

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC

Conforto Humano em Edifícios Altos Excitados pelo Vento:
Metodologias de Determinação das Acelerações e Critérios de
Conforto

Luciano Zatti

Porto Alegre
2016

Luciano Zatti

**CONFORTO HUMANO EM EDIFÍCIOS ALTOS EXCITADOS
PELO VENTO: METODOLOGIAS DE DETERMINAÇÃO DAS
ACELERAÇÕES E CRITÉRIOS DE CONFORTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Engenharia.

Porto Alegre

2016

LUCIANO ZATTI

**Conforto Humano em Edifícios Altos Excitados pelo Vento:
Metodologias de Determinação das Acelerações e Critérios de
Conforto**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Estruturas, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, setembro de 2016.

Prof. Acir Mércio Loredó Souza
Ph.D., University of Western Ontario,
Canadá
Orientador

Prof. Marcelo Maia Rocha
Dr. Techn., Universität Innsbruck,
Áustria
Coorientador

Prof. Carlos Torres Formoso
Ph.D., University of Salford
Coordenador do PPGEC

BANCA EXAMINADORA

Prof. José Luis Vital de Brito (UnB)
D.Sc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Prof. Adrian Roberto Wittwer (UNNE, Argentina)
D.Sc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Prof. Gustavo Javier Zani Núñez (UFRGS)
D.Sc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Mario Gustavo Klaus Oliveira (Vento-S)
D.Sc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Dedico este trabalho a toda a minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me ter proporcionado estudar e por ter estado comigo em toda esta caminhada.

Agradeço a toda a minha família, meus pais, irmãs, cunhados e sobrinha, por toda a dedicação dispensada, pela compreensão por muitas vezes das renúncias assim necessárias, por todos os conselhos e orientações que por muitas vezes se fizeram indispensáveis e pelo incentivo a sempre continuar estudando. Obrigado por terem confiado e acreditado em mim. Isto tudo com certeza é por vocês e para vocês.

Agradeço também a minha namorada Cecile pela compreensão por todas as ausências, pelo carinho e companheirismo e ainda, por dividir as minhas preocupações e angústias.

Agradeço também ao meu professor orientador, Prof. Ph.D Acir Mércio Loredou Souza, por todos os momentos de disposição no assessoramento que fizeram-se indispensáveis para conclusão deste trabalho, sempre com muita maestria.

Ao professor coorientador, Prof. Dr. Marcelo Maia Rocha, meu agradecimento pelos ensinamentos dispensados.

Aos professores do PPGECC da UFRGS que contribuíram significativamente para construção de meu conhecimento e aos funcionários da secretaria por todo auxílio de forma prestativa.

À Prefeitura Municipal de Farroupilha, em especial ao prefeito Dr. Claiton Gonçalves, pela flexibilidade e disponibilidade em me oportunizar ao mesmo tempo o trabalho e o estudo.

Ao Secretário Municipal de Planejamento, engenheiro civil Deivid Argenta, pela compreensão, entendimento, amizade e incentivo para a conclusão deste trabalho.

Aos meus colegas de curso e trabalho, pelas dicas e auxílios ao longo desta pesquisa, bem como, pela amizade e companheirismo dispensado.

Enfim, a todos que estiveram sempre ao meu lado, meu sincero agradecimento.

Se tu o desejas, podes voar, só tens de confiar
muito em ti.

Steve Jobs

RESUMO

ZATTI, L. **Conforto humano em edifícios altos excitados pelo vento: metodologias de determinação das acelerações e critérios de conforto.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

Atualmente, a construção de edifícios altos e esbeltos tem se tornado cada vez mais comum na paisagem urbana dos grandes centros. No Brasil, tais edifícios tem se mostrado insuficientemente rígidos, com baixo amortecimento estrutural e conseqüentemente com frequências mais baixas que as esperadas, este fato aumenta a possibilidade de que os edifícios respondam dinamicamente às excitações devidas ao vento, com conseqüente aumento da sensibilidade dos seus usuários. É fato, a necessidade da garantia da condição de serviço destas edificações associadas à estabilidade estrutural. Buscar qual nível é aceitável e a respectiva taxa de aceleração é o grande desafio. Sabe-se também que a exposição humana prolongada a essas vibrações provocadas pelo vento nas edificações podem ocasionar danos e conseqüências a vida de seus ocupantes. A predição, bem como, a estimativa dos níveis de conforto é de extrema importância na busca da resposta humana frente a estes movimentos. Esta pesquisa objetiva descrever qualitativamente e quantitativamente os procedimentos e formulações relacionadas à percepção e a tolerância humana (critério de aceitabilidade das acelerações) de diversos códigos e normas frente às vibrações provocadas pelo vento em edifícios altos, bem como as metodologias de determinação das acelerações. Busca-se descrever as características individuais dos ocupantes ao movimento, bem como, as características do movimento dos edifícios. Propõe-se por fim, avaliar se atualmente o procedimento recomendado pela NBR 6123/1988 na determinação e no critério de aceitação das acelerações frente às excitações devidas ao vento em edifícios altos, apresenta um bom critério de conforto, considerando-se mais de três décadas da publicação da mesma e os diversos trabalhos neste período relacionados ao conforto humano.

Palavras-chave: *conforto humano; edifícios altos; percepção; NBR 6123.*

ABSTRACT

ZATTI, L. **Human comfort in tall buildings excited by wind: methodologies for determination of the accelerations and comfort criteria.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2016.

Nowadays, the emergence of tall and slender building has become increasingly common in the urban landscape of big cities. At the same time, in Brazil, such buildings have been shown to be insufficiently rigid, structurally damping and therefore with frequencies lower than expected, increasing the human sensitivity to wind exposure. In fact, there is the need to guarantee the condition of service of such buildings associated with the structural stability. The major challenge is to get which level is acceptable and what acceleration rate is . It is also known that prolonged human exposure to these wind-induced vibrations in buildings can cause damage and consequences to the life of their inhabitants. It is extremely important the prediction, as well as the evaluation, of the levels of comfort in order to know the human response when facing these movements. This research aims to get the qualitative and quantitative evaluation of procedures and perception-related formulations and human tolerance (accelerations accessibility criterion) of various codes and standards front wind-induced vibrations in tall buildings, and the methodologies of determining accelerations. The aim is to assess the individual characteristics of the occupants related to the movement, as well as the characteristics of the movement of buildings. It is proposed in order to assess whether currently the procedure recommended by NBR 6123/1988 and in determining acceptance criteria from the front accelerations to wind excitations in tall buildings, it has a good comfort criteria, considering the more than three decades of publication and the various studies in this period related to human comfort in tall buildings excited by wind.

Keywords: *human confort; tall buildings; perception; NBR 6123.*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	22
1.1 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DO ESTUDO.....	22
1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	25
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	25
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1 HISTÓRICO DE ESTUDOS RELACIONADOS À PERCEPÇÃO HUMANA E DOS CRITÉRIOS DE CONFORTO DA ACELERAÇÃO.....	27
3 PARÂMETROS RELACIONADOS AO CONFORTO	42
3.1 CARACTERÍSTICAS INDIVIDUAIS DOS OCUPANTES AO MOVIMENTO.....	43
3.1.1 Percepção.....	43
3.1.2 Fisiológicas.....	44
3.1.3 Psicológicas.....	46
3.1.4 Influências Sociais.....	46
3.2 CARACTERÍSTICAS DO MOVIMENTO DOS EDIFÍCIOS.....	46
3.2.1 Amplitude da Resposta.....	47
3.2.2 Velocidade.....	47
3.2.3 Aceleração.....	48
3.2.4 Frequência.....	50
3.2.5 Duração.....	52
3.2.6 Período de Recorrência.....	52
4 PROCEDIMENTOS DE DETERMINAÇÃO DA ACELERAÇÃO E CRITÉRIO DE CONFORTO	55
4.1 ABNT/NBR 6123-1988.....	55
4.1.1 Determinação da Amplitude Máxima da Aceleração.....	55
4.1.2 Critério de Conforto.....	56
4.2 AII-2004.....	56
4.2.1 Determinação da Máxima Aceleração na Direção do Vento.....	56
4.2.2 Determinação da Máxima Aceleração na Direção Transversal do Vento.....	57
4.2.3 Determinação da Máxima Aceleração Torcional.....	58
4.2.4 Critério de Conforto.....	59

4.3 ASCE-2010.....	60
4.3.1 Determinação da Máxima Aceleração na Direção do Vento.....	60
4.3.2 Critério de Conforto.....	61
4.4 AS/NZS 1170-2011.....	62
4.4.1 Determinação da Máxima Aceleração na Direção do Vento.....	62
4.4.2 Determinação da Máxima Aceleração na Direção Transversal do Vento.....	63
4.4.3 Critério de Conforto.....	65
4.5 EUROCODE 1-2010.....	65
4.5.1 Determinação do Desvio Padrão da Aceleração na Direção do Vento.....	65
4.5.2 Critério de Conforto.....	66
4.6 ISO 6897-1984.....	67
4.6.1 Avaliação das Vibrações Induzidas em Edifícios Utilizados para fins Gerais, em Eventos com Duração Superior a 10 Minutos.....	67
4.6.2 Avaliação das Vibrações Induzidas em Estruturas Fixas <i>off-shore</i> de Baixa Frequência, em Eventos com Duração Superior a 10 Minutos.....	68
4.6.3 Avaliação das Vibrações Induzidas em Edifícios Utilizados para fins Especiais, em Eventos com Duração Superior a 10 Minutos.....	68
4.6.4 Eventos com Duração Inferior a 10 Minutos.....	69
4.7 ISO 10137-2007.....	70
4.7.1 Critérios de Vibração para Estado Limite de Serviço.....	70
4.7.2 Critérios para Ocupação Humana.....	70
4.8 NBCC-2010.....	74
4.8.1 Determinação da Máxima Aceleração na Direção do Vento e Transversal ao Vento.....	74
4.8.2 Critério de Conforto.....	75
5 COMPARAÇÃO NORMATIVA DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS RELACIONADOS A DETERMINAÇÃO DA ACELERAÇÃO.....	76
5.1 TEMPO DE MEDIÇÃO, ALTURA DE REFERÊNCIA E PERÍODO DE RECORRÊNCIA.....	76
5.2 PERFIS DE VELOCIDADE DO VENTO.....	76
5.3 PARÂMETROS PARA CÁLCULO DAS ACELERAÇÕES.....	82
6 COMPARAÇÃO DOS CRITÉRIOS DE CONFORTO.....	87
7 DESCRIÇÃO DO CAARC, APLICAÇÕES E RESULTADOS DAS AVALIAÇÕES NORMATIVAS.....	92
7.1 RESULTADOS DAS ACELERAÇÕES MÁXIMAS.....	99

7.2 RESULTADOS DOS CRITÉRIOS DE CONFORTO.....	110
8 ESTRATÉGIAS MITIGADORAS DO MOVIMENTO.....	116
8.1 MODELOS ESTRUTURAIS E AERODINÂMICOS.....	116
8.1.1 Alteração ou Adição de Elementos Estruturais.....	117
8.1.2 Alterações Geométricas ou Aerodinâmicas dos Edifícios.....	119
8.2 SISTEMAS DE AMORTECIMENTO.....	121
8.2.1 Sistema Passivo.....	121
8.2.1.1 <i>Tuned Mass Damper</i> – TMD.....	121
8.2.1.2 <i>Tuned Liquid Damper</i> – TLD.....	121
8.2.1.3 <i>Impact Damper</i> – ID.....	121
8.2.1.4 <i>Viscoelastic Damper</i> – VED.....	122
8.2.1.5 <i>Viscous Damping Device</i> – VDD.....	122
8.2.1.6 <i>Metallic Dissipators or Damper</i> – MD.....	122
8.2.1.7 <i>Friction System</i> – FS.....	122
8.2.2 Sistema Ativo.....	123
8.2.2.1 <i>Active Mass Damper</i> – AMD.....	123
8.2.2.2 <i>Active Variable Stiffnes</i> – AVS.....	123
8.2.3 Sistema Semi-Ativo.....	123
8.2.4 Sistema Híbrido.....	123
9 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	124
9.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	124
REFÊRENCIAS.....	126
APÊNDICES.....	131
APÊNDICE A – METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS NORMATIVOS PARA DETERMINAÇÃO DAS ACELERAÇÕES.....	132
A.1 PROCESSO DA NORMA BRASILEIRA ABNT/NBR 6123 (1988).....	133
A.1.1 Determinação da amplitude máxima da aceleração.....	133
A.2 PROCESSO DA NORMA JAPONESA AIJ (2004).....	133
A.2.1 Determinação da máxima aceleração na direção do vento.....	133
A.2.2 Determinação da máxima aceleração transversal do vento.....	142
A.2.3 Determinação da máxima aceleração torcional.....	144
A.3 PROCESSO DA NORMA AMERICANA ASCE (2010).....	146
A.3.1 Determinação da máxima aceleração na direção do vento.....	146
A.4 PROCESSO DA NORMA AUSTRALIANA E NEOZELANDESA AS/NZS 1170 (2011).....	154

A.4.1 Determinação da máxima aceleração na direção do vento.....	154
A.4.2 Determinação da máxima aceleração na direção transversal do vento.....	161
A.5 PROCESSO DA NORMA EUROCÓDIGO EURO (2010).....	164
A.5.1 Determinação do desvio padrão da aceleração na direção do vento.....	164
A.6 PROCESSO DA NORMA CANADENSE NBCC (2010).....	172
A.6.1 Determinação da máxima aceleração na direção do vento.....	172
A.6.2 Determinação da máxima aceleração na direção transversal do vento.....	177

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Categorias relacionadas à caracterização de edifícios altos: (a) contexto, (b) proporção e (c) tecnologia.....	23
Figura 3.1: Efeitos do movimento relatado pelos ocupantes.....	45
Figura 3.2: Reações dos ocupantes frente às acelerações.....	48
Figura 3.3: Níveis de aceleração rms em função da frequência de vibração das estruturas.....	49
Figura 3.4: Critério de modificação das curvas de Irwin e da ISO 6897 em relação às acelerações de pico, frequência e período de recorrência.....	50
Figura 3.5: Ábaco de avaliação da percepção das vibrações em edifícios.....	51
Figura 3.6: Percentual de objeção dos ocupantes <i>versus</i> período de recorrência para um critério de aceleração rms de 0,005g.....	53
Figura 3.7: Aceleração aceitável <i>versus</i> média anual do número de tempestades.....	54
Figura 4.1: Limites probabilísticos de percepção dados pelo AIJ.....	59
Figura 4.2: Sugestões de magnitudes satisfatórias de movimento horizontal em edifícios usados para fins gerais (curva 1) e estruturas fixas <i>off-shore</i> (curva 2).....	68
Figura 4.3: Limite inferior (curva 1) e média (curva 2) de percepção do movimento horizontal.....	69
Figura 4.4: Curvas de avaliação para vibrações induzidas pelo vento em edifícios em direção horizontal (x,y) para um período de recorrência de um ano.....	73
Figura 6.1: Resposta de edifícios em estudo de critério de conforto para 1 mês de intervalo de recorrência.....	88
Figura 6.2: Evolução dos critérios de conforto humano.....	90
Figura 6.3: Comparação dos limites de percepção e critérios sugeridos, para um período de recorrência de 1 ano.....	91
Figura 6.4: Comparação dos limites de percepção e critérios sugeridos, para um período de recorrência de 1 ano.....	91
Figura 7.1: Direções de incidência do vento analisadas.....	98
Figura 7.2: Estimativa das acelerações máximas utilizando a norma AIJ <i>versus</i> velocidade básica: longitudinal – 0°.....	100
Figura 7.3: Estimativa das acelerações máximas utilizando a norma ASCE <i>versus</i> velocidade básica: longitudinal – 0°.....	101
Figura 7.4: Estimativa das acelerações máximas utilizando a norma AS/NZS <i>versus</i> velocidade básica: longitudinal – 0°.....	101
Figura 7.5: Estimativa das acelerações máximas utilizando a norma EURO <i>versus</i> velocidade básica: longitudinal – 0°.....	102
Figura 7.6: Estimativa das acelerações máximas utilizando a norma NBCC <i>versus</i> velocidade básica: longitudinal – 0°.....	102

Figura 7.7: Estimativa das acelerações máximas utilizando a norma NBR <i>versus</i> velocidade básica: longitudinal – 0°.....	103
Figura 7.8: Estimativa das acelerações máximas utilizando a norma AIJ <i>versus</i> velocidade básica: longitudinal – 90°.....	103
Figura 7.9: Estimativa das acelerações máximas utilizando a norma ASCE <i>versus</i> velocidade básica: longitudinal – 90°.....	104
Figura 7.10: Estimativa das acelerações máximas utilizando a norma AS/NZS <i>versus</i> velocidade básica: longitudinal – 90°.....	104
Figura 7.11: Estimativa das acelerações máximas utilizando a norma EURO <i>versus</i> velocidade básica: longitudinal – 90°.....	105
Figura 7.12: Estimativa das acelerações máximas utilizando a norma NBCC <i>versus</i> velocidade básica: longitudinal – 90°.....	105
Figura 7.13: Estimativa das acelerações máximas utilizando a norma NBR <i>versus</i> velocidade básica: longitudinal – 90°.....	106
Figura 7.14: Estimativa das acelerações máximas utilizando a norma AIJ <i>versus</i> velocidade básica: transversal – 0°.....	107
Figura 7.15: Estimativa das acelerações máximas utilizando a norma AS/NZS <i>versus</i> velocidade básica: transversal – 0°.....	107
Figura 7.16: Estimativa das acelerações máximas utilizando a norma NBCC <i>versus</i> velocidade básica: transversal – 0°.....	108
Figura 7.17: Estimativa das acelerações máximas utilizando a norma AIJ <i>versus</i> velocidade básica: transversal – 90°.....	108
Figura 7.18: Estimativa das acelerações máximas utilizando a norma AS/NZS <i>versus</i> velocidade básica: transversal – 90°.....	109
Figura 7.19: Estimativa das acelerações máximas utilizando a norma NBCC <i>versus</i> velocidade básica: transversal – 90°.....	109
Figura 7.20: Estimativa das acelerações máximas utilizando a norma AIJ <i>versus</i> velocidade básica: torcional.....	110
Figura 7.21: Resultado das comparações dos limites de percepção: vento na direção longitudinal – 0°.....	112
Figura 7.22: Resultado das comparações dos limites de percepção: vento na direção longitudinal – 90°.....	113
Figura 7.23: Resultado das comparações dos limites de percepção: vento na direção transversal – 0°.....	114
Figura 7.24: Resultado das comparações dos limites de percepção: vento na direção transversal – 90°.....	115
Figura 8.1: Representação esquemática para sistemas treliçados (a) e exemplos de aplicação em <i>Melbourne Tower</i> (b).....	117
Figura 8.2: Representação esquemática para sistemas de “cintagem” treliçados (a) e exemplos de aplicação em <i>Plaza Rakyat</i> (b).....	118
Figura 8.3: <i>Sears Tower</i>	118

Figura 8.4: Modificações aerodinâmicas para edifícios de forma quadrada.....	119
Figura 8.5: Exemplo de aplicação em <i>Mitsubishi Heavy Industries Yokohama Building</i> (a) e variação da forma transversal com a altura.....	120
Figura 8.6: <i>Shanghai World Financial Center</i>	120
Figura A2.1: Velocidade básica do vento.....	134
Figura A2.2: Fator de direcionalidade do vento K_D	136
Figura A2.3: Taludes.....	138
Figura A2.4: Topografia em forma de cume.....	138
Figura A3.1: Velocidade básica do vento para categoria de ocupação II de edifícios e estruturas.....	148
Figura A3.2: Velocidade básica do vento para categoria de ocupação III e IV de edifícios e outras estruturas.....	149
Figura A3.3: Velocidade básica do vento para categoria de ocupação I de edifícios e outras estruturas.....	150
Figura A4.1: Direções β do vento.....	156
Figura A4.2: Região do vento Austrália.....	156
Figura A4.3: Região do vento Nova Zelândia.....	157
Figura A4.4: Alturas referenciais.....	161
Figura A4.5: Obtenção do coeficiente relativo ao espectro da componente transversal C_{fs}	163
Figura A5.1: Alturas referenciais.....	167
Figura A5.2: Função de densidade espectral de potência adimensional S_L	169
Figura A5.3: Coeficiente adimensional K_x	170
Figura A5.4: Expoente de modo de vibração ζ	171
Figura A5.5: Fator de pico K_p	171
Figura A6.1: Fator de pico estatístico para efeito de carga g_p	173
Figura A6.2: Fator de redução do tamanho s	173
Figura A6.3: Fator de exposição $C_e H$ baseado no perfil de velocidade para a altura H ...	175
Figura A6.4: Relação de rajada de energia F na frequência natural da estrutura.....	175
Figura A6.5: Fator para a parcela de fundo B em função da geometria da estrutura.....	176

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1: Fatores que influenciam o comportamento dos ocupantes de edifícios altos.....	42
Quadro 3.2: Valores limites de aceleração para a percepção humana.....	51
Quadro 5.1: Tempos de medição, altura de referência e período de recorrência para cálculo das acelerações.....	77
Quadro 5.2: Categorias de exposição de terreno.....	78
Quadro 5.3: Categorias de exposição de terreno de diversas normas.....	79
Quadro 5.4: Coeficiente de Lei de Potência de diversas normas para fins de unificação com as categorias propostas CE1, CE2, CE3, CE4, CE5 e CE6.....	80
Quadro 5.5: Comparação dos parâmetros relacionados à aceleração.....	82
Quadro 5.6: Parâmetros normativos relacionados à pressão dinâmica.....	83
Quadro 5.7: Comparação de fatores de pico de diversas normativas.....	84
Quadro 5.8: Comparação dos fatores de resposta ressonante de diversas normativas.....	85
Quadro 5.9: Comparação dos fatores de redução, energia e frequência reduzida de diversas normativas.....	86
Quadro 6.1: Comparação dos critérios de conforto.....	90
Quadro 7.1: Dados de entrada relacionados ao CAARC.....	93
Quadro 7.2: Categorias de exposição de terreno, altura de referência, tempo de medição e período de recorrência de cada norma para cálculo das acelerações.....	95
Quadro 7.3: Coeficientes de conversão das categorias de exposição de terreno, altura de referência, tempo de medição e período de recorrência.....	96
Quadro 7.4: Velocidades básicas e velocidades convertidas para cada norma.....	96
Quadro 7.5: Procedimentos normativos em relação à incidência do vento.....	98
Quadro A2.1: Categorias de terreno plano.....	137
Quadro A2.2: Parâmetros que determinam E_r	137
Quadro A2.3: Parâmetros que determinam E_g (taludes).....	139
Quadro A2.4: Parâmetros que determinam E_r (cume).....	139
Quadro A3.1: Parâmetros de exposição do terreno (em metros).....	147
Quadro A3.2: Categoria de risco de edifícios e outras estruturas para a inundação, vento, neve, terremoto e grande quantidade de gelo.....	148
Quadro A4.1: Intensidade de turbulência I_z	155
Quadro A4.2: Fator multiplicador de direção β do vento M_d	157
Quadro A4.3: Fator multiplicador em dependência da altura z e a categoria do terreno $M_{z,cat}$, para regiões A1 até A7, W e B.....	158

Quadro A4.4: Fator multiplicador em dependência da altura z e a categoria do terreno $M_{z,cat}$, para regiões A1.....	158
Quadro A4.5: Fator de multiplicador de proteção.....	159
Quadro A5.1: Categorias e parâmetros de terreno.....	166
Quadro A5.2: Decremento logarítmico de amortecimento estrutural.....	168

LISTA DE SÍMBOLOS

A – Aceleração máxima (ISO 10137)

a_D – Máxima aceleração na direção do vento (NBCC)

a_{Dmax} – Máxima aceleração na direção do vento no alto do edifício (AIJ)

a_j – Amplitude máxima da aceleração (NBR)

a_{Lmax} – Máxima aceleração na direção transversal do vento no alto do edifício (AIJ)

a_{Tmax} – Máxima aceleração torcional (AIJ)

a_W – Máxima aceleração na direção transversal do vento (NBCC)

B – Largura projetada do edifício (AIJ)

B – Largura da edificação normal ao vento (ASCE)

b – Largura média da estrutura (AS_NZS)

b – Largura da estrutura (EURO)

b_z – Largura média da estrutura na seção da altura z (AS_NZS)

C_{eH} – Fator de exposição no topo do edifício (NBCC)

C_f – Coeficiente de força (EURO)

C_{fx} – Coeficiente de força médio ou arrasto para a componente longitudinal (ASCE)

$C_{fig,bar}$ – Fator de forma aerodinâmica a barlavento (AS_NZS)

$C_{fig,sot}$ – Fator de forma aerodinâmica a sotavento (AS_NZS)

C_{fs} – Coeficiente do espectro da força na direção transversal do vento generalizada para uma forma modal linear (AS_NZS)

C_H – Coeficiente de força do vento C_D em relação à altura referência (AIJ)

C_g – Fator de efeito de rajada (NBCC)

C'_g – Coeficiente de momento de tombamento na direção do vento (AIJ)

C'_L – Coeficiente de momento de tombamento na direção transversal do vento (AIJ)

C'_T – Coeficiente de momento de torção (AIJ)

d – Profundidade efetiva na direção do vento (NBCC)

E_t – Espectro da turbulência do vento incidente (AS_NZS)

F – Relação de rajada de energia na frequência natural da estrutura (NBCC)

f_D – Frequência natural para o primeiro modo na direção do vento (AIJ)

f_j – Frequência natural no modo j (NBR)

f_L – Frequência natural para o primeiro modo na direção transversal do vento (AIJ)

f_0 – Primeira frequência natural numa direção estrutural do edifício e em torção (ISO 10137)

f_{nD} – Frequência natural fundamental na direção do vento (NBCC)

f_{nW} – Frequência natural fundamental na direção transversal do vento (NBCC)

f_T – Frequência natural para o primeiro modo na direção torcional (AIJ)

g – Aceleração devido à gravidade (NBCC)

g_{aD} – Fator de pico para a aceleração na direção do vento (AIJ)

g_{aL} – Fator de pico para a aceleração na direção transversal do vento (AIJ)

g_{aT} – Fator de pico para a aceleração resposta torcional (AIJ)

g_p – Fator de pico estatístico para o efeito de carga (NBCC)

g_R – Fator de pico de resposta ressonante (período 10min) (AS_NZS)

g_V – Fator de pico para as flutuações de velocidade a sotavento (AS_NZS)

$g_{\dot{x}}$ – Fator de pico para aceleração na direção do vento (ASCE)

H – Altura referência (AIJ)

h – Altura média do telhado de uma estrutura acima do solo (AS_NZS)

I_h – Intensidade de turbulência, definindo $z = h$ (AS_NZS)

I_T – Momento de inércia generalizada do edifício para vibração torcional (AIJ)

$I_v(z_s)$ – Intensidade da turbulência na altura $z = z_s$ acima do solo (EURO)

$I_{\bar{z}}$ – Intensidade da turbulência com \bar{z} como altura equivalente da estrutura (ASCE)

K – Fator relacionado com o coeficiente de rugosidade da superfície do terreno (NBCC)

K_m – Fator de correção de forma modal para a aceleração na direção transversal do vento (AS_NZS)

K_x – Coeficiente não adimensional (EURO)

k – Expoente energia da forma modal para o modo fundamental (AS_NZS)

M_D – Massa generalizada do edifício para vibração na direção do vento (AIJ)

M_L – Massa generalizada do edifício para vibração na direção transversal do vento (AIJ)

m_0 – Massa média por unidade de altura (AS_NZS)

m_1 – Massa modal (ASCE)

$m_{1,x}$ – Massa fundamental equivalente na direção do vento (EURO)

q_H – Pressão dinâmica em referência a altura H (AIJ)

R – Raiz quadrada da resposta ressonante (EURO)

R – Fator da resposta ressonante (ASCE)

R_D – Fator de ressonância para vibração na direção do vento (AIJ)

R_L – Fator de ressonância para vibração na direção transversal do vento (AIJ)

R_T – Fator de ressonância para vibração torcional (AIJ)

S – Fator de redução do tamanho (AS_NZS)

s – Fator de redução do tamanho (NBCC)

T – Período de tempo mínimo para cálculo da aceleração (ASCE)

u_j – Deslocamento no nível z no modo j (NBR)

$V_{des,0}(h)$ – Velocidade de projeto do vento em edifícios ortogonais avaliadas em relação à altura h (AS_NZS)

$V_{des,0}(z)$ – Velocidade de projeto do vento em edifícios ortogonais em função da altura z (AS_NZS)

$v_m(z_s)$ – Velocidade média do vento para $z = z_s$ (EURO)

\hat{v}_z^2 – Quadrado da velocidade de rajada em 3 segundos a uma altura \bar{z} (ASCE)

w – Largura efetiva do edifício para a direção transversal do vento (NBCC)

$\ddot{X}_{m\acute{a}x}$ – Máxima aceleração na direção do vento (ASCE)

\ddot{x}_{max} – Máxima aceleração no topo da estrutura na direção do vento (AS_NZS)

\ddot{y}_{max} – Máxima aceleração no topo da estrutura na direção transversal do vento (AS_NZS)

z – Altura acima do solo (EURO)

z – Altura de referência sobre a estrutura acima da média do nível do solo local (AS_NZS)

z_s – Altura de referência para a determinação do fator estrutural (EURO)

z_0 – Comprimento de rugosidade (EURO)

$\hat{\alpha}$ – Inverso da velocidade de rajada (3 segundos) do expoente da lei de potência (ASCE)

β_w – Fração do amortecimento crítico nas direções transversal do vento (NBCC)

β_D – Fração do amortecimento crítico na direção do vento (NBCC)

Δ – Máxima deflexão lateral induzida pelo vento no topo do edifício na direção do vento (NBCC)

Δ_z – Altura da seção da estrutura sobre o qual atua a pressão do vento (AS_NZS)

$\sigma_{a,x}$ – Desvio padrão da aceleração característica na direção do vento do ponto estrutural em altura z (EURO)

$\sigma_{\ddot{x}}$ – Desvio padrão da aceleração na direção do vento (ASCE)

η_a – Primeiro modo de vibração da frequência natural da estrutura na direção do vento (AS_NZS)

η_1 – Frequência natural no primeiro modo de vibração na direção do vento (ASCE)

η_c – Primeiro modo de vibração da frequência natural na direção transversal do vento (AS_NZS)

$\Phi(z)$ – Forma modal fundamental (ASCE)

$\phi_1(z)$ – Primeira forma modal como uma função da altura z (AS_NZS)

$\phi_{1,x}(z)$ – Forma modal fundamental na direção do vento (EURO)

λ – Fator de modo de correção da força do vento geral (AIJ)

ρ – Massa específica do ar (EURO) + (ASCE)

ρ_{ar} – Massa específica do ar (AS_NZS)

ρ_B – Massa específica média do edifício (NBCC)

ξ – Expoente da forma modal (ASCE)

ζ – Razão de amortecimento estrutural em relação ao crítico (AS_NZS)

ζ – Expoente de modo de vibração (EURO)

1 INTRODUÇÃO

1.1 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DO ESTUDO

Este capítulo apresenta uma síntese da relevância dos critérios de conforto humano em relação à aceleração, a aceitabilidade, a tolerância e a percepção das vibrações induzidas pela ação do vento em ocupantes de edifícios altos. Também são expostas as justificativas, os objetivos do presente trabalho, assim como a sua organização.

Estando-se em pleno século XXI é fácil constatar ao olhar os grandes centros urbanos as mudanças que estão acontecendo no entorno das edificações, visto as alterações de padrões arquitetônicos. É fato a necessidade de que cada vez mais as construções se tornem verticais, a fim de atender o crescimento populacional urbano e o decréscimo desproporcional destes espaços urbanos.

Edifícios altos ou arranha-céus, como também são chamados, são cada vez mais comuns em nosso cotidiano e por muitas vezes estas estruturas tem o poder de encantamento das pessoas. São como a celebração do homem moderno em favor do progresso. Segundo Robertson (1973) apud Kwok et al. (2009) foi somente na década de 1970 que teve início a construção moderna de edifícios altos pois, até então, a construção civil encontrava-se em sua fase de infância. Aumentou-se a complexidade desses projetos não apenas para propósitos residenciais e comerciais, mas também para que estes fossem vistos como pontos de referência, símbolos de prestígio, de arrojos arquitetônicos e estruturais.

Neste contexto, o surgimento de novas tecnologias, o advento e a popularização do computador, o crescente estudo de técnicas, ensaios e surgimento de novos materiais, fez com que fosse viabilizado o arrojado e o refinamento destas estruturas. Com as modelagens numéricas cada vez mais capazes de representar os comportamentos dos elementos de uma estrutura, e por muitas vezes da estrutura como um todo, análises de fenômenos físicos tornam-se melhores conhecidas, estimativas de esforços e deslocamentos podem ser melhores aproximados, e por isso pode-se projetar estruturas altas, de grande porte e mais esbeltas.

De acordo, para o *Council on Tall Buildings and Urban Habitat – CTBUH* (2015) um edifício alto deve necessariamente estar enquadrado em umas das seguintes categorias: contexto,

proporção e/ou tecnologia, conforme Figura 1.1. Considerando-se que o conceito de edifício alto é relativo e não absoluto, o CTBUH afirma que caracterizá-lo a partir da altura ou número de andares é um indicador pobre, pois tal concepção é algo inerente das circunstâncias da sociedade e da percepção de cada indivíduo.

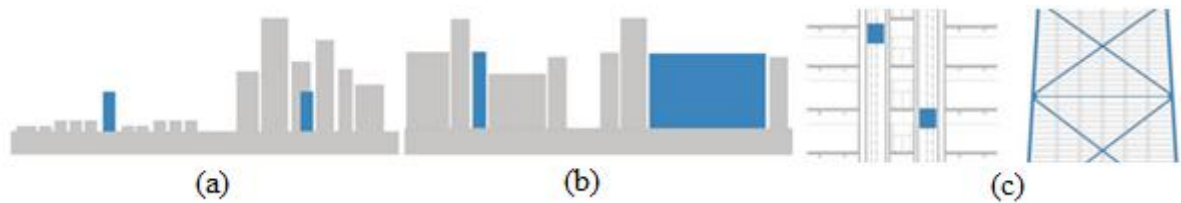


Figura 1.1: Categorias relacionadas à caracterização de edifícios altos: (a) contexto, (b) proporção e (c) tecnologia (fonte: CTBUH, 2015).

Porém, conforme Sartori (2010) relata, os estudos da ação do vento em edifícios altos tiveram início no fim do século XIX, mas foi por volta de 1930 que estes começaram a ser mais significativos, junto a forte tendência de construção de arranha-céus que surgia, como por exemplo, o *Empire State Building* (edificação com 380 metros de altura em Nova Iorque). Avançando-se no tempo, a partir da metade do século XX uma nova geração destes arranha-céus surgiu e atualmente, estes superam os 800 metros de altura, como por exemplo, o Burj Khalifa, em Dubai.

Os edifícios altos projetados atualmente no Brasil, segundo Rocha e Loredou-Souza (2011), têm apresentado rigidez, amortecimento estrutural e, conseqüentemente frequências naturais mais baixas do que seria esperado, portanto, aumentando-se assim a sensibilidade humana as excitações do vento.

Não se pode acreditar que tais edifícios altos ou arranha-céus sejam imunes às vibrações induzidas pela ação do vento. Assim, como qualquer outra estrutura mover-se-ão por esta ação e isto não significa falha no projeto, pois em geral, seria absurdamente caro projetar e construir edifícios que não se movimentem com a ação do vento. Segundo Cachuçó (2014) estes carregamentos horizontais além de exigirem soluções quanto à estabilidade da estrutura, demandam um nível de aceitação das condições de serviço das edificações. O grande

questionamento é como projetar para que essas estruturas apresentem níveis aceitáveis de acelerações aos seus ocupantes.

