $\Psi_{med}(f)$	102
6.1.3. Metodologia para o cálculo do Coeficiente Corretor, C_{corr}	103
6.2. Novos Ábacos para a NBR 6123/1988.....	105
CAPÍTULO 7	
CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PROSEGUIMENTO DESTE	
TRABALHO.....	110
7.1. Conclusões.....	110
7.1. Sugestões para prosseguimento daste trabalho.....	111
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	112
ANEXO A	
NOVOS ÁBACOS DO ITEM 9. DA NBR 6123/1988 PARA O CÁLCULO DO	
COEFICIENTE DE AMPLIFICAÇÃO DINÂMICA OU FATOR DINÂMICO,	
ξ.....	116

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 2. 1</i>	<i>Perfis de vento dependendo da rugosidade do terreno. (FIU,2016).....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 2. 2</i>	<i>Perfil vertical da velocidade do vento; z_0 é o comprimento de rugosidade e z_d é o deslocamento do plano “zero”.....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 2. 3</i>	<i>Velocidades de vento durante uma rajada no domínio do tempo, (Deacon, 1955 apud Holmes, 2015).....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 2. 4</i>	<i>Representação vetorial das componentes da velocidade de um ponto para um tempo t.</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2. 5</i>	<i>Perfis de velocidades médias de vento para as rugosidades da Cat II e V (NBR 6123/1988) com $U(10m)=20$ m/s. Leis potencial e logarítmica. ...</i>	<i>8</i>
<i>Figura 2. 6</i>	<i>Desenho de vento turbulento num túnel de vento. (Koss, 2014)</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2. 7</i>	<i>Intensidade local da turbulência longitudinal para as cinco categorias de terreno da NBR 6123/1988 calculadas com as eq. (2. 10) e (2. 13), com dados z_0 e Cas da Tabela 2. 1.</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2. 8</i>	<i>Espectros adimensionais da velocidade flutuante. $U(10)=20$m/s, $z=10$m, $z_0=300$mm.</i>	<i>13</i>
<i>Figura 3. 1</i>	<i>Esquemas típicos de sistemas de um grau de liberdade.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 3. 2</i>	<i>Esquema do processo no domínio da frequência.</i>	<i>20</i>
<i>Figura 3. 3</i>	<i>Admitância aerodinâmica, para $A = 30m^2$ e $U = 20$m/s.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 3. 4</i>	<i>Processo probabilístico de Davenport.</i>	<i>25</i>
<i>Figura 3. 5</i>	<i>Função densidade espectral da resposta e área sob o gráfico para cálculo da variância da resposta (adaptado por Davenport, 1967).</i>	<i>26</i>
<i>Figura 3. 6</i>	<i>(a) Esquema do modelo HFBB (b) forças na base que ele mede.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 3. 7</i>	<i>Modelo de tomada de pressões do CAARC, (Oliveira, 2009).</i>	<i>33</i>
<i>Figura 3. 8</i>	<i>Perspectiva do modelo e da balança dinâmica de 3 graus de liberdade BD3GDL desenhada por Oliveira (2009).</i>	<i>34</i>
<i>Figura 4. 1</i>	<i>Formas modais para diferentes expoente γ. Função z/h^γ.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 5. 1</i>	<i>Geometria e modelo da chaminé.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 5. 2</i>	<i>Três primeiros modos naturais de vibração da chaminé:.....</i>	<i>47</i>

Figura 5. 3	Perfis de velocidades do vento utilizados para o cálculo com a NBR 6123/1988 e o Eurocódigo 1-4/2005.	49
Figura 5. 4	Resultados das forças estáticas equivalentes calculadas com a NBR 6123/1988 e com o Eurocódigo 1-4/2005.	51
Figura 5. 5	Forças calculadas para a análise dinâmica com o método discreto.	54
Figura 5. 6	Resultados das forças equivalentes calculadas com o Eurocódigo 1-4/2005.	56
Figura 5. 7	Espectro de Harris, $S_u(f)$ (direita) e Espectro de força generalizada para o 1° modo, $S_p, 1(f)$ (esquerda).	57
Figura 5. 8	Função de admitância mecânica H_{f2} (direita) e Espectro de resposta de amplitude $S_a, j(f)$ (esquerda) da chaminé para o 1° modo.	57
Figura 5. 9	(a) Volume do Prédio B e eixos de referência. (IAWE, 2009).	60
Figura 5. 10	Momento médio na base M_y . $U_{ref180} = 20$ m/s. IAWE(2012).	62
Figura 5. 11	Momento médio na base M_x . $U_{ref180} = 20$ m/s. IAWE(2012).	62
Figura 5. 12	Momento mínimo na base M_y , $\zeta=1\%$. $U_{ref180} = 20$ m/s. IAWE(2012).	63
Figura 5. 13	Momento máximo na base M_x , $\zeta=1\%$. $U_{ref180} = 20$ m/s. IAWE(2012).	63
Figura 5. 14	Perfis verticais das velocidades médias $U_{ref} = 20; 30$ e 40 m/s.	65
Figura 5. 15	Discretização das fachadas do prédio B em áreas nodais na direção perpendicular ao vento.	66
Figura 5. 16	Coef. de amplificação dinâmica, ζ , Figura 17 da NBR 6123/1988. Extração dos dados de ζ para o amortecimento $\zeta=0,01$ e $\zeta=0,02$; para $l1/h = 0$ e $l1/h \geq 0,2$. Para o vento na direção X.	68
Figura 5. 17	Coef. De amplificação dinâmica, ζ . Cálculo de ζ para $h=180$ m. $\zeta=0,01$, $\zeta=0,02$ e $\zeta=0,025$; e para $l1/h = 0$ e $l1/h \geq 0,2$	68
Figura 5. 18	Coef. de amplificação dinâmica, ζ . Cálculo de ζ para $h=180$ m, e $\zeta=0,025$; e para $l1/h = 0,17$	69
Figura 5. 19	Distribuição de forças ao longo da altura obtida pela NBR 6123/1988 para o prédio B; Cat IV; $U_{ref}=20$ m/s; vento na dir X ; para $\zeta=0,01$ e $\zeta=0,025$	70

Figura 5. 20	Distribuição de forças ao longo da altura obtida pela NBR 6123/1988 para o prédio B; Cat IV; $U_{ref}=20$ m/s; vento na dir Y ; para $\zeta=0,01$ e $\zeta=0,025$	70
Figura 5. 21	Distribuição de forças ao longo da altura obtida pelo Eurocódigo 1-4/2005 (Anexo B) para o prédio B para $U_{ref}=20$ m/s, vento na dir X , para $\zeta=0,01$ e $\zeta=0,025$	73
Figura 5. 22	Distribuição de forças ao longo da altura obtida pelo Eurocódigo 1-4/2005 (Anexo B) para o prédio B para $U_{ref}=20$ m/s, vento na dir Y , para $\zeta=0,01$ e $\zeta=0,025$	73
Figura 5. 23	Espectro de Harris adimensionaliz. para $U_{ref}=20$ m/s e $\sigma u=2,86$ m/s... 74	74
Figura 5. 24	Densidade espectral da força modal para $U_{ref}=20$ m/s com vento na dir X e dir Y	75
Figura 5. 25	Função de admitância mecânica da estrutura H_f2 para vento na dir X e dir Y para a taxa de amortecimento $\zeta=0,01$	75
Figura 5. 26	Espectro de resposta de amplitude $S_a, j(f)$ do Prédio B para $U_{ref}=20$ m/s para vento na dir X e dir Y para $\zeta=0,01$	75
Figura 5. 27	Distribuição de forças ao longo da altura obtida da solução numérica no domínio da frequência para o prédio B para $U_{ref}=20$ m/s, vento na dir X , para $\zeta=0,01$ e $\zeta=0,025$	76
Figura 5. 28	Distribuição de forças ao longo da altura obtida da solução numérica no domínio da frequência para o prédio B para $U_{ref}=20$ m/s, vento na dir Y , para $\zeta=0,01$ e $\zeta=0,025$	76
Figura 5. 29	Distribuição de forças médias das análises dinâmicas para $U_{ref}=20$ m/s com vento na dir X e dir Y	77
Figura 5. 30	Comparativa das forças flutuantes das análises dinâmicas calculadas com a Cat IV da NBR 6123/1988 , o domínio da frequência e o Eurocódigo 1-4/2005 ; $U_{ref}=20$ m/s; vento na dir X ; $\zeta=0,01$ e $\zeta=0,025$	78
Figura 5. 31	Comparativa das forças flutuantes das análises dinâmicas calculadas com a Cat IV da NBR 6123/1988 , o domínio da frequência e o Eurocódigo 1-4/2005 ; $U_{ref}=20$ m/s; vento na dir Y ; $\zeta=0,01$ e $\zeta=0,025$	78

<i>Figura 5. 32</i>	<i>Resultados para Mom Y na base obtidos para o vento na dir X e $\zeta=1\%$. *Dados de (Holmes, 2013), para a norma australiana e norteamericana.</i>	82
<i>Figura 5. 33</i>	<i>Resultados para Mom Y na base obtidos para o vento na dir X e $\zeta=2,5\%$.</i>	83
<i>Figura 5. 34</i>	<i>Resultados para Mom Y na base obtidos para o vento na dir Y e $\zeta=1\%$...</i>	84
<i>Figura 5. 35</i>	<i>Resultados para Mom Y na base obtidos para o vento na dir X e $\zeta=2,5\%$.</i>	85
<i>Figura 5. 36</i>	<i>Momentos estáticos máximos na base obtidos para as velocidades de referência no topo $U_{ref} = 20 ; 30$ e 40 m/s, para vento na dir X e dir Y.</i>	88
<i>Figura 5. 37</i>	<i>Resultados da análise estática com o uso da NBR 6123/1988 e do Eurocódigo 1-4/2005 para $U_{ref} = 20$ e vento na dir X e dir Y.....</i>	89
<i>Figura 5. 38</i>	<i>Resultados da análise estática com o uso da NBR 6123/1988 e do Eurocódigo 1-4/2005 para $U_{ref} = 40$ e vento na dir X e dir Y.....</i>	89
<i>Figura 5. 39</i>	<i>Razão entre Momento fletor na base e o coeficiente de arrasto em função da velocidade média no topo $\bar{U}_{ref} = 20 ; 30$ e 40 m/s, para vento na dir X e dir Y.....</i>	90
<i>Figura 5. 40</i>	<i>Geometria do CAARC Standard Tall Building e modelo para o cálculo de deslocamentos.....</i>	91
<i>Figura 5. 41</i>	<i>Características do vento simulado: (a) perfil vertical de velocidades; (b) perfil vertical da intensidade da componente longitudinal da turbulência; (c) macroescala da componente longitudinal da turbulência. (Oliveira, 2009).....</i>	93
<i>Figura 5. 42</i>	<i>Ângulos de incidência do vento para ensaios com o modelo isolado. ...</i>	94
<i>Figura 5. 43</i>	<i>Deslocamentos horizontais normalizados no topo do modelo na direção Y para o prédio isolado: (a) médio, (b) desvio padrão e (c) máximo (maior deslocamento absoluto). (Oliveira, 2009).</i>	94
<i>Figura 5. 44</i>	<i>Deslocamentos horizontais normalizados no topo do modelo na direção X para o prédio asilado: (a) médio, (b) desvio padrão e (c) máximo (maior deslocamento absoluto). (Oliveira, 2009).</i>	95
<i>Figura 5. 45</i>	<i>Perfis verticais das velocidades médias consideradas para o caso de $U_{ref} 182,88 = 20$ m/s.</i>	96

<i>Figura 5. 46</i>	<i>Deslocamentos no topo do prédio para o vento na direção X e $\zeta=1\%$.</i>	<i>99</i>
<i>Figura 5. 47</i>	<i>Deslocamentos no topo do prédio para o vento na direção Y e $\zeta=1\%$.</i>	<i>100</i>
<i>Figura 6. 1</i>	<i>Ábaco para o cálculo do do fator dinâmico, ξ, para terreno de categoria IV e taxa de amortecimento $\zeta=1\%$.</i>	<i>106</i>
<i>Figura 6. 2</i>	<i>Comparação dos momentos flutuantes obtidos com o método no domínio da frequência, o método da NBR 6123/1988 e método discreto modificado (com o uso das tabelas do Anexo A), para o prédio B do HFBB, amortecimento $\zeta=0,016$ e categoria de terreno I.</i>	<i>108</i>
<i>Figura 6. 3</i>	<i>Comparação dos momentos flutuantes obtidos com o método no domínio da frequência, o método da NBR 6123/1988 e método discreto modificado (com o uso das tabelas do Anexo A), para o prédio B do HFBB, amortecimento $\zeta=0,016$ e categoria de terreno V.</i>	<i>109</i>
<i>Figura A. 1</i>	<i>Coefficiente de amplificação dinâmica, ξ, para terreno de categoria I.</i>	<i>119</i>
<i>Figura A. 2</i>	<i>Coefficiente de amplificação dinâmica, ξ, para terreno de categoria II.</i>	<i>122</i>
<i>Figura A. 3</i>	<i>Coefficiente de amplificação dinâmica, ξ, para terreno de categoria III.</i>	<i>125</i>
<i>Figura A. 4</i>	<i>Coefficiente de amplificação dinâmica, ξ, para terreno de categoria IV.</i>	<i>128</i>
<i>Figura A. 5</i>	<i>Coefficiente de amplificação dinâmica, ξ, para terreno de categoria V.</i>	<i>131</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 2. 1</i>	<i>Parâmetros de rugosidade adotados pela NBR 6123/1988. Para altura de referência $z_{ref} = 10m$ e valor médio horário ($t=3600seg$) (Blessmann, 1995).</i>	7
<i>Tabela 5. 1</i>	<i>Características geométricas do modelo da chaminé.</i>	47
<i>Tabela 5. 2</i>	<i>Características nodais do modelo da chaminé.</i>	48
<i>Tabela 5. 3</i>	<i>Iteração do intervalo de tempo t.</i>	50
<i>Tabela 5. 4</i>	<i>Resultados nodais da análise estática da chaminé (Item 4 da NBR 6123/1988).</i>	52
<i>Tabela 5. 5</i>	<i>Resultados da análise estática com o Eurocódigo 1-4/2005.</i>	52
<i>Tabela 5. 6</i>	<i>Resultados de pressão e forças nodais pelo método simplificado da NBR 6123/1988 da chaminé.</i>	53
<i>Tabela 5. 7</i>	<i>Resultados do método do modelo discreto da NBR 6123/1988 para a chaminé.</i>	54
<i>Tabela 5. 8</i>	<i>Coefficiente estrutural c_{scd} (Anexo B, procedimento 1 Eurocódigo 1-4/2005); $\zeta = 1\%$.</i>	55
<i>Tabela 5. 9</i>	<i>Coefficiente estrutural c_{scd} (Anexo C, procedimento 2 Eurocódigo 1-4/2005); $\zeta = 1\%$.</i>	55
<i>Tabela 5. 10</i>	<i>Resultados da análise dinâmica do Eurocódigo 1-4/2005 para $\zeta = 1\%$.</i>	55
<i>Tabela 5. 11</i>	<i>Resultado das respostas da chaminé com os métodos aplicados.</i>	58
<i>Tabela 5. 12</i>	<i>Parâmetros do vento do “International HFBB Comparison Project” e os das categorias III e IV da NBR 6123/1988.</i>	64
<i>Tabela 5. 13</i>	<i>Valores das velocidades básicas de vento V_0.</i>	64
<i>Tabela 5. 14</i>	<i>Determinação dos parâmetros de vento para o cálculo do perfil de vento a usar no Eurocódigo 1-4/2005.</i>	64
<i>Tabela 5. 15</i>	<i>Coefficientes de arrasto das diferentes análises.</i>	66
<i>Tabela 5. 16</i>	<i>Resultados dos coeficientes de amplificação dinâmica.</i>	69
<i>Tabela 5. 17</i>	<i>Parâmetros de Intensidade da turbulência e de pressão dinâmica de pico no topo do prédio pelo Eurocódigo 1-4/2005.</i>	71
<i>Tabela 5. 18</i>	<i>Resultados do Fator Estrutural, c_{scd}, com o uso do ANEXO B do Eurocódigo 1-4/2005.</i>	71

<i>Tabela 5. 19</i>	<i>Resultados do Fator Estrutural, c_{scd}, com o uso do ANEXO C do Eurocódigo 1-4/2005.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabela 5. 20</i>	<i>Resultados obtidos das análises dinâmicas para momentos máximos na base do prédio B nos planos XZ e YZ.....</i>	<i>86</i>
<i>Tabela 5. 21</i>	<i>Intervalos de tempo para o cálculo de S2.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabela 5. 22</i>	<i>Coefficiente de dimensão c_s para $z_s = 108$ m.</i>	<i>87</i>
<i>Tabela 5. 23</i>	<i>Resultados para momentos estáticos máximos na base obtidos para as velocidades características $U_{ref} = U_{3600}$ seg180= 20 ; 30 e 40 m/s.</i>	<i>88</i>
<i>Tabela 5. 24</i>	<i>Valores das velocidades de básicas de vento V_0 para a Cat V.....</i>	<i>95</i>
<i>Tabela 5. 25</i>	<i>Valores das velocidades de básicas de vento v_b para $z_0 = 1,75$m..</i>	<i>96</i>
<i>Tabela 6. 1</i>	<i>Cálculos de diferentes prédios para estimar o valor do Coeficiente Corretor, C_{corr} para amortecimento nas estruturas de 1%. $\zeta = 0,01$.</i>	<i>104</i>
<i>Tabela 6. 2</i>	<i>Resultados gerados com o método discreto modificado e o método no domínio da frequência para o prédio B do HFBB. $\zeta=0,016$.</i>	<i>108</i>
<i>Tabela A. 1</i>	<i>Coefficiente de amplificação dinâmica, ξ, para terreno de categoria I e taxa de amortecimento $\zeta=0,01$.</i>	<i>120</i>
<i>Tabela A. 2</i>	<i>Coefficiente de amplificação dinâmica, ξ, para terreno de categoria I e taxa de amortecimento $\zeta=0,02$.</i>	<i>121</i>
<i>Tabela A. 3</i>	<i>Coefficiente de amplificação dinâmica, ξ, para terreno de categoria II e taxa de amortecimento $\zeta=0,01$.</i>	<i>123</i>
<i>Tabela A. 4</i>	<i>Coefficiente de amplificação dinâmica, ξ, para terreno de categoria II e taxa de amortecimento $\zeta=0,02$.</i>	<i>124</i>
<i>Tabela A. 5</i>	<i>Coefficiente de amplificação dinâmica, ξ, para terreno de categoria III e taxa de amortecimento $\zeta=0,01$.</i>	<i>126</i>
<i>Tabela A. 6</i>	<i>Coefficiente de amplificação dinâmica, ξ, para terreno de categoria III e taxa de amortecimento $\zeta=0,02$.</i>	<i>127</i>
<i>Tabela A. 7</i>	<i>Coefficiente de amplificação dinâmica, ξ, para terreno de categoria IV e taxa de amortecimento $\zeta=0,01$.</i>	<i>129</i>
<i>Tabela A. 8</i>	<i>Coefficiente de amplificação dinâmica, ξ, para terreno de categoria IV e taxa de amortecimento $\zeta=0,02$.</i>	<i>130</i>

<i>Tabela A. 9</i>	<i>Coeficiente de amplificação dinâmica, ξ, para terreno de categoria V e taxa de amortecimento $\zeta=0,01$.</i>	<i>132</i>
<i>Tabela A. 10</i>	<i>Coeficiente de amplificação dinâmica, ξ, para terreno de categoria V e taxa de amortecimento $\zeta=0,02$.</i>	<i>133</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras romanas maiúsculas:

A	Área efetiva da estrutura toda.
A_0	Área de referência arbitraria.
$A_k; A_i$	Área efetiva associada ao nó k e i .
B^2	Fator da resposta quase-estática, “background factor”.
C	Matriz de amortecimento.
C_a	Coefficiente de arrasto.
$C_{a_k}; C_{a_i}$	Coefficiente de arrasto associado ao nó k e i .
C_{as}	Coefficiente de arrasto superficial.
C_{corr}	Coefficiente corretor. =1,29.
$C_y; C_z$	Coefficiente de decaimento experimentais da correlação espacial em y e z .
$F(t)$	Vetor de forças nodais externas.
\hat{F}	Vetor de forças nodais flutuantes equivalentes.
$F(x, y, z, t)$	Força de arrasto no instante t nas coordenadas x, y, z .
$\bar{F}(z)$	Força estática associada a velocidade média \bar{U} .
$\hat{F}(x, y, z, t)$	Força flutuante.
F_H	Força H.
$F_{r,II}$	Fator de ajuste do intervalo de tempo estimado.
$F_{j,i}$	Força total de pico sobre o nó i para o modo j .
$\bar{F}_{j,i}$	Força média sobre o nó i para o modo j .
$\hat{F}_{j,i}$	Força flutuante de pico sobre o nó i para o modo j .
F_w	Força exercida pelo vento sobre uma estrutura ou parte dela com o cálculo do Eurocódigo 1-4/2005.
G	Fator de rajada.
$ H(f) ^2$	Função de admitância mecânica.
$I_i(z)$	Intensidade local da turbulência na altura z para a componente $i=u, v, w$.
K	Matriz de rigidez.
L	Comprimento de escala da turbulência no espectro de Harris, $L = 1800m$.
$L(z)$	Comprimento de escala da turbulência no espectro ESDU função de z .
$L1$	Largura da construção.
$L2$	Profundidade da construção.
L_t	Escala de referência (=300m).

M	Matriz de massa.
R^2	Fator da resposta ressonante para a frequência natural, f_n .
R_h, R_b	Funções de admitância aerodinâmica.
S_1	Fator topográfico.
S_2	Fator que considera rugosidade, dimensões e a altura sobre a superfície.
S_3	Fator probabilísticos de uso.
$S_{a_j}(f)$	Espectro da amplitude (a_j) do modo j .
$S_F(f)$	Espectro da força de vento.
$S_{F_k, F_i}(k, i, f)$	Espectro cruzado das forças nodais k e i função da frequência f .
$S_{p_j}(f)$	Espectro da força modal do modo j .
$S_L(z, f)$	Espectro de vento flutuante adimensional função de z e f .
$S_u(f)$	Espectro de vento flutuante função de f .
$S_u(z, f)$	Espectro de vento flutuante função de z e f .
$S'_u(f)$	Espectro normalizado do vento flutuante, $\sigma_u^2 = 1$.
$S_{u,i}(f)$	Espectro da velocidade flutuante no nó i na direção u .
$S_{u,k}(f)$	Espectro da velocidade flutuante no nó k na direção u .
$S_x(f)$	Espectro do deslocamento na direção x .
T	Intervalo de tempo da estimativa.
$\mathbf{U}(x, y, z, t)$	Vetor velocidade de vento no instante t .
$U(t)$	Velocidade absoluta do vento.
$U_{rel}(t)$	Velocidade relativa do vento.
$\bar{\mathbf{U}}(z)$	Vetor de velocidade média na altura z .
\bar{U}_{ref}	Velocidade média na altura de referência z_{ref} .
$\bar{U}_k ; \bar{U}_i$	Velocidade média na altura do nó k e i .
$\bar{U}(10)$	Velocidade média na altura $10m$.
$\bar{U}(z)$	Velocidade média na altura z .
$\bar{U}_m(z_i, z_k)$	Velocidade média do vento entre os pontos i e k .
V_0	Velocidade básica do vento, $\bar{U}_{3seg}(10)$. Rajada excedida cada 50 anos.
\bar{V}_p	Velocidade de projeto, $\bar{U}_{600seg}(10)$.
$V_t(h)$	Velocidade média do vento sobre t segundos na altura h .
$\mathbf{X}; \dot{\mathbf{X}}; \ddot{\mathbf{X}}(t)$	Vetor de deslocamentos, velocidades e acelerações nodais função de t .
X_1	Frequência adimensionalizada no espectro de Harris.

Letras romanas minúsculas:

$\mathbf{a}(t)$	Vetor coluna amplitude das coordenadas normais.
$a_j; \dot{a}_j; \ddot{a}_j(t)$	Amplitude, primeira e segunda derivada função do tempo do modo j .
b	Coefficiente de ajuste da rugosidade do terreno.
c	Coefficiente de amortecimento do sistema de un grau de liberdade.
c_d	Coefficiente dinâmico.
$c_0(z)$	Coefficiente de orografia.
$c_e(z)$	Coefficiente de exposição
c_f	Coefficiente de arrasto ou força calculado com o Eurocódigo 1-4/2005.
c_{dir}	Coefficiente de direção.
$c_r(z)$	Coefficiente de rugosidade
c_{season}	Coefficiente de sazão.
$c_s c_d$	Coefficiente estrutural.
c_s	Coefficiente de dimensão da estrutura.
h	Altura da estrutura.
f	Frequência em Hz .
f_j	Frequência natural da estrutura, como Item 9. da NBR 6123/1988
f_L	Frequência adimensionalizada.
f_n	Frequência natural da estrutura.
g	Fator de pico.
k	Rigidez do sistema de un grau de liberdade.
\bar{k}_j	Rigidez modal associada a cada modo j de vibração.
k_l	Coefficiente de turbulencia.
k_p	Fator de pico calculado com o Eurocódigo 1-4/2005.
k_r	Coefficiente de terreno.
m	Massa do sistema de un grau de liberdade.
m_i	Massa associada ao nó i .
\bar{m}_j	Massa generalizada ou modal do modo j .
p	Exponente que depende da rugosidade do terreno.
\bar{p}_j	Força modal associada a cada modo j de vibração.
q	Pressão dinâmica do vento.
q_b	Pressão dinâmica de referência para a velocidade de referência v_b .
\bar{q}_0	Pressão dinâmica do vento para a velocidade de projeto \bar{V}_p .

q_{ref}	Pressão dinâmica de referência.
$q_p(z_e)$	Pressão dinâmica de pico à altura de referência z_e .
u, v, w	Componentes da velocidade nas direções cartesianas x, y e z .
u^*	Velocidade cisalhante.
v_b	Valor de referência da velocidade do vento.
$v_{b,0}$	Valor básico da velocidade de referência do vento. $\bar{U}_{600seg}(10)$.
$x; \dot{x}; \ddot{x}(t)$	Deslocamento, velocidade e aceleração função do tempo t .
x_{max}	Resposta ou deslocamento máximo absoluto.
\bar{x}	Resposta ou deslocamento médio.
\hat{x}_{max}	Resposta ou deslocamento flutuante máximo.
$y_i; y_k$	Coordenada y do nó i e k .
z	Altura sobre a superfície.
z_0	Comprimento de rugosidade.
$z_{0,II}$	Comprimento de rugosidade de referência ($= 0,05m$).
z_g	Altura da camada limite.
$z_i; z_k$	Coordenada z do nó i e k .
z_m	Altura média entre os pontos i e k .
z_{max}	Altura máxima a ser considerada nos cálculos com o Eurocódigo 1-4/2005.
z_{min}	Altura mínima a ser considerada nos cálculos com o Eurocódigo 1-4/2005.
z_r	Altura de referência ($=10m$).
z_{ref}	Altura de referência.
z_s	Altura de referência para a determinação do coeficiente estrutural $c_s c_d$
z_t	Altura de referência ($=200m$).

Letras gregas:

β	Exponente experimental para o cálculo do co-espectro normalizado. $\beta=0,3$.
β_σ	Fator experimental para o cálculo aproximado de σ_u .
γ	Exponente que define a forma modal.
γ_{euler}	Constante de Euler $\gamma = 0,5772$.
δ	Decremento logarítmico total. $\delta = 2 \pi \zeta$
κ	Constante de Von Kármán. $\kappa = 0,4$.
ν	Frequência representativa. Para sistemas de baixo amortecimento $\nu \approx f_n$

ξ	Fator dinâmico (Coeficiente de amplificação dinâmica na NBR 6123/1988)
ω	Frequência angular de excitação.
ω_j	Frequência circular natural do modo j .
ω_n	Frequência natural anular da estrutura (rad/seg).
ρ	Massa específica do ar.
σ_{a_j} e σ_{a_l}	Desvio padrão da amplitude do modo j e l .
$\sigma_i(z)$	Desvio padrão da velocidade flutuante para a componente $i=u, v, w$.
σ_u	Desvio padrão da velocidade flutuante na direção x .
$\sigma_{u,ref}$	Desvio padrão na altura de referência z_{ref} .
σ_x	Desvio padrão da resposta/deslocamento flutuante.
$\sigma_{a_j}^2$	Variância da amplitude do modo j .
σ_u^2	Variância das velocidades do vento flutuante na direção x .
σ_x^2	Variância do deslocamento flutuante na direção x .
$\sigma_{x,k}^2$	Variância do deslocamento x no nó k .
$\sigma_{x,j}^2$	Variância do deslocamento flutuante na direção x para o modo j .
Φ	Matriz modal de auto-vetores.
$\phi_{j,i}; \phi_{j,k}$	Componente do autovetor normalizado do nó i ou k do modo j .
$\chi(f)$	Admitância aerodinâmica.
Ψ_i	Massa adimensionalizada.
$\Psi_u(i, k, f)$	Função de co-espectro normalizado.
$\Psi_{u_{med}}(f)$	Co-espectro normalizado médio da estrutura toda.
ζ	Taxa de amortecimento da estrutura.
ζ_{aer}	Taxa de amortecimento aerodinâmico.
ζ_{est}	Taxa de amortecimento mecânico ou estrutural.
Δr	Comprimento entre as coordenadas $(y_k; z_k)$ e $(y_i; z_i)$

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

Esta dissertação dá sequência aos trabalhos de mestrado na COPPE de Cardoso (2011) e Carvalho (2015) que abordaram de forma comparativa métodos teóricos para estimativa da resposta dinâmica de edificações sob a ação de vento turbulento, encontrando expressivas divergências de resultados em alguns casos. Foram utilizados procedimentos normativos e desenvolvidas soluções nos domínios do tempo e da frequência para determinação de respostas em termos de deslocamentos e esforços. No presente trabalho estes estudos comparativos são estendidos para incluir resultados experimentais da literatura.

1.1.1. Estudos realizados por Carvalho (2015)

Carvalho (2015), apresenta um estudo comparativo entre resultados obtidos de soluções numéricas nos domínios do tempo e da frequência com o intuito de avaliar o número de modos de vibração a serem incluídos na análise para se alcançar uma boa precisão nas respostas em termos de deslocamentos e esforços solicitantes de pico. Foram utilizados exemplos de prédios apertados de concreto de nove andares (31m) e largura variável.

As soluções no domínio da frequência foram desenvolvidas em dois formatos: o de análise modal como adotado no método discreto indicado pela norma NBR 6123/1988 – Forças devidas ao Vento em Edificações, e separando-se a resposta em parcelas quase-permanente (*background*) e ressonante como no método de Davenport.

Para estes exemplos observou-se que apenas o modo fundamental de vibração foi necessário para se obter a resposta de pico em termos de deslocamentos. Já para a obtenção de momento fletor e esforço cortante na base o número de modos de vibração a ser considerado depende do método escolhido no domínio da frequência. Foi verificado que para se obter os esforços flutuantes de pico através da análise modal é necessário um número maior de modos de vibração na análise se comparado ao método de separação da resposta em contribuição quase-permanente e ressonante.

1.1.2. Estudos realizados por Cardoso (2011)

Cardoso (2011) realizou um estudo comparativo entre diferentes métodos para a determinação da resposta máxima em termos de deslocamentos de estruturas alteadas sob ação de vento originado de ciclones extratropicais. Foram analisadas 3 estruturas alteadas,

para o modo fundamental de vibração: uma torre de reservatório de água, uma chaminé de 180m de altura e um edifício de 50m de altura.

Neste trabalho, foram verificadas as respostas através das soluções numéricas modais no domínio do tempo e frequência, além dos métodos normativos da NBR 6123/1988 (Método discreto) e Eurocódigo, e também o processo de Dyrbye e Hansen (1997), que também consideram o fator de rajada do método de Davenport.

Em seu trabalho (Cardoso, 2011) achou boa correlação entre os resultados dos métodos, exceto para o resultado do modelo discreto da NBR 6123/1988, cujo deslocamento máximo foi inferior aos demais métodos. Os resultados foram apenas em termos de deslocamento, para o modo fundamental, de estruturas alteadas. Não foram abordados os resultados em termos esforços solicitantes e nem foi considerada a correlação das pressões na direção transversal ao vento.

1.2. Objetivos e Metodologia

O objetivo desta dissertação é a validação dos métodos teóricos de estimativa de respostas geradas nas estruturas altas sob ação de ventos turbulentos originados de ciclones extratropicais, mediante a elaboração de estudo comparativo entre os resultados de métodos teórico, procedimentos normativos e soluções numéricas com os obtidos de ensaios de modelos reduzidos em túnel de vento disponíveis na literatura.

Os resultados experimentais foram extraídos do “*International HFBB Comparison Project*” (2012), proposto pela *International Association for Wind Engineering* (IAWE), e da tese de doutorado de Oliveira (2009). No primeiro caso ensaios de modelos reduzidos em túnel de vento utilizando a técnica HFBB foram aplicados por diversos laboratórios no mundo a um prédio padrão - um paralelepípedo de 30x45x180 m³, fornecendo resultados em termos de esforços solicitantes de pico na base. O trabalho de Oliveira (2009) utiliza o prédio “*CAARC Standard tall building model*”, um paralelepípedo de 30,48 x 45,72 x 182,88 m³ proposto pela “*Commonwealth Advisory Aeronautical Council*” em 1969, para o qual apresenta resultados em termos de deslocamentos.

Os métodos teóricos utilizados são os seguintes:

- Solução modal numérica no domínio da frequência;
- Procedimentos 1 e 2 do Eurocódigo 1-4/2005.
- Procedimento do item 9 da NBR 6123/1988.

Além de avaliar as normas de projeto atuais objetiva-se propor as modificações necessárias para uma melhor estimativa do comportamento dinâmico no projeto de edificações esbeltas sob ação de vento turbulento por meio da NBR 6123/1988. Neste sentido propõe-se a atualização dos ábacos que compõem o procedimento de cálculo da referida norma.

1.3. Apresentação do trabalho

Os próximos capítulos são apresentados na seguinte sequência.

O capítulo 2 faz uma abordagem sobre os ventos fortes, com ênfase nos ventos originados de ciclones extratropicais, usados nas normas internacionais, apresentando sua descrição física e modelagem matemática.

O capítulo 3 apresenta conceitos fundamentais de análise dinâmica de estruturas sob a ação de vento turbulento. Apresentam-se os métodos baseados na solução no domínio da frequência: método fator rajada proposto por Davenport (1961); formulação da solução modal para modelo numérico. Apresenta-se também um resumo dos métodos experimentais utilizados em modelos reduzidos aerolásticos do tipo *stick model* assim como da técnica HFBB (*High Frequency Base Balance*).

No capítulo 4 descrevem-se os detalhes dos métodos normativos usados na dissertação: os da NBR 6123/1988 e os do *Eurocódigo 1-4/2005 /2010*.

No capítulo 5 são apresentadas as respostas dos métodos expostos nos capítulos 3 e 4 juntamente com as comparações com os resultados experimentais obtidos em túnel de vento para os exemplos estruturais seguintes:

1. Uma chaminé de concreto armado de 180 m de altura (sem resultados experimentais).
2. O prédio B do “*International HFBB Comparison Project*”, um paralelepípedo de 30x45x180 m³ proposto pela IAWA “*International Association for Wind Engineering*”.
3. O prédio “*CAARC Standard tall building model*”, um paralelepípedo de 30,48 x 45,72 x 182,88 m³ proposto pela “*Commonwealth Advisory Aeronautical Council*”.

O capítulo 6 apresenta o modelo discreto modificado com o qual se propõe a correção do cálculo do coeficiente de amplificação dinâmica do item 9 da Norma NBR 6123/1988.

No Anexo A são apresentados os gráficos e tabelas propostos a serem considerados para alteração da Norma NBR 6123/1988.

CAPÍTULO 2

VENTO NA ENGENHARIA CIVIL

2.1. Ventos na atmosfera

Os movimentos atmosféricos segundo Tarbuck e Lutgens (2012) podem ser enquadrados nas seguintes escalas de tempo e espaço:

- *Microescala*: dimensões de menos de 1 km e tempos de vida de segundos a minutos. São aqueles relacionados com tornados, pequenas rajadas e redemoinhos;
- *Mesoescala*: dimensões de 1 a 100 km e tempos de vida de minutos a dias. São aqueles relacionados com tormentas elétricas;
- *Escala sinótica ou macroescala*: dimensões de 100-5000 km e tempos de vida de dias a semana, basicamente anticiclones e ciclones:
 - *Tropicais*, formados nos oceanos quentes de latitudes pequenas, chamados tormentas tropicais e furacões, de maior intensidade.
 - *Extratropicais*, formados nas frentes frias polares que afetam as latitudes temperadas.
- *Escala planetária*: dimensões de 1000-40000 km e duração de semanas a anos.

Os movimentos observados num ponto da atmosfera terrestre (vento instantâneo com uma velocidade e direção) são uma sobreposição de todas as escalas de movimento. Assim, sistemas e padrões de escalas menores podem ser transportados pelos movimentos de escalas maiores. Mas os sistemas menores podem ter mais influência sobre uma localidade que os maiores nos quais estão imersos.

No restante deste capítulo apresenta-se um resumo de modelos matemáticos para descrever o campo de velocidades de vento em um ciclone extratropical, onde se desenvolvem ventos fortes de interesse da engenharia civil e nos quais baseiam-se as normas de projeto de estruturas. Este resumo baseia-se principalmente nas obras de Blessmann (1995) e Holmes (2015).

2.2. Vento nas proximidades da superfície

Nos níveis atmosféricos próximos a superfície terrestre, os de interesse para o estudo das edificações, as forças de atrito alteram o escoamento do ar, introduzindo um gradiente na velocidade de vento, que depende da rugosidade do terreno, como mostrado nos perfis de velocidades médias na *Figura 2. 1*.

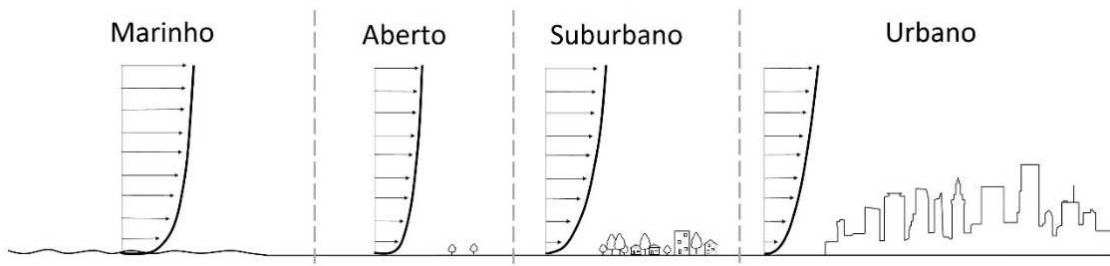


Figura 2.1 Perfis de vento dependendo da rugosidade do terreno. (FIU,2016)

Na Figura 2.2, pode-se observar a *camada limite atmosférica*, definida como a região compreendida entre a superfície e uma altura variável entre 100 e 3000 m que apresenta um comportamento diferente do restante da atmosfera devido às interações superfície-atmosfera.

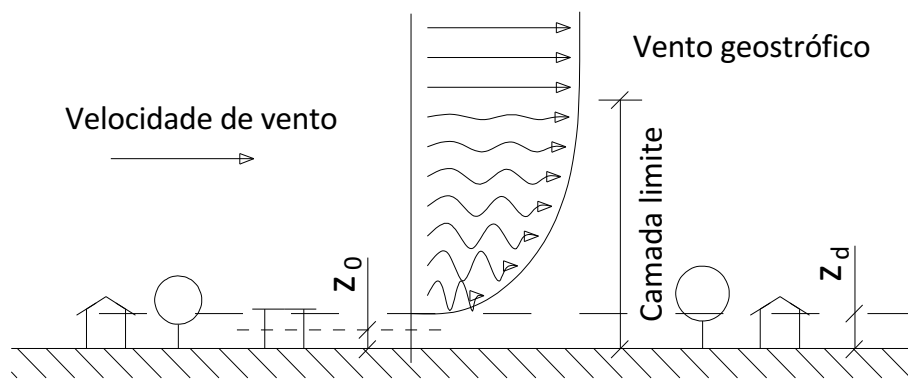


Figura 2.2 Perfil vertical da velocidade do vento; z_0 é o comprimento de rugosidade e z_d é o deslocamento do plano “zero”.

2.3. Velocidade média e velocidade flutuante

Os registros de velocidade de vento, como ilustrado na Figura 2.3, mostram uma velocidade média e no entorno dela uma velocidade flutuante aleatória. Assim a velocidade num ponto de altura z , num tempo t é a soma das duas parcelas de vento, média mais flutuante. É assim que é descrita matematicamente a velocidade num ponto para um vento turbulento.

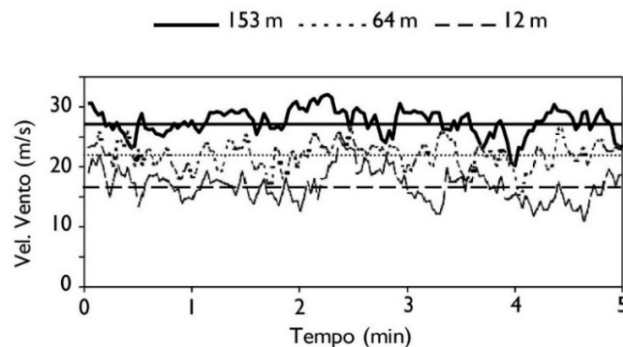


Figura 2.3 Velocidades de vento durante uma rajada no domínio do tempo, (Deacon, 1955 apud Holmes, 2015).

Baseado num sistema de eixos cartesianos, ver *Figura 2. 4*, considerando o eixo x na direção da velocidade média, tem-se a descrição do vetor velocidade de vento, \mathbf{U} , como:

$$\mathbf{U}(x, y, z, t) = \bar{\mathbf{U}}(z) + \mathbf{u}(x, y, z, t) + \mathbf{v}(x, y, z, t) + \mathbf{w}(x, y, z, t) \quad (2. 1)$$

sendo:

$\bar{\mathbf{U}}(z)$ Vetor de velocidade média na altura z na direção x .
 $\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w}$ Os componentes cartesianos x, y e z da velocidade flutuante, ou componentes de turbulência, no tempo t de um ponto qualquer.

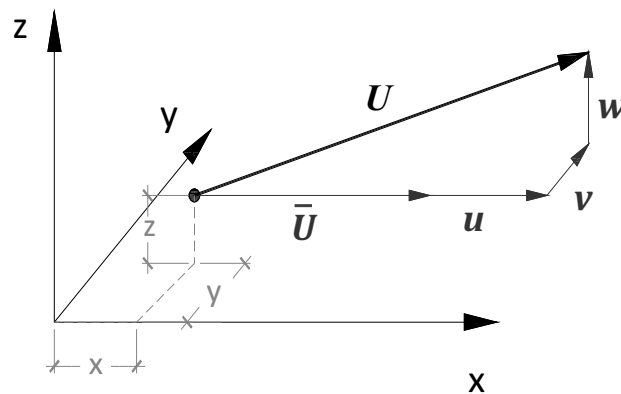


Figura 2. 4 Representação vetorial das componentes da velocidade de um ponto para um tempo t .

No caso particular em que for considerada só a velocidade flutuante na direção do eixo x , a eq. (2. 1) é reduzida a:

$$U(z, t) = \bar{U}(z) + u(z, t) \quad (2. 2)$$

2.4. Perfil vertical de velocidade média $\bar{U}(z)$

A velocidade média varia ao longo da altura z acima do terreno. A seguir mostram-se as representações matemáticas do perfil vertical de $\bar{U}(z)$.

2.4.1. Lei potencial

Proposta em 1916 e denominada *lei potencial*, a variação da velocidade média com a altura z é descrita pela expressão empírica (2. 3):

$$\frac{\bar{U}(z)}{\bar{U}_{ref}} = \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^p \quad \text{ou} \quad \bar{U}(z) = \bar{U}_{ref} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^p \quad (2. 3)$$

sendo:

\bar{U}_{ref} Velocidade média na altura de referência.

- z_{ref} Altura de referência, usualmente $z_{ref} = 10\text{ m}$.
 p Expoente que depende da rugosidade do terreno, constante em toda a altura.

Utiliza-se em muitos casos z_{ref} igual a altura da camada limite, z_g .

2.4.2. Lei Logarítmica

A Lei logarítmica também descreve a variação da velocidade do vento, $\bar{U}(z)$, ao longo da altura z , deduzida em Holmes (2015) e resumida em:

$$\bar{U}(z) = \frac{u^*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (2.4)$$

sendo:

- z_0 Comprimento de rugosidade.
 κ Constante de Von Kármán. $\kappa = 0,4$.
 u^* Velocidade cisalhante ou de fricção (junto a superfície); pode ser obtida substituindo um valor conhecido de $\bar{U}(z)$ na eq. (2.4).

2.4.3. Correlação entre lei logarítmica e lei potencial

Na *Tabela 2.1* mostram-se os parâmetros de rugosidade propostos por Blessmann (1995) e adotados na norma brasileira NBR 6123/1988 para as diferentes categorias do terreno, onde o coeficiente de arrasto superficial, C_{as} , é calculado como:

$$C_{as} = \frac{\kappa^2}{\ln^2 z/z_0} \quad (2.5)$$

Tabela 2.1 Parâmetros de rugosidade adotados pela NBR 6123/1988. Para altura de referência $z_{ref} = 10\text{m}$ e valor médio horário ($t=3600\text{seg}$) (Blessmann, 1995).

Descrição do terreno Categoria NBR 6123/1988	Parâmetros (para um intervalo de tempo de 3600 s)			
	p	z_0 (mm)	C_{as}	z_g (m)
I	0,10	5	0,0028	250
II	0,16	70	0,0065	300
III	0,20	200	0,0105	350
IV	0,25	700	0,0226	420
V	0,35	1750	0,0527	500

Na *Tabela 2.1*, os valores de z_0 e C_{as} foram obtidos para ajustar as duas leis de perfil vertical de velocidade média quando a altura de referência é igual a 10m . Outros

valores podem ser utilizados no caso em que z_{ref} for maior do que $20m$, (Blessmann, 1995).

A *Figura 2. 5* tem como objetivo mostrar a comparativa entre a lei potencial (usada na NBR 6123/1988) e a lei logarítmica (usada no Eurocódigo 1-4/2005). Mostram-se os resultados das velocidades médias de $20m/s$ para terreno com categoria de rugosidade II da NBR 6123/1988, onde $z_{ref}=10m$, $\bar{U}=20m/s$, $p=0,16$ e $z_0=70mm$. Pode se observar uma boa correlação entre elas. Para a Cat V da NBR 6123/1988, a boa correlação vai só até os $200m$, sendo $z_{ref}=10m$, $\bar{U}=20m/s$, $p=0,35$, e $z_0=1750mm$.

A lei potencial tem um ajuste melhor que a lei logarítmica na região mais afastada do solo, ao contrário que na região próxima a superfície, onde a lei logarítmica é melhor comportada.

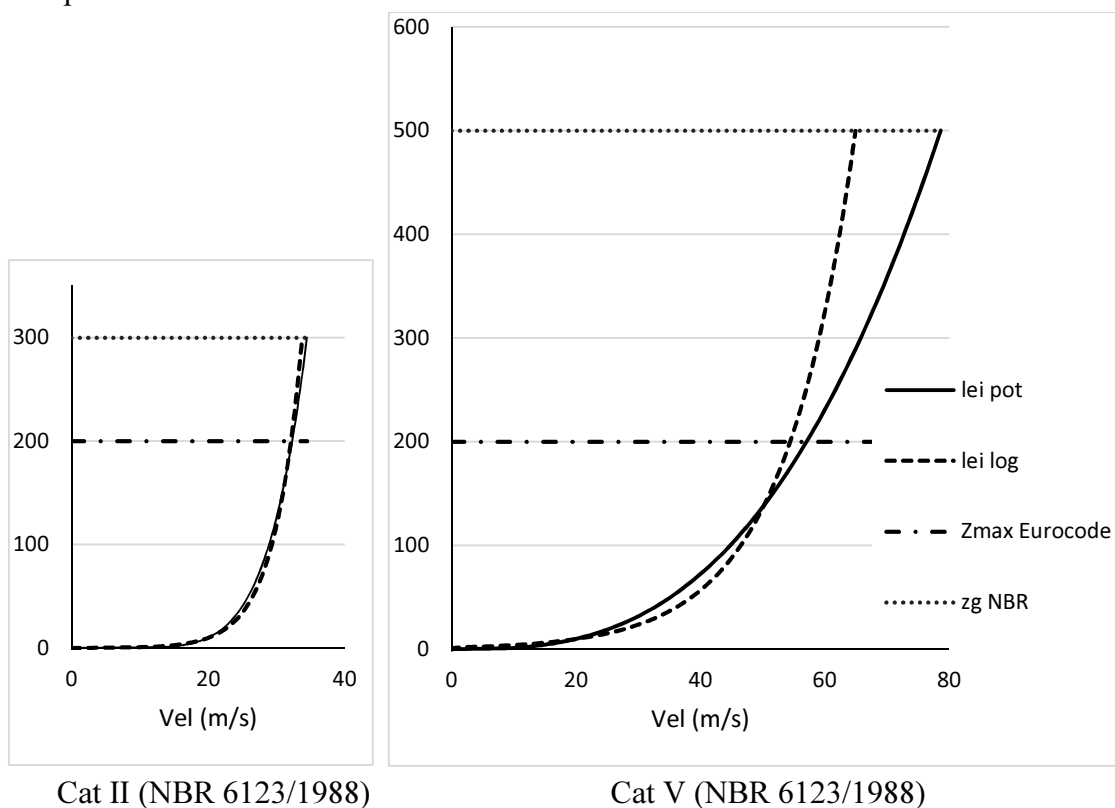


Figura 2. 5 Perfis de velocidades médias de vento para as rugosidades da Cat II e V (NBR 6123/1988) com $\bar{U}(10m)=20$ m/s. Leis potencial e logarítmica.

2.5. Velocidade flutuante (efeito da turbulência)

Quanto mais perto da superfície terrestre, maior é a interação com o vento e maior é a turbulência. Na *Figura 2. 6* temos uma demonstração visual da turbulência perto da superfície num túnel de vento, nela observa-se como o perfil da velocidade flutuante, $u(z, t)$, muda com o tempo e a posição ao redor do perfil da velocidade média, $\bar{U}(z)$.

A velocidade flutuante, por causa de ser um processo aleatório, tem que ser tratado com parâmetros estatísticos para seu cálculo e estudo. No restante do capítulo 2.5 são apresentadas as suas características.

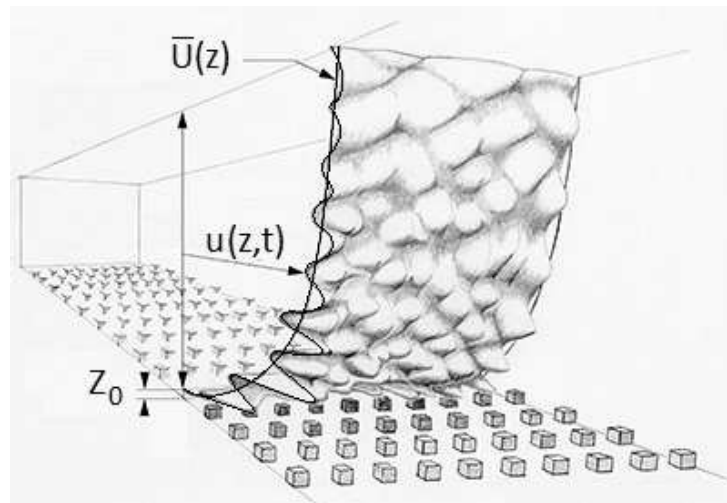


Figura 2. 6 Desenho de vento turbulento num túnel de vento. (Koss, 2014)

2.5.1. Desvio padrão, σ_u

A distribuição de probabilidade da velocidade flutuante do vento pode ser tomada como gaussiana, a qual fornece uma boa aproximação da distribuição real de velocidades na turbulência atmosférica (Blessmann, 1995). A vantagem das distribuições Gaussianas é que estão definidas por dois valores: a valor médio (nosso caso da velocidade) e o desvio padrão. Esses dois valores são os usados para o estudo da intensidade de turbulência.

De acordo com medições experimentais, o desvio padrão da velocidade flutuante, σ_u , (Simiu e Scanlan, 1996), na direção principal x , função da velocidade de fricção, u^* , definida na eq. (2. 4) é considerada constante na altura e pode ser definido como:

$$\sigma_u = \sqrt{\beta_\sigma} u^* \approx 2,5 u^* \quad (2. 6)$$

sendo:

β_σ Fator experimental comumente considerado invariante ao longo da altura e, portanto σ_u também. É aceito na literatura $\sqrt{\beta_\sigma} \approx 2,5$.

Blessmann (1995), a partir de estudos de Davenport, ajustou $\sqrt{\beta_\sigma} \approx 2,58$, também a partir de dados experimentais, chegando na expressão para o desvio padrão da velocidade flutuante seguinte:

$$\sigma_u(z) = \sqrt{\beta_\sigma} \sqrt{(C_{as})} \bar{U}_{ref} = 2,58 \sqrt{(C_{as})} \bar{U}_{ref} \quad (2. 7)$$

sendo:

C_{as} Coeficiente de arrasto superficial, calculado como na eq. (2. 5) também pode ser escrito função da velocidade cisalhante e da velocidade de referência como:

$$C_{as} = \left(\frac{u^*}{\bar{U}_{ref}} \right)^2 \quad (2. 8)$$

Simiu e Scanlan (1996) baseados em medidas tomadas por SethuRaman (1979) propõem valores de 2,55; 2,45; 2,29; 2,20 e 2 para as categorias de terreno I; II; III; IV e V da NBR 6123/1988, o que resulta em respostas flutuantes menores que se for considerado $\sqrt{\beta_\sigma}=2,5$.

2.5.2. Intensidade da turbulência, $I_i(z)$

A intensidade local da turbulência, $I_i(z)$, é definida pelo quociente entre o desvio padrão das flutuações da velocidade e a velocidade média $\bar{U}(z)$:

$$I_i(z) = \sigma_i(z)/\bar{U}(z) \quad (2. 9)$$

sendo:

$\sigma_i(z)$ Desvio padrão das flutuações da velocidade para as componentes $i=u,v,w$.

Substituindo-se a lei logarítmica (2. 4) na expressão (2. 9) e considerando só a componente horizontal, u , a intensidade de turbulência é descrita em função da altura como:

$$I_u(z) = \frac{\sqrt{\beta_\sigma} u^*}{(u^*/\kappa) \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \cong \frac{2,5 u^*}{(u^*/0,4) \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} = \frac{1}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (2. 10)$$

À semelhança da expressão (2. 10), são também apresentados valores aproximados para as turbulências nas outras direções ortogonais (Holmes, 2015), igualmente função só da altura z e rugosidade z_0 .

$$I_v(z) \cong \frac{0,88}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (2. 11)$$

$$I_w(z) \cong \frac{0,55}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (2. 12)$$

Substituindo-se a lei potencial (2. 3) e a eq. (2. 7) na (2. 9) chega-se em:

$$I_u(z) = \sqrt{\beta_\sigma} \sqrt{C_{as}} \left(10/z\right)^p \quad (2. 13)$$

Na *Figura 2. 7* mostram-se os valores de $I_u(z)$ das diferentes categorias de rugosidade do terreno propostas na NBR 6123/1988, para $T=3600s$, e valores de C_{as} e z_0 tomados da *Tabela 2. 1*, com o uso da eq. (2. 10), lei logarítmica, e a eq. (2. 13), lei

potencial. Pode-se observar como a intensidade de turbulência diminui ao longo da altura z . Observa-se uma correlação melhor para as categorias I a III do que para IV e V.

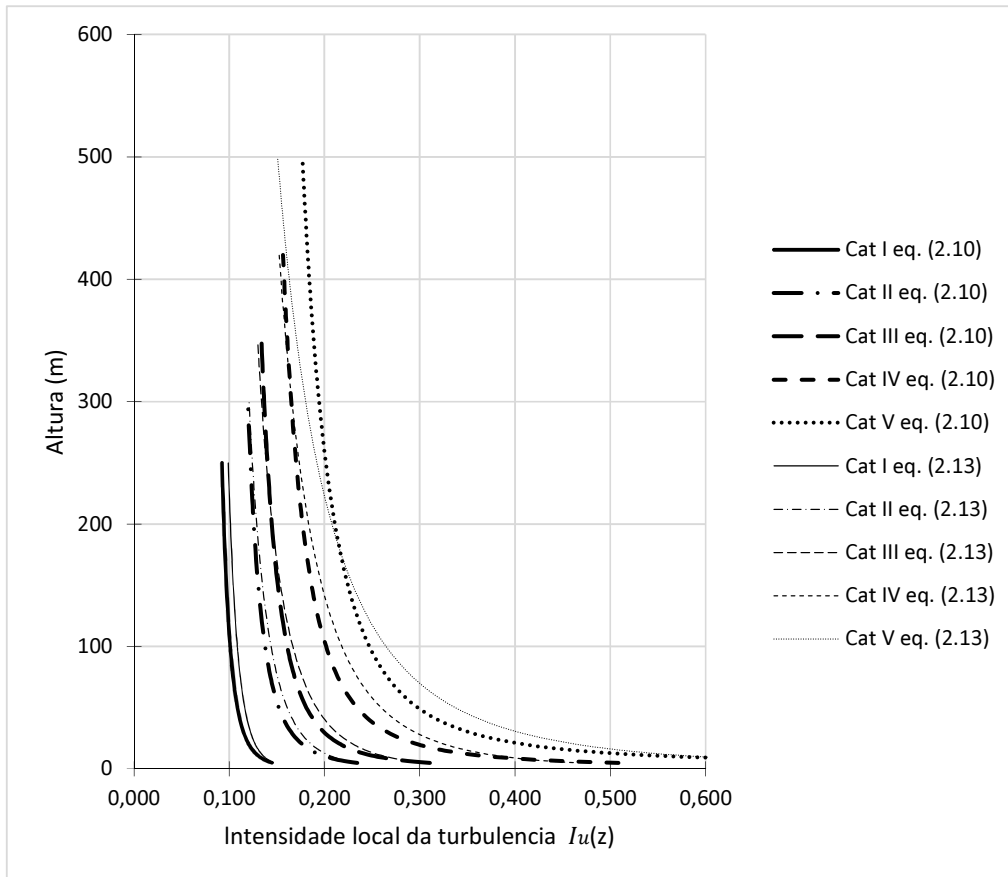


Figura 2. 7 Intensidade local da turbulência longitudinal para as cinco categorias de terreno da NBR 6123/1988 calculadas com as eq. (2. 10) e (2. 13), com dados z_0 e C_{as} da Tabela 2. 1.