Uma das principais justificativas para o presente estudo é a constatação de que a exposição humana prolongada a essas vibrações, conforme Kwok et al. (2009), pode causar medo, desconforto, afetar a concentração de tarefas e até mesmo provocar tontura, enxaqueca e náuseas. Logo, torna-se vital no projeto de edifícios altos a predição dos movimentos provocados pelo vento e à avaliação dos seus efeitos sobre o conforto e bem-estar de seus ocupantes. Pode-se dizer que as respostas dinâmicas destes edifícios sensíveis ao vento desafiam as respostas humanas frente ao movimento destes.

Por outro lado, inúmeros pesquisadores, dedicados principalmente a medir acelerações, não são capazes de chegar a um consenso acerca dos procedimentos de determinação da aceleração e dos critérios de conforto (percepção, aceitabilidade e tolerância), apresentando-se atualmente, formulações distintas em normas e códigos. Ficam evidentes as incertezas acerca da subjetividade humana, tendo em vista os parâmetros psicológicos e fisiológicos, incluindo o tátil, o vestibular, o visual, o auditivo, o proprioceptivo e o cinestésico, bem como o comportamental, relacionados ao conforto de cada usuário em edifícios altos submetidos às excitações do vento. Ainda, há diferenças significativas nas metodologias usualmente utilizadas, levando em consideração que os critérios de conforto dos ocupantes são apresentados principalmente, num formato que permite uma abordagem do tipo determinística, seja pelo fato da facilidade de aplicação e aceitação. Porém, por outro lado, as abordagens probabilísticas poderiam, por exemplo, considerar as incertezas de parâmetros, tais como velocidade do vento de projeto e o prognóstico das respostas. Portanto, tendo em vista a complexidade do assunto, justifica-se ainda mais a necessidade de estudos nesta área.

A ABNT/NBR 6123/1988 (Forças devidas ao vento em edificações) apresenta de forma simplificada a indicação de cálculo de acelerações máximas para a verificação do conforto. No caso de edificações destinadas a ocupação humana e submetidas às oscilações induzidas pelas forças flutuantes do vento, esta Norma descreve que a amplitude máxima de aceleração não deve ultrapassar a $0,1 \text{ m/s}^2$ em média uma vez a cada dez anos, propondo que a sua verificação seja efetuada para a velocidade de vento com maior ocorrência que a velocidade do projeto estrutural, definida pelo projetista.

Esta pesquisa justifica-se também, tendo em vista aproximadamente 30 anos de sua publicação, a investigação de normas e codificações vigentes que possibilitem avaliar se o que atualmente encontra-se como recomendação brasileira, ainda apresenta um bom procedimento de determinação e um bom critério de conforto, principalmente levando-se em conta o aprimoramento dos estudos relacionados ao tema nestas quase três décadas.

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

O presente trabalho tem como objetivo relacionar os critérios de conforto, bem-estar, desempenho humano e aceitabilidade, considerando a percepção e a tolerância em edifícios altos excitados pelo vento. Serão estudadas as características de movimento dos edifícios em relação às vibrações (amplitude da resposta, velocidade, aceleração, frequência, duração, período de recorrência) e também as características individuais dos ocupantes (percepção, fisiológicas, psicológicas e influências sociais). Ainda, neste estudo, sendo realizada uma análise comparativa de normas e códigos, os procedimentos para determinação das acelerações e os critérios de conforto recomendados.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está organizado em nove capítulos, onde a divisão corresponde às etapas realizadas na pesquisa. O primeiro capítulo introduz e situa o assunto de uma forma geral, expõe a sua relevância, justifica o estudo realizado e por fim apresenta os objetivos da pesquisa, bem como a sua organização.

O segundo capítulo expõe a revisão bibliográfica, onde são apresentadas as pesquisas anteriores, em um breve histórico, relacionadas à percepção humana e aos critérios de conforto das acelerações frente às vibrações induzidas pelo vento em edifícios altos desde a década de 1970.

No terceiro capítulo são apresentadas as características fundamentais ao conforto humano em edifícios altos, sejam estes relacionados à resposta individual dos ocupantes ao movimento, bem como relacionados também as características do movimento dos edifícios.

No quarto capítulo são apresentados os procedimentos de determinação e os critérios de aceitabilidade das acelerações, através de uma análise comparativa entre os principais códigos e normas internacionais. Para este trabalho são analisadas as seguintes normas e códigos: ABNT/NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações – (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1988); AIJ: Guidelines for the evaluation of habitability to building vibration – (Architectural Institute of Japan, 2004); ASCE: Minimum design loads for buildings and other structures – (American Society of Civil Engineering Standard, 2010); AS/NZS 1170: Structural design actions - part 2: wind actions – (Australian/New Zealand Standard, 2011); EUROCODE 1: Actions on structures – part 1-4: general actions – wind actions – (European Committee for Standardization, 2010); ISO 6897: guidelines for the evaluation of the response of occupants of fixed structures, especially buildings and off-shore structures, to low-frequency horizontal motion (0,063 to 1 Hz) – (International Organization for Standardization, 1984); ISO 10137: bases for design of structures - serviceability of buildings and walkways against vibrations – (International Organization for Standardization, 2007); NBCC – (National Building Code of Canada, 2010).

No quinto capítulo é apresentada uma comparação entre as normativas analisadas relacionando os parâmetros para a determinação das acelerações.

No sexto capítulo é apresentada uma comparação entre as normativas analisadas relacionando aos critérios de conforto.

No capítulo sétimo é descrito o *CAARC Standard Tall Building*, um modelo padrão utilizado na aplicação de cada normativa, onde por fim serão avaliados e comparados os resultados.

No oitavo capítulo são apresentadas as estratégias para mitigar os movimentos provocados pela ação do vento em edifícios altos, sejam através de soluções aerodinâmicas e estruturais ou através de sistemas de amortecimento.

No nono capítulo são expostas as considerações finais, acompanhadas de um resumo geral dos resultados, além das conclusões atingidas.

No Apêndice A encontram-se as metodologias e procedimentos de cada norma/código analisado para a determinação das acelerações.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta um breve histórico das pesquisas anteriores relacionadas às vibrações induzidas pela ação do vento em edifícios altos, levando-se em conta a resposta humana a estes movimentos, tendo os limites de percepção como base para os critérios de conforto e desempenho humano ou aqueles relacionados à aceitabilidade ao movimento em edifícios altos. Na sua minoria, tais estudos têm-se realizado através de experimentos em edifícios reais, considerando a imprevisibilidade da ocorrência, a dificuldade de recrutamento de participantes e a relutância dos proprietários dos edifícios em permitir tais pesquisas. Por isso, mediante a complexidade pautada nas pesquisas em edifícios reais, a maioria dos estudos tem utilizado simuladores de movimento, numa tentativa de replicar a situação de vibração mais fidedigna, em condições cuidadosamente controladas, porém, ainda com o ônus, neste tipo de experimento, da dificuldade de reproduzir-se a vida realista e a minimização da própria expectativa do movimento em relação ao trabalho ou as tarefas realizadas cotidianamente.

2.1 HISTÓRICO DE ESTUDOS RELACIONADOS À PERCEPÇÃO HUMANA E DOS CRITÉRIOS DE CONFORTO DA ACELERAÇÃO

Khan e Parmelee (1971) investigaram a percepção das vibrações e os critérios em relação ao conforto dos ocupantes para os 100 andares do projeto do *John Hancock Center*, em Chicago. Através de uma plataforma giratória, que rodava a uma velocidade constante, 30 indivíduos de diferentes profissões, idades e sexo, foram submetidos à produção de uma série de acelerações que variavam de 1 a 20mg (1mg é igual a 1/1000 da gravidade, ou seja, aproximadamente $0,00981\text{m/s}^2$), os testes foram realizados para mais de 10 posições corporais sendo os participantes convidados a avaliar as acelerações dos testes em “não perceptíveis” ou “perceptíveis”. Os resultados indicaram que a postura corporal não afeta os limites de percepção das vibrações e que o valor limite da aceleração perceptível ao movimento, de uma avaliação ou de outra, foi superior a cerca de 4mg.

Chen e Robertson (1972) realizaram duas séries de experimentos em relação aos limites de percepção de vibração através de simuladores de movimento. No primeiro experimento, foram estudados os efeitos e interações de quatro fatores: frequência (0,067 Hz, 0,1 Hz e 0,2 Hz), o movimento do corpo (parado em pé ou andando), o nível de expectativa (nenhuma

experiência prévia, poucas experiências e muito experiente) e a orientação do corpo (costas, frente e lateral em relação à vibração). O pretexto para a realização do experimento foi um teste de visão, onde se pode concluir que os três primeiros fatores são os que influenciam mais significativamente. Dentre os resultados, observa-se que o limite de percepção de vibração diminui à medida que a frequência aumenta, portanto, relata a dependência da percepção humana em relação à frequência e ainda, que o movimento do corpo parado em pé e o nível de expectativa influenciam para menores limites de percepção de vibração, nestas condições.

Ainda, Chen e Robertson (1972) em uma segunda fase de experiência, investigaram os efeitos em relação à postura dos indivíduos (sentados ou em pé) em condição de vibração sinusoidal uniaxial e em uma frequência de 0,1 Hz. O pretexto para a realização do experimento foi a avaliação estética de uma série de imagens reproduzidas em *slides*. Concluíram que os limites de percepção às vibrações foram mais elevados para aqueles que se encontravam sentados do que para aqueles que mantinham sua postura em pé. Segundo Kwok et al. (2009), ambos trabalhos tratam de estudos que continuam sendo referenciados até hoje.

Hansen et al. (1973) realizaram estudos em dois edifícios com escritórios de aproximadamente 167 metros de altura, o qual fora submetido a dois grandes eventos de vento, que produziram vibrações consideráveis sendo percebidas por seus ocupantes. Os dois edifícios apresentaram diferentes limites e tipos de movimentos principais. Um deles apresentou sinais sonoros, como rangidos, e o outro demonstrou sinais visuais, próprios de movimento. Propôs-se que numa tentativa de impor critérios de vibração fosse considerado um limite para a aceleração rms de 5mg, ocorrendo, em média, não mais do que uma vez a cada seis anos, com base numa taxa de objeção dos ocupantes de 2%.

Goto (1975) realizou experimento com cobaias humanas através de simulador de movimento, em condições de vibração sinusoidal, frequências que variavam de 0,1 Hz a 1,0 Hz e amplitudes de 10 a 500 mm. Estudou a resposta humana frente aos aspectos psicológicos, fisiológicos, cinestésicos e ergonômicos. Concluiu em relação à percepção, como mais significativos os resultados: alta sensibilidade dos indivíduos do teste, dependência da frequência de vibração e dominação das acelerações na cabeça onde o órgão vestibular encontra-se alojado. Ainda, quanto aos limites de percepção, verificou que as mulheres em relação aos homens, que os adultos em relação às crianças e que a posição de pé em relação à sentada apresentaram um limite inferior de percepção de vibrações para os casos estudados.

O *National Building Code of Canada* (NBCC) em 1977 introduziu pela primeira vez em codificações critérios de utilização para edificações, sugerindo limites de acelerações de pico de 1% da gravidade para edifícios residenciais e 3% da gravidade para edifícios de escritórios, tendo em vista um período de recorrência de 10 anos.

Irwin (1981) realizou experimentos com cobaias humanas expostas a vibração sinusoidal em sala de ensaio rotativa. Os dez indivíduos do teste, três do sexo feminino e sete do sexo masculino, sendo todos de diferentes idades, estaturas, massas corporais e ocupações, foram submetidos a alguns testes separados. O primeiro teste foi realizado nesta sala onde havia uma janela, porém com as luzes apagadas e nenhum outro sinal visual e ainda, os indivíduos sentados em uma cadeira com o eixo de sua coluna alinhados com o centro de rotação desta sala. As frequências de vibração variaram de 0,05 a 5 Hz, sendo que para cada frequência o ensaio ocorreu duas vezes. O segundo ensaio foi idêntico ao primeiro, porém com o objetivo de avaliar os sinais visuais em relação à percepção das vibrações. Os indivíduos podiam visualizar através da janela, que anteriormente estava escurecida, uma parede de blocos de cor clara, distantes 5 metros da mesma. Ao combinar o resultado dos dois ensaios, Irwin propôs critérios para estruturas com baixas frequências de vibração.

Segundo Goto (1983), foram realizados estudos em cinco edifícios altos, estes com alturas superiores a 170 metros, após a passagem de um forte tufão em 1979 no Japão. A pesquisa investigou, através de questionários entregues aos ocupantes, as reações provocadas pelas vibrações. Pode-se concluir que mais de 90% dos usuários situados nos pavimentos superiores ao 13º andar perceberam níveis de vibração. Ainda, cerca de 40% destes mesmos ocupantes relataram “nunca” mais conseguirem tolerar tal situação ou apenas uma vez em 10 anos. Posteriormente Goto, tendo em vista que nenhum dos cinco edifícios dispunha na oportunidade de equipamentos para medição das acelerações, instrumentou um sexto edifício com acelerômetros. Com a passagem de um novo tufão em 1982, mediu uma aceleração máxima de 14mg, para uma velocidade média do vento de cerca de 11m/s no 60º andar. Ao combinar essas medidas de aceleração e os dados da pesquisa anterior, Goto propôs quatro gamas de aceleração em edifícios e suas correspondentes reações aos ocupantes, onde fica evidente que a habitabilidade da edificação é significativamente afetada pelas vibrações induzidas pelo vento.

Lee (1983) publicou um estudo de caso que investigou a reação de frequentadores de um bar/café em uma sala de conferência no 19º andar, situada a aproximadamente 78 metros de altura, durante uma forte tempestade. Na ocasião somente se dispunha de anemômetros, os quais registraram a velocidade do vento e por isso, os dados de aceleração foram determinados, posteriormente, em estudos em túnel de vento onde se obteve como aceleração máxima na direção norte-sul o valor de 5,5mg. Conclui-se que as vibrações do edifício foram claramente perceptíveis pelos ocupantes em pé ou sentados e agravados em caso de os mesmos estarem encostados em paredes ou visualizando objetos que continham líquidos.

Irwin e Goto (1984) continuaram a pesquisa realizada por Irwin em 1981, onde novamente realizaram uma série de testes em simuladores para determinar os limites de percepção humana e o desempenho/destreza em tarefas manuais em baixas frequências de vibração. Os procedimentos seguiram os testes anteriormente realizados. Para os de percepção foram aplicadas frequências que variaram de 0,02 a 10 Hz, todos na ausência de indicação visual e para os de desempenho e destreza manual foram aplicadas faixas de frequência de 0,06 a 10 Hz, em quatro conjuntos de atividades, como por exemplo, a tarefa de passar com as mãos, por entre o buraco de uma agulha, um fio. Os testes de limites de percepção apresentaram resultados muito semelhantes àqueles obtidos anteriormente. Já para os de desempenho e destreza manual, conclui-se que em geral, o tempo para a conclusão das tarefas foi menor em frequências superiores a 1,0 Hz. Ainda, para as frequências inferiores a 1,0 Hz, observou-se que mais indivíduos apresentaram sintomas como náuseas, desconforto e tonturas, principalmente na faixa de frequência de 0,1 a 0,5 Hz, o qual essas ocorrências eram predominantes.

Em 1984, com base nas pesquisas realizadas anteriormente por Irwin (1981) e Irwin e Goto (1984) e estas baseadas em Chen e Robertson (1972) e Hansen et al. (1973), levou-se ao desenvolvimento da ISO 6897/1984 (*International Organization for Standardization*, 1984) o qual trouxe diretrizes para a avaliação da aceitabilidade humana sujeita as vibrações de baixa frequência (gama de 0,063 a 1,0 Hz) provocadas pela ação das forças horizontais induzidas pelo vento. As orientações são dependentes da frequência natural da edificação, ao qual se relacionam com o valor de aceleração rms, medida a partir dos dez piores minutos de uma tempestade de vento, com um intervalo de recorrência de cinco anos, por exemplo, limitando a tolerância ao movimento de 0,2 Hz a uma aceleração de 5mg (rms).

Kanda et al. (1988) realizaram teste de percepção em simulador em condição de vibração sinusoidal uniaxial em cinco frequências: 0,33, 0,5, 0,8, 1,25 e 2,0 Hz e para cada uma das frequências, a amplitude de aceleração foi aumentada de 0,2 a 8,0mg em 10 passos ascendentes e descendentes. Todos os cento e dezenove indivíduos de ambos os sexos e diferentes idades foram testados em duas orientações do corpo: frente-costas e lateralmente. Os participantes acionavam um dispositivo de iluminação quando sentiam a vibração e desligavam quando não mais sentiam. Considerando os dados globais, foram propostos critérios probabilísticos de percepção as vibrações, em semelhança aos especificados pela ISO 6897/1984 (*International Organization for Standardization*, 1984).

Ainda, Isyumov et al. (1988) realizaram uma série de estudos em grande escala, com escopo de analisar historicamente os mais notáveis edifícios altos do mundo, entre eles: *Eiffel Tower*, o *Empire State Building*, *World Trade Center*, *John Hancock Tower*, *Commerce Court Plaza*, *CN Tower*, *Allied Bank Plaza* e *Citicorp Building*, em relação aos efeitos das vibrações causadas pela ação do vento e o conforto de seus usuários. Kwok et al. (2009) afirmam que estes estudos em grande escala, por muitas vezes, têm também como objetivos mensurar muitas variáveis durante longos períodos de tempo, ao qual tornam os resultados mais confiáveis do que aqueles obtidos em modestas pesquisas e ainda, podem fornecer dados significativos quanto ao desempenho, por exemplo, estrutural do edifício.

Melbourne e Cheung (1988) modificaram as curvas de aceitabilidade fornecidas pela ISO 6897/1984 (*International Organization for Standardization*, 1984) indicando que os critérios de aceleração estivessem definidos em função da aceleração de pico. Para tanto, sugeriram um fator de pico em função da frequência, para uma tempestade de vento de duração de 10 minutos, aplicado para o valor de aceleração rms para representar mais fielmente o processo Gaussiano comumente experimentado em vibrações de edifícios excitados pelo vento.

Kanda et al. (1990) estenderam os estudos anteriores e realizaram com base na mesma metodologia experimentos para outras orientações do corpo. Observaram que tanto os indivíduos deitados, quanto em pé, foram mais sensíveis às vibrações na direção lateral. Constataram ainda que, os limites de percepção para os indivíduos que se encontravam deitados foram maiores do que aqueles que se encontravam em pé, assim como nos testes anteriores que comparavam os que se encontravam sentados em relação aos de pé. Por fim, realizaram os testes seguindo as mesmas frequências e o mesmo protocolo, porém aplicando

vibrações aleatórias, testes adicionais e observaram semelhança nos resultados daqueles obtidos com a aplicação de vibração sinusoidal. Kwok et al. (2009) afirmam que embora os resultados não tenham sido significativamente diferentes em condições de vibração aleatória e sinusoidal, a amostra do teste fora demasiadamente pequena para tal observação ser feita de forma conclusiva.

Ainda em 1990, Goto et al. utilizaram de um simulador de movimento multieixo para estudar os efeitos das vibrações nos ocupantes, com base em um edifício residencial de cinquenta andares e uma frequência natural de vibração de 0,23 Hz, onde foram investigados dois tipos de forma de vibração: vibração elíptica e vibração circular, em um intervalo de níveis de aceleração de 1,38 a 15,2mg. Os parâmetros estudados foram: limites de percepção, sentimentos de mal-estar, dificuldade de se manter equilibrado e eficiência do trabalho. Os resultados mostraram que para ambos os tipos de vibração a uma aceleração de 5,0mg, foram nitidamente perceptíveis para 50% dos indivíduos do teste. Além disso, 80% dos indivíduos relataram mal-estar quando submetidos à aceleração de 10mg, com pequenas diferenças quanto às vibrações circulares ou elípticas. Também, relataram que para acelerações superiores a 3mg foram encontradas dificuldades na eficiência de uma tarefa, por exemplo, derramar água em uma garrafa. Logo, concluíram que a habitabilidade de um ambiente residencial não será prejudicada se a aceleração máxima for igual ou inferior a 3mg, o que é um valor relativamente baixo para o limite de percepção. Segundo Kwok et al. (2009) este estudo não investigou os efeitos da frequência, uma vez que foi direcionado somente para avaliação de uma frequência e ainda, afirma que para as construções reais as vibrações são improváveis que se apresentem puramente do tipo elípticas ou circulares, mesmo sob forte excitação, por exemplo, induzida por vórtices.

Shioya et al. (1992) estudaram os limites de percepção humana em vibrações sinusoidais elípticas e circulares uniaxiais, através de uma mesa vibratória de seis graus de liberdade em uma sala de teste devidamente isolada acusticamente e dos sinais visuais. Os parâmetros estudados foram: frequências de 0,125, 0,16, 0,20, 0,25 e 0,315 Hz, formas elípticas e circulares e por fim, a orientação do corpo. As quarenta e sete cobaias humanas foram testadas e avaliadas para cada condição do ensaio, classificando a percepção da vibração em uma escala de cinco níveis, que iniciavam da classificação de imperceptível a fortemente perceptível. Limites de percepção probabilística, com base numa função de distribuição de probabilidade log-normal, para todas as frequências do teste foram determinados, obtendo-se

resultados semelhantes ou ligeiramente acima da linha média daqueles determinados pela ISO 6897/1984. Para Kwok et al. (2009), cabe ressaltar que este estudo foi realizado sem a distração de alguma tarefa, pondo-se a questionar a fidelidade da representação de uma situação real de vibração ocasionada eventualmente pela ação do vento. Além disso, falta a imprevisibilidade de vibrações do tipo aleatória, normalmente experimentadas por construções reais excitadas pela ação do vento, concluindo assim que os limites de percepção podem ser diferente para dada situação real.

Melbourne e Palmer (1992) desenvolveram ainda mais os critérios de aceleração, expressando as acelerações de pico aceitáveis como uma função da frequência de vibração e do período de recorrência.

Shioya e Kanda (1993) estudaram as vibrações aleatórias de banda estreita utilizando a mesma mesa vibratória de seis graus de liberdade e o mesmo protocolo do experimento anterior. Novamente, sessenta e um indivíduos foram testados para se verificar o nível de percepção, através de um botão que representava a classe da vibração sentida. Os limites de percepção probabilística, com base numa função de distribuição de probabilidade log-normal, foram encontrados para ser quase constantes e independentes da frequência, logo, em nítido contraste com todos os resultados de estudos anteriores. Porém, a causa desta discrepância não foi discutida.

Também em 1993, Noguchi et al. estudaram, através de um simulador de movimento de seis graus de liberdade, a resposta humana a várias formas de vibrações sinusoidal, nas frequências de 0,1, 0,125, 0,167 e 0,2 Hz e amplitudes de aceleração de 4,8 a 14,5mg. Vinte indivíduos foram submetidos a testes de reações psicológicas através de dois questionamentos: primeiro quanto aos níveis de percepção de vibração, que variavam em cinco categorias, iniciando em imperceptível até fortemente perceptível e o segundo, para avaliar o comportamento qualitativo em três categorias: desconfortável, mal-estar e dificuldade física em resposta ao equilíbrio. A sensação de desconforto, seguida pela dificuldade física de equilíbrio e pelo mal-estar foram descritas conforme se aumentavam as amplitudes das acelerações.

Isyumov (1993) sugeriu critérios de aceitação e limites de aceleração para garantir o conforto dos ocupantes, ambos para um período de recorrência de um ou dez anos. Para o critério de

período de recorrência de um ano especificou-se duas gamas de aceleração máxima: 5 a 7mg para edifícios residências e 9 a 12mg para edifícios comerciais. Segundo Kwok et al. (2009), a falta de dependência da frequência neste critério de aceitabilidade é a diferença mais evidente em comparação a outros critérios.

Mais tarde, em 1996, Isyumov e Kilpatrick, apresentaram uma revisão das acelerações provocadas pela ação do vento em 27 edifícios altos, localizados no Japão e nos EUA, além de ensaiarem mais 47 edifícios em túnel do vento. Relacionaram as acelerações provocadas com a percepção das vibrações em engenheiros, arquitetos, construtores e proprietários. Dentre os resultados de maior expressão destacam-se às indicações de que os sinais visuais e de áudio desempenham papel significativo na percepção das vibrações em seus ocupantes, que as acelerações aceitáveis em edifícios tendem realmente aquelas apresentadas nos estudos anteriores e por fim, concluíram que a percepção das vibrações e conseqüentemente, as vibrações inaceitáveis são dependentes da frequência.

Denoon et al. (1999), Denoon et al. (2000a) e Denoon (2001) estudaram também a percepção e a tolerância humana frente as vibrações através de experimentos de campo, em três torres instrumentadas com anemômetros e acelerômetros. As estruturas estudadas foram: *Sydney Airport Control Tower*, *Brisbane Airport Control Tower* e *Port Operation Control Centre* (POCC) onde obtiveram como primeira frequência natural os valores de 0,94Hz, 0,54 Hz e 0,39 Hz, respectivamente. Para a torre de *Sydney* os controladores de tráfego aéreo foram submetidos à observação em longo prazo e posteriormente, a questionários de respostas. Já para os controladores de *Brisbane* foram utilizados botões de classificação de vibração ao qual eram acionados em conformidade com o nível de vibração sentido. Para os controladores da *Port Operation* haviam somente questionários de respostas. Por fim, concluíram que a percepção das vibrações pelos ocupantes é dependente da frequência e os resultados obtidos nesta pesquisa estavam consistentes com a ISO 6897 (1984).

Também Denoon et al. (2000b) e Denoon (2001) realizaram experimentos em simulador de movimento para avaliar a percepção humana frente as vibrações, os limites de tolerância e o desempenho cognitivo no POCC através de uma mesa vibratória unidirecional. Os resultados sugeriram que altas vibrações induzidas pelo vento em construções têm efeitos mínimos sobre o desempenho cognitivo, o que para Kwok et al. (2009), tais resultados, estão longe de serem conclusivos.

Burton et al. (2004a), Burton et al. (2004b), Burton et al. (2005) e Burton et al. (2006) apresentaram uma série de experimentos em simulador de movimento, relacionando o estudo da resposta humana às vibrações induzidas pelo vento em edifícios altos. Tal simulador fora construído na *Hong Kong University of Science and Technology* (HKUST), o qual é capaz de simular através de dois graus de liberdade, vibração sinusoidal e vibração aleatória com frequências entre 0,1 e 1,2 Hz.

Burton et al. (2004b) realizaram testes de percepção de vibração em duzentos e cinquenta cobaias humanas utilizando tal simulador de movimento. Para vibração aleatória foram testadas três frequências e quatro acelerações de pico: 0,125, 0,25 e 0,5 Hz e 1, 2, 4 e 8mg, respectivamente. Os indivíduos deste teste foram submetidos a seis tarefas cognitivas e duas não cognitivas, em algumas distintas orientações de corpo. Diferente da maioria dos estudos anteriores, neste houve a preocupação de não estar somente focado na percepção e sim, que o indivíduo fosse surpreendido com o movimento ao estar realizando alguma tarefa. Os resultados demonstraram que os limites de percepção de vibração bidirecionais foram consistentemente inferiores do que a vibração frente-costas e ainda, que para os mesmos níveis de aceleração, a percepção de vibração, por exemplo, para a frequência de 0,5 Hz foi anterior a de 0,125 Hz, portanto, sugerindo novamente, uma forte dependência da frequência em relação às percepções de vibrações.

Também Burton et al. (2004a) e Burton et al. (2006) realizaram uma série de testes no simulador de movimento, em dez indivíduos para estudar a resposta humana uniaxial horizontal (frente-costas e lateral) em vibrações sinusoidais na faixa de frequências baixas (0,15, 0,50 e 1,00 Hz) e uma aceleração de pico constante de 13,5mg. Enquanto os indivíduos posicionados sentados, assistiam a um filme, estes foram monitorados por acelerômetros e câmeras de vídeo, quanto às movimentações na cabeça provocadas pela aceleração do simulador de movimento. Observou-se que as magnitudes dessa aceleração da cabeça eram dependes da frequência de vibração e por ser na cabeça que se encontra os órgãos vestibulares, sugere-se também que a percepção humana a vibração seja dependente da frequência de vibração.

O *Architectural Institute of Japan* publicou em 2004 *Guidelines for Evaluation of Habitability* (AIJ-GEH/2004) baseado nos experimentos anteriores, principalmente nos estudos posteriormente publicados por Tamura et al. (2006) através do simulador de movimento e

também, baseados pela própria ISO 6897/1984 (*International Organization for Standardization*, 1984), orientações fundamentadas nos limites de percepção probabilísticos e na relação dependente com a frequência, ao qual representam cinco níveis de probabilidade de percepção, de 10% a 90%, para a avaliação das vibrações em edifícios excitados pelo vento.

Por exemplo, mostrando como mais sensível à linha H-90, onde 90% dos ocupantes perceberam movimento a uma aceleração (pico) de 8mg e a uma frequência de 0,3 Hz. Estas linhas básicas de avaliação especificam acelerações de pico, de recorrência de um ano, ou seja, indicam apenas um nível de movimento perceptível, porém, as diretrizes do AIJ não especificam níveis aceitáveis de habitabilidade, ao qual é deixada inteiramente aos engenheiros, projetistas e proprietários decidirem o nível de conforto aos ocupantes.

Em outra experiência realizada por Burton et al. (2005) em simulador de movimento, mais de quinhentos indivíduos foram testados ao realizar tarefas manuais e cognitivas, em condições de vibração para uma gama de frequências de 0,16 a 0,50 Hz e amplitudes de aceleração de 1 a 24mg. Além de demonstrar como resultados a dependência da perturbação nas tarefas em relação às frequências, observou-se que quanto menor a duração da exposição, menor são os sintomas relacionados para uma mesma condição de evento, mostrando assim a importância de se considerar não somente os efeitos de curta duração, como tempestades, mas da necessária observância também aos eventos de longa duração.

Tamura et al. (2006) realizaram testes em simuladores de movimento, ao qual os ocupantes foram submetidos a vibrações aleatórias e sinusoidais, para frequências de 0,15 a 0,315Hz, 0,33 a 2,0Hz e 1,0 a 6,0Hz. Tais experimentos não levaram em conta fatores auditivos e visuais, e foram avaliados somente para a posição sentada. Observaram que as vibrações aleatórias e sinusoidais não apresentam grande variação na percepção humana, que a percepção humana tem caráter log-normal, tomando como base a aceleração de pico e ainda que o nível social e econômico dos habitantes das edificações influenciam na tolerância as vibrações.

Ainda, Burton et al. (2007) consideraram a necessidade de se abordar as reações de medo, alarme e desconforto humano causados pelas vibrações induzidas pelos ventos. Observou-se que o medo e o alarme se apresentam tipicamente nos indivíduos submetidos aos ventos pouco frequentes, como tufões e tempestades. Já o desconforto é provocado pela vibração frequente associada a eventos de ventos regulares, típicos de cada região e por consequência,

de mais longa duração. Com isso, levou-se a proposição de critérios que relacionam a duração do vento e o tempo de exposição do indivíduo, que se assemelham, em magnitude, àqueles apresentados pela ISO 6897/1984 (*International Organization for Standardization*, 1984).

Kwok e Hitchcock (2008) utilizaram o simulador de movimento da HKUST para testes de conforto dos ocupantes, com base nas vibrações induzidas pelo vento de um estudo anterior realizado em túnel de vento, em modelo aeroelástico de um edifício alto e ajustado para reproduzir as acelerações equivalentes em um protótipo em escala. Foram submetidos os participantes a certo número de vibrações aleatórias, onde cada um respondeu questionário avaliando seu nível de conforto para cada condição apresentada, classificando-os desde nenhum movimento percebido a muito desconfortável. Observou-se que, conforme esperado, as classificações de desconfortável foram aumentando conforme se aumentavam também as acelerações. Também, com base nos resultados de túnel de vento, foram submetidos os participantes a experimentarem as vibrações produzidas pelas diferentes velocidades do vento, bem como os diferentes intervalos de recorrência, proporcionando assim a possibilidade da avaliação quanto ao conforto relacionado com a duração e frequência de ocorrência da vibração do edifício. Pode-se perceber que os ocupantes toleraram vibrações com amplitudes suficientemente grandes, desde que não ocorram com frequência. Porém de maneira inversa, a ocorrência frequente de vibrações, mesmo com menores amplitudes, pode causar maior desconforto aos ocupantes. Ainda, com base nos resultados de túnel de vento e valor de amortecimento específico, os participantes puderam experimentar os potenciais benefícios na redução das amplitudes de vibração e conseqüentemente, um maior conforto associado ao aumento no valor de amortecimento, permitindo assim, que projetistas, construtores e proprietários possam avaliar a necessidade de adotar medidas de mitigação de vibração e conduzir análises de custo benefício para a mais adequada medida disponível.

Também em 2007, a ISO 6897/1984 (*International Organization for Standardization*, 1984) passou pelo processo de revisão ao qual foi publicada a versão final ISO 10137/2007 (*International Organization for Standardization*, 2007) de que trata da manutenção de edifícios e calçadas contra vibrações. A linha de aceitação para residências foi semelhante à linha de probabilidade de percepção H-90, dado pelo AIJ-GEH/2004 (*Architectural Institute of Japan*, 2004) e da linha de aceitação para escritórios é tida por 70%. Segundo Kwok et al. (2009), a linha H-90 representa um limite de percepção e não aborda diretamente o conforto

dos ocupantes, portanto, os valores de aceleração são significativamente mais baixos do que os níveis de aceleração aceitáveis sugeridas em outros critérios.

Wu et al. (2008) também realizaram testes em simulador de movimento biaxial, capaz de gerar ondas sinusoidais e aleatórias em uma faixa de frequência de 0 a 3,0 Hz e amplitudes de acelerações de até 24mg a 0,1 Hz. Num programa de testes para se estudar o conforto dos ocupantes, vinte e oito indivíduos foram submetidos a acelerações que variavam de 3,2 a 32mg e a frequências de 0,1 a 1,0 Hz, os quais, durante os testes encontravam-se livres de orientação postural, bem como podiam executar qualquer tarefa. Os resultados apresentados foram preliminares e inconclusivos, mas evidenciaram, segundo Kwok et al. (2009), que o desconforto aos usuários aumenta à medida que se aumentam as amplitudes de aceleração para as todas as frequências testadas.

Morava et al. (2010) trouxeram a experiência da *RWDI/Motioneering* na realização de testes em edifícios, num simulador de movimento de 6 graus de liberdade, construído na *Centre for Marine Simulation, Fisheries and Marine Institute of Memorial University in St John's, Newfoundland and Labrador, Canada*. Considerando que os movimentos induzidos pelo vento são aleatórios e não unidirecionais e que, os efeitos de percepção estão relacionados com o ambiente circundante, tal simulador, basicamente, é uma sala configurável que pode acomodar em seu interior cerca de 15 pessoas, sentadas ou em pé. O exterior inclui uma tela de vídeo parabólica que pode ser usada para fornecer a experiência panorâmica de estar no local real do edifício de interesse (os arredores da cidade e sua paisagem são simulados na tela). Para o projeto do *Chicago Spire*, com mais de 600 metros de altura, foram convidados projetistas e proprietários a testarem diferentes andares, diferentes intensidades de vento e a possibilidade ou não da utilização de amortecedor de massa. Concluíram que tal como esperado, a maioria classificou como desconfortável conforme a magnitude da aceleração era ampliada. Verificaram, também, que é possível suportar vibrações de amplitudes suficientemente grandes, desde que estas não ocorram com frequência, porém, a ocorrência frequente de vibrações, mesmo com menores amplitudes, pode causar um maior desconforto e por fim, os participantes foram capazes de experimentar os benefícios potenciais de uma redução na amplitude de vibração e um maior conforto associado com o aumento no valor de amortecimento e redução nas vibrações induzida pelo vento.

Burton et al. (2011) realizaram estudos em simulador de movimento a fim de avaliar o desempenho dos participantes em uma tarefa de controle manual, enquanto sujeitos às vibrações. Tais movimentos caracterizavam-se como aleatórios e de banda estreita, típico de excitação por vento em edifícios altos. As frequências variaram de 0,125 Hz a 0,5 Hz e as amplitudes de acelerações de 2 a 30mg. Foram medidos os tempos para conclusão da tarefa e a precisão para realização da mesma. Os resultados mostraram que quando comparadas com a condição estática, não havia significativas melhoras ou pioras no desempenho, em função da frequência e da aceleração. Os autores sugeriram que níveis mais elevados de aceleração ou durações mais longas ao movimento podem ser necessários para induzir uma degradação ao desempenho. Foi destacado, ainda, que a dificuldade da tarefa manual cumpre um papel importante no desempenho do ocupante. Para Kwok (2013) tal estudo, por não definir o nível de dificuldade da referida tarefa pode, potencialmente, ter mascarado a dificuldade adicional induzida pelo movimento da vibração.

Kwok e Kareem (2013) realizaram também experimento no simulador de movimento da *Hong Kong University of Science and Technology* (HKUST), com o objetivo de avaliar a influência das vibrações induzidas pelo vento em edifícios altos, sobre o desempenho de tarefas humanas. Os participantes da pesquisa foram submetidos a vibrações do tipo sinusoidais e aleatórias, enquanto realizavam uma tarefa, submetidos a frequências de vibrações de 0,125 Hz, 0,25 Hz e 0,5 Hz, com amplitudes de acelerações que variaram de 8 a 30mg em várias orientações posturais. Os resultados mostraram que o aumento na frequência e, particularmente, o nível de aceleração dão origem a degradações no desempenho, principalmente mensurável quanto ao tempo de execução da tarefa.

Lamb et al. (2013) realizaram pesquisa no *Wellington Central Business District* (CBD) em Wellington, na Nova Zelândia, através de levantamento de questionários, onde foram estudadas as experiências em relação aos movimentos provocados pelo vento em mais de 1000 indivíduos, observando-se, principalmente: determinar se os indivíduos mais suscetíveis a doença do movimento evitam trabalhar em edifícios alteados, examinar a relação entre a suscetibilidade a doença do movimento, os efeitos em relação ao desempenho produtivo, comportamento compensatório e de reclamação. Concluíram que em circunstâncias normais, os indivíduos que são altamente suscetíveis à doença do movimento evitam ambientes que tendem a sofrer vibrações. Também relataram como característica dos indivíduos suscetíveis à doença do movimento, as dificuldades de concentração, redução de desempenho, redução de

produtividade e a necessidade de compensação, numa tentativa de melhorar o seu conforto, como por exemplo, de saídas do edifício para pausas ou caminhadas ao redor do escritório. Por fim, concluíram que as queixas formais não são um bom indicador dos efeitos dos movimentos nas edificações, tendo em vista que mesmo com os efeitos adversos ao movimento, geralmente, os ocupantes não as fazem, não podendo assim, ser unicamente parâmetro para avaliação de desempenho do edifício.

Lamb et al. (2014) estudaram a resposta dos ocupantes de um edifício alto localizado novamente em CBD Wellington, na Nova Zelândia. Tal pesquisa teve como objetivo avaliar as mudanças de bem-estar e desempenho destes trabalhadores. Uma amostra de 47 indivíduos que desenvolvem seus trabalhos em pisos elevados de um prédio de escritórios foi comparada com as respostas de 53 indivíduos que trabalham no mesmo edifício, porém em andares mais próximo ao térreo. Concluíram que a doença do movimento (náuseas e tontura, por exemplo) é emergente as vibrações das construções, ao qual se desenvolve após uma determinada duração a exposição do movimento e que também se manifesta anteriormente pelos sintomas da Síndrome Sópita (cansaço, distração, mau humor, desmotivação, por exemplo) aos quais ambas, reduzem significativamente o desempenho nas tarefas, acarretando em pausas mais frequentes e a automedicação. Por fim, relatam que raramente são dadas queixas formais sobre os movimentos e conseqüentemente, o seu desconforto.

Ferrareto et al. (2015) estudaram também o desempenho dos ocupantes frente as ações de vento em edifícios altos. Apresentam uma avaliação em relação aos critérios de conforto de diversos autores e normativas, bem como as suas divergências. Alinham por fim a hipótese de que, no futuro, os usuários devem estar cientes dos movimentos de construção e educados para lidar com estes. Também afirmam que os sintomas da doença do movimento devem ser considerados a fim de levar a concepções estruturais menos conservadoras.

Galsworthy et al. (2015) apresentam também um estudo relacionando a tendência de construção de edifícios super esbeltos, aos quais os critérios de conforto, para estas construções tem gerado críticas, principalmente em relação ao período de recorrência, ao qual os eventos mais frequentes de ação do vento podem ocasionar maior desconforto aos usuários, apresentando assim uma comparação do critério de conforto para 1 mês de período de recorrência.

Burton et al. (2015) apresentam, em breve resumo, um amplo trabalho sobre as ações do vento em edifícios altos e a sua condição de projeto para a habitabilidade. Tal estudo apresenta um estado da arte das respostas dos ocupantes destes edifícios altos, bem como dos critérios de conforto. Fornece informações sobre as características fisiológicas, psicológicas e comportamentais dos ocupantes, estudos da resposta humana em simuladores e construções reais, uma revisão dos critérios e dos padrões internacionais, diretrizes sobre limites de percepção e aceitabilidade, além de estratégias de mitigação para reduzir o movimento dos edifícios. Será lançada em breve uma monografia sobre o tema pela ASCE (*American Society of Civil Engineers*).

Por fim, faz-se necessário a continuidade de pesquisas e estudos relacionados ao conforto humano em edifícios altos excitados pelo vento, levando-se em conta o aumento significativo, desde a metade do século XX, da construção de edifícios altos no Brasil e no mundo. Pode-se considerar que a resposta dos ocupantes a estes movimentos ainda é um grande desafio aos projetos de edifícios altos.

3 PARÂMETROS RELACIONADOS AO CONFORTO

Muitos são os fatores relacionados ao conforto humano em edifícios altos excitados pelo vento, onde a interação destas características e propriedades compõe o sistema de detecção, determinando assim a sensibilidade de um indivíduo ao movimento de um edifício. Segundo Michaels et al. (2013), às características individuais dos ocupantes e as características do movimento dos edifícios podem definir a resposta dos ocupantes ao movimento induzido pelo vento.

Michaels et al. (2013), apresentam uma lista abrangente de fatores relacionados as características da resposta humana às vibrações, que podem ser expressos conforme Quadro 3.1:

Quadro 3.1: Fatores que influenciam o comportamento dos ocupantes de edifícios altos.

Características dos movimentos dos edifícios	Características individuais dos ocupantes
Frequência; aceleração; duração; período de recorrência; velocidade.	<p>Percepção: percepção ao movimento; sensibilidade ao movimento; idade; sexo.</p> <p>Fisiológicas: náuseas; fadiga; dores de cabeça; concentração; tontura; equilíbrio; conforto; suscetibilidade a doença do movimento.</p> <p>Psicológicas: medo e ansiedade; aborrecimento; personalidade; disposição;</p> <p>Influências sociais: <i>status</i> social; proprietário/usuário; agrupamento social; condição socioeconômica; expectativa cultural de grupo.</p>

(fonte: adaptado de MICHAELS ET AL., 2013)

Com intuito de descrever os mais relevantes aspectos destes fatores, sucintamente, os mesmos são apresentados a seguir.

3.1 CARACTERÍSTICAS INDIVIDUAIS DOS OCUPANTES AO MOVIMENTO

3.1.1 – Percepção

De acordo com Burton et al. (2006), o movimento pode ser percebido de várias formas tais como, pelos órgãos vestibulares, sensações proprioceptivas, sinais auditivos e através de pistas visuais. Isyumov e Kilpatrick (1996) e Burton et al. (2015) indicam que os sinais visuais e de áudio desempenham papel significativo e são as formas mais comuns de percepção das vibrações em seus ocupantes. Os sinais visuais podem ser aqueles internos e externos. Dos exemplos de indicações visuais internas tem-se o balanço de lustres de luzes, a movimentação de persianas/cortinas, o balanço de plantas, líquidos e objetos suspensos. Além disso, a paralaxe visual dos observadores em relação aos outros podem resultar em efeitos na percepção do movimento. Os sinais visuais externos são caracterizados pela movimentação de árvores, edifícios, sinalizações e outras indicações que incidam a velocidade do vento forte.

Irwin (1978) relaciona as pistas de ruído do vento em edifícios mal isolados, em revestimentos ou outros elementos de construção, sons criados a partir de movimentos de tráfego e do fluxo do vento, a observação do movimento relativo, especialmente sobre os movimentos de torção e por fim, a própria expectativa de movimento como possibilidades de desencadear ou exagerar o medo do movimento sobre os ocupantes. Burton et al. (2015) também cita que os sinais audíveis de movimento podem fornecer informações sobre a frequência do movimento e outros não. Sinais acústicos comuns (impacto de janelas, cortinas balançando, rangidos resultantes da movimentação estrutural) podem proporcionar aos ocupantes informações a cerca da frequência natural do movimento.

Segundo Irwin (1981) por meio de sinais visuais, auditivos e pelo sistema vestibular é que a aceleração angular pode ser sentida. As pistas visuais, mesmo que para pequenas oscilações de torção, podem causar uma amplificação significativa nos limites de avaliação propostos.

Ferrareto et al. (2015) afirmam que os órgãos otólitos (aqueles responsáveis pela manutenção do equilíbrio e da orientação), no sistema vestibular, são profundamente responsáveis pela detecção das acelerações, assumidos pelas sensações proprioceptivas. Segundo Irwin (1981)

os canais semicirculares do sistema auditivo são responsáveis pela detecção das acelerações angulares.

Irwin (1978) relata que as pessoas sensíveis às vibrações podem provocar a percepção de movimento em outras e Burton et al. (2015) afirmam que a probabilidade aumenta quando há um grande número de pessoas reunidas.

Os fatores como postura corporal (sentado, em pé, deitado e andando), sexo, idade e direção do movimento complementam os demais fatores da resposta humana frente às vibrações. Goto (1975) afirma que as mulheres em relação aos homens, que os adultos em relação às crianças e que a posição de pé em relação à sentada apresenta um limite inferior de percepção de vibrações. Chen e Robertson (1972) também concluíram que as vibrações foram mais elevadas para aqueles que se encontravam sentados do que para aqueles que mantinham seu movimento do corpo parado (parado em pé ou andando). Lee (1983) relata que as vibrações do edifício são claramente perceptíveis pelos ocupantes em pé ou sentados e agravados em caso de os mesmos estarem encostados em paredes.

3.1.2 – Fisiológicas

Burton et al. (2015) relatam que a resposta humana é complexa fisiologicamente e comportamentalmente e são suscetíveis de serem mascaradas pela maneira que se pode interpretá-la e relatá-la. De acordo com Chang (1973) se qualquer órgão interno do corpo humano entrar em ressonância própria, um desconforto poderá ser percebido.

Segundo Burton et al. (2015) há uma grande variação na capacidade individual de se detectar a percepção ao movimento e a suscetibilidade a doença do movimento. Quando detectado, os ocupantes podem sentir até mesmo enjoo (Hansen et al., 1973; Goto, 1983; Burton, 2006). Estes sintomas clássicos, que também se somam às tonturas, foram estudados por pesquisadores, como Irwin e Goto (1984), que identificaram em seus estudos uma predominante ocorrência de sintomas de náuseas, desconforto e tonturas, principalmente na faixa de frequência de 0,1 a 0,5 Hz. Também Hansen et al. (1973) realizaram pesquisas em relação aos ocupantes de dois edifícios, descobrindo que 36% dos entrevistados em um prédio e 47% em outro, experimentaram sintomas da doença do movimento durante uma tempestade de vento. Goto (1983) observou que após um tufão, 72% dos ocupantes relataram sintomas fisiológicos ou psicológicos, incluindo a doença do movimento, como dores de cabeça, “mal-

estar” e tensão. Mais recentemente, outros pesquisadores tem se dedicado a estudar os sintomas que se antevem aos costumeiros, conhecida como Síndrome Sopite (Lamb et al., 2014 apud Graybiel & Knepton, 1976).

Segundo Lamb et al. (2014), a Síndrome Sopite caracteriza-se pelos sintomas de cansaço, distração, baixa motivação e mau humor. Em dois estudos mediu-se os efeitos do movimento, a suscetibilidade individual, as preferências e as reclamações dos ocupantes de edifícios altos excitados pelo vento. Constatou-se uma forte preferência dos ocupantes de se trabalhar nos andares mais baixos. Indivíduos altamente suscetíveis foram mais propensos a experimentar sintomas de enjoo (relatado por um quinto dos ocupantes), afirmando ser provavelmente uma interação complexa entre duração, intensidade e frequência do movimento. Aproximadamente metade dos ocupantes relataram dificuldades de concentração, sintoma característico da Síndrome Sopite. Além destes, entre os efeitos mais relatados foram o fato de sentir-se “estranho”, seguido por tonturas e náuseas, conforme Figura 3.1. Apesar dos entrevistados julgarem o movimento do edifício como desconfortável e desagradável, Lamb et al. (2014) afirmam que quase nunca formalmente se queixam, contradizendo assim a crença de que a queixa formal é um indicador fiel ao desempenho da edificação. Para Michaels et al. (2013), em relação as queixas dos ocupantes, estas estão associadas a cultura do indivíduo e tem um impacto potencial sobre a aceitabilidade. Por fim, Lamb et al. (2014) concluíram que tais sintomas reduzem o desempenho no trabalho e que os indivíduos afetados tendem a gerenciar o seu próprio desconforto com pausas mais longas e a automedicação, por exemplo, com o uso de analgésicos. Michaels et al. (2013) sugerem que trabalhadores de escritórios tendem a uma taxa de absentismo de aproximadamente 20% devido a doença do movimento.

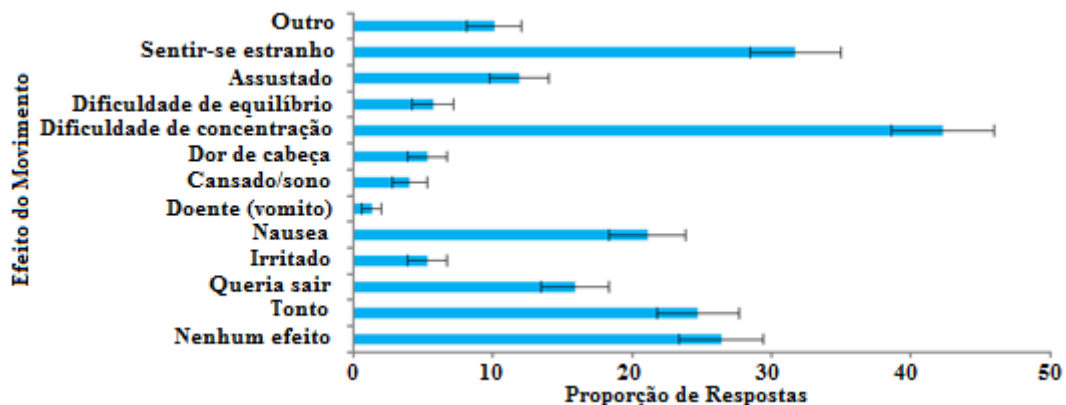


Figura 3.1: Efeitos do movimento relatado pelos ocupantes (fonte: LAMB et al., 2014).

3.1.3 – Psicológicas

Segundo Burton et al. (2015), a busca por respostas de como os seres humanos percebem e respondem as alterações em seus ambientes físicos está entre os desafios conceituais técnicos da moderna psicologia. Ainda, afirma que o corpo humano é uma rede fechada e integrada de subsistemas interagindo (estrutural, hidráulico, elétrico, químico e termodinâmico), onde o cérebro humano é a unidade de controle central, completada por sistemas óticos e acústicos.

Michaels et al. (2013) relacionam a personalidade e a disposição como características psicológicas próprias de cada ocupante frente as vibrações. Burton et al. (2015) afirmam que a resposta biodinâmica do corpo humano varia de modo aleatório de pessoa para pessoa.

3.1.4 – Influências Sociais

Segundo Burton et al. (2015), os traços comportamentais são influenciados por fatores sociais e culturais. A educação dos ocupantes tem efeito favorável para aliviar, por exemplo, o medo e o alarme, inculcando a aceitação dos movimentos perceptíveis induzidos pelo vento nos edifícios.

Tamura et al. (2006) afirmam que além do nível social, também o nível econômico dos habitantes das edificações influenciam a tolerância as vibrações. Michaels et al. (2013) sugerem que as influências sociais podem desempenhar um papel na definição da aceitabilidade para os ocupantes de edifícios altos excitados pelo vento.

Chen e Robertson (1972) relatam que quanto maior o nível de expectativa (nenhuma experiência prévia, poucas experiências e muito experiente) influência para menores limites de percepção de vibração, nestas condições.

3.2 CARACTERÍSTICAS DO MOVIMENTO DOS EDIFÍCIOS

Segundo Burton et al. (2015), o movimento provocado pelo vento pode ser dividido em duas componentes: uma ação estática (não aparente aos ocupantes) e uma ação dinâmica (vibração oscilatória devido a variação da velocidade do vento). É esta vibração oscilatória que se torna perceptível aos ocupantes e se excessiva pode causar desconforto e até mesmo medo.

Algumas das propriedades do movimento em edifícios altos relacionadas às vibrações e o conforto humano podem ser avaliadas através de alguns indicadores, tais como: amplitude da resposta, velocidade, aceleração, frequência, duração e período de recorrência, os quais a seguir, serão relatados sucintamente.

3.2.1 – Amplitude da Resposta

As amplitudes de movimento são consideradas importantes para a condição da identificação das pistas visuais, paralaxe visual e ainda significativa na possibilidade de provocar sinais de ruído, como rangidos, condicionantes também da amplitude da resposta, os quais, combinados ou não a outros mecanismos podem provocar um aumento na percepção ao movimento. Chang (1973) afirma que o desconforto humano é função da amplitude apenas acima de certas frequências. Para a gama de frequências inferiores a 1,00 Hz as amplitudes do movimento somente provocam indicações visuais e sonoras.

Kwok e Hitchcock (2008) e Morava et al. (2010) afirmam que os ocupantes toleram vibrações com amplitudes suficientemente grandes, desde que não ocorram com frequência, e inversamente, a ocorrência frequente de vibrações, mesmo com menores amplitudes, podem causar maiores desconfortos aos ocupantes.

Noguchi et al. (1993) relatam que a sensação de desconforto, seguida pela dificuldade física de equilíbrio e pelo mal-estar são descritas conforme aumentam-se as amplitudes das acelerações.

3.2.2 – Velocidade

Chang (1973) afirma que os indivíduos não podem sentir a velocidade constante diretamente, eles só podem sentir os efeitos indiretos da mesma, tal como a pressão do vento sobre o corpo. Ainda, afirma que tais indivíduos, se privados de vibrações e de pistas, não podem afirmar se estão movendo-se a uma velocidade constante ou se estão parados. Por fim, afirma que os limites de percepção dependem da velocidade para frequências entorno de 20 a 60 Hz, ou seja, frequências estas muito acima da gama de vibrações induzidas pelo vento em edifícios altos, mas por outro lado, ressalta que as velocidades e acelerações angulares podem ser mais importantes, em muitos casos, que as acelerações lineares.

3.2.3 – Aceleração

A aceleração linear é o parâmetro para a avaliação da percepção ao movimento mais comum entre os documentos normativos. Segundo Ferrareto et al. (2015) isso se dá tendo em vista a sua possibilidade de medida de campo e a sua fácil verificação analítica. Irwin (1981) afirma que a aceleração é o melhor parâmetro para avaliar o conforto ao movimento/percepção dos ocupantes por diversas razões, sendo uma delas, a simplicidade de se usar apenas um parâmetro de movimento.

Diferentes parâmetros para níveis de aceleração são expressos e referenciados por diversos autores e normativas, como por exemplo, Khan e Parmelee (1971) ao qual sugeriram valores limites da aceleração perceptível ao movimento superior a 4mg.

Goto (1983) também propôs quatro gamas de aceleração de edificações e suas correspondentes reações aos ocupantes, conforme Figura 3.2, onde fica evidente que a habitabilidade da construção é significativamente afetada pelas vibrações induzidas pelo vento.

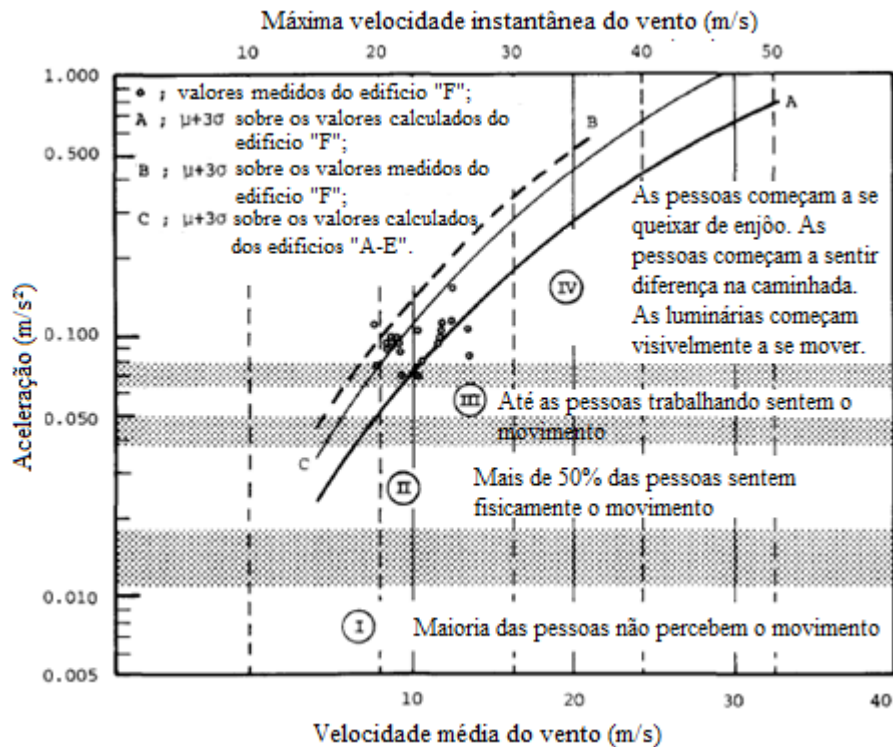


Figura 3.2: Reações dos ocupantes frente às acelerações (fonte: GOTO, 1983).

Burton et al. (2015) afirmam que normas internacionais buscam formular critérios de conforto dos movimentos induzidos pelo vento nas edificações, e recomendam como proposta aceitável de habitabilidade e de mitigação para valores de acelerações de pico avaliados na ordem de: 5mg – limite de introdução a percepção para alguns ocupantes e também limite de improbabilidade de respostas adversas, como alarme e medo, desde que o movimento não ocorra com frequência e continuamente por um longo período de tempo; 10mg – limite de conforto e bem estar, ao qual é perceptível para uma grande maioria de ocupantes e, efetivamente, edifícios que apresentem tal movimento por um longo período de tempo podem não serem aceitáveis para alguns ocupantes; 35-40mg – limite de medo e insegurança, suficientemente grave para causar a perda de equilíbrio de alguns ocupantes.

3.2.4 – Frequência

Chen e Robertson (1972) observaram que o limite de percepção de vibração diminui à medida que a frequência aumenta, portanto, relataram uma dependência da percepção humana em relação à frequência. Goto (1975) também confirma a dependência da frequência de vibração. Irwin (1978) propôs diferentes curvas, avaliando os níveis de aceleração linear rms em função das frequências. A Figura 3.3 apresenta os níveis para estruturas de edifícios de uso geral (curva 1) e *offshore*/pontes (curva 6).

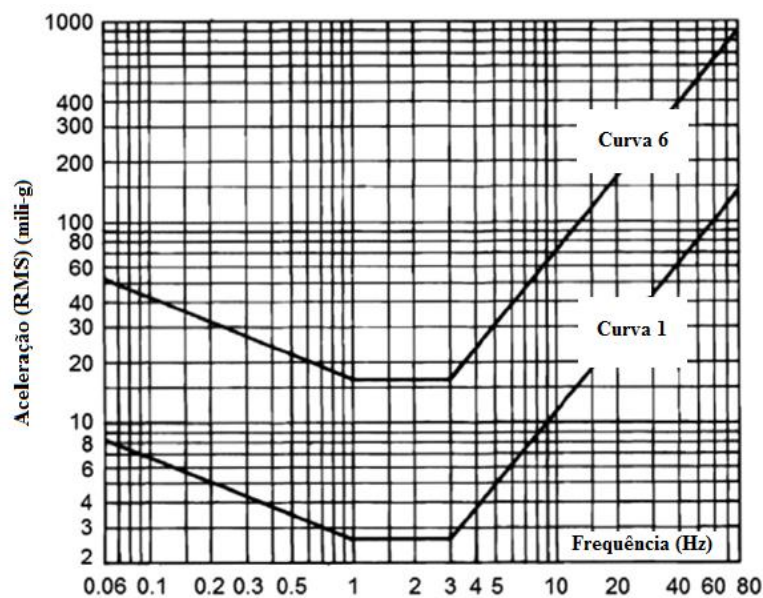


Figura 3.3: Níveis de aceleração rms em função da frequência de vibração das estruturas (fonte: IRWIN, 1978).

Para Irwin (1981), considerando as frequências naturais, no primeiro modo de vibração no intervalo de 0,063 a 1 Hz, encontra-se uma forte dependência entre o limite de conforto humano e a frequência de vibração.

Melbourne e Palmer (1992) desenvolveram ainda mais os critérios de aceleração, expressando as acelerações de pico aceitáveis como uma função da frequência de vibração e do período de recorrência, conforme Figura 3.4. Noguchi et al. (1993) também concluíram que os limites de percepção tendem a aumentar conforme se diminui a frequência. Isyumov e Kilpatrick (1996) afirmaram que a percepção das vibrações e conseqüentemente, as vibrações inaceitáveis são dependentes da frequência. Denoon et al. (1999), Denoon et al. (2000a) e Denoon (2001) concluíram que a percepção das vibrações pelos ocupantes é dependente da frequência.

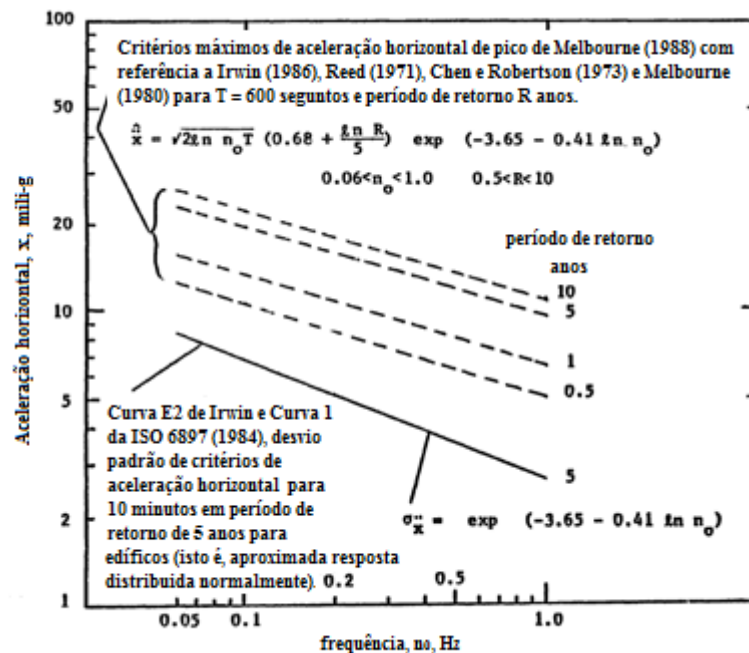


Figura 3.4: Critério de modificação das curvas de Irwin e da ISO 6897 em relação às acelerações de pico, frequência e período de recorrência. (fonte: MELBOURNE et al., 1992).

Bachman (1995) sugere a utilização da Figura 3.5 para a avaliação da sensibilidade humana as vibrações dos edifícios. Este ábaco ilustra as relações não lineares entre amplitude máxima de deslocamento, aceleração máxima e frequência de vibração, tendo como limites de aceleração quanto à percepção humana, conforme Quadro 3.2.

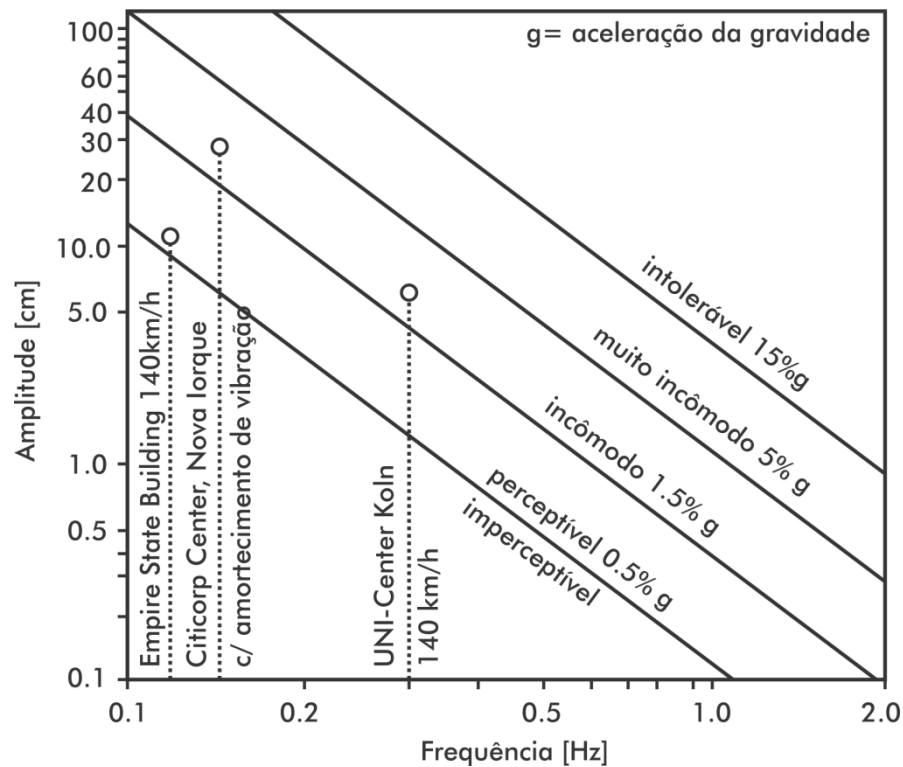


Figura 3.5: Ábaco de avaliação da percepção das vibrações em edifícios (fonte: BACHMAN, 1995).

Quadro 3.2: Valores limites de aceleração para a percepção humana.

Percepção	Acelerações Limites
Imperceptível	$a < 0,005g$
Perceptível	$0,005g < a < 0,015g$
Incomodo	$0,015g < a < 0,05g$
Muito incomodo	$0,05g < a < 0,15g$
Intolerável	$a > 0,15g$

(fonte: BACHMANN, 1995)

Também Burton et al. (2004a) e Burton et al. (2006) sugeriram que a percepção humana a vibração é dependente da frequência de vibração. Burton et al. (2004b) concluíram que para mesmos níveis de aceleração, a percepção da vibração, por exemplo, em frequência de 0,5 Hz fora anterior a de 0,125 Hz, portanto, sugerindo novamente, uma forte dependência da frequência em relação às percepções de vibrações. Burton et al (2015) e Galsworthy et al.

(2015) recentemente reafirmaram que a percepção humana ao movimento é dependente da frequência.

3.2.5 – Duração

Segundo Ferrareto et al. (2015) alguns pesquisadores acreditam que se a vibração perdura mais de 5,0 a 8,0 segundos a sua duração não afeta a resposta humana. Para a duração menor que 5 segundos, a aceleração pode ser aumentada na mesma proporção, por exemplo: 10 para 20mg, logo, de 2,5 para 5,0 segundos de duração. Uma vez que a maioria dos casos de vibrações induzidas pelo vento tem uma duração maior do que 5,0 segundos, a omissão da duração em critérios de conforto não é totalmente injustificada (CHANG, 1973).

Ferrareto et al. (2015) apud Lenzen afirma que as vibrações importantes são aqueles que persistem mais que cinco ciclos. Além disso, se a vibração persistir mais que 12 ciclos, as respostas serão as mesmas que uma vibração de estado estacionário.

Denoon et al. (1999), Denoon et al. (2000a e 2000b) e Denoon (2001), durante os experimentos de campo, sugeriram fortemente que ambos, duração e forma de onda, contribuem de forma importante para a percepção de movimento e para o limite de tolerância.

Burton et al. (2005) observaram que quanto menor a duração a exposição, menor são os sintomas relacionados para uma mesma condição de evento, mostrando assim a importância de se considerar não somente os efeitos de curta duração, como tempestades, mas da necessária observância também aos eventos de longa duração.

Burton et al. (2007) observaram também que o medo e o alarme se apresentam tipicamente nos indivíduos submetidos os ventos pouco frequentes, como tufões e tempestades, e que o desconforto é provocado pela vibração frequente associada a eventos de ventos regulares, típicos de cada região, e por consequência de mais longa duração.

3.2.6 – Período de Recorrência

Hansen et al. (1973) propuseram que fosse considerado um limite para a aceleração rms de 5mg ocorrendo em média não mais do que uma vez a cada seis anos, com base numa taxa média de objeção dos ocupantes de 2%, conforme Figura 3.6.

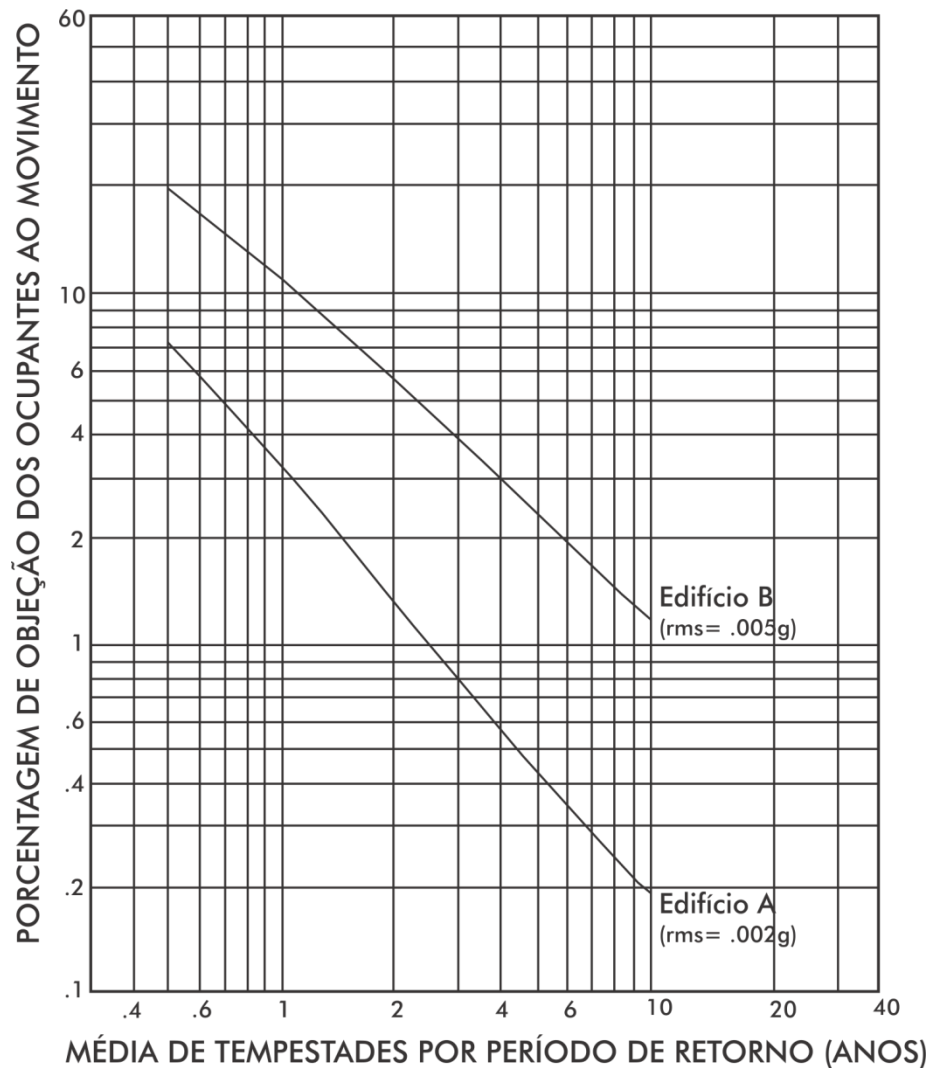


Figura 3.6: Percentual de objeção dos ocupantes *versus* período de recorrência para um critério de aceleração rms de 0,005g. (fonte: HANSEN et al., 1973).