Varição do σ_u com a altura

Nas equações acima considera-se o desvio padrão $\sigma_u(z)$ constante ao longo da altura (Blessmann, 1995). Na realidade, medidas feitas na década de 70 mostram uma diminuição de $\sigma_u(z)$ com a altura. Assim para z maior do que 20m e não muito próximo do z_g , pode-se considerar correta a eq. (2. 14), (Sfintesco e Wyatt, 1975).

$$\sigma_u(z) = \sigma_{u,ref} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^{-0,09} \quad (2. 14)$$

Sendo:

$\sigma_{u,ref}$ Desvio padrão na altura de referência z_{ref} .

2.5.3. Espectro da turbulência

O espectro da turbulência pode ser interpretado como a distribuição da energia contida nos turbilhões do vento turbulento, distribuída em função das frequências desses turbilhões.

O espectro de turbulência ou a função densidade espectral, S_u , das componentes flutuantes de velocidade de vento, descreve o conteúdo em frequência do processo. A variância do processo é igual a área sob o espectro, ou seja, a energia total contida no processo e vem dada por:

$$\sigma_u^2 = \int_0^{\infty} S_u(f) df \quad (2.15)$$

sendo:

σ_u^2 Variância das velocidades do vento flutuante na direção u , também o quadrado do desvio padrão das flutuações da velocidade na direção u .

$S_u(f)$ Densidade espectral da velocidade de vento flutuante função da frequência f , com unidades $(Vel)^2/Hz$.

Os espectros de turbulência são simplificações matemáticas baseadas em dados experimentais de ventos reais tomados por diferentes autores. No presente trabalho serão expostos os espectros utilizados na NBR 6123/1988 (Harris) e no Eurocódigo 1-4/2005 (ESDU).

Espectro de Harris

O espectro de Harris, adotado pela NBR 6123/1988 é dado por uma expressão que não depende da altura e está baseado em medições feitas entre 18m e 180m. Em geral apresenta-se na forma adimensionalizada como Blessmann (1995):

$$\frac{f S_u(f)}{\sigma_u^2} = \frac{0,6 X_1}{(2 + X_1^2)^{5/6}} \quad (2.16)$$

sendo:

f Frequência em Hz , (das rajadas de vento).

X_1 Frequência adimensionalizada dada pela (2.17).

$$X_1 = \frac{f L}{\bar{U}(10)} \quad (2.17)$$

onde:

L 1800 m.

$\bar{U}(10)$ Velocidade média a 10 m de altura, em m/s.

Espectro ESDU

O espectro ESDU, 1974, *Engineering Sciences Data Unit*, adotado pelo Eurocódigo 1-4/2005 (2005) [Anexo B], é um espectro que está baseado no espectro de Kármán, (Blessmann, 1995).

O espectro adimensionalizado como geralmente apresentado na literatura vem definido como:

$$S_L(z, f) = \frac{f S_u(f, z)}{\sigma_u^2} = \frac{6,8 f_L(z, f)}{(1 + 10,2 f_L(z, f))^{5/3}} \quad (2. 18)$$

sendo:

$f_L(z, f)$ Frequência adimensionalizada das rajadas dada por:

$$f_L(z, f) = \frac{f L(z)}{\bar{U}(z)} \quad (2. 19)$$

onde:

$L(z)$ Comprimento de escala da turbulência para unidades em m é dado por:

$$L(z) = L_t \left(\frac{z}{z_t} \right)^\alpha \quad (2. 20)$$

onde:

z_t altura de referência (=200m).

L_t escala de referência (=300m).

$\alpha = 0,67 + 0,05 \ln(z_0)$

Na *Figura 2. 8* mostram-se as representações dos espectros usados para a NBR e para o Eurocódigo 1-4/2005, para o caso de $\bar{U}(10) = 20\text{m/s}$ e $z_0 = 0,3\text{m}$.

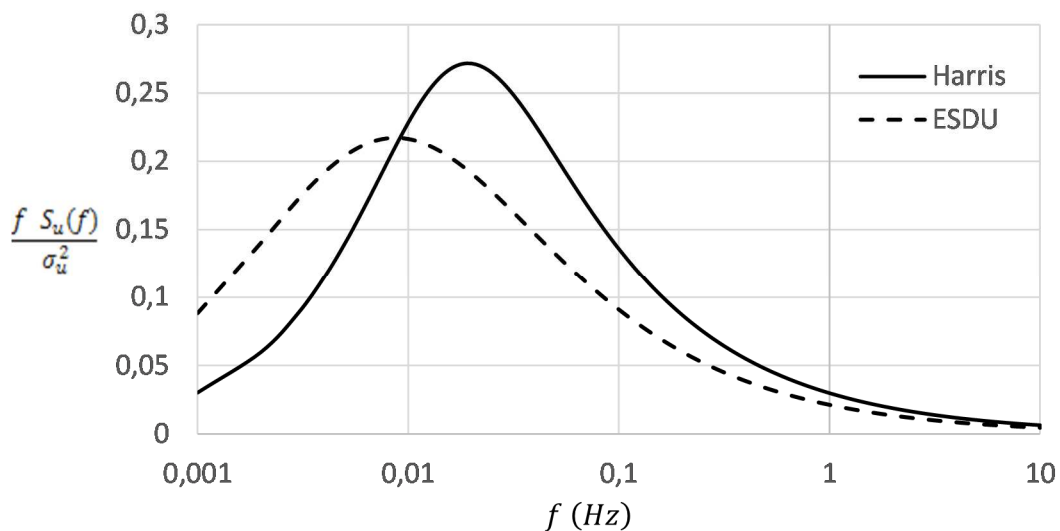


Figura 2. 8 Espectros adimensionais da velocidade flutuante. $\bar{U}(10)=20\text{m/s}$, $z=10\text{m}$, $z_0=300\text{mm}$.

2.5.4. Espectro cruzado de turbulência, $S_{ui,uk}$

Em um determinado instante de tempo, a flutuação da velocidade do vento não apresenta uma correlação perfeita para diferentes pontos no espaço. Esta variação da flutuação entre os nós i e k , pode ser considerada por meio da função densidade espectral cruzada de turbulência ou espectro cruzado da turbulência, $S_{ui,uk}$, definido por:

$$S_{ui,uk}(i, k, f) = \sqrt{S_{u,i}(f)} \sqrt{S_{u,k}(f)} \Psi_u(i, k, f) \quad (2. 21)$$

sendo:

- $S_{u,i}(f)$ Espectro da velocidade flutuante no nó i na direção u .
 $S_{u,k}(f)$ Espectro da velocidade flutuante no nó k na direção u .
 $\Psi_u(i, k, f)$ Co-espectro normalizado, (Holmes, 2015):

$$\Psi_u(i, k, f) = \Psi_u(\Delta r, f) = e^{\left[\frac{f \sqrt{C_y^2 (y_k - y_i)^2 + C_z^2 (z_k - z_i)^2}}{\bar{U}_m(z_i, z_k)} \right]} \quad (2. 22)$$

onde:

- (y_i, z_i) Coordenadas do nó i .
 (y_k, z_k) Coordenadas do nó k .
 C_y e C_z Coeficientes de decaimento para a correlação espacial das pressões obtidos experimentalmente. Valores conservadores na falta de ensaios são fornecidos por Blassmann (1998) iguais a $C_y = C_z = 10$, usados na NBR 6123/1988. O Eurocódigo 1-4/2005 (Anexo C) propõe $C_y = C_z = 11,5$. Valores diferentes de $C_y = 16$ e $C_z = 10$ propostos por Simiu e Scanlan (1996).
 $\bar{U}_m(z_i, z_k)$ Velocidade média do vento entre os pontos i e k .

$$\bar{U}_m = \frac{\bar{U}_m(z_i) + \bar{U}_m(z_k)}{2}$$

A função de co-espectro normalizado, $\Psi_u(i, k, f)$, também pode ser calculada considerando os coeficientes de decaimento variáveis com a altura como dado pela eq. (2. 23), usada na formulação original do item 9 da NBR 6123/1988 (Blessmann, 1998), não tendo sido considerada nos cálculos realizados neste trabalho.

$$\Psi_u(i, k, f) = e^{\left[\frac{f \sqrt{C_y^2 (y_k - y_i)^2 + C_z^2 (z_k - z_i)^2}}{\bar{U}_{ref}} \left(\frac{z_m}{z_{ref}} \right)^{-\beta} \right]} \quad (2. 23)$$

onde:

- z_m Altura média entre os pontos i e k .
 \bar{U}_{ref} Velocidade média na altura de referência z_{ref} .
 β Exponente experimental para qualquer terreno, $\beta=0,3$. (Riera e Blessmann, 1979)

CAPÍTULO 3

ANÁLISE DINÂMICA DE ESTRUTURAS SOB AÇÃO DE VENTO TURBULENTO

3.1. Introdução

O estudo da resposta das estruturas na direção do vento, em particular para estruturas verticais (prédios, torres e chaminés), desenvolveu-se a partir do modelo proposto por Davenport (1963) para calcular a componente flutuante da carga de vento na camada limite atmosférica para estruturas flexíveis.

As ações dinâmicas costumam ser definidas como de dois tipos: determinísticas (definidas em função do tempo, como as vibrações mecânicas) e não determinísticas ou aleatórias (mudam arbitrariamente no tempo, como os sismos e o vento). As ações aleatórias, caso do estudo nessa dissertação, são tratadas com médias estatísticas, assim como as respostas.

Apresenta-se nesse capítulo a formulação das equações necessárias para o cálculo dinâmico estrutural gerado pelas forças de vento. As seguintes hipóteses foram adotadas para formulação das equações deste capítulo:

- A estrutura tem comportamento linear elástico;
- O amortecimento estrutural é viscoso;
- As forças devidas ao vento são calculadas com base no campo de velocidades de vento, não sendo perturbadas pela presença da estrutura.

Apresentam-se também de forma resumida as técnicas experimentais utilizadas em ensaios de modelos reduzidos em túnel de vento.

3.2. Resumo da resposta dinâmica de um sistema de um grau de liberdade

O comportamento do sistema massa-mola amortecedor sob a ação da força $F(t)$, representado na *Figura 3.1*, é descrito por:

$$m \ddot{x}(t) + c \dot{x}(t) + kx(t) = F(t) \quad (3.1)$$

onde m é a massa, c é o coeficiente de amortecimento e k é a rigidez de mola.

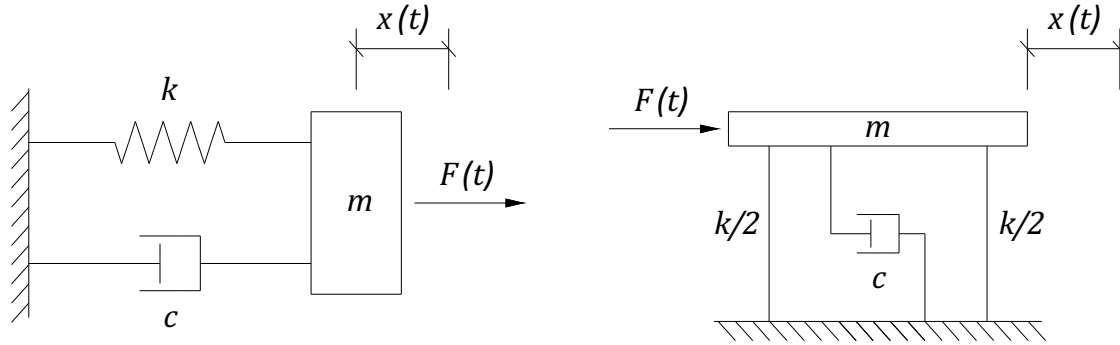


Figura 3. 1 Esquemas típicos de sistemas de um grau de liberdade.

Para uma excitação periódica, ou seja, $F(t) = F_0 \cos \omega t$ na eq. (3. 1), chega-se na solução bem conhecida da Função de Resposta em frequência ou Admitância Mecânica, $|H(\omega)|^2$:

$$\left| \frac{x}{\bar{x}} \right|^2 = |H(\omega)|^2 = \frac{1}{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right)^2 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} = |H(f)|^2 \quad (3. 2)$$

sendo:

ω	Frequência angular de excitação.
$\omega_n = 2\pi f_n = \sqrt{k/m}$	Frequência natural angular da estrutura (rad/seg).
$\zeta = c/c_c$	Taxa de amortecimento da estrutura como razão entre o coeficiente de amortecimento da estrutura c e o crítico definido por $c_c = \sqrt{4 m k}$.
$\bar{x} = \frac{F_0}{k}$	Deslocamento médio, função da amplitude da força dinâmica F_0 .

A taxa de amortecimento da estrutura ζ , no caso de consideração do amortecimento aerodinâmico é tomada como:

$$\zeta = \zeta_{est} + \zeta_{aer} \quad (3. 3)$$

onde:

ζ_{est}	Razão de amortecimento mecânico ou estrutural.
ζ_{aer}	Amortecimento aerodinâmico.

A função de densidade espectral do deslocamento na direção x , $S_x(f)$, é definida pelo produto do espectro de força $S_F(f)$ e a função de resposta em frequência, $H(f)$, dado pela:

$$S_x(f) = \frac{1}{k^2} |H(f)|^2 S_F(f) \quad (3.4)$$

A integral do espectro de deslocamento define a variância do deslocamento flutuante, σ_x^2 , como mostrado na eq.:

$$\sigma_x^2 = \int_0^\infty S_x(f) df \quad (3.5)$$

3.3. Formulação modal para um sistema discretizado

O comportamento dinâmico de uma estrutura discretizada pode ser definido por um sistema matricial diferencial de segunda ordem, com N graus de liberdade ao longo do tempo t como:

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{C} \dot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{K} \mathbf{X}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (3.6)$$

sendo:

M Matriz de massa do sistema, de ordem N x N.

C Matriz de amortecimento, de ordem N x N. Na falta de dados experimentais costuma-se adotar um valor proporcional a matriz de massa. Assim:

$$\mathbf{C} = \alpha \mathbf{M} \quad (3.7)$$

onde α é o coeficiente de proporcionalidade entre amortecimento e massa.

K Matriz de rigidez.

X(t) Vetor de deslocamentos nodais.

$\dot{\mathbf{X}}(t)$ Vetor de velocidades nodais.

$\ddot{\mathbf{X}}(t)$ Vetor de acelerações nodais.

F(t) Vetor de forças nodais externas. Nesse caso as forças geradas pelo vento.

Um dos métodos mais comuns para solução do sistema (3.6), é o método de superposição modal. Ele gera um sistema de equações desacopladas (no caso de amortecimento proporcional). Nele os deslocamentos nodais são obtidos por combinação linear em uma base composta pela formas modais, como expressado em:

$$\mathbf{X}(t) = \Phi \mathbf{a}(t) \quad (3.8)$$

sendo:

Φ Matriz modal, suas colunas são os auto-vetores. Inclui todos os modos normais de vibração da estrutura.

a(t) Vetor coluna amplitude das coordenadas normais.

Para desacoplar as equações do sistema (3.6), multiplicam-se todos seus termos por Φ^T , resultando em:

$$\Phi^T \mathbf{M} \Phi \ddot{\mathbf{A}}(t) + \Phi^T \mathbf{M} \Phi \dot{\mathbf{A}}(t) + \Phi^T \mathbf{K} \Phi \mathbf{A}(t) = \Phi^T \mathbf{F}(t) \quad (3.9)$$

Pela propriedade de ortogonalidade das matrizes, chega-se a equação desacoplada para cada modo de vibração j expressa como:

$$\ddot{a}_j(t) + \alpha \dot{a}_j(t) + \omega_j^2 a_j(t) = \frac{\bar{p}_j(t)}{\bar{m}_j} \quad (3. 10)$$

onde:

$a_j(t)$	Amplitude do modo j de vibração da estrutura função do tempo.
$\dot{a}_j(t)$ e $\ddot{a}_j(t)$	Primeira e segunda derivada função do tempo da amplitude do modo j .
$\bar{m}_j = \Phi^T \mathbf{M} \Phi$	Massa generalizada (ou massa modal) do modo j vibração. Valor fixo de massa para cada modo j .
$\bar{k}_j = \Phi^T \mathbf{K} \Phi$	Rigidez modal associada a cada modo j de vibração.
$\bar{p}_j = \Phi^T \mathbf{F}$	Força modal associada a cada modo j de vibração.

Aplicando a transformada de Fourier a ambos lados da eq. (3. 10) e resolvendo o sistema, chega-se na solução (3. 11) escrita em termos de densidade espectral no domínio da frequência.

$$S_{a_j}(f) = \frac{1}{\bar{m}_j^2 \omega_j^4} |H(f)|^2 S_{p_j}(f) \quad (3. 11)$$

sendo:

$S_{a_j}(f)$	Função da densidade espectral da amplitude (a_j), do modo j .
\bar{m}_j	Massa generalizada do modo j . $\bar{m}_j = \sum_{k=1}^n m_k \phi_{j,k}^2$
ω_j	Frequência circular natural do modo j . $\omega_j = 2 \pi f_j = \sqrt{k/m}$
$ H(f) ^2$	Função de admitância mecânica no domínio da frequência definida na eq. (3. 2).

$S_{p_j}(f)$ Densidade espectral da força modal. Para uma estrutura discretizada em n nós para o modo de vibração natural j , com forças aplicadas em vários nós, é definida pela eq.:

$$S_{p_j}(f) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n \phi_{j,i} \phi_{j,k} S_{F_i, F_k}(i, k, f) \quad (3. 12)$$

sendo:

$\phi_{j,k}$	Componente do autovetor normalizado da estrutura do nó k para modo j .
$\phi_{j,i}$	Componente do auto-vetor normalizado da estrutura do nó i para modo j .
$S_{F_i, F_k}(i, k, f)$	Espectro cruzado das forças nodais dado por:

$$S_{Fi,Fk}(i, k, f) = \frac{\rho^2}{4} (2\bar{U}_k)(2\bar{U}_i) C_{a_k} C_{a_i} A_k A_i S_{ui,uk}(i, k, f) \quad (3. 13)$$

sendo:

- $\bar{U}_i; \bar{U}_k$ Velocidade média na altura do nó i e k .
 $C_{a_i}; C_{a_k}$ Coeficiente de arrasto associado ao nó i e k .
 $A_i; A_k$ Área efetiva associada ao nó i e k .
 $S_{ui,uk}(i, k, f)$ Co-espectro de velocidade flutuante. É a função densidade espectral cruzada de turbulência dada na (2. 21) com o uso da (2. 22).

Definida $S_{a_j}(f)$ como a função da densidade espectral da amplitude (a_j), do modo j , sua variância calcula-se pela integração da (3. 11), assim chega-se a:

$$\sigma_{a_j}^2 = \int_0^\infty S_{a_j}(f) df = \int_0^\infty \frac{1}{\bar{m}_j^2 \omega_j^4} |H(f)|^2 S_{p_j}(f) df \quad (3. 14)$$

sendo:

$\sigma_{a_j}^2$ Variância da amplitude do modo j .

Considerando-se apenas um modo j na análise, a variância $\sigma_{x,j}^2$ do deslocamento na direção x do nó k é dada por:

$$\sigma_{x,j}^2 = \phi_{j,k}^2 \sigma_{a_j}^2 \quad (3. 15)$$

Para m modos de vibração, a resposta dinâmica em termos de variância do deslocamento x no nó k , $\sigma_{x,k}^2$, é dada pela eq. seguinte:

$$\sigma_{x,k}^2 = \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^m \phi_{j,k} \phi_{l,k} \sigma_{a_j} \sigma_{a_l} \quad (3. 16)$$

sendo:

σ_{a_j} e σ_{a_l} Desvios padrão das amplitudes dos modos j e l .

Os termos cruzados na eq. (3. 16) podem ser desprezados nos casos de estruturas de baixo amortecimento e com modos de vibração com frequências afastadas (Clough e Penzien, 1995), resultando na eq. seguinte:

$$\sigma_{x,k}^2 = \sum_{j=1}^m \phi_{j,k}^2 \sigma_{a_j}^2 \quad (3. 17)$$

Na *Figura 3. 2* mostra-se o esquema de um exemplo do método acima descrito, uma estrutura de múltiplos graus de liberdade com baixo amortecimento sob ações de vento turbulento.

PROCESSO NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA (SISTEMA COM MÚLTIPLES GRAUS DE LIBERDADE)

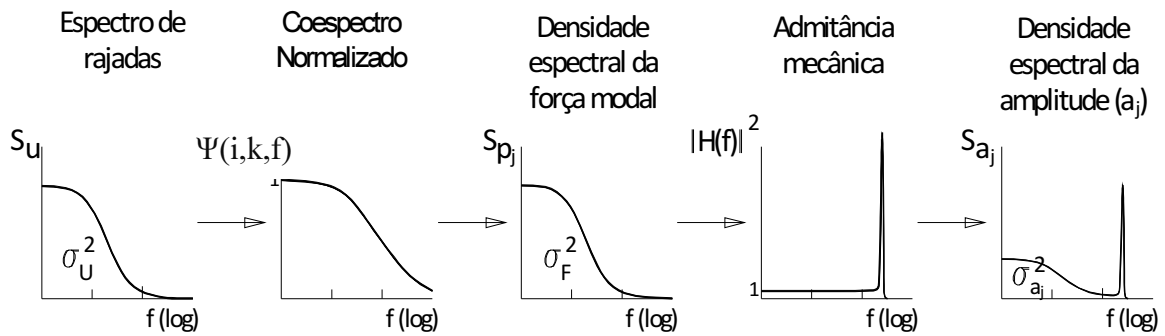


Figura 3. 2 Esquema do processo no domínio da frequência.

3.4. Força aerodinâmica de arrasto

3.4.1. Força devida ao vento em estruturas de pequenas dimensões em repouso

Para estruturas de pequenas dimensões (em relação ao comprimento de escala da turbulência), não é considerado o efeito do espectro cruzado da turbulência. Assim, a força de arrasto gerada pelo vento num ponto do espaço num momento t , considerando uma estrutura em repouso sob ação de vento turbulento, é dada por:

$$F(x, y, z, t) = \frac{1}{2} \rho C_a A U^2(x, y, z, t) \quad (3. 18)$$

sendo:

$F(x, y, z, t)$ Força de arrasto no instante t nas coordenadas x, y, z , considerando-se a direção do vento x .

ρ Massa específica do ar.

C_a Coeficiente de arrasto da geometria da estrutura para o vento turbulento.

A Área efetiva da estrutura perpendicular à direção do vento.

Na eq. (3. 18) admite-se válida a hipótese quase-estática segundo a qual a força flutuante pode ser calculada com base no coeficiente de arrasto, que representa a força média adimensionalizada na direção do vento.

Substituindo a (2. 2) na (3. 18) e desprezando o termo u^2 , muito menor do que \bar{U}^2 , chega-se na eq. (3. 20) para forças geradas pelo vento turbulento. Assim a velocidade média gera uma componente estática $\bar{F}(z)$ e a velocidade flutuante uma parcela dinâmica $\hat{F}(x, y, z, t)$.

$$F(x, y, z, t) = \frac{1}{2} \rho C_a A [\bar{U}^2(z) + 2 \bar{U}(z) u(x, y, z, t)] \quad (3. 19)$$

ou

$$F(x, y, z, t) = \bar{F}(z) + \hat{F}(x, y, z, t) \quad (3. 20)$$

sendo:

$\bar{F}(z)$ Força estática associada à velocidade média \bar{U} , definida por:

$$\bar{F}(z) = \frac{1}{2} \rho C_a A \bar{U}^2(z) \quad (3. 21)$$

ou pela lei potencial (2. 3), chega-se em:

$$\bar{F}(z) = \frac{1}{2} \rho C_a A \bar{U}_{ref}^2 \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^{2p} \quad (3. 22)$$

$\hat{F}(x, y, z, t)$ Força flutuante:

$$\hat{F}(x, y, z, t) = \frac{1}{2} \rho C_a A [2 \bar{U}(z) u(x, y, z)] \quad (3. 23)$$

Aplicando a transformada de Fourier, chega-se na eq. de força no domínio da frequência:

$$S_F(f) = (\rho C_a A \bar{U})^2 S_u(f) \quad (3. 24)$$

em que:

$S_F(f)$ Espectro da força de vento (N^2/Hz).

ou reescrevendo a eq. (3. 21) como:

$$\frac{2 \bar{F}}{\bar{U}} = \rho C_a A \bar{U} \quad (3. 25)$$

e substituindo a (3. 25) na (3. 24) chega-se na eq. (3. 26), tem-se $S_F(f)$ dependentes só da força e da velocidade média do vento e do espectro de velocidade flutuante.

$$S_F(f) = \frac{4 \bar{F}^2}{\bar{U}^2} S_u(f) \quad (3. 26)$$

Essa eq. é válida para rajadas grandes que envolvem a estrutura toda, ou para estruturas pequenas nas quais as pressões flutuantes tem uma grande correlação espacial.

3.4.2. Força devida ao vento em estruturas de pequenas dimensões em movimento

No caso de consideração do movimento da estrutura durante ação das forças de vento, tem-se que o vento real não é mais função da velocidade absoluta do vento $U(t)$, mas da velocidade relativa $U_{rel}(t)$, como expressado em:

$$U_{rel}(t) = U(t) - \dot{x}(t) \quad (3. 27)$$

sendo:

$\dot{x}(t)$ A velocidade da estrutura no tempo t .

Substituindo a (3. 27) na (3. 18) e desprezando os termos quadráticos u^2 , \dot{x}^2 e $-2u\dot{x}$, comparativamente muito pequenos respeito daqueles relacionados com a velocidade média $\bar{U}(z)$, chega-se para o ponto nodal (x, y, z) na eq. seguinte:

$$F(z, t) = \frac{1}{2} \rho C_a A [\bar{U}^2(z) + 2 \bar{U}(z) u(z, t) - 2 \bar{U}(z) \dot{x}(z, t)] \quad (3. 28)$$

onde $\frac{1}{2} \rho C_a A [-2 \bar{U}(z) \dot{x}(z, t)]$ é o termo que dá origem à força de amortecimento aerodinâmico.

3.4.3. Forças devidas ao vento em estruturas alargadas e alteadas

Para estruturas cuja dimensão característica não é pequena em relação às dimensões dos turbilhões, deve-se levar em conta a correlação espacial das pressões devidas ao vento no cálculo da força resultante.

Vickery (1965) e Davenport (1963) introduziram a função de admitância aerodinâmica χ^2 para relacionar as funções densidades espectrais da força flutuante resultante, S_F e da flutuação da velocidade do vento, S_u levando em conta a correlação espacial das pressões devidas ao vento. Trata-se de um ajuste do espectro da força de arrasto em relação ao caso ideal de uma estrutura envolvida pela turbulência com correlação perfeita, eq. (3. 26). A relação entre a densidade espectral da força S_F e a componente longitudinal da velocidade flutuante S_u é dada por:

$$S_F(f) = \frac{4 \bar{F}^2}{\bar{U}^2} S_u(f) \chi^2(f) \quad (3. 29)$$

Dos trabalhos realizados por Davenport e Vickery chega-se na função de admitância aerodinâmica $\chi(f)$, calculada em base ao rateio adimensional, representada na *Figura 3. 3* e definida por:

$$\chi(f) \approx \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{2f\sqrt{A}}{\bar{U}} \right)^{4/3}} \right]^2 \quad (3.30)$$

em que:

f Frequência das rajadas.

\sqrt{A} Dimensão característica da estrutura, máximo comprimento da superfície.

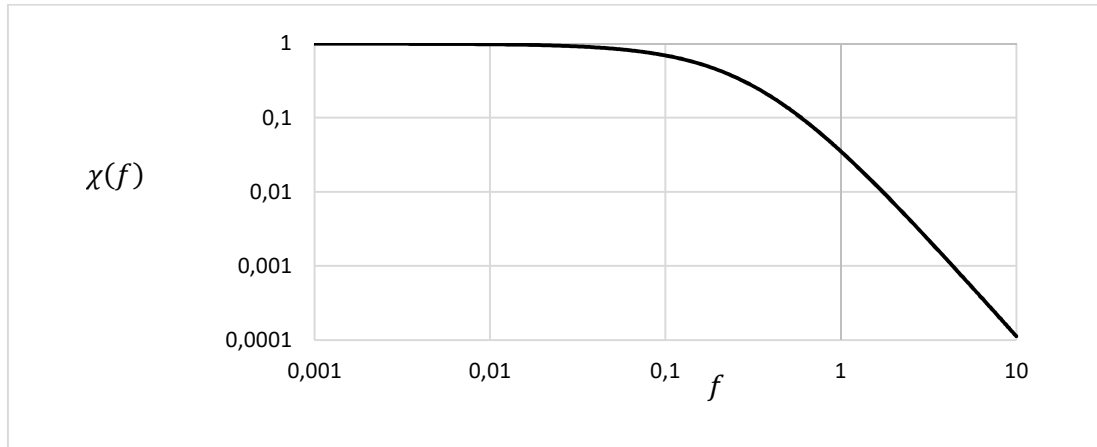


Figura 3.3 Admitância aerodinâmica, para $\sqrt{A} = 30m^2$ e $\bar{U} = 20m/s$.

Observa-se na *Figura 3.3* que para certa estrutura de dimensão característica sob a ação de vento de velocidade média, o valor de χ^2 se reduz com o aumento da frequência f associada aos turbilhões. Isto porque os turbilhões de menores dimensões (que têm menores comprimentos de onda e, portanto, maiores frequências) não envolvem a estrutura como um todo, causando perda de correlação de pressões.

3.5. Processo de Davenport (fator de rajada)

3.5.1. Conceitos gerais

O Processo de Davenport (“The Gust Factor Approach”) foi desenvolvido a partir da solução no domínio da frequência do sistema em movimento de um só grau de liberdade com baixo amortecimento, eq. (3.11), com base na aplicação de conceitos estatísticos de processo aleatório estacionário à velocidade de vento para determinar seu valor de pico, admitindo distribuição de probabilidades de Gauss.

Os métodos indicados por normas de projeto para a determinação da resposta dinâmica de edificações se baseiam, em geral, no método proposto por Davenport (1961), que considera a ação dinâmica do vento turbulento através do *método de fator de rajada*.

De acordo com este método, a resposta estática da estrutura à ação do vento, devida à força aerodinâmica média, é multiplicada pelo fator de rajada para resposta, G , para considerar as suas vibrações devidas à turbulência do vento. O fator G é, portanto, definido como a razão entre a resposta máxima esperada, x_{max} , em certo intervalo de tempo (em geral tomado 1 hora ou 10 minutos) e a resposta média (ou estática), \bar{x} , neste mesmo intervalo:

$$G = \frac{x_{max}}{\bar{x}} \quad (3. 31)$$

sendo:

$$x_{max} = \bar{x} + \hat{x}_{max} \quad (3. 32)$$

onde:

x_{max} Resposta, por exemplo deslocamento máximo absoluto.

\bar{x} Resposta, por exemplo deslocamento médio.

\hat{x}_{max} Resposta, por exemplo deslocamento flutuante máximo, definido como:

$$\hat{x}_{max} = g \sigma_x \quad (3. 33)$$

sendo:

σ_x Desvio padrão do deslocamento x .

g Fator de pico da resposta/deslocamento. Depende do intervalo de tempo da estimativa para a qual é calculada a resposta máxima e da faixa de frequências escolhida. Assim, para uma distribuição de probabilidade gaussiana, Davenport (1961), chegou na expressão seguinte:

$$g = \sqrt{2 \ln(v T)} + \frac{\gamma_{euler}}{\sqrt{2 \ln(v T)}} \quad (3. 34)$$

Sendo:

γ_{euler} Constante de Euler $\gamma = 0,5772$.

ν Pode-se interpretar fisicamente como a frequência representativa da faixa de frequências na qual está concentrada a maior energia do espectro. Para sistemas de baixo amortecimento $\nu \approx f_n$, sendo f_n a frequência natural de interesse.

T Intervalo de tempo da estimativa.

νT É o número de ciclos da resposta.

De acordo com a eq. anterior, a resposta flutuante máxima esperada, é calculada multiplicando-se o desvio padrão da resposta flutuante, σ_x , pelo fator de pico, g .

As flutuações da velocidade de vento, em torno do valor médio, são descritas pela função de densidade espectral ou simplesmente espectro de velocidade, S_u . A partir dessa descrição chega-se às forças atuantes na estrutura e finalmente à resposta em termos de deslocamento com a eq. (3. 11).

A *Figura 3. 4* (Davenport, 1963) resume os principais conceitos do método. Na primeira linha da figura, as etapas de solução do problema no domínio do tempo são ilustradas: a determinação das flutuações de velocidade do vento em torno do valor médio a partir das quais se obtém as forças aerodinâmicas e finalmente com a solução da eq. de movimento chega-se à resposta da estrutura. Na segunda linha, estas etapas estão descritas no domínio da frequência, e na terceira linha têm-se as respectivas distribuições de probabilidade. No domínio da frequência, a determinação do espectro da força generalizada é obtida multiplicando-se o espectro de velocidade flutuante do vento pela chamada função de admitância aerodinâmica introduzida por Davenport e que leva em conta a correlação espacial das pressões na superfície exposta. O espectro da resposta é obtido por meio da função de admitância mecânica ou função de resposta em frequência, $H(f)$, eq. (3. 2).

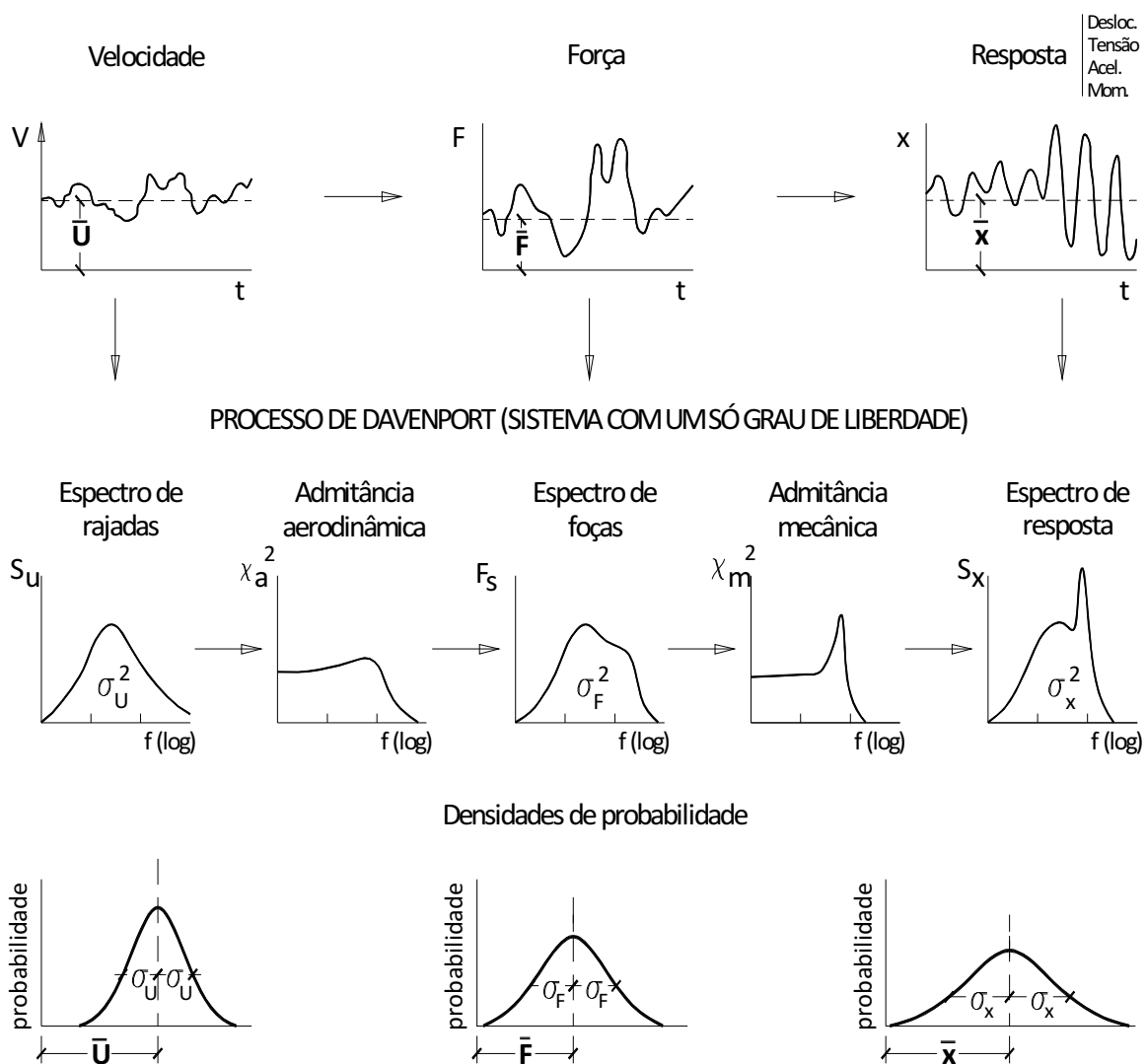


Figura 3. 4 Processo probabilístico de Davenport.

O desvio padrão da resposta flutuante, σ_x , é a raiz quadrada da variância, σ_x^2 , que é a área sob o gráfico da função de densidade espectral de resposta, eq. (3. 17). Esta área é convenientemente calculada em duas parcelas conforme ilustra a *Figura 3. 5*: parcelas ressonante e sub-ressonante, correspondentes às áreas A_1 e A_2 , respectivamente. Como a resposta na região sub-ressonante é quase-estática, a área A_2 é calculada a partir da integral do espectro da própria força de vento. Enquanto que a área A_1 é calculada a partir da magnitude do espectro de resposta na frequência f_r de ressonância.

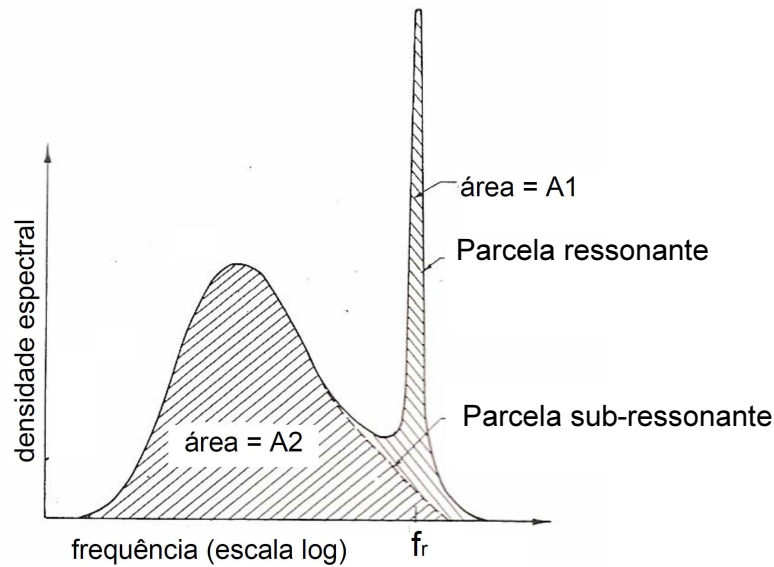


Figura 3. 5 Função densidade espectral da resposta e área sob o gráfico para cálculo da variância da resposta (adaptado por Davenport, 1967).

3.5.2. Determinação do desvio padrão da resposta em deslocamentos

Substituindo na (3. 4) a eq. (3. 29), chega-se no seguinte espectro de deslocamento para um sistema de um grau de liberdade representativo de uma estrutura de grandes dimensões:

$$S_x(f) = \frac{4 \bar{F}^2}{k^2 \bar{U}^2} S_u(f) \chi^2(f) |H(f)|^2 \quad (3. 35)$$

Neste ponto já é possível calcular a área sob o espectro, ou seja, a variância do deslocamento, σ_x^2 , com métodos computacionais. Mas este método foi criado nos anos 60, assim foram gerados cálculos analíticos para resolver o problema. A variância σ_x^2 do deslocamento, eq. (3. 5), foi calculada como na *Figura 3. 5*, e o espectro de velocidade flutuante de vento, $S_u(f)$, como:

$$S_u(f) = \sigma_u^2 S'_u(f) \quad (3. 36)$$

onde:

$S'_u(f)$ Espectro normalizado do vento flutuante, ou seja $\sigma_u^2 = 1$.

Substituindo as equações (3. 35), e (3. 36) na (3. 5) considerando $\bar{x} = \bar{F}/k$, chega-se na solução seguinte:

$$\frac{\sigma_x^2}{\bar{x}^2} = 4 \frac{\sigma_u^2}{\bar{u}^2} \int_0^\infty \chi^2(f) |H(f)|^2 S'_u(f) df \quad (3. 37)$$

ou

$$\frac{\sigma_x^2}{\bar{x}^2} = 4 \frac{\sigma_u^2}{\bar{u}^2} (B + R) \quad (3. 38)$$

em que:

B Fator da resposta quase-estática, “background factor”.

$$B = \int_0^\infty \chi^2(f) S'_u(f) df \quad (3. 39)$$

admitindo-se $H(f) = 1$ em todo o espectro.

R Fator da resposta ressonante para a frequência natural, f_n .

$$R = \chi^2(f) S'_u(f_n) \int_0^\infty |H(f)|^2 df \quad (3. 40)$$

ou

$$R = \chi^2(f) S'_u(f_n) \frac{\pi f_n}{4 \zeta} = \frac{SE}{\zeta} \quad (3. 41)$$

em que:

f_n Frequencia natural da estrutura.

$S = \chi^2(f)$ Fator de redução do tamanho.

$E = \frac{\pi}{4} f_n S'_u(f_n)$ Fator de energia da rajada na frequência natural.

ζ Fator de amortecimento.

Substituindo a eq. (3. 40) na (3. 11) e fazendo raiz quadrada chega-se a:

$$\sigma_x = 2 \bar{x} \frac{\sigma_u}{\bar{u}} \sqrt{B + \frac{SE}{\zeta}} \quad (3. 42)$$

3.5.3. Estimativa da resposta máxima ou de pico

Por se tratar de um problema probabilístico, deve ser calculada a resposta dinâmica de pico, obtida com estimativa de máximos do processo aleatório a partir do valor do desvio padrão, neste caso igual do valor RMS (“*Root Mean Square*” em inglês).

Com uso das equações (3. 32), (3. 33), (3. 34), (3. 41) e (3. 42) chega-se na:

$$x_{max} = \bar{x} + 2 g \bar{x} \frac{\sigma_u}{\bar{u}} \sqrt{B + R} \quad (3. 43)$$

Assim, pode-se definir finalmente o “fator de rajada para o deslocamento máximo”, G , como:

$$G = \frac{x_{max}}{\bar{x}} = 1 + 2 g \frac{\sigma_u}{\bar{u}} \sqrt{B + R} = 1 + 2 g I_u \sqrt{B + R} \quad (3. 44)$$

Estimativa da aceleração de pico

Se for considerado um deslocamento harmônico simples, ou seja, $x = A \text{ sen } \omega t$, então $\ddot{x} = -\omega^2 x$, onde $\omega = 2\pi f$. Assim, da (3. 5) chega-se em:

$$\sigma_{\ddot{x}}^2 = \int_0^\infty S_{\ddot{x}}(f) df \cong \int_0^\infty (2\pi f)^4 S_x(f) df \quad (3. 45)$$

A aceleração de pico é calculada com aplicação do apropriado fator de pico, tendo em consideração só a parcela flutuante:

$$\ddot{x}_{max} = \hat{\ddot{x}}_{max} = g \sigma_{\ddot{x}} \quad (3. 46)$$

3.6. Solução modal no domínio da frequência

3.6.1. Desvio padrão de amplitude modal

Para uma estrutura discretizada em elementos finitos com N nós e considerando m modos de vibração tem-se a resposta dinâmica em termos de desvio padrão de amplitude modal σ_{a_j} , dado pela eq. (3. 13), obtida a partir da eq. de movimento (3. 11) no domínio da frequência.

No cálculo da Densidade espectral da força modal $S_{p_j}(f)$, eq. (3. 12), entra o espectro cruzado das forças nodais, $S_{F_i, F_k}(f)$, eq. (3. 13); utiliza-se a hipótese de que as forças de vento podem ser determinadas a partir do campo de velocidades do vento não

perturbado pela estrutura, tomando-se a correlação espacial das pressões de vento idêntica à correlação das velocidades flutuantes através do co-espectro normalizado da eq. (2. 22) ou (2. 23). Esta hipótese se justifica pela ocorrência de dois efeitos opostos:

- (i) as pressões na face frontal de uma edificação são melhor correlacionadas entre si do que o são as velocidades flutuantes de vento;
- (ii) as pressões devidas ao vento na face de sota-vento não são bem correlacionadas com as pressões de barlavento.

A hipótese acima mencionada seria não conservadora a julgar pelo efeito (i) e seria conservadora pelo efeito (ii). Como os efeitos se compensam e tendo em conta a grande dispersão de resultados, esta hipótese é tida como uma boa aproximação (Dyrbye & Hansen, 1997).

3.6.2. Forças Nodais Equivalentes

Na análise modal pode-se obter, para cada modo j de vibração, um vetor de forças nodais que aplicado estaticamente ao modelo numérico da estrutura gera o deslocamento flutuante máximo da estrutura associado a cada modo j , dado pela eq. (3. 33). Os componentes deste vetor de forças são dados por Blessmann (1998) e Cardoso (2011):

$$\hat{F}_{j,k} = g \sigma_{a_j} \omega_j^2 \bar{m}_j \phi_{j,k} \quad (3. 47)$$

sendo:

$\hat{F}_{j,k}$ Força flutuante equivalente aplicada no nó k para gerar o deslocamento máximo associado ao modo j exclusivamente.

3.6.3. Esforços solicitantes de pico da análise no domínio da frequência

Pode-se distinguir da literatura três metodologias para o cálculo dos esforços solicitantes de pico originados da ação dinâmica do vento turbulento, a partir da análise no domínio da frequência:

- a) Método do Fator de Rajada.
- b) Análise modal completa.
- c) Método de separação das respostas quase-estática (com o conceito de linha de influência) e ressonante (com análise modal).

No método do Fator de Rajada o procedimento usual é calcular o fator de rajada, G , com base na amplitude a_1 do modo fundamental de vibração, eq. (3. 44), e aplicá-lo à distribuição de forças de vento associadas ao valor médio da velocidade para se obter, por análise estática, respostas tais como momentos fletores e esforços cortantes. A utilização de G assim calculado (com base em deslocamento) para a determinação de

outros tipos de respostas é, portanto, um procedimento aproximado que, entretanto, fornece resultados com boa aproximação quando se trata de esforços na base de edifícios, (Holmes, 2015). Este é o procedimento adotado em várias normas de projeto entre elas o Eurocódigo 1-4/2005, em geral admitindo formas modais aproximadas por funções das coordenadas z (vertical) e y (lateral).

Diversos autores [Holmes (1994); Vickery (1995); Zhou & Kareem (1999) e Kareem & Zhou (2003)] observaram que, apesar de fornecer resultados com boa aproximação para momento fletor na base de edifícios, o método do fator de rajada fornece resultados menos aproximados para outras respostas ou tipos estruturais, como, por exemplo, o esforço cortante na base e ao longo da altura de edifícios altos. Isto porque a distribuição espacial das forças equivalentes à ação extrema do vento em estruturas que apresentam resposta ressonante relevante não é proporcional à distribuição das forças médias. Para superar esta limitação, o método foi revisado por diversos autores [Loredo-Souza (1996) *apud* Loredo-Souza (2005); Dyrbye & Hansen (1997); Holmes (2015)] utilizando o conceito de linhas de influência, usualmente adotado em projetos de estruturas sujeitas a cargas móveis - como, por exemplo, em pontes – para determinar o desvio padrão da resposta quase-estática (*background*) e também na ressonante. A resposta total deve ser calculada adicionando a contribuição dos modos de vibração em que há resposta ressonante. Por envolver funções de linhas de influência, este método não é aplicável a procedimentos normativos.

No método de análise modal completa, similarmente ao cálculo do deslocamento apresentado na eq. (3. 14), a variância de uma resposta da estrutura (momento fletor, esforço cortante, etc), σ_r^2 pode ser obtida conhecendo-se a resposta R_j devida à atuação de um vetor de forças equivalentes F_j correspondente à amplitude modal unitária, conforme a expressão abaixo (Holmes, 2015):

$$\sigma_r^2 = \sum_{j=1}^n \sigma_{a,j}^2 R_j^2 \quad (3. 48)$$

sendo R_j calculado para a ação do vetor F indicado na eq. (3. 47) com $g \sigma_{a_j}$ unitário. Este cálculo corresponde a determinar os esforços solicitantes de pico através da aplicação das forças equivalentes do item 3.5.2. Esta é a base do método adotado na NBR 6123/1988 para tratar a análise dinâmica devida à turbulência do vento.

Considerando uma estrutura de cabo tracionado com frequência fundamental de 0,2 Hz sob ação de vento turbulento, (Vickery, 1995) determinou a reação de apoio de pico, em um dos extremos, de acordo com três abordagens mencionadas anteriormente. A variância da resposta flutuante foi descrita em termos de um fator adimensional cujos valores obtidos foram: 0,218 (através do método (i)), 0,196 (através do método (ii), considerando 12 modos na análise modal), e 0,197 (através do método (iii), considerando apenas 1 modo na análise). Com este resultado, ficou clara a vantagem

no uso da metodologia (iii), em relação à análise modal (ii). O uso da metodologia da análise modal para a determinação da parcela quase-estática se mostrou menos eficiente já que esta parcela fica distribuída na resposta de diversos modos.

Carvalho (2015) também efetuou estudos comparativos entre as metodologias (ii) e (iii) para exemplos de estrutura de chaminé e edificação alargada com frequências fundamentais respectivamente iguais a 0,26Hz e 0,64Hz e concluiu que a análise modal, que é a base do método discreto da NBR 6123/1988, fornece respostas equivalentes às da análise com separação das parcelas quase-permanente e ressonante e utilizando o conceito de linhas de influência desde que um número adequado de modos seja incluído na modelagem (inclusive modos cujas frequências são tais que não produzem respostas ressonantes apreciáveis). É importante ressaltar que a utilização de apenas um modo de vibração na análise modal pode conduzir já um alto percentual da resposta obtida com o método (iii) com um modo também, como ocorreu com o exemplo da chaminé em que se chegou a 96% para momento fletor na base e 85% para esforço cortante na base.

3.7. Métodos experimentais em túnel de vento

Existem vários métodos para determinação das forças médias e flutuantes de vento como as respostas em termos de deslocamentos e esforços dos edifícios altos por meio de ensaios em modelos reduzidos em túnel de vento. Nesse item apresentam-se resumidamente as três principais técnicas:

- HFBB: “high frequency base balance”.
- HFPI: “high frequency pressure integration”.
- Modelo aerolástico.

Resultados obtidos com estas três técnicas são utilizados neste trabalho para fins de comparativa teórico-experimental. O resumo apresentado a seguir baseia-se em Irwin *et al.* (2013).

3.7.1. Método HFBB “high frequency based balance”

O método “*high frequency based balance*” (HFBB), também chamado “*high frequency force balance*” (HFFB) ou “*high frequency balance*” (HFB), consiste no ensaio de um modelo reduzido rígido acoplado em sua base a uma balança de força ultrasensível que mede diretamente os esforços cortantes e momentos fletores e torsor na base ao longo do tempo nos três eixos, como mostrado na *Figura 3. 6* (Tschanz e Davenport, 1983) por meio de “*strain gauge*” ou outro mecanismo piezoelétrico. Considerando que a estrutura possui uma forma modal fundamental (1º modo) linear (tipo pendular), o momento fletor flutuante medido é proporcional à forma modal associada ao primeiro modo, $p_1(t)$, como mostrado na *Figura 3. 6 (c)*. A medição da força modal permite que se efetue a solução da eq. de movimento do sistema de um grau de liberdade

no domínio da frequência fornecendo as respostas em termos de deslocamento sob as seguintes hipóteses:

- apenas o primeiro modo de vibração em cada direção é importante na resposta e as formas modais são lineares (para outras formas modais foram desenvolvidos fatores de correção);
- o amortecimento aerodinâmico é desprezado.

O método é chamado high frequency porque a frequência natural do conjunto modelo – balança é muito maior do que a frequência natural da estrutura protótipo. Dessa forma o sinal registrado dos esforços não é contaminado por efeitos ressonantes do modelo. Os requisitos para a balança são os seguintes: alta sensibilidade, grande rigidez, estabilidade e medições desacopladas nas direções ortogonais (Tschanz & Davenport, 1983).

A principal vantagem do método HFBB é que os modelos são rápidos, fáceis e económicos de construir, além que a base é reciclada para outros projetos.

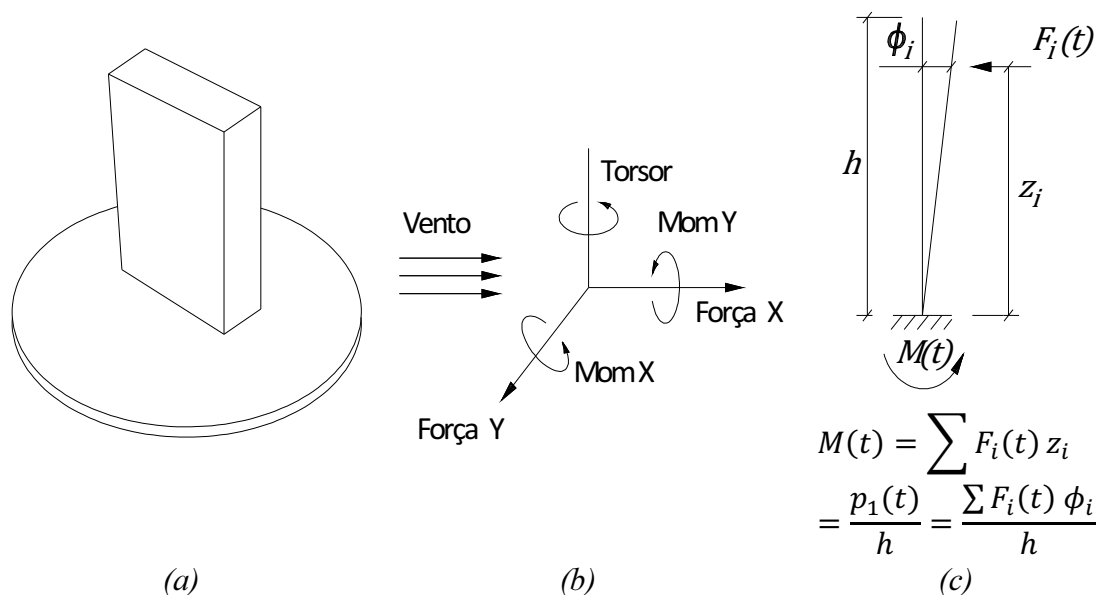


Figura 3. 6 (a) Esquema do modelo HFBB (b) forças na base que ele mede (c) forma modal linear e relação entre $M(t)$ e $p_1(t)$

3.7.2. Método HFPI “high frequency pressure integration”, integração das pressões

Este método também utiliza o modelo reduzido de alta frequência (rígido) em cujas faces se instalam transdutores de pressão como mostra a Figura 3. 7. Esta técnica tornou-se viável a partir dos anos de 1990 com o desenvolvimento de sistemas de

aquisição de registros com grande frequência de digitalização, capazes de medir pressões em centenas de pontos simultaneamente. A cada tomada de pressão é associada a área tributária. Com a amostra das pressões em tempo real é possível calcular numericamente no domínio do tempo as forças médias, as forças quase-permanentes e as forças modais associadas a cada modo de vibração da estrutura. A partir daí a análise é similar ao da técnica HFBB.

Uma vantagem do método de integração de pressões em relação ao da balança de base (HFBB) é que permite a obtenção da variação das forças aerodinâmicas e do momento tursor ao longo da altura da estrutura, e não somente na base, permitindo uma boa precisão no cálculo do tursor assim como a excitação de múltiplos modos de vibração. Este método está limitado a modelos com superfícies mais o menos lisas, sem rugosidades na arquitetura que interfiram demais na turbulência do escoamento ao redor do modelo.

Os registros de pressões ao longo do tempo são processados para se obter as forças médias e flutuantes modais. Estas últimas são aplicadas ao modelo teórico para determinação das respostas.



Figura 3. 7 Modelo de tomada de pressões do CAARC, (Oliveira, 2009).

3.7.3. Modelo aerolástico [Balança 3d tipo “stick” (BD3GDL)]

As técnicas descritas anteriormente, HFBB e HFPI, utilizam modelos rígidos e medem esforços na base e pressões na superfície respectivamente, mas não deformações.

Os modelos aerolásticos são os que se deformam e medem a resposta em deslocamentos e acelerações, são os que sofrem efeitos aerolásticos gerados pela interação fluido-estrutura, como são o amortecimento aerodinâmico, o desprendimento de vórtices, o martelamento ou o galope.

Os modelos aerolásticos a escala tem que ser projetados de acordo com a teoria da semelhança física para representar a estrutura real em termos de: comprimento, massa, momento de inércia, frequência, tempo, velocidade, aceleração, força, momento e amortecimento; para assim processar os deslocamentos no modelo e estimar as respostas na estrutura real.

O modelo “stick model” denominado balança dinâmica de três graus de liberdade (BD3GDL) desenhado por Oliveira (2009) e mostrado na *Figura 3. 8* é um modelo rígido acoplado a uma balança dinâmica de três graus de liberdade para representar as frequências fundamentais da estrutura e formas modais lineares.

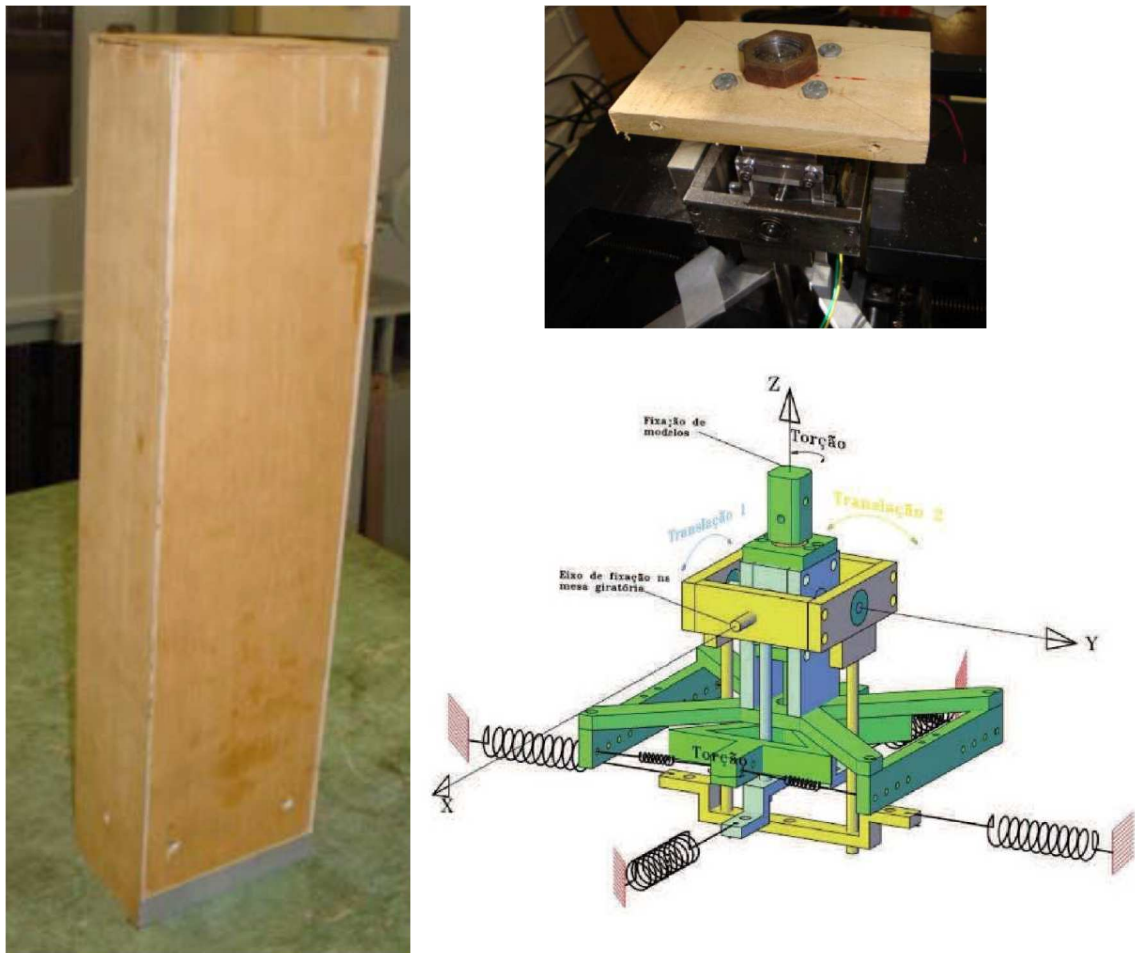


Figura 3. 8 Perspectiva do modelo e da balança dinâmica de 3 graus de liberdade BD3GDL desenhada por Oliveira (2009).

CAPÍTULO 4

PROCEDIMENTOS NORMATIVOS

4.1. Processos da NBR 6123/1988

Os dois métodos apresentados pela NBR 6123/1988 para análise dinâmica de edificações foram desenvolvidos a partir do método de Davenport. O método simplificado considera formas modais segundo a expressão $(z/h)^\gamma$, sendo o valor de γ adotado de acordo com o tipo de estrutura. Já o método discreto é aplicado a estrutura com formas modais obtidas de um modelo numérico da estrutura (discretizada em elementos barra).

4.1.1. Análise estática (4.2 da NBR 6123/1988)

Para estruturas que não apresentam comportamento dinâmico a força de arrasto de projeto (na direção do vento) é calculada como:

$$\bar{F}(z) = C_a q A \quad (4.1)$$

sendo:

$\bar{F}(z)$ Força de arrasto gerada pela velocidade de vento e as características da estrutura. Definida como F_a na NBR 6123/1988.

A Área frontal efetiva. “Área sombra” perpendicular à direção do vento.

q Pressão dinâmica do vento (N/m^2):

$$q = 0,613 V_k^2 \quad (4.2)$$

sendo

$$0,613 = \frac{1}{2} \rho = \frac{1}{2} 1,226 \text{ kg}/m^3.$$

V_k Velocidade de projeto ou velocidade característica.

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 \quad (4.3)$$

Sendo:

V_0 Velocidade básica do vento: velocidade de uma rajada de 3s, excedida na média uma vez em 50 anos, a 10m acima da superfície, em campo aberto e plano, ou seja, para categoria de terreno II.

$$V_0 = \bar{U}_{3seg}(10)_{Cat II}$$

S_1 Fator topográfico.

S_2 Fator que considera a influência da rugosidade do terreno, das dimensões da edificação ou parte da edificação em estudo e a altura sobre a superfície. Apresentado no Anexo A da NBR 6123/1988.

$$S_2 = F_{r,II} b \left(\frac{z}{10} \right)^p \quad (4.4)$$

Sendo:

$F_{r,II}$ Fator de ajuste do intervalo de tempo da estimativa T e categoria II.

$$F_{r,II} = \frac{\bar{U}_{3seg}(10)_{cat II}}{\bar{U}_{T seg}(10)_{cat II}} \quad (4.5)$$

b Fator de ajuste da rugosidade do terreno, onde T é o tempo da estimativa e N qualquer categoria de terreno.

$$b = \frac{\bar{U}_{T seg}(10)_{cat N}}{\bar{U}_{T seg}(10)_{cat II}} \quad (4.6)$$

p Exponente de rugosidade do perfil da lei potencial para o tempo T e a categoria N .

S_3 Fator baseado em conceitos probabilísticos de uso da edificação.

4.1.2. Método dinâmico simplificado (9.3.1 da NBR 6123/1988)

O método simplificado é um caso particular do método dinâmico discreto, onde a forma modal normalizada, ϕ_k (definida na NBR 6123/1988 como x_i) é dada pela função $(z/h)^\gamma$.

Aplica-se a eq. (4.1), sendo a variação da pressão dinâmica com a altura expressa pela eq. (4.7), na qual o primeiro termo dentro dos colchetes corresponde à resposta média e o segundo representa a força equivalente estática que produz a amplitude máxima da resposta flutuante.

$$q(z) = \bar{q}_0 b^2 \left[\left(\frac{z}{z_r} \right)^{2p} + \left(\frac{h}{z_r} \right)^p \left(\frac{z}{h} \right)^\gamma \frac{1 + 2\gamma}{1 + \gamma + p} \xi \right] \quad (4.7)$$

sendo:

\bar{q}_0 Pressão dinâmica do vento para a velocidade de projeto, dada pela (4.2) é rescrita como:

$$\bar{q}_0 = 0,613 \bar{V}_p^2 \quad (\bar{q}_0 \text{ em } \frac{N}{m^2}, \bar{V}_p \text{ em } \frac{m}{s}) \quad (4.8)$$

sendo:

\bar{V}_p Velocidade de projeto, correspondente à velocidade (V_k), eq. (4.3), sobre 10min (600s) a 10m, ou seja, $F_{r,II}=0,69$. Resultando na seguinte eq.:

$$\bar{V}_p = 0,69 V_0 S_1 S_3 \quad (4.9)$$

b e p Calculados com a Tabela 20 da NBR 6123/1988, para $T=10min$.

ξ Coeficiente de amplificação dinâmica obtido a partir das figuras 14 a 18 do Item 9 da NBR 6123/1988).

Função de (tabela 19 da NBR 6123/1988):

- Tipo de edificação.
- Das dimensões da edificação.
- Da razão de amortecimento crítico ζ .
- Da frequência f (através da relação adimensional (\bar{V}_p/fL)). Onde f é a frequência natural e $L = 1800$ m.

z_r Altura de referência ($z_r = 10$ m).

γ Exponente da função (com valores representativos na Tabela 19 NBR 6123/1988) que define a forma modal da estrutura, ver *Figura 4. 1*.

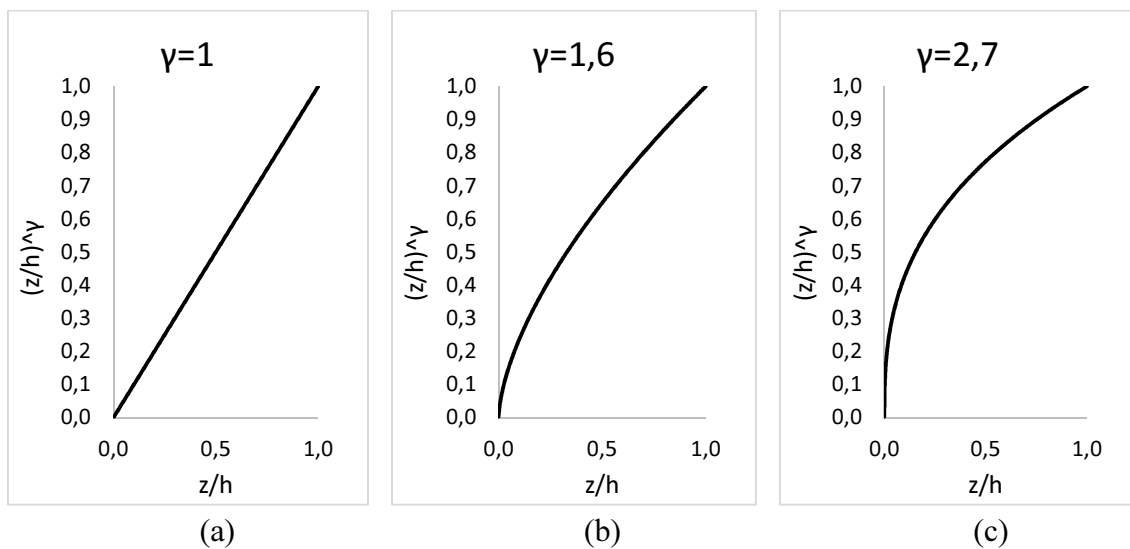


Figura 4. 1 Formas modais para diferentes exponente γ . Função $(z/h)^\gamma$.

4.1.3. Método dinâmico discreto (9.3.2 da NBR 6123/1988)

Este método foi desenvolvido por Galindez (1979) e está descrito resumidamente por Blessmann (1998).

O método discreto baseia-se no método de Davenport (item 3.5) sendo que a variância da amplitude modal $\sigma_{a,j}^2$ na eq. (3. 14) é obtida a través da integração numérica do espectro S_a de forma direta e não por separação da área sob o gráfico de S_a em duas contribuições (quase-estática e ressonante) como proposto por Davenport. Com o método calculam-se as forças aerodinâmicas que, se aplicadas estaticamente ao modelo estrutural, fornecem o deslocamento modal de pico obtido da análise dinâmica. São as chamadas forças equivalentes. Considera-se a estrutura discretizada por um modelo unifilar com n pontos nodais.

Para cada modo de vibração j , com componentes $\phi_{j,i}$ (definido como x_i na NBR 6123/1988), a força total $F_{j,i}$ (definida como X_i na NBR 6123/1988) aplicada no nó i é calculada como a seguir:

$$F_{j,i} = \bar{F}_{j,i} + \hat{F}_{j,i} \quad (4.10)$$

Sendo:

$\bar{F}_{j,i}$ Força média (definida como \bar{X}_i na NBR 6123/1988) dada por:

$$\bar{F}_{j,i} = \bar{q}_0 b^2 C_{ai} A_i \left(\frac{z_i}{z_r} \right)^{2p} \quad (4.11)$$

$\hat{F}_{j,i}$ Força flutuante de pico (definida como \hat{X}_i na NBR 6123/1988) dada por:

$$\hat{F}_{j,i} = F_H \Psi_i \phi_{j,i} \quad (4.12)$$

Sendo:

$\Psi_i = \frac{m_i}{m_0}$ Massa adimensionalizada

m_i Massa do nó i .

m_0 Massa de referência arbitrária.

F_H Força H:

$$F_H = \bar{q}_0 b^2 A_0 \frac{\sum_{i=1}^n \beta_i \phi_{j,i}}{\sum_{i=1}^n \Psi_i \phi_{j,i}^2} \xi \quad (4.13)$$

sendo:

$$\beta_i = C_{ai} \frac{A_i}{A_0} \left(\frac{z_i}{z_r} \right)^{2p} \quad (4.14)$$

onde:

A_0 Área de referência arbitrária.

ξ Coeficiente de amplificação dinâmica

O método discreto adota as seguintes premissas, (Blessmann, 1998) e (Galindez, 1979):

- Lei Potencial para definir o perfil vertical das velocidades médias do vento, eq. (2. 3).
- Espectro de Harris para definir a turbulência, eq. (2. 16).
- Fator de pico $g = 4$.
- Uso eq. (2. 23) para o cálculo da função do co-espectro normalizado $\Psi_u(i, k, f)$, junto com a função de admitância aerodinâmica χ^2 para o tratamento da correlação espacial das pressões.
- Coefficientes de decaimento iguais a $C_y=C_z=10$.

A seguir são apresentados os fundamentos do método conforme apresentado em Galindez (1979) e Blessmann (1998):

Como visto no item 3.5.3, e análogo a eq. (3. 33), para o modo j de vibração, o valor da amplitude modal de pico, a_j , é calculado multiplicando o fator de pico, g , pelo desvio padrão da amplitude, σ_{a_j} :

$$a_j = g \sigma_{a_j} \quad (4. 15)$$

Lembrando a eq. matricial (3. 8), $\mathbf{X}(\mathbf{t}) = \boldsymbol{\Phi} \mathbf{a}(\mathbf{t})$, o vetor \mathbf{X} de deslocamentos nodais, para o modo j de vibração, pode ser escrito como:

$$\mathbf{X} = g \sigma_{a_j} \boldsymbol{\phi}_j \quad (4. 16)$$

Conhecido o vetor deslocamentos pode-se obter o vetor de forças nodais equivalentes flutuantes com o método da rigidez, $\hat{\mathbf{F}} = \mathbf{K} \mathbf{X}$, pode-se reescrever a (4. 16) como:

$$\hat{\mathbf{F}} = \mathbf{K} g \sigma_{a_j} \boldsymbol{\phi}_j \quad (4. 17)$$

onde $\hat{\mathbf{F}}$ é um vetor de forças nodais, que ao ser aplicado estaticamente na estrutura resulta em deslocamentos extremos devido à ação dinâmica do vento considerando apenas o modo j de vibração.

Conhecida a solução do problema de autovalor para um sistema dinâmico em vibração livre, $\mathbf{K} \boldsymbol{\phi}_j = \omega_j^2 \mathbf{M} \boldsymbol{\phi}_j$, a (4. 17) pode-se reescrever como:

$$\hat{\mathbf{F}}_j = g \sigma_{a_j} \omega_j^2 \mathbf{M} \boldsymbol{\phi}_j \quad (4. 18)$$

Para uma estrutura discretizada, a força flutuante $\hat{F}_{j,i}$ em cada nó i para cada modo j é dada por:

$$\hat{F}_{j,i} = g \sigma_{a_j} \omega_j^2 m_i \phi_{j,i} \quad (4. 19)$$

Substituindo a (3. 14) na (4. 19) chega-se a:

$$\hat{F}_{j,i} = g \omega_j^2 m_i \phi_{j,i} \left[\int_0^\infty \frac{1}{\bar{m}_j^2 \omega_j^4} |H(f)|^2 S_{p_j}(f) df \right]^{1/2} \quad (4. 20)$$

Utiliza-se aqui a definição da função de resposta em frequência $|H(f)|^2$, como mostrada na eq. (3. 2), em que o termo ω^4 não está inserido em $|H(f)|^2$, ao contrário do formato apresentado em Galindez (1979).

Substituindo a (3. 14) e (2. 21) na (4. 20), e adicionando a função de admitância aerodinâmica χ^2 para o tratamento da correlação espacial das pressões junto com a densidade espectral da força modal $S_{p_j}(f)$ como Galindez (1979), chega-se em:

$$\hat{F}_{j,i} = g \omega_j^2 m_i \phi_{j,i} \left[\int_0^\infty \frac{1}{\bar{m}_j^2 \omega_j^4} |H(f)|^2 \frac{\rho^2}{4} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n \phi_{j,i} \phi_{j,k} (2\bar{U}_i)(2\bar{U}_k) C_{a_i} C_{a_k} A_i A_k \sqrt{S_{u,i}(f)} \sqrt{S_{u,k}(f)} \chi^2 \psi_u(i, k, f) df \right]^{1/2} \quad (4. 21)$$

Para maior simplificação escreve-se:

$$\hat{F}_{j,i} = m_i \phi_{j,i} F_H \quad (4. 22)$$

Sendo que $S_{u,i}(f) = S_{u,k}(f)$, $\omega_j^2 / \sqrt{\omega_j^4} = 1$ e considerando-se um valor médio de $\chi^2 \psi_u(i, k, f) = \overline{\chi^2(f) \psi_u(i, k, f)}$, F_H pode ser redefinido como:

$$F_H = g \frac{\rho \sum_{i=1}^n \phi_{j,i} \bar{U}_i C_{a_i} A_i}{\bar{m}_j} \left[4 \int_0^\infty |H(f)|^2 S_u(f) \overline{\chi^2(f) \psi_u(i, k, f)} df \right]^{1/2} \quad (4. 23)$$

Lembrando que a massa generalizada do modo j é definida como $\bar{m}_j = \sum_{i=1}^n m_i \phi_{j,i}^2$, fazendo uso da Lei potencial (2. 3), e multiplicando de dividindo por \bar{U}_{ref} , para adimensionalizá-la, chega-se reescrevendo na:

$$F_H = g \frac{\rho \bar{U}_{ref}^2 \sum_{i=1}^n \phi_{j,i} \left(\frac{z_k}{z_{ref}} \right)^2 C_{a_i} A_i}{\sum_{i=1}^n m_i \phi_{j,i}^2} \left[4 \int_0^\infty \frac{|H(f)|^2 S_u(f) \overline{\chi^2(f) \psi_u(i, k, f)}}{\bar{U}_{ref}^2} df \right]^{1/2} \quad (4. 24)$$

Fazendo as seguintes troca de variáveis:

$$q_{ref} = \frac{\rho \bar{U}_{ref}^2}{2} \quad (4. 25)$$

$$\xi = g \gamma \quad (4. 26)$$

onde:

$$\gamma^2 = 4 \int_0^\infty \frac{|H(f)|^2 S_u(f) \overline{\chi^2(f) \psi_u(i, k, f)}}{\bar{U}_{ref}^2} df \quad (4. 27)$$

e \bar{U}_{ref} é a velocidade de referência (comumente na altura $z=10$ m), e substituindo a (4. 25) e a (4. 26) na (4. 24) chega-se em:

$$F_H = q_{ref} \frac{\sum_{i=1}^n \phi_{j,i} \left(\frac{z_i}{z_{ref}} \right)^p C_{a_i} A_i}{\sum_{i=1}^n m_i \phi_{j,i}^2} \xi \quad (4. 28)$$

4.2. Processo do Eurocódigo 1-4/2005

4.2.1. Pressão de vento de pico

Desconsiderados os fatores sazonal (c_{season}) e direcional (c_{dir}) o valor de referência da velocidade do vento (v_b) é definido como a velocidade média do vento referida a períodos de $10min$, a uma altura de $10m$ acima da superfície num terreno plano e aberto ($z_0 = 0,05m$) com probabilidade de ser excedida anualmente igual a $0,02$ (período de retorno de 50 anos).

O ajuste de v_b as condições locais do terreno e ao longo da altura z é feito por meio da lei logarítmica (coeficiente $c_r(z)$) e do coeficiente de orografia $c_0(z)$, resultando na definição de velocidade $c_r(z)$, resultando na definição da velocidade média do vento a uma altura z acima da superfície $\bar{U}(z)$, definida no Eurocódigo 1-4/2005 como $v_m(z)$:

$$\bar{U}(z) = c_r(z) * c_0(z) * v_b \quad (4. 29)$$

em que:

$c_r(z)$ coeficiente de rugosidade definido por:

$$\begin{aligned} c_r(z) &= k_r \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) & \text{para } z_{min} \leq z \leq z_{max} \\ c_r(z) &= c_r(z_{min}) & \text{para } z \leq z_{min} \end{aligned} \quad (4. 30)$$

em que:

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

$$k_r = 0,19 \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} \quad (4. 31)$$

em que:

$z_{0,II} = 0,05m$ (Categoria de terreno II, Tabela 4.1 Eurocódigo 1-4/2005).

z_{min} altura mínima (Tabela 4.1 Eurocódigo 1-4/2005).

z_{max} altura a ser considerada igual a $200m$.

A intensidade de turbulência à altura z , $I_u(z)$, definido no Eurocódigo 1-4/2005 como $I_v(z)$, é definida como o quociente entre o desvio padrão da turbulência e a velocidade média do vento, igual a eq. (2. 9).

O desvio padrão da turbulência, definido no Eurocódigo 1-4/2005 como σ_v , e sendo a intensidade de turbulência escrita em termos dos parâmetros da lei logarítmica, eq. (2. 10), é dado por:

$$\sigma_u = k_r * v_b \quad (4. 32)$$

Sendo, por tanto, constante ao longo da altura.

Ao contrario que a NBR 6123/1988 o Eurocódigo 1-4/2005 não define velocidade de vento de projeto (V_k da NBR) para determinação das pressões dinâmicas a serem aplicadas em análise estática equivalente das estruturas. A norma europeia define diretamente as pressões de pico $q_p(z)$ através de:

$$q_p(z) = [1 + 7 I_u(z)] \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2(z) \quad (4.33)$$

em que:

ρ massa específica do ar, sendo o valor recomendado $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$.

4.2.2. Forças exercidas pelo vento

As forças exercidas pelo vento sobre o conjunto da construção ou sobre uma parte dela deverão ser determinadas:

- a partir de coeficientes de força (5.2 Eurocódigo 1-4/2005), ou
- a partir das pressões nas superfícies (5.3 (3) Eurocódigo 1-4/2005).

A partir de coeficientes de força, F_w

A força exercida pelo vento, F_w , equivalente a força de arrasto, $\bar{F}(z)$, para a consideração estática e a força global, F , se a análise dinâmica for usada, sobre uma construção ou um elemento, poderá ser determinada diretamente através da expressão de soma vectorial:

$$F_w = c_s c_d \sum_{\text{elementos}} c_f q_p(z_e) A_k \quad (4.34)$$

em que:

$c_s c_d$ coeficiente estrutural, definido na secção 6 do Eurocódigo 1-4/2005;

z_e altura de referência, para a pressão exterior exercida pelo vento

A_k área de referência da construção ou do elemento de construção, indicada na secção 7 do Eurocódigo 1-4/2005 como A_{ref} .

$A_k = A_{ref} = l \cdot b = \text{comprimento} \times \text{largura}$

c_f coeficiente de arrasto ou força relativo à construção ou ao elemento de construção, fornecido na secção 7 do Eurocódigo 1-4/2005, equivalente a C_a .

$$c_f = c_{f,0} \Psi_r \Psi_\lambda \quad (4.35)$$

onde:

$c_{f,0}$ coeficiente de arrasto ou força para elementos sem livre escoamento em torno das extremidades;

Ψ_r coeficiente de redução para secções quadradas com cantos arredondados;

Ψ_λ coeficiente de efeitos de extremidade para elementos cujas extremidades sejam livremente contornadas pelo vento.

4.2.3. Coeficiente estrutural $c_s c_d$

O coeficiente estrutural $c_s c_d$ deverá ter em conta o efeito nas ações do vento da não simultaneidade na ocorrência das pressões de pico sobre a superfície (*size factor*, c_s) em conjunto com o efeito das vibrações da estrutura devidas à turbulência (*dynamic factor*, c_d).

Coeficiente estrutural $c_s c_d$

O procedimento pormenorizado para o cálculo do coeficiente estrutural $c_s c_d$ é descrito pela expressão:

$$c_s c_d = \frac{1 + 2 k_p I_u(z_s) \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 I_u(z_s)} \quad (4.36)$$

em que:

- z_s altura de referência para a determinação do coeficiente estrutural.
- k_p fator de pico, definido como o quociente entre o valor máximo da parte flutuante da resposta e o desvio padrão desta, ou seja “ $k_p = g$ ”.
- B^2 coeficiente de resposta quase-estática, que tem em conta a falta de total correlação das pressões sobre a superfície da construção;
- R^2 coeficiente de resposta ressonante, que tem em conta o efeito da turbulência em ressonância com o modo de vibração.

NOTA 1: O coeficiente de dimensão c_s tem em conta o efeito de redução na ação do vento devido à não simultaneidade na ocorrência das pressões de pico sobre a superfície da construção; poderá ser obtido através da expressão:

$$c_s = \frac{1 + 7 I_u(z_s) \sqrt{B^2}}{1 + 7 I_u(z_s)} \quad (4.37)$$

NOTA 2: O coeficiente dinâmico c_d tem em conta o efeito de majoração devido às vibrações provocadas pela turbulência em ressonância com a estrutura; poderá ser obtido através da expressão:

$$c_d = \frac{1 + 2 k_p I_u(z_s) \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 I_u(z_s) \sqrt{B^2}} \quad (4.38)$$

4.2.4. Procedimento 1 para a determinação do Coeficiente estrutural $c_s c_d$ (ANEXO B do Eurocódigo 1-4/2005)

Coeficiente de resposta quase-estática B^2 (Background response factor)

O coeficiente de resposta quase-estática B^2 , poderá ser calculado através da expressão:

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0,9 \left(\frac{L1 + h}{L(z_s)} \right)^{0,63}} \quad (4. 39)$$

em que:

$L1, h$ largura e altura da construção.

$L(z_s)$ Escala de turbulência, à altura de referência z_s , eq. (2. 20).

Fator de pico, k_p, g

O fator de pico k_p , definido como o quociente entre o valor máximo da parte flutuante da resposta e o desvio padrão desta, deverá ser obtido através da expressão análoga a eq. (3. 34):

$$k_p = g = \sqrt{2 \ln(vT)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 \ln(vT)}} \quad ; \quad k_p \geq 3 \quad (3. 34)a$$

em que:

T duração de integração da velocidade média do vento, $T = 600 s$.

v frequência de passagens ascendentes.

$$v = f_n \sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}} \quad ; \quad v \geq 0,08Hz \quad (4. 40)$$

em que:

f_n frequência própria (fundamental) da estrutura. Definido como $f_{1,x}$ no Eurocódigo 1-4/2005.

$v = 0,08Hz$ corresponde a um fator de pico, $k_p = 3$.

Coefficiente de resposta ressonante R^2 (Resonance response fator)

O coeficiente de resposta R^2 deverá ser calculado através da expressão:

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \delta} S_L(z_s, f_n) R_h(\eta_h) R_b(\eta_b) \quad (4. 41)$$

em que:

R_h, R_b funções de admitância aerodinâmica.

δ decremento logarítmico total de amortecimento fornecido em F.5 Eurocódigo 1-4/2005;

$$\delta = 2 \pi \zeta \quad (4. 42)$$

em que:

ζ razão de amortecimento crítico definido na eq. (3. 3).

As funções de admitância aerodinâmica R_h e R_b para uma configuração de modo fundamental poderão ser estimadas através das expressões:

$$R_h = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2 \eta_h^2} (1 - e^{-2 \eta_h}) ; \quad R_h = 1 \quad \text{for} \quad \eta_h = 0 \quad (4.43)$$

$$R_b = \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2 \eta_b^2} (1 - e^{-2 \eta_b}) ; \quad R_b = 1 \quad \text{for} \quad \eta_b = 0 \quad (4.44)$$

com:

$$\eta_h = \frac{4,6 h}{L(z_s)} f_L(z_s, f_n) \quad ; \quad \eta_b = \frac{4,6 b}{L(z_s)} f_L(z_s, f_n)$$

4.2.5. Procedimento 2 para a determinação do Coeficiente estrutural $c_s c_d$ (ANEXO C do Eurocódigo 1-4/2005)

Coeficiente de resposta quase-estática B^2 (Background fator)

O coeficiente de resposta quase-estática B^2 poderá ser calculado através da expressão:

$$B^2 = \frac{1}{1 + \frac{3}{2} \sqrt{\left(\frac{L1}{L(z_s)}\right)^2 + \left(\frac{h}{L(z_s)}\right)^2 + \left(\frac{L1}{L(z_s)} \frac{h}{L(z_s)}\right)^2}} \quad (4.45)$$

Coeficiente de resposta ressonante R^2 (Resonance response fator)

O coeficiente de resposta R^2 deverá ser calculado através da expressão:

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \delta} S_L(z_s, f_n) K_s(f_n) \quad (4.46)$$

em que:

$S_L(z_s, f_n)$ função de densidade espectral de potência adimensional definida na eq. (2.18).

$K_s(f_n)$ função de efeito redutor de dimensão, estimada através da expressão:

$$K_s(n) = \frac{1}{1 + \sqrt{(G_y \phi_y)^2 + (G_z \phi_z)^2 + \left(\frac{2}{\pi} G_y \phi_y G_z \phi_z\right)^2}} \quad (4.47)$$

em que:

$$\phi_y = \frac{C_y L1 f}{\bar{U}(z_s)} \quad ; \quad \phi_z = \frac{C_z h f}{\bar{U}(z_s)} \quad (4.48)$$

As constantes G_y e G_z dependem, respectivamente, da variação da configuração modal ao longo do eixo horizontal y e do eixo vertical z . As constantes de decaimento C_y e C_z são ambas iguais a **11,5**.

CAPÍTULO 5

EXEMPLOS NUMÉRICOS/EXPERIMENTAIS

5.1. CHAMINÉ

5.1.1. Características da chaminé

O modelo da Chaminé foi escolhido pela sua definição no Anexo I da NBR 6123/1988 e as análises prévias nas ref. Blessmann (1998), Cardoso (2011) e Carvalho (2015), para a avaliação desses trabalhos assim como dos métodos usados nesta dissertação.

A estrutura da chaminé é um tubo circular de concreto armado ($E = 28500 \text{ N/mm}^2$) de seção variável. Na *Figura 5. 1* mostram-se as características geométricas assim como a discretização usada para os cálculos numéricos. As características geométricas detalhadas dos elementos estão indicadas na *Tabela 5. 1*. Para o cálculo das forças devidas ao vento foi tomado $C_a = 0,6$.

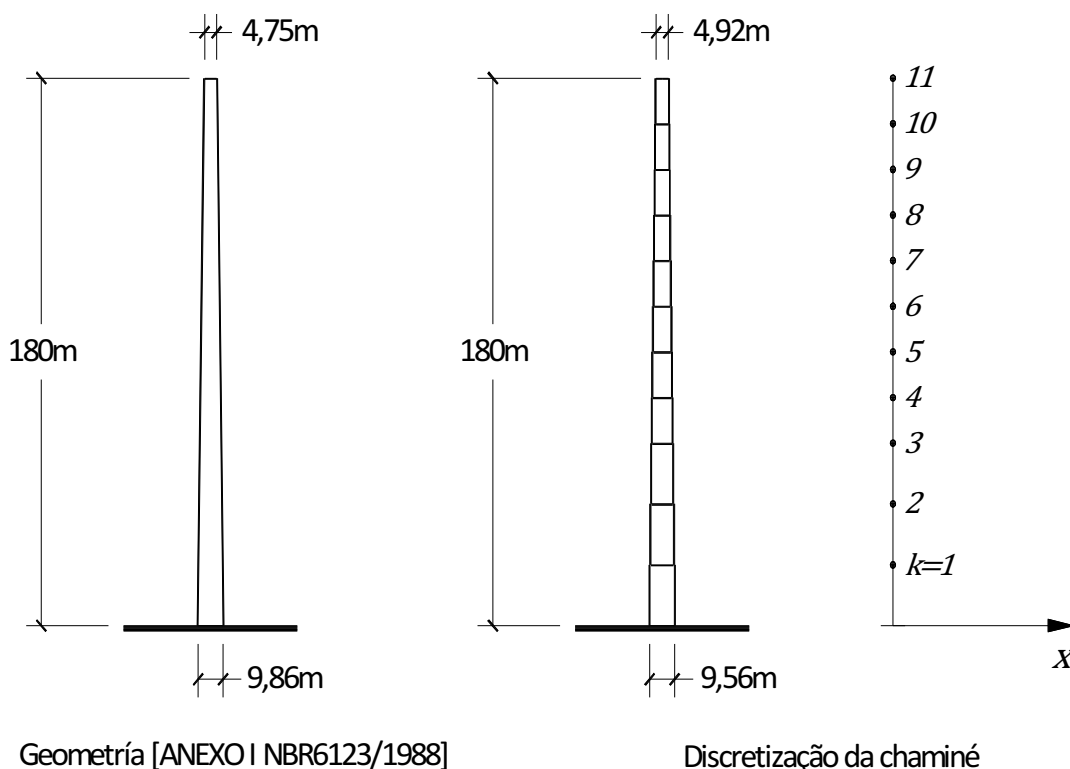


Figura 5. 1 Geometria e modelo da chaminé.

Tabela 5.1 Características geométricas do modelo da chaminé.

Elemento	z (m)	Diâmetro externo (m)	Espessura da parede (m)	Momento de inércia (m ⁴)
11	165 - 180	4,92	0,17	7,16
10	150 - 165	5,27	0,17	8,87
9	135 - 150	5,61	0,17	10,76
8	120 - 135	5,98	0,17	13,10
7	105 - 120	6,43	0,2	19,01
6	90 - 105	6,89	0,22	25,66
5	75 - 90	7,34	0,25	35,03
4	60 - 75	7,81	0,35	57,19
3	40 - 60	8,35	0,48	92,22
2	20 - 40	8,97	0,6	138,87
1	0 - 20	9,56	0,6	170,25

Características dinâmicas da chaminé

Os dados associados aos nós do modelo adotado na análise dinâmica estão apresentados na Tabela 5.2 e na Figura 5.2, que ilustra as formas modais de vibração em flexão dos três primeiros modos.

A razão de amortecimento crítico foi tomada igual a 1% em todas as análises, sendo o amortecimento aerodinâmico desprezível ($\zeta_{aer} = 0$).

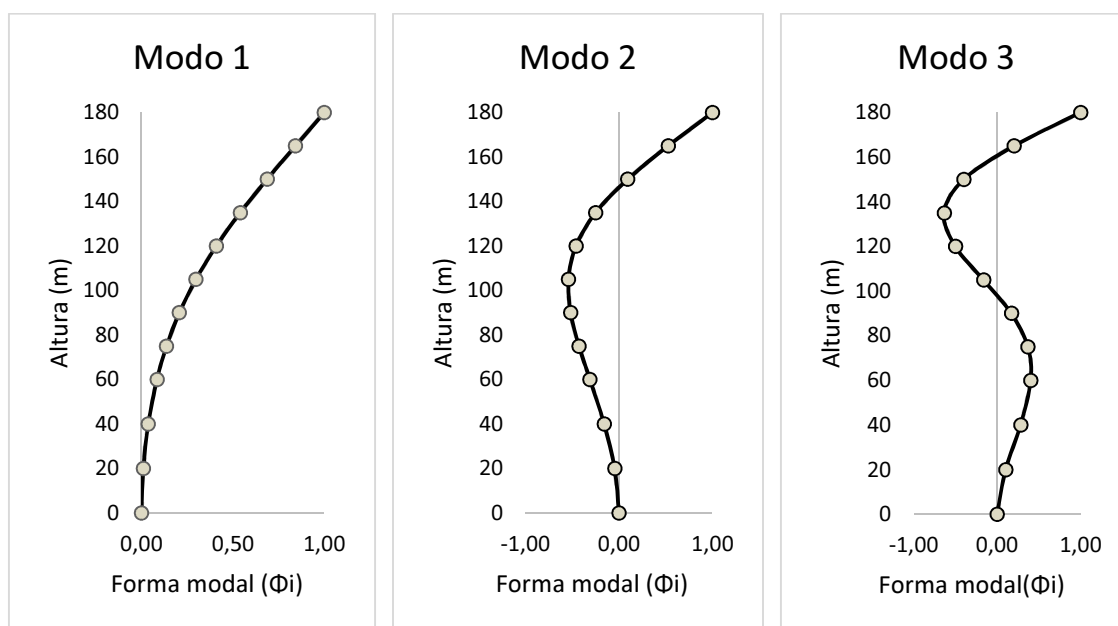


Figura 5.2 Três primeiros modos naturais de vibração da chaminé:
 $f_1 = 0,262$ Hz; $f_2 = 0,941$ Hz; $f_3 = 2,156$ Hz.

Tabela 5. 2 Características nodais do modelo da chaminé.

Nó	Altura z_i (m)	Autovetor	Autovetor	Autovetor	Massa	Área de
		MODO 1 x_1	MODO 2 x_2	MODO 3 x_3	nodal m_i (kg)	exposição A_i (m ²)
11	180	1,000	1,000	1,000	70900	36,3
10	165	0,842	0,526	0,202	146200	76,4
9	150	0,687	0,093	-0,400	153700	81,6
8	135	0,540	-0,250	-0,636	163100	86,9
7	120	0,409	-0,461	-0,500	174400	93,0
6	105	0,298	-0,540	-0,164	195000	99,9
5	90	0,207	-0,517	0,170	232500	107,2
4	75	0,137	-0,428	0,368	292500	114,0
3	60	0,085	-0,311	0,402	463800	141,4
2	40	0,037	-0,159	0,281	750000	173,2
1	20	0,010	-0,046	0,102	1254000	282,5

5.1.2. Características do vento

Os dados básicos para a modelagem do vento de acordo com a NBR 6123/1988 são os seguintes:

$$V_0 = 40 \text{ m/s}$$

Terreno plano ($S_1 = 1$)

Terreno de Categoria de rugosidade III (S_2)

O período de recorrência médio de V_0 é 50 anos ($S_3 = 1$)

Vento com parâmetros da NBR 6123/1988 (Lei Potencial)

A velocidade média a 10m de altura, num período de 600s, na Cat III é definida como:

$$\bar{U}(10) = V_0 S_1 S_2 S_3 = 40 * 1 * \left[0,86 * 0,69 * \left(\frac{z}{10}\right)^{0,185}\right] * 1 = 23,74 \text{ m/s} \quad (5. 1)$$

O desvio padrão da velocidade flutuante é dado a partir da eq. (2. 7).

$$\sigma_u = 2,58 \sqrt{0,0105} * 23,74 = 6,27 \text{ m/s}$$

Vento com parâmetros do Eurocódigo 1-4/2005 (Lei logarítmica)

A velocidade média a 10m de altura, num período de 600s, para $z_0 = 200\text{mm}$ (Tabela 2. 1) é definida como:

$$\bar{U}(10) = c_r(10) * c_0(10) * v_b$$

$$23,74 = 0,819 * 1 * v_b$$

assim a velocidade básica do vento, v_b , é definida como:

$$v_b = 29 \text{ m/s}$$

Na *Figura 5. 3* mostram-se os perfis de velocidade média de vento utilizados para o cálculo das forças dinâmicas de vento, onde pode-se observar cómo o perfil do Eurocódigo resulta em maiores velocidades para esse vento equivalente.

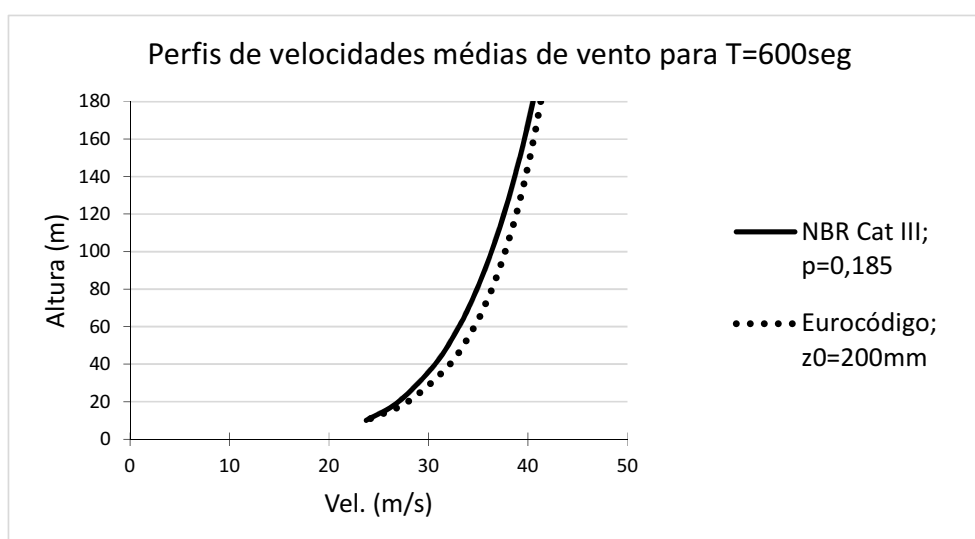


Figura 5. 3 Perfis de velocidades do vento utilizados para o cálculo com a NBR 6123/1988 e o Eurocódigo 1-4/2005.

5.1.3. Análise estática da chaminé

Apresenta-se neste item a análise estática da chaminé sob ação das forças de pico devidas ao vento de acordo com a NBR 6123/1988 e também de acordo com o Eurocódigo 1-4/2005. Este cálculo seria válido no caso em que a chaminé não apresentasse comportamento dinâmico devido a turbulência do vento, por exemplo caso a frequência fundamental fosse superior a 2 Hz.

a) De acordo com a NBR 6123/1988 (item 4)

As forças são determinadas considerando-se as duas opções apresentadas pela NBR 6123/1988 para a determinação do fator S_2 : utilizando os dados da Tabela 1 da NBR 6123/1988 e usando o Anexo A da norma. No primeiro caso considera-se o intervalo de tempo de 10s no cálculo da média da velocidade para determinação de velocidade de pico associada a dimensão do turbilhão que envolve a estrutura. No segundo caso o intervalo de tempo é obtivo por meio de processo iterativo.

Considerando $\Delta t=10\text{seg.}$ (Tabela 1 da NBR 6123/1988)

A chaminé tem 180m de altura, maior de 50m , é catalogada como Classe C; o terreno é considerado de categoria de rugosidade III. Então:

$$\begin{aligned}F_r &= 0,95 \\p &= 0,115 \\b &= 0,93\end{aligned}$$

Com processo iterativo (Anexo A da NBR 6123/1988)

Para estruturas cuja maior dimensão excede 80m , S_2 pode ser reduzido para ter em consideração o tamanho da rajada, este parâmetro pode ser calculado para um intervalo de tempo, t , de acordo com o anexo A da NBR 6123/1988 com a eq. (4. 4).

Os valores de b , $F_{r,II}$ e p são calculados função do intervalo de tempo, t , de acordo com:

$$t = 7,5 L / V_t(h) \quad (5. 2)$$

sendo:

L Altura ou largura da superfície frontal da edificação. $L = 180\text{ m}$.

$V_t(h)$ Velocidade média do vento sobre t segundos na altura h . Igual a:

$$V_t(h) = S_1 S_2(h) V_0 \quad (5. 3)$$

O processo de cálculo de t é iterativo, é mostrado na *Tabela 5. 3*. Primeiro, um valor de $t(s)$ é adotado, neste caso $30s$; segundo lugar, são calculados os parâmetros b , $F_{r,II}$ e p da tabela 21 da NBR 6123/1988 mediante interpolação linear se precisar; terceiro, é calculado S_2 no topo da edificação com a eq. $S_2 = b F_{r,II}(z/10)^p$ do Anexo A da NBR 6123/1988; quarto, calcula-se $V_t(h)$ com a (5. 3); e quinto, com a eq. (5. 2) acha-se t , que tem que convergir com o primeiro valor adotado. Neste caso o valor adotado é $28,37\text{ s}$.

Tabela 5. 3 Iteração do intervalo de tempo t .

Parâmetros			
$t(s)$	30,00	28,44	<u>28,37</u>
p	0,91	0,91	0,912
b	0,14	0,14	0,138
F_r	0,87	0,87	0,875
S_2 no topo	1,19	1,19	1,19
$V_t(h)$	47,46	47,59	47,59
t	28,44	28,37	<u>28,37</u>

b) De acordo com o Eurocódigo 1-4/2005

O cálculo estático com o Eurocódigo 1-4/2005 é feito adotando-se $c_d = 1$ na eq. (4. 34) de modo a considerar uma análise quase-estática.

Na *Tabela 5. 8* e na *Tabela 5. 9* mostram-se os valores de c_s achados com o Anexo B e C do Eurocódigo 1-4/2005, resultando em 0,862 e 0,821 respectivamente.

c) Resultados da análise estática

Na *Tabela 5. 4* mostram-se os valores da análise estática calculados pela norma NBR 6123/1988, na *Tabela 5. 5* são apresentados os resultados usando o Eurocódigo 1-4/2005. Um estudo comparativo é mostrado graficamente na *Figura 5. 4*.

Pode-se observar na *Figura 5. 4* que as respostas com o uso de $\Delta t=10s$ são maiores que se for usado $\Delta t=28,37s$, pois quanto menor é o comprimento do turbilhão, menor é intervalo de tempo de estimativa do vento e maior é a sua velocidade. Também é visível que os métodos do Eurocódigo 1-4/2005 geram resultados mais conservadores do que os da norma NBR 6123/1988.

Na *Figura 5. 4* as forças equivalentes maiores na base são causa da maior área associada aos nós inferiores, mesmo com uma velocidade de vento incidente menor, pois o diâmetro da chaminé é maior y a discretização é feita cada 20m até os 60m de altura e daí para acima cada 15m, é por isso também que existe uma anomalia no perfil de forças equivalentes na altura 60m.

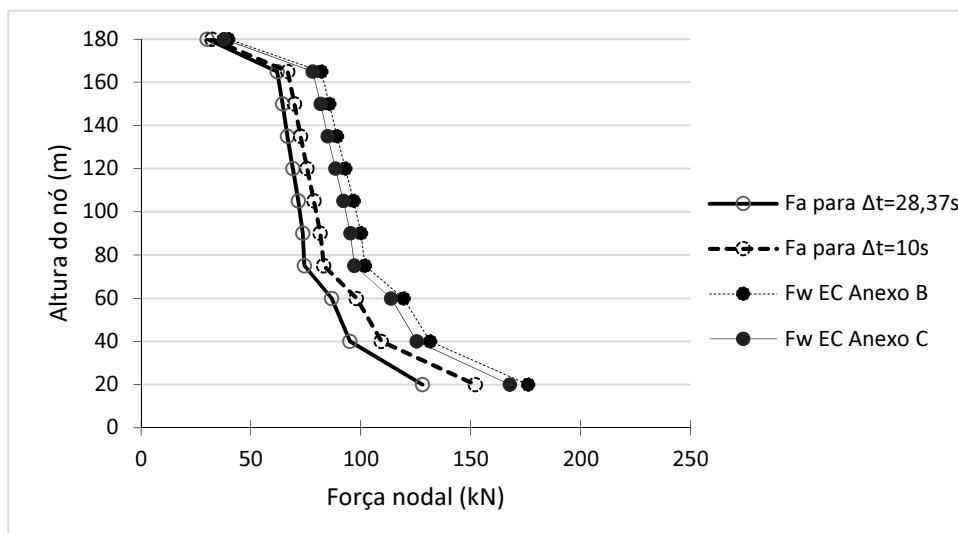


Figura 5. 4 Resultados das forças estáticas equivalentes calculadas com a NBR 6123/1988 e com o Eurocódigo 1-4/2005.

Aplicando as forças estáticas equivalentes nodais mostradas na *Figura 5. 4* e nas Tabelas *Tabela 5. 4* e *Tabela 5. 5* sobre o modelo numérico da chaminé chega-se em

deslocamentos no topo de 26,8cm para $\Delta t=10s$; 24,6cm para $\Delta t=28,37s$; 32,9cm para o Anexo B e 31,4cm para o Anexo C.

Tabela 5. 4 Resultados nodais da análise estática da chaminé (Item 4 da NBR 6123/1988).

Nó	z (m)	Fator S2		V. característica		Pressão dinâmica		Forças nodais	
		$\Delta t=28,37s$ S_2	$\Delta t=10s$ S_2	$\Delta t=28,37s$ $V_k(z)$ (m/s)	$\Delta t=10s$ $V_k(z)$ (m/s)	$\Delta t=28,37s$ q (N/m ²)	$\Delta t=10s$ q (N/m ²)	$\Delta t=28,37s$ F_a (kN)	$\Delta t=10s$ F_a (kN)
11	180	1,19	1,23	47,57	49,27	1386,89	1488,35	30,21	32,42
10	165	1,17	1,22	47,00	48,78	1353,98	1458,86	62,07	66,87
9	150	1,16	1,21	46,38	48,25	1318,83	1427,23	64,57	69,88
8	135	1,14	1,19	45,71	47,67	1281,03	1393,06	66,79	72,63
7	120	1,12	1,18	44,98	47,03	1240,05	1355,83	69,19	75,66
6	105	1,10	1,16	44,16	46,31	1195,18	1314,82	71,64	78,81
5	90	1,08	1,14	43,23	45,50	1145,40	1269,02	73,67	81,62
4	75	1,05	1,11	42,15	44,56	1089,19	1216,91	74,50	83,24
3	60	1,02	1,09	40,87	43,43	1024,13	1156,03	86,89	98,08
2	40	0,97	1,04	38,65	41,45	915,70	1053,09	95,16	109,44
1	20	0,88	0,96	35,12	38,27	756,26	897,91	128,19	152,19
Momento fletor na base (kNm)								74007	81405
Cortante na base (kN)								823	921

Tabela 5. 5 Resultados da análise estática com o Eurocódigo 1-4/2005.

z m	A_i m ²	$c_r(z)$	$\bar{U}(z)$ m/s	$I_u(z)$	$q_p(z)$ N/m ²	$c_e(z)$	F_w Anexo B kN	F_w Anexo C kN
180	36,3	1,42	41,27	0,147	2119	4,11	39,77	37,89
165	76,4	1,41	40,75	0,149	2079	4,03	82,11	78,24
150	81,6	1,39	40,17	0,151	2035	3,95	85,85	81,80
135	86,9	1,36	39,53	0,153	1987	3,86	89,28	85,07
120	93,0	1,34	38,81	0,156	1934	3,75	93,00	88,61
105	99,9	1,31	38,00	0,160	1875	3,64	96,84	92,27
90	107,2	1,28	37,07	0,164	1807	3,51	100,18	95,45
75	114,0	1,24	35,96	0,169	1729	3,36	101,92	97,11
60	141,4	1,19	34,61	0,175	1635	3,17	119,56	113,92
40	173,2	1,11	32,15	0,189	1471	2,85	131,70	125,48
20	282,5	0,96	27,94	0,217	1206	2,34	176,19	167,87
Momento fletor na base (kNm)							99592	94892
Cortante na base (kN)							1116	1064

5.1.4. Análise dinâmica da chaminé pelo método simplificado da NBR 6123/1988 (Item 9.3.1)

A forma modal indicada para torres e chaminés de concreto de seção variável, conforme a Tabela 19 da NBR 6123/1988, $\gamma=2,7$ é definida por: $(z/h)^{2,7}$.

O coeficiente de amplificação dinâmica calculado com interpolação linear com o uso da Figura 16 da NBR 6123/1988 é:

$$\xi = 1,61$$

Os resultados das forças calculadas com os parâmetros acima descritos pelo modelo simplificado são representados na *Tabela 5. 6*.

Tabela 5. 6 Resultados de pressão e forças nodais pelo método simplificado da NBR 6123/1988 da chaminé.

Nó	z (m)	A_i (m ²)	$\bar{U}(z)$ (m/s)	$\bar{q}_{0,média}$ (N/m ²)	$\bar{q}_{0,flut}$ (N/m ²)	\bar{q}_0 (N/m ²)	$F_{média}$ (kN)	F_{flut} (kN)	F_{tot} (kN)
11	180	36,30	40,52	1006,30	1563,56	2569,86	21,92	34,05	55,97
10	165	76,40	39,87	974,42	1236,19	2210,61	44,67	56,67	101,33
9	150	81,60	39,17	940,65	955,71	1896,36	46,05	46,79	92,85
8	135	86,90	38,42	904,69	719,09	1623,78	47,17	37,49	84,66
7	120	93,00	37,59	866,11	523,20	1389,31	48,33	29,19	77,52
6	105	99,90	36,67	824,36	364,83	1189,19	49,41	21,87	71,28
5	90	107,20	35,64	778,66	240,62	1019,28	50,08	15,48	65,56
4	75	114,00	34,46	727,86	147,08	874,94	49,79	10,06	59,85
3	60	141,40	33,06	670,18	80,52	750,70	56,86	6,83	63,69
2	40	173,20	30,68	576,82	26,94	603,76	59,94	2,80	62,74
1	20	282,50	26,98	446,33	4,15	450,48	75,65	0,70	76,36
Momento fletor na base (kNm)							51143	36043	87186
Cortante na base (kN)							550	262	812

Aplicando-se ao modelo numérico o vetor de forças indicado na última coluna da *Tabela 5. 6*, F_{tot} , a análise estática da estrutura conduz ao deslocamento de pico (idealmente igual ao da análise dinâmica) no topo da chaminé, igual a *33,7cm* (considerando-se apenas o primeiro modo de vibração).

5.1.5. Análise dinâmica da chaminé pelo método dinâmico discreto da NBR 6123/1988 (Item 9.3.2)

Os resultados do cálculo dinâmico discreto proposto pela NBR 6123/1988 são apresentados na *Tabela 5. 1*.

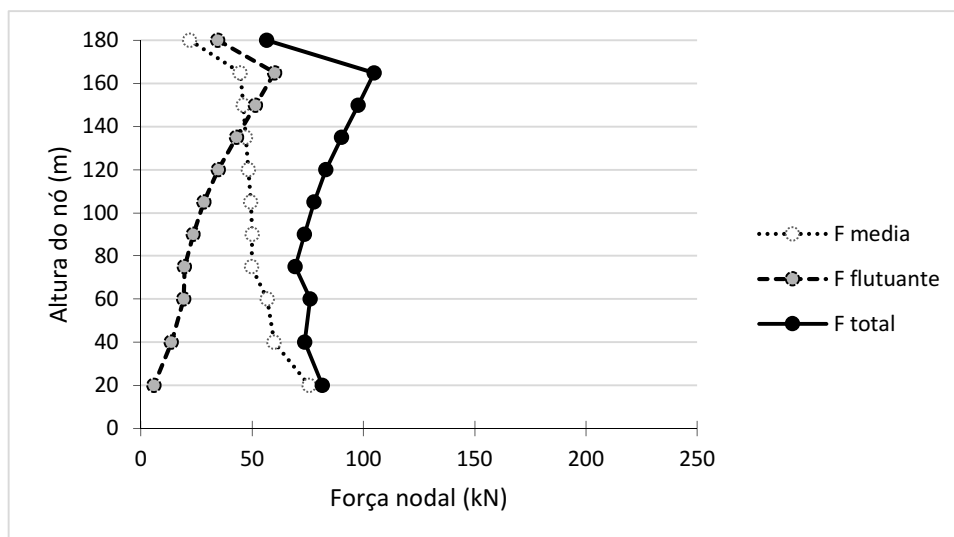


Figura 5. 5 Forças calculadas para a análise dinâmica com o método discreto.

Tabela 5. 7 Resultados do método do modelo discreto da NBR 6123/1988 para a chaminé.

Nó	z (m)	A_i (m ²)	ϕ_i	Ψ_i	β_i	F_H (kN)	\bar{F}_i (kN)	\hat{F}_i (kN)	F_i (kN)
11	180	36,3	1,00	0,071	0,029	488,58	21,92	34,64	56,56
10	165	76,4	0,84	0,146	0,060	488,58	44,67	60,14	104,81
9	150	81,6	0,69	0,154	0,063	488,58	46,05	51,58	97,64
8	135	86,9	0,54	0,163	0,065	488,58	47,17	43,05	90,22
7	120	93,0	0,41	0,174	0,068	488,58	48,33	34,87	83,20
6	105	99,9	0,30	0,195	0,072	488,58	49,41	28,40	77,81
5	90	107,2	0,21	0,233	0,075	488,58	50,08	23,48	73,57
4	75	114,0	0,14	0,293	0,077	488,58	49,79	19,58	69,37
3	60	141,4	0,08	0,464	0,091	488,58	56,86	19,20	76,06
2	40	173,2	0,04	0,750	0,104	488,58	59,94	13,65	73,60
1	20	282,5	0,01	1,254	0,149	488,58	75,65	5,89	81,54
Momento fletor na base (kNm)							51143	42273	93416
Cortante na base (kN)							550	335	884

Aplicando-se o vetor de forças nodais da última coluna da Tabela 5. 7 ao modelo numérico, a análise estática conduz ao deslocamento de pico da análise dinâmica considerando apenas o primeiro modo de vibração igual a 35,4cm.

5.1.6. Análise dinâmica da chaminé pelo método do Eurocódigo 1-4/2005

As forças equivalentes a serem aplicadas ao longo da altura, F_w , eq. (4. 34), são mostradas na Tabela 5. 10 e graficamente na Figura 5. 6 para cada um dos dois procedimentos apresentados no Eurocódigo 1-4/2005 (Anexos B e C): o procedimento 1, Anexo B, apresentado no Item 4.2.4 e o procedimento 2, Anexo C, apresentados no Item

4.2.5. Considerando-se $c_f = C_a = 0,6$, $\rho = 1,266 \text{ kg/m}^3$, $q_b = 515,53 \text{ N/m}^2$, e os fatores $c_s c_d$ dados na Tabela 5. 8 e na Tabela 5. 9.