Isyumov (1993) sugeriu critérios de aceitação e limites de aceleração para garantir o conforto dos ocupantes, ambos para um período de recorrência de um e dez anos. Para o critério de período de recorrência de um ano especificam-se duas gamas de aceleração máxima: 5 a 7mg para edifícios residências e 9 a 12mg para edifícios comerciais. Segundo Kwok et al. (2009), a falta de dependência da frequência neste critério de aceitabilidade é a diferença mais evidente em comparação a outros critérios.

Kilpatrick (1996) apud Davenport que propôs duas curvas diferentes de se relacionar aceleração e taxa de objeção. Estas curvas foram calculadas para representar 2% e 10% de taxa de objeção ao movimento nos andares superiores a um terço da altura do edifício e

também foram esboçadas a fim de concordar com os critérios propostos por Hansen e ainda, combinados os dados de percepção do movimento para sugerir níveis aceitáveis de aceleração variando-se o número de tempestades por ano. As curvas resultantes são vistas na Figura 3.7 e definem tanto o quociente de sensibilidade dos ocupantes (uma medida da proporção da aceleração de pico ao limite da percepção de aceleração para uma determinada percentagem de ocupantes) e aceleração de pico variando a frequência de ocorrência.

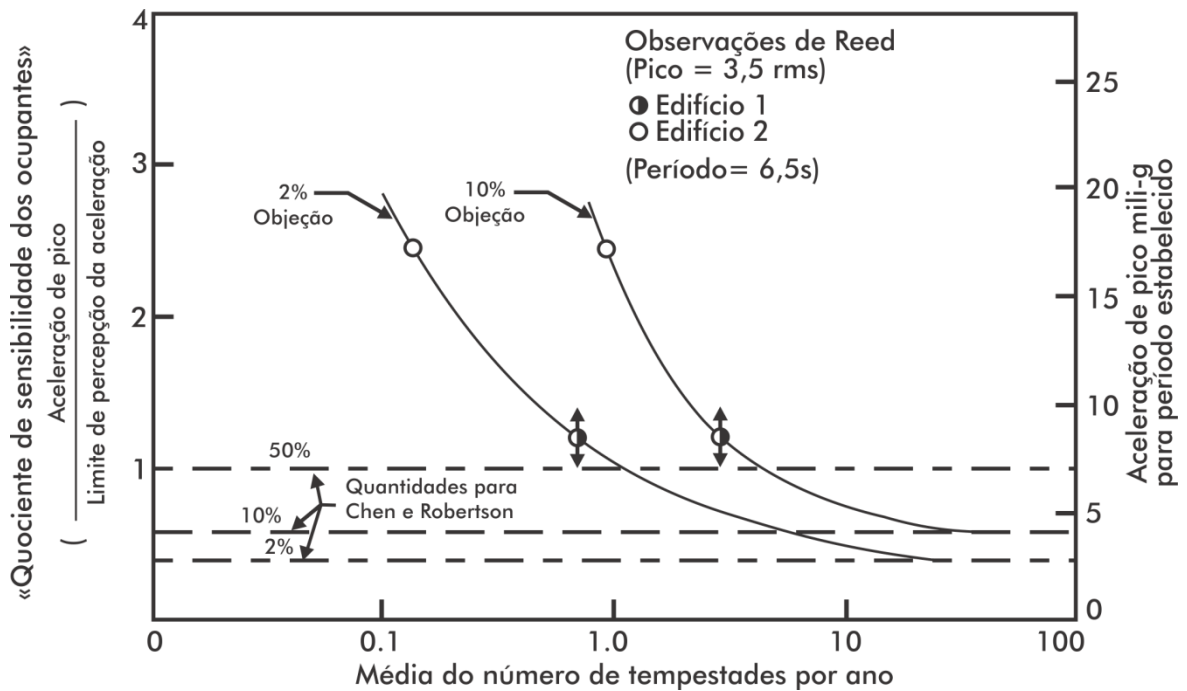


Figura 3.7: Aceleração aceitável *versus* média anual do número de tempestades. (fonte: KILPATRICK apud DAVENPORT, 1996).

4 PROCEDIMENTOS DE DETERMINAÇÃO DA ACELERAÇÃO E CRITÉRIO DE CONFORTO

São apresentadas neste capítulo as formulações referentes à determinação da aceleração, bem como dos critérios de conforto de diversas normativas. O Apêndice A apresentada de forma detalhada as metodologias e os procedimentos para a determinação da aceleração das normativas estudadas.

4.1 ABNT/NBR 6123-1988: FORÇAS DEVIDAS AO VENTO EM EDIFICAÇÕES – (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988)

Para ABNT/NBR 6123 (1988), em seu Capítulo 9 – Efeitos dinâmicos à turbulência atmosférica – especificamente em seu item 9.5 (Cálculo de acelerações máximas para verificação do conforto), descreve que as oscilações provocadas pelas forças do vento em edificações destinadas a ocupação humana, podem acarretar sobre maneira, desconforto a estes mesmos usuários.

4.1.1 – Determinação da Amplitude Máxima da Aceleração

A amplitude máxima da aceleração pode ser calculada conforme a equação 4.1:

$$a_j = 4\pi^2 f_j^2 u_j \quad (4.1)$$

Onde:

a_j (m/s²): amplitude máxima da aceleração;

f_j (Hz): frequência natural no modo j;

u_j (m): deslocamento no nível z no modo j.

4.1.2 – Critério de Conforto

A ABNT/NBR 6123 (1988) indica, de forma generalizada, que a amplitude máxima não deve exceder a $0,10\text{m/s}^2$ e que a verificação do conforto deve ser efetuada para a velocidade do vento com maior probabilidade de ocorrência que a velocidade de projeto estrutural, definida pelo projetista. Ainda, considera admissível que a amplitude máxima da aceleração seja excedida, em média, uma vez a cada dez anos.

4.2 AIJ-2004: GUIDELINES FOR THE EVALUATION OF HABITABILITY – (ARCHITETURAL INSTITUTE OF JAPAN, 2004)

A aceleração para a verificação da habitabilidade de um edifício sujeito a ação do vento e induzido por vibração devem ser avaliados pela seção A6.10 da AIJ (2004), onde a velocidade do vento deve ser obtida para um período de recorrência de um ano, conforme seção A6.13 da mesma Norma.

Cada formulação considera apenas o primeiro modo de vibração. Se um edifício tem uma grande resposta dinâmica ou modos de vibração parciais e superiores, outras investigações especiais devem ser realizadas.

A seção A6.10 trata das acelerações, definindo a aceleração máxima na direção do vento para edifícios comuns, a aceleração máxima na direção transversal do vento e de torção para edifícios de planta retangular, desde que satisfeitas as condições de vibração e resultados de carga.

4.2.1 – Determinação da Máxima Aceleração na Direção do Vento

A aceleração máxima na direção do vento na parte superior de um edifício é calculada pela equação 4.2:

$$a_{Dmax} = \frac{q_H g_{aD} B H C_H C'_g \lambda \sqrt{R_D}}{M_D} \quad (4.2)$$

Sendo g_{aD} o fator de pico para a aceleração na direção do vento definido pela equação 4.3:

$$g_{aD} = \sqrt{2 \ln(600 f_D) + 1,2} \quad (4.3)$$

Onde:

$a_{Dmax}(m/s^2)$: máxima aceleração na direção do vento no alto do edifício;

$q_H(N/m^2)$: pressão dinâmica em referência a altura H;

$B(m)$: largura projetada do edifício;

$H(m)$: altura referência;

C_H : coeficiente de força do vento C_D em relação a altura referência;

C'_g : rms coeficiente de momento de tombamento na direção na direção do vento;

λ : fator de modo de correção da força do vento geral;

R_D : fator de ressonância para vibração na direção do vento;

$M_D(kg)$: massa generalizada do edifício para vibração na direção do vento;

$f_D(Hz)$: frequência natural para o primeiro modo na direção na direção do vento.

4.2.2 – Determinação da Máxima Aceleração na Direção Transversal do Vento

A aceleração máxima na direção transversal do vento na parte superior de um edifício é calculada pela equação 4.4:

$$a_{Lmax} = \frac{q_H g_{aL} B H C'_L \lambda \sqrt{R_L}}{M_L} \quad (4.4)$$

Sendo g_{aL} o fator de pico para a aceleração na direção transversal do vento definido pela equação 4.5:

$$g_{aL} = \sqrt{2 \ln(600f_L) + 1,2} \quad (4.5)$$

Onde:

$a_{Lmax}(m/s^2)$: máxima aceleração na direção transversal do vento no alto do edifício;

$q_H(N/m^2)$: pressão dinâmica em referência a altura H;

$B(m)$: largura projetada do edifício;

$H(m)$: altura referência;

C'_L : rms coeficiente de momento de tombamento na direção transversal do vento;

λ : fator de modo de correção da força do vento geral;

R_L : fator de ressonância para vibração na direção transversal do vento;

$M_L(kg)$: massa generalizada do edifício para vibração na direção transversal do vento;

$f_L(Hz)$: frequência natural para o primeiro modo na direção na direção transversal do vento.

4.2.3 – Determinação da Máxima Aceleração Torcional

A aceleração máxima de torção na parte superior de um edifício é calculada pela equação 4.6:

$$a_{Tmax} = \frac{0,6q_H g_{aT} B^2 H C'_T \lambda \sqrt{R_T}}{I_T} \quad (4.6)$$

Sendo g_{aT} o fator de pico para aceleração torcional definido pela equação 4.7:

$$g_{aT} = \sqrt{2 \ln(600f_T) + 1,2} \quad (4.7)$$

Onde:

$a_{Tmax}(rad/s^2)$: máxima aceleração torcional;

$q_H(N/m^2)$: pressão dinâmica em referência a altura H;

$B(m)$: largura projetada do edifício;

$H(m)$: altura referência;

C'_T : rms coeficiente de momento de torção;

λ : fator de modo de correção da força do vento geral;

R_T : fator de ressonância para vibração torcional;

$I_T(kgm^2)$: momento de inércia generalizada do edifício para vibração torcional;

$f_T(Hz)$: frequência natural para o primeiro modo na direção torcional.

4.2.4 – Critério de Conforto

O AIJ recomenda a avaliação quanto aos níveis de habitabilidade de uma construção submetida às vibrações induzidas pela ação do vento, conforme Figura 4.1.

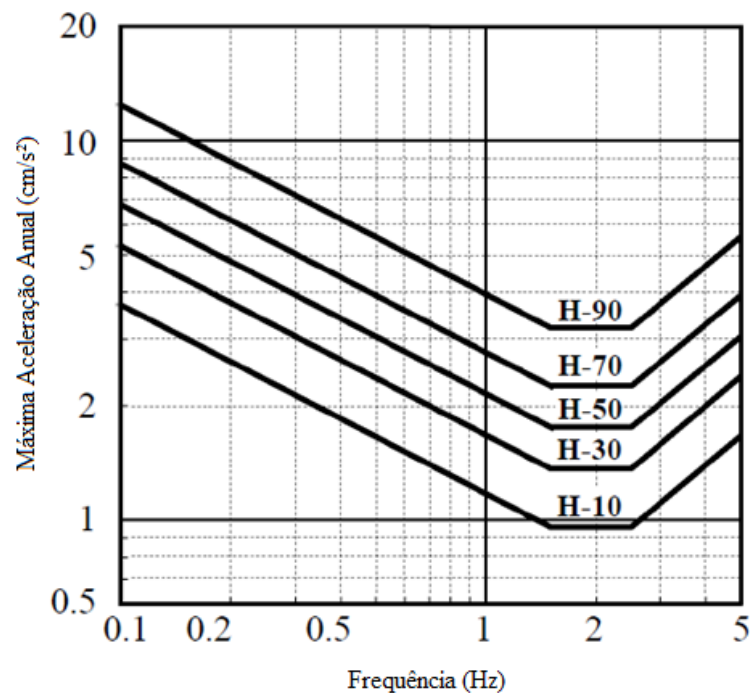


Figura 4.1: Limites probabilísticos de percepção dados pelo AIJ (fonte: ARCHITETURAL INSTITUTE OF JAPAN, 2004).

As cinco curvas H-n representam os limites de percepção onde, por exemplo, H-10 indica 10% de probabilidade de percepção. O nível aceitável não é especificado de forma determinística, deixando esta decisão para proprietários e projetistas. Ainda, recomenda aplicar-se a aceleração de pico considerando um ano de recorrência, tendo em vista avaliar o conforto diário dos ocupantes, ou seja, em eventos frequentes. Tais curvas expressam-se em relação ao movimento de translação não considerando os efeitos de vibrações torcionais. No entanto, as orientações AIJ indicam apenas um nível de movimento que é perceptível, não um nível que seja confortável para os ocupantes.

4.3 ASCE-2010: MINIMUM DESIGN LOADS FOR BUILDINGS AND OTHER STRUCTURES – (AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERING STANDARD, 2010)

4.3.1 Determinação da Máxima Aceleração na Direção do Vento

A aceleração máxima na direção do vento de um edifício é calculada pela equação 4.8:

$$\ddot{X}_{m\acute{a}x}(z) = g_{\ddot{x}} \sigma_{\ddot{x}}(z) \quad (4.8)$$

Sendo $g_{\ddot{x}}$ o fator de pico para aceleração na direção do vento definido pela equação 4.9:

$$g_{\ddot{x}} = \sqrt{2 \ln(T\eta_1)} + \frac{0,5772}{\sqrt{2 \ln(T\eta_1)}} \quad (4.9)$$

Onde:

$\ddot{X}_{m\acute{a}x}(z)$: máxima aceleração na direção do vento;

T (s): período de tempo mínimo para cálculo da aceleração, geralmente tido como 3600=1h;

η_1 (Hz): frequência natural da estrutura no primeiro modo de vibração na direção do vento;

O valor rms ou desvio padrão da aceleração na direção do vento $\sigma_{\ddot{x}}$ de um edifício é calculado pela equação 4.10:

$$\sigma_{\ddot{x}} = \frac{0,85 \Phi(z) \rho B h C_{fs} \hat{v}_z^2}{m_1} I_{\bar{z}} K R \quad (4.10)$$

Sendo:

$\sigma_{\ddot{x}}$: valor rms ou desvio padrão da aceleração do vento;

$\Phi(z)$: forma modal fundamental;

ρ (kg/m^3): massa específica do ar, considerada como 1,225;

B (m): largura da edificação normal ao vento;

C_{fx} : coeficiente de arrasto para a componente longitudinal;

\hat{v}_z^2 : quadrado da velocidade de rajada em 3 segundos (parcela flutuante) a uma altura \bar{z} ;

m_1 : massa modal;

$I_{\bar{z}}$: intensidade da turbulência com \bar{z} como altura equivalente da estrutura;

O fator K é obtido através da equação 4.11:

$$K = (1,65)^{\hat{\alpha}} / \hat{\alpha} + \xi + 1 \quad (4.11)$$

ξ – expoente da forma modal

$\hat{\alpha}$ – inverso da velocidade de rajada (3 segundos) do expoente da lei de potência

R : fator da resposta ressonante.

4.3.2 – Critério de Conforto

Critérios para a determinação do conforto e acelerações aceitáveis não são indicados no ASCE e devem ser obtidos em outras referências.

4.4 AS/NZS 1170-2011: STRUCTURAL DESIGN ACTIONS - PART 2: WIND ACTIONS – (AUSTRALIAN/NEW ZEALAND STANDARD, 2011)

Os limites de acelerações aceitáveis frente à resposta humana precisam ser considerados em estruturas dinamicamente sensíveis ao vento. O apêndice G da AS/NZS (2011) apresenta métodos de estimativa de acelerações de pico em ambas as direções do vento.

4.4.1 – Determinação da Máxima Aceleração na Direção do Vento

A aceleração de pico no topo de uma estrutura na direção do vento (\ddot{x}_{max}), em metros por segundo ao quadrado, é definida pela equação 4.12:

$$\ddot{x}_{max} = \frac{3}{m_0 h^2} \times \text{componente ressonante de base de pico de momento fletor}$$

$$\ddot{x}_{max} = \frac{3}{m_0 h^2} \frac{\rho_{ar} g_R I_h \sqrt{\frac{SE_t}{\zeta}}}{(1 + 2g_v I_h)} \left\{ C_{fig,barlavento} \sum_{z=0}^h [V_{des,0}(z)]^2 b_z z \Delta z - C_{fig,sotavento} [V_{des,0}(h)]^2 \sum_{z=0}^h b_z z \Delta z \right\} \quad (4.12)$$

Onde:

m_0 (kg/m): massa média por unidade de altura;

h (m): altura média do telhado de uma estrutura acima do solo;

ρ_{ar} (kg/m³): massa específica do ar, considerada como 1,2;

g_R : fator de pico para a resposta ressonante (período de 10 min) dado pela equação 4.13:

$$g_R = \sqrt{1,2 + [2 \log_e(600\eta_a)]} \quad (4.13)$$

η_a (Hz): primeiro modo de vibração da frequência natural da estrutura na direção do vento;

I_h : intensidade de turbulência, definindo $z=h$;

S : fator de redução de tamanho;

E_t : espectro da turbulência do vento incidente;

ζ : razão de amortecimento estrutural em relação ao crítico;

g_v : fator de pico para as flutuações de velocidade a sotavento, o qual pode ser tomado como 3,4;

$C_{fig,bar}$: fator de forma aerodinâmica a barlavento;

$C_{fig,sot}$: fator de forma aerodinâmica a sotavento;

z (m): altura de referência sobre a estrutura acima da média do nível do solo local;

$V_{des,0}(z)$ (m/s): velocidade de projeto do vento em edifícios ortogonais, função da altura z ;

$V_{des,0}(h)$ (m/s): velocidade de projeto do vento em edifícios ortogonais avaliadas em relação a altura h ;

b_z (m): largura média da estrutura na seção da altura z ;

Δ_z (m): altura da seção da estrutura sobre o qual atua a pressão do vento.

A Norma Australiana e Neozelandesa (AS/NZS) recomenda que os usuários estimem valores de possíveis amortecimentos em função da altura da estrutura e da amplitude de vibração.

4.4.2 – Determinação da Máxima Aceleração na Direção Transversal do Vento

A aceleração de pico no topo de uma estrutura com uma massa constante por unidade de altura (m_0) na direção transversal do vento (\ddot{y}_{max}) em metros por segundo ao quadrado é definida pela equação 4.14:

$$\ddot{y}_{max} = \frac{1,5b g_R}{m_0} \left[\frac{0,5\rho_{ar} [V_{des,0}]^2}{(1 + g_v I_h)^2} \right] K_m \sqrt{\frac{\pi C_{fs}}{\zeta}} \quad (4.14)$$

Onde:

b (m): largura média da estrutura;

g_R : fator de pico para a resposta ressonante (período de 10min) dado pela equação 4.15:

$$g_R = \sqrt{1,2 + [2 \log(600\eta_c)]} \quad (4.15)$$

η_c (Hz): primeiro modo de vibração da frequência natural da estrutura na direção transversal do vento;

m_0 (kg/m): massa média por unidade de altura;

ρ_{ar} (kg/m³): massa específica do ar, considerada como 1,2;

$V_{des,0}(h)$ (m/s): velocidade de projeto do vento em edifícios ortogonais avaliadas em relação a altura h ;

g_V : fator de pico para as flutuações de velocidade a sotavento, o qual pode ser tomado como 3,4;

I_h : intensidade de turbulência, definindo $z=h$;

K_m : fator de correção de forma modal para a aceleração transversal do vento, dada pela equação 4.16:

$$K_m = 0,76 + 0,24k \quad (4.16)$$

k : expoente energia da forma modal para o modo fundamental onde os valores do expoente k deve ser tomado como:

$k = 1,5$ para um uniforme balanço;

$k = 0,5$ para uma estrutura delgada;

$k = 1,0$ para um edifício com núcleo central;

$k = 2,3$ para uma torre diminuindo a rigidez com a altura ou com uma grande massa no topo;

k = o valor obtido a partir $\phi_1(z) = (z/h)^k$ apropriado a forma modal da estrutura computadorizada;

$\phi_1(z)$: primeira forma modal como uma função da altura z , unidade normalizada para $z=h$;

C_{fs} : coeficiente do espectro da força na direção transversal do vento generalizada para uma forma modal linear;

ζ : razão de amortecimento estrutural em relação ao crítico.

4.4.3 – Critério de Conforto

Crítérios para a determinação do conforto e acelerações aceitáveis não são indicados em AS/NZS e devem ser obtidos em outras referências.

4.5 EUROCODE 1-2010: ACTIONS ON STRUCTURES – PART 1-4: GENERAL ACTIONS – WIND ACTIONS – (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2010)

4.5.1 – Determinação do Desvio Padrão da Aceleração na direção do Vento

O desvio padrão $\sigma_{a,x}$ da aceleração característica na direção do vento na altura z (altura acima do solo) é dado pela EUROCODE (2010) conforme seu Anexo B e deve ser obtido através da equação 4.17:

$$\sigma_{a,x} = \frac{c_f \cdot \rho \cdot b \cdot I_v(z_e) \cdot v_m^2(z_e)}{m_{1,x}} \cdot R \cdot K_x \cdot \phi_{1,x}(z) \quad (4.17)$$

Onde:

z (m): altura acima do solo;

z_s (m): altura de referência para a determinação do fator estrutural;

c_f : coeficiente de força;

ρ (kg/m^3): massa específica do ar;

b (m): largura da estrutura;

$I_v(z_s)$: intensidade da turbulência na altura $z=z_s$ acima do solo;

$v_m(z_s)$ (m/s): velocidade média do vento para $z=z_s$;

R : raiz quadrada da resposta ressonante;

K_x : coeficiente não adimensional;

$m_{1,x}$ (kg/m): massa fundamental equivalente na direção do vento;

$\phi_{1,x}(z)$: forma modal fundamental na direção do vento.

O coeficiente não adimensional K_x é definido através da equação 4.18:

$$K_x = \frac{(2 \cdot \zeta + 1) \cdot \left\{ (\zeta + 1) \cdot \left[\ln \left(\frac{z_s}{z_0} \right) + 0,5 \right] - 1 \right\}}{(\zeta + 1)^2 \cdot \ln \left(\frac{z_s}{z_0} \right)} \quad (4.18)$$

Onde:

z_0 (m): comprimento de rugosidade;

z_s (m): altura de referência para a determinação do fator estrutural;

ζ : expoente de modo de vibração.

4.5.2 – Critério de Conforto

Critérios para a determinação do conforto e de acelerações aceitáveis não são fornecidas pelo EUROCODE (2010) e devem ser obtidos em outras referências.

4.6 ISO 6897-1984: GUIDELINES FOR THE EVALUATION OF THE RESPONSE OF OCCUPANTS OF FIXED STRUCTURES, ESPECIALLY BUILDINGS AND OFF-SHORE STRUCTURES, TO LOW-FREQUENCY HORIZONTAL MOTION (0,063 TO 1 HZ) – (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1984)

A ISO 6897 (1984) refere-se à resposta típica de pessoas frente ao movimento horizontal das estruturas induzidas pela ação do vento na faixa de frequência de 0,063 a 1,0 Hz. Considera as vibrações estruturais causadas por ações de ocorrência frequente deixando fora de seu escopo as possíveis lesões de seus ocupantes. Considera ainda que, a percepção visual, os efeitos do ruído e a influencia dos movimentos de torção das estruturas não estão avaliados quantitativamente nesta norma, bem como, também estão excluídos sismos, terremotos e eventos similares.

Os níveis de percepção apresentados nesta norma dividem-se em dois tipos: estruturas *off-shore* e para edifícios. Para o primeiro leva-se em conta o treinamento dos ocupantes deste tipo de estrutura. Já para o segundo, a resposta das pessoas é dada para uma população adulta normal, e não há fatores de correção para diferenciar, por exemplo, idade e sexo, e assim ajustar as magnitudes destas acelerações. Por fim, esta norma aplica-se ao movimento horizontal de estruturas e avalia a percepção humana em qualquer postura, por exemplo, sentada, em pé ou deitada.

4.6.1 – Avaliação das Vibrações Induzidas em Edifícios Utilizados para fins Gerais, em Eventos com Duração Superior a 10 Minutos

Magnitudes consideráveis satisfatórias de movimento horizontal de baixa frequência, durante os piores 10 minutos consecutivos de uma tempestade de vento e com um período de recorrência de pelo menos 5 anos, em edifícios utilizados para fins gerais, são dados pela curva 1, conforme Figura 4.2.

4.6.2 – Avaliação das Vibrações Induzidas em Estruturas Fixas *off-shore* de Baixa Frequência, em Eventos com Duração Superior a 10 Minutos

Magnitudes consideráveis satisfatórias de movimento horizontal em estruturas fixas *off-shore* de baixa frequência são indicados conforme curva 2 da Figura 4.2 ao qual aplica-se aos casos em que o trabalho ou tarefa não rotineira deva ser executada. Pode-se observar que as amplitudes de acelerações dadas pela curva 2 são seis vezes maiores do que as fornecidas pela curva 1.

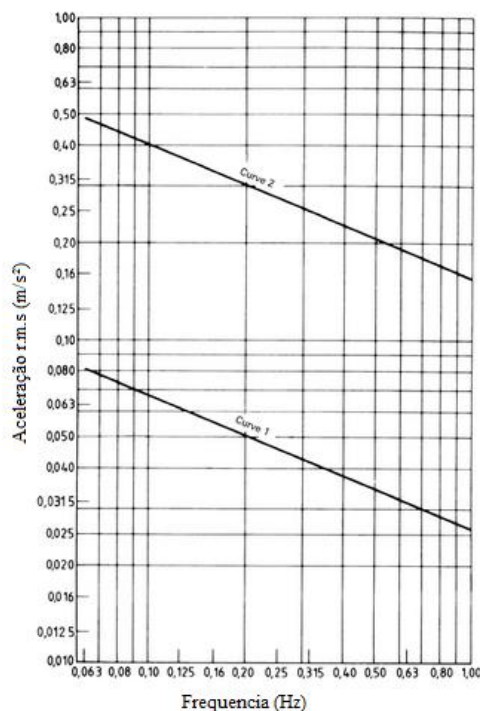


Figura 4.2: Sugestões de magnitudes satisfatórias de movimento horizontal em edifícios usados para fins gerais (curva 1) e estruturas fixas *off-shore* (curva 2) (fonte: INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1984).

4.6.3 – Avaliação das Vibrações Induzidas em Edifícios Utilizados para fins Especiais, em Eventos com Duração Superior a 10 Minutos

Ocorrências frequentes referem-se a eventos de natureza diária, onde os dados disponíveis indicam que o limite inferior da percepção do movimento horizontal por seres humanos é representado por uma curva conforme a Figura 4.3.

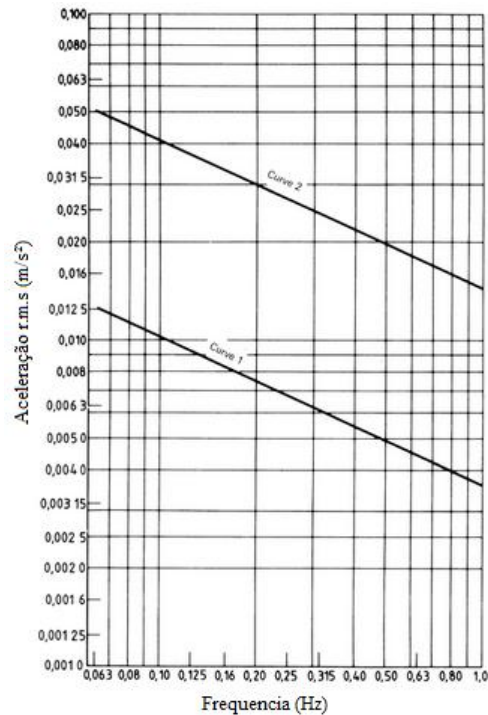


Figura 4.3: Limite inferior (curva 1) e média (curva 2) de percepção do movimento horizontal (fonte: INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1984).

Conforme a ISO 6897 (1984) o limite de percepção médio representa a média do limite de percepção do movimento horizontal para uma população adulta normal. As magnitudes sugeridas pela curva 2 na Figura 4.3 são adequados para edifícios especiais em que o trabalho rotineiro de precisão é realizado. Estas grandezas são quatro vezes superiores as indicadas para as atividades abrangidas pela curva 1 na Figura 4.3.

A percepção do movimento é detectada através de sinais proprioceptivos ou órgãos vestibulares e não através de pistas visuais. Até mesmo muito pequenas oscilações de rotação em torno de um eixo vertical pode exagerar significativamente a magnitude real da aceleração (ISO 6897, 1984).

4.6.4 Eventos com Duração Inferior a 10 Minutos

Um procedimento definitivo para avaliar eventos de curta duração não é descrito nesta norma, que indica uma nova publicação assim que mais dados se tornem disponíveis.

4.7 ISO 10137-2007: BASES FOR DESIGN OF STRUCTURES - SERVICEABILITY OF BUILDINGS AND WALKWAYS AGAINST VIBRATIONS – (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2007)

4.7.1 Critérios de Vibração para o Estado Limite de Serviço

Segundo a ISO 10137 (2007) os critérios de vibração devem corresponder ao estado limite de serviço que é especificado para a funcionalidade da edificação. O projetista deve decidir sobre o critério de utilização e sobre sua variabilidade. A variabilidade no estado limite é geralmente contida nos critérios para o receptor. Certa probabilidade de que o critério de utilização será excedido deve ser considerada. Há casos, no entanto, de que quando o critério de utilização não deve ser excedido, especialmente quando o resultado não é reversível (por exemplo, rachaduras), uma menor probabilidade de se exceder, deve então, ser escolhida. Os critérios relacionados com a ISO 10137 (2007) estão divididos em relação à ocupação humana, ao conteúdo dos edifícios e a estrutura. Os critérios que se referem à ocupação humana serão especificados a seguir.

4.7.2 Critérios para Ocupação Humana

Conforme a ISO 10137 (2007) os níveis de vibração aceitáveis para ocupação humana variam de acordo com o indivíduo, com a atividade, com a orientação, com o ambiente, com a expectativa da pessoa quanto às vibrações sentidas e também com um componente cultural. Várias influências podem se combinar para afetar a resposta subjetiva dos seres humanos à vibração. Estes incluem, entre outros, a presença de ruído, componentes de vibração linear e rotacional agindo em vários eixos simultaneamente. Para os participantes em um evento social, por exemplo, amplitudes de vibração maiores são geralmente toleradas do que para pessoas participando de uma reunião de negócios.

Critérios para a reação humana às vibrações podem ser agrupados naqueles pertencentes as:

- a) ocupações "sensíveis", tais como salas de cirurgia de hospitais;
- b) ocupações "regulares", como escritórios e áreas residenciais; e

c) ocupações "ativas", como as áreas de montagem ou locais de trabalhos industriais, incluindo pisos em arenas, ginásios e estádios, submetidos às atividades de movimentos, como por exemplo, dançar e correr.

Alguns níveis de vibração aceitáveis são apresentados nos Anexos C e D da ISO 10137 (2007). Estes critérios de vibração podem ser ajustados para atender circunstâncias particulares.

Segundo a ISO 10137 (2007) muitos fatores influenciam a resposta das pessoas a vibrações nos edifícios. Os efeitos diretos incluem as frequências, magnitude, duração, variabilidade, as direções da vibração e intervalos entre os eventos de vibração, ou a exposição humana frente às vibrações. Os efeitos indiretos sobre a resposta subjetiva para um ambiente que inclui vibrações são: ruídos, indicações visuais, tipo de população, a familiaridade com a vibração, a aparência estrutural, a confiança em uma estrutura do edifício, altura acima do solo, aviso de eventos, atividades exercidas, o conhecimento da fonte de vibração, etc. As vibrações que afetam os ocupantes humanos podem ser divididas nas seguintes classes, segundo a ISO 10137 (2007):

Classe A: influências inferiores aos limites de percepção humana;

Classe B: efeitos básicos;

Classe C: alarme e medo (que pode estar associada com uma série de comentários negativos);

Classe D: interferência nas atividades;

Classe E: possibilidade de lesão ou risco para a saúde.

Na Classe A, o critério é baseado na interferência quando se trabalha com instrumentos sensíveis, onde os indivíduos percebem que o movimento vibratório encontra-se presente, embora não seja diretamente percebido por qualquer sentido normal humano, função do corpo ou componente. O critério para o limite da Classe E é a exigência de mecanismos de retenção, por exemplo, para reduzir o risco de ferimentos humanos.

Provável resposta humana à vibração nas Classes B, C e D é avaliada em termos de categoria de evento como:

- a) contínua;
- b) impulsiva; ou
- c) intermitente.

Em geral, os critérios para a restrição de magnitudes de vibração em edifícios são baseados nos comentários mínimos adversos da população envolvida. Fator de ajuste aos critérios deve ser aplicado de acordo com a categoria do evento. A avaliação da resposta humana à vibração em edifícios nas faixas de frequência de 1 Hz a 80 Hz é dada no anexo C. Orientações para resposta humana aos movimentos induzidos pelo vento nos edifícios são dadas no anexo D da ISO 10137 (2007).

O anexo D da ISO 10137 (2007) orienta a avaliação da habitabilidade em edifícios na resposta humana frente as movimentações induzidas pelo vento, do ponto de vista de manter dentro de limites aceitáveis as condições de vida diária, para acelerações horizontais do edifício com um período de recorrência de um ano.

Podem ser estabelecidos outros períodos de recorrência, levando em consideração as tempestades mais fortes e/ou furacões que podem ocorrer em intervalos de vários anos ou décadas. A orientação fornecida pela ISO 10137 (2007) aplica-se a ocupação regular em edifícios de escritórios ou residências.

A curva de avaliação para movimentos horizontais aceitáveis para escritórios é especificada com acelerações de pico nas primeiras frequências naturais e nas principais direções estruturais do edifício (normalmente: longitudinal, transversal e torcional), derivados de avaliações de dados em muitos edifícios reais e de uso geral. O nível da curva de avaliação para residências trata de dois terços da curva para o escritório. A curva resultante para residências é próxima do nível de 90% de probabilidade de percepção. As curvas de avaliação para movimentos horizontais aceitáveis são mostradas na Figura 4.4.

As acelerações de pico para um período de recorrência de um ano nas direções estruturais do edifício (normalmente: longitudinal, transversal e torcional) não devem exceder a curva de avaliação básica para a ocupação respectiva na Figura 4.4, o qual f_0 é a primeira frequência natural na direção estrutural do edifício e na torção. A aceleração na torção representa a aceleração translacional equivalente definida como $r x A_\theta(t)$, onde r representa a distância do

centro de torção para o ponto objetivo e $A_{\theta}(t)$ a aceleração angular de vibração torcional. Em situações mais complexas, a ISO 10137 (2007) recomenda a necessidade de combinações das respostas modais.