Tabela 5. 8 Coeficiente estrutural $c_s c_d$ (Anexo B, procedimento 1 Eurocódigo 1-4/2005); $\zeta = 1\%$.

z_s m	L1 m	h m	$L(z_s)$ m	f Hz	$\bar{U}(z)$ m/s	σ_u m/s	$I_u(z)$	$f_L(z, f)$	$S_L(z, f)$	B^2		
108	7,12	180	208,62	0,262	38,16	5,86	0,159	1,432	0,100	0,543		
z_s	$\delta(\zeta_r, 1\%)$	η_h	η_b	R_h	R_b	R^2	v	T	k_p	$c_s c_d$	c_s	c_d
108	0,063	5,684	0,225	0,160	0,866	1,090	0,214	600	3,305	1,110	0,862	1,288

Tabela 5. 9 Coeficiente estrutural $c_s c_d$ (Anexo C, procedimento 2 Eurocódigo 1-4/2005); $\zeta = 1\%$.

z_s	B^2	c_y	c_z	ϕ_y	ϕ_z	$k_s(f)$	R^2	$c_s c_d$	c_s	c_d
108	0,436	11,5	11,5	0,56	14,21	0,199	1,563	1,177	0,821	1,434

Tabela 5. 10 Resultados da análise dinâmica do Eurocódigo 1-4/2005 para $\zeta = 1\%$.

z m	A_i m ²	$c_r(z)$	$\bar{U}(z)$ m/s	$I_u(z)$	$q_p(z)$ N/m ²	$c_e(z)$	F_{media} kN	F_w Anexo B kN	F_w Anexo C kN
180	36,3	1,42	41,27	0,147	2119	4,11	22,74	51,22	54,35
165	76,4	1,41	40,75	0,149	2079	4,03	46,65	105,76	112,21
150	81,6	1,39	40,17	0,151	2035	3,95	48,42	110,58	117,32
135	86,9	1,36	39,53	0,153	1987	3,86	49,94	115,00	122,00
120	93,0	1,34	38,81	0,156	1934	3,75	51,53	119,79	127,09
105	99,9	1,31	38,00	0,160	1875	3,64	53,07	124,74	132,34
90	107,2	1,28	37,07	0,164	1807	3,51	54,17	129,04	136,90
75	114,0	1,24	35,96	0,169	1729	3,36	54,22	131,28	139,28
60	141,4	1,19	34,61	0,175	1635	3,17	62,29	154,00	163,38
40	173,2	1,11	32,15	0,189	1471	2,85	65,83	169,60	179,97
20	282,5	0,96	27,94	0,217	1206	2,34	81,12	226,93	240,76
Momento fletor na base (kNm)							5448	128278	136683
Cortante na base (kN)							590	1438	1532

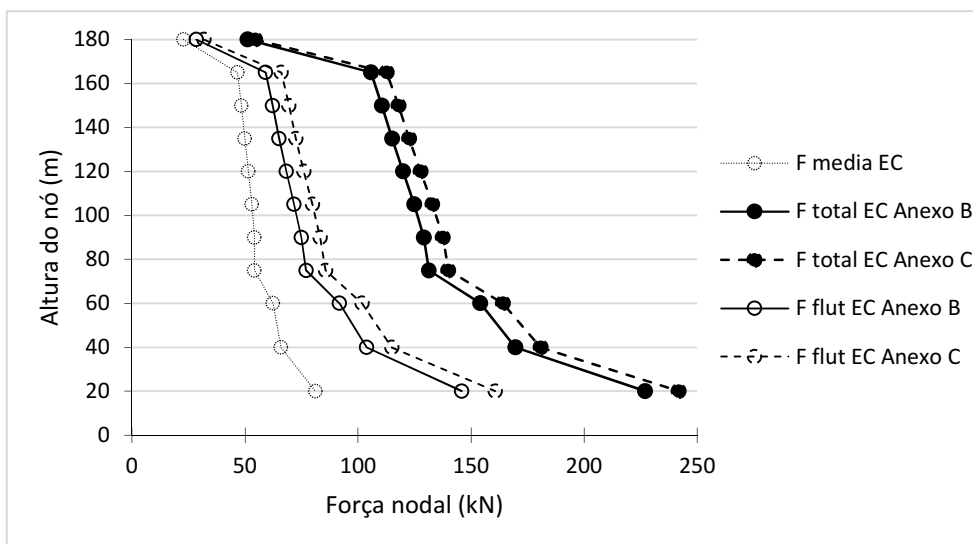


Figura 5. 6 Resultados das forças equivalentes calculadas com o Eurocódigo 1-4/2005.

Aplica-se as forças F_w no modelo numérico e fazendo análise estática chega-se ao deslocamento máximo no topo da chaminé igual $42,4cm$ no caso do Anexo B e $45,2cm$ se for usado o Anexo A.

5.1.7. Análise dinâmica da chaminé no domínio da frequência

Apresenta-se neste item os resultados em termos de deslocamento no topo e esforços na base da chaminé obtidos com a solução modal no domínio da frequência exposta nos itens 3.3 e 3.5.

A velocidade média \bar{U}_k , é igual à mostrada no item 5.1.2 para o Vento com parâmetros da NBR 6123/1988 (Lei Potencial). O espectro de Harris (2. 16) foi calculado para o vento médio de $10min$, com os parâmetros de rugosidade da Cat III mostrados na Tabela 2. 1, resultando em:

$$\sigma_{vento} = 6,27m/s ; \quad L = 1800m ; \quad \bar{U}(10) = 0,59 * 40 = 23,74 m/s$$

A função de co-espectro normalizado, $\Psi_u(\Delta r, f)$, usada no cálculo é a mostrada na eq. (2. 22).

A Figura 5. 7 mostra o Espectro de Harris, eq. (2. 16), e o Espectro de força generalizada, eq. (3. 12), para as características do vento dadas.

A Figura 5. 8 apresentam-se a função de admitância mecânica $|H(f)|^2$ e o espectro de resposta de amplitude $S_{a,j}(f)$ da chaminé para o primeiro modo de vibração.

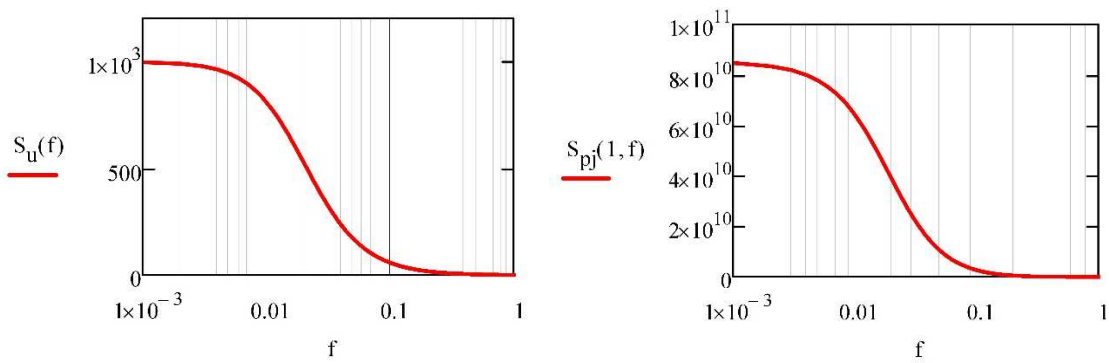


Figura 5. 7 Espectro de Harris, $S_u(f)$ (direita) e Espectro de força generalizada para o 1º modo, $S_{p,1}(f)$ (esquerda).

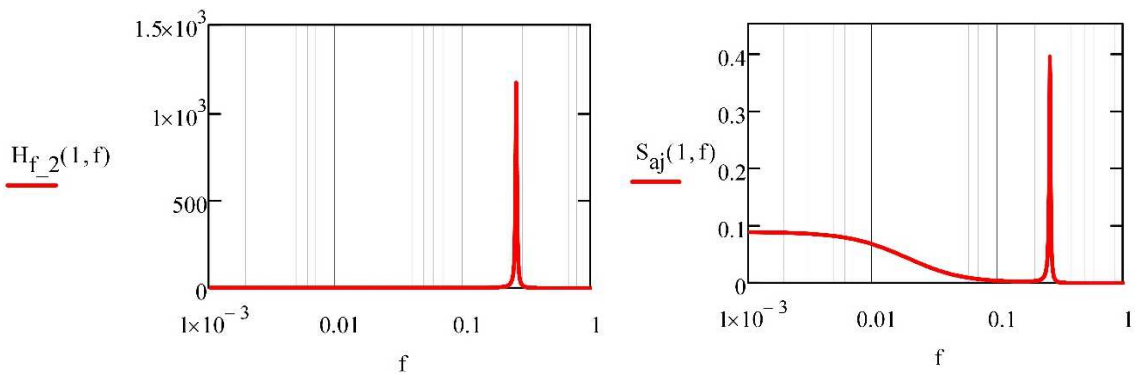


Figura 5. 8 Função de admitância mecânica $|H(f)|^2$ (direita) e Espectro de resposta de amplitude $S_{a,j}(f)$ (esquerda) da chaminé para o 1º modo.

Aplica-se a eq. (3. 14) para o primeiro modo de vibração e a eq. (3. 15), integrando entre 0,00001 e 1 Hz, chega-se para o nó $k=1$ (180m) no desvio padrão seguinte:

$$\sigma_x = 90 \text{ mm}$$

Com o uso da (3. 34) chega-se no seguinte resultado:

$$g = 3,362$$

Assim, o deslocamento flutuante máximo provável mostrado na (3. 33) é:

$$\hat{x}_{max} = g \sigma_x = 3,362 * 0,0905 = 0,304 \text{ m}$$

5.1.8. Resultados da chaminé (deslocamentos calculados com o uso de SAP2000)

Na Tabela 5. 11 são mostrados a compilação dos resultados obtidos no item 5.1.

Tabela 5. 11 Resultado das respostas da chaminé com os métodos aplicados.

MÉTODO DE ANÁLISE	S_u	\bar{x} (m)	σ_x (mm)	g	$\hat{x} =$ $g \sigma_x$ (m)	$x =$ $\bar{x} + \hat{x}$ (m)	Mom Max na base (kNm)	Cort Max na base (kN)	
ESTÁTICO	NBR $\Delta t=10s$	-	0,268	-	-	0,268	81405	921	
	NBR $\Delta t=28,37s$	-	0,246	-	-	0,246	74007	823	
	EC Anexo B	-	0,329	-	-	0,329	99592	1116	
	EC Anexo C	-	0,314	-	-	0,314	94892	1064	
DINÂMICO	MODELO SIMPLIF. (9.3.1 NBR)	Harris	0,174	41	4	0,163	0,337	87186	812
	MODELO DISCRETO (9.3.2 NBR)	Harris	0,174	45	4	0,180	0,354	93416	884
	DOM. DA FREQUÊNCIA	Harris	0,174	90,5	3,36	0,304	0,478	122585	1116
	DOM. DA FREQUÊNCIA	ESDU	0,174	90,2	3,36	0,303	0,477	122342	1114
	EC Anexo B	ESDU	0,184	73	3,31	0,240	0,424	128278	1438
	EC Anexo C			80	3,33	0,268	0,452	136683	1532

Dos resultados da Tabela 5. 11 chega-se nas seguintes conclusões:

- O resultado da análise feita pela NBR 6123/1988 considerando a velocidade de pico ou característica baseada na dimensão máxima de 50m (classe C), difere aproximadamente 10% dos resultados que consideram a dimensão total de 180m na determinação da velocidade de pico.
- A análise estática pelo método do Eurocódigo 1-4/2005 gera respostas aproximadamente 20% maiores do que as calculadas com a NBR 6123/1988.
- O método simplificado da NBR 6123/1988, com o uso de $\gamma=2,7$, produz um resultado 5% menor do que o modelo discreto, o que é uma aproximação muito boa para o modelo da chaminé.

- Teoricamente o modelo discreto e o modelo no domínio da frequência teriam que produzir resultados muito próximos. Considerando a solução numérica baseada no método no domínio da frequência como correto, o modelo discreto da NBR 6123/1988 subestima o desvio padrão da resposta flutuante em 50% e o deslocamento máximo em 30% aproximadamente para o caso da chaminé. Este resultado indica que o método apresentado na NBR 6123/1988 no item 9 necessita ser revisado.
- O uso do Espectro de Harris e do ESDU são equivalentes no caso da chaminé.
- O método do Eurocódigo 1-4/2005 com o cálculo de $c_s c_d$ com o procedimento 1 (Anexo B), gera deslocamentos flutuantes e cortantes diferentes do método no domínio da frequência para um mesmo valor de momento máximo na base similar. Isso é causado pela diferente distribuição das forças equivalentes ao longo da altura.
- Comparando a solução numérica no domínio da frequência aplicado o ESDU com os procedimentos do Eurocódigo 1-4/2005 verifica-se uma boa correlação em termos de desvio padrão da resposta flutuante com cerca de 12% de diferença em relação ao método do Anexo C, para valores muito próximos do momento na base.

5.2. PREDIO B “BENCHMARK BUILDING FOR THE INTERNATIONAL HFBB COMPARISON PROJECT”

5.2.1. Projeto “*International HFBB Comparison Project*”

O projeto “*International HFBB Comparison Project*” foi iniciado na reunião da “*12th International Conference on Wind Engineering*” em Cairns, Austrália, Julho 2007. O projeto basicamente consiste na comparativa dos resultados gerados em diferentes túneis de vento do mundo, localizados em universidades e empresas, para dois prédios definidos e três velocidades de vento fornecidas. Todos eles usando o método HFBB “*High Frequency Based Balance*” para a estimativa dos resultados.

O projeto aplica a dois prédios:

- Prédio A (*Building A, Advanced*), para laboratórios mais experimentados, que tem modos de vibração acoplados.
- Prédio B (*Building B, Basic*), com modos de vibração desacoplados e forma modal linear.

Os prédios têm sua origem no edificio padrão do “CAARC (*Commonwealth Advisory Aeronautical Council standard tall building model*)”, onde as dimensões foram

adaptadas em metros e alguma das frequências naturais mudaram levemente. As análises geradas pelos diferentes túneis de vento foram apresentadas no “13th International Conference on Wind Engineering (Netherlands)” no 2011.

No presente trabalho só será considerado o prédio B (básico) para o estudo comparativo.

5.2.2. Características do prédio B

Características geométricas

Na *Figura 5. 9* estão representadas as dimensões do modelo, sendo $l_x = 45m$, $l_y = 30m$, $h_z = 180m$, assim como os eixos de referência utilizados (IAWE, 2009). A massa específica do prédio é $\rho = 160kg/m^3$.

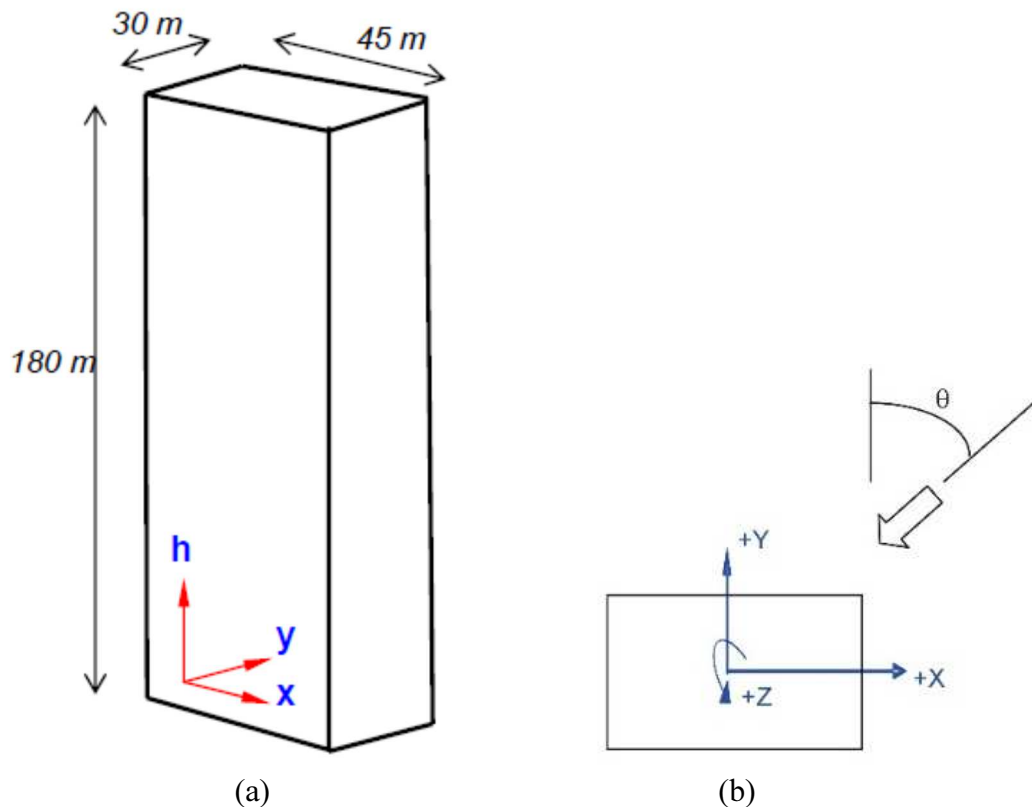


Figura 5. 9 (a) Volume do Prédio B e eixos de referência. (IAWE, 2009).

(b) Sistema de coordenadas. (IAWE, 2012).

Características dinâmicas

Os modos fundamentais de vibração em flexão nas direções X e Y e torsão tem forma linear (exponente $\gamma = 1$), como mostrado na *Figura 4. 1 (a)*, estão desacoplados entre eles. As suas frequências naturais principais são:

$$\begin{aligned}
 f_1 = f_Y &= 0,20 \text{ Hz} && \text{(flexão na direção Y exclusivamente)} \\
 f_2 = f_X &= 0,23 \text{ Hz} && \text{(flexão na direção X exclusivamente)} \\
 f_3 = f_\theta &= 0,40 \text{ Hz} && \text{(torsor puro)}
 \end{aligned}$$

O valor da massa modal ou generalizada para os três primeiros modos de vibração é:

$$\bar{m}_j = 12\,980 \text{ t}$$

Para o amortecimento estrutural, ζ_{est} , são considerados dois valores: **1% e 2,5%**, sendo o amortecimento aerodinâmico ζ_{aer} desprezível, resultando nos seguintes amortecimentos críticos usados para o cálculo:

$$\zeta_1 = 0,01 \quad e \quad \zeta_{2,5} = 0,025$$

5.2.3. Características do vento a simular do “HFBB comparison project”

O projeto “*International HFBB Comparison Project*” propõe os seguintes valores do vento a ser simulados nos diferentes tuneis de vento:

Densidade do ar: $\rho_{ar} = 1,2 \text{ kg/m}^3$

Velocidades médias

O perfil de velocidades médias será desenhado para velocidades médias no topo do prédio de 20, 30 e 40 m/s. As velocidades médias estão associadas a períodos/janelas de tempo de 1 hora (3600s), (Tse, 2015). Os valores das velocidades médias e os parâmetros de rugosidade propostos são:

$$\begin{aligned}
 \bar{U}_{3600s}(180) &= 20, 30 \text{ e } 40 \text{ m/s} \\
 p &= 0,25 \text{ ou } z_0 = 0,2 \text{ m (aproximadamente)}
 \end{aligned}$$

Velocidade flutuante

- A intensidade longitudinal de turbulência no topo do prédio B é **0,143 ($\pm 10\%$)**.
- O comprimento de escala da turbulência longitudinal é de **175 m ($\pm 20\%$)**.

5.2.4. Resultados experimentais do “International HFBB Comparison Project”

Os resultados experimentais do “*International HFBB Comparison Project*” são extraídos da ref (IAWE, 2012); nela são apresentados graficamente em termos de

momentos na base (flexão nos eixos X e Y e torção Z) e acelerações de pico no topo do prédio em função do ângulo θ do vento incidente (ver *Figura 5. 9 (b)*).

As figuras neste item apresentam resultados em termos de momentos fletores médios e flutuantes de pico nas direções perpendiculares X e Y na base do prédio com taxa de amortecimento $\zeta=1\%$ para o caso de $\bar{U}(180) = 20\text{m/s}$. Observa-se que os resultados dos sete grupos mostrados encontram-se bem correlacionados, exceto em poucas situações como por exemplo, o momento M_y de pico no caso $\theta = 180^\circ$ na *Figura 5. 13*. Vê-se também que os valores máximos e mínimos do momento fletor M_y ocorrem para ação de vento com $\theta = 90^\circ$ e $\theta = 270^\circ$, ou seja, vento na direção X e para M_y ocorrem para ação de vento com $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 180^\circ$, ou seja vento na direção Y, como esperado

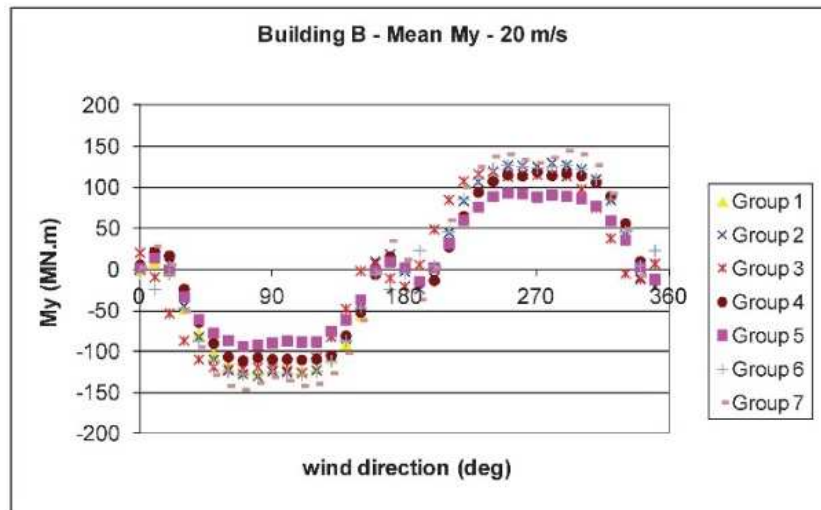


Figura 5. 10 Momento médio na base M_y . $\bar{U}_{ref}(180) = 20\text{ m/s}$. IAWQ (2012)

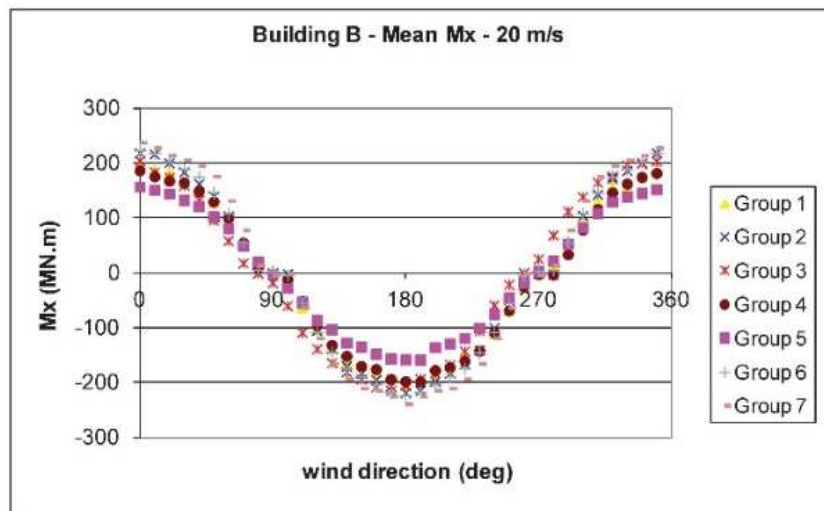


Figura 5. 11 Momento médio na base M_x . $\bar{U}_{ref}(180) = 20\text{ m/s}$. IAWQ (2012)

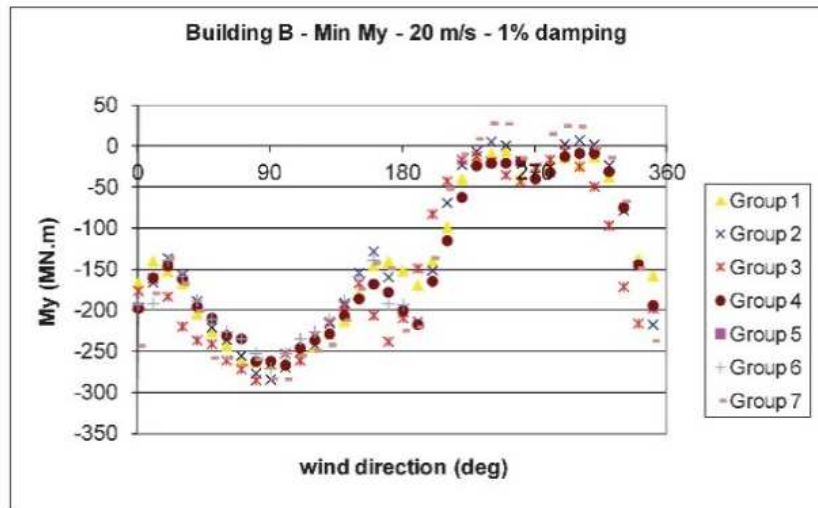


Figura 5. 12 Momento mínimo na base M_y , $\zeta=1\%$. $\bar{U}_{ref}(180) = 20 \text{ m/s}$. IAWA (2012)

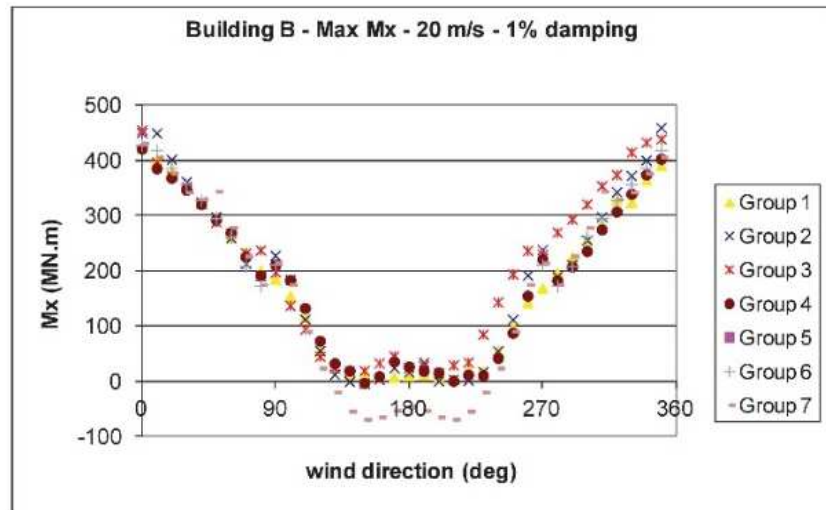


Figura 5. 13 Momento máximo na base M_x , $\zeta=1\%$. $\bar{U}_{ref}(180) = 20 \text{ m/s}$. IAWA (2012)

5.2.5. Parâmetros para o cálculo das forças de arrasto

a) Velocidade de vento com parâmetros da NBR 6123/1988 (Lei Potencial)

O perfil da velocidade média baseado na lei potencial, eq. (2. 3), tem:

$$\begin{aligned} \bar{U}_{ref} &= \bar{U}_{3600 \text{ seg}}(180) = 20; 30; 40 \text{ m/s} \\ z_{ref} &= 180 \text{ m} \\ p &= 0,25 \\ S_1 &= S_3 = 1 \end{aligned}$$

Com $p = 0,25$ e velocidade média horaria pode-se classificar o terreno como **categoria IV** da NBR 6123/1988. No entanto, o valor calculado para a intensidade de turbulência no topo do prédio se afasta do valor prescrito ($I_u = 0,143$), calculado com valores de C_{as} da Tabela 2. 1. Já para categoria III I_u no topo se aproxima mais a $0,143$ ainda que $p = 0,20$, como mostrado Tabela 5. 12. Nesta tabela pode-se observar que o parâmetro p proposto no projeto é o mesmo que o da categoria IV, mas a intensidade de turbulência prescrita é mais próxima da categoria III. Sendo assim, as duas categorias são analisadas e consideradas para o estudo comparativo.

Tabela 5. 12 Parâmetros do vento do “International HFBB Comparison Project” e os das categorias III e IV da NBR 6123/1988.

Categoria	p_{3600s}	$S_2 (180)$	$z_0 (m)$	C_{as}	$I_u (180m)$
HFBB	0,25	-	0,2	0,013 (2.17)	0,143
IV	0,25	0,91	0,7 (Tabela 2.1)	0,0226 (Tabela 2.1)	0,188 (2.17)
III	0,2	0,98	0,2 (Tabela 2.1)	0,0105 (Tabela 2.1)	0,148 (2.17)

Na Tabela 5. 13 são mostrados os valores das velocidades básicas de vento associadas às velocidades horárias na altura de $180m$ para as categorias III e IV da NBR 6123/1988.

Tabela 5. 13 Valores das velocidades básicas de vento V_0 .

$\bar{U}_{3600s}(180)$	20	30	40	(m/s)
V_0 Cat IV	21,98	32,97	43,96	(m/s)
V_0 Cat III	20,41	30,61	40,82	(m/s)

b) Velocidade de vento com parâmetros do Eurocódigo 1-4/2005 (Lei logarítmica)

Parâmetros equivalentes no Eurocódigo 1-4/2005.

O perfil vertical de velocidades médias de vento $\bar{U}(z)$ é definido pela eq. (4. 29) com os parâmetros do Eurocódigo 1-4/2005. Com o uso das equações (4. 29) até a 31) e assumindo $z_0 = 0,2m$ e $c_0(z) = 1$ chega-se aos valores de velocidade básica de vento v_b expressas na Tabela 5. 14.

Tabela 5. 14 Determinação dos parâmetros de vento para o cálculo do perfil de vento a usar no Eurocódigo 1-4/2005.

$\bar{U}_{ref}(180)$ (m/s)	z (m)	k_r	$c_r(z)$	v_b (m/s)	σ_v	$I_u(z)$
20	180	0,209	1,42	14,04	2,940	0,147
30	180	0,209	1,42	21,07	4,410	0,147
40	180	0,209	1,42	28,09	5,880	0,147

Com o uso de $k_r = 0,209$ e $k_l = 1$, podem-se fazer os cálculos da intensidade da turbulência, mostrados na *Tabela 5. 14*, onde pode-se observar a boa correlação entre a intensidade da turbulência do vento no topo do prédio obtivo com o processo do Eurocódigo 1-4/2005 e o valor de **0,143** proposto pelo “*International HFBB Comparison Project*”

c) Comparação entre perfis de velocidade média

Os perfis verticais das velocidades médias horarias de vento usados nos cálculos do Eurocódigo 1-4/2005, $\bar{U}(z_0 = 0,2m)$ são apresentados na Figura 5. 14 junto com os perfis gerados com a lei potencial para as categorias da NBR 6123/1988 ($p=0,25$ para a Cat IV e $p=0,20$ para a Cat III). Pode-se comprovar como o perfil gerado com $z_0 = 0,2m$ resulta em valores moires de velocidade média que os outros, sendo o perfil referido a Cat IV o que conduz a valores de velocidade média menores.

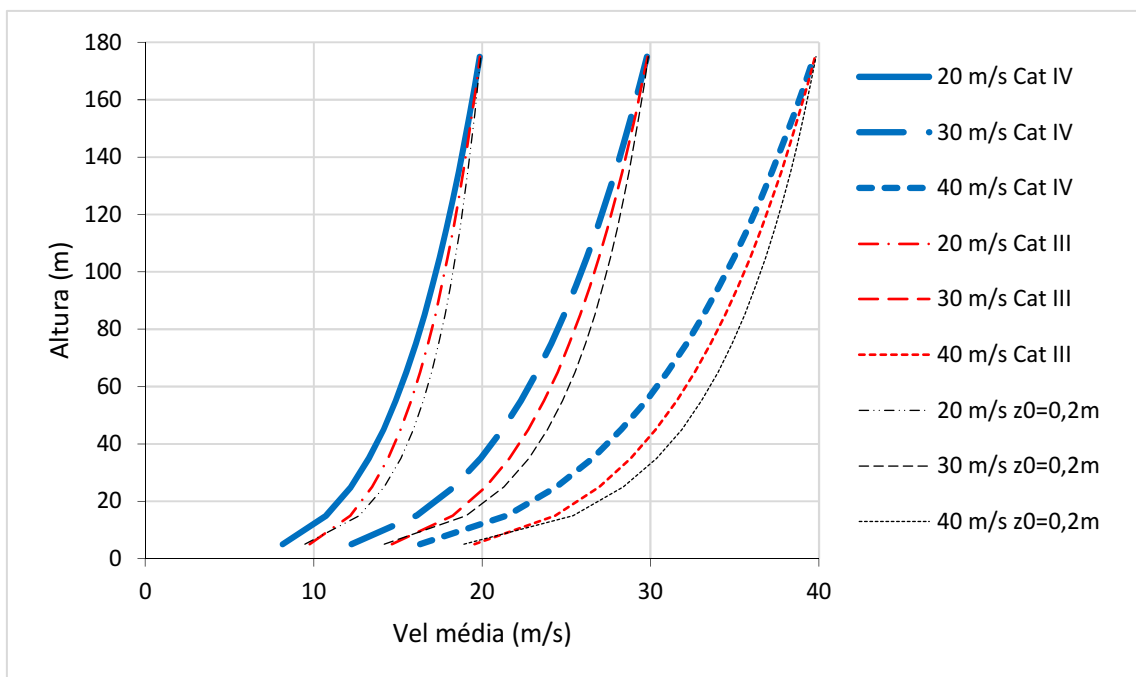


Figura 5. 14 Perfis verticais das velocidades médias $\bar{U}_{ref} = 20; 30$ e 40 m/s.

d) Co-espectro cruzado da turbulência

Os coeficientes de decaimento para o método no domínio da frequência e método discreto da NBR são considerados $C_y=10$ e $C_z=10$, como apresentado no item 2.5.4.. Já o Eurocódigo 1-4/2005 propõe **11,5** para os dois coeficientes.

e) Coeficientes de arrasto

A Tabela 5. 15 apresenta os valores de coeficientes de arrasto determinados a partir da NBR 6123/1988 para baixa turbulência e o Eurocódigo 1-4/2005. Verifica-se que na direção X houve melhor correlação de valores do que na direção Y, na qual o valor do Eurocódigo é 11% maior do que o da NBR.

Tabela 5. 15 Coeficientes de arrasto das diferentes análises.

Norma	Coeficiente de arrasto	
	Vento na dir X	Vento na dir Y
NBR 6123/1988	$C_{a,X} = 1,26$	$C_{a,Y} = 1,45$
Eurocódigo 1-4/2005	$c_{f,X} = c_{f,0} \Psi_r \Psi_\lambda =$ $= 1,76 * 1 * 0,691 = 1,22$	$c_{f,Y} = c_{f,0} \Psi_r \Psi_\lambda =$ $= 2,38 * 1 * 0,675 = 1,61$

f) Modelo numérico da estrutura

Para o modelo da NBR e do Eurocódigo a estrutura foi considerada discretizada com 18 nós na direção vertical sendo a forma modal linear. Para o tratamento da correlação espacial da velocidade flutuante de vento na solução numérica no domínio da frequência, a área da fachada do prédio B, perpendicular ao vento, foi dividida em 90 partes retangulares formando uma malha de 5x18 áreas nodais, respectivamente nas direções horizontal e vertical, cinco destas cada 10m de altura, como mostrado na Figura 5. 15.

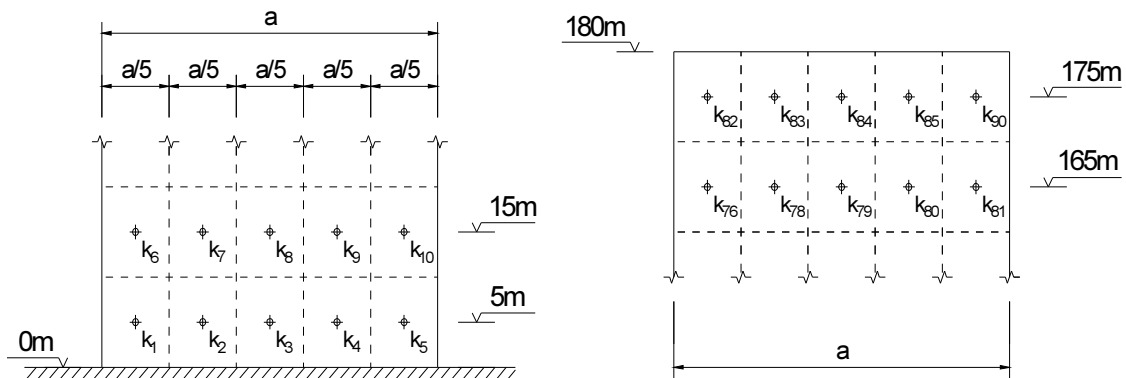


Figura 5. 15 Discretização das fachadas do prédio B em áreas nodais na direção perpendicular ao vento.

Valores usados para o cálculo

- $m_k = 432 t$ Massa nodal.
- $A_{k,X} = A_{ref,X} = 60 m^2$ Área nodal com o vento na direção X.
- $A_{k,Y} = A_{ref,Y} = 90 m^2$ Área nodal com o vento na direção Y.

5.2.6. Análise dinâmica do prédio B pelo método da NBR 6123/1988

É importante lembrar que o método simplificado (9.3.1 NBR 6123/1988) é um caso particular do método dinâmico discreto (9.3.2 NBR 6123/1988), onde a forma modal normalizada é introduzida como $(z/h)^\gamma$ na eq. (4. 7). Assim, para o caso considerado neste estudo, o expoente de esbeltez $\gamma = 1$, tem o significado de considerar a forma modal como linear (proposta no projeto HFFB), de modo que o método simplificado (9.3.1 NBR 6123/1988) e o método dinâmico discreto (9.3.2 NBR 6123/1988) produzam resultados muito próximos.

A velocidade do vento de projeto, \bar{V}_p , proposta no item 9.2.1 da norma NBR 6123/1988 corresponde a uma velocidade de vento média sobre 600s referida a 10m de altura acima do terreno para fazer os cálculos correspondentes a 10m sobre 3600s é preciso passar $F_{r,II}$ de 0,69 para **0,65**. Assim a velocidade de vento de projeto dada pela eq. (4. 9) é alterada para a (4. 9)b).

$$\bar{V}_p = 0,65 V_0 S_1 S_3 \quad (4. 9)b$$

Da mesma forma, os valores de b e p (Tabela 20 da NBR 6123/1988) adotados se referem ao intervalo de tempo $T=3600s$. Assim:

b passa de 0,71 para **0,68** na Cat IV; e de 0,86 para **0,85** na Cat III;
 p passa de 0,23 para **0,25** na Cat IV; e de 0,185 para **0,20** na Cat III.

Os resultados experimentais se referem a massa específica do ar igual a $1,2 \text{ kg/m}^3$, valor este utilizado aqui no cálculo da pressão dinâmica de referência $\bar{q}_0 = 0,6 \bar{V}_p^2$.

Coefficiente de amplificação dinâmica ou fator dinâmico, ξ

No presente item será apresentado o cálculo do coeficiente de amplificação dinâmica ξ para Cat IV usando a Figura 17 da NBR 6123/1988 para a velocidade de vento de referência de 20 m/s a 180m para $T=3600s$, para a direção de vento X e $\zeta = 0,025$.

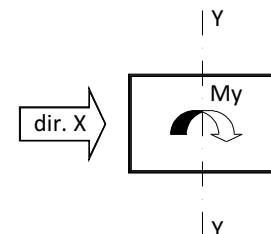
Velocidade do vento 20 m/s na direção do eixo X, Cat IV

Dados de cálculo:

$$\zeta = 0,025$$

$$\bar{V}_p / f_j L = 14,29 / 0,23 * 1800 = 0,035$$

$$\frac{l_1}{h} = \frac{30}{180} = 0,17$$



Na Figura 5. 16 estão representados os valores dos ábacos da NBR 6123/1988 para a velocidade de vento e a frequência f_j na direção X no caso de $h=25, 100$ e $300m$.

Com os valores extraídos da *Figura 5. 16* são feitas interpolações para determinar os valores dos coeficientes de amplificação dinâmica propostos pela norma NBR 6123/1988 para a altura desejada, nesse caso $180m$.

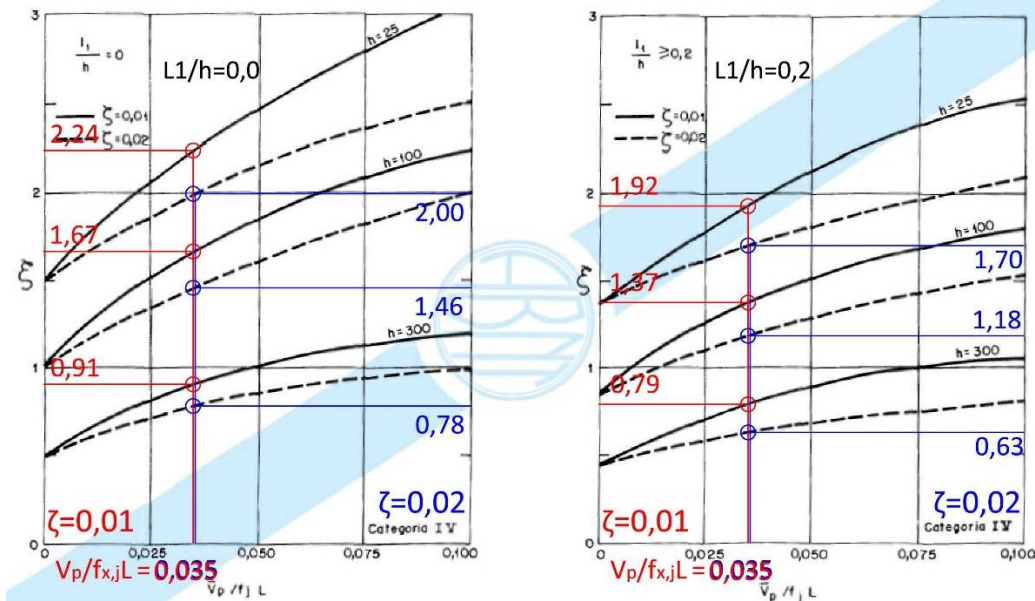


Figura 5. 16 Coef. de amplificação dinâmica, ζ , *Figura 17* da NBR 6123/1988. Extração dos dados de ζ para o amortecimento $\zeta=0,01$ e $\zeta=0,02$; para $l_1/h = 0$ e $l_1/h \geq 0,2$. Para o vento na direção X.

A primeira interpolação a ser feita é aquela para achar os valores de ζ para $h=180m$, para $l_1/h = 0$ e $l_1/h \geq 0,2$, mostrado na *Figura 5. 17* por interpolação linear, mais conservador que se for usada uma curva.

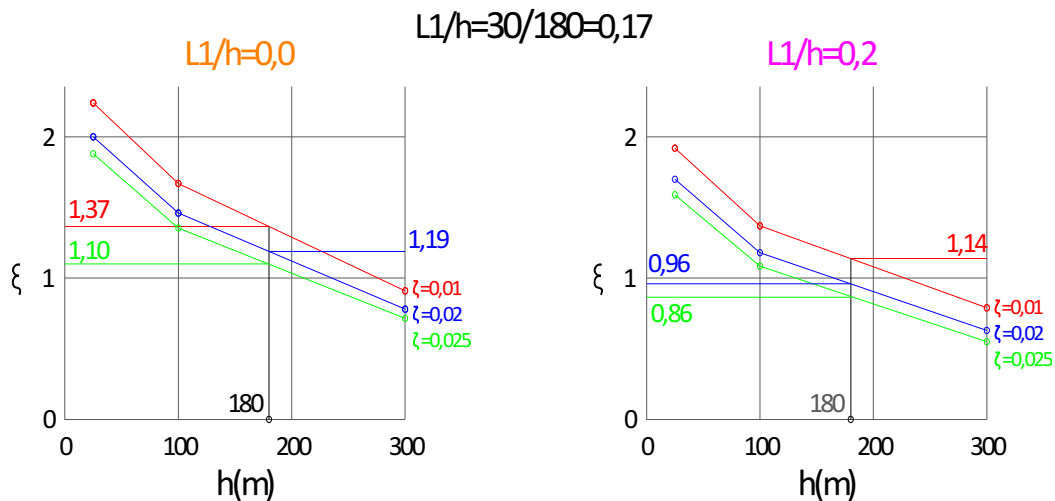


Figura 5. 17 Coef. De amplificação dinâmica, ζ . Cálculo de ζ para $h=180$ m. $\zeta=0,01$, $\zeta=0,02$ e $\zeta=0,025$; e para $l_1/h = 0$ e $l_1/h \geq 0,2$.

No caso l_1/h não estar muito perto de 0 e sendo menor do que $0,2$, no presente caso $0,17$, é preciso fazer uma segunda interpolação entre os valores determinados com a

Figura 5. 17, como mostrado na Figura 5. 18; resultando num coeficiente de amplificação dinâmica ou fator dinâmico ξ para o caso de $\bar{U}_{ref}(180) = 20m/s$; $l_1/h = 0,17$; $\zeta = 0,25$; $h = 180m$; na Cat IV de $\xi = 0,91$.

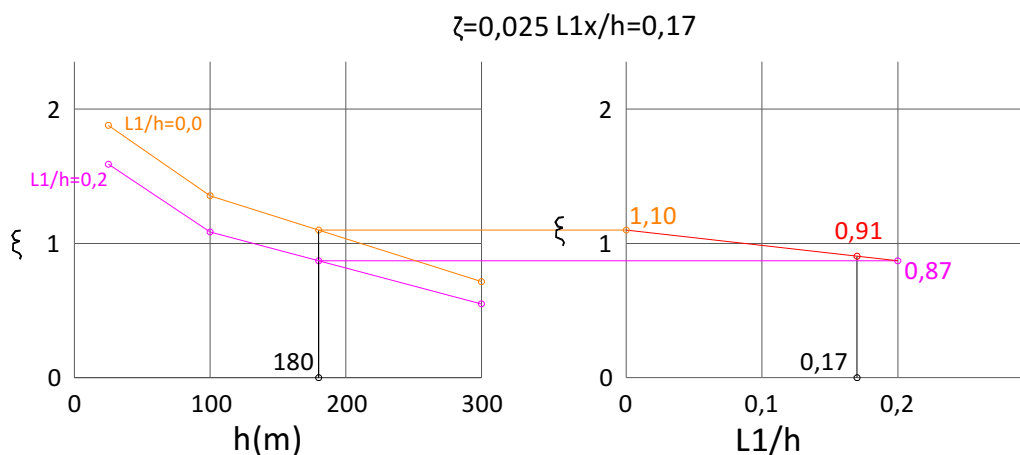


Figura 5. 18 Coef. de amplificação dinâmica, ξ . Cálculo de ξ para $h=180 m$, e $\zeta=0,025$; e para $l_1/h = 0,17$.

Para o cálculo dos coeficientes de amplificação dinâmica para todos os casos de estudo, mostrados na Tabela 5. 16, o processo iterativo é o mesmo que o descrito acima.

Tabela 5. 16 Resultados dos coeficientes de amplificação dinâmica.

$\bar{U}_{ref}(180)$ 3600s	20 m/s		30 m/s		40 m/s	
	$\zeta=0,01$	$\zeta=0,025$	$\zeta=0,01$	$\zeta=0,025$	$\zeta=0,01$	$\zeta=0,025$
ξ_x (Vento dir X) Cat IV	1,17	0,91	1,32	0,99	1,43	1,06
ξ_y (Vento dir Y) Cat IV	1,18	0,89	1,33	0,98	1,43	1,05
ξ_x (Vento dir X) Cat III	1,07	0,83	1,22	0,91	1,33	0,99
ξ_y (Vento dir Y) Cat III	1,06	0,80	1,21	0,89	1,32	0,96

Resultados da análise dinâmica com o Método 9.3 da NBR 6123/1988 para Cat IV

Os resultados apresentados neste item nas Figuras 5. 19 e 5. 20 são os associados à distribuição de forças ao longo da altura referentes a $\bar{U}_{ref}=20 m/s$ para as direções X e Y do vento para a Cat IV. As forças com $\bar{U}_{ref}=30$ e $40 m/s$ tem o mesmo comportamento do que $\bar{U}_{ref}=20 m/s$. Observa-se que as componentes flutuantes de força seguem o perfil do modo de vibração (linear) enquanto que as parcelas médias são proporcionais a $\bar{U}^2(z)$. Como esperado, as forças equivalentes associadas a $\zeta=0,01$ são maiores do que as associadas a $\zeta=0,025$.

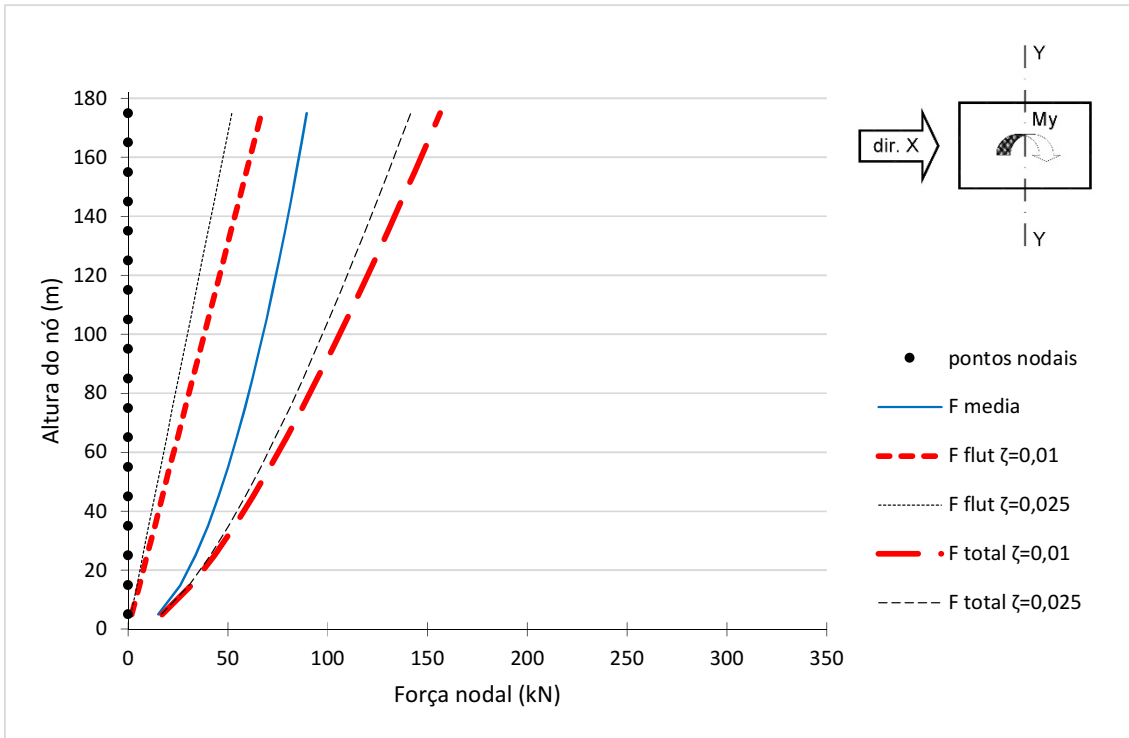


Figura 5. 19 Distribuição de forças ao longo da altura obtida pela NBR 6123/1988 para o prédio B; Cat IV; $\bar{U}_{ref}=20$ m/s; vento na **dir X**; para $\zeta=0,01$ e $\zeta=0,025$.

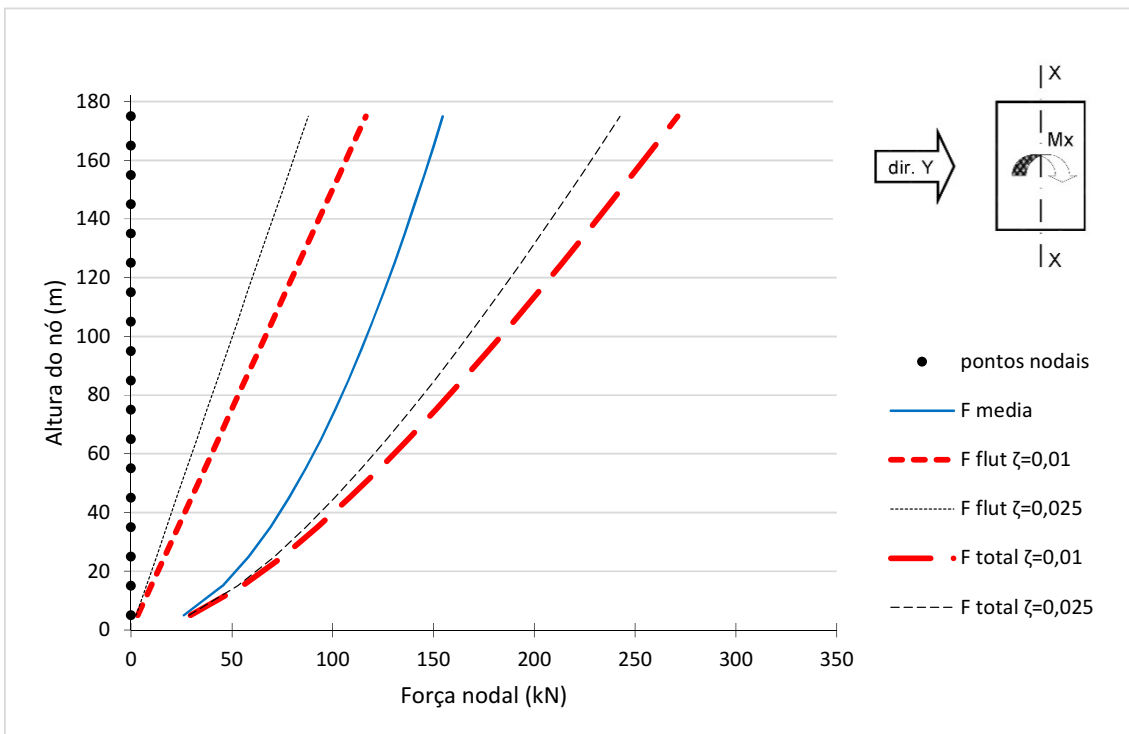


Figura 5. 20 Distribuição de forças ao longo da altura obtida pela NBR 6123/1988 para o prédio B; Cat IV; $\bar{U}_{ref}=20$ m/s; vento na **dir Y**; para $\zeta=0,01$ e $\zeta=0,025$.

5.2.7. Análise dinâmica do prédio B pelo método do Eurocódigo 1-4/2005

Parâmetros para o cálculo das forças equivalentes, F_w

Com o uso da eq. (4. 33) e o valor de $\rho = 1,2kg/m^3$, chega-se nos valores para a pressão dinâmica de pico no topo do prédio mostrados na *Tabela 5. 17*.

Tabela 5. 17 Parâmetros de Intensidade da turbulência e de pressão dinâmica de pico no topo do prédio pelo Eurocódigo 1-4/2005.

$\bar{U}_{ref}(180)$ (m/s)	z (m)	σ_v	$I_u(z)$	$I_u(180)$ <i>HFBB project</i>	$q_p(z)$ (N/m ²)
20	180	2,940	0,147	0,143 ($\pm 10\%$)	487
30	180	4,410	0,147	0,143 ($\pm 10\%$)	1096
40	180	5,880	0,147	0,143 ($\pm 10\%$)	1948

O cálculo do fator estrutural, $c_s c_d$, é feito com o uso da eq. (4. 36) e os resultados são mostrados na *Tabela 5. 18*. e na *Tabela 5. 19*.

Tabela 5. 18 Resultados do Fator Estrutural, $c_s c_d$, com o uso do ANEXO B do Eurocódigo 1-4/2005.

\bar{U}_{ref}	$\bar{U}(z_e)$	$I_u(z_e)$	dir	$f_L(z_e, f)$	B^2	$S_L(z_e, f)$	ζ	R^2	v	k_p	$c_s c_d$
20	18,50	0,159	X	1,729	0,525	0,071	1,0%	0,214	0,124	3,665	0,948
							2,5%	0,086	0,086	3,564	0,893
			Y	2,256	0,514	0,077	1,0%	0,221	0,110	3,631	0,942
							2,5%	0,089	0,077	3,532	0,886
30	27,74	0,159	X	2,594	0,525	0,071	1,0%	0,505	0,161	3,735	1,044
							2,5%	0,202	0,121	3,659	0,943
			Y	1,504	0,514	0,097	1,0%	0,535	0,143	3,703	1,044
							2,5%	0,214	0,108	3,628	0,939
40	36,99	0,159	X	1,297	0,525	0,106	1,0%	0,885	0,182	3,768	1,147
							2,5%	0,354	0,146	3,709	0,997
			Y	1,128	0,514	0,114	1,0%	0,953	0,161	3,736	1,154
							2,5%	0,381	0,130	3,679	0,997

Tabela 5. 19 Resultados do Fator Estrutural, $c_s c_d$, com o uso do ANEXO C do Eurocódigo 1-4/2005.

\bar{U}_{ref}	$\bar{U}(z_e)$	$I_u(z_e)$	dir	$f_L(z_e, f)$	B^2	$S_L(z_e, f)$	ζ	R^2	k_p	$c_s c_d$
20	18,50	0,159	X	0,430	0,071	0,057	1,0%	0,317	3,665	0,950
							2,5%	0,127	3,564	0,874
			Y	0,423	0,077	0,054	1,0%	0,328	3,631	0,947
							2,5%	0,131	3,532	0,869
30	27,74	0,159	X	0,430	0,090	0,102	1,0%	0,565	3,735	1,034
							2,5%	0,226	3,659	0,919
			Y	0,423	0,097	0,101	1,0%	0,610	3,703	1,040
							2,5%	0,244	3,628	0,919
40	36,99	0,159	X	0,430	0,106	0,144	1,0%	0,798	3,768	1,102
							2,5%	0,319	3,709	0,957
			Y	0,423	0,114	0,147	1,0%	0,888	3,736	1,117
							2,5%	0,355	3,679	0,962

Resultados da análise dinâmica com o Eurocódigo 1-4/2005 Anexo B

Para o cálculo das forças é usada a eq. (4. 34) onde o somatório é feito por 18 nós, a cada 10m de altura, desde 5m até 175m. Os resultados para $\bar{U}_{ref} = 20m/s$ com o Anexo B do Eurocódigo 1-4/2005 são mostrados na Figura 5. 21 para o vento na direção X e na Figura 5. 22 para o vento na direção Y. Os cálculos com o Anexo C apresentam um comportamento similar ao do Anexo B, mesmo sendo levemente superior a resposta flutuante.

Observa-se nas Figuras 5.21 e 5.22 que a distribuição de forças totais equivalentes segue o perfil vertical da força média, de forma coerente com o método do fator de rajada G (ver item 3.5.1 e 3.6.3) adotado pelo Eurocódigo 1-4/2005 ($G = c_d c_s$).

As forças flutuantes foram obtidas subtraindo-se as forças médias das totais em cada altura.