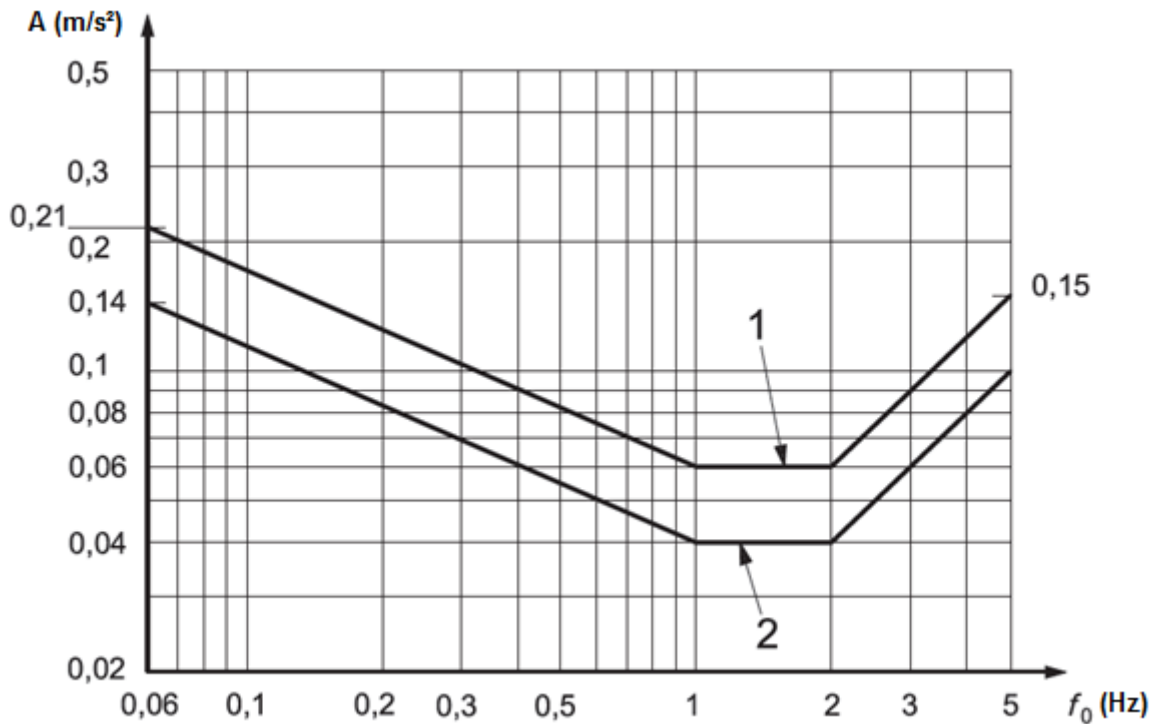


Figura 4.4: Curvas de avaliação para vibrações induzidas pelo vento em edifícios em direção horizontal (x, y) para um período de recorrência de um ano (fonte: INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2007).

Onde:

A (m/s²): aceleração máxima;

f_0 (Hz): primeira frequência natural numa direção estrutural do edifício e em torção;

1: aplicável a escritórios;

2: aplicável a residências.

4.8 NBCC-2010 – (NATIONAL BUILDING CODE OF CANADA, 2010)

4.8.1 Determinação da Máxima Aceleração na Direção do Vento e Transversal ao Vento

A aceleração de pico pode ser na direção transversal ao vento e obtida a partir da seguinte equação 4.19:

$$a_W = f_{nW}^2 g_p \sqrt{wd} \left(\frac{a_r}{\rho_B g \sqrt{\beta_W}} \right) \quad (4.19)$$

A aceleração de pico pode ser na direção do vento e calculada conforme a equação 4.20:

$$a_D = 4\pi^2 f_{nD}^2 g_p \sqrt{\frac{KsF}{C_{eH} \beta_D} \frac{\Delta}{C_g}} \quad (4.20)$$

As variáveis dadas nas fórmulas das equações 4.19 e 4.20 têm as seguintes definições:

w, d (m): largura efetiva do edifício para a direção transversal ao vento e profundidade efetiva do edifício para a direção do vento, respectivamente;

a_W, a_D (m/s²): aceleração de pico nas direções transversal e longitudinal, respectivamente;

$$a_r (\text{N/m}^3) = 78,5 \times 10^{-3} [V_H / (f_{nW} \sqrt{wd})]^{3,3} \quad (4.21)$$

ρ_B (kg/m³): massa específica média do edifício;

β_w, β_D : fração do amortecimento crítico nas direções transversal e longitudinal, respectivamente;

f_{nW}, f_{nD} (Hz): frequência natural fundamental nas direções transversal e longitudinal, respectivamente;

Δ (m): máxima deflexão lateral induzida pelo vento no topo do edifício na direção longitudinal;

g (m/s^2): aceleração devido a gravidade, tida como 9,81;

g_p : fator de pico estatístico para o efeito de carga;

K : fator relacionado com o coeficiente de rugosidade da superfície do terreno:

K : 0,08 para a exposição A;

K : 0,10 para a exposição B;

K : 0,14 para a exposição C.

s : fator de redução do tamanho;

F : relação de rajada de energia na frequência natural da estrutura;

C_{eH} : fator de exposição no topo do edifício;

C_g : fator de efeito de rajada.

4.8.2 Critério de Aceitabilidade e Conforto

Critérios para a determinação do conforto e de acelerações aceitáveis não são fornecidas pelo NBCC (2010) e devem ser obtidos em outras referências.

5 COMPARAÇÃO NORMATIVA DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS RELACIONADOS À DETERMINAÇÃO DA ACELERAÇÃO

Segundo Kwon e Kareem (2013) estudos anteriores relacionados à comparação das principais normas e códigos mundiais observaram significativa dispersão nos resultados das estimativas das acelerações, tendo em vista as diferentes definições das características do vento, incluindo perfis de velocidade, perfis de intensidade de turbulência, espectro do vento, escala de comprimento de turbulência, entre outros. Portanto, busca-se relatar as principais divergências encontradas, bem como, as principais semelhanças, no intuito de melhor compreendê-las.

5.1 TEMPOS DE MEDIÇÃO, ALTURA DE REFERÊNCIA E PERÍODO DE RECORRÊNCIA

No que tange os tempos de medição, tanto para a velocidade básica do vento, quanto para a resposta induzida na estrutura pela ação do mesmo, estes variam entre normas e códigos. Para a ASCE, AS/NZS e NBR a velocidade básica do vento corresponde a três segundos, enquanto para a AIJ e EURO seu tempo é de dez minutos e para a NBCC este é considerado como uma hora. Porém, em relação à resposta da estrutura, seus tempos de medição são mais longos, sendo a maioria dez minutos (exceto ASCE e NBCC que são de uma hora). A diferença de parâmetros entre normas é apresentada no Quadro 5.1, também em relação às alturas de referência e aos tempos de recorrência. Conclui-se, tendo em vista o objetivo da comparação, uma necessidade de conversão nos tempos de medição do vento, bem como nos tempos de recorrência.

5.2 PERFIS DE VELOCIDADE DO VENTO

Os perfis de velocidade do vento também se apresentam descritos em cada norma ou código de uma forma não unificada. AIJ, ASCE, NBCC e NBR descrevem seus perfis de velocidade do vento através da Lei de Potência, enquanto a AS/NZS e EURO através da Lei Logarítmica. Para que seja possível a comparação, os parâmetros que se referem a cada Lei devem estar referidos a uma mesma rugosidade do terreno. Considerando que em relação às categorias de exposição de terreno estas também apresentam discrepâncias, sugere-se uma proposta de

unificação de definições, referenciando-as em seis categorias, conforme o Quadro 5.2 e Quadro 5.3.

As variáveis utilizadas nos perfis de velocidade do vento (α, b, u^*, z_0) para cada Lei específica e em função da categoria do terreno, apresentadas no Quadro 5.4, são referentes à de cada normativa, exceto para a AS/NZS e EURO, as quais não apresentam explicitamente a equação logarítmica de descrição do perfil de velocidade. Neste caso, foram utilizados os valores tabulados no trabalho de Kwon e Kareem (2013).

Quadro 5.1: Tempos de medição, altura de referência e período de recorrência para cálculo das acelerações.

	NBR	AIJ	ASCE	AS/NZS	EURO	NBCC
Tempo de medição da velocidade básica	3-s	10-min	3-s	3-s	10-min	1-h
Tempo de medição da resposta estrutural	10-min	10-min	1-h	10-min	10-min	1-h
Altura de referência (h = topo da edificação)	h	h	h	h	h	h
Período de recorrência (anos)	10	1	10	10	-	10

fonte: (adaptado de Kwon e Kareem, 2013)

Quadro 5.2: Categorias de exposição de terreno.

Categoria de Exposição 1 – CE1	Mar ou zonas costeiras expostas a mar aberto.
Categoria de Exposição 2 – CE2	Áreas abertas com obstrução mínima.
Categoria de Exposição 3 – CE3	Terrenos abertos com poucos obstáculos isolados, e ainda, categoria onde a velocidade básica do vento é definida.
Categoria de Exposição 4 – CE4	Áreas suburbanas.
Categoria de Exposição 5 – CE5	Áreas urbanas em geral.
Categoria de Exposição 6 – CE6	Centro de grandes cidades, com terrenos cobertos de obstáculos numerosos, altos e poucos espaçados.

(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro 5.3: Categorias de exposição de terreno de diversas normas, para fins de unificação com as categorias propostas CE1, CE2, CE3, CE4, CE5 e CE6.

	NBR	AIJ	ASCE	AS/NSZ	EURO	NBCC
CE1	I	I	D	1	0	A
CE2					I	
CE3	II	II	C	2	II	
CE4	III	III	B	3	III	B
CE5	IV	IV		4	IV	C
CE6	V	V				
TOTAL DE CATEGORIAS	5	5	3	4	4	3

fonte: (adaptado de Kwon e Kareem, 2013)

Quadro 5.4: Coeficientes de Lei de Potência de diversas normas.

Normativa	Tipo de lei do perfil de velocidade	Tempo	Parâmetros de perfil de velocidade	CE1	CE2	CE3	CE4	CE5	CE6
NBR	Potencial	3-s	α	0,060		0,085	0,100	0,120	0,150
			β	1,100	1,000	0,940	0,860	0,740	
		600-s (10-min)	α	0,095		0,150	0,185	0,230	0,310
			β	0,849	0,690	0,593	0,490	0,345	
AJJ	Potencial	600-s (10-min)	α	0,100		0,150	0,200	0,270	0,350
			β	1,230	1,000	0,794	0,576	0,394	
ASCE	Potencial	3-s	α	0,087		0,105	0,143		
			β	1,070	1,000	0,840			

Continuação do Quadro 5.4.

ASCE	Potencial	3600-s (1-h)	α	0,111	0,154	0,250		
			β	0,800	0,650	0,450		
AS/NZS	Logarítmica	3-s	u^*	0,055-0,061	0,064-0,070	0,075-0,083	0,086-0,102	
			z_0	0,002	0,020	0,200	2,000	
EURO	Logarítmica	600-s (10-min)	u^*	0,062	0,068	0,076	0,086	0,094
			z_0	0,003	0,010	0,050	0,300	1,000
NBCC	Potencial	3600-s (1-h)	α	0,140		0,250	0,360	
			β	1,000		0,666	0,426	

fonte: (adaptado de Kwon et al.,2013)

5.3 PARÂMETROS PARA CÁLCULO DAS ACELERAÇÕES

Considerando que a pressão dinâmica $q_{h_{ref}}$, assim como, o fator de correção da forma modal K e o coeficiente G_R são parâmetros envolvidos no cálculo das acelerações, apresenta-se a comparação das normativas utilizadas neste trabalho, conforme Quadro 5.5.

Quadro 5.5: Comparação dos parâmetros relacionados à aceleração.

$\ddot{x}(z)$	$q_{h_{ref}}$	G_R	K
NBR	$\frac{1}{2}\rho V_{h_{ref}}^2$	-	-
AIJ	$\frac{1}{2}\rho V_{h_{ref}}^2$	$g_R I_{h_{ref}} \sqrt{R}$	$1 - 0,4 \ln k$
ASCE	$\frac{1}{2}\rho V_{h_{ref}}^2$	$1,7 g_R I_{h_{ref}} \sqrt{R}$	$\frac{1,65^{\hat{a}}}{\hat{a} + k + 1}$
AS/NZS	$\frac{1}{2}\rho V_{h_{ref}}^2$	$\frac{2 g_R I_{h_{ref}} \sqrt{R}}{(1 + 2 g_v I_{h_{ref}})}$	$\frac{\int_0^h V^2(z) z dz}{V_h^2 h^2}$
EURO	$\frac{1}{2}\rho V_{h_{ref}}^2$	$2 g_R I_{h_{ref}} \sqrt{R}$	$\frac{(2k + 1) \left[(k + 1) \left[\ln \left(\frac{h}{z_0} \right) + 0,5 \right] - 1 \right]}{(k + 1)^2 \ln \left(\frac{h}{z_0} \right)}$
NBCC	$\frac{1}{2}\rho V_{h_{ref}}^2$		

fonte: (adaptado de Kwon e Kareem, 2013)

Considerando também que a pressão dinâmica $q_{h_{ref}}$ generalizada pode ser expressa através da Equação 5.1, segundo Kwon e Kareem (2013), o Quadro 5.6 são apresentados os parâmetros descritos para cada norma relacionados a referida expressão.

$$q_z = \frac{1}{2} \rho V_0^2 C_{topografia} C_{exposição} C_{direção} C_{importância} C_{outro} \quad (5.1)$$

Quadro 5.6: Parâmetros normativos relacionados à pressão dinâmica.

$q_{h_{ref}}$	ρ (kg/m ³)	$V_{h_{ref}}$				
		Fator topográfico				
		Coeficiente de topografia	Coeficiente de exposição	Coeficiente de Direção	Coeficiente de Importância	Outro
NBR	1,2250	S1	S2 (dependentes de b, p)	-	S3	FV (fator de vizinhança)
AIJ	1,2200	E_H		K_D	-	K_{rw} (fator de conversão do período de recorrência)
ASCE	1,2250	K_z	K_{zt}	K_d	I_w	-
AS/NZS	1,2000	M_t	$M_{z,cat}$	M_d	-	M_s (fator de proteção)
EURO	1,2500	C_r	C_0	C_{dir}	-	C_{season} (coeficiente de estação)
NBCC	1,2929	C_e		-	I_w	-

fonte: (elaborado pelo autor)

Considerando que para o cálculo do coeficiente G_R , o fator de pico da resposta ressonante g_R deve ser observado e este pode ser expresso de forma generalizada, segundo Kwon e Kareem (2013), conforme a Equação 5.2, o Quadro 5.7 são apresentados os parâmetros descritos para cada norma relacionado a expressão generalizada, bem como para o fator de pico da velocidade do vento g_v .

$$g_R = \sqrt{2 \ln(vT)} + \frac{0,5772}{\sqrt{2 \ln(vT)}} \quad (5.2)$$

Quadro 5.7: Comparação de fatores de pico de diversas normativas.

G_R	g_R	g_v	$T(s)$	ν
NBR	-	-	-	-
AIJ	$\sqrt{2 \ln(vT)} + 1,2$	-	600	$f_0 C$
ASCE	$\sqrt{2 \ln(vT)} + \frac{0,5772}{\sqrt{2 \ln(vT)}}$	3,4	3600	f_0
AS/NZS	$\sqrt{1,2 + 2 \ln(vT)}$	3,4	600	f_0
EURO	$\sqrt{2 \ln(vT)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 \ln(vT)}}$	3,5	600	$f_0 C$
NBCC	$\sqrt{2 \ln(vT)} + \frac{0,5772}{\sqrt{2 \ln(vT)}}$	-	3600	$f_0 C$

fonte: (adaptado de Kwon e Kareem, 2013)

Considerando ainda os parâmetros para obtenção do coeficiente G_R , o fator de resposta ressonante R generalizado pode ser expresso através da Equação 5.3, segundo Kwon e Kareem (2013):

$$R = \frac{\pi SE}{4\zeta} \quad (5.3)$$

No Quadro 5.8 são apresentados os parâmetros descritos para cada norma relacionados à expressão generalizada.

Quadro 5.8: Comparação dos fatores de resposta ressonante de diversas normativas.

G_R	R
NBR	-
AIJ	$R_D = \frac{\pi F_D}{4\zeta_n}$
ASCE	$R = \sqrt{\frac{1}{\beta}} R_n R_h R_B (0,53 + 0,47 R_L)$
AS/NZS	-
EURO	$R^2 = \frac{\pi^2}{2\delta} S_L(z_s, f_1) R_h(\eta_h) R_b(\eta_b)$
NBCC	-

fonte: (adaptado de Kwon e Kareem, 2013)

O fator de redução S , apresenta critérios variáveis que dependem das dimensões da estrutura (altura e largura), da frequência natural e da velocidade no topo do edifício. A consideração da intensidade da turbulência e o fator de pico da velocidade na norma australiana e neozelandeza permite a estimativa do incremento da velocidade devido à altura. O fator de energia E inclui a frequência reduzida, que varia de acordo com a definição do comprimento da rugosidade L e a utilização da velocidade máxima ou média. No Quadro 5.9 são mostrados os parâmetros descritos para cada norma.

Quadro 5.9: Comparação dos fatores de redução, energia e frequência reduzida de diversas normativas.

R	S	E	N
NBR	-	-	-
AIJ	$S_D = \frac{0,9}{\left[1 + 6 \left(\frac{f_D H}{V_H}\right)^2\right]^{0,5} \left(1 + 3 \frac{f_D B}{V_H}\right)}$	$F = \frac{\frac{4f_D L_H}{V_H}}{\left[1 + 71 \left(\frac{f_D L_H}{V_H}\right)^2\right]^{\frac{5}{6}}}$	$N = \frac{f_D L_H}{V_H}$
ASCE	$S = R_h R_b (0,53 + 0,47 R_L)$	$R_n = \frac{7,47 N_1}{(1 + 10,3 N_1)^{\frac{5}{3}}}$	$N_1 = \frac{\eta_1 L_z}{V_z}$
AS/NZS	$S = \frac{1}{\left[1 + \frac{3,5 f_1 h (1 + g_v I_h)}{V_{des,\theta}}\right] \left[1 + \frac{4 f_1 b_{oh} (1 + g_v I_h)}{V_{des,\theta}}\right]}$	$E_t = \frac{\pi N}{(1 + 70,8 N^2)^{\frac{5}{6}}}$	$N = \frac{f_1 L_h (1 + g_v I_h)}{V_{des,\theta}}$
EURO	$S = R_h (\eta_h) R_b (\eta_b)$	$S_L(z_s, f_1) = \frac{6,8 f_L(z_s, f_1)}{[1 + 10,2 f_L(z_s, f_1)]^{\frac{5}{3}}}$	$f_L = \frac{f_1 L(z_s)}{V_m(z_s)}$
NBCC	$S = \frac{\pi}{3} \left[\frac{1}{1 + \frac{8 f_{nD} H}{3 V_H}} \right] \left[\frac{1}{1 + \frac{10 f_{nD} W}{V_H}} \right]$	$F = \frac{x_0^2}{(1 + x_0^2)^{\frac{4}{3}}}$	$x_0 = \frac{1220 f_1}{V_H}$

fonte: (adaptado de Kwon e Kareem, 2013)

6 COMPARAÇÃO DOS CRITÉRIOS DE CONFORTO

O principal objetivo na ocupação de edifícios altos excitados pelo vento é fornecer um ambiente confortável aos habitantes, assegurando o desempenho de suas tarefas e de seu conteúdo. Segundo Burton et al. (2015), dois fatores precisam ser considerados para manter aceitável o ambiente aos seus ocupantes: a mitigação do medo e da insegurança, bem como, a eliminação do desconforto.

Uma discussão recente entre a comunidade internacional de engenharia do vento tem ocorrido em relação a um descritor universal de aceleração, seja rms (*root mean square*) ou aceleração de pico. Melbourne e Cheung (1988) modificaram as curvas de aceitabilidade fornecidas pela ISO 6897/1984 (*International Organization for Standardization*, 1984) indicando que os critérios de aceleração fossem fornecidos em função da aceleração de pico. Segundo McNamara et al. (2002), as reações negativas ao movimento podem ser resultantes de um fenômeno isolado ou contínuo, logo, um melhor descritor médio dos efeitos sobre algum período de recorrência seria o valor rms. No entanto, outros também têm afirmado que uma pessoa é mais dramaticamente afetada por grandes eventos, impactando o indivíduo muito mais do que o fenômeno contínuo, ao qual o seu corpo possa já ter se acostumado.

Muitos defendem o índice rms devido à facilidade com que é medido experimentalmente ou previsto analiticamente, citando a variabilidade nas medições de aceleração máxima em testes de túnel de vento, por exemplo. Segundo Kareem (1992) os critérios baseados em acelerações rms, em oposição as acelerações de pico, oferecem um meio mais preciso de combinar respostas em direções diferentes com base nas suas respectivas correlações. Já os defensores de critérios de aceleração de pico alegam que as acelerações de pico resultantes são difíceis de estimar quando acelerações rms são utilizadas.

Conforme Burton et al. (2015), em termos de intervalo de recorrência, as avaliações de conforto dos ocupantes tem ocorrido em intervalos de 5 a 10 anos justificam-se pois, em média, neste período, o funcionamento ou a estabilidade estrutural não é afetada. Embora estes intervalos de recorrências possam atenuar o medo em relação a movimentos extremos (e eventos extremos), não abordam adequadamente o desconforto associado à ocorrência regular de ventos fortes. Uma tendência mais recente, segundo Burton et al. (2015), é a avaliação dos eventos de vento para um intervalo de recorrência de 1 ano. Sendo assim, mais relevantes as

preocupações diárias dos habitantes, tendo em vista, que na prática, tem se percebido, que os movimentos são sentidos muito mais regularmente do que para um período de recorrência de 10 anos, por exemplo. Galsworthy (2015) relata em estudo recente a conversão do período de recorrência para 1 mês, considerando um multiplicador de 0,5 nos critérios de 1 ano, conforme Figura 6.1.

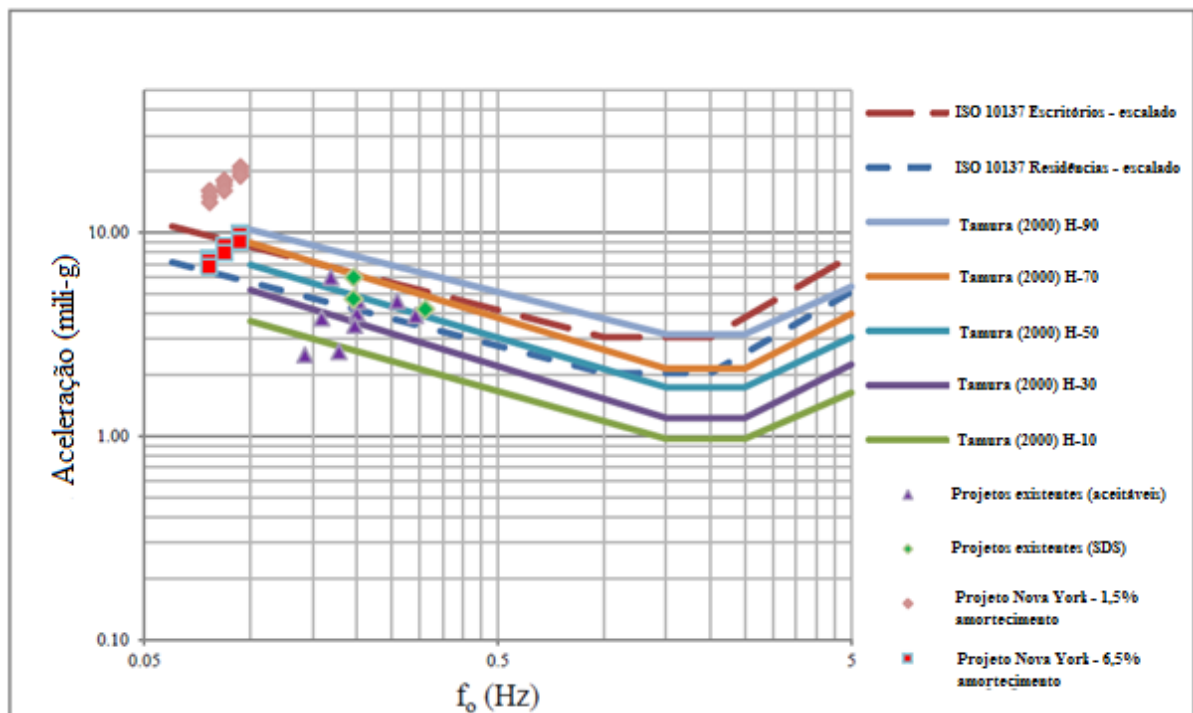


Figura 6.1: Resposta de edifícios em estudo de critério de conforto para 1 mês de intervalo de recorrência (fonte: GALSWORTHY et al., 2015).

Segundo Burton et al. (2015), o tempo de medição está intimamente associado com a taxa de objeção dos ocupantes. As pessoas toleram o desconforto para eventos com pouca frequência e de menor duração, ou seja, curtos períodos de tempo, mas não em ocorrências rotineiras. Melbourne e Palmer (1992) afirmam que a duração de 10 minutos é utilizada porque são típicas de resposta extrema em áreas onde a atividade temporal sobrepõe as cargas de vento de projeto.

Quanto aos critérios de conforto, muitos estão relacionados à aceitabilidade e outros estão relacionados à percepção. Chen e Robertson (1972) forneceram informações sobre os limites de percepção humana para excitação senoidal em função da frequência. Hansen et al. (1973) foi o primeiro trabalho publicado em relação às respostas dos ocupantes frente às acelerações.

Os critérios foram expressos em termos de acelerações rms para um período de recorrência de 6 anos.

O Canadá foi o primeiro país a introduzir em seu código nacional um critério de aceitabilidade em relação às acelerações de pico para um período de recorrência de 10 anos. Irwin (1981) propôs recomendações, sintetizando trabalhos anteriores de vários pesquisadores, que levaram ao desenvolvimento da ISO 6897 (1984) para avaliar a aceitabilidade dos movimentos horizontais sujeitos as ações do vento. As orientações estavam relacionadas com a frequência e as acelerações rms para um período de recorrência de 5 anos. Em 1988, Melbourne e Cheung alteraram as curvas fornecidas pela ISO 6897 (1984) para especificar as acelerações em termos de pico. Esta proposta influenciou no código australiano em 1989 para qualquer período de recorrência. As recomendações japonesas de 1991 foram substituídas pelo AIJ (2004), o qual levou em conta, trabalhos realizados em simulador de movimento e novamente a ISO 6897 (1984), onde propôs critérios de percepção, especificados com acelerações de pico para um intervalo de recorrência de 1 ano.

Isyumov (1993) propôs critérios de aceitabilidade em função das acelerações de pico para um período de recorrência de 1 ano, ao qual foram considerados pela norma americana (ASCE) e CTBUH. Em 1995 estas mesmas diretrizes foram introduzidas no código canadense. Um padrão mais atual, que substituiu a ISO 6897 (1984) é a ISO 10137 (2007), a qual alterou o período de recorrência para um 1 ano e as acelerações estão especificadas para valor de pico, ao invés de rms. O quadro 6.1 trás de forma sintetizada a comparação dos critérios de conforto, bem como, a Figura 6.2 apresenta a evolução dos critérios de conforto, segundo Tamura et al. (2006) e as Figuras 6.3 e 6.4 apresentam uma comparação atual das orientações de conforto para um período de recorrência de 1 ano, usado globalmente por projetistas de edifícios altos, e resultados específicos de vários estudos em simulador de movimento.

Quadro 6.1: Comparação dos critérios de conforto.

Pesquisa (ano)	Aceleração (rms ou pico)	Recorrência (anos)	Objeção (%)	Intervalo de Tempo (min)	Critério (mg)
Hansen et al. (1973)	rms	6	2	-	5
NBCC (1977)	pico	10	-	-	1 (residências) 3 (escritórios)
Irwin (1981)	rms	5	2	10	curvas
ISO 6897 (1984)	rms	5	2	10	5 para 0,2Hz
Melbourne e Cheung (1988)	pico	R (0,5<R<10)	2	10	curvas
NBR 6188 (1988)	pico	10	-	-	< 0,10m/s ²
AIJ (1991-2004)	pico	1	2	10	curvas
Isyumov (1993)	pico	1	-	-	5-7 (residências) 9-12 (comerciais)
NBCC (1995)	pico	1	-	-	5-7 (residências) 9-12 (comerciais)
ISO 10137 (2007)	pico	1	-	-	curvas

fonte: (elaborado pelo autor)

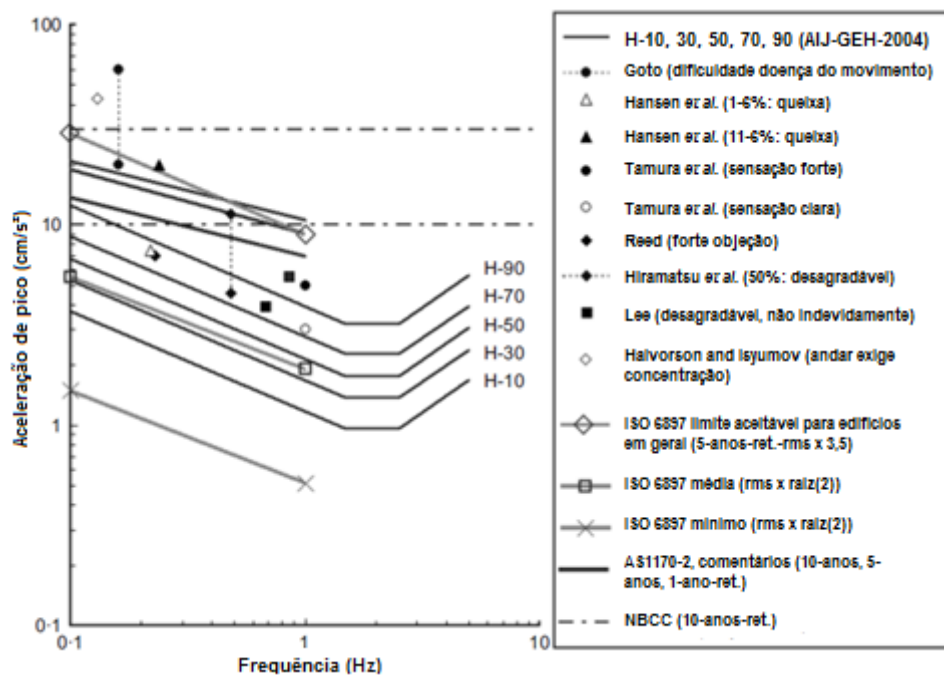


Figura 6.2: Evolução dos critérios de conforto humano (fonte: TAMURA et al., 2006).

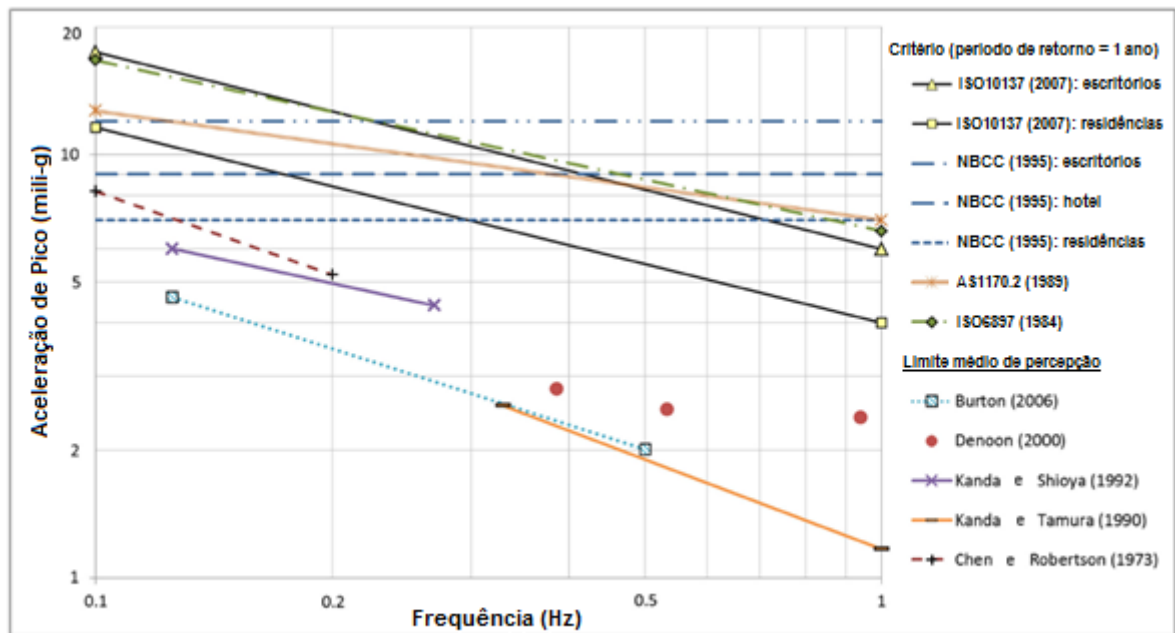


Figura 6.3: Comparação dos limites de percepção e critérios sugeridos, para um período de recorrência de 1 ano (fonte: KWOK et al., 2009).

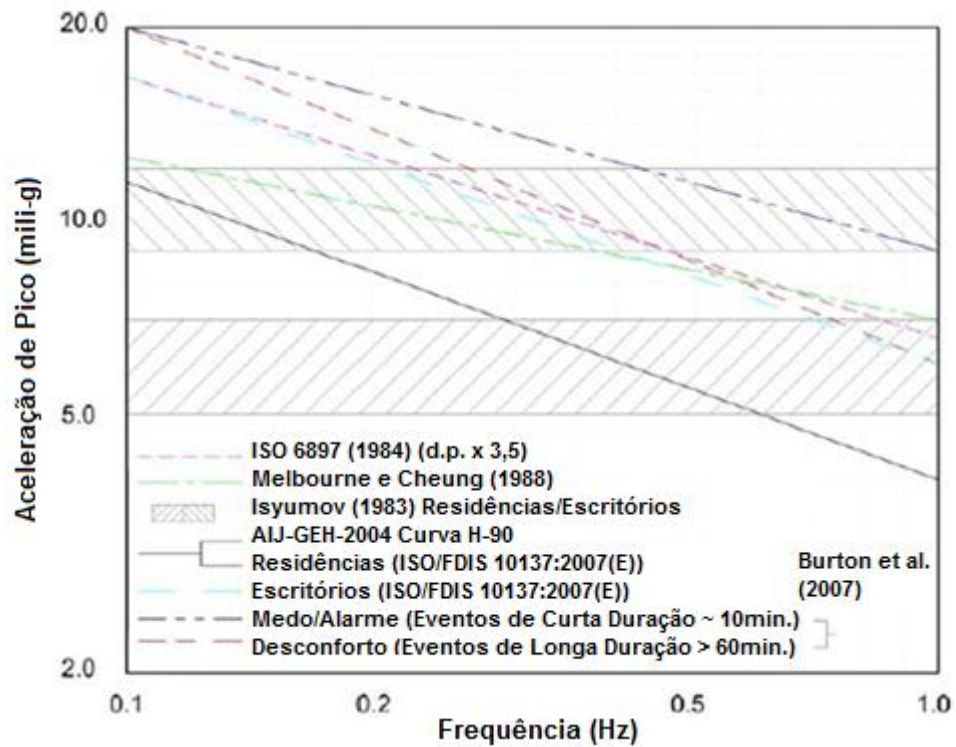


Figura 6.4: Comparação dos limites de percepção e critérios sugeridos, para um período de recorrência de 1 ano (fonte: BURTON et al., 2015).

7 DESCRIÇÃO DO CAARC, APLICAÇÕES E RESULTADOS DAS AVALIAÇÕES NORMATIVAS

Neste capítulo será apresentado o edifício alto a ser avaliado, bem como as características e parâmetros principais envolvidos na determinação das acelerações provocadas pelas forças vibratórias, obtidos para cada resposta do vento, ou seja, longitudinal, transversal e torcional.