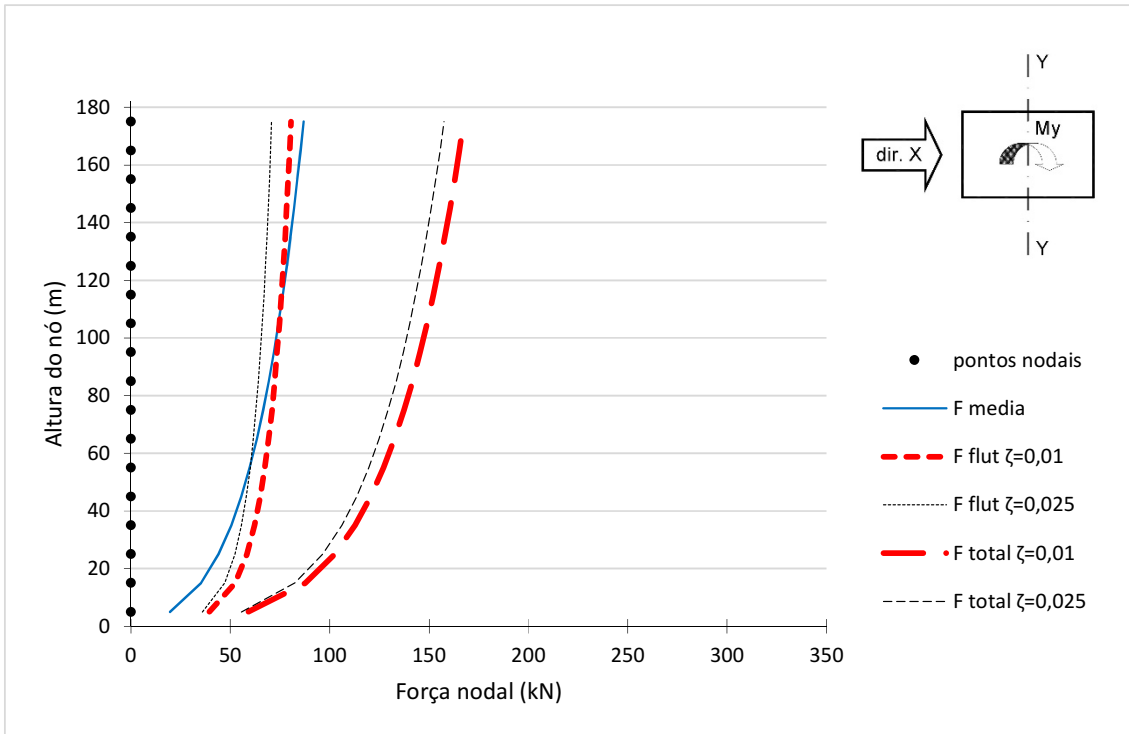


Figura 5. 21 Distribuição de forças ao longo da altura obtida pelo **Eurocódigo 1-4/2005** (Anexo B) para o prédio B para $\bar{U}_{ref}=20$ m/s, vento na **dir X**, para $\zeta=0,01$ e $\zeta=0,025$.

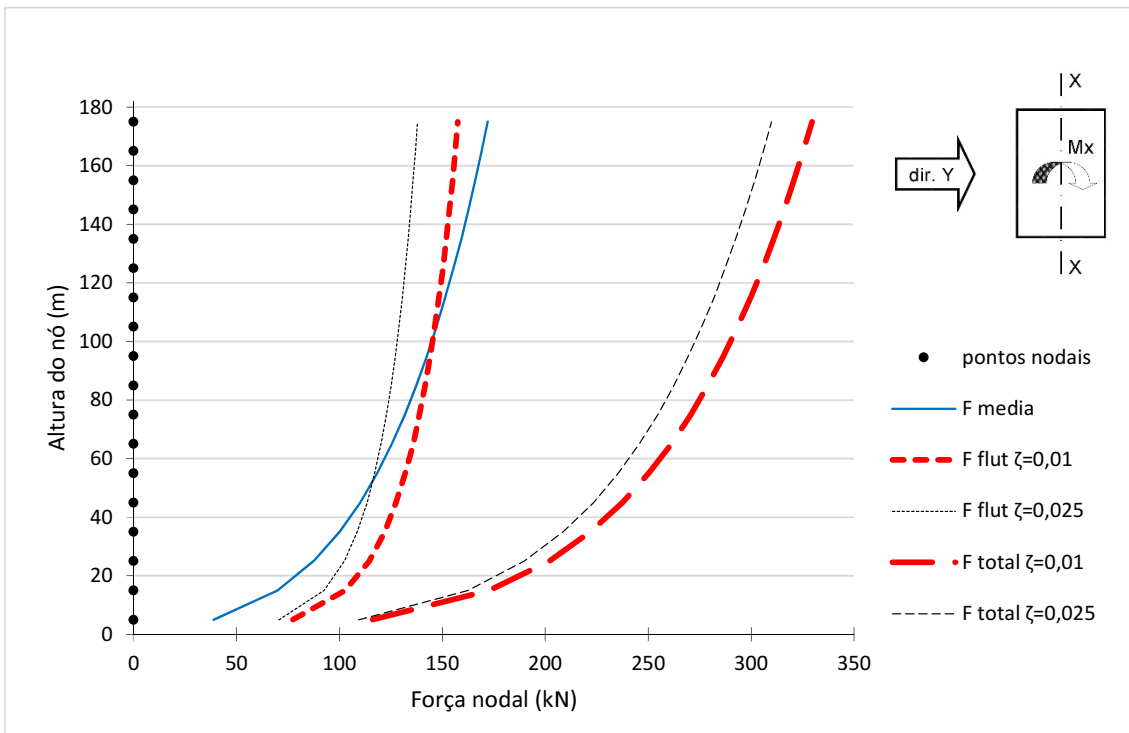


Figura 5. 22 Distribuição de forças ao longo da altura obtida pelo **Eurocódigo 1-4/2005** (Anexo B) para o prédio B para $\bar{U}_{ref}=20$ m/s, vento na **dir Y**, para $\zeta=0,01$ e $\zeta=0,025$.

5.2.8. Análise dinâmica do prédio B com a solução numérica no domínio da frequência

Parâmetro para aplicação do espectro de Harris, $S_u(f)$

O espectro da turbulência de Harris, eq. (2. 16), tem como referência a velocidade média na altura de 10 m. Para as velocidades de referência $\bar{U}_{ref} = 20, 30$ e 40 m/s no topo obtém-se os seguintes resultados com o uso da lei potencial (2. 3) para $p = 0,25$:

$$\bar{U}(10) = 9,71m/s ; 14,56m/s ; 19,42m/s$$

Conhecida a Intensidade da turbulência no topo, com valor $0,143 (\pm 10\%)$, pode-se calcular o desvio padrão na altura de referência, $180m$, com a eq. (2. 9); $I_i(z) = \sigma_i(z)/\bar{U}(z)$. Resultam para $\bar{U}_{ref} = 20, 30$ e 40 m/s os seguintes valores de desvio padrão, considerados constantes ao longo da altura:

$$\sigma_u = 2,86m/s ; 4,29m/s ; 5,72m/s$$

Resultados da análise do prédio B no domínio da frequência

As Figuras 5. 23 a 5. 26 apresentam as funções de densidade espectral S_u, S_p e S_a , junto com a função de admitância mecânica $|H(f)|^2$ obtidas da análise no domínio da frequência (ver item 3.3) para $\bar{U}_{ref} = 20m/s$ nas direções X e Y. Com a integração das funções S_a da Figura 5. 26 obtém-se as variâncias de amplitude modal a partir das quais se calculam as forças flutuantes de pico equivalentes conforme a eq. (3. 47). A distribuição destas forças para os mesmos casos mencionados anteriormente são mostradas nas Figuras 5. 27 e 5. 28, juntamente com a distribuição de forças médias e totais ao longo da altura. Observa-se que as forças flutuantes equivalentes se distribuem segundo o perfil da forma modal.

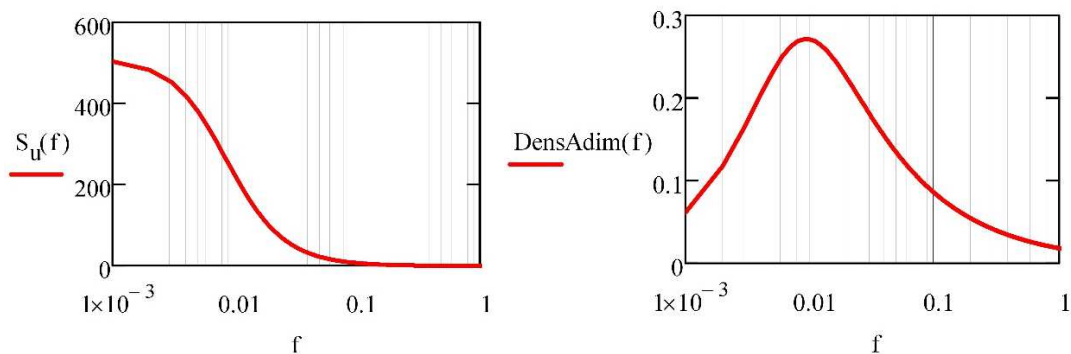


Figura 5. 23 Espectro de Harris adimensionalizado para $\bar{U}_{ref} = 20m/s$ e $\sigma_u = 2,86m/s$.

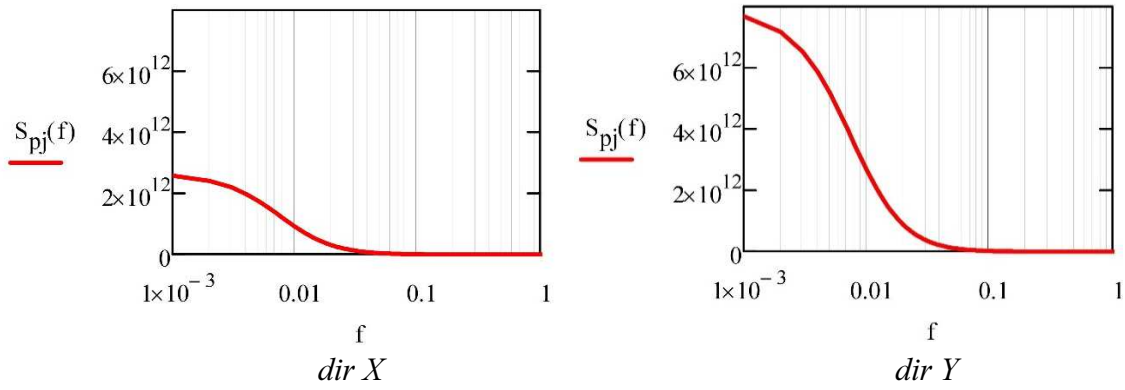


Figura 5. 24 Densidade espectral da força modal para $\bar{U}_{ref}=20m/s$ com vento na *dirX* e *dirY*.

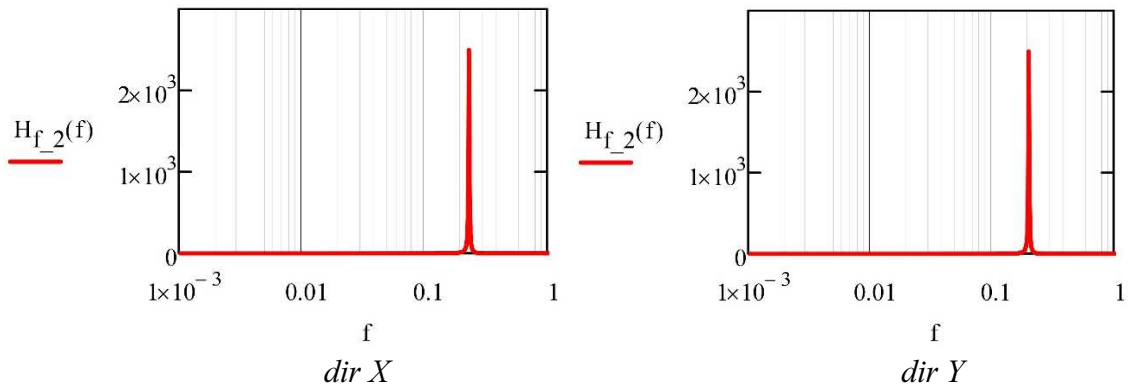


Figura 5. 25 Função de admitância mecânica da estrutura $|H(f)|^2$ para vento na *dirX* e *dirY* para a taxa de amortecimento $\zeta=0,01$.

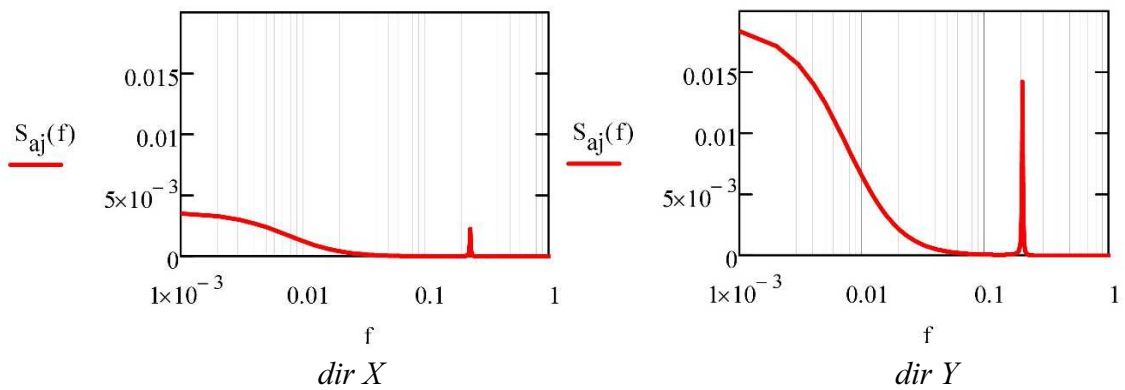


Figura 5. 26 Espectro de resposta de amplitude $S_{a,j}(f)$ do Prédio B para $\bar{U}_{ref}=20m/s$ para vento na *dirX* e *dirY* para $\zeta=0,01$.

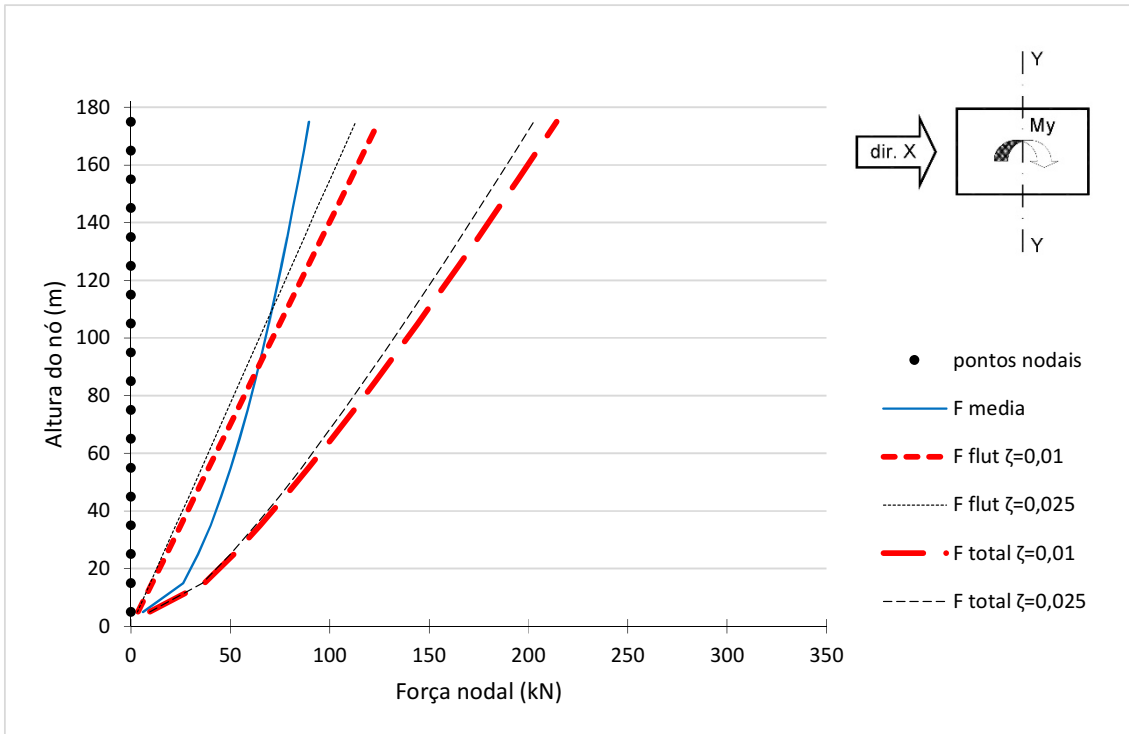


Figura 5. 27 Distribuição de forças ao longo da altura obtida da solução numérica no domínio da frequência para o prédio B para $\bar{U}_{ref}=20m/s$, vento na **dir X**, para $\zeta=0,01$ e $\zeta=0,025$.

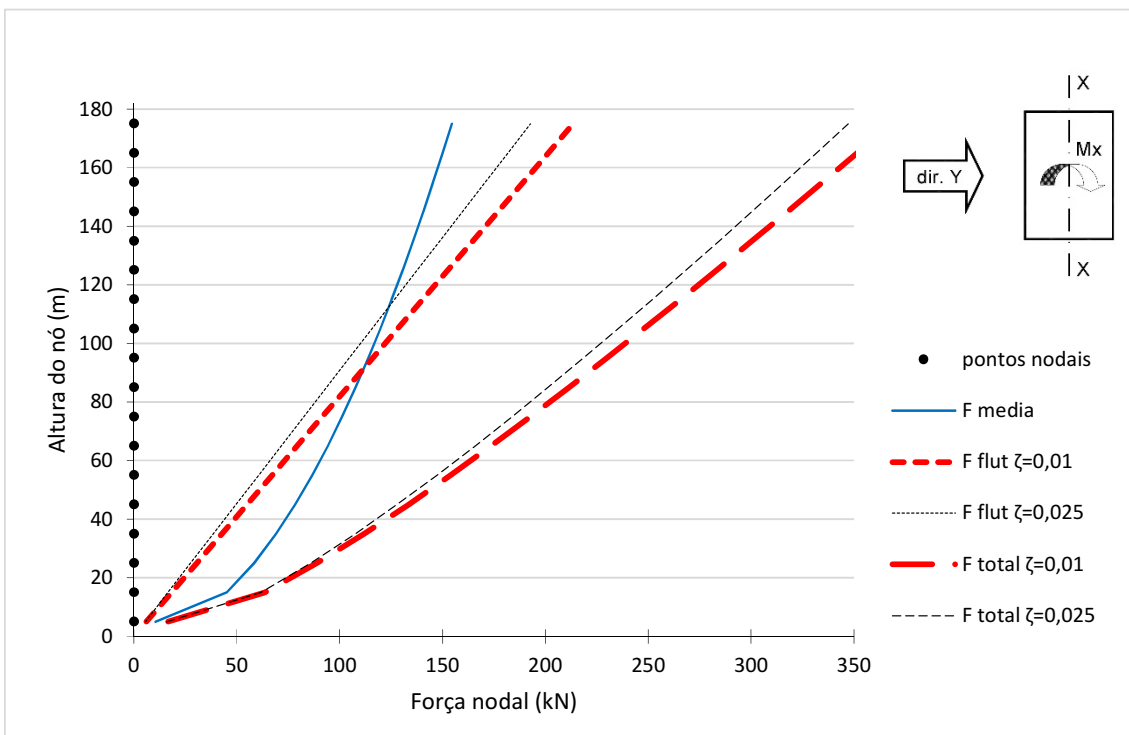


Figura 5. 28 Distribuição de forças ao longo da altura obtida da solução numérica no domínio da frequência para o prédio B para $\bar{U}_{ref}=20m/s$, vento na **dir Y**, para $\zeta=0,01$ e $\zeta=0,025$.

5.2.9. Análise comparativa dos métodos teóricos

As Figuras 5. 29 a 5. 31 apresentam comparações das distribuições de forças - parcela média e flutuante- obtidas com os métodos teóricos: método discreto da NBR 6123/1988, procedimentos 1 e 2 do Eurocódigo 1-4/2005 e a solução numérica no domínio da frequência.

Na Figura 5. 29 vê-se que a distribuição de forças médias para vento na direção X apresentam correlação bem melhor do que as forças na direção Y. Isto decorre essencialmente dos valores dos coeficientes de arrasto (ver Tabela 5. 15), cujos valores na direção Y apresentam diferença de 11%, e, em muito menor grau, das pequenas diferenças no perfil de velocidades médias (ver Figura 5. 14).

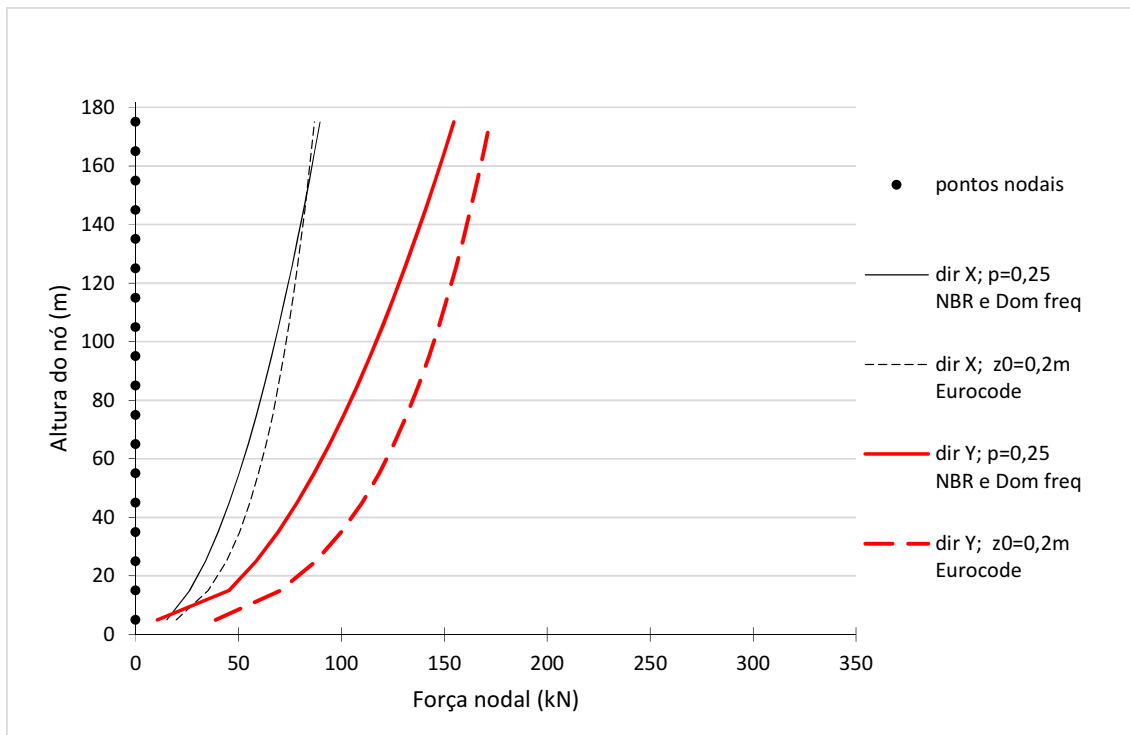


Figura 5. 29 Distribuição de **forças médias** das análises dinâmicas para $\bar{U}_{ref} = 20 \text{ m/s}$ com vento na dir X e dir Y.

Em relação à parcela flutuante da força de pico equivalente observa-se nas Figuras 5. 30 e 5. 31 que os métodos de análise modal (método discreto da NBR 6123/1988 e solução numérica no domínio da frequência) e o método do fator de rajada (procedimento do Eurocódigo 1-4/2005) conduzem a distintas distribuições de forças ao longo da altura. No entanto, como já apontado por diversos autores [(Vickery, 1995); (Holmes, 2015); Carvalho (2015)], os esforços na base de edifícios altos com estas distribuições resultam em valores próximos. Mas essa proximidade nem sempre ocorre ao longo da altura.

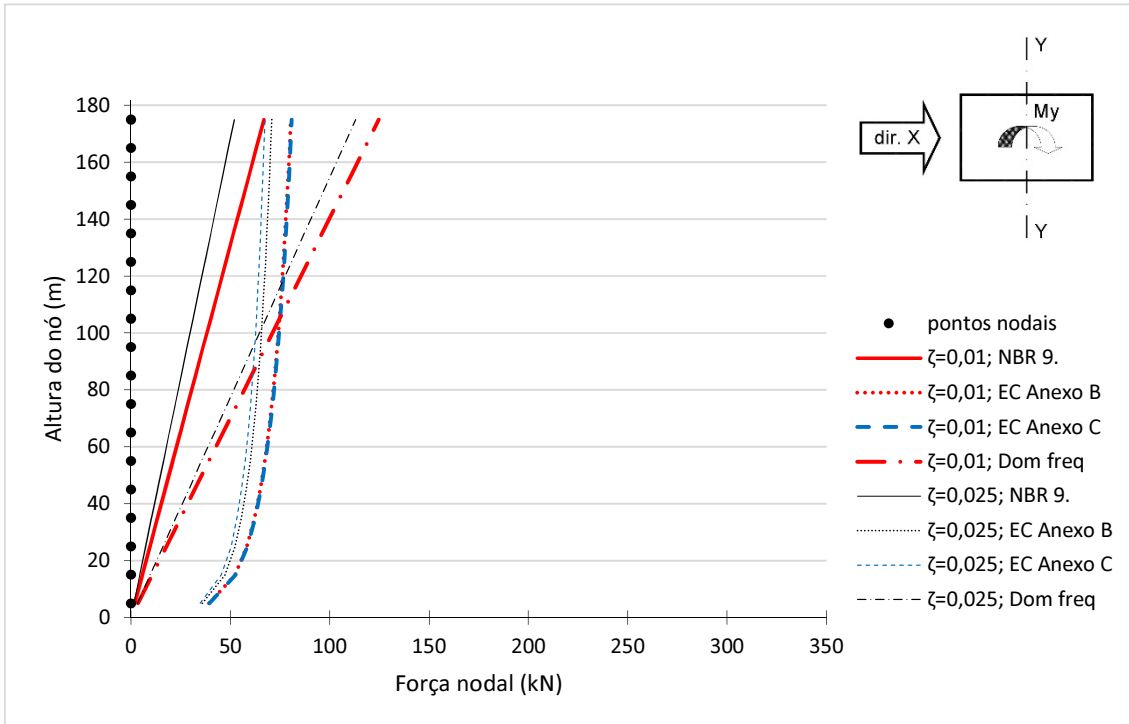


Figura 5. 30 Comparativa das forças flutuantes das análises dinâmicas calculadas com a Cat IV da **NBR 6123/1988**, o **domínio da frequência** e o **Eurocódigo 1-4/2005**; $\bar{U}_{ref}=20m/s$; vento na dir X; $\zeta=0,01$ e $\zeta=0,025$.

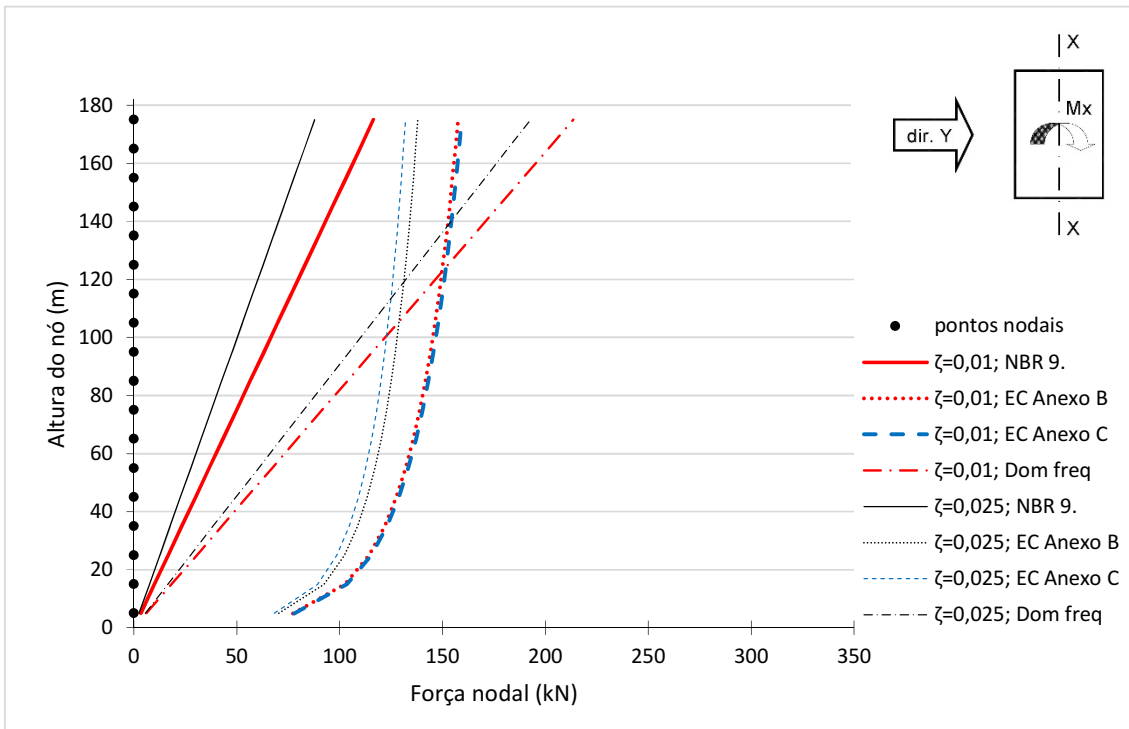


Figura 5. 31 Comparativa das forças flutuantes das análises dinâmicas calculadas com a Cat IV da **NBR 6123/1988**, o **domínio da frequência** e o **Eurocódigo 1-4/2005**; $\bar{U}_{ref}=20m/s$; vento na dir Y; $\zeta=0,01$ e $\zeta=0,025$.

5.2.10. Comparação teórico-experimental

Apresenta-se neste item uma comparação de valores máximos de momento fletor na base do prédio B obtido pelo “*International HFBB Comparison Project*” e pelos métodos teóricos, para vento nas direções X e Y e taxas de amortecimento 1% e 2,5%. Dos dados experimentais foram omitidos aqueles obtidos pelo “group 5” para a representação da envolvente dos valores máximos e mínimos dos resultados experimentais. Isto por eles se afastam muito mais que os outros da média. Também são apresentados os resultados teóricos a partir da norma Norte Americana (ASCE 7) e da Austrália / Nova Zelândia (AS/NZS 2011), tomados de Holmes (2013).

As *Figuras 5. 32 a 5. 35* apresentam valores comparativos de momento fletor na base do prédio em função da velocidade média no topo. Cada figura apresenta três gráficos que ilustram as parcelas média, flutuante de pico e total de pico. Nos gráficos de momento fletor médio e total de pico apresentam-se duas linhas que correspondem a envoltórias dos valores experimentais enquanto que no gráfico de momento fletor flutuante de pico o resultado experimental está representado pelo valor médio estimado, já que os valores de momento flutuante de pico experimentais não foram publicados. Esta estimativa foi então obtida subtraindo-se do valor médio de momento fletor total o valor médio do momento fletor médio para cada velocidade de vento. Os valores teóricos de momento fletor foram obtidos com as distribuições de força apresentadas nos itens anteriores. A *Tabela 5. 20* mostra os valores numéricos utilizados na composição dos gráficos das *Figuras 5. 32 a 5. 35*.

Dos resultados resumidos na *Tabela 5. 20* e dos gráficos apresentados neste item, podem-se fazer as seguintes observações:

- a) Os valores experimentais de momento fletor médio M_y (*Figura 5. 32 (a)*) apresentam pouca dispersão e os valores teóricos inserem-se na faixa de variação das medidas experimentais.
- b) Os valores experimentais de M_x médio (*Figura 5. 34 (a)*) apresentam dispersão similar à de M_y médio; os valores teóricos correspondentes também se encontram dentro da faixa de variação. Observa-se que os valores do Eurocódigo se apresentam junto ao limite superior dos resultados experimentais. Já os resultados da NBR encontram-se aproximadamente no meio da faixa de variação experimental.
- c) Os gráficos que tratam do momento fletor flutuante de pico (*Figuras (b)*) tanto para M_y quanto M_x mostram que os resultados do método dinâmico discreto da NBR 6123/1988 subestimam as forças flutuantes com respostas em torno de 50% dos correspondentes valores experimentais.

- d) Ainda em relação ao momento fletor flutuante de pico vê-se que, em geral, as respostas obtidas com os procedimentos do Eurocódigo 1-4/2005 e da solução numérica no domínio da frequência apresentem boa correlação com os valores médios experimentais.
- e) O procedimento 1 definido no Anexo B do Eurocódigo 1-4/2005 gera resultados um pouco mais conservadores do que os obtidos com o procedimento 2 do Anexo C, tendo ambos ótima correlação com os resultados experimentais.
- f) Os resultados para valores pico do momento total, gráficos (c), obtidos com a norma AS/NZS 2011 tem em geral uma boa correlação com os dados experimentais, o que a torna norma de referência. Contrariamente a ASCE 7, resulta em estimativas inferiores aos valores experimentais.
- g) Os momentos médios na base considerando-se a Cat III da NBR 6123/1988 são maiores que para a Cat IV por causa dos maiores valores do perfil vertical de velocidades médias para Cat III. A resposta flutuante com Cat III também gera momentos maiores que com a Cat IV, apesar da intensidade de turbulência teórica ser menor; o que não é lógico.

Lembrando que a técnica HFBB aplica o momento fletor quase-estático medido na base a uma solução modal teórica no domínio da frequência para calcular respostas em termos de deslocamentos e forças equivalentes, a presente comparação teórico-experimental refere-se à validação das formulações para estimar o espectro de força modal (S_p) a partir do espectro cruzado de forças aerodinâmicas (S_{F_k, F_i}). O cálculo de forças equivalentes a partir de deslocamentos é semelhante ao utilizado na solução numérica no domínio da frequência.

A partir das observações acima chega-se as seguintes conclusões:

- 1) Os coeficientes de arrasto para vento de baixa turbulência fornecidos pela Figura 4 da NBR 6123/1988 estão em concordância com valores médios experimentais.
- 2) O coeficiente de arrasto calculado com o método do Eurocódigo 1-4/2005 gera resultados acima dos experimentais. O que implica que a Figura 7.23 do Eurocódigo 1-4/2005 deveria ser revisada.
- 3) A formulação das forças aerodinâmicas utilizada na solução numérica no domínio da frequência fica validada com a presente análise comparativa de resultados teóricos e experimentais.
- 4) É necessário rever o método dinâmico discreto da NBR 6123/1988.

- 5) O Eurocódigo 1-4/2005 gera estimativas de momentos na base em geral muito próximas aos resultados experimentais, tanto com o Anexo B como com o Anexo C, o que valida o uso dele para prédios paralelepípedos, mesmo o cálculo do coeficiente de arrasto é superestimado na direção Y. Por tanto a Figura 4.23 do Eurocódigo 1-4/2005 parece precisar de a uma revisão com métodos experimentais.

- 6) O uso de coeficientes de correlação espacial $C_y = C_z = 10$ no co-espectro cruzado da turbulência, eq. (2. 22), para implementação no método numérico no domínio da frequência resulta em estimativas mais próximas às medições experimentais do que os valores $C_y = 16$ e $C_z = 10$. Desta forma pode-se adotar $C_y = C_z = 10$ na NBR 6123.

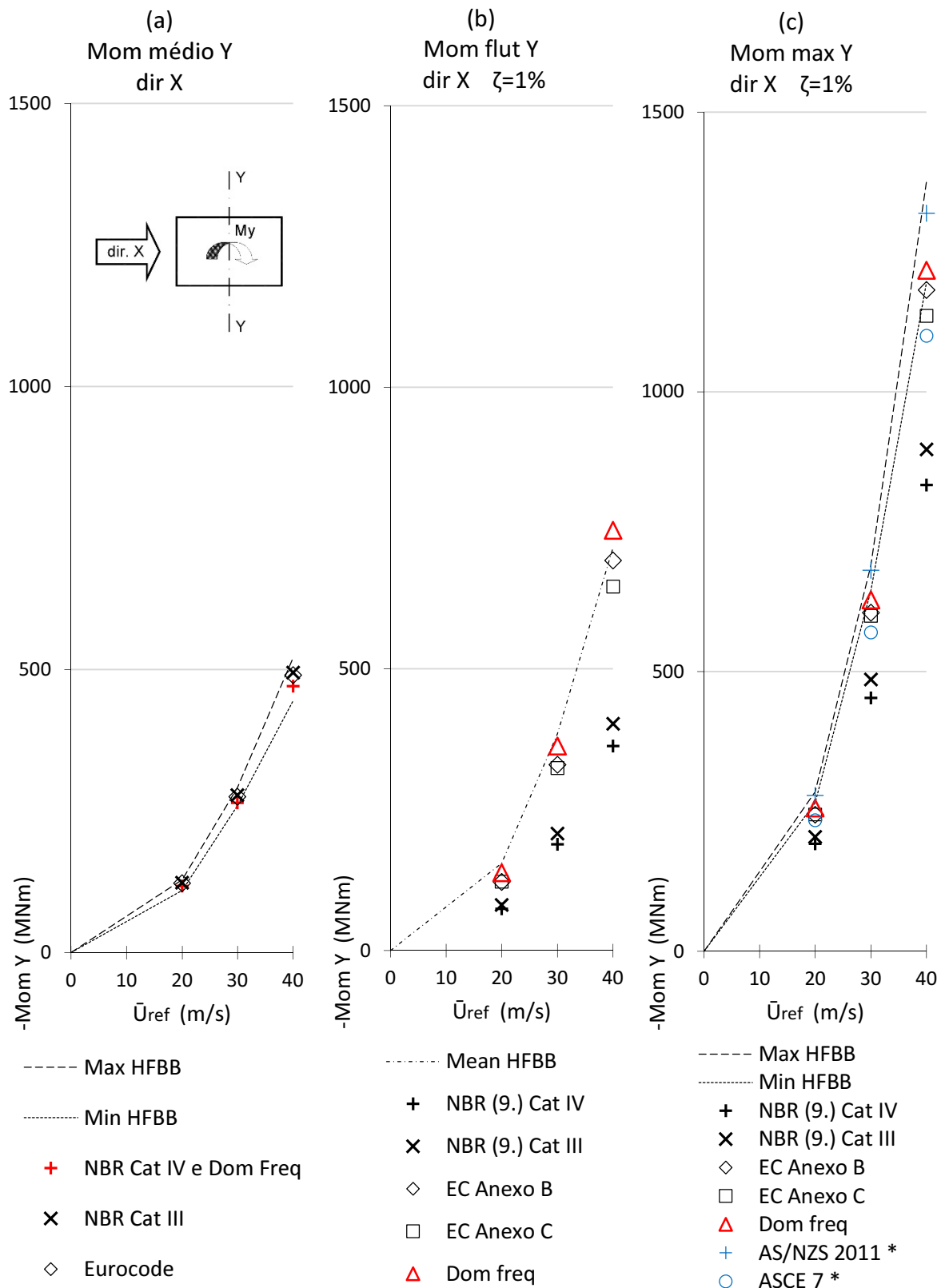


Figura 5. 32 Resultados para Mom Y na base obtidos para o vento na dir X e $\zeta=1\%$.
 *Dados de (Holmes, 2013), para a norma australiana e norte-americana.

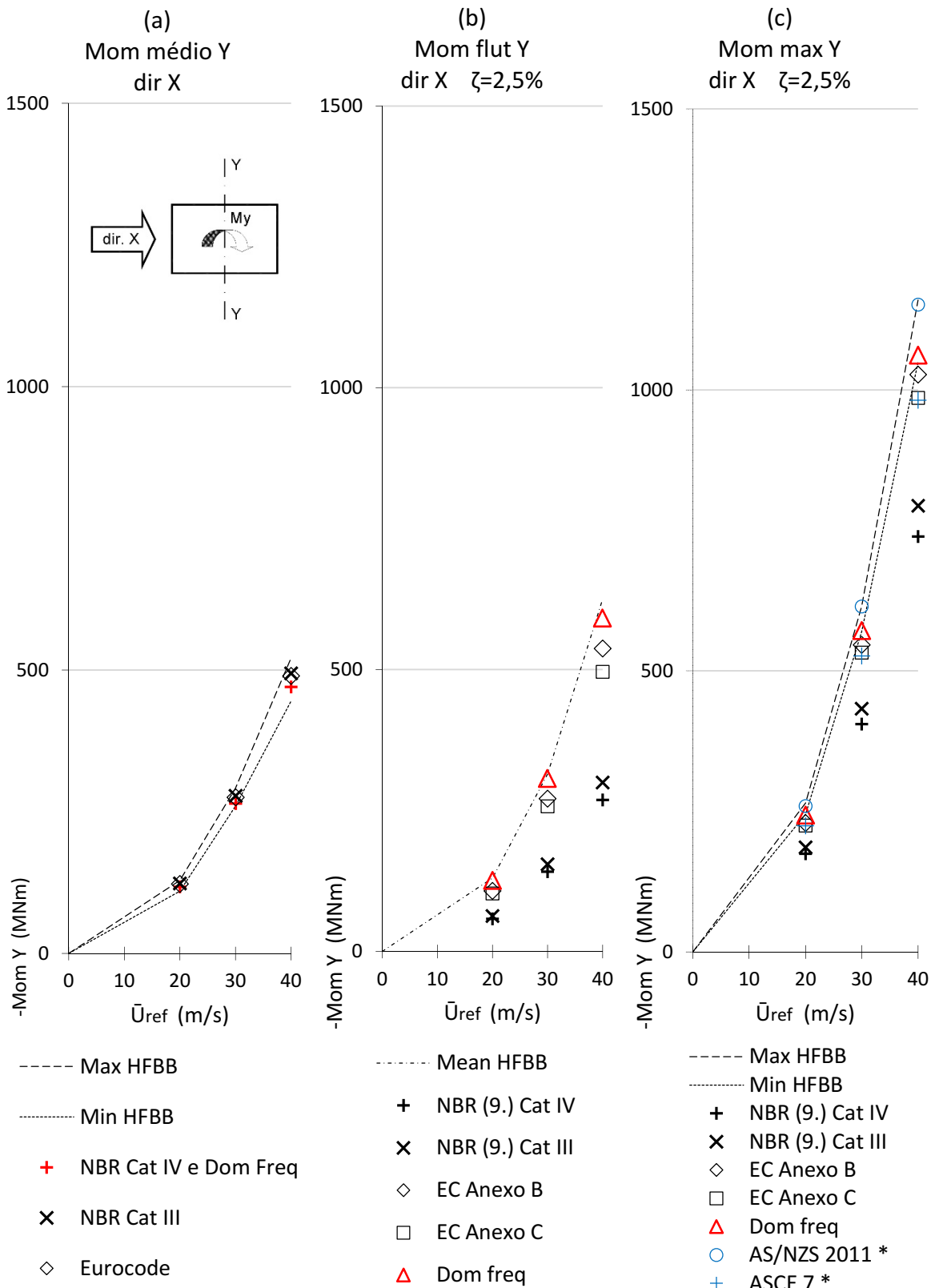


Figura 5. 33 Resultados para Mom Y na base obtidos para o vento na dir X e $\zeta=2,5\%$.

*Dados de (Holmes, 2013), para a norma australiana e norte-americana.

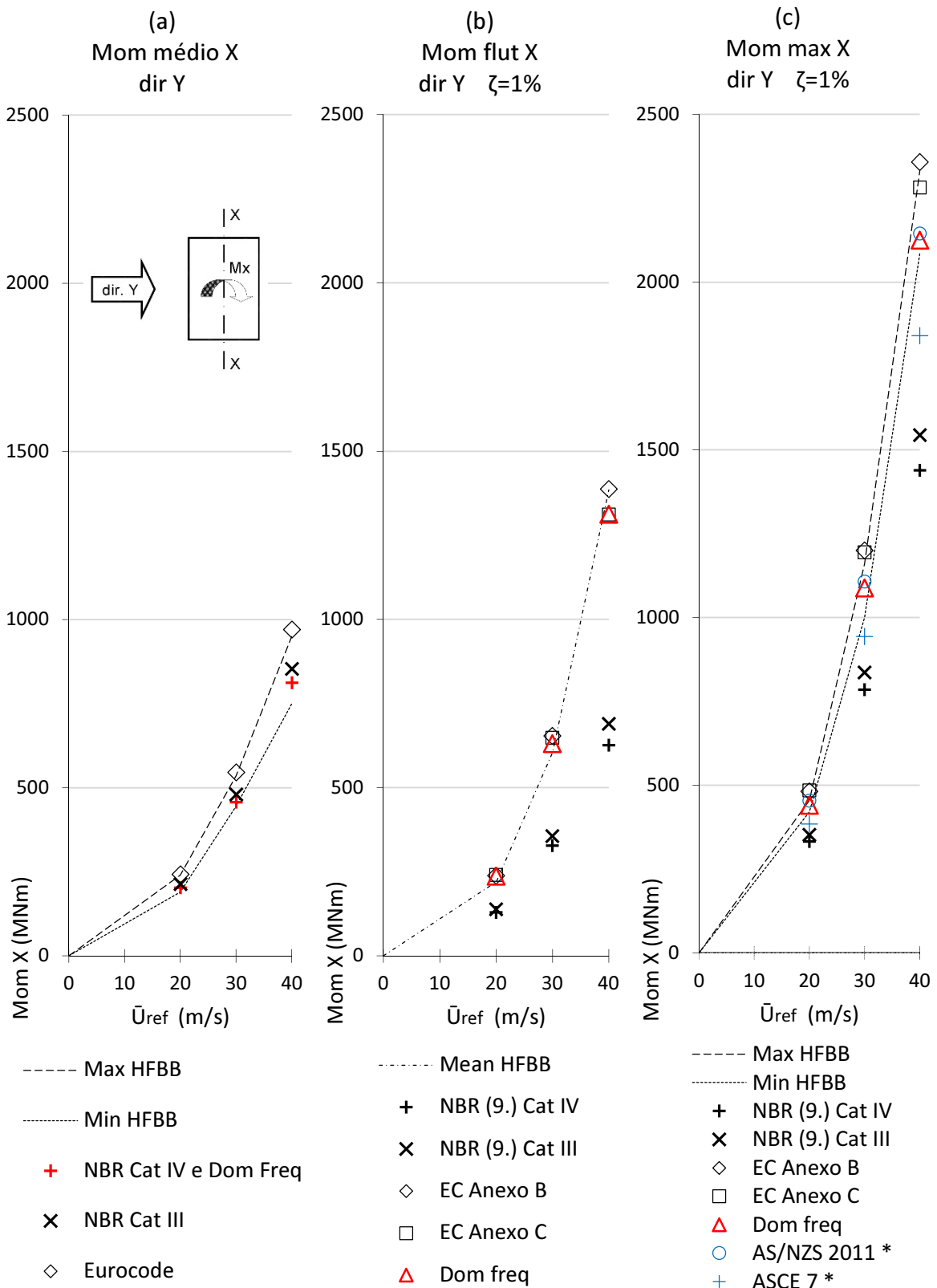


Figura 5. 34 Resultados para Mom X na base obtidos para o vento na dir Y e $\zeta=1\%$.

*Dados de (Holmes, 2013), para a norma australiana e norte-americana.

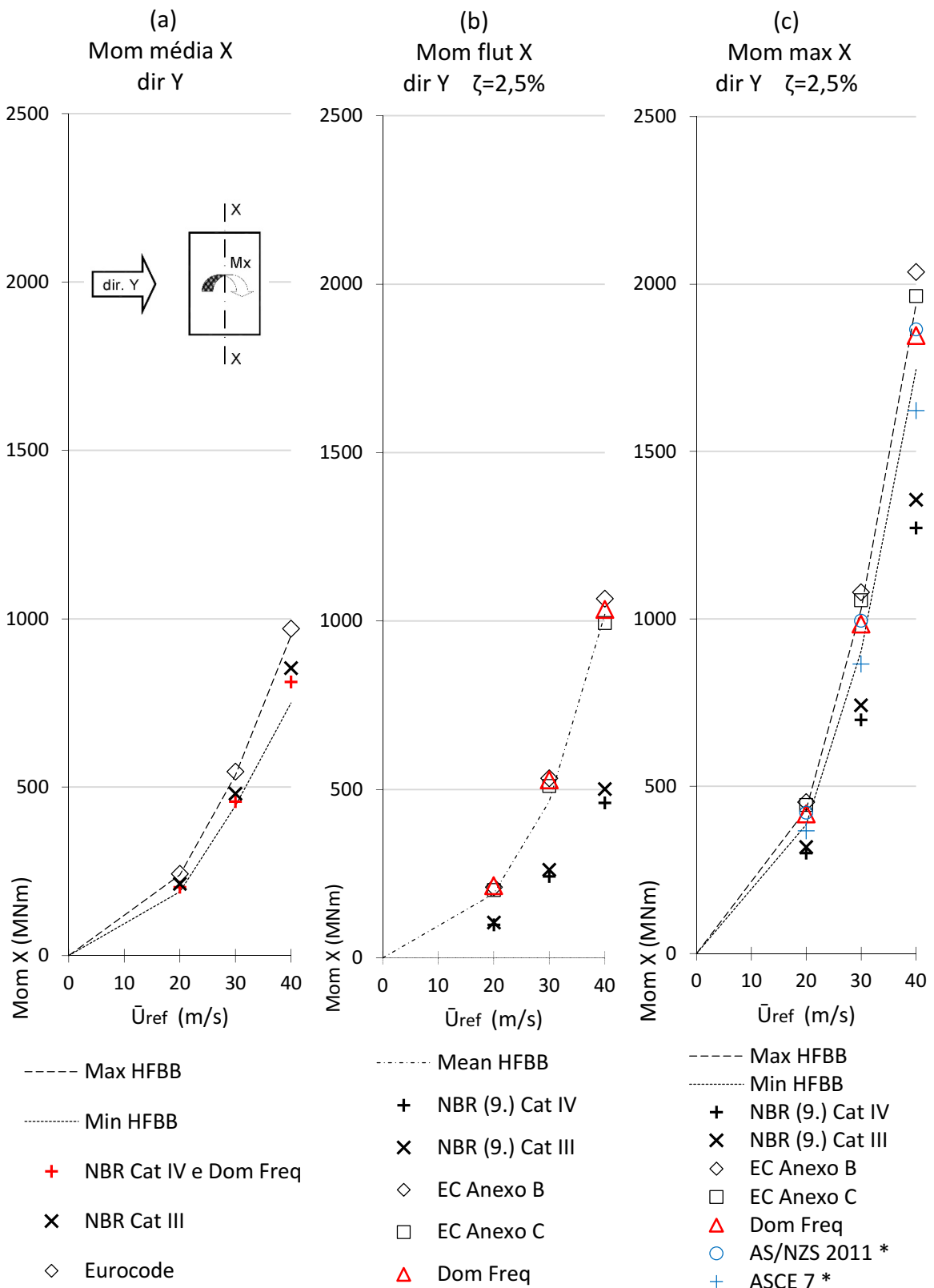


Figura 5. 35 Resultados para Mom X na base obtidos para o vento na dir Y e $\zeta=2,5\%$.

*Dados de (Holmes, 2013), para a norma australiana e norte-americana.

Tabela 5. 20 Resultados obtidos das análises dinâmicas para momentos máximos na base do prédio B nos planos XZ e YZ.

Direção vento	Veloc.	ζ	U(180)=20m/s		U(180)=30m/s		U(180)=40m/s	
			My max MNm	Mx max MNm	My max MNm	Mx max MNm	My max MNm	Mx max MNm
			dir X	dir Y	dir X	dir Y	dir X	dir Y
NBR 6123/1988 Item 9. Cat IV	<i>Vmedia</i>	1,0%	118	203	265	457	471	812
	<i>Vflut</i>		74	129	188	328	363	627
	<i>Vtot</i>		192	332	453	785	834	1439
	<i>Vmedia</i>	2,5%	118	203	265	457	471	812
	<i>Vflut</i>		58	98	141	242	269	460
	<i>Vtot</i>		175	301	406	698	740	1272
NBR 6123/1988 Item 9. Cat III	<i>Vmedia</i>	1,0%	124	213	278	480	495	854
	<i>Vflut</i>		81	138	208	356	403	690
	<i>Vtot</i>		205	352	486	836	897	1544
	<i>Vmedia</i>	2,5%	124	213	278	480	495	854
	<i>Vflut</i>		63	105	155	262	300	502
	<i>Vtot</i>		186	318	433	742	794	1355
Eurocódigo 1-4/2005 (ANEXO B)	<i>Vmedia</i>	1,0%	122	243	276	546	490	971
	<i>Vflut</i>		122	238	330	654	692	1387
	<i>Vtot</i>		244	481	605	1200	1182	2358
	<i>Vmedia</i>	2,5%	122	243	276	546	490	971
	<i>Vflut</i>		108	210	271	533	537	1066
	<i>Vtot</i>		230	452	547	1079	1027	2037
Eurocódigo 1-4/2005 (ANEXO C)	<i>Vmedia</i>	1,0%	122	243	276	546	490	971
	<i>Vflut</i>		122	241	324	649	646	1311
	<i>Vtot</i>		245	484	600	1195	1136	2282
	<i>Vmedia</i>	2,5%	122	243	276	546	490	971
	<i>Vflut</i>		103	201	257	510	496	994
	<i>Vtot</i>		225	444	533	1056	986	1964
DOMINIO DA FREQUÊNCIA	<i>Vmedia</i>	1,0%	118	203	265	457	471	813
	<i>Vflut</i>		138	237	363	631	746	1312
	<i>Vtot</i>		256	440	628	1088	1217	2125
	<i>Vmedia</i>	2,5%	118	203	265	457	471	813
	<i>Vflut</i>		126	214	307	528	591	1034
	<i>Vtot</i>		244	417	572	985	1062	1847

5.2.11. Análise estática do prédio B

Apresenta-se neste item uma comparação das forças aerodinâmicas calculadas pela NBR 6123/1988 e pelo Eurocódigo 1-4/2005 para o caso em que o prédio B não estivesse sujeito a vibrações devidas a turbulência do vento, isto é, admitindo um comportamento quase-estático.

a) De acordo com a NBR 6123/1988 (item 4)

O fator S_2 é calculado com o processo iterativo exposto no item 5.1.3, apresentado no Anexo A da NBR 6123/1988. Na *Tabela 5. 21* são mostrados os intervalos de tempo usados na determinação de S_2 .

Tabela 5. 21 Intervalos de tempo para o cálculo de S_2 .

\bar{U}_{ref}		20 m/s	30 m/s	40 m/s
Δt Cat IV		57 seg	37 seg	27 seg
Δt Cat III		58 seg	39 seg	29 seg

b) De acordo com o Eurocódigo 1-4/2005

O cálculo estático com o Eurocódigo 1-4/2005 é feito com a consideração do coeficiente dinâmico, $c_d = 1$, para o cálculo das pressões de pico sobre a superfície da estrutura. Na *Tabela 5. 22* são apresentados os valores de c_s para a altura de referência z_s .

Tabela 5. 22 Coeficiente de dimensão c_s para $z_s = 108$ m.

Vento	dir X	dir Y
c_s Anexo B	0,855	0,851
c_s Anexo C	0,819	0,816

c) Resultados da análise estática

Na *Tabela 5. 23* e na *Figura 5. 36* apresentam-se os valores totais dos momentos na base obtidos com análise estática para as diferentes velocidades de vento nas direções X e Y. As forças equivalentes sobre os nós são diretamente proporcionais ao perfil das velocidades médias, como mostrado na *Figura 5. 37*, onde pode-se perceber como os resultados obtidos com o Eurocódigo 1-4/2005 são maiores que os da NBR 6123/1988, principalmente na direção do vento Y, por causa do coeficiente de arrasto bem maior. Na direção X as forças calculadas pelo Eurocódigo são cerca de 20% maiores que as da NBR, apesar do coeficiente de arrasto ser praticamente o mesmo. Isto se deve principalmente as diferentes formulações para levar em conta a correlação espacial das velocidades flutuantes.

Tabela 5. 23 Resultados para momentos estáticos máximos na base obtidos para as velocidades características $\bar{U}_{ref} = \bar{U}_{3600\text{ seg}}(180) = 20 ; 30 \text{ e } 40 \text{ m/s}$.

\bar{U}_{ref}	20 m/s		30 m/s		40 m/s	
	dir X MNm	dir Y MNm	dir X MNm	dir Y MNm	dir X MNm	dir Y MNm
NBR Cat IV	176	304	428	739	796	1373
NBR Cat III	175	303	369	637	680	1173
EC Anexo B	220	435	496	978	881	1738
EC Anexo C	211	417	475	937	844	1667

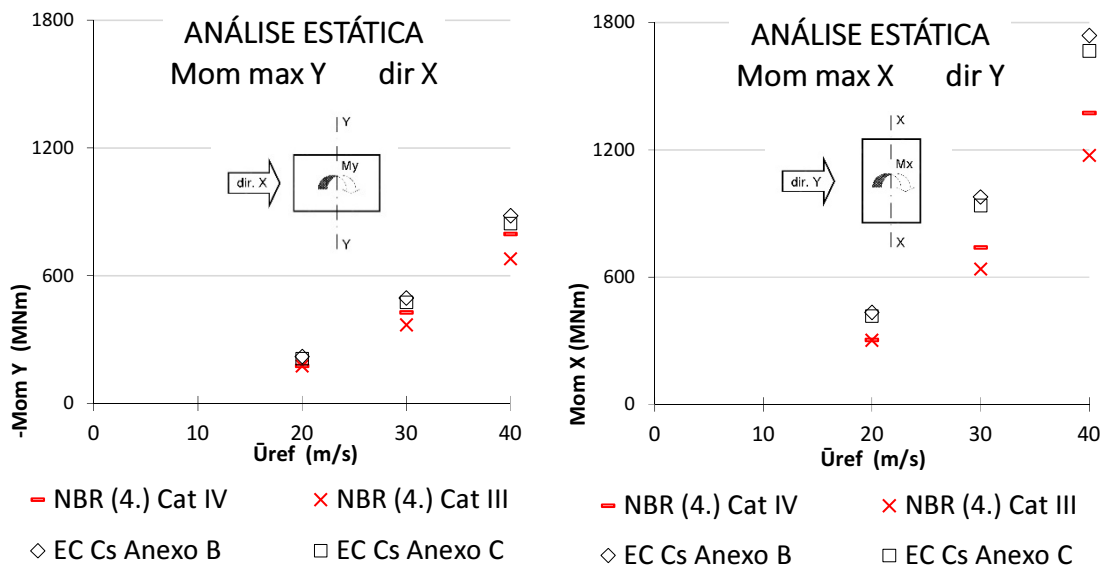


Figura 5. 36 Momentos estáticos máximos na base obtidos para as velocidades de referência no topo $\bar{U}_{ref} = 20 ; 30 \text{ e } 40 \text{ m/s}$, para vento na dir X e dir Y.