Segundo Melbourne (1980), em 1969, R. L. Wardlaw e G. F. Moss propuseram a criação de um edifício alto padronizado que permitiria a comparação e a calibração de técnicas experimentais. Estes dois cientistas participaram no *Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council in the Field of Aerodynamics*, um conselho criado na Austrália para coordenar o desenvolvimento da tecnologia na área da engenharia aeronáutica o qual se refere às siglas utilizadas no nome do edifício proposto por estes, *CAARC Standard Tall Building*. O objetivo esperado por estes pesquisadores era a obtenção de uma comparação direta da resposta dinâmica do modelo e das medidas de pressão que ajudassem no desenvolvimento de melhores técnicas, unificando os resultados de diferentes pesquisadores e ensaios em túneis de vento.

O *CAARC Standard Tall Building* trata-se de um prisma retangular, com dimensões adaptadas ao sistema internacional de medidas de 45,72m x 30,48m x 182,88m, sendo estás B, D e H, respectivamente. Considere-se:

B: dimensão perpendicular à direção do vento (componente transversal);

D: dimensão paralela à direção do vento (componente longitudinal);

H: altura da edificação.

Em relação às propriedades dinâmicas, considera-se uma forma modal linear, amortecimento estrutural em relação ao crítico de 1% em relação às componentes transversal, longitudinal e torcional, bem como, uma frequência de 0,2Hz para o primeiro modo de vibração em cada direção ortogonal e de 0,3Hz para componente torcional. A massa específica do edifício é constante ao longo da altura sendo o seu valor de aproximadamente 160 kg/m³ e o seu raio de giro é de 8,79m.

O Quadro 7.1 representa resumidamente os parâmetros dos dados de entrada em relação ao modelo *CAARC Standard Tall Building*:

Quadro 7.1: Dados de entrada relacionados ao CAARC.

Parâmetro	Simbologia	Valor	Unidade
Dimensão do CAARC perpendicular ao vento	B	45,72	m
Dimensão do CAARC paralela ao vento	D	30,48	m
Altura do CAARC	H	182,88	m
Razão de amortecimento crítico	ζ	0,01	-
Forma modal linear para a componente longitudinal	β_1	1	-
Forma modal linear para a componente transversal	β_2	1	-
Forma modal linear para a componente torcional	β_3	1	-
Frequência para a componente longitudinal	f_1	0,2	Hz
Frequência para a componente transversal	f_2	0,2	Hz
Frequência para a componente torcional	f_3	0,3	Hz
Massa específica do edifício	ρ	160	kg/m ³
Massa total do edifício	m	40776259,09	kg
Raio de giro do edifício	γ	8,79	m
Altura atribuída de piso a piso (exceto o topo)	Δ_h	3,00	m
Altura atribuída no topo	Δ_h	2,88	m

fonte: (elaborado pelo autor)

Com intuito de avaliar e comparar especificamente os parâmetros relacionados às acelerações, as velocidades básicas (V_0) foram fixadas com valores entre 30 e 50m/s, variando o intervalo a cada 1m/s, considerando que esta é a gama de velocidade no território brasileiro. De acordo com as isopletas de velocidade básica da NBR 6123 (1988) esta corresponde a máxima velocidade média medida sobre 3 segundos, que pode ser excedida uma vez em 50 anos, a 10 metros sobre o nível do terreno em lugar aberto e plano (Categoria de Rugosidade do Terreno II).

Considerando os critérios de cada normativa em relação às categorias de exposição de terreno, altura de referência, tempo de medição e período de recorrência, apresentados resumidamente no Quadro 7.2 e para que fosse possível a aplicação das metodologias de determinação das acelerações, fez-se necessário converter cada velocidade básica (V_0) em função dos critérios de cada normativa.

Adotou-se para todas as normativas a Categoria de Exposição 3 – CE3 (refere-se à Categoria de Rugosidade do Terreno II da NBR 6123 (1988)), conforme Quadro 5.2, definido anteriormente. Com o objetivo de converter a altura de referência e o tempo de medição, adotaram-se os valores especificados na Tabela 22 da NBR 6123 (1988), onde para cada normativa fora multiplicado um coeficiente de conversão das velocidades básicas, tudo em relação à Categoria de Rugosidade do Terreno II da NBR 6123 (1988), conforme Quadro 7.3. Por fim, utilizou-se a expressão matemática da Equação 7.1, oriunda dos valores da Tabela 23 da NBR 6123 (1988), para converter o período de recorrência de todas as normativas em 1 ano, respeitada a probabilidade de que a velocidade básica (V_0) seja igualada ou excedida neste período em 63%. Esta conversão leva em consideração que os critérios de avaliação quanto a conforto (percepção e/ou aceitabilidade), atualmente vigente e estudados neste trabalho, referem-se ao período de recorrência de 1 ano, exceto para a NBR 6123 (1988) que apresenta critério para a verificação do conforto relacionado ao período de recorrência de 10 anos.

Quadro 7.2: Categorias de exposição de terreno, altura de referência, tempo de medição e período de recorrência de cada norma para cálculo das acelerações.

Norma	Velocidade básica	Velocidade básica para cálculo das acelerações
	Categoria, Altura, Tempo, Período de Recorrência	Categoria, Altura, Tempo, Período de Recorrência
AIJ	Cat. II, 10m, 600s, 100 anos	Cat. II, 180m, 600s, 1 ano
ASCE	Cat. C, 10m, 3s, 50 anos	Cat. II, 180m, 3s, 1 ano
AS_NZS	Cat. II, 10m, 3s, 50 anos	Cat. II, 180m, 3s, 1 ano
EURO	Cat. II, 10m, 600s, 50 anos	Cat. II, 180m, 600s, 1 ano
NBCC	Cat. A, 10m, 3600s, 50 anos	Cat. II, 180m, 3600s, 1 ano
NBR	Cat. II, 10m, 3s, 50 anos	Cat. II, 180m, 3s, 10 anos

fonte: (elaborado pelo autor)

$$S_3 = 0,54 \left[-\frac{\ln(1 - P_m)}{m} \right]^{-0,157} \quad (7.1)$$

Sendo:

S_3 : Fator estatístico;

P_m : Probabilidade de que a velocidade seja igualada ou excedida;

m : Vida útil ou período de recorrência.

Quadro 7.3: Coeficientes de conversão das categorias de exposição de terreno, altura de referência, tempo de medição e período de recorrência.

Normas	Categoria de terreno e Tempo de medição	Altura de referência	Período de recorrência
AIJ	0,69	1,06	1,11 e 0,54
ASCE	1,00	1,28	0,54
AS_NZS	1,00	1,28	0,54
EURO	0,69	1,06	0,54
NBCC	0,65	1,03	0,54
NBR	1,00	1,28	0,78

fonte: (elaborado pelo autor)

Os coeficientes de importância, de direção do vento, de efeito de vizinhança, de proteção e de estação, presentes em algumas normativas para obtenção da velocidade, bem como, o coeficiente de arrasto são tomados pelo valor unitário. O Quadro 7.4 apresenta os valores relacionados às velocidades básicas e após a conversão de cada norma em relação aos coeficientes anteriormente descritos.

Quadro 7.4: Velocidades básicas e velocidades convertidas para cada norma.

V_0 (m/s)	V_0 convertidas (m/s)					
	AIJ	ASCE	AS_NZS	EURO	NBCC	NBR
30	13,2	20,7	20,7	11,8	10,8	30,0
31	13,6	21,4	21,4	12,2	11,2	31,0
32	14,0	22,1	22,1	12,6	11,6	31,9
33	14,5	22,8	22,8	13,0	11,9	32,9

34	14,9	23,5	23,5	13,4	12,3	33,9
35	15,3	24,2	24,2	13,8	12,7	34,9
36	15,8	24,9	24,9	14,2	13,0	35,9
37	16,2	25,6	25,6	14,6	13,4	36,9
38	16,7	26,3	26,3	15,0	13,7	37,9
39	17,1	27,0	27,0	15,4	14,1	38,9
40	17,5	27,6	27,6	15,8	14,5	39,9
41	18,0	28,3	28,3	16,2	14,8	40,9
42	18,4	29,0	29,0	16,6	15,2	41,9
43	18,9	29,7	29,7	17,0	15,5	42,9
44	19,3	30,4	30,4	17,4	15,9	43,9
45	19,7	31,1	31,1	17,8	16,3	44,9
46	20,2	31,8	31,8	18,2	16,6	45,9
47	20,6	32,5	32,5	18,6	17,0	46,9
48	21,0	33,2	33,2	19,0	17,4	47,9
49	21,5	33,9	33,9	19,4	17,7	48,9
50	21,9	34,6	34,6	19,7	18,1	49,9

fonte: (elaborado pelo autor)

Foram aplicadas as metodologias e procedimentos na determinação das acelerações conforme disposto em cada normativa, descritos em inteiro teor no Apêndice A. Tais procedimentos foram desenvolvidos e aplicados neste trabalho com o uso da ferramenta Excel, através de sucessivas programações.

Foram também consideradas as incidências do vento na resposta longitudinal, transversal e torcional, bem como, na direção dos ventos a 0° e 90° , conforme Figura 7.1. O Quadro 7.5 apresenta um resumo dos procedimentos normativos que consideram o cálculo das acelerações nas direções de incidência do vento.

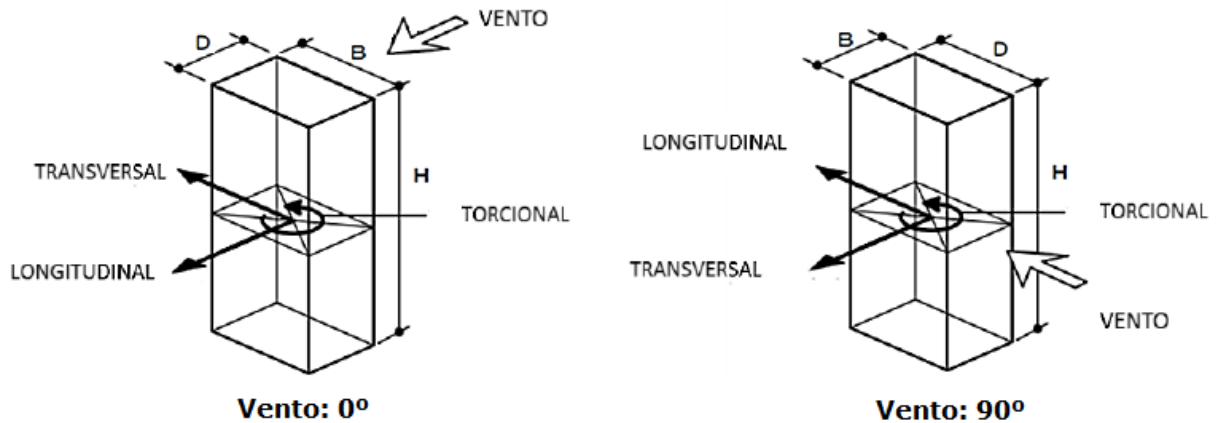


Figura 7.1: Direções de incidência do vento analisadas (fonte: elaborado pelo autor).

Quadro 7.5: Procedimentos normativos em relação à incidência do vento.

Normas	Vento 0°		Vento 90°		Torcional
	Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal	
AIJ	X	X	X	X	X
ASCE	X	-	X	-	-
AZ_NZS	X	X	X	X	-
EURO	X	-	X	-	-
NBCC	X	X	X	X	-

fonte: (elaborado pelo autor)

7.1 RESULTADOS DAS ACELERAÇÕES MÁXIMAS

A seguir é desenvolvida a análise dos resultados obtidos com a aplicação de diversos códigos normativos, utilizando-se como estudo padrão o modelo *CAARC Standard Tall Building* em relação às acelerações máximas, considerando a altura de referência de cada norma, bem como, as velocidades convertidas descritas anteriormente, para cada direção de incidência do vento. Os valores das acelerações máximas são apresentados em *mg* (mili-*g*), sendo *g* a aceleração da gravidade e as velocidades estão apresentadas em *m/s*.

Pode-se verificar em todos os processos de determinação das acelerações das diversas normativas analisadas a falta de homogeneização das metodologias. Iniciando pela determinação das velocidades básicas, tendo em vista critérios diferentes em cada normativa na determinação das categorias de exposição do terreno, altura de referência, tempo de medição e período de recorrência. Isto posto, observa-se a dificuldade de comparação dos resultados e, por consequência, da padronização dos mesmos.

Outra dificuldade encontra-se no fato que nem todas as normativas analisadas apresentam processos para a determinação completa da resposta transversal e torcional, ao qual se pode observar também que os resultados das acelerações máximas foram maiores que a resposta longitudinal, no caso analisado.

Pode-se perceber que muitas normativas e códigos já apresentaram critérios de conforto em versões anteriores e atualmente não mais os apresentam, deixando a cargo dos projetistas e proprietários a busca de orientações em outros referenciais. Nota-se uma tendência mundial de que a generalização das normas não pode ser adotada de forma indiscriminada e que, para uma maior eficiência, deve-se estudar o caso mais detalhadamente, seja através de túnel de vento e/ou simuladores de movimento.

Ainda neste contexto, embora as normas, em sua maioria, não mais apresentam critérios de conforto, atualmente os dois únicos códigos vigentes que apresentam critérios de conforto (ISO 10137 e AIJ) os apresentam para um intervalo de recorrência de 1 ano. Como a maioria das normas e códigos recomendam um período de 10 anos para o cálculo das acelerações, há necessidade de conversão destes valores para comparação com os critérios vigentes.

As Figuras 7.2 a 7.13 apresentam as magnitudes de acelerações máximas na resposta longitudinal de direção de incidência do vento a 0° e 90° . Pode-se perceber que as acelerações, para o caso estudado, apresentam variações assemelhando-se na maioria dos procedimentos. Exceto para a AS/NZS (2011) a qual difere consideravelmente. De igual forma, a norma brasileira (NBR 6123 (1988)), considerando um período de recorrência de 10 anos, também apresenta valores de acelerações muito acima do critério de conforto de $0,10\text{m/s}^2$ imposto pela mesma. Não foram encontradas razões específicas para tais discrepâncias, em ambos os casos.

7.1.1 Componente Longitudinal – 0°

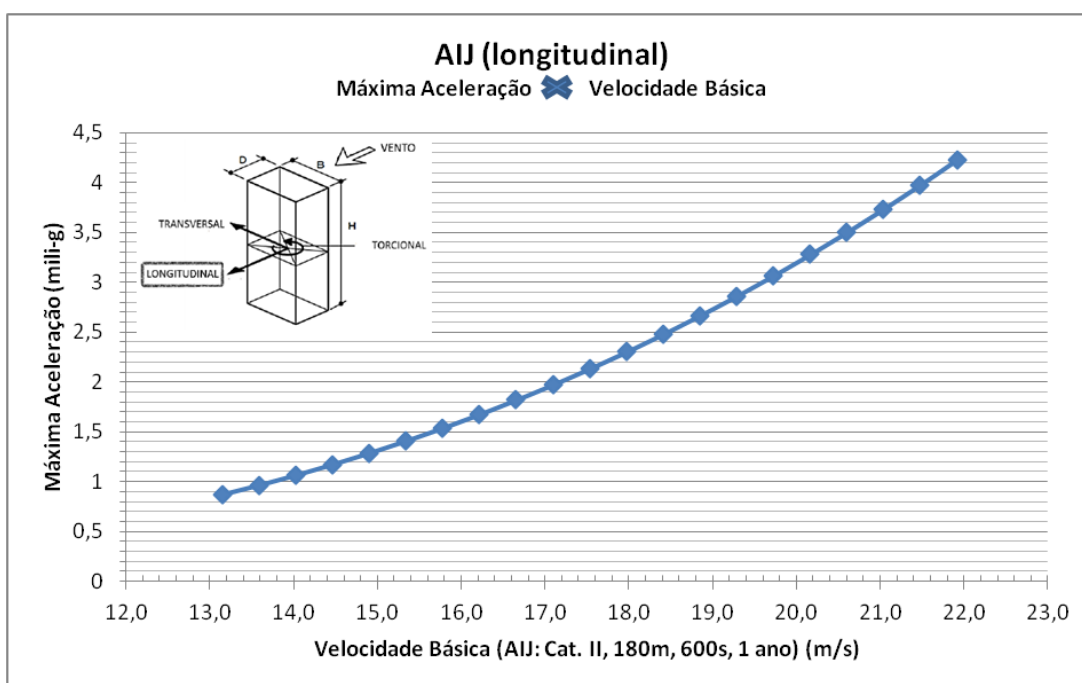


Figura 7.2: Estimativa das acelerações máximas utilizando a norma AIJ *versus* velocidade básica: longitudinal – 0° .

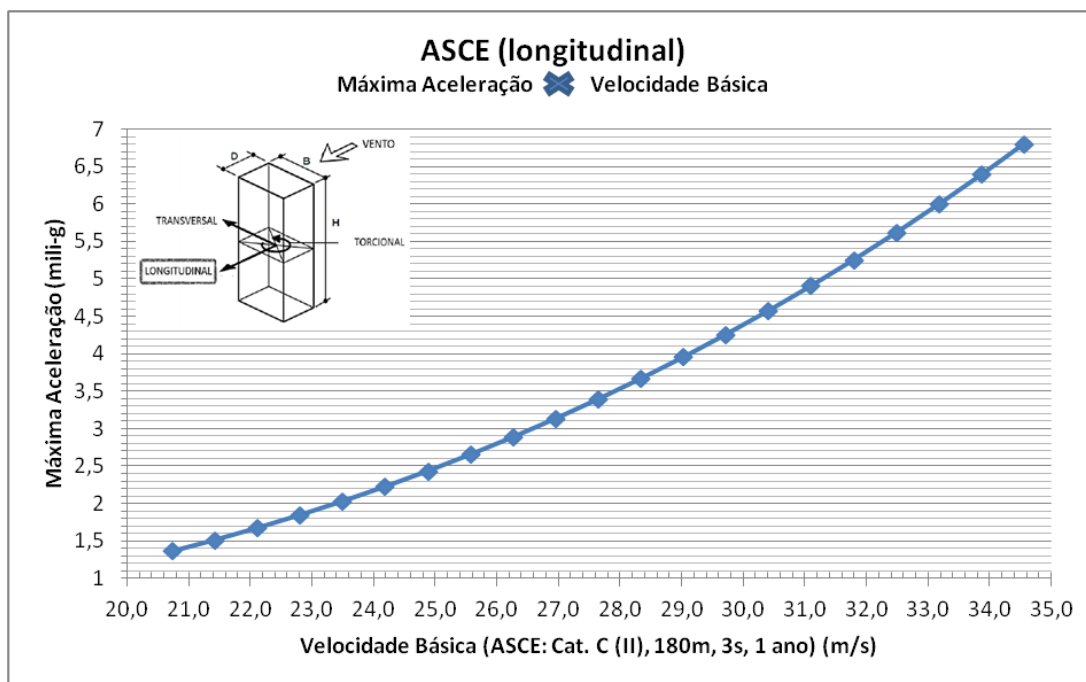


Figura 7.3: Estimativa das acelerações máximas utilizando a norma ASCE *versus* velocidade básica: longitudinal – 0°.

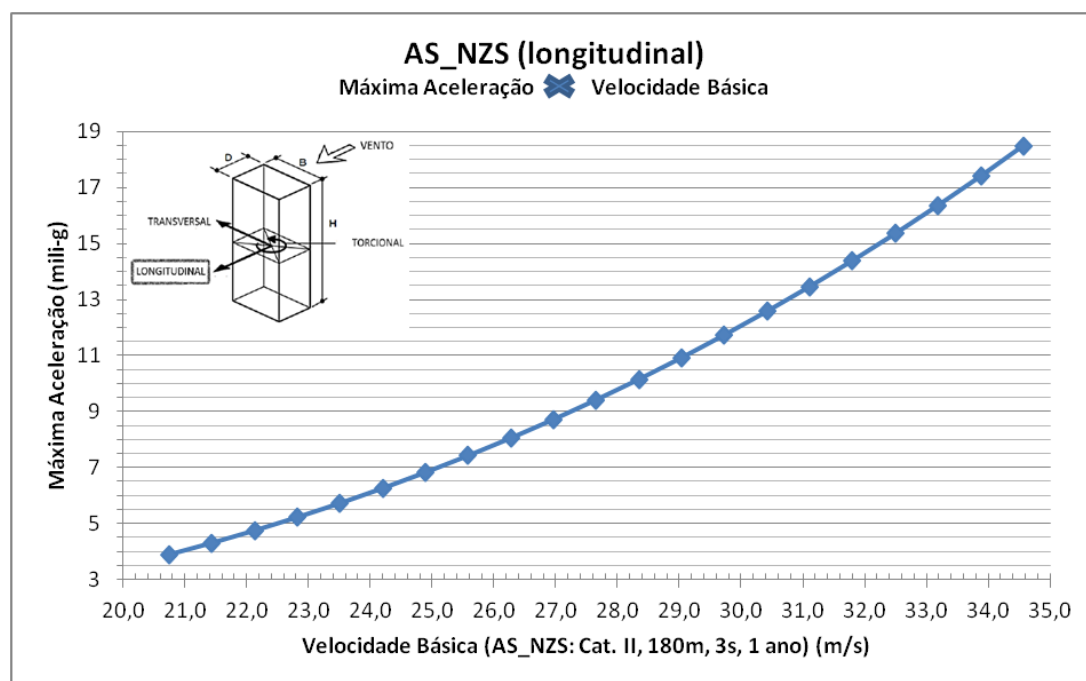


Figura 7.4: Estimativa das acelerações máximas utilizando a norma AS/NZS *versus* velocidade básica: longitudinal – 0°.

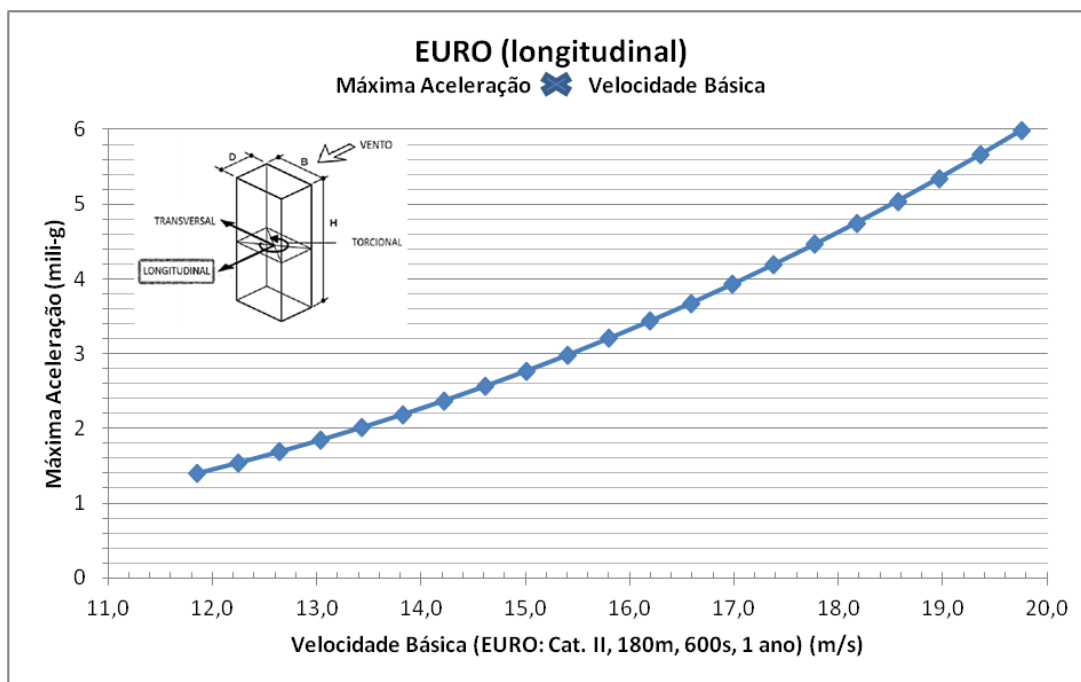


Figura 7.5: Estimativa das acelerações máximas utilizando a norma EURO *versus* velocidade básica: longitudinal – 0°.

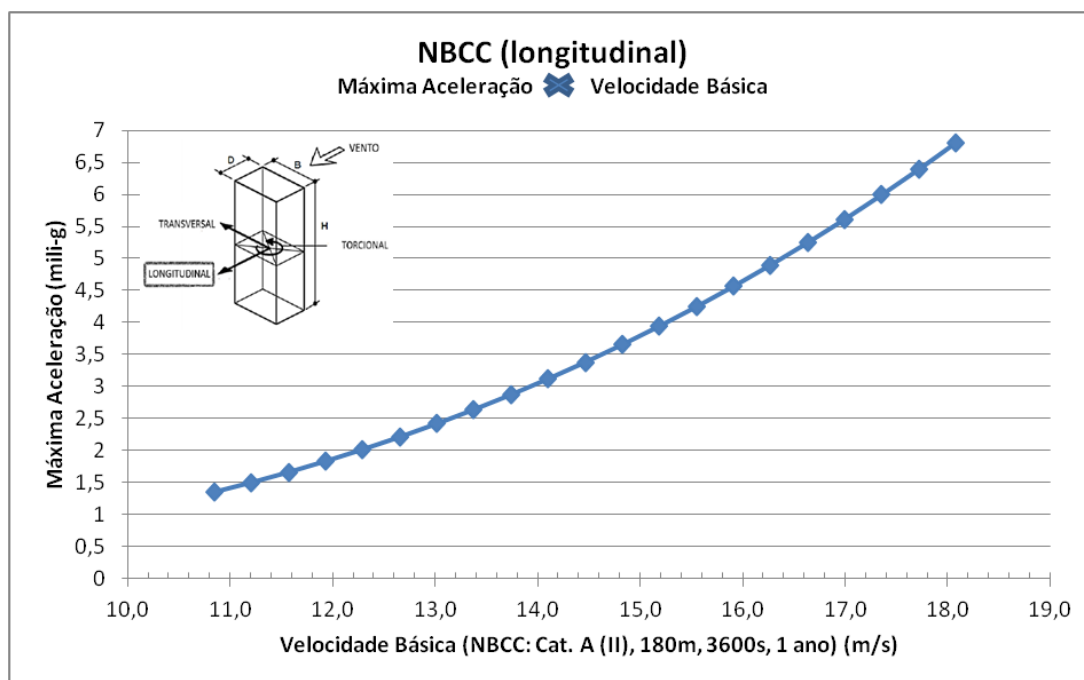


Figura 7.6: Estimativa das acelerações máximas utilizando a norma NBCC *versus* velocidade básica: longitudinal – 0°.

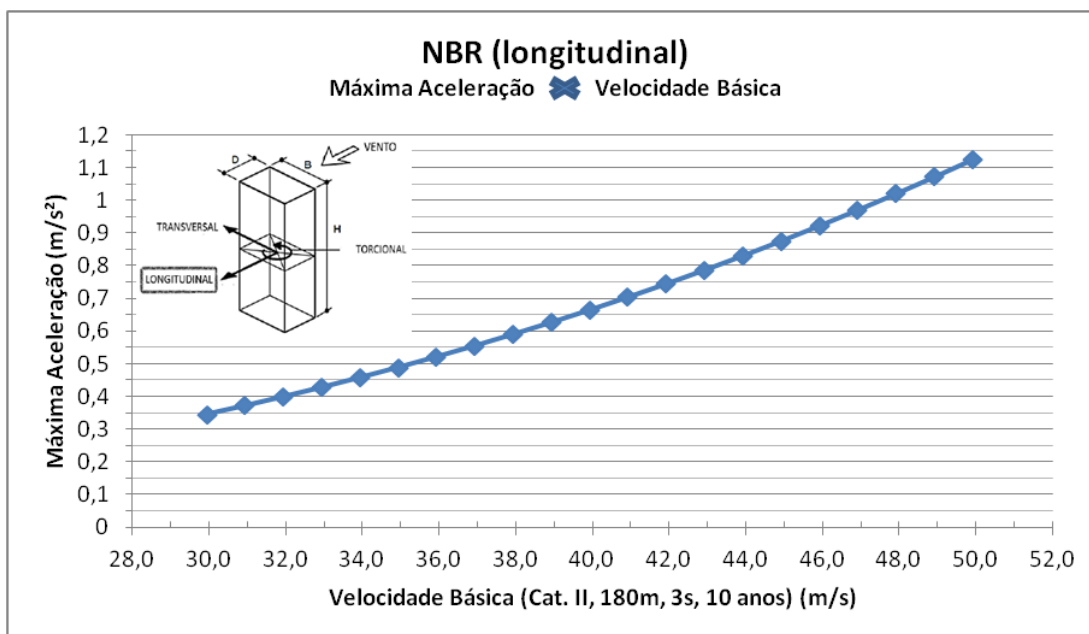


Figura 7.7: Estimativa das acelerações máximas utilizando a norma NBR *versus* velocidade básica: longitudinal – 0°.

7.1.2 Componente Longitudinal – 90°

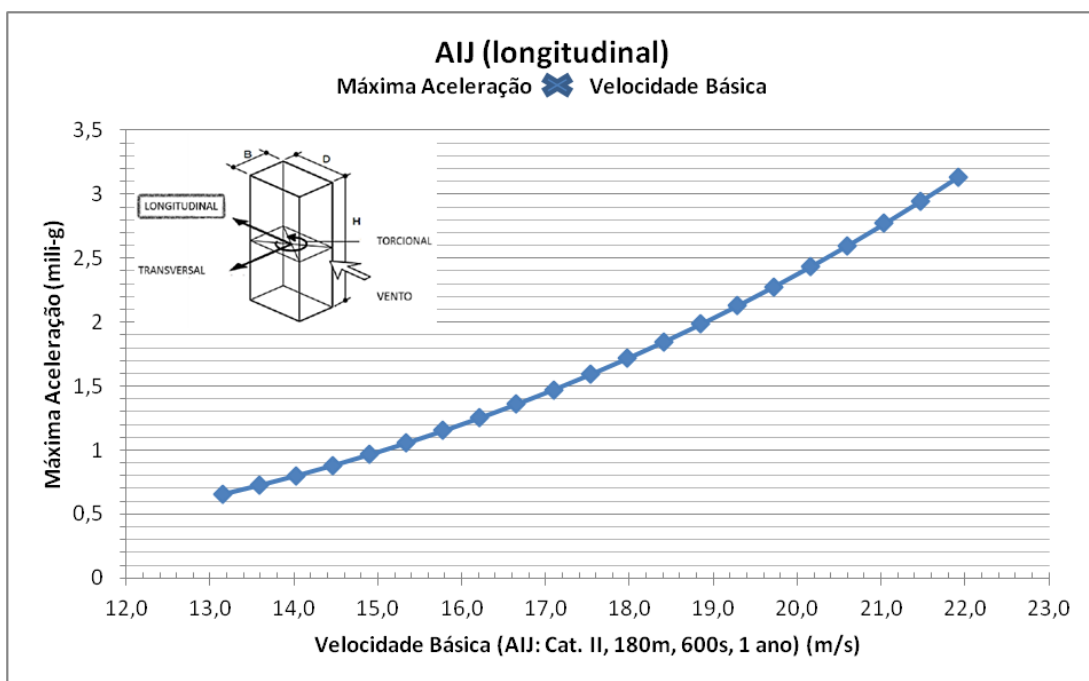


Figura 7.8: Estimativa das acelerações máximas utilizando a norma AIJ *versus* velocidade básica: longitudinal – 90°.

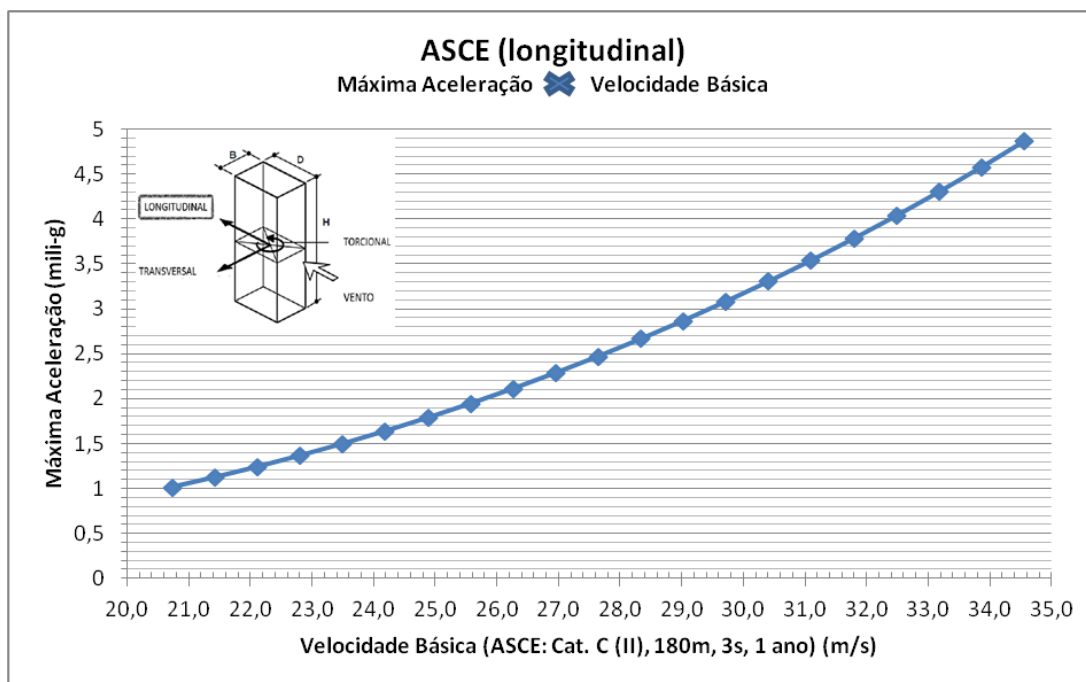


Figura 7.9: Estimativa das acelerações máximas utilizando a norma ASCE *versus* velocidade básica: longitudinal – 90°.

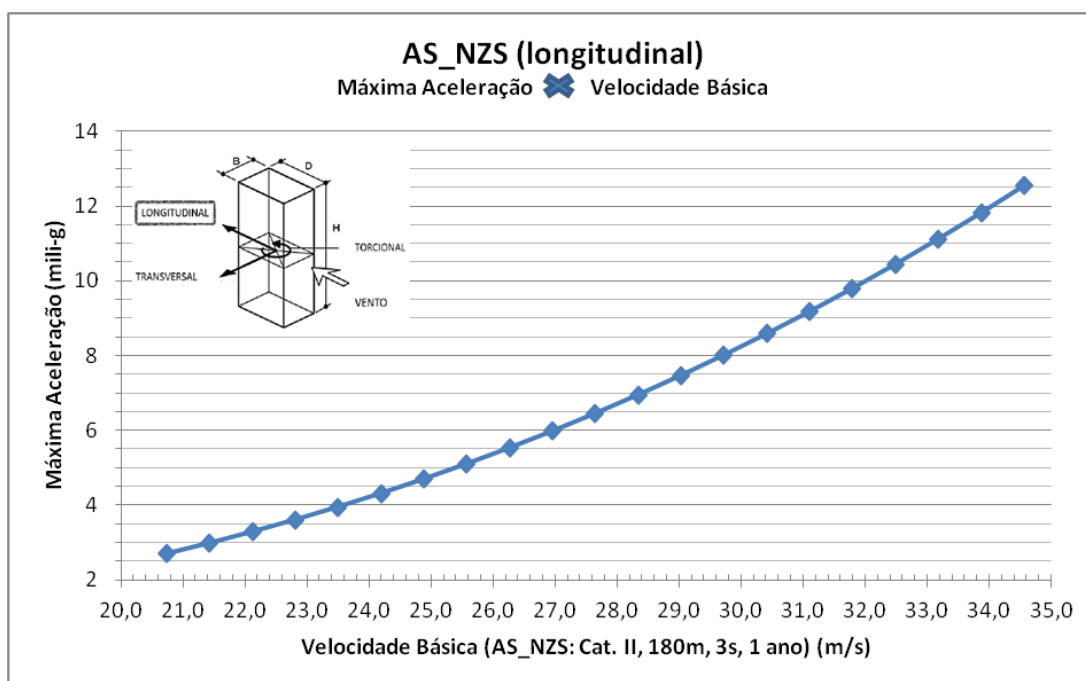


Figura 7.10: Estimativa das acelerações máximas utilizando a norma AS/NZS *versus* velocidade básica: longitudinal – 90°.