Na Figura 5. 37 com $\bar{U}_{ref} = 20\text{m/s}$ pode-se observar que a adoção da categoria III ou IV da NBR 6123/1988 não altera o perfil de forças equivalentes. Mas para velocidade média maior, ver Figura 5. 38, o perfil das forças equivalentes aplicadas é alterado pela categoria adotada. Isto não ocorre se usado o Eurocódigo 1-4/2005, o qual utiliza o coeficiente de forma c_s e seu desempenho independe da velocidade média. Além disso, pode-se observar que para todas as análises o Eurocódigo gera amplitudes de resposta maiores que a da NBR.

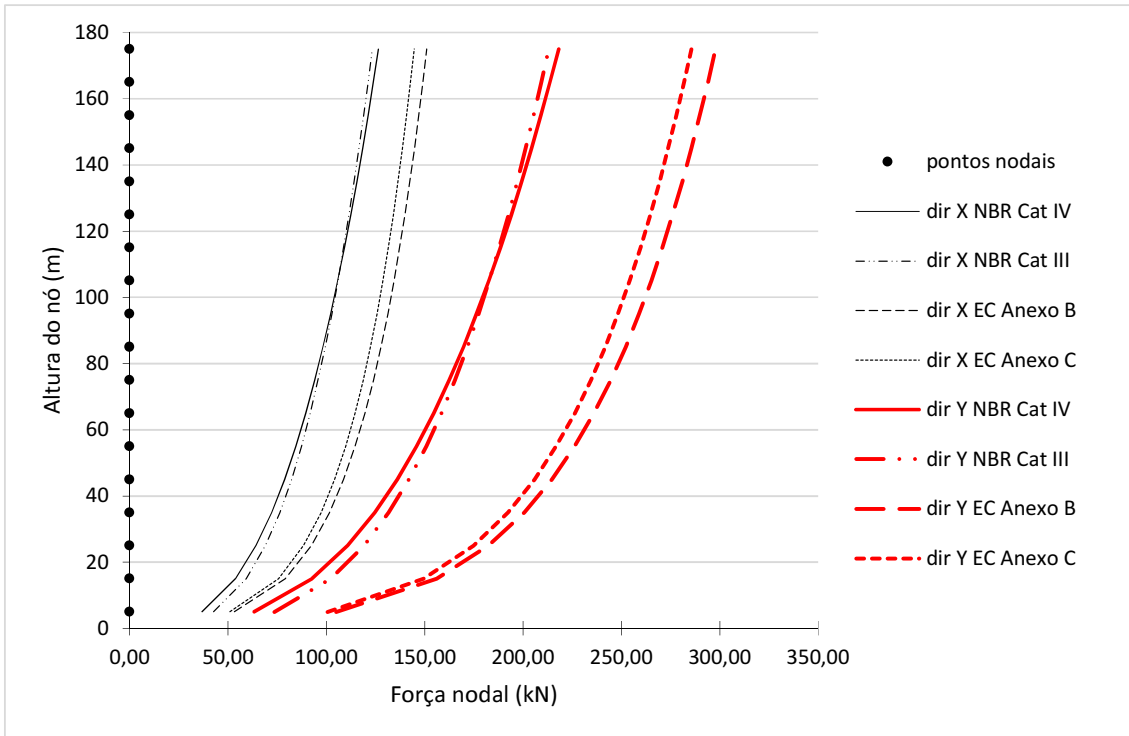


Figura 5. 37 Resultados da análise estática com o uso da NBR 6123/1988 e do Eurocódigo 1-4/2005 para $\bar{U}_{ref} = 20$ e vento na dir X e dir Y.

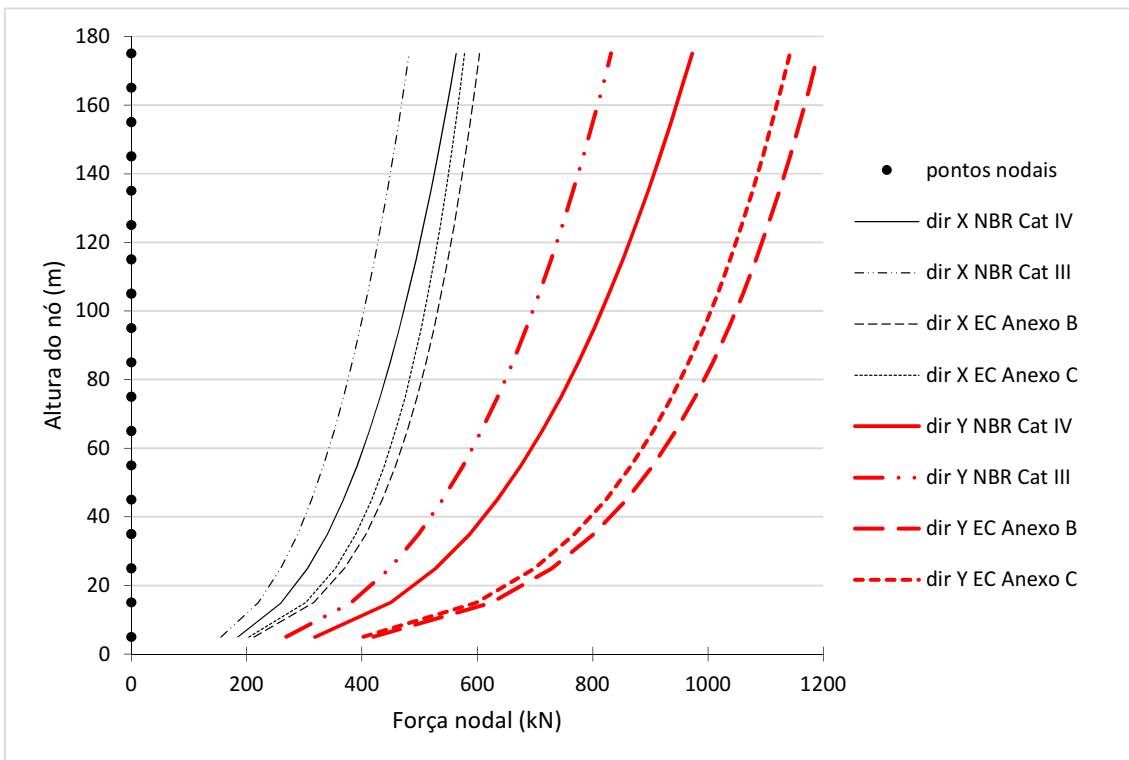


Figura 5. 38 Resultados da análise estática com o uso da NBR 6123/1988 e do Eurocódigo 1-4/2005 para $\bar{U}_{ref} = 40$ e vento na dir X e dir Y.

Na *Figura 5. 39* apresenta o gráfico da razão entre o momento fletor na base e o coeficiente de arrastado em cada caso em função da velocidade média no topo. Excluindo o efeito das diferenças entre os coeficientes de arrasto é possível se comparar os efeitos conjuntos do perfil vertical de velocidades e o tratamento de correlação espacial das duas normas (NBR 6123/1988 e Eurocódigo 1-4/2005). A maior diferença encontrada foi de 25% entre os resultados da NBR (Cat III) e do Eurocódigo.

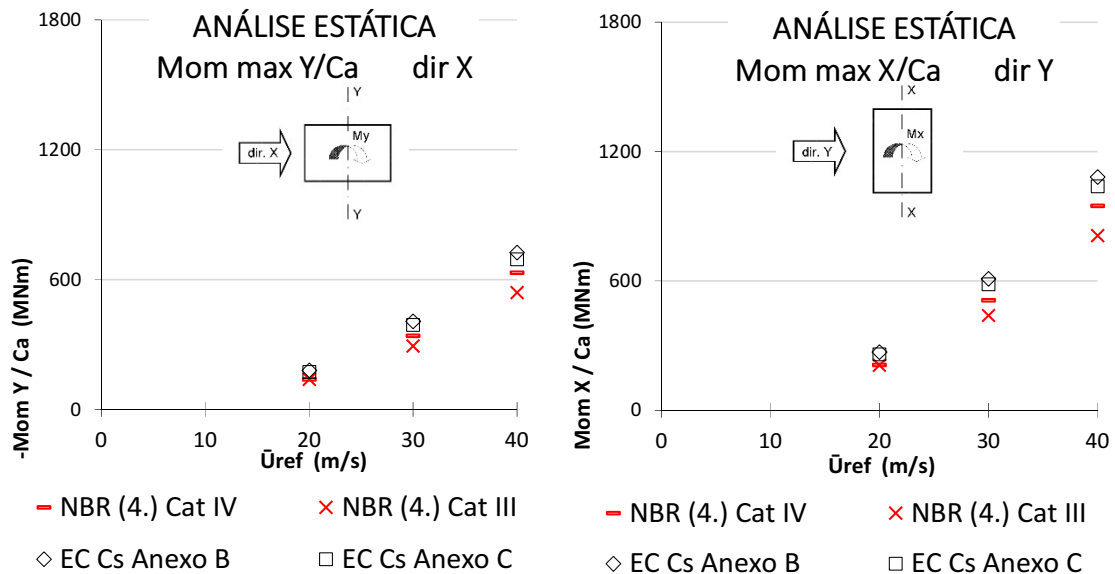


Figura 5. 39 Razão entre Momento fletor na base e o coeficiente de arrasto em função da velocidade média no topo $\bar{U}_{ref} = 20 ; 30$ e 40 m/s, para vento na dir X e dir Y.

5.3. CAARC (STANDARD TALL BUILDING)

5.3.1. Características do prédio CAARC

O prédio “CAARC Standard tall building model”, um paralelepípedo proposto pela “Commonwealth Advisory Aeronautical Council” em 1969, é uma estrutura muito usada na literatura para validação de procedimentos experimentais. Oliveira (2009) usou esse prédio para avaliar frente a resultados da literatura o desempenho de uma balança dinâmica de 3 graus de liberdade, ver *Figura 3. 8* . Os resultados obtidos por Oliveira (2009) são comparados com os métodos teóricos nesta seção.

Geometria e modelo numérico

O CAARC Standard Tall Building tem dimensões muito parecidas as do prédio B do “International HFBB Comparison Project”, um prisma retangular com base de 30,48m por 45,72m e altura de 182,88m (100ft x 150ft x 600ft), como mostrado na Figura 5. 40.

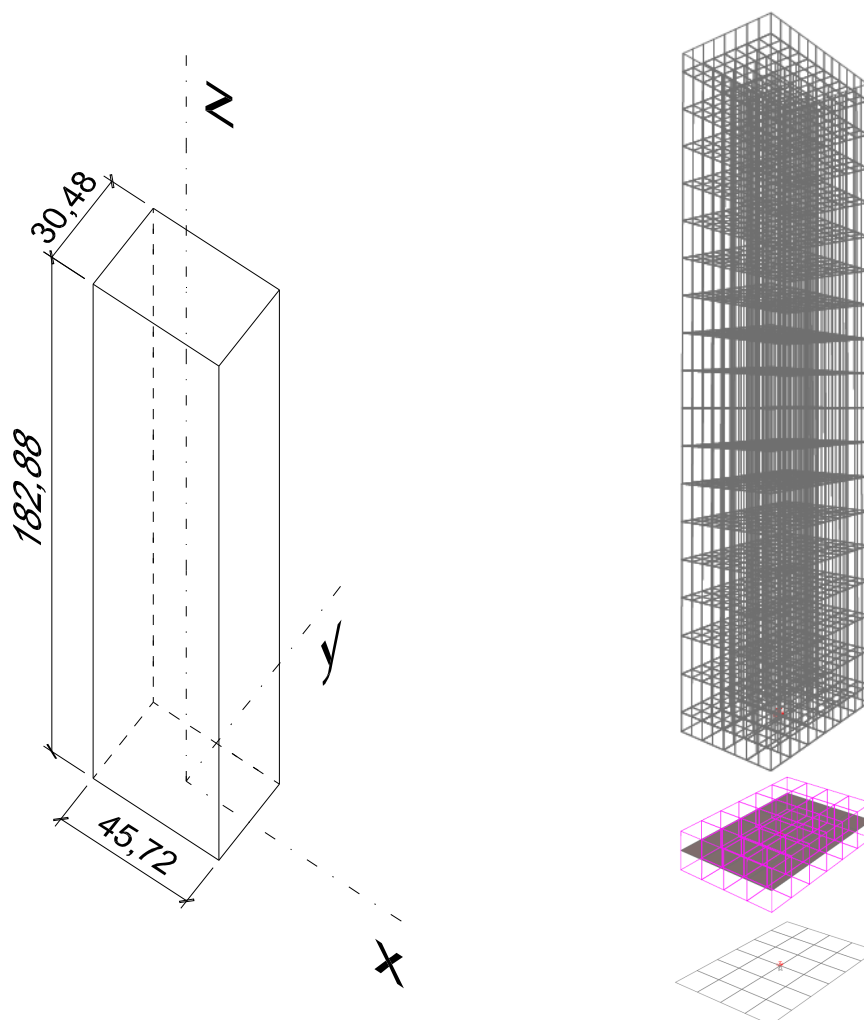


Figura 5. 40 Geometria do CAARC Standard Tall Building e modelo para o cálculo de deslocamentos.

A modelagem no SAP2000 para o cálculo dos deslocamentos estáticos é mostrada na Figura 5. 40. É um modelo que replica o “Stick model” com os primeiros modos de vibração lineares proposto por Oliveira (2009), desenhada com elementos de placa bastante rígida com distribuição de massa uniforme nas lajes horizontais com uma base mais rígida ainda articulada no seu centro, com molas que fornecem rigidez a torção nos três eixos coordenados e ajustada para a estrutura coincidir com as frequências naturais de projeto.

A discretização da estrutura para o cálculo no domínio da frequência foi feita do mesmo jeito que com o prédio B no item 5.2.5, só que com distâncias nodais na direção vertical iguais a 10,16m e os seguintes dados de cálculo:

$m_k = 453t$	Massa nodal.
$A_{k,X} = A_{ref,X} = 61,94 m^2$	Área nodal com o vento na direção X.
$A_{k,Y} = A_{ref,Y} = 92,90 m^2$	Área nodal com o vento na direção Y.

Os coeficientes de arrasto C_a ou de força c_f são considererados iguais aos do prédio B, item 5.2.5.

Propriedades dinâmicas

Só são considerados os primeiros modos de vibração para as direções X e Y ; suas formas modais são consideradas lineares como no “*International HFBB Comparison Project*”.

As frequências naturais dos três primeiros modos são:

$$\begin{aligned} f_1 = f_X &= 0,2 \text{ Hz} && \text{(flexão na direção Y exclusivamente)} \\ f_2 = f_Y &= 0,2 \text{ Hz} && \text{(flexão na direção X exclusivamente)} \\ f_3 = f_\theta &= 0,30 \text{ Hz} && \text{(torsor puro)} \end{aligned}$$

A distribuição de massa é uniforme, a uma taxa de 160 kg/m^3 .

O amortecimento estrutural (razão de amortecimento crítico) é igual a 1%:

$$\zeta = 0,01$$

Massa generalizada/modal: $\bar{m}_j = 13.581.599 \text{ kg}$

Rigidez generalizada/modal: $\bar{k}_j = 21.447.201 \text{ kg m}^2/\text{s}^2$

5.3.2. Características do vento medido por Oliveira (2009)

O vento simulado é o vento turbulento com perfil potencial, eq. (2. 3), onde z_{ref} é considerado no topo do prédio/modelo reduzido e o expoente p determinado por medições no túnel de vento como $p = 0,34$, similar ao da categoria V da NBR 6123/1988 que para um período de 3600 seg é $p = 0,35$ com $I_{turb}(182,88) = 0,071$.

Na *Figura 5. 41 (a-c)* mostram-se as principais caraterísticas do vento simulado no túnel de vento por Oliveira (2009), onde: (a) a velocidade média foi tomada na cota de referência (450 mm) no eixo longitudinal do túnel; (b) a intensidade (I1) da componente longitudinal da turbulência no nível do topo do modelo, 450 mm , é aproximadamente 7,1%; (c) a macroescala da componente longitudinal da turbulência.

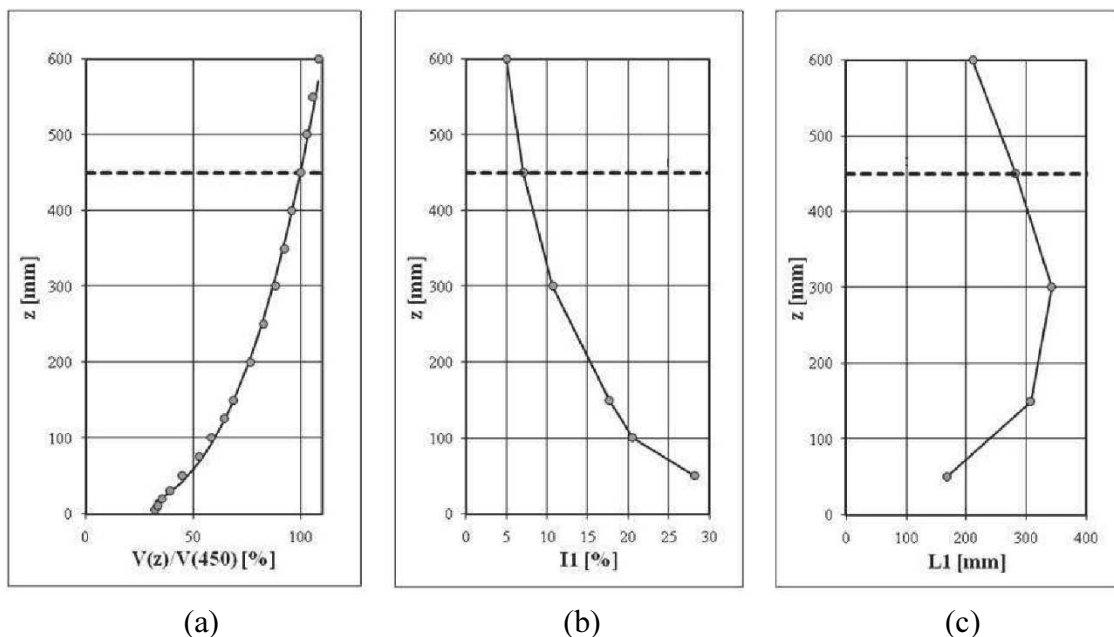


Figura 5. 41 Características do vento simulado: (a) perfil vertical de velocidades; (b) perfil vertical da intensidade da componente longitudinal da turbulência; (c) macroescala da componente longitudinal da turbulência. (Oliveira, 2009)

A massa específica do ar é tomada $\rho_{ar} = 1,226 \text{ kg/m}^3$

O perfil de velocidades médias é desenhado para velocidade média no topo do prédio $\bar{U}_{3600s}(182,88)$ de 20 até 120m/s cada 10m/s. As velocidades estão associados a períodos/janelas de tempo de 1 hora (3600s). Os parâmetros de rugosidade usados nos cálculos são: $p = 0,35$ e de $z_0 = 1,75 \text{ m}$ (para os cálculos do Eurocódigo 1-4/2005).

5.3.3. Resultados experimentais CAARC

Os resultados experimentais mostrados nas Figuras 5. 43 e 5. 44 são extraídos de Oliveira (2009), esses resultados são apresentados graficamente em termos de deslocamentos médios, máximos e desvios padrões normalizados no topo do modelo para taxa de amortecimento de 1% nas direções X e Y da Figura 5. 42.

Os resultados “modelo BD3GDL” e “modelo de pressões” são obtidos por Oliveira (2009) enquanto os outros são resultados da literatura adicionados aos gráficos para análise comparativa e validação das técnicas experimentais descritas nos itens 3.7.2 e 3.7.3 implementadas pelo autor.

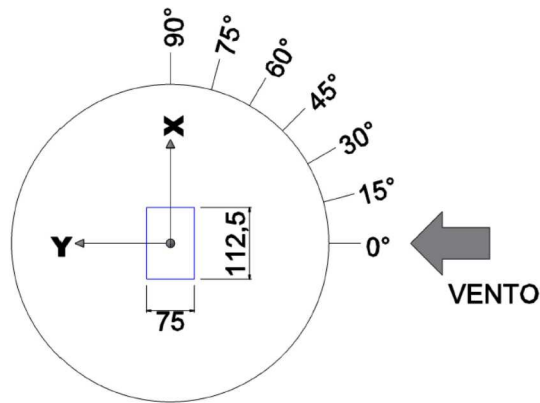


Figura 5. 42 Ângulos de incidência do vento para ensaios com o modelo isolado.

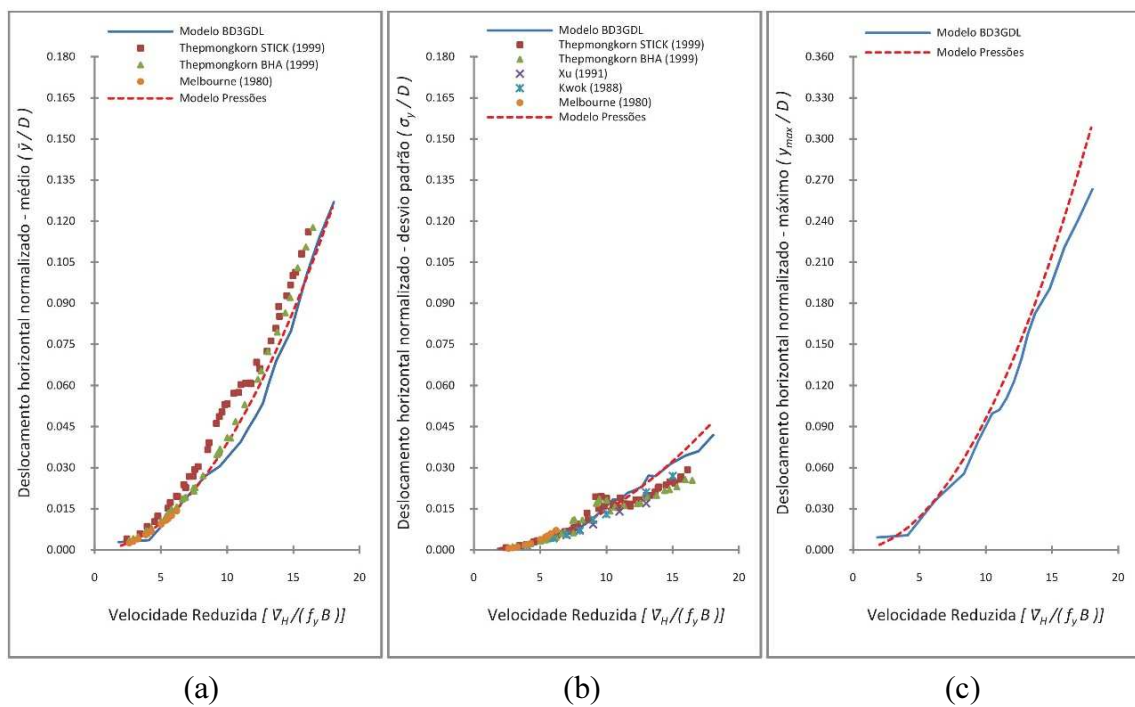


Figura 5. 43 Deslocamentos horizontais normalizados no topo do modelo na direção Y para o prédio isolado: (a) médio, (b) desvio padrão e (c) máximo (maior deslocamento absoluto). (Oliveira, 2009).

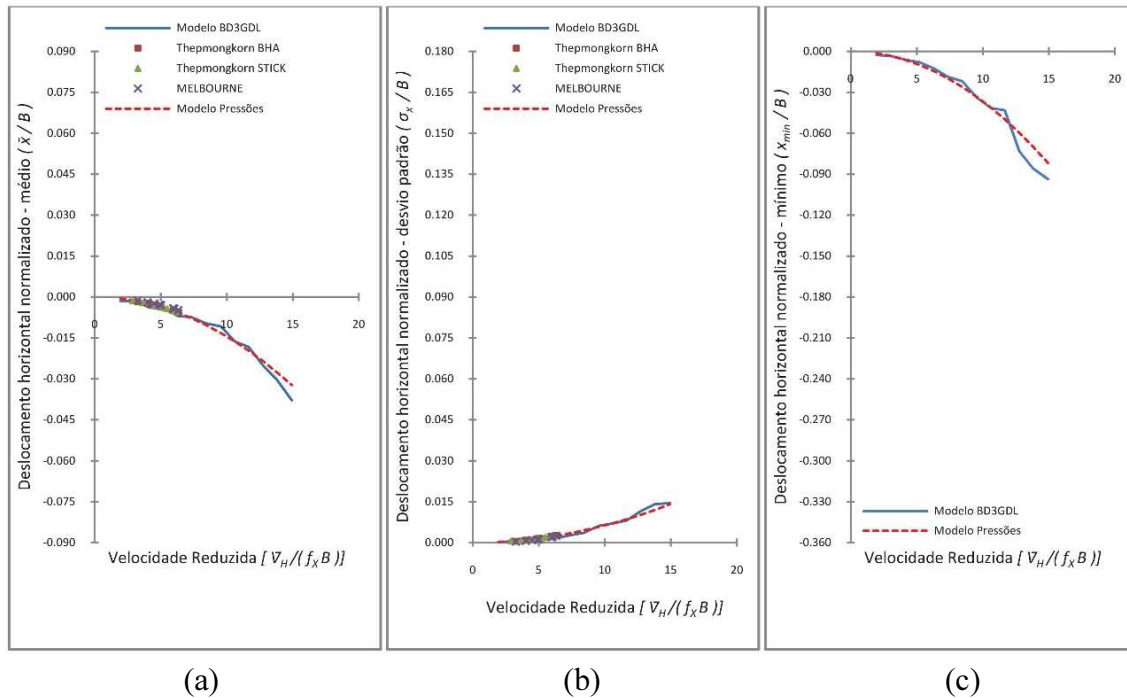


Figura 5. 44 Deslocamentos horizontais normalizados no topo do modelo na direção X para o prédio asilado: (a) médio, (b) desvio padrão e (c) máximo (maior deslocamento absoluto). (Oliveira, 2009).

5.3.4. Modelos de vento equivalente

a) Vento com parâmetros da NBR 6123/1988 (Lei Potencial)

Observa-se inicialmente que não é possível caracterizar o vento medido no túnel de vento por Oliveira (2009) com base nas categorias descritas na NBR 6123/1988. A Cat V, com perfil vertical de velocidades médias de vento equivalente, com o uso das equações (2. 7) e (2. 9) junto com os dados da Tabela 2. 1, considerando o desvio padrão constante ao longo da altura, resulta numa intensidade de turbulência $I_{turb}(182,88) = 0,214$, muito afastada do valor de $I_{turb}(182,88) = 0,071$ medido por Oliveira (2009).

Mesmo não sendo de todo possível se aplicar o vento equivalente, serão apresentados os resultados obtidos com parâmetros da Cat V ($t=3600seg$) para os perfis verticais de velocidades médias segundo a lei potencial, para as diferentes velocidades de referência mostradas na Tabela 5. 24 e a seguir:

$$z_{ref} = 180 \text{ m}$$

$$p = 0,35 ; b = 0,44 ; F_{r,II} = 0,65$$

$$S_1 = S_3 = 1$$

Tabela 5. 24 Valores das velocidades de básicas de vento V_0 para a Cat V

\bar{U}_{ref}	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	m/s
V_0	25,29	37,93	50,57	63,22	75,86	88,51	101,15	113,79	126,44	139,08	151,72	m/s

b) Vento com parâmetros do Eurocódigo 1-4/2005 (Lei logarítmica)

Os perfis do Eurocódigo 1-4/2005 também não são equivalentes ao vento medido por Oliveira (2009). Utilizando $z_0 = 1,75m$ para representar o perfil de velocidade média o resultado da intensidade de turbulência no topo do prédio $I_{turb}(182,88) = 0,215$ está muito afastado dos resultados experimentais. Para obter intensidades de turbulência similares as experimentais o comprimento de rugosidade teria que ser aproximadamente $z_0 = 0,0002m$, longe de um comportamento similar ao perfil potencial de $p = 0,35$.

Mesmo não sendo o vento equivalente, serão apresentados os valores de cálculo com os parâmetros $z_0 = 1,75m$; $c_0(z) = 1$ resultando em valores de velocidades básicas de vento v_b para as diferentes velocidades de referência \bar{U}_{ref} mostrados na *Tabela 5. 25*.

Tabela 5. 25 Valores das velocidades de básicas de vento v_b para $z_0 = 1,75m$.

\bar{U}_{ref}	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	m/s
v_b	17,65	26,48	35,31	44,13	52,96	61,78	70,61	79,44	88,26	97,09	105,92	m/s

c) Análise comparativa entre os perfis de velocidade média da NBR 6123/1988 e o do Eurocódigo 1-4/2005

Na *Figura 5. 45* mostram-se os perfis de vento da Cat V da NBR 6123/1988 (lei potencial) e o do Eurocódigo 1-4/2005 (lei logarítmica) para $\bar{U}_{ref}(182,88) = 20m/s$. Pode-se observar que o perfil gerado com $z_0 = 1,75m$ resulta em valores maiores de velocidade média do que o do perfil gerado com $p = 0,35$ (Cat V da NBR 6123/1988).

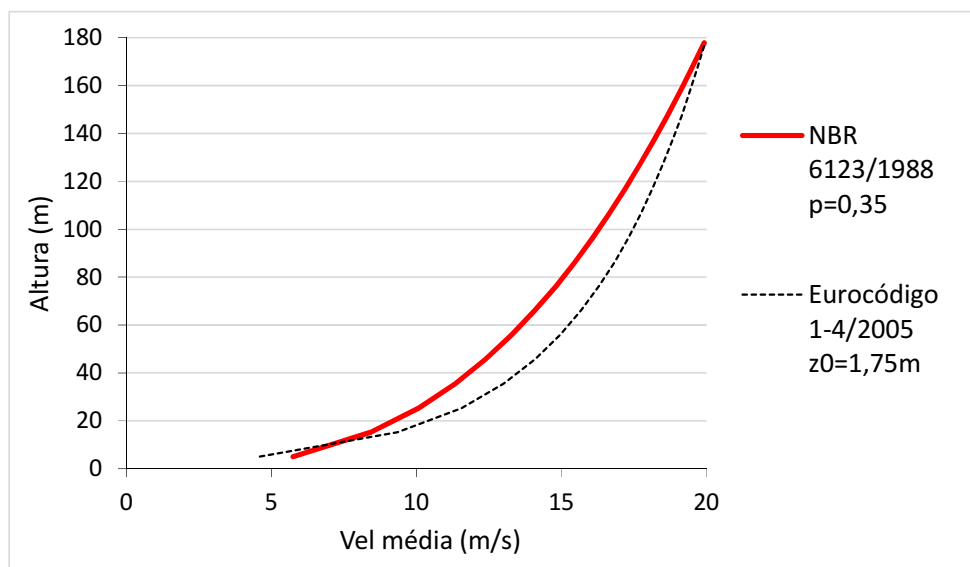


Figura 5. 45 Perfis verticais das velocidades médias consideradas para o caso de $\bar{U}_{ref}(182,88) = 20m/s$.

d) Co-espectro cruzado da turbulência

Os coeficientes de decaimento para o método no domínio da frequência são considerados $C_y = C_z = 10$, como apresentado no item 2.5.4.

5.3.5. Comparação teórico-experimental

Na *Figura 5. 46* e *Figura 5. 47* são mostrados os resultados obtidos das diferentes análises teóricas realizadas para o prédio CAARC comparadas aos resultados experimentais de Oliveira (2009) extraídos das *Figuras 5. 43 e 5. 44*.

Nas *Figuras 5. 46 e 5. 47* são apresentados os resultados na forma de deslocamento normalizado função da velocidade reduzida, definido a seguir:

Velocidade reduzida:

$$\frac{\bar{U}}{f_X B} \text{ ou } \frac{\bar{U}}{f_Y B} \quad (5. 4)$$

onde:

- \bar{U} Velocidade média no topo da estrutura.
- f_X Frequência natural da estrutura na direção do eixo X.
- f_Y Frequência natural da estrutura na direção do eixo Y.
- B Maior dimensão em planta da estrutura. $B = 45,72m$

Deslocamentos normalizados:

dir X:

$$\frac{x}{D_X}$$

dir Y:

$$\frac{y}{D_Y}$$

(5. 5)

x deslocamento na dir X

y deslocamento na dir Y

D_X dimensão da estrutura na dir X

D_Y dimensão da estrutura na dir Y

$$D_X = 45,72m$$

$$D_Y = 30,48m$$

Desvio padrão normalizado:

dir X:

$$\frac{\hat{x}}{g_X D_X}$$

dir Y:

$$\frac{\hat{y}}{g_Y D_Y}$$

(5. 6)

\hat{x} deslocamento flutuante na dir X

\hat{y} deslocamento flutuante na dir Y

g_X fator de pico na dir X

g_Y fator de pico na dir Y

$$g_X = 3,787$$

$$g_Y = 3,787$$

Os deslocamentos máximos no topo do prédio sob a ação das forças médias de vento são calculados com o programa SAP2000, o modelo mostrado na *Figura 5. 40* no item 5.3.1.

Os resultados com o método discreto para a Cat V da NBR 6123/1988 estão apresentados até velocidades reduzidas inferiores a 5, devido a não ser possível o cálculo do coeficiente de amplificação dinâmica ξ com os ábacos da norma quando $\bar{V}_p/f_j L \geq 0,1$.

São mostradas duas análises com a solução numérica no domínio da frequência:

a) Com intensidade da turbulência 7,1% no topo, $I_{turb}(182,88) = 0,071$

O objetivo desta análise é apresentar os resultados teóricos com as características de vento medidas nos ensaios de Oliveira (2009).

b) Com intensidade da turbulência 21,4% no topo, $I_{turb}(182,88) = 0,214$, (Cat V)

O objetivo desta análise é apresentar os resultados teóricos para as características de vento e parâmetros de rugosidade equivalentes a categoria V da NBR 6123/1988, com $C_{as} = 0,0527$.

A análise com o método discreto da NBR 6123/1988 fornece resultados com valores menores ainda aos experimentais, apesar da intensidade de turbulência da Cat V ser muito maior que a experimental, indicando que o método produz valores muito menores do que deveria.

Dos resultados obtidos com vento na direção Y, mostrados na *Figura 5. 47*, pode-se observar a boa correlação entre o método no domínio da frequência com parâmetros da Cat V da NBR 6123/1988 e os métodos apresentados no Eurocódigo 1-4/1988. Na direção de vento X, *Figura 5. 46*, por causa dos valores próximos dos coeficientes de arrasto, a correlação é quase perfeita com o procedimento 1 do Anexo B da norma europeia.

Os resultados obtidos com o método no domínio da frequência, com o parâmetro de turbulência igual ao medido experimentalmente, produz valores muito próximos aos experimentais, o que valida mais uma vez este método teórico.

Os resultados da NBR 6123/1988 para Cat V em termos de deslocamentos flutuantes são 70% menores do que os produzidos com o método no domínio da frequência se considerar parâmetros da Cat V; já para os deslocamentos totais são 50% menores.

Os deslocamentos médios na direção do vento Y, *Figura 5. 47*, calculados com o coeficiente de arrasto da NBR 6123/1988 para baixa turbulência, $C_a = 1,45$, resultam em torno de 32% menores do que os experimentais; já se for usado o Eurocódigo 1-4/2005, com $C_a = 1,56$ e um perfil de vento maior, os deslocamentos médios são 18% menores. Aparentemente os resultados indicam que as duas normas subestimam o coeficiente de arrasto na dir Y, contrário do que se conclui com os resultados experimentais do item 5.2.

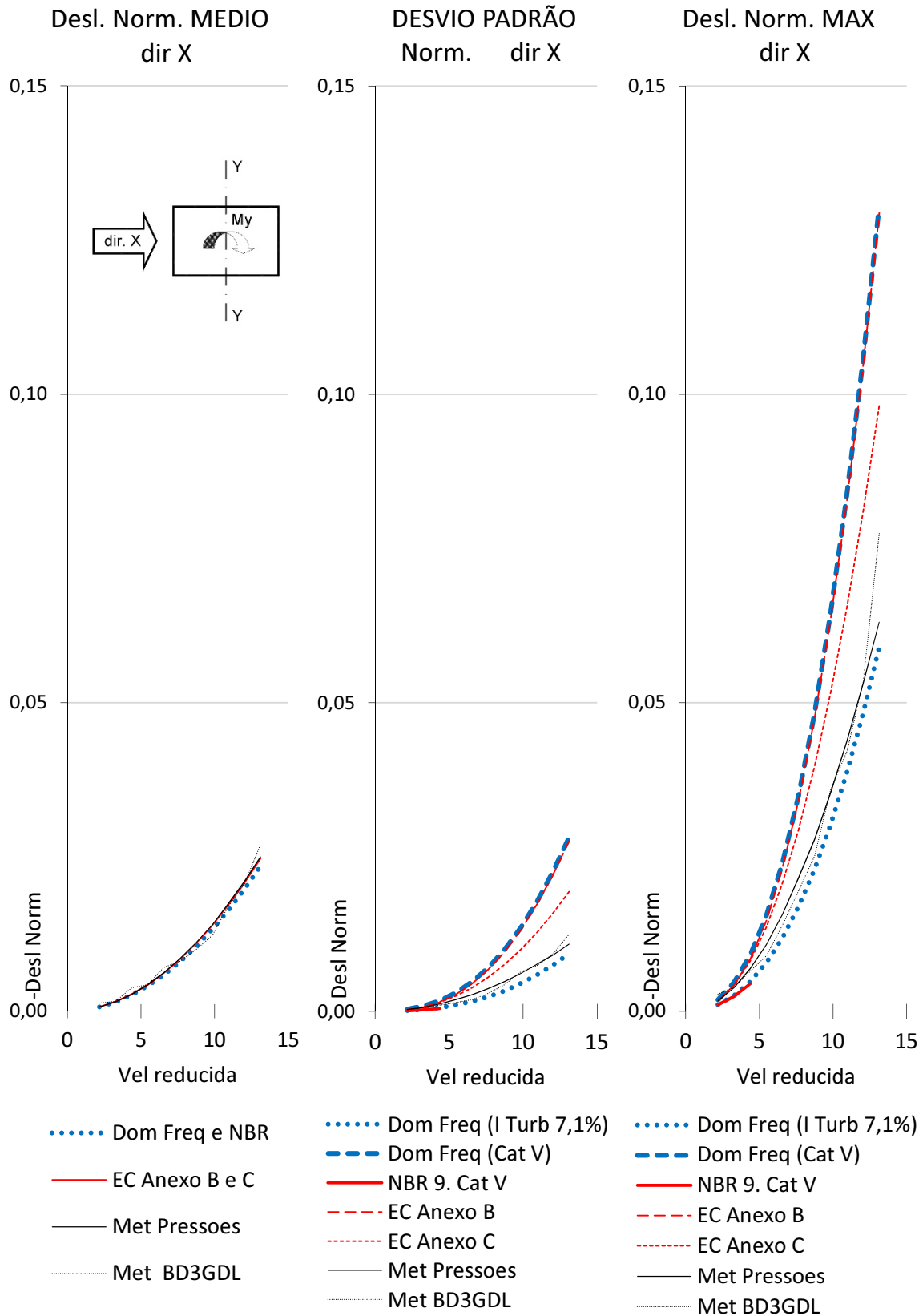


Figura 5. 46 Deslocamentos no topo do prédio para o vento na direção X e $\zeta=1\%$.

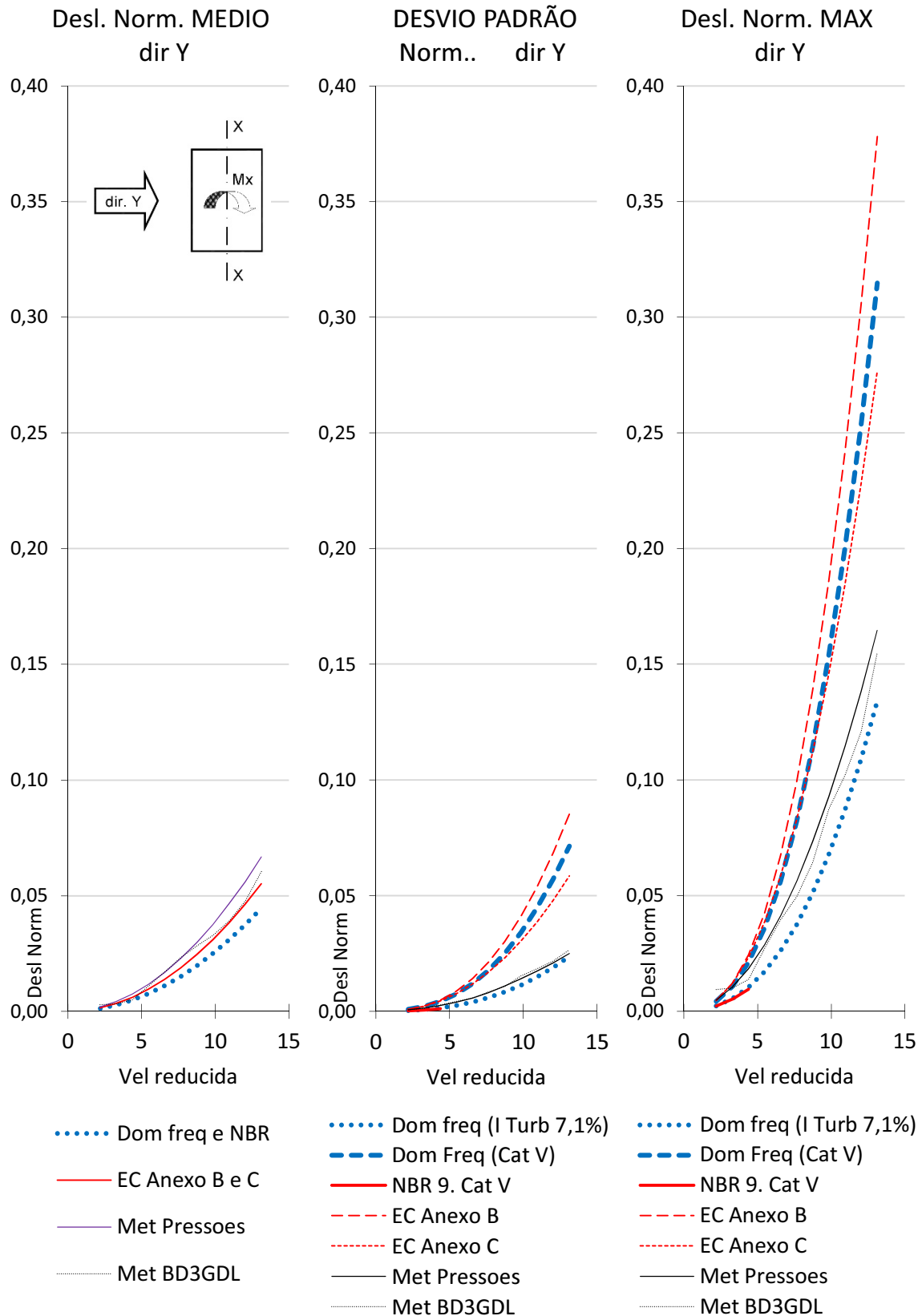


Figura 5. 47 Deslocamentos no topo do prédio para o vento na direção Y e $\zeta=1\%$.

CAPÍTULO 6

PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO MÉTODO DISCRETO DA NBR 6123/1988

6.1. Método discreto modificado

6.1.1. Fundamento teórico do método discreto modificado

O método dinâmico discreto adotado pela NBR 6123/1988, exposto no item 4.1.3, está baseado na formulação modal no domínio da frequência para determinar uma ação estática equivalente às forças dinâmicas que produzem o deslocamento dinâmico máximo da estrutura. Para determinar esse deslocamento máximo, x_{max} , da estrutura sob ação de vento tem que se somar o deslocamento médio, \bar{x} , ao deslocamento dinâmico, \hat{x} .

O método atual da NBR 6123/1988 produz resultados com valores muito menores do que os obtidos nos ensaios experimentais e, também, menores que os devidos a outros procedimentos normativos, como observado nos resultados nos itens 5.1.8, 5.2.10 e 5.3.5 para as estruturas estudadas. Esta discrepância é causada pela dupla consideração da correlação espacial através do co-espectro normalizado, $\Psi_u(i, k, f)$, eq. (2. 23), junto com a admitância aerodinâmica χ^2 , eq. (3. 30).

A proposta de mudança do método discreto adota as seguintes premissas:

- a) Lei Potencial para definir o perfil vertical das velocidades médias do vento, eq. (2. 3).
- b) Espectro de Harris para definir a turbulência, eq. (2. 16).
- c) Fator de pico g calculado com a eq. (3. 34), Davenport (1961).
- d) Coeficientes de decaimento iguais a $C_y=C_z=10$.
- e) Parâmetros de rugosidade mostrados na *Tabela 2. 1* para as diferentes categorias de terreno.
- f) Intensidade da turbulência definida pela eq. (2. 13).
- h) Co-espectro normalizado definido pela eq. (2. 22), através do uso da função do co-espectro normalizado médio $\Psi_{u_{med}}(f)$ descrito no item 6.1.2 para o tratamento da correlação espacial das pressões.

Eliminando o fator da admitância aerodinâmica χ^2 , eq. (4. 21), chega-se na seguinte expressão:

$$\hat{F}_{j,i} = g \omega_j^2 m_i \phi_{j,i} \left[\int_0^\infty \frac{1}{\bar{m}_j^2 \omega_j^4} |H(f)|^2 \frac{\rho^2}{4} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n \phi_{j,i} \phi_{j,k} (2\bar{U}_i)(2\bar{U}_k) C_{a_i} C_{a_k} A_i A_k \sqrt{S_{u,i}(f)} \sqrt{S_{u,k}(f)} \Psi_u(i, k, f) df \right]^{1/2} \quad (6. 1)$$

Considerando agora $S_{u,i}(f) = S_{u,k}(f)$, $\omega_j^2 / \sqrt{\omega_j^4} = 1$, e $\Psi_u(i, k, f)$ representado por seu valor médio em toda a estrutura $\Psi_{u_{med}}(f)$ - para F_H não depender dos pontos k e i , sendo assim função só da frequência f - a eq. (6. 1) é reescrita como:

$$\hat{F}_{j,i} = m_i \phi_{j,i} F_H \quad (4. 22)$$

onde F_H é redefinida como:

$$F_H = g \frac{\rho \bar{U}_{ref}^2 \sum_{i=1}^n \phi_{j,i} \left(\frac{z_k}{z_{ref}}\right)^2 C_{a_i} A_i}{\sum_{i=1}^n m_i \phi_{j,i}^2} \left[4 \int_0^\infty \frac{|H(f)|^2 S_u(f) \Psi_{u_{med}}(f)}{\bar{U}_{ref}^2} df \right]^{1/2} \quad (6. 2)$$

Fazendo as seguintes troca de variáveis:

$$q_{ref} = \frac{\rho \bar{U}_{ref}^2}{2} \quad (4. 25)$$

$$\xi = g \gamma \quad (4. 26)$$

onde:

$$\gamma^2 = 4 \int_0^\infty \frac{|H(f)|^2 S_u(f) \Psi_{u_{med}}(f)}{\bar{U}_{ref}^2} df \quad (6. 3)$$

Chegando-se novamente à eq. (4. 28) para definir F_H .

$$F_H = q_{ref} \frac{\sum_{i=1}^n \phi_{j,i} \left(\frac{z_i}{z_{ref}}\right)^p C_{a_i} A_i}{\sum_{i=1}^n m_i \phi_{j,i}^2} \xi \quad (4. 28)$$

6.1.2. Estimativa do co-espectro normalizado médio, $\Psi_{u_{med}}(f)$

Para permitir a confecção de novos ábacos para a NBR 6123/1988 é necessário que o termo na integral da eq. (6. 1) independa das posições dos nós k e i . Isto pode ser feito adotando um valor médio para Ψ_u , substituindo $\Psi_u(i, k, f)$ por $\Psi_{u_{med}}(f)$. Então, deve ser buscado um valor médio do co-espectro normalizado, válido para todo tipo de estruturas.

Neste trabalho foi realizado o estudo, mostrado a seguir no item 6.1.3, para propor uma formulação de $\Psi_{u_{med}}(f)$. Mediante um estudo das respostas em termos de momento fletor na base de numerosas e diferentes estruturas sob ventos variados chegou-se a eq. (6. 4), que define $\Psi_{u_{med}}(f)$. Observa-se que a (6. 4) gera resultados próximos aos calculados no domínio da frequência com o uso do co-espectro normalizado $\Psi_u(i, k, f)$, definido na eq. (2. 22), resultando em:

$$\Psi_{u_{med}}(f) = C_{corr} \frac{\sum_{i=1}^{i_{max}} \sum_{k=1}^{k_{max}} \Psi_u(i, k, f)}{i_{max} * k_{max}} \quad (6. 4)$$

Substituindo a (2. 22) na (6. 4) chegase em:

$$\Psi_{u_{med}}(f) = C_{corr} \frac{\sum_{i=1}^{i_{max}} \sum_{k=1}^{k_{max}} e^{\left[\frac{f \sqrt{C_y^2 (y_k - y_i)^2 + C_z^2 (z_k - z_i)^2}}{\bar{U}_m} \right]}}{i_{max} * k_{max}} \quad (6. 5)$$

onde:

- i, k Nó i e k da estrutura discretizada; $i(y_i, z_i)$ e $k(y_k, z_k)$
- i_{max}, k_{max} Número de nós nos que a estrutura é discretizada.
- C_{corr} Coeficiente corretor para que o cálculo do modelo discreto da NBR seja igual/similar ao cálculo no domínio da frequência.

6.1.3. Metodologia para o cálculo do Coeficiente Corretor, C_{corr}

Com a base de em que o método discreto da NBR 6123/1988 produza resultados próximos aos calculados com o método no domínio da frequência (cuja distinção se dá apenas no cálculo do co-espectro normalizado) foi feito o estudo para diferentes tipologias de prédios e ventos com $\zeta = 0,01$. Os resultados são mostrados na *Tabela 6. 1*, onde pode-se observar que os resultados considerando $C_{corr} = 1$ o valor médio dos momentos fletores na base é 0,88 vezes o valor médio obtido com o método no domínio da frequência (0,89 para $V_0=30m/s$ e 0,87 para $V_0=50m/s$), sendo os valores afastados da média muito pequenos para todos os casos de estudo. Pode-se observar nas equações (4. 22), (6. 1) e (6. 2) que para ter $\Psi_{u_{med}}(f) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n \Psi_u(i, k, f)$, fazendo assim com que os dois métodos venham a convergir para todo tipo de geometrias estruturais, deve-se assumir o fator corretor C_{corr} da eq. (6. 6) para $\zeta = 0,01$. Para taxa de amortecimento $\zeta = 0,02$ foi realizado um estudo similar com o resultado mostrado na eq. (6. 7).

Para $\zeta = 0,01$:

$$C_{corr}(1\%) = \left(\frac{1}{Média_{1\%}} \right)^2 \approx \left(\frac{1}{0,88} \right)^2 = 1,29 \quad (6. 6)$$

Para $\zeta = 0,02$:

$$C_{corr}(2\%) = \left(\frac{1}{Média_{2\%}} \right)^2 \approx \left(\frac{1}{0,90} \right)^2 = 1,23 \quad (6. 7)$$

onde:

$Média_{1\% \text{ ou } 2\%}$ Média aproximada da razão dos resultados das análises com o método discreto modificado (considerando $C_{corr} = 1$) sobre o método no domínio da frequência para $\zeta = 0,01$ ou $\zeta = 0,02$.

Tabela 6.1 Cálculos de diferentes prédios para estimar o valor do Coeficiente Corretor, C_{corr} para amortecimento nas estruturas de 1%. $\zeta = 0,01$.

h	L1	L2	L1/ L2	h/ L1	Ca	fn	Cat NBR	V ₀ m/s	Mom flut base (MNm)			V ₀ m/s	Mom flut base (MNm)		
									Mom / Mom D Freq				Mom / Mom D Freq		
									Dom Freq	NBR prop C _{corr} = 1	NBR prop C _{corr} = 1.29		Dom Freq	NBR prop C _{corr} = 1	NBR prop C _{corr} = 1.29
180	30	45	0,67	6,00	1,26	0,23	4*	21,98	132 1,00	120 0,91	136 1,03	43,96	703 1,00	607 0,86	690 0,98
							4	21,98	174 1,00	158 0,91	180 1,03	43,96	925 1,00	800 0,86	908 0,98
180	45	30	1,50	4,00	1,45	0,2	4*	21,98	224 1,00	204 0,91	231 1,03	43,96	1214 1,00	1049 0,86	1190 0,98
							4	21,98	296 1,00	269 0,91	305 1,03	43,96	1598 1,00	1381 0,86	1568 0,98
100	10	10	1,00	10,0	1,56	0,15	1	30	67 1,00	61 0,91	69 1,03	50	249 1,00	229 0,92	260 1,04
							5	30	39 1,00	33 0,85	38 0,97	50	141 1,00	120 0,85	137 0,97
100	10	40	0,25	10,0	0,82	0,3	1	30	25 1,00	22 0,88	25 1,00	50	93 1,00	83 0,89	95 1,02
							5	30	16 1,00	15 0,94	16 1,00	50	55 1,00	48 0,87	54 0,98
100	40	10	4,00	2,50	1,44	0,15	1	30	208 1,00	188 0,90	213 1,02	50	809 1,00	745 0,92	846 1,05
							5	30	120 1,00	105 0,88	120 1,00	50	439 1,00	376 0,86	427 0,97
300	30	30	1,00	10,0	1,56	0,15	1	30	1355 1,00	1188 0,88	1349 1,00	50	5289 1,00	4641 0,88	5271 1,00
							5	30	1220 1,00	1050 0,86	1193 0,98	50	4363 1,00	3629 0,83	4121 0,94
300	30	30	1,00	10,0	1,56	0,05	1	30	2507 1,00	2248 0,90	2523 1,01	50	8745 1,00	8053 0,92	9146 1,05
							5	30	2036 1,00	1694 0,83	1924 0,94	50	7571 1,00	6489 0,86	7370 0,97
100	10	20	0,50	10,0	1,17	0,2	1	30	44 1,00	39 0,89	44 1,00	50	163 1,00	148 0,91	168 1,03
							5	30	26 1,00	23 0,88	26 1,00	50	93 1,00	79 0,85	90 0,97
100	20	10	2,00	5,00	1,54	0,18	1	30	113 1,00	102 0,90	115 1,02	50	431 1,00	393 0,91	447 1,04
							5	30	67 1,00	58 0,87	66 0,99	50	240 1,00	204 0,85	232 0,97
300	30	60	0,50	10,0	1,17	0,2	1	30	870 1,00	769 0,88	874 1,00	50	3338 1,00	2920 0,87	3316 0,99
							5	30	843 1,00	744 0,88	845 1,00	50	2870 1,00	2426 0,85	2755 0,96
300	60	30	2,00	5,00	1,54	0,18	1	30	2141 1,00	1903 0,89	2161 1,01	50	8381 1,00	7350 0,88	8348 1,00
							5	30	2112 1,00	1881 0,89	2137 1,01	50	7185 1,00	6100 0,85	6929 0,96
Percentagem média do Mom flutuante na base									Média	Média		Média	Média		
Mom NBR modificado / Mom Dominio na frequência								Cat NBR	1, 5 e 4*	0,89	1,00	1, 5 e 4*	0,87	0,99	
									1	0,89	1,01	1	0,90	1,02	
									5	0,87	0,99	5	0,85	0,97	

4* Cat 4, com o desvio padrão da turbulência substituído pelo valor da intensidade longitudinal de turbulência fornecido no "International HFBB Comparison Project" (o que muda o Espectro de Harris).

Onde:

- h Altura da estrutura.
- $L1$ Largura da estrutura, direção perpendicular ao vento.
- $L2$ Profundidade da estrutura, na direção ao vento.
- C_a Coeficiente de arrasto da NBR 6123/1988 para baixa turbulência.
- f_n Frequência natural da estrutura.
- V_0 Velocidade média do vento na altura de 10m de uma rajada de 3 seg.

Para o cálculo dos momentos na base foram usados os seguintes parâmetros:

$$\rho_{predio} = 160 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{ar} = 1,2 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Tempo da amostra, } T = 3600 \text{ seg}$$

$$\text{Amortecimento, } \zeta_{estr} = 1\%$$

$$\text{Coeficiente de decaimento Z, } C_z = 10$$

$$\text{Coeficiente de decaimento Y, } C_y = 16$$

Diferentes tempos de amostra T e coeficientes de decaimento C_y e C_z não mudam a efeitos práticos o valor do coeficiente corretor C_{corr} .

6.2. Novos Ábacos para a NBR 6123/1988

Neste trabalho efetua-se uma revisão do método dinâmico discreto da NBR 6123/1988 e apresenta-se uma proposta de novos ábacos para determinação do fator dinâmico (ver Anexo A) ou fator de amplificação dinâmica (como definido na NBR 6123/1988). Os ábacos do Anexo A corrigem os que a NBR 6123/1988 define entre a Figura 14 e 18 do item 9 para as cinco categorias de terreno, onde o tempo de estimativa tem que ser considerado $T=600s$.

A Figura 6. 1 apresenta um exemplo dos novos ábacos gerados com a formulação descrita a partir da solução numérica no domínio da frequência, para categorias IV e taxa de amortecimento $\zeta = 1\%$.

Os parâmetros que aparecem na Figura 6. 1, definidos na lista de símbolos são: a velocidade de projeto \bar{V}_p ; a frequência modal f_j ; o comprimento de escala, $L=1800m$; e o fator dinâmico ξ .

São propostos dois ábacos para cada categoria de terreno em função da taxa de amortecimento: 1% e 2% (Anexo A). Em cada um se apresentam três curvas para cada altura considerada: 25m, 100m e 300m. Estas três curvas para cada altura se referem à relação largura ($L1$)/altura (h) do prédio, e variam dependendo do valor de h . O conjunto

completo de ábacos propostos encontra-se no Anexo A, juntamente com um conjunto de tabelas que facilitarão a aplicação do método.

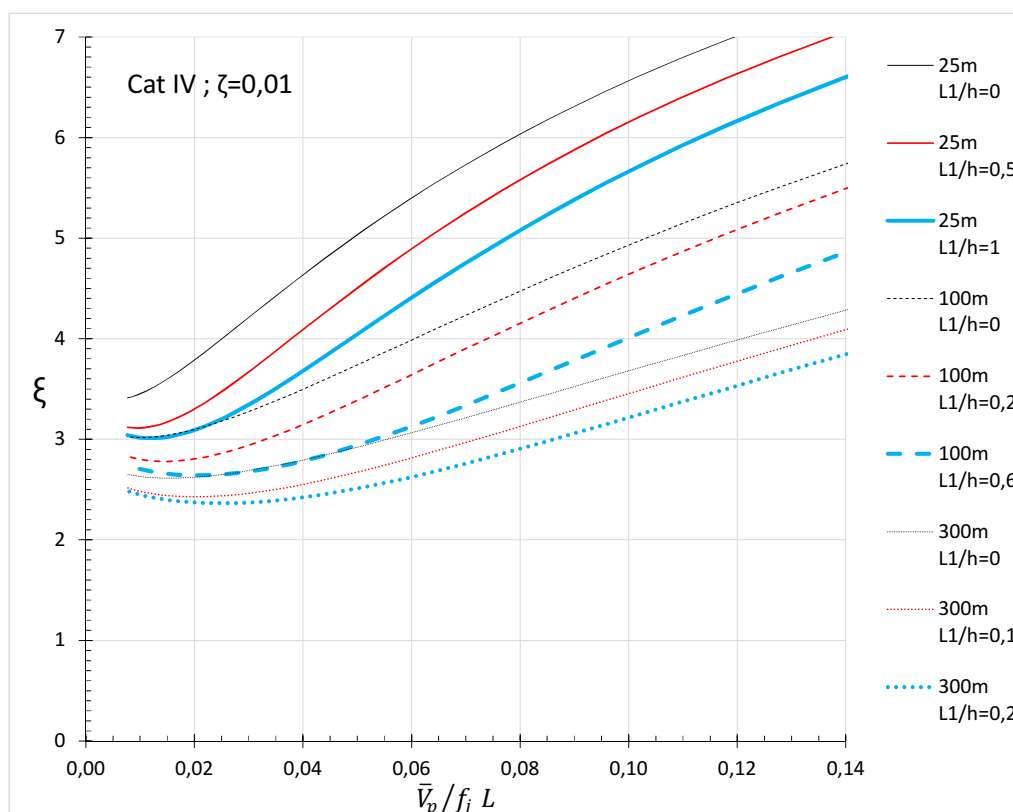


Figura 6. 1 Ábaco para o cálculo do fator dinâmico, ξ , para terreno de **categoria IV** e taxa de amortecimento $\zeta=1\%$.

Para avaliar o método discreto modificado é realizado um estudo comparativo com a solução numérica no domínio da frequência. A estrutura escolhida para o estudo é o prédio B do “*International HFBB Comparison Project*” com uma taxa de amortecimento de $\zeta=0,016$ para as categorias de terreno I e V e para diferentes velocidades básicas, com $\rho=1,2Kg/m^3$.

O método discreto modificado pode ser usado de duas formas: (i) calculando o fator dinâmico ζ com a eq. (4. 26); (ii) calculando ζ mediante interpolação linear com os valores obtidos dos ábacos e tabelas fornecidos no Anexo A para as diferentes categorias de terreno da NBR 6123/1988.

Na *Tabela 6. 2* são apresentados os resultados para momentos médios e momentos flutuantes, estes últimos obtidos com o método no domínio da frequência e com os dois modos de uso do método discreto modificado indicados no parágrafo anterior. Pode-se observar a ótima correlação entre os momentos flutuantes obtidos com o método no domínio da frequência e os obtidos com a eq. (4. 26) em todos os casos analisados, o que demonstra a validade do parâmetro C_{corr} proposto neste trabalho. Pode-se considerar que a convergência dos resultados obtidos com ábacos e tabelas fornecidos no Anexo A é

favorável em todos os casos, ver *Figura 6. 2*. Observa-se, entretanto, que as necessárias interpolações numéricas, feitas com auxílio dos ábacos e tabelas do Anexo A, produzem certa margem de erros de aproximação, resultando nas diferenças de valores mostrados nas colunas da *Tabela 6. 2*.

A *Tabela 6. 2* apresenta também os resultados para momento flutuante obtidos com a NBR 6123/1988, os quais são sempre bastante inferiores aqueles obtidos com os outros métodos de cálculo.

Os novos Ábacos do fator dinâmico, ξ , da NBR 6123/1988 propostos no Anexo A para o método discreto modificado, foram gerados a partir de uma velocidade básica $V_0 = 40m/s$. Os resultados são praticamente os mesmos que se forem usados outros valores de V_0 . Deve-se observar, entretanto que os resultados obtidos para $V_0 = 40m/s$ são levemente maiores do que para $V_0 = 30m/s$ e pouco menores do que para $V_0 = 50m/s$. Observa-se também que a influência desses desvios é pequena e os resultados das respostas flutuantes para as diferentes velocidades básicas e categorias de vento são coerentes e bem correlacionadas com os resultados do método no domínio da frequência, como pode-se observar na *Figura 6. 2*.

Nas *Figuras 6. 2 e 6. 3*, assim como na *Tabela 6. 2*, pode-se observar discrepância entre os resultados do método dinâmico discreto da NBR 6123/1988 e os demais. Para a categoria I os resultados apresentam uma razão média de correlação de 90% com os resultados do método no domínio da frequência; já para categoria V essa razão média de correlação é de apenas cerca de 35% da resposta flutuante obtida com o método no domínio da frequência.

Na *Tabela 6. 2* são apresentados os resultados do fator dinâmico e a resposta flutuante de pico no caso de aplicar o Anexo A com os ábacos e não as tabelas, o que significa interpolar entre as alturas de 25, 100 e 300m, sendo que as tabelas consideram as alturas de 25, 50, 100, 200 e 300m. Isso gera superestimções de 3-6% nos momentos flutuantes quando usados os ábacos em lugar das tabelas para o prédio B.

Tabela 6. 2 Resultados gerados com o método discreto modificado e o método no domínio da frequência para o prédio B do HFBB. $\zeta=0,016$.

	V_0 m/s	Mom médio MNm	Momento flutuante					Fator dinâmico ξ				
			dom freq MNm	eq. (4. 26) MNm	Anexo A tabelas MNm	Anexo A ábacos MNm	NBR 6123/ 88 MNm	eq. (4. 26)	Anexo A tabelas	Anexo A ábacos	NBR 6123/ 1988	
Cat I	X	30	377	303	306	329	343	290	1,022	1,100	1,148	0,97
		40	670	625	626	658	688	564	1,177	1,237	1,294	1,06
		50	1046	1106	1107	1139	1191	931	1,331	1,371	1,433	1,12
	Y	30	650	527	532	546	576	496	1,030	1,057	1,116	0,96
		40	1156	1100	1103	1092	1157	955	1,201	1,189	1,260	1,04
		50	1806	1963	1969	1894	2008	1578	1,372	1,320	1,400	1,10
Cat V	X	30	180	317	319	337	343	110	3,830	4,033	4,109	1,32
		40	320	616	609	629	643	212	4,103	4,240	4,337	1,43
		50	500	1050	1023	1039	1067	350	4,414	4,484	4,601	1,51
	Y	30	311	543	545	567	580	190	3,785	3,935	4,025	1,32
		40	553	1064	1047	1054	1085	366	4,090	4,116	4,238	1,43
		50	864	1829	1775	1737	1798	600	4,437	4,342	4,492	1,51

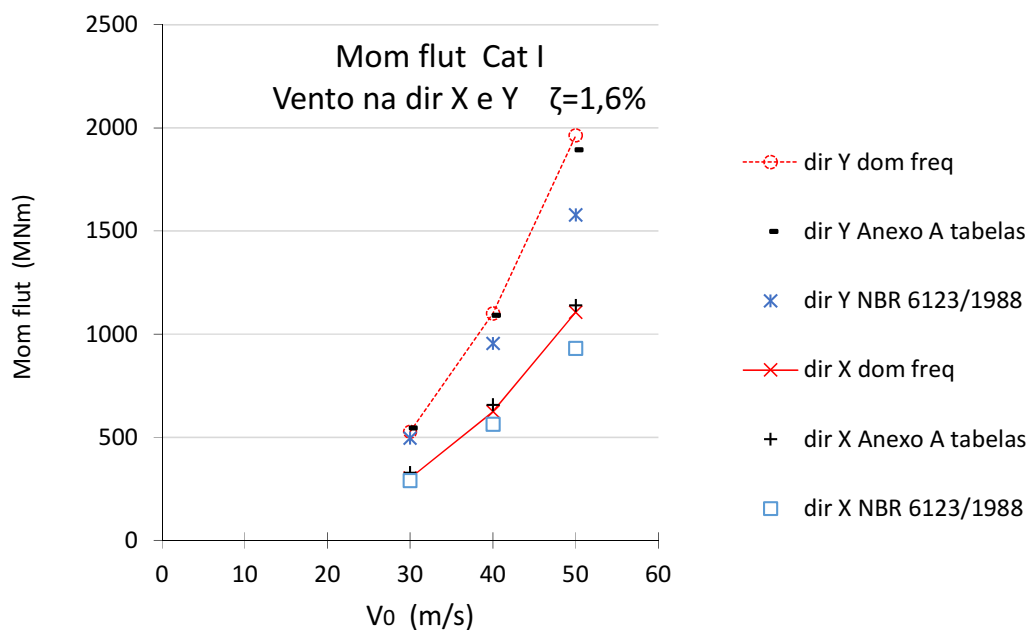


Figura 6. 2 Comparação dos momentos flutuantes obtidos com o método no domínio da frequência, o método da NBR 6123/1988 e método discreto modificado (com o uso das tabelas do Anexo A), para o prédio B do HFBB, amortecimento $\zeta=0,016$ e categoria de terreno I.

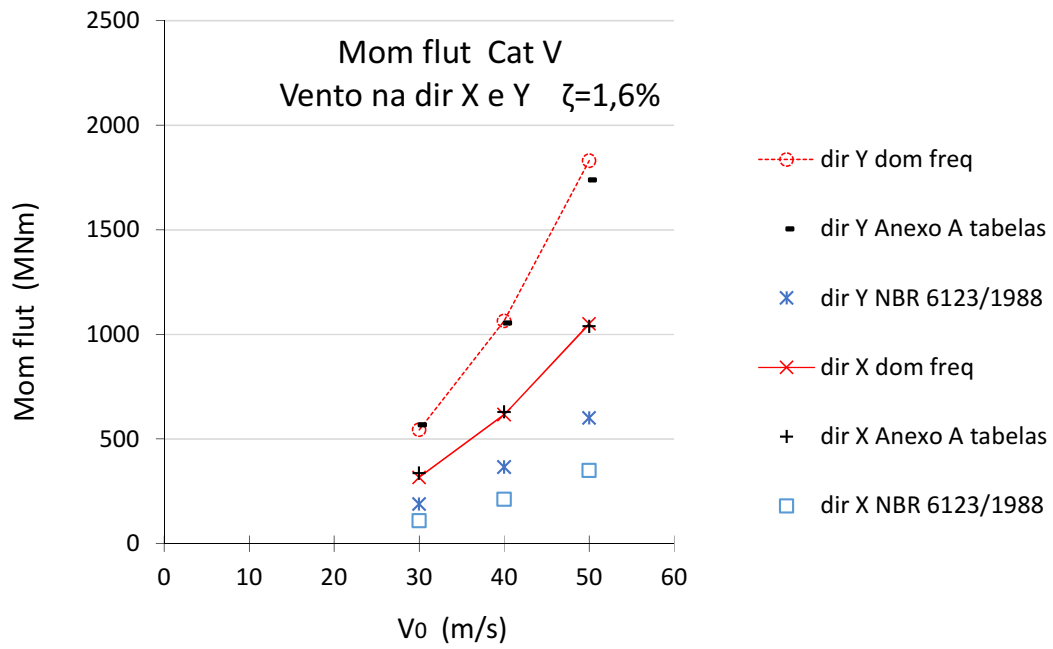


Figura 6.3 Comparação dos momentos flutuantes obtidos com o método no domínio da frequência, o método da NBR 6123/1988 e método discreto modificado (com o uso das tabelas do Anexo A), para o prédio B do HFBB, amortecimento $\zeta=0,016$ e categoria de terreno V.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PROSEGUIMENTO DESTE TRABALHO

7.1. Conclusões

Para a avaliação de métodos teóricos para estimar a resposta dinâmica de edificações sob a ação de vento turbulento foram utilizados dois conjuntos de resultados experimentais que consideram apenas as contribuições das respostas dos modos fundamentais em cada direção de flexão: resultados do projeto HFBB em termos de momentos fletores na base do prédio B e em termos de deslocamentos no topo do prédio padrão CAARC. Os métodos teóricos abordados são aqueles adotados pelo Eurocódigo 1-4/2005 (baseado no método do fator de rajada) e pela Norma NBR6123/1988 (baseada na análise modal), além do método numérico para análise modal no domínio da frequência.

Para o prédio B do projeto HFBB o Eurocódigo 1-4/2005 produz resultados teóricos que, em geral, são muito próximos dos resultados experimentais; o que valida sua aplicação para prédios paralelepípedicos, apesar do coeficiente de arrasto em uma das direções ter se mostrado relativamente conservador.

A comparação de resultados experimentais do prédio B com os teóricos do método discreto da NBR 6123/1988 mostrou que respostas flutuantes de pico (momentos na base ou deslocamentos no topo) teóricas são, em geral, cerca de apenas 50% dos correspondentes valores experimentais, indicando a necessidade de revisão desse método discreto. Esta conclusão já havia sido extraída do estudo comparativo entre métodos teóricos feitos por Cardoso (2011).

No presente trabalho o método dinâmico discreto da NBR 6123/1988 foi revisado e uma proposta de alteração dos ábacos utilizados para a aplicação do método foi elaborada de modo que se possa seguir os mesmos passos de cálculo indicados na norma vigente. O cálculo do fator dinâmico, ξ , foi feito através da solução numérica no domínio da frequência gerando os novos ábacos e tabelas apresentados no Anexo A, com os quais se pode, alternativamente, efetuar interpolações para obter ξ , função da categoria de terreno. Os ábacos do Anexo A substituiriam, então, os que a NBR 6123/1988 apresenta nas Figuras 14 a 18 do item 9 para as cinco categorias de terreno.

É importante mencionar que será necessário incluir no mesmo item 9 da NBR 6123/1988 uma nota a respeito do número de modos necessários para a obtenção da resposta completa devida à ação de vento turbulenta, com suas parcelas quase-estática e permanente. Como observado por Carvalho (2015) a obtenção da resposta completa em termos de deslocamentos é suficiente considerar apenas o primeiro modo de vibração,

mas para a determinação de momentos fletores e principalmente esforços cortantes é necessário incluir mais modos de vibração na resposta, até que haja convergência numérica.

Complementarmente foram efetuadas análises estáticas dos dois exemplos aqui estudados (chaminé e prédio) não considerando vibração devida à turbulência, isto é, como se as estimativas respondessem de forma quase-estática à ação do vento. A comparação de resultados de procedimentos normativos da NBR6123/1988 e do Eurocódigo 1-4/2005 mostrou que a norma brasileira produz resultados cerca de 20% inferiores aos da europeia e que a abordagem da correlação espacial de velocidades flutuantes é bastante distinta entre as duas normas.

7.1. Sugestões para prosseguimento deste trabalho

Tanto o prédio B quanto o prédio padrão CAARC se caracterizam pela mesma geometria em termos de áreas expostas. Sendo assim, sugere-se para trabalhos futuros que novas verificações de métodos teóricos sejam efetuadas para edificações com diferentes dimensões.

Tendo em vista a grande discordância entre os resultados para a resposta estática obtidos com os procedimentos da NBR 6123/1988 e do Eurocódigo 1-4/2005, sugere-se que as causas dessa discordância sejam melhor investigadas, inclusive por meio de correlações com resultados experimentais.

Além da aplicação do método discreto por meio de ábacos e tabelas seria interessante aprimorar o programa computacional desenvolvido por Cardoso (2011) de modo que possa acompanhar o texto da NBR 6123/1988 e permitir o seu livre uso para fornecer as forças equivalentes com a solução numérica no domínio da frequência de forma automática.

No presente trabalho adotou-se o espectro de Harris para descrever a turbulência longitudinal na solução numérica no domínio da frequência e na proposta de modificação do método discreto da NBR 6123; esta função de Harris não muda com a altura, o que facilita a implementação do método discreto. Propõe-se trabalhar com outros espectros de turbulência, especialmente o de Kaimal e Kármán, variáveis na altura, assim como a sua possível implementação na normativa brasileira.

Este trabalho tratou apenas da vibração em modos de flexão. Propõe-se estudar a aplicação dos métodos teóricos e a comparação em relação a resultados experimentais no caso de vibração em modos de torção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, NBR 6123/1988. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988. *NBR-6123 Forças devidas ao vento em edificações*. Rio de Janeiro.

BLESSMANN, J., 1983. *Aerodinâmica das construções*. 3.ed. UFRGS, Porto Alegre.

BLESSMANN, J., 1995. *O vento na engenharia estrutural*. 2.ed. UFRGS, Porto Alegre.

BLESSMANN, J., 1998. *Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento*. 2.ed. UFRGS. Porto Alegre.

CARDOSO Jr., S., 2011. *Edificações flexíveis sob ação dinâmica de vento turbulento*. Dissertação M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

CARVALHO, C., 2015. *Resposta dinâmica de edificações sob ação de vento turbulento*. Dissertação M.Sc., UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

CLOUGH, R.W.; PENZIEN, J., 1995. *Dynamics of Structures*. 3.ed. Computers & Structures, Inc. Berkeley.

DAVENPORT, A.G. 1961. *The application of statistical concepts to the wind loading of structures*. Proc. Institution of Civil Engineers, v19, Paper 6480, p.449-472.

DAVENPORT, A.G. 1963. *Gust loading factors*. ASCE, Journal of Structural Division, ST3, Paper 5255, p. 11-34, June1967.

DAVENPORT, A.G. 1967. *The buffeting of structures by gusts*. *Symposium N°16, Wind Effects on Buildings and Structures*. Teddington, Inglaterra, v.1, Paper 9, p.357-391.

DAVENPORT, A. WIND ENGINEERING GROUP, May 2007. *Wind Tunnel Testing: A General Outline*. The University of Western Ontario.

DEACON, E.L. 1955. *Gust variation with height up to 150 metres*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 81: 562–73.

DYRBYE, C., HANSEN, S.O., 1997. *Wind Loads on Structures*, John Wiley & Sons, England.

ESDU 7401, 1974. *Characteristics of atmospheric turbulence near the ground*. Part II, single point data for strong winds (neutral atmosphere). Engineering Sciences Data Unit, London.

EUROCODE 1, 2005. *Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions*. The European Standard EN 1991-1-4:2005+A1.

EUROCÓDIGO 1, 2010. *Ações em estruturas. Parte 1-4: Ações gerais. Ações do vento*. Norma Portuguesa EN 1991-1-4:2005+AC 2010.

FIU. International Hurricane Research Center, 2016 Disponível em: <https://wow.fiu.edu/about/technical-aspects-of-the-wall-of-wind/>. Acesso em: 30 1 2016.

FLAY, R.G.J., June 2015. *The gust factor approach to evaluate the along-wind response of structures to Wind excitation*. The University of Aucland.

GALINDEZ, E., 1979. *Resposta dinâmica de estruturas na direção da velocidade média do vento*. Dissertação M.Sc., UFRGS, Rio Grande do Sul, RS, Brasil.

GASCH, R. AND TWELE, J., 2011. *Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation*, second edition. Springer Heidelberg Dordrecht, Alemanha.

HARRIS, R.I., 1970. *The nature of the Wind*. The modern Design of wind Sensitive Structures. London, Construction Industry Research and Information Association. Paper 3, p. 29-55.

HOLMES, J.D., 2013. *Along-wind response of a generic tall building – comparison of consensus wind-tunnel data with codes and standards*. The 12th Americas Conference on Wind Engineering (12ACWE). Seattle, Washington, USA.

HOLMES, J.D. AND TSE, T., 2014. *International high-frequency base balance benchmark study*. Wind and Structures, Vol. 18, No. 4 (2014) 457-471

HOLMES, J.D., 2015. *Wind Loading of Structures*, Third edition. Taylor & JDH Consulting, Australia.

INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR WIND ENGINEERING (IAWE), 2009. *HFBB Benchmark study commences*. <http://www.iawe.org/>. Acesso em: 15 2 2015

INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR WIND ENGINEERING (IAWE), 2009. *Benchmark Buildings for an International HFBB Comparison*. <http://www.iawe.org/>. Acesso em: 15 2 2015

INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR WIND ENGINEERING (IAWE), 2012. *International HFBB Comparison Project - Building B Summary results*. <http://www.iawe.org/>. Acesso em: 15 2 2015

IRWIN, P.; DENOON, R. e SCOTT, D., 2013. *Wind tunnel Testing of Hig-Rise Buildings*. Council on Tall Buildings and Urban Habitat. Illinois Institute of Tecnology, Chicago.

KAREEM, A., ZHOU, Y., 2003. *Gust Loading fator – past, present and future*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics Vol. 91, pp.1301- 1328, Elsevier Ltd.

KOSS, H., 2014. Technical University of Denmark. Disponível em: <http://www.windengineering.byg.dtu.dk/Research/Wind-Tunnel-Testing>. Acesso em: 30 1 2016.

LOREDO-SOUZA, A.M., 1996. *The behavior of transmission lines under high winds*, Ph.D. Thesis, University of Western Ontario, London, Canada.

LOREDO-SOUZA, A.M.; DAVENPORT, A.G.; PALLUCH, M.J., 2005, *Determinação da resposta de torres de transmissão treliçadas à ação de vento*, Construção metálica: estudos e pesquisas recente, Editora UPF. Passo Fundo, RS, Brasil.

MARTÍN, P., 2014. *Acción del viento sobre edificios de hormigón armado*. Tesis de Magíster en Ingeniería Estructural. Montevideo, Uruguay, 2014.

MARTINSI, F.R.; GUARNIERI, R.A. E PEREIRA, E.B., 2008. *The wind energy resource. O aproveitamento da energia eólica*. Revista Brasileira de Ensino Física vol.30 no.1. São Paulo.

OLIVEIRA, M.G.K., 2009. *Desenvolvimento de uma balança dinâmica de três graus de liberdade para estudo dos efeitos de flexo-torção em edifícios altos submetidos à ação do vento*. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

PFEIL, M.S.; CARDOSO, D.; CONCEIÇÃO, R.; BATTISTA, R.C. 2012. *Edificações flexíveis sob a ação dinâmica de vento turbulento (Along-wind response of flexible tall structures)*. XXXV Jornadas Sul Americanas de Engenharia Estructural. Rio de Janeiro.

RIERA, J.; BLESSMANN, J., 1979. *Respuesta dinámica de estructuras en dirección del viento*. XX jornadas Sulamericanas de Engenharia Estructural, 20, Córdoba, Argentina.

SETHURAMAN, S., 1979. *Structure of Turbulence over Water during High Winds*. Appl. Meteorol., L8, 324-328.

SIMIUI, E. ; SCANLAN, R., 1996. *Wind Effects on Structures*. , 3rd Ed. John Wiley & Sons.

SFINTESCO, D. e WYATT, T. A., 1975. *A proposed european code practice: current work of the ECCS towards specification of the effect of wind on structures*. Proc. 4th International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures. Heathrow, England, p. 643-654.

SFINTESCO, D.; WYATT, T.A., 1977. *A proposed european code of practice: Current work of the ECCS towards specification of the effect of wind on structures*.

TARBUCK, E.J. LUTGENS, F.K., 2012. *Earth Science*. Pearson Education, thirteenth edition, Germany.

TSCHANZ, T. AND DAVENPORT, A.G., 1983. *The base balance technique for the determination of dynamic wind loads*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 13 (1983) 429-439. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam.

TSE, KIM., 2015. *Correspondencia privada*.

VICKERY, B.J., 1965. On the flow behind a coarse grid and its use as a model of atmospheric turbulence in studies related to wind loads on buildings. Teddington/England: National Physical Laboratory, NPL Aero Report 1143.

VICKERY, B.J., 1995. *The response of chimneys and tower-like structures to Wind loading*, A state of art in Wind Engineering, ed. P. Krishna, Wiley Eastern, New Delhi.

ZHOU, Y., KAREEM, A., Gu, M., 1999. *Gust loading factors for design applications*. Proceedings of the 10th ICWE, pp. 169-176, Copenhagen, Denmark.

ANEXO A

Novos ábacos do item 9. da NBR 6123/1988 para o cálculo do coeficiente de amplificação dinâmica ou fator dinâmico, ξ

No presente Anexo A são apresentados os novos ábacos para o item 9. da NBR 6123/1988 para as suas 5 categorias de terreno calculados com a metodologia descrita no item 6.1 para o método discreto modificado. Os dados constantes para o cálculo dos valores dos coeficientes de amplificação dinâmica ou fator dinâmico ξ são:

$$T=600s.$$

$$V_0 = 40m/s.$$

$$C_y = C_z = 10$$

$$C_{corr}(1\%)=1,29$$

$$C_{corr}(2\%)=1,23$$

Os valores presentes nas figuras são definidos por:

$$L=1800m$$

$$f_j = f_n \quad \text{Frequência natural da estrutura (Hz).}$$

$$h \quad \text{Altura da estrutura (m).}$$

$$L1 \quad \text{Largura da estrutura, dimensão horizontal perpendicular a direção do vento (m).}$$

$$\bar{V}_p \quad \text{Velocidade de projeto (m/s).}$$

EXEMPLO DE USO DAS TABELAS:

O exemplo aqui mostrado é aplicado ao prédio B (ver item 5.2.2) com o vento na direção X e taxa de amortecimento $\zeta = 0,016$ para Cat V e $V_0 = 50m/s$ ($T=3600s$). Será mostrado o procedimento com interpolação baseada nas tabelas, mesmo os ábacos podem ser também usados com uma porcentagem de erro maior por não ter dados de ξ para as alturas de 50 e 200 m.

Dados de entrada:

$$\bar{V}_p / f_j L = 34,5 / 0,23 * 1800 = 0,083$$

$$\frac{l_1}{h} = \frac{30}{180} = 0,17$$

$$\zeta = 0,016$$

Para $\bar{V}_p / f_j L = 0,083$ e $\zeta = 0,01$, tem-se:

$\bar{V}_p / f_j L$	ξ (180m)			
	ξ (100m)		ξ (200m)	
	L1/h=0	L1/h=0,2	L1/h=0,1	L1/h=0,4
0,085	6,10	5,63	4,97	4,28
0,081	5,98	5,50	4,87	4,20
0,083	6,05	5,565	4,92	4,24
	L1/h=0,17 5,638		L1/h=0,17 4,761	
	4,936			

Para $\bar{V}_p / f_j L = 0,083$ e $\zeta = 0,02$, tem-se:

$\bar{V}_p / f_j L$	ξ (180m)			
	ξ (100m)		ξ (200m)	
	L1/h=0	L1/h=0,2	L1/h=0,1	L1/h=0,4
0,085	4,91	4,62	4,17	3,75
0,081	4,85	4,56	4,12	3,71
0,083	4,88	4,59	4,145	3,73
	L1/h=0,17 4,634		L1/h=0,17 4,048	
	4,165			

Chega-se para $\zeta = 0,016$ a $\xi = 4,473$.

EXEMPLO DE USO DOS ÁBACOS:

O exemplo aqui mostrado é aplicado ao prédio B (ver item 5.2.2) com o vento na direção X e taxa de amortecimento $\zeta = 0,016$ para Cat V e $V_0 = 50m/s$ ($T=3600s$). Será mostrado o procedimento com interpolação baseada nos ábacos, mesmo as tabelas podem ser também usadas com uma porcentagem de erro menor por ter dados de ξ para as alturas de 50 e 200 m.

Dados de entrada:

$$\bar{V}_p / f_j L = 34,5 / 0,23 * 1800 = 0,083$$

$$\frac{l_1}{h} = \frac{30}{180} = 0,17$$

$$\zeta = 0,016$$

Para $\bar{V}_p / f_j L = 0,083$ e $\zeta = 0,01$, tem-se:

$\bar{V}_p / f_j L$	ξ (100m)		ξ (180m)		ξ (300m)	
	L1/h=0	L1/h=0,2			L1/h=0,1	L1/h=0,2
0,083	6,05	5,57			4,45	4,17
	L1/h=0,17 5,642				L1/h=0,17 4,254	
	5,087					

Para $\bar{V}_p / f_j L = 0,083$ e $\zeta = 0,02$, tem-se:

$\bar{V}_p / f_j L$	ξ (100m)		ξ (180m)		ξ (300m)	
	L1/h=0	L1/h=0,2			L1/h=0,1	L1/h=0,2
0,083	4,88	4,59			3,83	3,66
	L1/h=0,17 4,634				L1/h=0,17 3,711	
	4,265					

Chega-se para $\zeta = 0,016$ a $\xi = 4,594$.

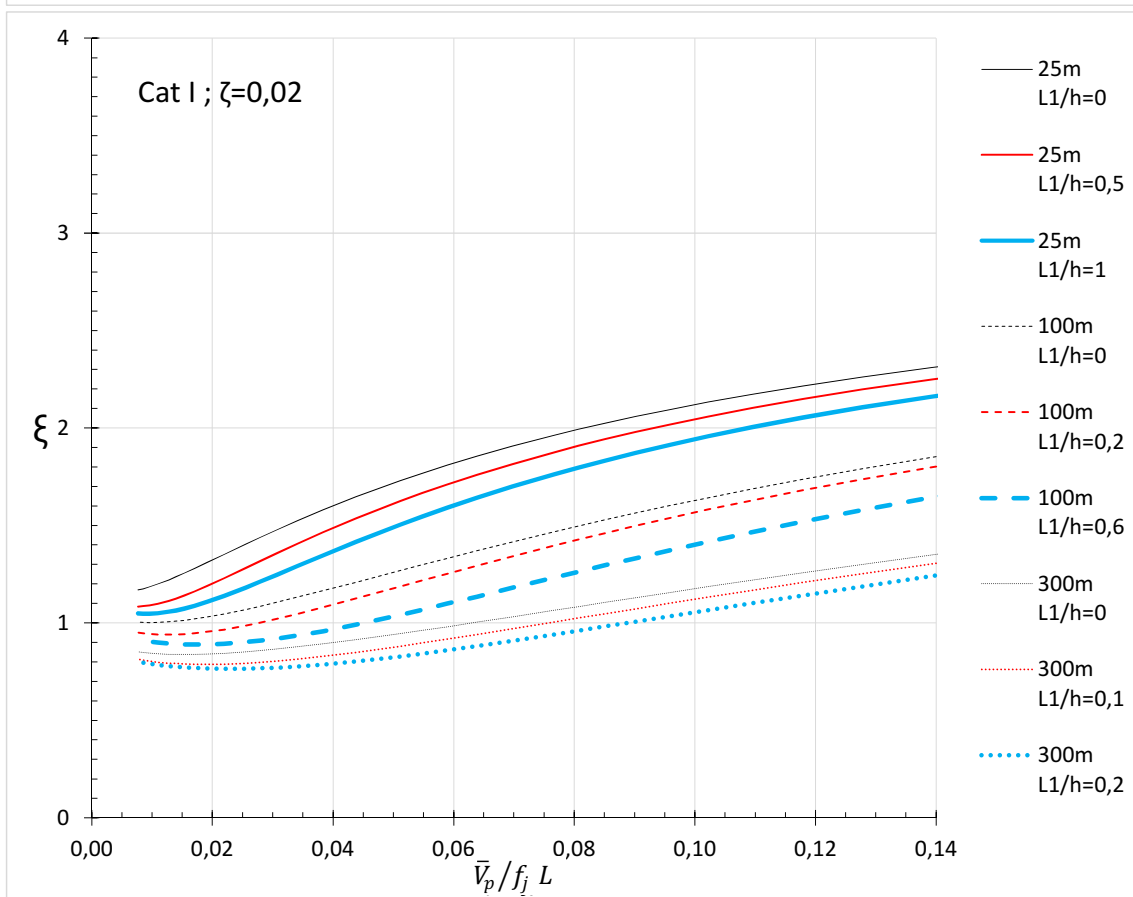
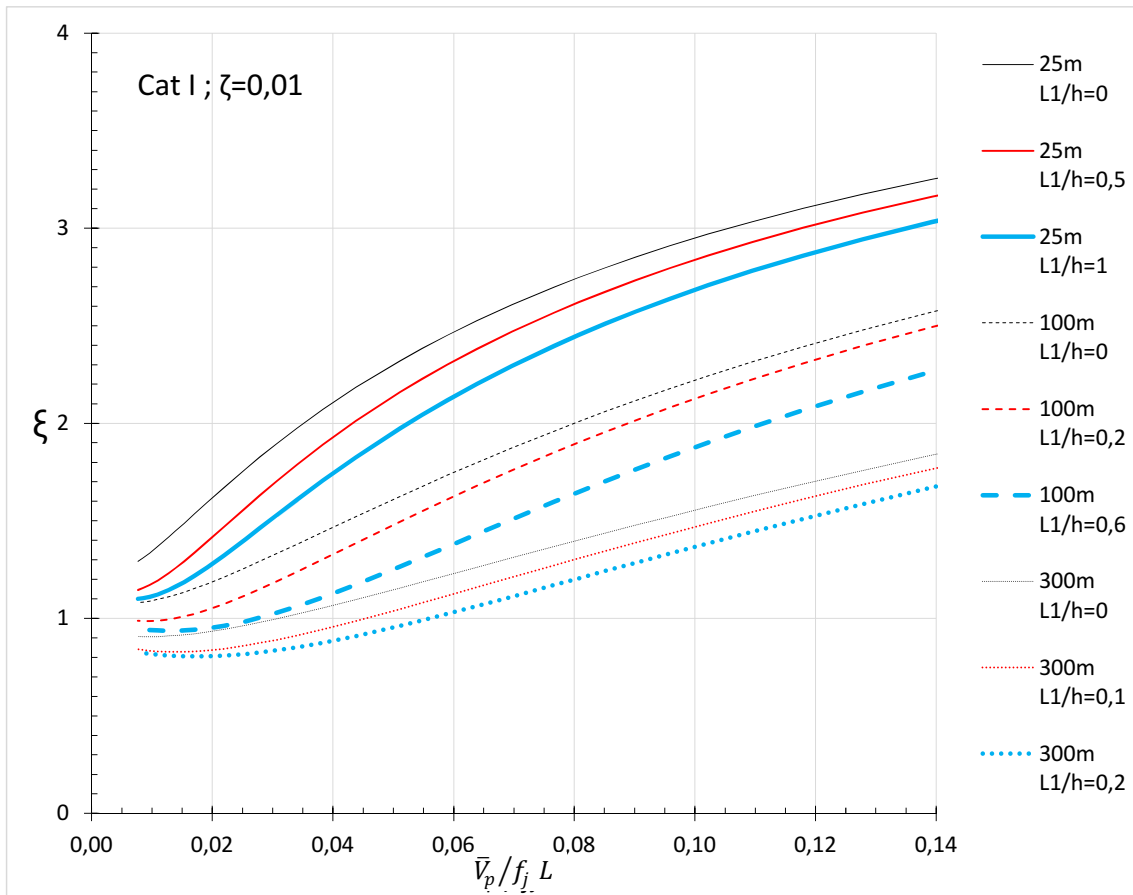


Figura A. 1 Coeficiente de amplificação dinâmica, ξ , para terreno de categoria I.

Tabela A.1 Coeficiente de amplificação dinâmica, ξ , para terreno de categoria I e taxa de amortecimento $\zeta=0,01$.

$\frac{\bar{V}_p}{f_j L}$	ξ (25m)			ξ (50m)			ξ (100m)			ξ (200m)			ξ (300m)		
	L1/h			L1/h			L1/h			L1/h			L1/h		
	0,0	0,5	≥ 1	0,0	0,3	$\geq 0,8$	0,0	0,2	$\geq 0,6$	0,0	0,1	$\geq 0,4$	0,0	0,1	$\geq 0,2$
0,153	3,33	3,25	3,13	3,06	2,99	2,80	2,67	2,60	2,38	2,20	2,16	1,93	1,93	1,86	1,77
0,139	3,25	3,16	3,03	2,97	2,89	2,69	2,57	2,49	2,27	2,11	2,06	1,82	1,84	1,77	1,67
0,128	3,17	3,08	2,94	2,88	2,80	2,59	2,48	2,40	2,16	2,02	1,96	1,72	1,76	1,68	1,59
0,118	3,10	3,00	2,86	2,80	2,71	2,50	2,39	2,31	2,07	1,94	1,88	1,64	1,69	1,61	1,51
0,110	3,03	2,93	2,78	2,73	2,63	2,42	2,31	2,22	1,98	1,87	1,81	1,56	1,63	1,55	1,44
0,102	2,97	2,86	2,71	2,65	2,56	2,33	2,24	2,15	1,90	1,81	1,74	1,50	1,57	1,49	1,38
0,096	2,91	2,79	2,64	2,59	2,49	2,26	2,18	2,08	1,83	1,75	1,69	1,44	1,52	1,43	1,33
0,090	2,85	2,73	2,57	2,53	2,42	2,19	2,12	2,02	1,76	1,70	1,63	1,38	1,48	1,39	1,28
0,085	2,80	2,67	2,51	2,47	2,36	2,13	2,06	1,96	1,70	1,65	1,58	1,33	1,44	1,35	1,24
0,081	2,75	2,62	2,45	2,41	2,30	2,06	2,01	1,90	1,65	1,61	1,54	1,29	1,40	1,31	1,20
0,077	2,70	2,57	2,40	2,36	2,25	2,01	1,96	1,85	1,60	1,57	1,50	1,25	1,37	1,27	1,17
0,070	2,61	2,47	2,29	2,27	2,15	1,91	1,87	1,76	1,51	1,50	1,42	1,19	1,31	1,21	1,11
0,064	2,53	2,38	2,20	2,19	2,06	1,82	1,80	1,68	1,43	1,44	1,36	1,13	1,26	1,16	1,06
0,059	2,45	2,30	2,12	2,11	1,98	1,74	1,73	1,61	1,37	1,39	1,31	1,09	1,22	1,12	1,02
0,055	2,38	2,23	2,04	2,04	1,91	1,66	1,68	1,55	1,31	1,35	1,26	1,05	1,19	1,08	0,99
0,051	2,32	2,16	1,97	1,98	1,84	1,60	1,63	1,49	1,26	1,31	1,22	1,02	1,16	1,05	0,96
0,044	2,18	2,01	1,83	1,86	1,71	1,47	1,52	1,39	1,17	1,24	1,14	0,96	1,10	0,99	0,91
0,038	2,07	1,89	1,71	1,75	1,60	1,38	1,44	1,30	1,11	1,18	1,09	0,92	1,05	0,94	0,87
0,034	1,98	1,79	1,61	1,67	1,51	1,30	1,38	1,24	1,06	1,14	1,04	0,89	1,02	0,91	0,85
0,031	1,90	1,70	1,53	1,61	1,44	1,24	1,33	1,19	1,03	1,11	1,01	0,88	1,00	0,89	0,84
0,028	1,83	1,63	1,46	1,55	1,38	1,20	1,29	1,15	1,00	1,09	0,99	0,87	0,98	0,87	0,82
0,026	1,77	1,57	1,41	1,50	1,34	1,16	1,26	1,12	0,98	1,07	0,97	0,86	0,96	0,86	0,82
0,022	1,67	1,47	1,32	1,43	1,26	1,11	1,21	1,07	0,96	1,04	0,94	0,85	0,94	0,84	0,81
0,019	1,59	1,39	1,26	1,38	1,21	1,08	1,18	1,04	0,95	1,02	0,92	0,84	0,93	0,84	0,81
0,017	1,53	1,34	1,22	1,34	1,17	1,06	1,15	1,02	0,94	1,00	0,91	0,84	0,92	0,83	0,80
0,015	1,49	1,29	1,19	1,31	1,15	1,05	1,13	1,01	0,94	0,99	0,91	0,84	0,92	0,83	0,81
0,014	1,45	1,26	1,16	1,28	1,13	1,04	1,12	1,00	0,94	0,99	0,90	0,85	0,91	0,83	0,81
0,013	1,42	1,23	1,14	1,26	1,11	1,03	1,11	0,99	0,94	0,98	0,90	0,85	0,91	0,83	0,81
0,011	1,37	1,19	1,12	1,24	1,09	1,03	1,10	0,99	0,94	0,98	0,90	0,85	0,91	0,83	0,81
0,010	1,33	1,17	1,11	1,22	1,08	1,02	1,09	0,99	0,94	0,98	0,90	0,86	0,91	0,83	0,82
0,009	1,31	1,15	1,10	1,21	1,08	1,03	1,08	0,99	0,94	0,97	0,90	0,86	0,91	0,84	0,82
0,008	1,29	1,15	1,10	1,20	1,07	1,03	1,08	0,99	0,95	0,97	0,90	0,87	0,91	0,84	0,83

Tabela A. 2 Coeficiente de amplificação dinâmica, ξ , para terreno de categoria I e taxa de amortecimento $\zeta=0,02$.

$\frac{\bar{V}_p}{f_j L}$	ξ (25m)			ξ (50m)			ξ (100m)			ξ (200m)			ξ (300m)		
	L1/h			L1/h			L1/h			L1/h			L1/h		
	0,0	0,5	≥ 1	0,0	0,3	$\geq 0,8$	0,0	0,2	$\geq 0,6$	0,0	0,1	$\geq 0,4$	0,0	0,1	$\geq 0,2$
0,153	2,36	2,30	2,22	2,18	2,13	2,00	1,91	1,87	1,72	1,60	1,56	1,41	1,40	1,36	1,30
0,139	2,31	2,25	2,16	2,12	2,07	1,93	1,85	1,80	1,65	1,53	1,50	1,34	1,35	1,30	1,24
0,128	2,26	2,20	2,11	2,06	2,01	1,87	1,79	1,74	1,58	1,48	1,44	1,28	1,30	1,25	1,19
0,118	2,22	2,15	2,05	2,01	1,95	1,81	1,74	1,68	1,52	1,43	1,39	1,23	1,26	1,21	1,14
0,110	2,17	2,10	2,00	1,97	1,90	1,76	1,69	1,63	1,47	1,39	1,35	1,19	1,22	1,17	1,10
0,102	2,13	2,06	1,96	1,92	1,86	1,71	1,64	1,58	1,42	1,35	1,31	1,14	1,19	1,13	1,07
0,096	2,09	2,02	1,91	1,88	1,81	1,66	1,60	1,54	1,37	1,31	1,27	1,11	1,16	1,10	1,03
0,090	2,06	1,98	1,87	1,84	1,77	1,62	1,56	1,50	1,33	1,28	1,24	1,08	1,13	1,07	1,01
0,085	2,02	1,94	1,83	1,80	1,73	1,58	1,53	1,46	1,30	1,25	1,21	1,05	1,11	1,05	0,98
0,081	1,99	1,91	1,80	1,77	1,70	1,54	1,50	1,43	1,26	1,23	1,18	1,02	1,08	1,02	0,96
0,077	1,96	1,88	1,76	1,74	1,66	1,50	1,47	1,40	1,23	1,20	1,16	1,00	1,06	1,00	0,94
0,070	1,91	1,81	1,70	1,68	1,60	1,44	1,42	1,34	1,18	1,16	1,11	0,96	1,03	0,97	0,91
0,064	1,86	1,76	1,64	1,63	1,55	1,39	1,37	1,29	1,14	1,13	1,08	0,93	1,00	0,94	0,88
0,059	1,81	1,71	1,59	1,58	1,50	1,34	1,33	1,25	1,10	1,10	1,05	0,91	0,98	0,92	0,86
0,055	1,77	1,67	1,55	1,54	1,46	1,30	1,30	1,22	1,07	1,08	1,02	0,89	0,96	0,90	0,84
0,051	1,73	1,62	1,50	1,51	1,42	1,26	1,27	1,19	1,04	1,06	1,00	0,87	0,95	0,88	0,83
0,044	1,65	1,54	1,42	1,43	1,34	1,19	1,21	1,12	0,99	1,01	0,96	0,84	0,91	0,85	0,80
0,038	1,58	1,46	1,35	1,37	1,28	1,13	1,16	1,08	0,96	0,99	0,93	0,83	0,89	0,83	0,79
0,034	1,52	1,41	1,29	1,33	1,23	1,09	1,13	1,05	0,93	0,97	0,91	0,81	0,88	0,81	0,78
0,031	1,48	1,36	1,25	1,29	1,19	1,06	1,11	1,02	0,92	0,95	0,89	0,81	0,87	0,80	0,77
0,028	1,44	1,32	1,21	1,26	1,16	1,04	1,08	1,00	0,91	0,94	0,88	0,80	0,86	0,80	0,77
0,026	1,40	1,28	1,18	1,23	1,13	1,02	1,07	0,99	0,90	0,93	0,87	0,80	0,85	0,79	0,77
0,022	1,35	1,23	1,14	1,19	1,10	1,00	1,05	0,97	0,89	0,92	0,86	0,80	0,84	0,79	0,76
0,019	1,31	1,19	1,11	1,17	1,07	0,99	1,03	0,95	0,89	0,91	0,86	0,80	0,84	0,79	0,77
0,017	1,28	1,16	1,09	1,15	1,05	0,98	1,02	0,95	0,89	0,91	0,85	0,81	0,84	0,79	0,77
0,015	1,26	1,14	1,07	1,13	1,04	0,98	1,01	0,94	0,89	0,90	0,85	0,81	0,84	0,79	0,77
0,014	1,24	1,12	1,06	1,12	1,03	0,97	1,01	0,94	0,89	0,90	0,85	0,81	0,84	0,79	0,78
0,013	1,22	1,11	1,06	1,12	1,03	0,97	1,01	0,94	0,89	0,90	0,86	0,81	0,84	0,79	0,78
0,011	1,20	1,10	1,05	1,11	1,02	0,97	1,00	0,94	0,90	0,90	0,86	0,82	0,84	0,80	0,78
0,010	1,18	1,09	1,05	1,10	1,02	0,98	1,00	0,94	0,90	0,91	0,86	0,83	0,84	0,80	0,79
0,009	1,17	1,09	1,05	1,10	1,02	0,98	1,00	0,95	0,91	0,91	0,87	0,83	0,85	0,81	0,80
0,008	1,17	1,08	1,05	1,10	1,02	0,99	1,00	0,95	0,91	0,91	0,87	0,84	0,85	0,81	0,80

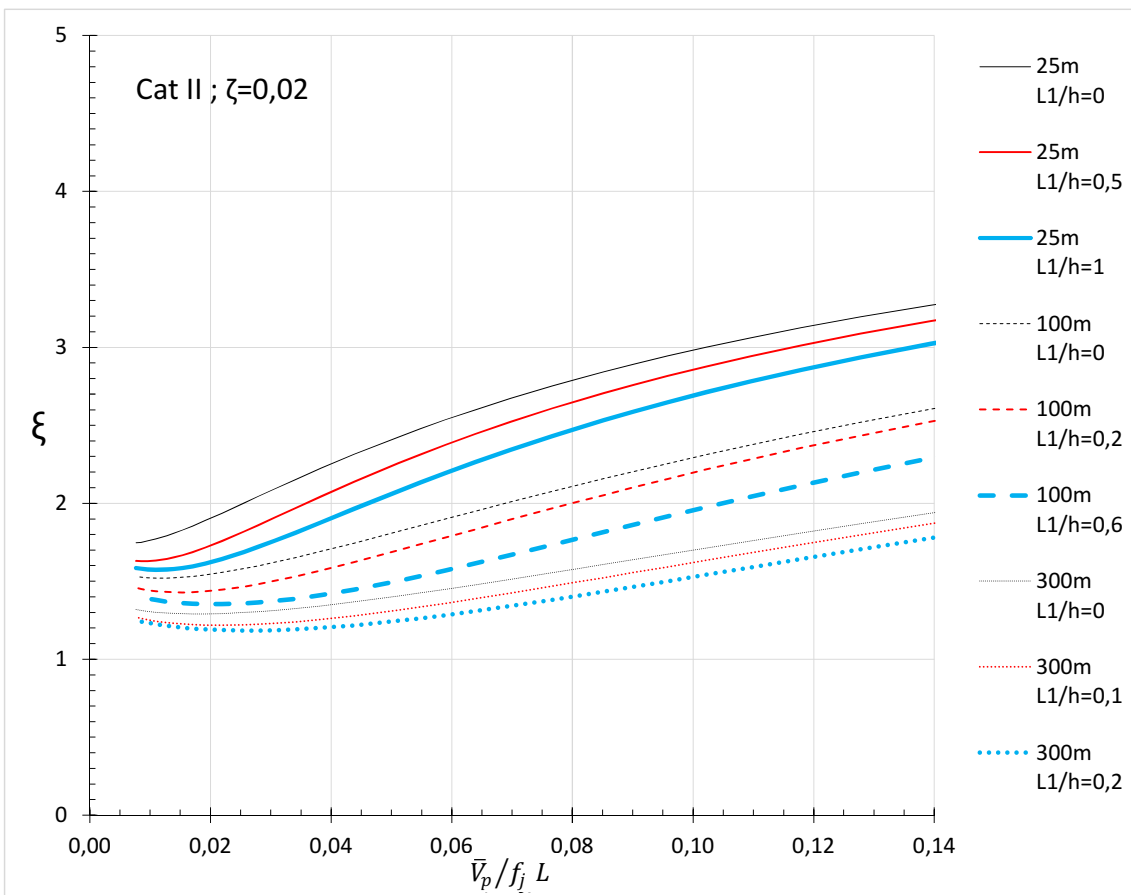
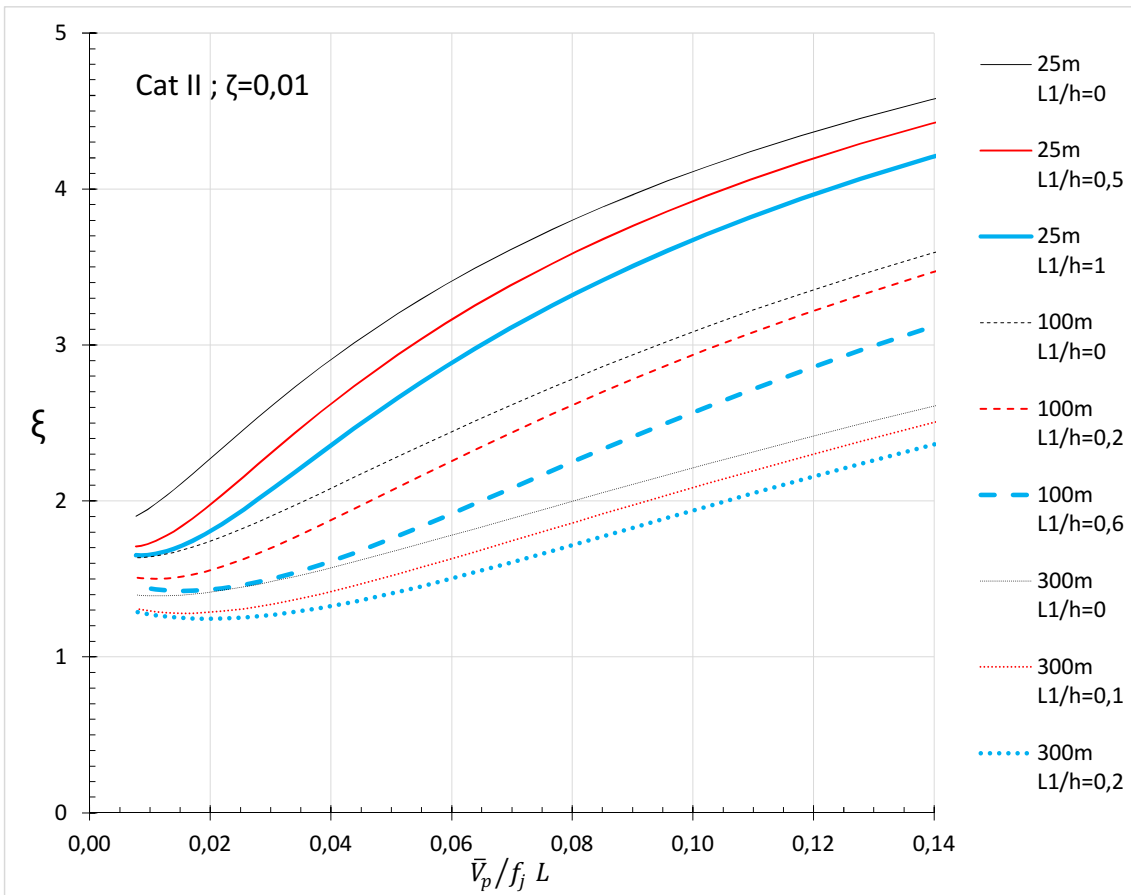


Figura A. 2 Coeficiente de amplificação dinâmica, ξ , para terreno de categoria II.

Tabela A. 3 Coeficiente de amplificação dinâmica, ξ , para terreno de categoria II e taxa de amortecimento $\zeta=0,01$.

$\frac{\bar{V}_p}{f_j L}$	ξ (25m)			ξ (50m)			ξ (100m)			ξ (200m)			ξ (300m)		
	L1/h			L1/h			L1/h			L1/h			L1/h		
	0,0	0,5	≥ 1	0,0	0,3	$\geq 0,8$	0,0	0,2	$\geq 0,6$	0,0	0,1	$\geq 0,4$	0,0	0,1	$\geq 0,2$
0,153	4,70	4,56	4,35	4,29	4,17	3,87	3,73	3,62	3,28	3,10	3,02	2,68	2,73	2,63	2,49
0,139	4,57	4,42	4,20	4,15	4,02	3,71	3,58	3,46	3,11	2,96	2,88	2,53	2,60	2,50	2,36
0,128	4,45	4,29	4,07	4,02	3,88	3,56	3,45	3,32	2,96	2,84	2,75	2,40	2,49	2,38	2,24
0,118	4,34	4,17	3,94	3,90	3,75	3,42	3,33	3,19	2,83	2,73	2,64	2,28	2,40	2,28	2,13
0,110	4,24	4,06	3,82	3,79	3,63	3,29	3,22	3,08	2,71	2,63	2,54	2,18	2,31	2,19	2,04
0,102	4,14	3,96	3,71	3,68	3,53	3,18	3,12	2,97	2,60	2,54	2,45	2,09	2,24	2,11	1,96
0,096	4,05	3,86	3,61	3,59	3,42	3,07	3,02	2,87	2,50	2,47	2,37	2,01	2,17	2,04	1,89
0,090	3,97	3,77	3,51	3,50	3,33	2,97	2,94	2,78	2,41	2,40	2,29	1,94	2,11	1,98	1,83
0,085	3,89	3,68	3,42	3,42	3,24	2,88	2,86	2,70	2,33	2,33	2,23	1,88	2,05	1,92	1,77
0,081	3,81	3,60	3,33	3,34	3,16	2,80	2,79	2,63	2,26	2,28	2,17	1,82	2,01	1,87	1,72
0,077	3,74	3,52	3,25	3,27	3,08	2,72	2,73	2,56	2,19	2,22	2,11	1,77	1,96	1,82	1,68
0,070	3,61	3,38	3,11	3,14	2,94	2,58	2,61	2,43	2,08	2,13	2,01	1,69	1,89	1,74	1,60
0,064	3,49	3,25	2,98	3,02	2,82	2,46	2,51	2,33	1,98	2,06	1,93	1,62	1,82	1,67	1,54
0,059	3,39	3,14	2,86	2,92	2,71	2,36	2,42	2,24	1,90	1,99	1,86	1,56	1,77	1,62	1,49
0,055	3,29	3,03	2,76	2,83	2,61	2,26	2,35	2,16	1,83	1,93	1,81	1,52	1,72	1,57	1,45
0,051	3,20	2,94	2,66	2,75	2,53	2,18	2,28	2,09	1,77	1,89	1,75	1,48	1,68	1,53	1,42
0,044	3,01	2,74	2,46	2,58	2,35	2,02	2,15	1,95	1,67	1,79	1,66	1,41	1,61	1,46	1,35
0,038	2,86	2,57	2,31	2,45	2,21	1,91	2,05	1,84	1,59	1,72	1,59	1,37	1,56	1,40	1,31
0,034	2,73	2,44	2,19	2,34	2,10	1,82	1,97	1,77	1,54	1,67	1,53	1,34	1,52	1,37	1,29
0,031	2,63	2,33	2,09	2,26	2,01	1,76	1,91	1,71	1,50	1,63	1,49	1,32	1,49	1,34	1,27
0,028	2,54	2,23	2,01	2,19	1,94	1,71	1,87	1,66	1,48	1,60	1,47	1,31	1,47	1,32	1,26
0,026	2,46	2,16	1,95	2,13	1,89	1,67	1,83	1,63	1,46	1,58	1,44	1,31	1,45	1,31	1,25
0,022	2,34	2,04	1,85	2,05	1,80	1,62	1,77	1,58	1,44	1,55	1,41	1,30	1,42	1,29	1,25
0,019	2,24	1,95	1,79	1,98	1,74	1,59	1,73	1,55	1,43	1,53	1,40	1,30	1,41	1,28	1,25
0,017	2,17	1,89	1,74	1,94	1,71	1,57	1,70	1,53	1,42	1,51	1,39	1,30	1,40	1,28	1,25
0,015	2,12	1,84	1,71	1,90	1,68	1,56	1,68	1,51	1,42	1,50	1,38	1,30	1,40	1,28	1,25
0,014	2,07	1,80	1,69	1,88	1,66	1,55	1,67	1,51	1,42	1,50	1,38	1,31	1,39	1,28	1,25
0,013	2,04	1,78	1,68	1,86	1,65	1,55	1,66	1,50	1,43	1,49	1,38	1,31	1,39	1,28	1,26
0,011	1,98	1,74	1,66	1,83	1,63	1,55	1,65	1,50	1,43	1,49	1,38	1,32	1,39	1,29	1,27
0,010	1,95	1,72	1,65	1,81	1,62	1,55	1,64	1,50	1,44	1,49	1,38	1,33	1,39	1,30	1,28
0,009	1,92	1,71	1,65	1,80	1,62	1,56	1,64	1,51	1,45	1,49	1,39	1,34	1,39	1,30	1,28
0,008	1,90	1,71	1,65	1,79	1,62	1,56	1,64	1,51	1,45	1,49	1,40	1,34	1,40	1,31	1,29

Tabela A. 4 Coeficiente de amplificação dinâmica, ξ , para terreno de categoria II e taxa de amortecimento $\zeta=0,02$.