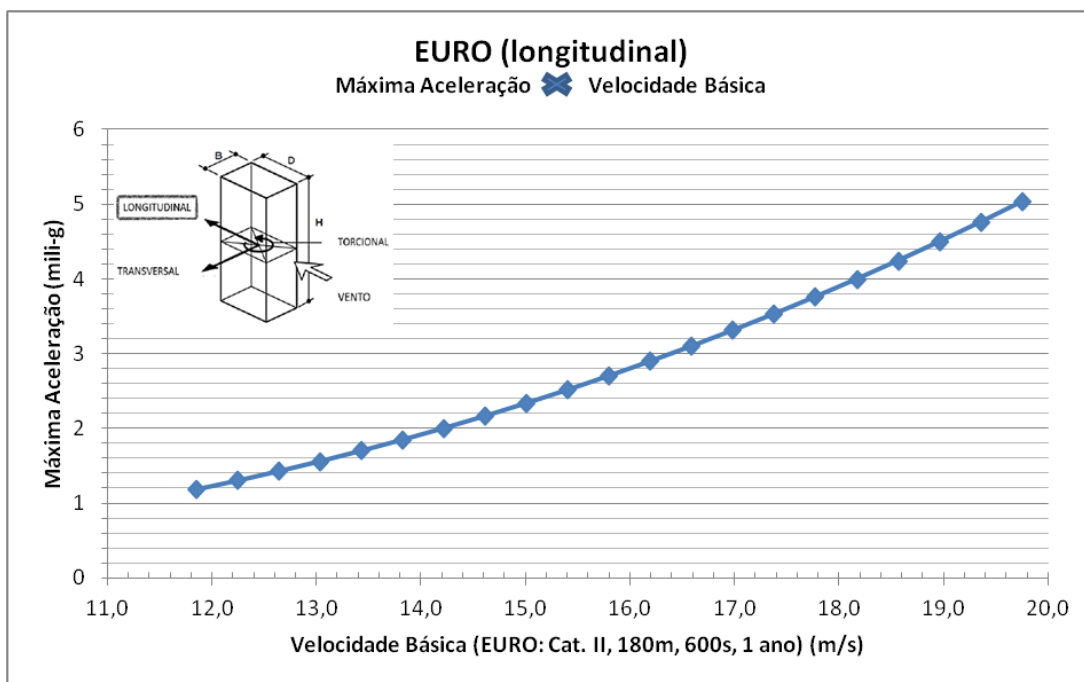


Figura 7.11: Estimativa das acelerações máximas utilizando a norma EURO *versus* velocidade básica: longitudinal – 90°.

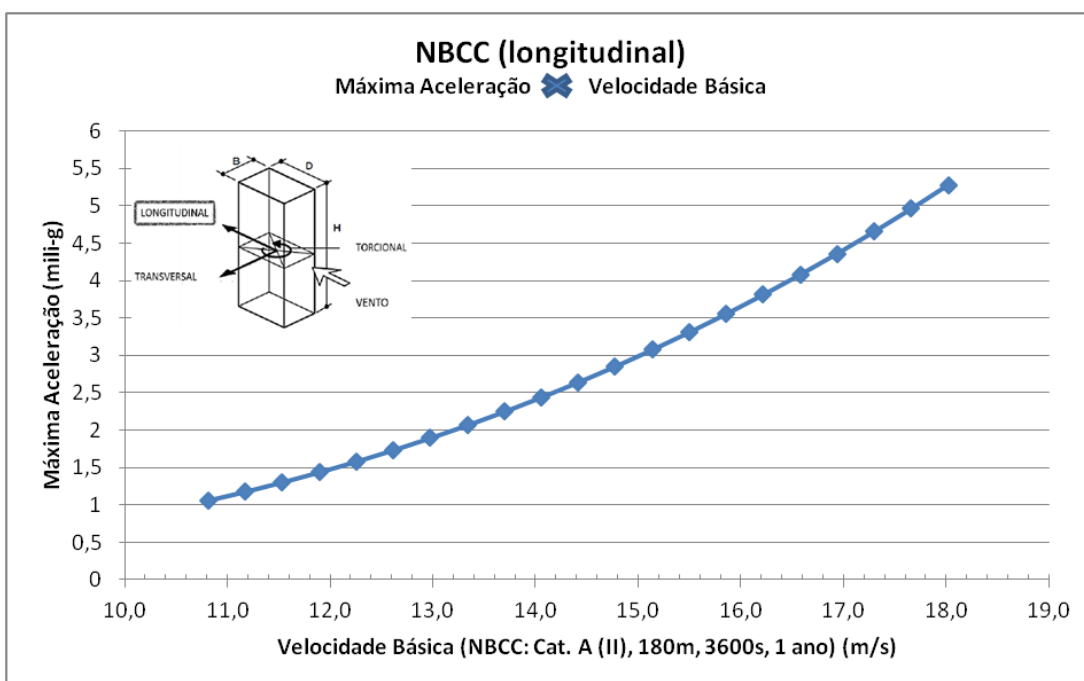


Figura 7.12: Estimativa das acelerações máximas utilizando a norma NBCC *versus* velocidade básica: longitudinal – 90°.

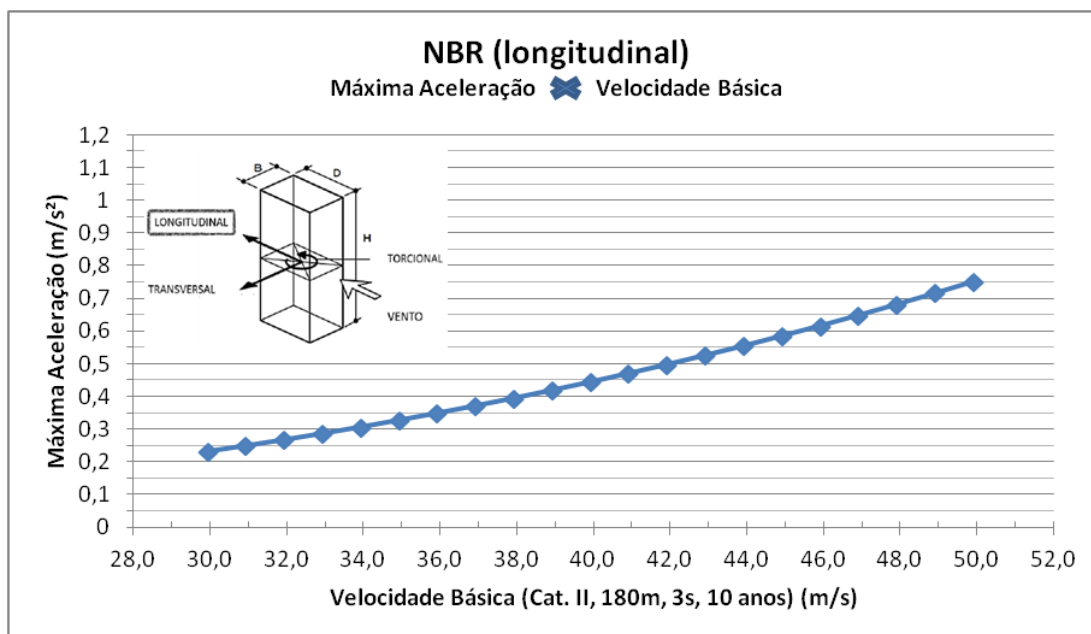


Figura 7.13: Estimativa das acelerações máximas utilizando a norma NBR *versus* velocidade básica: longitudinal – 90°.

7.1.3 Componente Transversal – 0°

As Figuras 7.14 a 7.19 apresentam as magnitudes de acelerações máximas na resposta transversal de direção de incidência do vento a 0° e 90°. Pode-se perceber que as acelerações, para o caso estudado, apresentam discrepância na maioria dos casos, sendo divergentes os seus resultados.

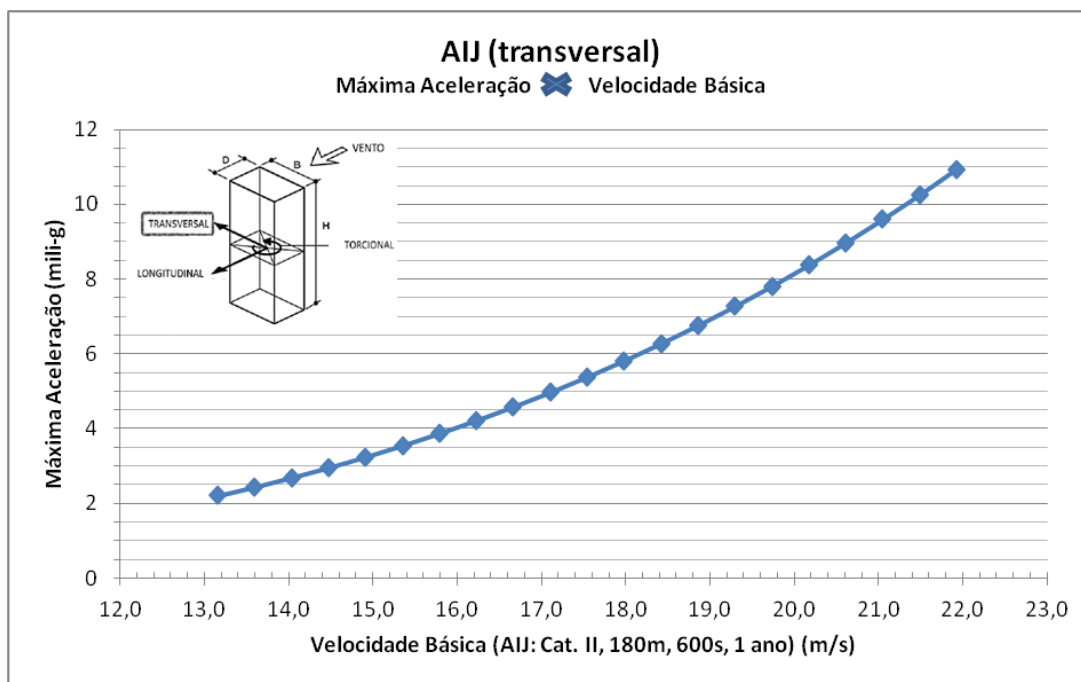


Figura 7.14: Estimativa das acelerações máximas utilizando a norma AIJ *versus* velocidade básica: transversal – 0°.

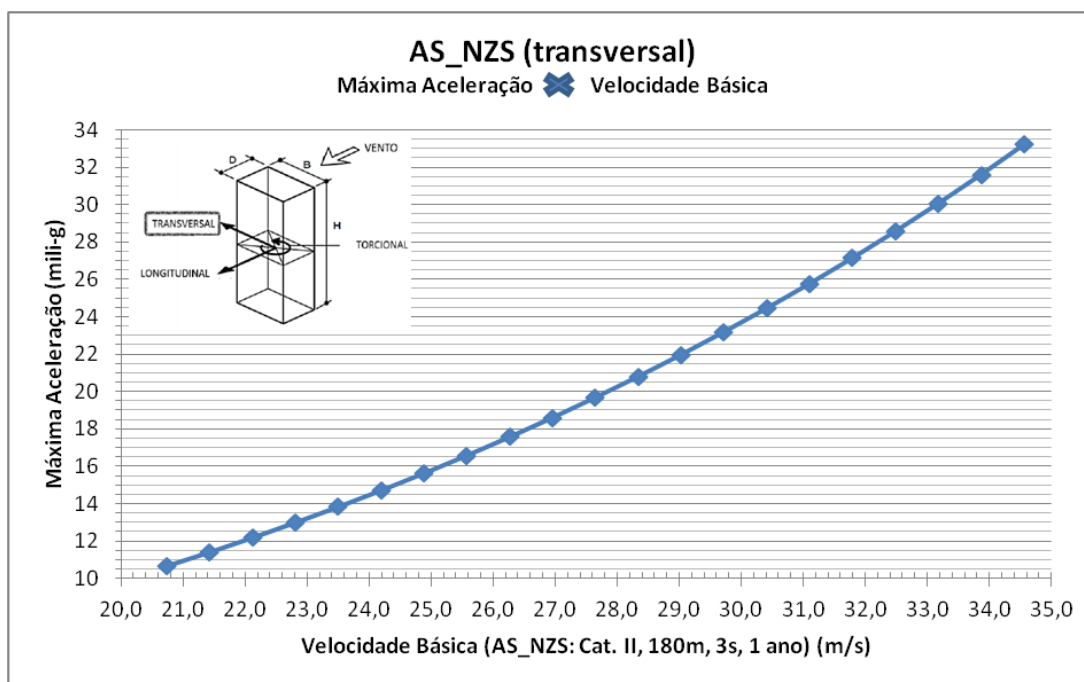


Figura 7.15: Estimativa das acelerações máximas utilizando a norma AS/NZS *versus* velocidade básica: transversal – 0°.

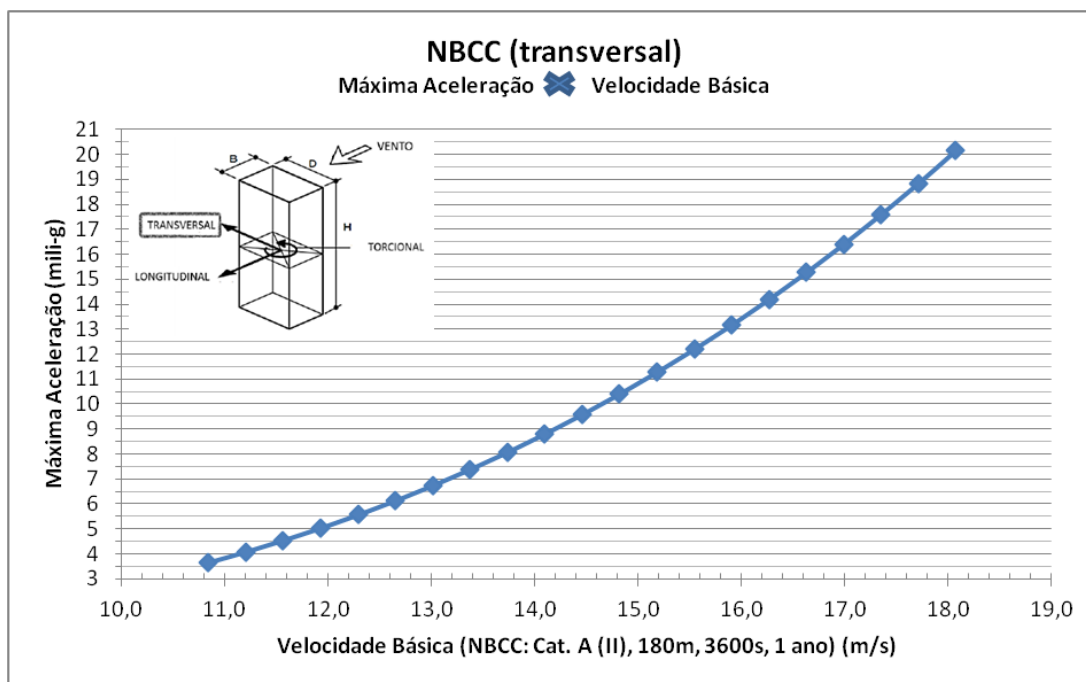


Figura 7.16: Estimativa das acelerações máximas utilizando a norma NBCC *versus* velocidade básica: transversal – 0°.

7.1.4 Componente Transversal – 90°

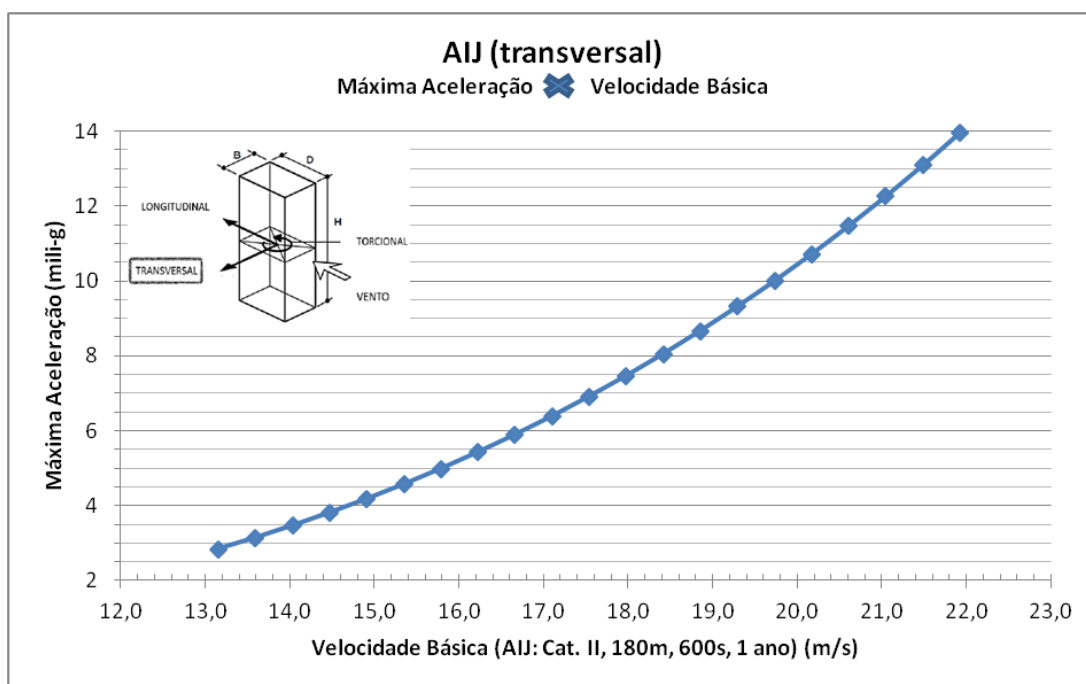


Figura 7.17: Estimativa das acelerações máximas utilizando a norma AIJ *versus* velocidade básica: transversal – 90°.

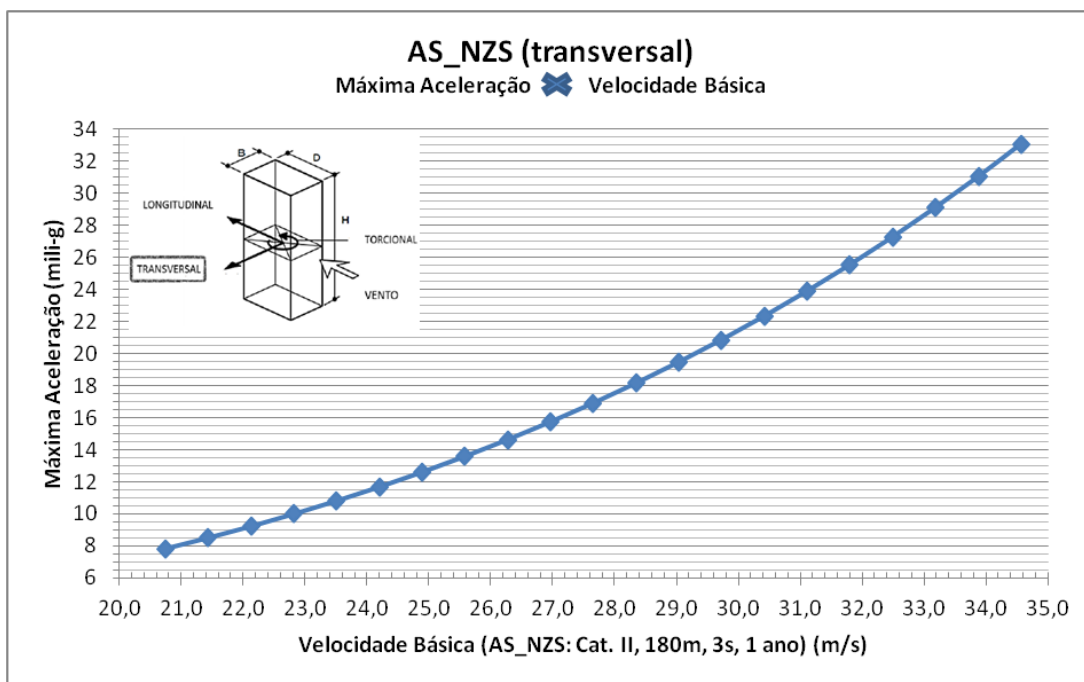


Figura 7.18: Estimativa das acelerações máximas utilizando a norma AS/NZS *versus* velocidade básica: transversal – 90°.

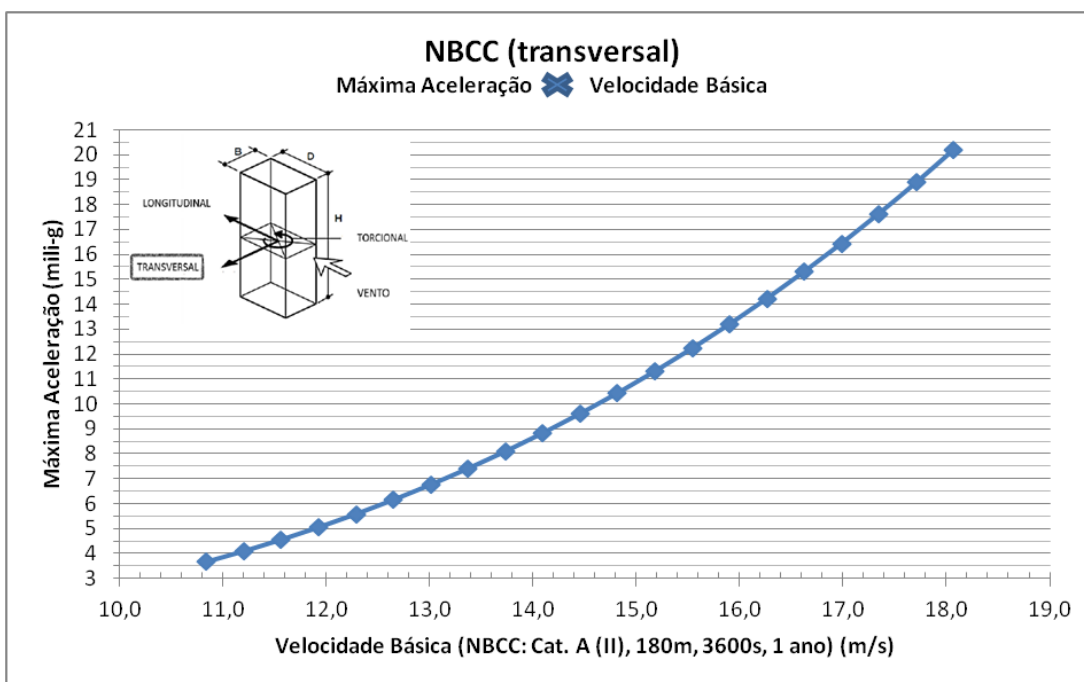


Figura 7.19: Estimativa das acelerações máximas utilizando a norma NBCC *versus* velocidade básica: transversal – 90°.

7.1.5 Componente Torcional

A Figura 7.20 apresenta as magnitudes de acelerações máximas na resposta torcional. Tendo em vista que somente a norma japonesa apresenta tal procedimento, fica impossibilitada a sua comparação.

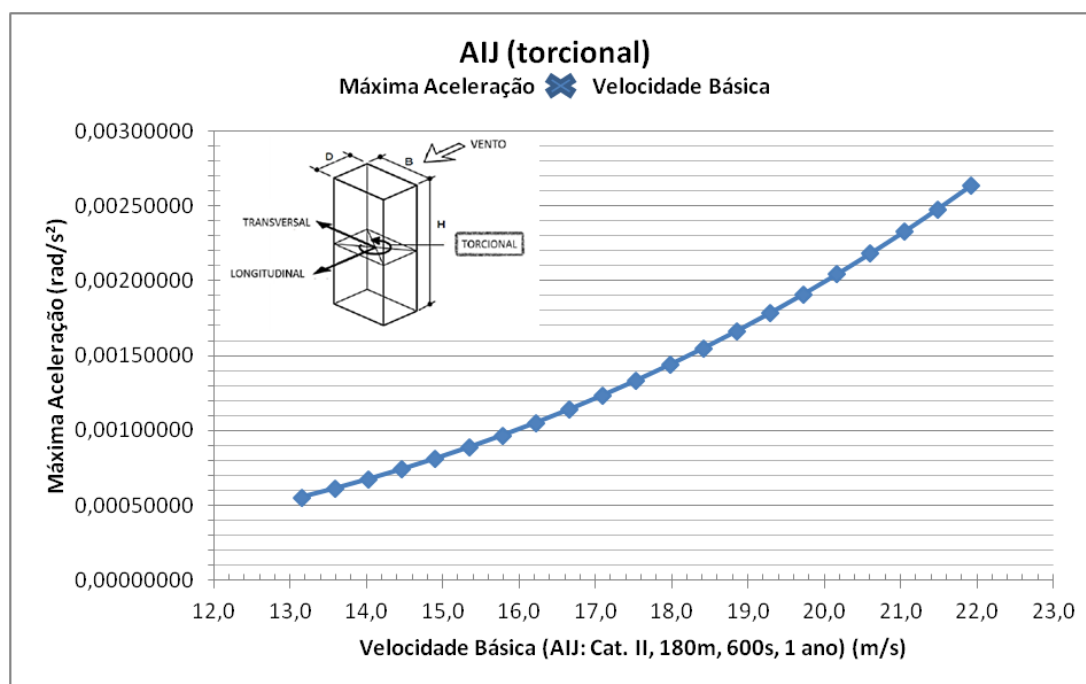


Figura 7.20: Resultado das acelerações máximas em relação às velocidades básicas: AIJ torcional.

7.2 RESULTADOS DOS CRITÉRIOS DE CONFORTO

Nas Figuras 7.21 a 7.24 são apresentados os resultados das acelerações máximas estudadas anteriormente, em comparação aos critérios vigentes da AIJ (2004) e da ISO 10137 (2007), todos relacionados ao período de recorrência de 1 ano e adotando-se a mínima e a máxima aceleração em relação a mínima e a máxima velocidade convertida para cada normativa. Salvo a AIJ (2004) que apresenta critério próprio, as demais normativas, foram avaliadas segundo a ISO 10137 (2007).

Se construíssemos o *CAARC Standard Tall Building* no Brasil, aplicando-se as diversas normativas e considerando tais critérios de conforto na resposta longitudinal, vento na direção a 0° e 90°, as acelerações calculadas pela norma japonesa estariam abaixo dos limites de

percepção e outras em patamares da ordem de 10 a 30% de percepção. Quanto às demais normativas avaliadas em relação ao critério de aceitabilidade dado pela ISO 10137 (2007) somente para a norma australiana a sua maior aceleração estaria ligeiramente superior ao critério para escritórios em incidência de vento a 0° e ligeiramente superior ao critério de residências para vento a 90°.

Para a resposta transversal de incidência do vento na direção a 0°, a máxima aceleração calculada pela norma japonesa estaria muito próxima ao limite de percepção de 90%, ocasionando grande desconforto aos usuários do *CAARC Standard Tall Building*. Quanto às demais normativas avaliadas em relação ao critério de aceitabilidade dado pela ISO 10137 (2007) a menor aceleração calculada pela norma australiana estaria muito próxima ao limite de aceitabilidade dado para residências. Já para as acelerações máximas, tanto a norma australiana, quanto a norma canadense apresentam valores bem acima do limite de aceitabilidade para escritórios. Para a incidência de vento a 90°, a máxima aceleração calculada pela norma japonesa apresenta valor de percepção superior a 90%, provocando impossibilidade de ocupação humana. Quanto às demais normativas avaliadas em relação ao critério de aceitabilidade dado pela ISO 10137 (2007), às acelerações máximas, tanto para a norma australiana, quanto para a norma canadense apresentam valores bem acima do limite de aceitabilidade dado para escritórios.

Em relação à norma brasileira (NBR 6123 (1988)) ao qual prevê critério de aceitabilidade para 10 anos e acelerações máximas inferiores a 0,10 m/s², para o caso estudado, todas as acelerações na resposta longitudinal, tanto na direção do vento a 0° e 90°, excedem o critério.

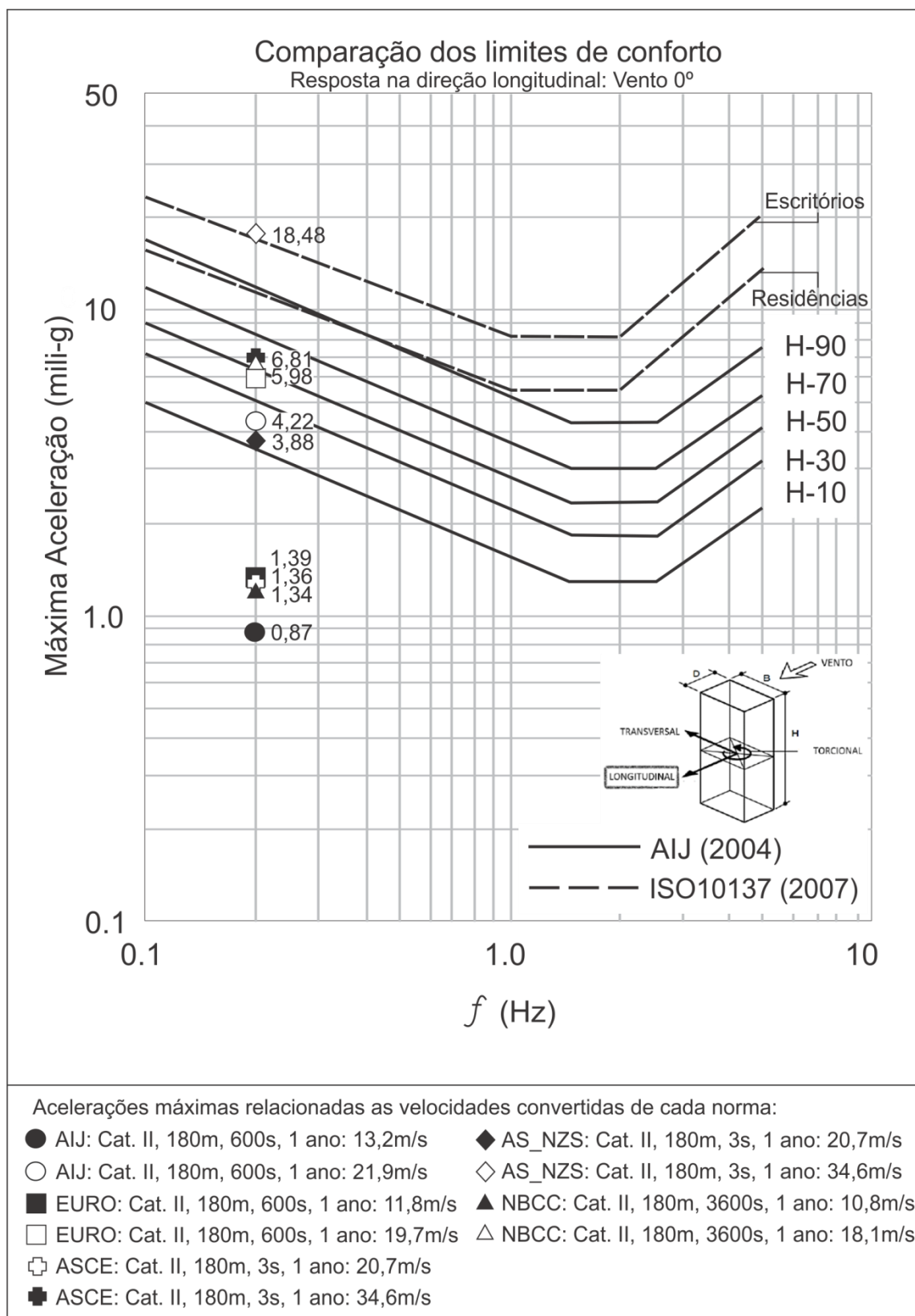


Figura 7.21: Resultado das comparações dos limites de percepção: vento na direção longitudinal – 0°.

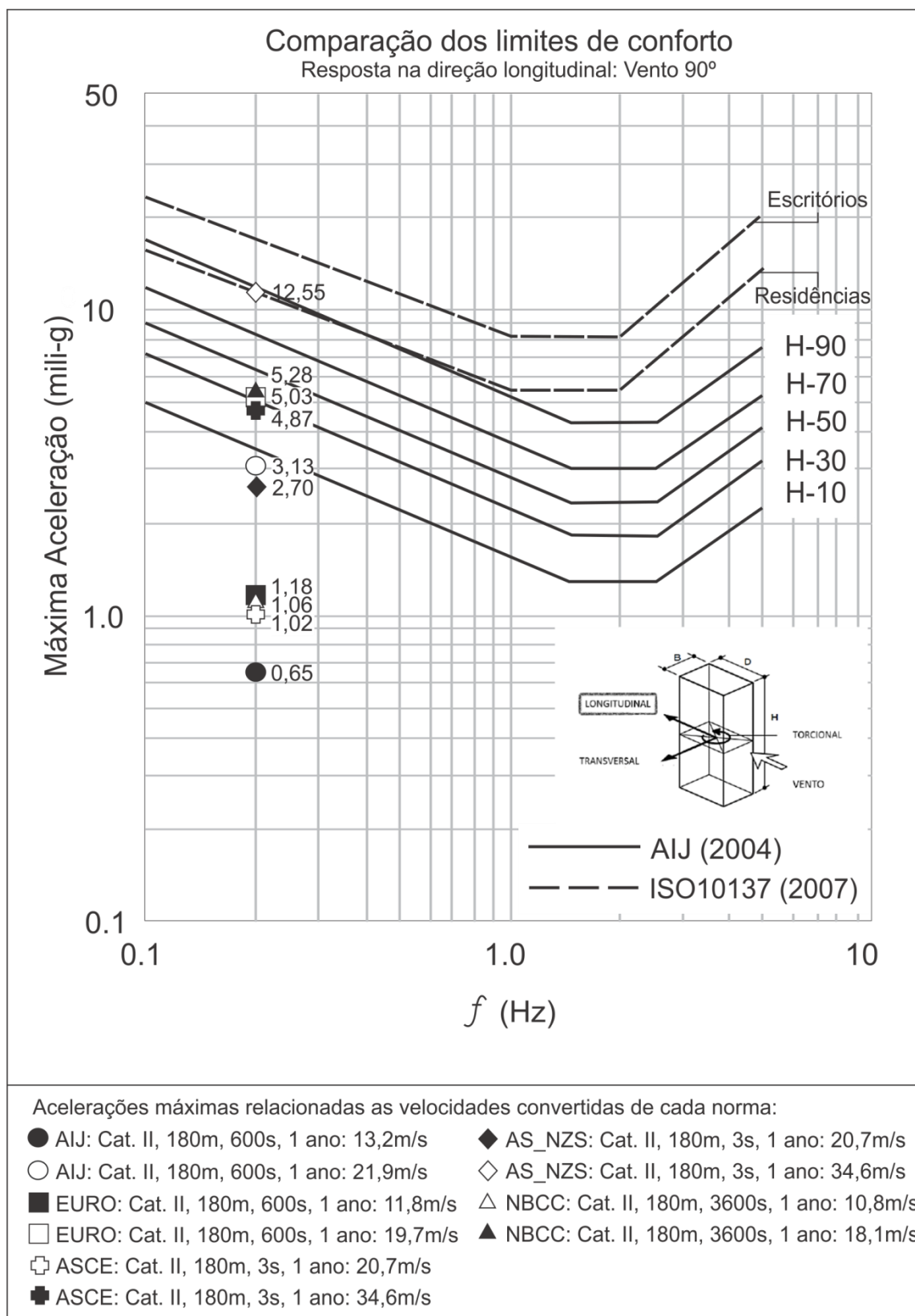


Figura 7.22: Resultado das comparações dos limites de percepção: vento na direção longitudinal – 90°.