$\frac{\bar{V}_p}{f_j L}$	ξ (25m)			ξ (50m)			ξ (100m)			ξ (200m)			ξ (300m)		
	L1/h			L1/h			L1/h			L1/h			L1/h		
	0,0	0,5	≥ 1	0,0	0,3	$\geq 0,8$	0,0	0,2	$\geq 0,6$	0,0	0,1	$\geq 0,4$	0,0	0,1	$\geq 0,2$
0,153	3,35	3,25	3,12	3,08	2,99	2,79	2,70	2,62	2,40	2,27	2,22	1,99	2,01	1,95	1,86
0,139	3,27	3,17	3,02	2,99	2,90	2,69	2,60	2,52	2,29	2,18	2,13	1,90	1,94	1,87	1,78
0,128	3,20	3,09	2,94	2,90	2,81	2,60	2,52	2,43	2,20	2,10	2,05	1,82	1,87	1,80	1,70
0,118	3,13	3,01	2,86	2,83	2,73	2,51	2,44	2,35	2,12	2,04	1,98	1,75	1,81	1,74	1,64
0,110	3,06	2,94	2,78	2,76	2,66	2,43	2,37	2,28	2,04	1,98	1,92	1,69	1,76	1,68	1,59
0,102	3,00	2,88	2,71	2,69	2,59	2,36	2,31	2,22	1,98	1,93	1,86	1,63	1,71	1,63	1,54
0,096	2,95	2,82	2,65	2,63	2,53	2,29	2,26	2,16	1,92	1,88	1,81	1,59	1,67	1,59	1,50
0,090	2,89	2,76	2,59	2,58	2,47	2,23	2,21	2,10	1,86	1,84	1,77	1,55	1,64	1,56	1,46
0,085	2,84	2,71	2,53	2,53	2,41	2,18	2,16	2,05	1,82	1,80	1,73	1,51	1,61	1,52	1,43
0,081	2,80	2,66	2,48	2,48	2,36	2,13	2,12	2,01	1,77	1,77	1,70	1,48	1,58	1,49	1,41
0,077	2,75	2,61	2,43	2,44	2,32	2,08	2,08	1,97	1,73	1,74	1,67	1,45	1,56	1,47	1,38
0,070	2,67	2,52	2,34	2,36	2,23	2,00	2,01	1,89	1,67	1,68	1,61	1,40	1,51	1,42	1,34
0,064	2,60	2,44	2,26	2,29	2,16	1,93	1,95	1,83	1,61	1,64	1,57	1,37	1,48	1,39	1,31
0,059	2,54	2,38	2,19	2,23	2,09	1,87	1,90	1,78	1,57	1,60	1,53	1,34	1,45	1,36	1,28
0,055	2,48	2,31	2,13	2,17	2,04	1,81	1,86	1,74	1,53	1,57	1,50	1,32	1,43	1,34	1,26
0,051	2,43	2,26	2,08	2,13	1,99	1,77	1,82	1,70	1,50	1,55	1,47	1,30	1,41	1,32	1,25
0,044	2,31	2,14	1,96	2,03	1,89	1,68	1,75	1,62	1,45	1,50	1,42	1,27	1,37	1,28	1,22
0,038	2,22	2,04	1,88	1,96	1,81	1,62	1,69	1,57	1,41	1,46	1,38	1,25	1,34	1,26	1,20
0,034	2,15	1,97	1,81	1,90	1,75	1,58	1,65	1,53	1,39	1,44	1,36	1,24	1,33	1,24	1,19
0,031	2,09	1,91	1,76	1,85	1,71	1,55	1,62	1,50	1,37	1,42	1,34	1,23	1,31	1,23	1,19
0,028	2,04	1,86	1,72	1,82	1,67	1,52	1,60	1,48	1,36	1,41	1,33	1,23	1,30	1,22	1,18
0,026	2,00	1,82	1,69	1,79	1,64	1,51	1,58	1,47	1,36	1,40	1,32	1,23	1,30	1,22	1,18
0,022	1,94	1,76	1,64	1,75	1,60	1,49	1,56	1,45	1,35	1,39	1,32	1,24	1,29	1,22	1,19
0,019	1,89	1,72	1,61	1,72	1,58	1,48	1,54	1,44	1,35	1,38	1,31	1,24	1,29	1,22	1,19
0,017	1,85	1,69	1,60	1,70	1,56	1,47	1,53	1,43	1,36	1,38	1,31	1,25	1,29	1,22	1,20
0,015	1,83	1,67	1,59	1,68	1,55	1,47	1,53	1,43	1,36	1,38	1,31	1,25	1,29	1,23	1,20
0,014	1,81	1,65	1,58	1,67	1,55	1,47	1,52	1,43	1,36	1,38	1,32	1,26	1,29	1,23	1,21
0,013	1,79	1,64	1,58	1,66	1,55	1,47	1,52	1,43	1,37	1,38	1,32	1,26	1,30	1,24	1,21
0,011	1,77	1,63	1,57	1,66	1,54	1,48	1,52	1,44	1,38	1,39	1,33	1,27	1,30	1,24	1,22
0,010	1,76	1,63	1,58	1,65	1,55	1,49	1,52	1,44	1,39	1,39	1,33	1,28	1,31	1,25	1,23
0,009	1,75	1,63	1,58	1,65	1,55	1,50	1,53	1,45	1,40	1,40	1,34	1,29	1,31	1,26	1,24
0,008	1,75	1,63	1,59	1,65	1,56	1,50	1,53	1,46	1,41	1,40	1,35	1,30	1,32	1,27	1,25

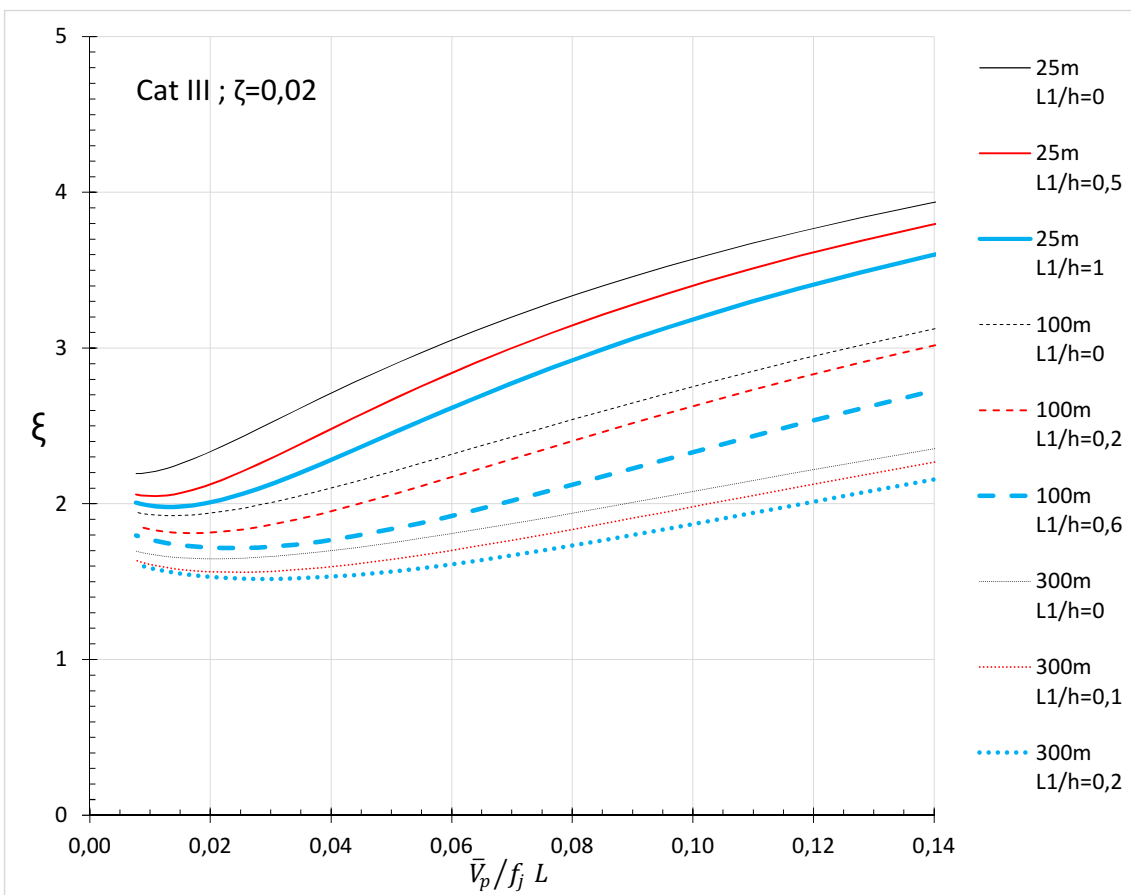
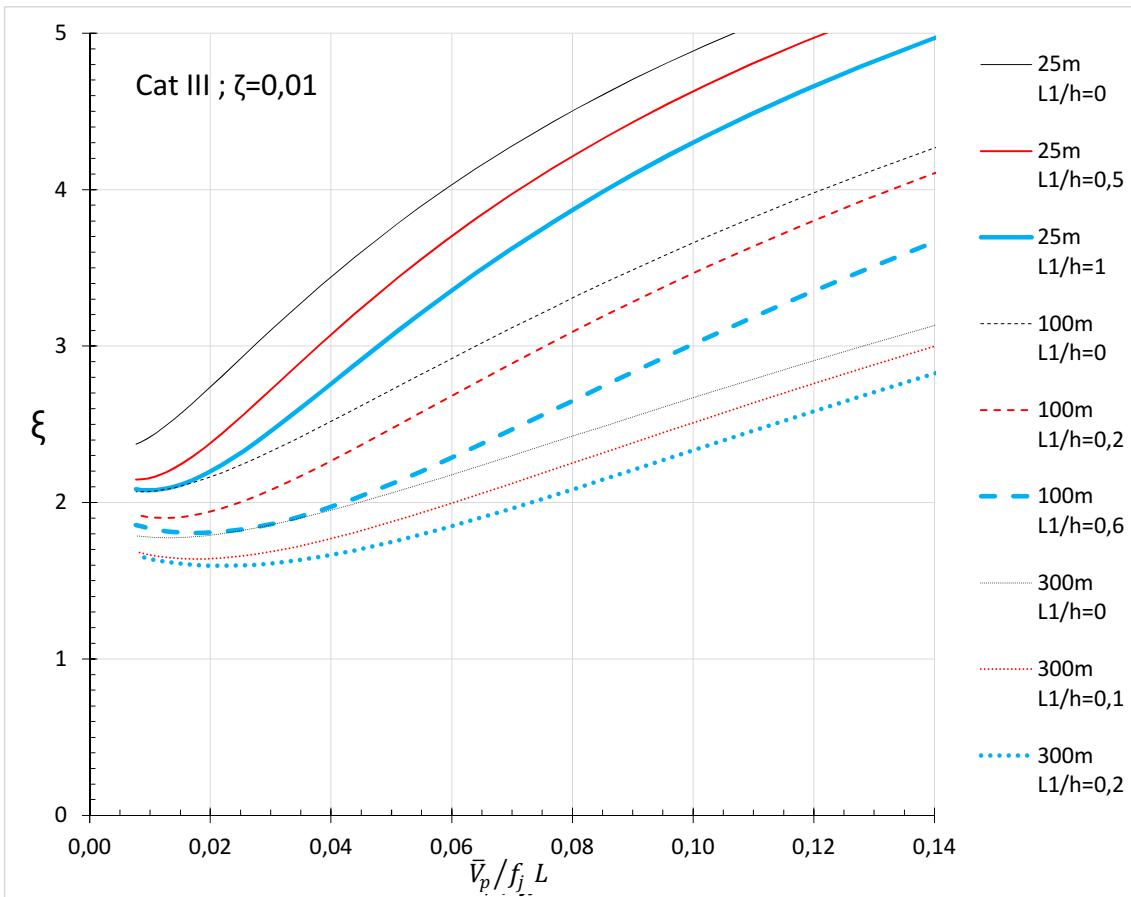


Figura A. 3 Coeficiente de amplificação dinâmica, ξ , para terreno de categoria III.

Tabela A. 5 Coeficiente de amplificação dinâmica, ξ , para terreno de categoria III e taxa de amortecimento $\zeta=0,01$.

$\frac{\bar{V}_p}{f_j L}$	ξ (25m)			ξ (50m)			ξ (100m)			ξ (200m)			ξ (300m)		
	L1/h			L1/h			L1/h			L1/h			L1/h		
	0,0	0,5	≥ 1	0,0	0,3	$\geq 0,8$	0,0	0,2	$\geq 0,6$	0,0	0,1	$\geq 0,4$	0,0	0,1	$\geq 0,2$
0,153	5,63	5,43	5,15	5,11	4,95	4,55	4,44	4,29	3,86	3,70	3,60	3,18	3,28	3,15	2,98
0,139	5,46	5,25	4,96	4,94	4,76	4,35	4,26	4,10	3,66	3,53	3,43	3,00	3,13	2,99	2,82
0,128	5,31	5,09	4,79	4,77	4,59	4,17	4,09	3,92	3,48	3,39	3,28	2,84	3,00	2,85	2,68
0,118	5,17	4,94	4,63	4,62	4,43	4,00	3,95	3,77	3,32	3,26	3,14	2,71	2,88	2,74	2,56
0,110	5,04	4,80	4,48	4,49	4,28	3,85	3,82	3,63	3,18	3,15	3,03	2,59	2,78	2,63	2,45
0,102	4,92	4,67	4,34	4,36	4,15	3,71	3,70	3,50	3,05	3,05	2,92	2,49	2,70	2,54	2,36
0,096	4,81	4,55	4,22	4,25	4,03	3,58	3,59	3,39	2,94	2,96	2,83	2,40	2,62	2,46	2,28
0,090	4,71	4,44	4,10	4,14	3,91	3,47	3,49	3,29	2,84	2,88	2,74	2,32	2,55	2,38	2,21
0,085	4,61	4,33	3,99	4,04	3,81	3,36	3,40	3,19	2,75	2,80	2,67	2,25	2,49	2,32	2,15
0,081	4,52	4,23	3,89	3,95	3,71	3,26	3,32	3,10	2,66	2,74	2,60	2,19	2,43	2,26	2,09
0,077	4,43	4,14	3,79	3,87	3,62	3,17	3,24	3,02	2,59	2,68	2,53	2,13	2,38	2,21	2,04
0,070	4,27	3,96	3,62	3,71	3,46	3,01	3,11	2,88	2,46	2,57	2,43	2,04	2,30	2,12	1,96
0,064	4,13	3,81	3,46	3,58	3,31	2,88	3,00	2,76	2,36	2,49	2,33	1,97	2,22	2,04	1,89
0,059	4,00	3,67	3,33	3,46	3,19	2,76	2,90	2,66	2,27	2,42	2,26	1,91	2,17	1,98	1,84
0,055	3,89	3,55	3,21	3,36	3,08	2,66	2,82	2,57	2,20	2,35	2,19	1,86	2,12	1,93	1,79
0,051	3,79	3,44	3,10	3,26	2,98	2,57	2,74	2,49	2,14	2,30	2,14	1,82	2,07	1,89	1,76
0,044	3,57	3,20	2,88	3,07	2,78	2,40	2,59	2,34	2,02	2,20	2,03	1,75	1,99	1,81	1,69
0,038	3,39	3,02	2,71	2,93	2,62	2,28	2,49	2,23	1,95	2,12	1,96	1,71	1,93	1,75	1,65
0,034	3,24	2,87	2,58	2,81	2,51	2,19	2,40	2,15	1,90	2,07	1,90	1,69	1,89	1,72	1,63
0,031	3,12	2,74	2,47	2,72	2,41	2,13	2,34	2,09	1,87	2,03	1,86	1,67	1,86	1,69	1,61
0,028	3,02	2,65	2,39	2,65	2,34	2,08	2,29	2,04	1,85	2,00	1,83	1,66	1,84	1,67	1,60
0,026	2,94	2,56	2,33	2,59	2,28	2,05	2,25	2,01	1,83	1,97	1,81	1,66	1,82	1,66	1,60
0,022	2,81	2,44	2,24	2,50	2,20	2,00	2,19	1,96	1,81	1,94	1,78	1,66	1,80	1,65	1,60
0,019	2,71	2,35	2,18	2,43	2,15	1,98	2,15	1,93	1,81	1,92	1,77	1,66	1,79	1,64	1,60
0,017	2,63	2,29	2,14	2,38	2,11	1,96	2,13	1,92	1,81	1,91	1,76	1,66	1,78	1,64	1,60
0,015	2,58	2,25	2,12	2,35	2,09	1,96	2,11	1,91	1,81	1,90	1,76	1,67	1,78	1,64	1,61
0,014	2,53	2,22	2,10	2,33	2,07	1,95	2,09	1,90	1,81	1,90	1,76	1,68	1,77	1,64	1,61
0,013	2,50	2,20	2,09	2,31	2,06	1,95	2,08	1,90	1,82	1,89	1,76	1,68	1,77	1,65	1,62
0,011	2,44	2,17	2,08	2,28	2,05	1,96	2,07	1,90	1,83	1,89	1,77	1,69	1,78	1,66	1,63
0,010	2,41	2,15	2,08	2,27	2,05	1,97	2,07	1,91	1,84	1,89	1,77	1,71	1,78	1,67	1,64
0,009	2,39	2,15	2,08	2,26	2,05	1,97	2,07	1,92	1,85	1,90	1,78	1,72	1,78	1,68	1,65
0,008	2,37	2,15	2,09	2,25	2,05	1,98	2,07	1,92	1,86	1,90	1,79	1,73	1,79	1,69	1,66

Tabela A. 6 Coeficiente de amplificação dinâmica, ξ , para terreno de categoria III e taxa de amortecimento $\zeta=0,02$.

$\frac{\bar{V}_p}{f_j L}$	ξ (25m)			ξ (50m)			ξ (100m)			ξ (200m)			ξ (300m)		
	L1/h			L1/h			L1/h			L1/h			L1/h		
	0,0	0,5	≥ 1	0,0	0,3	$\geq 0,8$	0,0	0,2	$\geq 0,6$	0,0	0,1	$\geq 0,4$	0,0	0,1	$\geq 0,2$
0,153	4,03	3,90	3,71	3,69	3,58	3,31	3,23	3,13	2,85	2,73	2,67	2,39	2,44	2,36	2,25
0,139	3,93	3,79	3,59	3,58	3,46	3,19	3,12	3,01	2,72	2,63	2,56	2,28	2,35	2,26	2,15
0,128	3,84	3,69	3,49	3,47	3,35	3,07	3,02	2,91	2,61	2,54	2,47	2,19	2,27	2,18	2,07
0,118	3,75	3,59	3,39	3,38	3,25	2,97	2,93	2,81	2,52	2,46	2,39	2,11	2,20	2,11	2,00
0,110	3,67	3,51	3,30	3,30	3,16	2,88	2,85	2,73	2,43	2,39	2,32	2,04	2,15	2,05	1,94
0,102	3,60	3,43	3,21	3,22	3,08	2,79	2,77	2,65	2,35	2,33	2,25	1,98	2,09	2,00	1,89
0,096	3,53	3,35	3,13	3,15	3,01	2,71	2,71	2,58	2,29	2,28	2,20	1,93	2,05	1,95	1,84
0,090	3,46	3,28	3,06	3,08	2,94	2,64	2,65	2,52	2,23	2,23	2,15	1,88	2,01	1,91	1,80
0,085	3,40	3,22	2,99	3,02	2,87	2,58	2,60	2,46	2,18	2,19	2,11	1,84	1,98	1,87	1,77
0,081	3,35	3,16	2,93	2,97	2,81	2,52	2,55	2,41	2,13	2,15	2,07	1,81	1,94	1,84	1,74
0,077	3,29	3,10	2,87	2,92	2,76	2,47	2,50	2,37	2,09	2,12	2,03	1,78	1,92	1,81	1,71
0,070	3,20	3,00	2,77	2,83	2,66	2,38	2,43	2,28	2,02	2,06	1,97	1,73	1,87	1,76	1,67
0,064	3,11	2,90	2,68	2,75	2,58	2,30	2,36	2,22	1,96	2,02	1,92	1,70	1,83	1,73	1,63
0,059	3,04	2,82	2,60	2,68	2,51	2,23	2,31	2,16	1,91	1,98	1,88	1,67	1,80	1,69	1,61
0,055	2,97	2,75	2,53	2,62	2,44	2,18	2,26	2,11	1,88	1,94	1,85	1,64	1,78	1,67	1,59
0,051	2,91	2,69	2,47	2,56	2,39	2,13	2,22	2,07	1,85	1,92	1,82	1,63	1,76	1,65	1,57
0,044	2,78	2,55	2,35	2,46	2,28	2,04	2,14	1,99	1,79	1,87	1,77	1,60	1,72	1,61	1,54
0,038	2,68	2,45	2,25	2,38	2,19	1,98	2,08	1,94	1,76	1,83	1,73	1,58	1,69	1,59	1,53
0,034	2,60	2,37	2,19	2,32	2,13	1,94	2,04	1,90	1,74	1,81	1,71	1,58	1,67	1,57	1,52
0,031	2,53	2,30	2,13	2,27	2,09	1,91	2,01	1,87	1,73	1,79	1,70	1,57	1,66	1,57	1,52
0,028	2,48	2,25	2,10	2,23	2,05	1,89	1,99	1,85	1,72	1,78	1,69	1,57	1,66	1,56	1,52
0,026	2,44	2,21	2,07	2,20	2,03	1,88	1,97	1,84	1,72	1,77	1,68	1,57	1,65	1,56	1,52
0,022	2,37	2,15	2,03	2,16	1,99	1,86	1,95	1,82	1,72	1,76	1,67	1,58	1,65	1,56	1,53
0,019	2,32	2,11	2,00	2,13	1,97	1,86	1,94	1,81	1,72	1,76	1,67	1,59	1,65	1,57	1,53
0,017	2,29	2,09	1,99	2,12	1,96	1,86	1,93	1,81	1,73	1,76	1,67	1,60	1,65	1,57	1,54
0,015	2,26	2,07	1,98	2,10	1,95	1,86	1,93	1,81	1,73	1,76	1,68	1,61	1,65	1,58	1,55
0,014	2,24	2,06	1,98	2,10	1,95	1,86	1,92	1,82	1,74	1,76	1,68	1,62	1,66	1,58	1,56
0,013	2,23	2,05	1,98	2,09	1,95	1,87	1,92	1,82	1,75	1,76	1,69	1,62	1,66	1,59	1,57
0,011	2,21	2,05	1,98	2,09	1,95	1,88	1,93	1,83	1,76	1,77	1,70	1,64	1,67	1,60	1,58
0,010	2,20	2,05	1,99	2,09	1,96	1,89	1,93	1,84	1,77	1,78	1,71	1,65	1,68	1,61	1,59
0,009	2,20	2,05	2,00	2,09	1,97	1,90	1,94	1,85	1,79	1,79	1,72	1,66	1,69	1,63	1,60
0,008	2,19	2,06	2,01	2,09	1,98	1,91	1,95	1,86	1,80	1,79	1,73	1,67	1,69	1,64	1,61

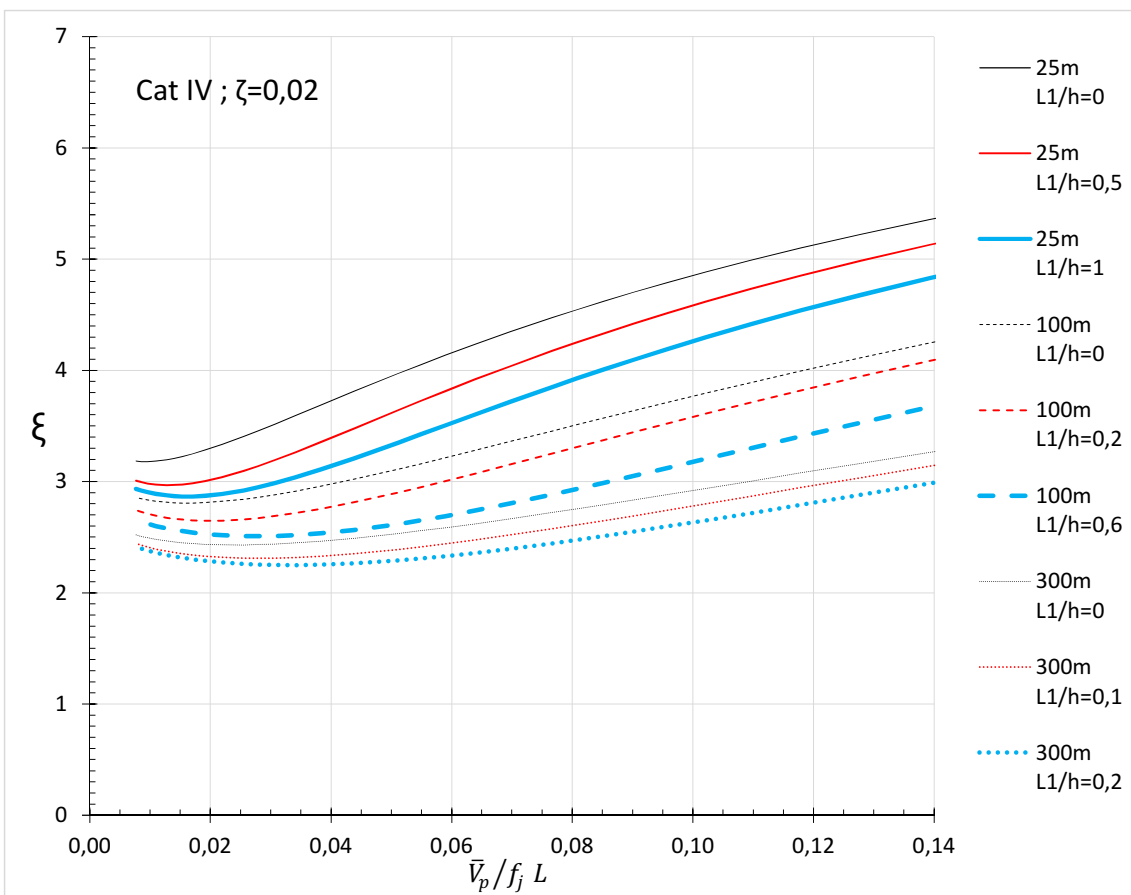
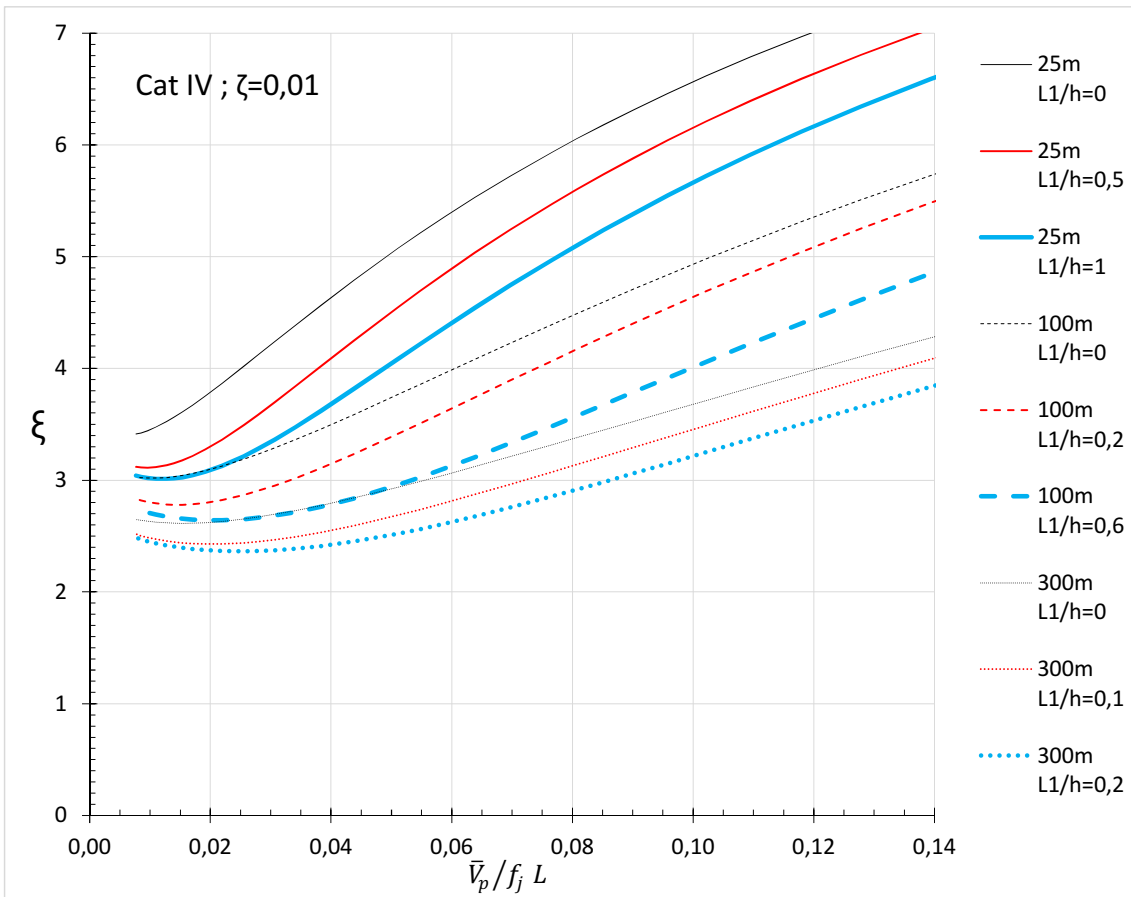


Figura A. 4 Coeficiente de amplificação dinâmica, ξ , para terreno de categoria IV.

Tabela A. 7 Coeficiente de amplificação dinâmica, ξ , para terreno de categoria IV e taxa de amortecimento $\zeta=0,01$.

$\frac{\bar{V}_p}{f_j L}$	ξ (25m)			ξ (50m)			ξ (100m)			ξ (200m)			ξ (300m)		
	L1/h			L1/h			L1/h			L1/h			L1/h		
	0,0	0,5	≥ 1	0,0	0,3	$\geq 0,8$	0,0	0,2	$\geq 0,6$	0,0	0,1	$\geq 0,4$	0,0	0,1	$\geq 0,2$
0,153	7,62	7,29	6,86	6,89	6,63	6,03	5,98	5,74	5,12	5,02	4,87	4,27	4,47	4,29	4,05
0,139	7,38	7,04	6,59	6,64	6,36	5,75	5,73	5,48	4,85	4,79	4,64	4,03	4,28	4,08	3,84
0,128	7,17	6,81	6,34	6,41	6,12	5,50	5,51	5,25	4,61	4,60	4,44	3,83	4,10	3,90	3,66
0,118	6,97	6,59	6,12	6,21	5,90	5,27	5,31	5,04	4,40	4,43	4,26	3,66	3,96	3,75	3,50
0,110	6,79	6,39	5,91	6,02	5,70	5,07	5,14	4,86	4,22	4,29	4,11	3,51	3,83	3,61	3,37
0,102	6,62	6,21	5,72	5,85	5,52	4,88	4,98	4,69	4,06	4,16	3,97	3,38	3,72	3,49	3,25
0,096	6,46	6,04	5,55	5,69	5,35	4,72	4,84	4,54	3,92	4,04	3,85	3,27	3,62	3,39	3,15
0,090	6,32	5,88	5,39	5,55	5,20	4,57	4,71	4,41	3,79	3,94	3,74	3,17	3,53	3,29	3,06
0,085	6,18	5,74	5,24	5,42	5,06	4,43	4,60	4,28	3,68	3,84	3,65	3,09	3,45	3,21	2,98
0,081	6,05	5,60	5,10	5,30	4,93	4,30	4,49	4,17	3,57	3,76	3,56	3,01	3,38	3,14	2,91
0,077	5,94	5,47	4,97	5,19	4,81	4,19	4,39	4,07	3,48	3,69	3,48	2,95	3,32	3,07	2,85
0,070	5,72	5,24	4,74	4,99	4,60	3,99	4,23	3,89	3,33	3,56	3,34	2,84	3,21	2,96	2,75
0,064	5,53	5,04	4,54	4,81	4,41	3,82	4,08	3,74	3,21	3,45	3,23	2,76	3,12	2,87	2,67
0,059	5,36	4,85	4,37	4,66	4,25	3,68	3,96	3,61	3,11	3,36	3,14	2,69	3,05	2,80	2,61
0,055	5,21	4,69	4,22	4,53	4,11	3,56	3,86	3,51	3,03	3,29	3,06	2,64	2,99	2,74	2,56
0,051	5,07	4,55	4,09	4,42	3,99	3,46	3,77	3,41	2,96	3,22	2,99	2,59	2,94	2,69	2,52
0,044	4,79	4,25	3,82	4,18	3,75	3,27	3,59	3,23	2,84	3,10	2,87	2,52	2,84	2,59	2,45
0,038	4,57	4,02	3,62	4,00	3,56	3,14	3,46	3,11	2,76	3,01	2,78	2,48	2,77	2,53	2,41
0,034	4,39	3,84	3,47	3,87	3,43	3,05	3,36	3,02	2,71	2,95	2,72	2,46	2,73	2,49	2,39
0,031	4,24	3,70	3,36	3,76	3,32	2,98	3,29	2,95	2,68	2,91	2,68	2,45	2,69	2,47	2,37
0,028	4,12	3,58	3,28	3,67	3,25	2,94	3,23	2,90	2,66	2,87	2,65	2,44	2,67	2,45	2,37
0,026	4,02	3,49	3,22	3,60	3,18	2,91	3,19	2,87	2,65	2,85	2,63	2,44	2,65	2,44	2,36
0,022	3,86	3,36	3,13	3,50	3,10	2,87	3,13	2,82	2,64	2,81	2,60	2,44	2,63	2,43	2,37
0,019	3,75	3,27	3,08	3,43	3,05	2,85	3,09	2,80	2,64	2,79	2,59	2,45	2,62	2,43	2,37
0,017	3,67	3,22	3,04	3,38	3,01	2,84	3,06	2,79	2,65	2,78	2,59	2,46	2,61	2,43	2,38
0,015	3,61	3,18	3,03	3,35	3,00	2,84	3,04	2,78	2,65	2,78	2,59	2,47	2,61	2,44	2,39
0,014	3,56	3,15	3,02	3,33	2,98	2,85	3,03	2,78	2,66	2,77	2,59	2,49	2,61	2,45	2,41
0,013	3,52	3,13	3,01	3,31	2,98	2,85	3,02	2,78	2,67	2,77	2,60	2,50	2,62	2,45	2,42
0,011	3,47	3,12	3,01	3,29	2,98	2,86	3,02	2,79	2,69	2,78	2,61	2,52	2,62	2,47	2,44
0,010	3,44	3,11	3,02	3,27	2,98	2,88	3,02	2,81	2,71	2,78	2,63	2,54	2,63	2,49	2,45
0,009	3,42	3,11	3,03	3,27	2,99	2,89	3,02	2,82	2,73	2,79	2,64	2,55	2,64	2,50	2,47
0,008	3,41	3,12	3,04	3,27	3,00	2,91	3,03	2,83	2,74	2,80	2,65	2,57	2,65	2,52	2,49

Tabela A. 8 Coeficiente de amplificação dinâmica, ξ , para terreno de categoria IV e taxa de amortecimento $\zeta=0,02$.

$\frac{\bar{V}_p}{f_j L}$	ξ (25m)			ξ (50m)			ξ (100m)			ξ (200m)			ξ (300m)		
	L1/h			L1/h			L1/h			L1/h			L1/h		
	0,0	0,5	≥ 1	0,0	0,3	$\geq 0,8$	0,0	0,2	$\geq 0,6$	0,0	0,1	$\geq 0,4$	0,0	0,1	$\geq 0,2$
0,153	5,50	5,29	5,00	5,01	4,84	4,45	4,40	4,25	3,84	3,75	3,66	3,27	3,38	3,26	3,11
0,139	5,36	5,13	4,83	4,86	4,68	4,27	4,25	4,09	3,67	3,62	3,52	3,13	3,26	3,14	2,98
0,128	5,22	4,98	4,68	4,72	4,53	4,12	4,11	3,95	3,53	3,50	3,40	3,01	3,16	3,03	2,88
0,118	5,10	4,85	4,54	4,59	4,39	3,98	3,99	3,82	3,41	3,40	3,29	2,91	3,08	2,94	2,79
0,110	4,99	4,73	4,41	4,48	4,27	3,86	3,89	3,71	3,30	3,32	3,20	2,82	3,00	2,87	2,72
0,102	4,89	4,62	4,30	4,38	4,16	3,75	3,80	3,61	3,20	3,24	3,13	2,75	2,94	2,80	2,65
0,096	4,79	4,52	4,19	4,28	4,06	3,65	3,71	3,52	3,12	3,17	3,06	2,69	2,88	2,74	2,60
0,090	4,70	4,42	4,10	4,20	3,97	3,56	3,64	3,44	3,05	3,12	3,00	2,64	2,83	2,69	2,55
0,085	4,62	4,33	4,01	4,12	3,89	3,48	3,57	3,37	2,99	3,06	2,94	2,59	2,79	2,65	2,51
0,081	4,54	4,25	3,93	4,05	3,81	3,41	3,51	3,31	2,93	3,02	2,89	2,56	2,75	2,61	2,47
0,077	4,47	4,17	3,85	3,98	3,74	3,34	3,45	3,25	2,88	2,98	2,85	2,52	2,72	2,58	2,44
0,070	4,35	4,04	3,72	3,86	3,62	3,23	3,36	3,15	2,80	2,91	2,78	2,47	2,67	2,52	2,39
0,064	4,23	3,92	3,60	3,76	3,51	3,14	3,28	3,07	2,74	2,85	2,72	2,43	2,62	2,48	2,36
0,059	4,14	3,81	3,51	3,68	3,42	3,06	3,21	3,00	2,69	2,81	2,67	2,40	2,59	2,44	2,33
0,055	4,05	3,72	3,42	3,60	3,35	3,00	3,16	2,95	2,65	2,77	2,64	2,37	2,56	2,41	2,31
0,051	3,97	3,64	3,35	3,54	3,28	2,95	3,11	2,90	2,62	2,74	2,60	2,36	2,53	2,39	2,29
0,044	3,81	3,48	3,21	3,41	3,15	2,85	3,02	2,81	2,56	2,68	2,55	2,33	2,49	2,35	2,26
0,038	3,69	3,36	3,11	3,32	3,06	2,79	2,96	2,75	2,53	2,64	2,51	2,32	2,46	2,33	2,25
0,034	3,59	3,26	3,04	3,25	3,00	2,75	2,91	2,71	2,52	2,62	2,49	2,32	2,45	2,32	2,25
0,031	3,52	3,19	2,98	3,20	2,95	2,73	2,88	2,69	2,51	2,60	2,48	2,32	2,44	2,31	2,25
0,028	3,46	3,14	2,95	3,16	2,91	2,71	2,86	2,67	2,51	2,59	2,47	2,32	2,43	2,31	2,25
0,026	3,41	3,10	2,92	3,13	2,89	2,70	2,84	2,66	2,51	2,58	2,46	2,33	2,43	2,31	2,26
0,022	3,33	3,04	2,89	3,09	2,86	2,70	2,82	2,65	2,52	2,58	2,46	2,34	2,43	2,32	2,27
0,019	3,28	3,01	2,87	3,06	2,84	2,70	2,81	2,65	2,53	2,58	2,47	2,36	2,44	2,33	2,29
0,017	3,25	2,99	2,87	3,04	2,83	2,71	2,81	2,65	2,54	2,58	2,48	2,37	2,44	2,34	2,30
0,015	3,22	2,97	2,87	3,04	2,83	2,72	2,81	2,66	2,55	2,59	2,48	2,39	2,45	2,35	2,31
0,014	3,21	2,97	2,87	3,03	2,84	2,73	2,81	2,67	2,57	2,59	2,49	2,40	2,46	2,36	2,33
0,013	3,20	2,97	2,88	3,03	2,84	2,74	2,81	2,68	2,58	2,60	2,50	2,41	2,47	2,37	2,34
0,011	3,18	2,97	2,89	3,03	2,85	2,76	2,82	2,69	2,60	2,62	2,52	2,44	2,48	2,39	2,36
0,010	3,18	2,98	2,90	3,04	2,87	2,77	2,83	2,71	2,62	2,63	2,54	2,46	2,50	2,41	2,38
0,009	3,18	2,99	2,92	3,04	2,88	2,79	2,85	2,73	2,64	2,64	2,56	2,47	2,51	2,43	2,40
0,008	3,18	3,01	2,94	3,05	2,90	2,81	2,86	2,74	2,65	2,65	2,57	2,49	2,52	2,44	2,41

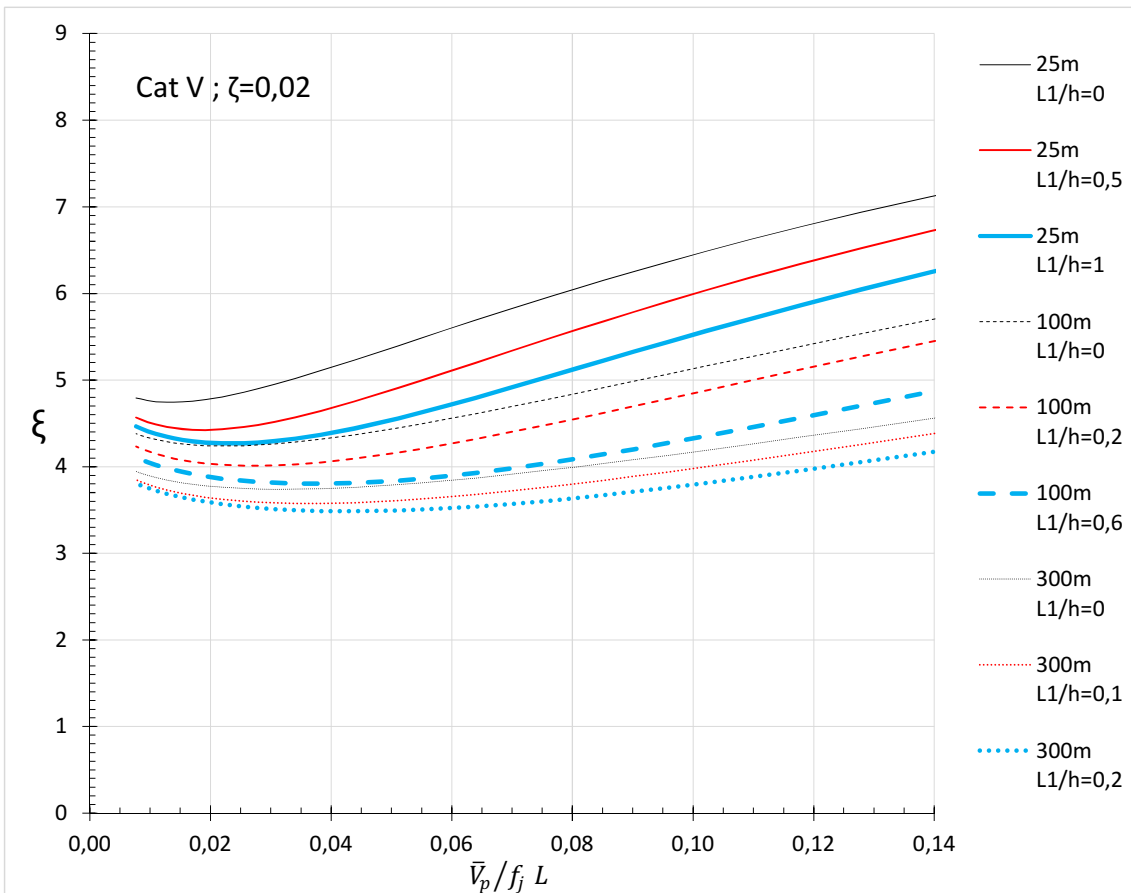
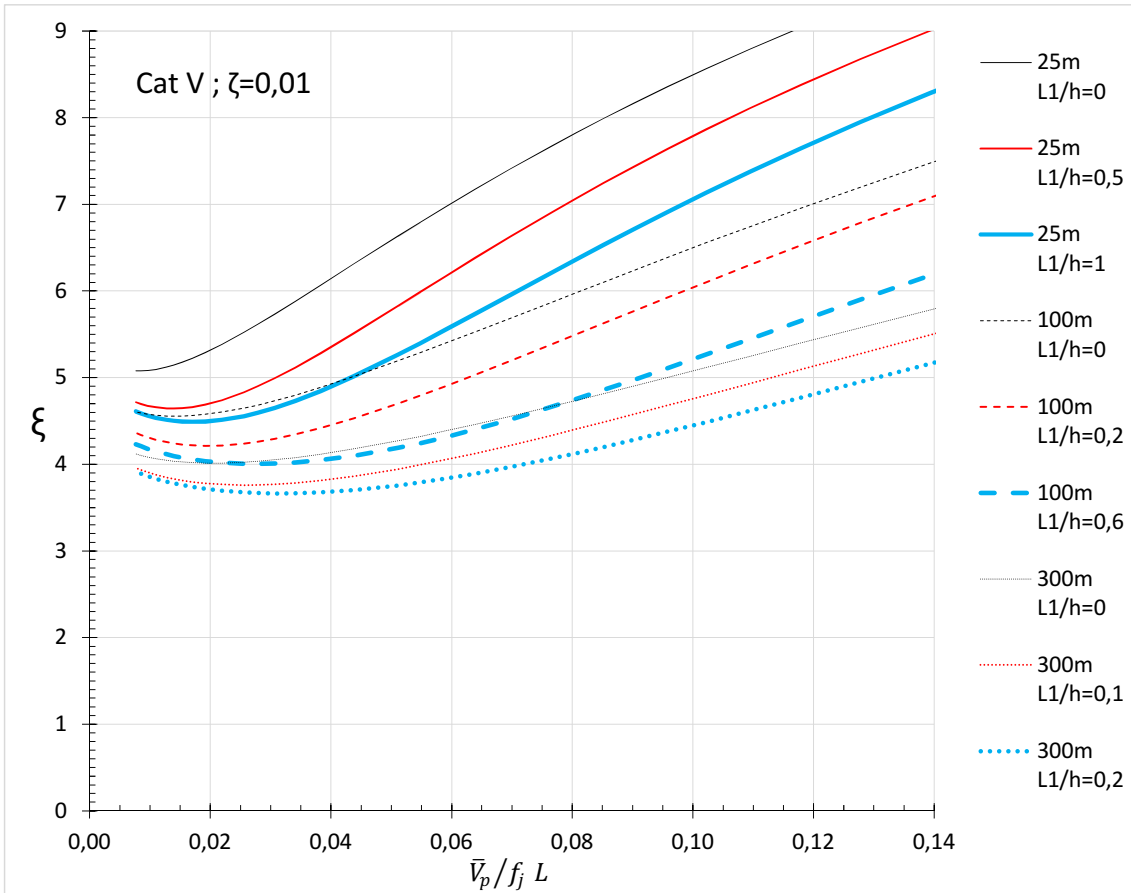


Figura A. 5 Coeficiente de amplificação dinâmica, ξ , para terreno de categoria V.

Tabela A. 9 Coeficiente de amplificação dinâmica, ξ , para terreno de categoria V e taxa de amortecimento $\zeta=0,01$.

$\frac{\bar{V}_p}{f_j L}$	ξ (25m)			ξ (50m)			ξ (100m)			ξ (200m)			ξ (300m)		
	L1/h			L1/h			L1/h			L1/h			L1/h		
	0,0	0,5	≥ 1	0,0	0,3	$\geq 0,8$	0,0	0,2	$\geq 0,6$	0,0	0,1	$\geq 0,4$	0,0	0,1	$\geq 0,2$
0,153	9,95	9,37	8,66	8,95	8,50	7,59	7,80	7,41	6,51	6,66	6,43	5,59	6,03	5,75	5,42
0,139	9,62	9,01	8,29	8,61	8,14	7,22	7,48	7,08	6,18	6,38	6,14	5,31	5,78	5,49	5,16
0,128	9,32	8,68	7,95	8,31	7,82	6,90	7,20	6,78	5,90	6,15	5,90	5,08	5,58	5,28	4,95
0,118	9,04	8,38	7,65	8,05	7,53	6,62	6,96	6,53	5,66	5,94	5,68	4,88	5,40	5,09	4,77
0,110	8,79	8,11	7,38	7,81	7,27	6,37	6,74	6,30	5,45	5,77	5,50	4,72	5,25	4,93	4,62
0,102	8,57	7,87	7,13	7,59	7,04	6,15	6,56	6,10	5,27	5,62	5,34	4,58	5,12	4,80	4,49
0,096	8,36	7,64	6,91	7,40	6,84	5,96	6,39	5,93	5,11	5,48	5,20	4,46	5,00	4,68	4,38
0,090	8,17	7,43	6,71	7,22	6,65	5,79	6,24	5,77	4,98	5,37	5,08	4,36	4,90	4,58	4,28
0,085	7,99	7,25	6,53	7,06	6,48	5,63	6,10	5,63	4,86	5,26	4,97	4,28	4,82	4,49	4,20
0,081	7,83	7,07	6,37	6,92	6,32	5,50	5,98	5,50	4,76	5,17	4,87	4,20	4,74	4,41	4,13
0,077	7,68	6,91	6,22	6,78	6,18	5,37	5,87	5,39	4,67	5,09	4,79	4,14	4,67	4,34	4,07
0,070	7,41	6,63	5,95	6,55	5,94	5,17	5,68	5,19	4,52	4,94	4,64	4,04	4,55	4,22	3,97
0,064	7,17	6,38	5,74	6,35	5,73	5,00	5,53	5,03	4,40	4,83	4,52	3,96	4,46	4,13	3,89
0,059	6,97	6,17	5,55	6,18	5,55	4,87	5,40	4,90	4,31	4,74	4,42	3,90	4,38	4,05	3,83
0,055	6,79	5,99	5,40	6,04	5,41	4,76	5,29	4,79	4,24	4,66	4,35	3,86	4,32	3,99	3,79
0,051	6,63	5,83	5,26	5,91	5,28	4,67	5,19	4,70	4,19	4,59	4,28	3,83	4,27	3,94	3,76
0,044	6,31	5,51	5,01	5,66	5,04	4,51	5,01	4,53	4,10	4,47	4,16	3,78	4,18	3,86	3,70
0,038	6,07	5,28	4,85	5,48	4,87	4,41	4,89	4,42	4,05	4,39	4,09	3,76	4,12	3,81	3,68
0,034	5,88	5,12	4,73	5,35	4,75	4,35	4,80	4,34	4,02	4,34	4,04	3,75	4,08	3,78	3,66
0,031	5,73	4,99	4,65	5,25	4,66	4,31	4,73	4,29	4,01	4,30	4,01	3,75	4,05	3,77	3,66
0,028	5,62	4,90	4,59	5,17	4,60	4,29	4,68	4,26	4,00	4,27	3,99	3,76	4,03	3,76	3,67
0,026	5,52	4,83	4,56	5,11	4,56	4,27	4,65	4,24	4,01	4,26	3,98	3,77	4,02	3,76	3,67
0,022	5,38	4,74	4,51	5,03	4,51	4,27	4,60	4,22	4,02	4,24	3,97	3,79	4,01	3,77	3,69
0,019	5,29	4,69	4,49	4,98	4,48	4,27	4,58	4,21	4,04	4,23	3,98	3,81	4,01	3,78	3,72
0,017	5,22	4,66	4,49	4,94	4,47	4,29	4,56	4,22	4,06	4,23	3,99	3,83	4,02	3,80	3,74
0,015	5,18	4,65	4,49	4,92	4,47	4,30	4,56	4,23	4,08	4,23	4,00	3,86	4,03	3,81	3,76
0,014	5,14	4,64	4,50	4,91	4,48	4,32	4,56	4,24	4,10	4,24	4,01	3,88	4,04	3,83	3,78
0,013	5,12	4,64	4,51	4,90	4,49	4,33	4,56	4,26	4,11	4,25	4,03	3,90	4,05	3,85	3,80
0,011	5,09	4,66	4,54	4,90	4,51	4,36	4,57	4,28	4,15	4,26	4,06	3,93	4,06	3,88	3,83
0,010	5,08	4,68	4,56	4,90	4,53	4,39	4,58	4,31	4,18	4,28	4,08	3,96	4,08	3,91	3,86
0,009	5,08	4,70	4,59	4,91	4,55	4,42	4,59	4,34	4,21	4,30	4,11	3,99	4,10	3,93	3,89
0,008	5,08	4,72	4,61	4,91	4,58	4,44	4,60	4,36	4,23	4,31	4,13	4,01	4,12	3,96	3,91

Tabela A. 10 Coeficiente de amplificação dinâmica, ξ , para terreno de categoria V e taxa de amortecimento $\zeta=0,02$.

$\frac{\bar{V}_p}{f_j L}$	ξ (25m)			ξ (50m)			ξ (100m)			ξ (200m)			ξ (300m)		
	L1/h			L1/h			L1/h			L1/h			L1/h		
	0,0	0,5	≥ 1	0,0	0,3	$\geq 0,8$	0,0	0,2	$\geq 0,6$	0,0	0,1	$\geq 0,4$	0,0	0,1	$\geq 0,2$
0,153	7,32	6,94	6,47	6,66	6,36	5,77	5,89	5,64	5,06	5,12	4,98	4,44	4,69	4,52	4,31
0,139	7,12	6,72	6,24	6,45	6,14	5,55	5,70	5,44	4,86	4,96	4,81	4,28	4,55	4,38	4,17
0,128	6,94	6,52	6,04	6,27	5,95	5,36	5,53	5,27	4,70	4,83	4,67	4,16	4,44	4,26	4,05
0,118	6,77	6,34	5,87	6,11	5,78	5,20	5,39	5,12	4,57	4,71	4,55	4,05	4,34	4,16	3,96
0,110	6,62	6,18	5,71	5,97	5,63	5,06	5,27	4,99	4,45	4,62	4,45	3,97	4,26	4,07	3,88
0,102	6,49	6,04	5,57	5,85	5,50	4,93	5,16	4,88	4,36	4,53	4,37	3,89	4,19	4,00	3,81
0,096	6,37	5,91	5,44	5,73	5,38	4,82	5,07	4,78	4,27	4,46	4,29	3,84	4,13	3,94	3,76
0,090	6,25	5,79	5,33	5,63	5,28	4,73	4,99	4,70	4,20	4,40	4,23	3,79	4,08	3,89	3,71
0,085	6,15	5,68	5,22	5,54	5,18	4,65	4,91	4,62	4,14	4,34	4,17	3,75	4,04	3,84	3,67
0,081	6,06	5,58	5,13	5,46	5,10	4,58	4,85	4,56	4,09	4,30	4,12	3,71	4,00	3,80	3,64
0,077	5,97	5,49	5,05	5,39	5,02	4,51	4,79	4,50	4,05	4,26	4,08	3,68	3,96	3,77	3,61
0,070	5,82	5,33	4,91	5,26	4,89	4,41	4,69	4,40	3,98	4,19	4,01	3,64	3,91	3,72	3,57
0,064	5,69	5,20	4,79	5,15	4,78	4,32	4,61	4,32	3,93	4,13	3,95	3,61	3,87	3,68	3,54
0,059	5,58	5,09	4,70	5,06	4,69	4,26	4,55	4,25	3,89	4,09	3,91	3,59	3,84	3,65	3,52
0,055	5,48	4,99	4,62	4,99	4,61	4,21	4,49	4,20	3,86	4,06	3,88	3,58	3,81	3,63	3,50
0,051	5,40	4,91	4,56	4,93	4,55	4,17	4,45	4,16	3,84	4,03	3,85	3,57	3,79	3,61	3,49
0,044	5,23	4,75	4,44	4,80	4,44	4,10	4,37	4,09	3,81	3,98	3,81	3,56	3,76	3,58	3,48
0,038	5,11	4,64	4,37	4,72	4,36	4,07	4,32	4,05	3,80	3,96	3,79	3,57	3,75	3,58	3,49
0,034	5,02	4,57	4,32	4,66	4,32	4,05	4,28	4,03	3,80	3,94	3,78	3,58	3,74	3,58	3,50
0,031	4,95	4,52	4,29	4,62	4,29	4,05	4,26	4,01	3,81	3,93	3,77	3,59	3,74	3,58	3,51
0,028	4,90	4,48	4,28	4,59	4,27	4,05	4,25	4,01	3,82	3,93	3,78	3,61	3,74	3,59	3,52
0,026	4,86	4,46	4,27	4,57	4,26	4,05	4,24	4,01	3,84	3,94	3,78	3,62	3,75	3,60	3,54
0,022	4,81	4,43	4,27	4,55	4,25	4,07	4,24	4,02	3,86	3,94	3,80	3,65	3,76	3,62	3,57
0,019	4,77	4,42	4,28	4,54	4,26	4,09	4,24	4,04	3,89	3,96	3,82	3,68	3,78	3,65	3,60
0,017	4,76	4,43	4,29	4,54	4,27	4,12	4,25	4,06	3,91	3,97	3,84	3,71	3,80	3,67	3,62
0,015	4,75	4,43	4,31	4,54	4,28	4,14	4,26	4,07	3,94	3,99	3,86	3,73	3,81	3,69	3,64
0,014	4,74	4,45	4,33	4,55	4,30	4,16	4,28	4,09	3,96	4,00	3,88	3,76	3,83	3,71	3,67
0,013	4,74	4,46	4,34	4,56	4,32	4,18	4,29	4,11	3,98	4,02	3,90	3,78	3,84	3,73	3,69
0,011	4,75	4,49	4,38	4,58	4,35	4,22	4,31	4,15	4,02	4,05	3,93	3,81	3,87	3,77	3,72
0,010	4,76	4,52	4,41	4,60	4,38	4,25	4,34	4,18	4,05	4,07	3,96	3,85	3,90	3,80	3,75
0,009	4,78	4,54	4,44	4,62	4,41	4,28	4,36	4,21	4,08	4,10	3,99	3,87	3,92	3,82	3,78
0,008	4,79	4,57	4,47	4,63	4,43	4,30	4,38	4,23	4,11	4,12	4,01	3,90	3,94	3,85	3,81