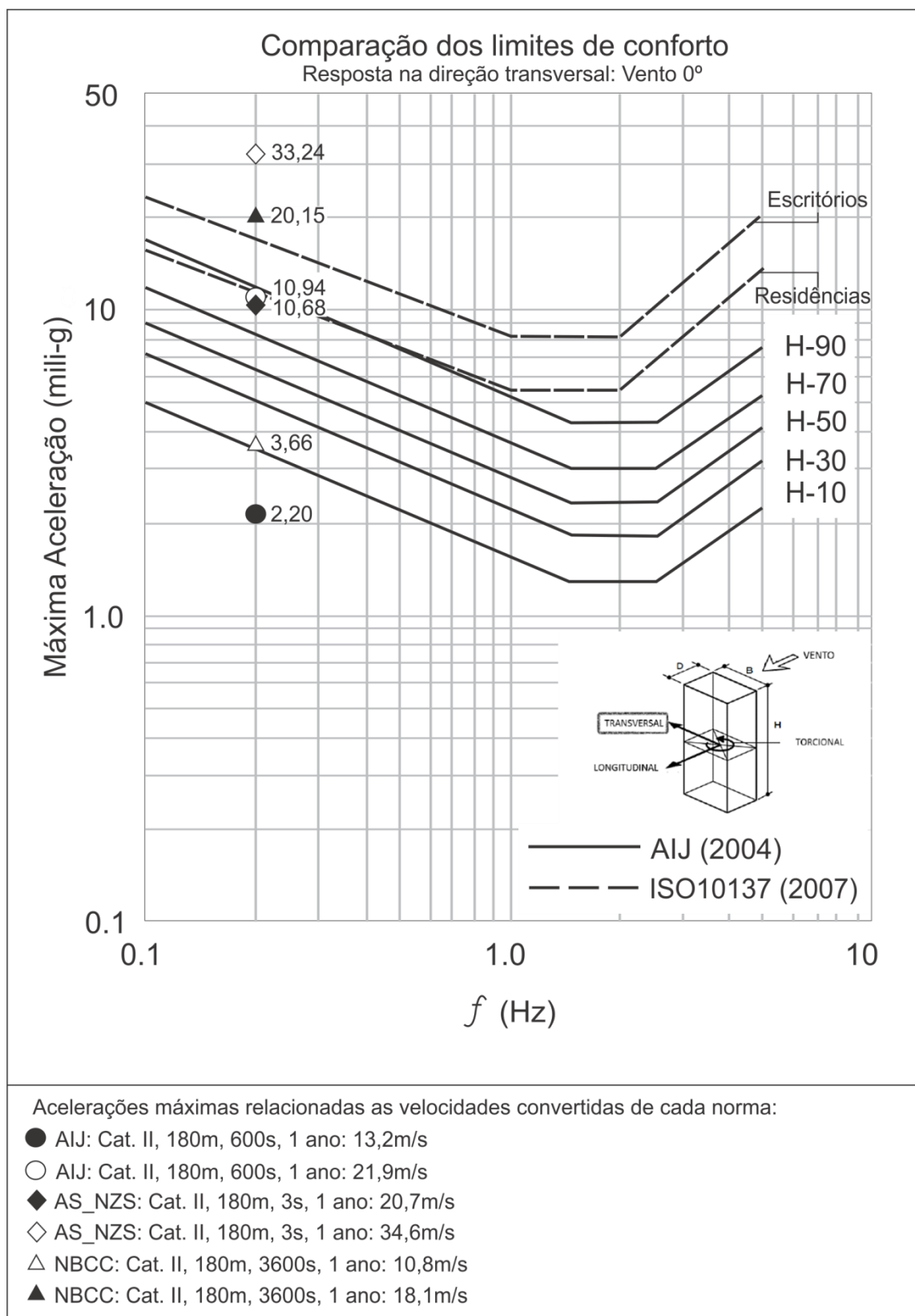


Figura 7.23: Resultado das comparações dos limites de percepção: vento na direção transversal – 0°.

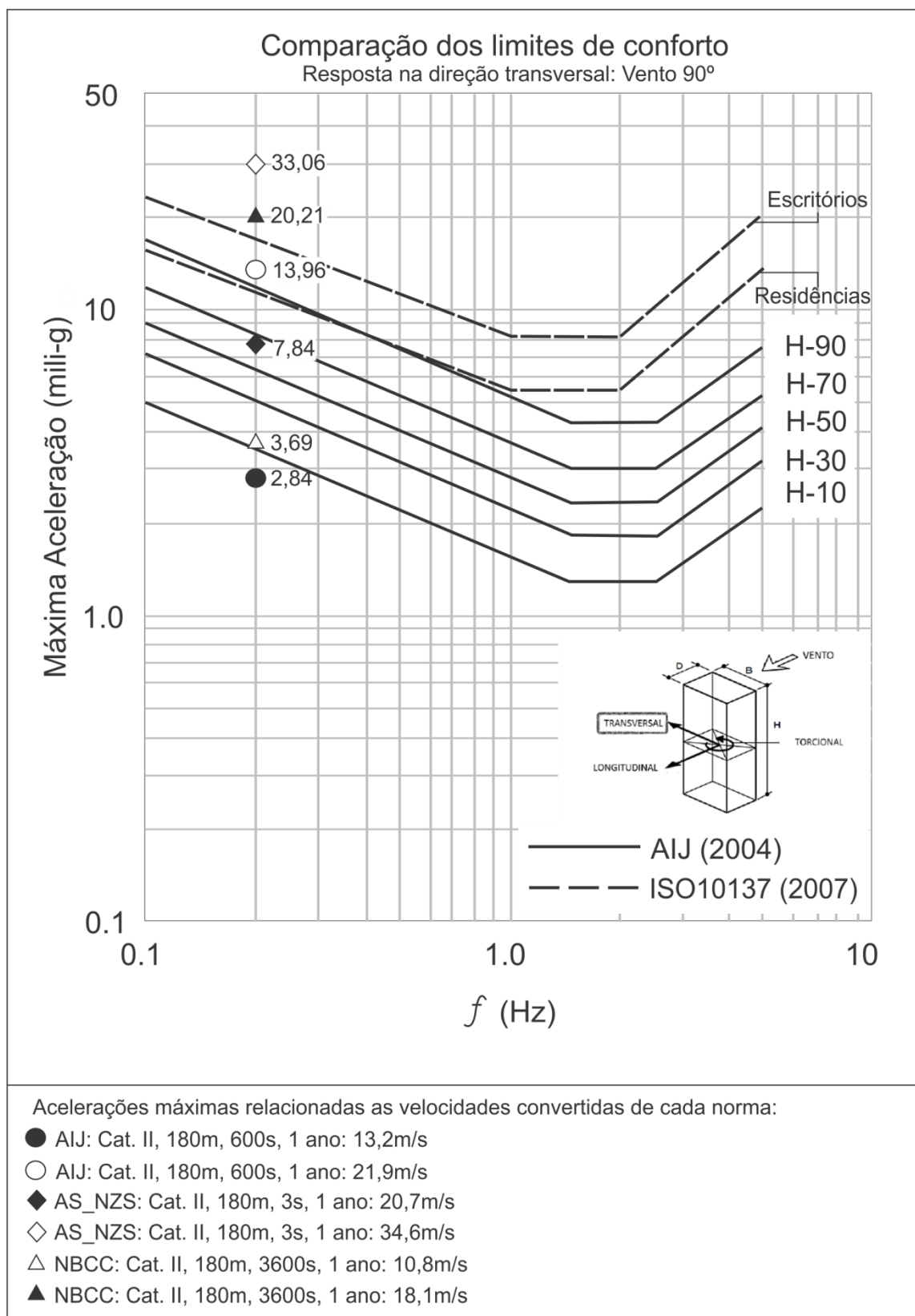


Figura 7.24: Resultado das comparações dos limites de percepção: vento na direção transversal – 90°.

8 ESTRATÉGIAS MITIGADORAS DO MOVIMENTO

O atendimento de uma estrutura ao seu nível de estado limite último deve atender concomitantemente o seu estado limite de serviço, onde para este último, cabe atentar-se ao conforto de seus ocupantes e usuários. Quando os resultados sugerem que o edifício não satisfaz os critérios de conforto dos ocupantes tendo em vista as vibrações induzidas pelo vento, medidas de mitigação devem ser propostas. Modificações no sistema estrutural, na forma aerodinâmica das construções e/ou instalação de dispositivos de controle de vibração podem ser necessários para minimizar a percepção dos ocupantes e o desconforto devido ao movimento e evitar assim, possíveis reclamações futuras. Atualmente, existem diversas técnicas para mitigar tais movimentos provocados pelo vento.

8.1 MODELOS ESTRUTURAIS E AERODINÂMICOS

Um dos grandes problemas das estruturas leves e esbeltas, suscetíveis ao envolvimento complexo de escoamento do vento é o aumento da flexibilidade e o baixo coeficiente de amortecimento próprio deste tipo de estrutura. Diante disso, procurando minimizar os efeitos da vibração do vento, alterações na estrutura ou na sua forma aerodinâmica permitem um melhor comportamento destes edifícios em interação com o vento. Segundo Kareem et al. (1999), observando a equação genérica do movimento verifica-se que qualquer alteração estrutural introduz uma alteração na matriz de massas, amortecimento ou rigidez. O aumento da massa do edifício pode melhorar a vibração do mesmo, contudo amplifica bastante as forças de inércia. Se esta ação for pouco relevante, então a relação de massa do edifício e ação do vento deverá ser otimizada de forma a melhorar o desempenho estrutural. Por outro lado, ainda conforme Kareem et al. (1999), a dinâmica fundamental prova que os acréscimos de rigidez podem proporcionar reduções na amplitude de movimento, mas não irão afetar as acelerações, que compreendem o estímulo para percepção do movimento. Posto isto, em cada caso deverá ser adotado um sistema estrutural adequado. Normalmente, o custo e o orçamento disponível para estes equipamentos “não visíveis” tonarem-se um fator também importante para a escolha da solução.

8.1.1 – Alteração ou Adição de Elementos Estruturais

Vários elementos estruturais podem ser adicionados à estrutura. Os mais correntes são elementos treliçados ou mesmo paredes que ligam as zonas exteriores do edifício ao núcleo interno, conforme Figura 8.1 (a). Permite-se assim, que estes elementos, ajudem a resistir às ações laterais transferindo algumas destas cargas para a zona exterior resistente. Tal sistema foi utilizado no projeto da *Melbourne Tower*, conforme Figura 8.1 (b). Segundo Kareem et al. (1999) geralmente, acima dos 40 andares, esta técnica revela-se pouco eficaz.

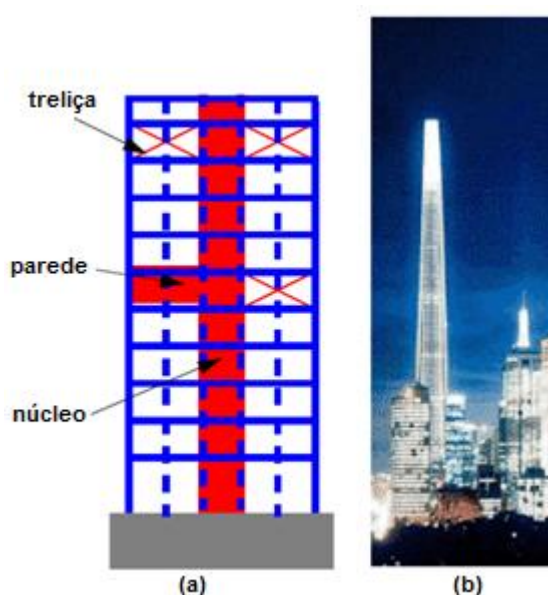


Figura 8.1: Representação esquemática para sistemas treliçados (a) e exemplo de aplicação em *Melbourne Tower* (b) (fonte: KAREEM et al., 1999).

Outro sistema é o desenvolvimento de uma “cintagem” em toda a periferia da estrutura com elementos exteriores ligados ao núcleo interno, quer seja com paredes estruturais quer seja por meio de treliças, conforme Figura 8.2 (a). A utilização deste tipo de sistema pode ser exemplificada pelo *Plaza Rakyat*, Malásia, conforme Figura 8.2. (b). Este sistema permite também que sejam atingidas alturas superiores, revelando pouca eficácia para superestruturas. O sistema estrutural mais eficaz já utilizado em grandes edifícios, como a *Sears Tower*, Figura 8.3, *World Trade Center* e *John Hancock Center* e que esta muito em foco desde as últimas décadas do século XX, segundo Kareem et al. (1999), é a concepção da estrutura como um conjunto de tubos acoplados. Estes núcleos podem encontrar-se lado a lado ou no interior de outros.

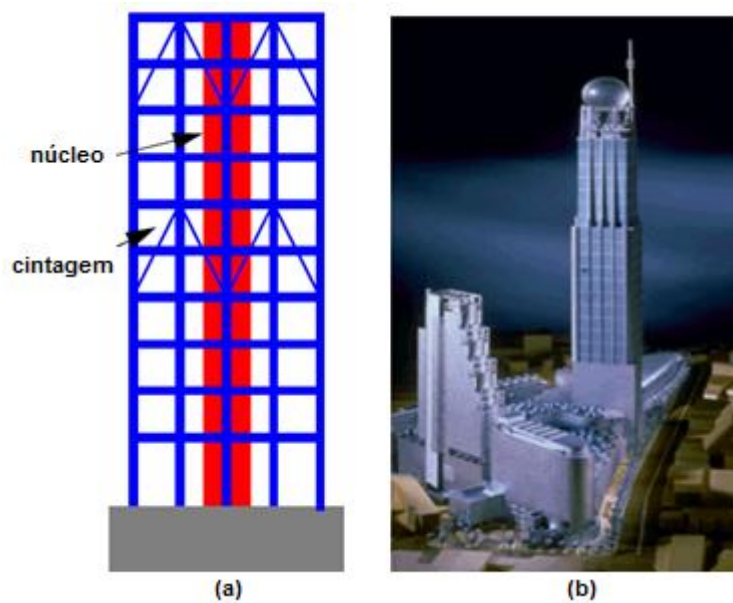


Figura 8.2: Representação esquemática para sistemas de “cintagem” treliçados (a) e exemplo de aplicação em *Plaza Rakyat* (b) (fonte: KAREEM et al., 1999).



Figura 8.3: *Sears Tower* (fonte: KAREEM et al., 1999).

Kareem et al. (1999) relatam que outras opções podem ser adotadas, como por exemplo, o aumento da massa modal já que as acelerações induzidas pelo vento são inversamente proporcionais à massa.

8.1.2 – Alterações Geométricas ou Aerodinâmicas dos Edifícios

Estes tipos de aplicações visam atribuir à estrutura uma forma aerodinâmica que ofereça um melhor comportamento quando envolvida pelo vento. As principais aplicações conhecidas passam pelo arredondamento das arestas da secção transversal do edifício, fendas, cantos chanfrados, aletas, ranhuras, etc., conforme Figura 8.4, podendo no limite definir-se um eixo maior na direção predominante do vento.

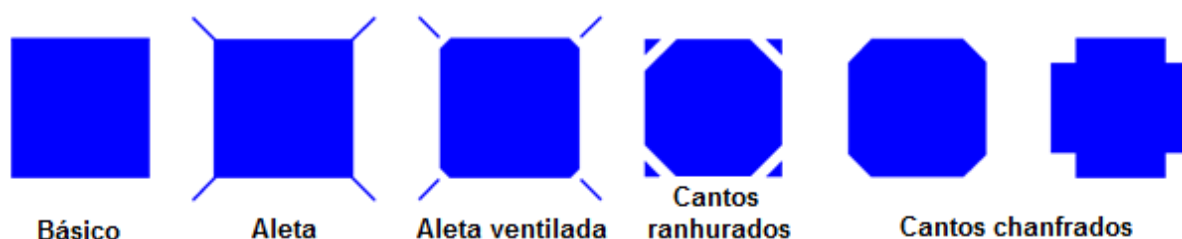


Figura 8.4: Modificações aerodinâmicas para edifícios de forma quadrada (fonte: KAREEM et al., 1999).

O edifício ganha uma forma que induz um escoamento mais ordenado em torno do mesmo oferecendo menos resistência a passagem do vento, conforme aplicado em *Mitsubishi Heavy Industries Yokohama Building*, Figura 8.5 (a). Ainda assim, não existe um consenso definitivo sobre os benefícios das alterações da geometria de canto, uma vez que outros estudos mostraram também que tais modificações foram ineficazes ou com efeitos adversos (KAREEM et al., 1999). Respostas eficientes quanto à ação lateral do vento também têm sido observadas em edifícios altos que variam sua secção transversal com altura ou reduzem suas áreas de plano em relação aos níveis superiores, por exemplo, afinando, cortando cantos, ou diminuindo cantos progressivamente à medida que se aumenta a altura, tal como ilustrado na Figura 8.5 (b) (KAREEM et al., 1999).

Outro parâmetro a se levar em consideração é a variabilidade da seção do edifício em altura. Algumas combinações de seções variáveis em altura podem contribuir para evitar que fenômenos como o desprendimento de turbilhões em torno do edifício se formem em toda a sua altura. Segundo Camarinha (2008), a introdução de elementos na fachada que conduzam o vento como desejado é também uma solução habitual.

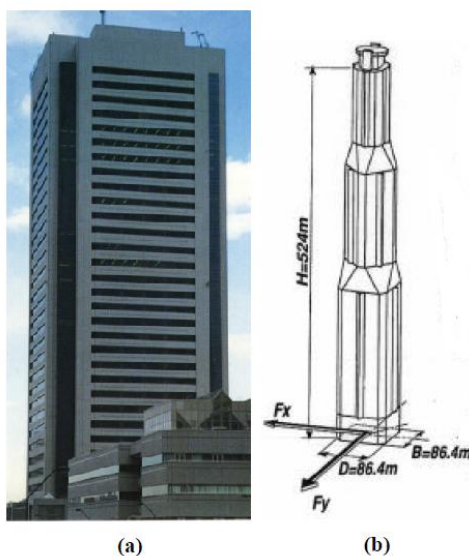


Figura 8.5: Exemplo de aplicação em *Mitsubishi Heavy Industries Yokohama Building* (a) e variação da forma transversal com a altura (b) (fonte: KAREEM et al., 1999).

A introdução de aberturas na estrutura, geralmente próximo do topo, permite que o escoamento atravesse em algumas zonas o edifício, diminuindo os coeficientes de força do mesmo. O *Shanghai World Financial Center*, conforme Figura 8.6, apresenta, por exemplo, no topo da torre uma abertura de 51m de diâmetro. No entanto, a eficácia desta modificação diminui se as aberturas são sejam em níveis mais baixos do edifício. Ainda, podem-se ter consequências adversas se reduzidas às frequências de ressonância de libertação vórtices (KAREEM et al., 1999).



Figura 8.6: *Shanghai World Financial Center* (fonte: KAREEM et al., 1999).

8.2 SISTEMAS DE AMORTECIMENTO

Os sistemas de amortecimento com recurso a elementos exteriores a estrutura são divididos em quatro classes: sistema passivo, sistema ativo, sistema semi-ativo e sistema híbrido. A seguir é apresentada uma breve descrição de cada sistema; os nomes na língua inglesa serão mantidos devido à grande divergência entre os pesquisadores quanto a sua tradução.

8.2.1 – Sistema Passivo

Os sistemas de amortecimentos tipo passivo podem também pode ser divididos em duas classes: sistemas com dissipação indireta de energia e sistemas com dissipação direta de energia. As duas classes são caracterizadas pelos principais sistemas descritos a seguir (KAREEM et al., 1999).

8.2.1.1 – *Tuned Mass Damper* – TMD

Incorporação de um sistema capaz de dissipar energia, ligando uma massa concentrada à estrutura por meio de equipamento elástico e amortecedor permitindo uma interação com a estrutura. Estes elementos induzem o amortecimento na estrutura diminuindo as amplitudes de vibração.

8.2.1.2 – *Tuned Liquid Damper* – TLD

Caracterizados pela incorporação de reservatórios de água distribuídos pelo edifício. Cada tanque é dividido em múltiplos (depósitos) amortecedores, que exploram o movimento dos fluídos e o comportamento provocado pela formação de ondas no fluido, onde estes são os responsáveis pelo acréscimo de amortecimento reduzindo as acelerações em mais de 50%, segundo Kareem et al. (1999).

8.2.1.3 – *Impact Damper* – ID

São definidos como dispositivos formados por pequenas massas rígidas no interior de um reservatório. Essas massas podem oscilar livremente colidindo nas paredes desse reservatório.

O choque das massas na periferia do dispositivo impulsiona a estrutura permitindo o reequilíbrio. (KAREEM et al., 1999).

8.2.1.4 – *Viscoelastic Damper* – VED

Materiais polímeros ou outros materiais deformáveis são utilizados para dissipar energia e possibilitar a rápida recuperação de forças importantes em vibrações com frequências altas, características de tempestades ou mesmo de sismos. São instalados dispositivos metálicos que envolvem o material viscoelástico em diagonais que funcionam ao corte. Para Kareem et al. (1999) este sistema é eficaz e produz também um acréscimo na rigidez do edifício.

8.2.1.5 – *Viscous Damping Device* – VDD

O sistema do amortecimento viscoso gera uma força resistente ao longo de um deslocamento finito da ação de um pistão forçado por uma câmara preenchida com um fluido completamente viscoso de comportamento linear. Segundo Kareem et al. (1999), este sistema é vantajoso por não exigir energia exterior para ser acionado e de ter uma manutenção muito baixa, justificando, por isso, ser a escolha na maioria das aplicações de engenharia civil.

8.2.1.6 – *Metallic Dissipators or Damper* – MD

Os dissipadores metálicos recorrem à deformação de uma peça metálica que liga duas partes cinematicamente “independentes” da estrutura, geralmente juntas entre elementos contíguos. Este sistema é utilizado na resistência lateral aos sismos desde a hegemonia do povo grego, conforme Kareem et al. (1999). Atualmente, utilizam-se geralmente pratos de aço por escorregamento e fricção, permitindo a dissipação de energia e não comprometendo a resistência as ações verticais.

8.2.1.7 – *Friction System* – FS

A aplicação de sistemas de fricção proporciona um comportamento plástico não linear permitindo que a estrutura recupere o comportamento elástico, quando sujeita a vibrações indesejadas.

8.2.2 – Sistema Ativo

8.2.2.1 – *Active Mass Damper* – AMD

Neste tipo de sistema, um dispositivo computadorizado analisa as vibrações do edifício e para determinados parâmetros introduz uma força de controle baseada na resposta do edifício. A força é submetida através de uma ou várias massas deslizantes ou em pêndulos para contrariar o movimento. Estes sistemas necessitam de pequenas massas revelando maior eficácia do que os sistemas passivos (KAREEM et al., 1999).

8.2.2.2 – *Active Variable Stiffness* – AVS

Como o próprio nome indica este sistema faz variar a rigidez da estrutura. Conforme Kareem et al. (1999) a sua aplicação é comum em edifícios suscetíveis à carga sísmica, já que o sistema atribui à estrutura propriedades antirressonantes como consequência do controle das vibrações.

8.2.3 – Sistema Semi-ativo

Reservando as melhores características dos sistemas passivos e ativos, os sistemas semi-ativos representam a última tecnologia em sistemas de dissipação de energia. Para Kareem et al. (1999) possuem rápida adaptabilidade dos sistemas ativos para carregamentos rápidos e oferecem maior estabilidade devido as suas características passivas. Estes sistemas conseguem produzir resultados muito próximos dos sistemas ativos com um risco de instabilidade muito inferior ou com muito menor consumo de energia.

8.2.4 – Sistema Híbrido

Os sistemas de amortecimento híbridos utilizam o conceito de massa móvel dos amortecedores de massa sintonizados, calculando para as vibrações fundamentais do edifício, acoplado com um sistema de amortecimento ativo que corrige a instabilidade da resposta do edifício para forças aplicadas subitamente por sismos ou tempestades. Este sistema permite assim economia de energia, contudo, apresenta custos de instalação bastante elevados.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica das principais metodologias de determinação das acelerações, bem como, dos principais critérios de conforto humano em edifícios altos excitados pelo vento. Apresenta também as principais características de movimento dos edifícios altos e as características individuais destes ocupantes em relação ao movimento, bem como, formas de mitigação destas vibrações. Foram analisadas seis normas e códigos internacionais, todos vigentes em seus países à época da realização desta pesquisa, além de estudos relacionados aos limites de percepção a aceitabilidade das acelerações.

Para este trabalho foi escolhido o CAARC (*Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council*) *Standard Tall Building* como o edifício alto a ser estudado, sendo que este foi desenvolvido especialmente para as calibrações dos ensaios experimentais. Foi adotada a categoria de terreno II da NBR 6123 (1988) e determinadas as velocidades básicas conforme as isopletas da mesma Norma, para a faixa de 30 a 50 m/s variando o intervalo das mesmas em 1 m/s. Foi necessário para a aplicação das metodologias de determinação de cada norma a conversão destas velocidades. Por fim, avaliaram-se os resultados das acelerações máximas relacionadas ao critério de percepção da AIJ (2004) e de aceitabilidade da ISO 10137 (2007) e NBR 6123 (1988).

Do estudo realizado neste trabalho pode-se concluir:

Há necessidade de garantir limites de serviço às edificações altas destinadas à ocupação humana, garantido desempenho aceitável as mesmas. Neste contexto, deve o engenheiro e/ou arquiteto avaliar os requisitos e restrições funcionais, além dos aspectos econômicos, em conjunto com o proprietário, garantindo segurança, conforto e valor comercial a estas edificações.

Verificações de tradicionais deflexões estáticas não são suficientes para garantir que as vibrações desconfortantes nos edifícios não irão ocorrer. Considerando que o controle da rigidez é um dos aspectos de operacionalidade, a distribuição de massa e o amortecimento são também importantes no controle de vibrações e ainda, a utilização de novos materiais e sistemas de construção, podem exigir que a resposta dinâmica do sistema seja explicitamente considerada.

Os limites de serviço dependem da função do edifício e das percepções de seus ocupantes. Em contraste com os estados limites últimos, é difícil essa utilização especificar limites gerais que sejam aplicáveis para todas as estruturas dos edifícios. Percebe-se uma tendência das normativas internacionais que já apresentaram critérios de conforto em não mais os apresentarem, deixando que tal verificação seja estudada caso a caso.

Fica evidente também a necessidade de unificação das normativas e codificações internacionais, tendo em vista que tais documentos não são consistentes entre si.

Não foi possível neste estudo determinar qual o melhor critério de conforto em termos de aceitabilidade ou percepção, embora se perceba uma tendência em utilizar-se a percepção. Ainda, a doença do movimento (redução no desempenho de tarefas, cansaço, distração, mau humor, desmotivação, etc.) vem sendo estudada e torna-se tendência para uma abordagem menos conservadora na determinação dos critérios de conforto.

As acelerações, tanto lineares, quanto angulares são os parâmetros mais significativos na avaliação dos movimentos, percebendo-se uma tendência para a avaliação das acelerações de pico. Neste contexto, no procedimento de determinação de aceleração, bem como no critério de conforto apresentados na NBR 6123 (1988), pode-se perceber sua simplicidade, tendo em vista os poucos parâmetros considerados. Em relação ao período de recorrência nota-se uma tendência que os mesmos sejam menores que 10 anos, considerando que as movimentações provocadas pela ação do vento cotidiano provocam maiores desconfortos aos usuários, sugerindo 1 ano, ou até mesmo, em estudos mais recentes, 1 mês. Por fim, nota-se a necessidade de que tais acelerações sejam avaliadas também em relação a outros graus de liberdade, tendo em vista que os resultados demonstraram, por exemplo, significativas majorações nas acelerações transversais e torcionais em detrimento das longitudinais. Logo, faz-se necessário a revisão deste procedimento de determinação das acelerações, bem como, do critério de conforto vigente na NBR 6123 (1988).

9.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se, tendo em vista trabalhos futuros, a continuidade dos estudos relacionados ao conforto humano em edifícios altos excitados pelo vento. Sugere-se que tais trabalhos venham propor novo procedimento de determinação das acelerações, bem como, relacionado ao critério de conforto para a revisão da NBR 6123 (1988).

REFERÊNCIAS

- ARCHITECTURAL INSTITUTE OF JAPAN. **AIJ-GEH**: Guidelines for the Evaluation of Habitability. Tokyo, 2004.
- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERING STANDARD. **ASCE**: Minimum Design Loads For Buildings and Other Structures. Virginia, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças Devidas ao Vento em Edificações. Rio de Janeiro, 1988.
- AUSTRALIAN/NEW ZEALAND. **AS/NZS 1170**: Structural Design Actions - Part 2: Wind Actions. Sidney, 2011.
- BACHMANN, H., **Vibration Problems in Structures: Practical Guidelines**. Birkhauser, 1995. 234 p.
- BURTON, M. D. et al. Frequency Dependence of Human Response to Uni-axial Sinusoidal Motion. **Proceedings of 11th Australasian Wind Engineering Society Workshop**, Darwin, Australia, Jul. 2004a.
- BURTON, M. D. et al. Effects of Uni-axial and Bi-directional Random Motion on Cognitive Performance. **Proceedings of 11th Australasian Wind Engineering Society Workshop**, Darwin, Australia, Jul. 2004b.
- BURTON, M. D. et al. Acceptability Curves Derived from Motion Simulator Investigations and Previous Experience with Building Motion. **Proceedings of 10th Americas Conference on Wind Engineering**, Baton Rouge, Louisiana, USA, p. 286-287, 31 May. – 4 Jun. 2005.
- BURTON, M. D. et al. Frequency Dependence of Human Response to Wind-induced Building Motion. **Journal of Structural Engineering**, ASCE 132 (2), p. 296-303, Feb. 2006.
- BURTON, M. D. et al. Occupant Comfort Criteria for Wind-Excited Buildings: Based on Motion Duration. **Proceedings of 12th International Conference on Wind Engineering**, Cairns, Australia, vol. 1, p. 1207–1214, Jul. 2007.
- BURTON, M. D. et al. Effect of Low-Frequency Motion on the Performance of a Dynamic Manual Tracking Task. **Wind and Structures** 14, 517-536, 2011.
- BURTON, M. D., KWOK, K. C. S., ABDELRAZAQ, A. Wind-Induced Motion of Tall Buildings: Designing for Occupant Comfort. **International Journal of High-Rise Buildings**. vol. 4, nº 1, p. 1-8, 2015.
- CACHUÇO, F. B. **Estudo da Incerteza em Estimativas de Frequências Naturais de Vibração Livre de Edifícios Altos em Concreto Armado**. 2014. 171 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CAMARINHA, R. M. M. **Ação e Efeitos do Vento em Edifícios Altos**. 2008. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa.

CHANG, F.K. Human response to motions in tall buildings. **Journal of Structural Division**, ASCE 99 (6), p. 1259–1272, 1973.

CHEN, P. W., ROBERTSON, L. E. Human Perception Threshold of Horizontal Motion. **Journal of Structural Division**, ASCE 98 (8), 1681-1695, 1972.

COUNCIL ON TALL BUILDINGS AND URBAN HABITAT. Height e Statistics. Height Criteria. Disponível em: <
<http://www.ctbuh.org/TallBuildings/HeightStatistics/Criteria/tabid/446/language/en-US/Default.aspx> >. Acesso em 22 ago. 2015.

DENOON, R. O. Designing for Wind-Induced Serviceability Accelerations in Buildings. **Ph.D. Thesis**, The University of Queensland, Australia, 2001.

DENOON, R. O. et al. Field Measurements of Human Reaction to Wind-Induced Building Motion. **Proceedings of 10th International Conference on Wind Engineering**, Copenhagen, Denmark, p. 637-644, 1999.

DENOON, R. O. et al. Field Experiments to Investigate Occupant Perception and Tolerance of Wind-Induced Building Motion. **Research Report No. R803**, Department of Civil Engineering, University of Sydney, Australia, 2000a.

DENOON, R. O. et al. Effects of Wind-Induced Tall Building Motion on Cognitive Performance. **Research Report No. R804**, Department of Civil Engineering, University of Sydney, Australia, 2000b.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 1: Actions on Structures – part 1-4: General Actions - Wind Actions**. Brussels, 2010.

FERRARETO, J. A., MAZZILLI, C. E. N., FRANÇA, R. L. S. Wind-Induced Motion on Tall Buildings: a Comfort Criteria Overview. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics** 142, 26-42, 2015.

GALSWORTHY, J. K. et al. Wind Engineering for Today's Architecture. **Proceedings of 14th International Conference on Wind Engineering**, Porto Alegre, Brazil, Jun. 2015.

GOTO, T. The Criteria to Motions in Tall Buildings (Part 1) Factors Affecting Human Perception and Tolerance of Motion. **Transactions of the Architectural Institute of Japan** 237 (11), 109-119, 1975.

GOTO, T. Studies on Wind-Induced Motion of Tall Buildings based on Occupants Reactions. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics** 13, 241-252, 1983.

GOTO, T., IWASA, Y., TSURUMAKI, H. An Experimental Study on the Relationship between Motion and Habitability in a Tall Residential Building. **Proceedings of Tall Buildings: 2000 and Beyond**, Fourth World Congress, Hong Kong, p. 817-829, 1990.

HANSEN, R. J., REED, J.W., VANMARCKE, E.H. Human Response to Wind-Induced Motion of Buildings. **Journal of Structural Division**, ASCE 99 (ST7), 1589-1605, 1973.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 6897**: Guidelines for the Evaluation of the Response of Occupants of fixed Structures, especially Buildings and off-shore Structures, to Low-Frequency Horizontal Motion (0,063 to 1 Hz). Geneva, 1984.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10137**: Bases for Design of Structures - Serviceability of Buildings and Walkways Against Vibrations. Geneva, 2007.

IRWIN, A. W. Human Response to Dynamic Motion of Structures. **Journal of Structural Engineering**, 56A (9), p. 237-244, 1978.

IRWIN, A. W. Perception, Comfort and Performance Criteria for Human Beings Exposed to Whole body Pure yaw Vibration and Vibration Vontaining yaw and Translational Components. **Journal of Sound and Vibration** 76 (4), 481-497, 1981.

IRWIN, A.W., GOTO, T. Human Perception, Task Performance and Simulator Sickness in Single and Multi-Axis Low-Frequency Horizontal Linear and Rotational Vibration. **United Kingdom informal group meeting on human response to vibration**, Edinburgh, p. 289-313, 21-22 Sep. 1984.

ISYUMOV, N., MASCANTONIO, A., DAVENPORT, A.G. Measured Building Motions of Tall Buildings in Wind and Their Evaluation. **Proceedings of Symposium/Workshop on Serviceability of Buildings (Movements, Deformations, Vibrations)**, Ottawa, Canada, p. 181-199, May. 1988.

ISYUMOV, N. Criteria for Acceptable Wind-Induced Motions of Tall Buildings. **Proceedings of International Conference on Tall Buildings**, CTBUH, Rio de Janeiro, 17-19 May. 1993.

ISYUMOV, N., KILPATRICK, J. Full-scale Experience With Wind-Induced Motions of Tall Buildings. **Proceedings of 67th Regional Conference Council on Tall Buildings and Urban Habitat**, Chicago, US, p. 401-411, 15-18 Apr. 1996.

KANDA, J., TAMURA, Y., FUJII, K. Probabilistic Criteria for Human Perception of Low-Frequency Horizontal Motions. **Proceedings of Symposium/Workshop on Serviceability of Buildings**, Ottawa, p. 260-269, 1988.

KANDA, J., TAMURA, Y., FUJII, K. Probabilistic Perception Limits of Low-Frequency Horizontal Motions. **Conference with International Participation, Serviceability of Steel and Composite Structures Proceedings**, Pardubice, Czechoslovakia, p. 61-72, 1990.

KAREEM, A., KIJEWski, T., TAMURA, Y. Mitigation of Motions of Tall Buildings with Specific Examples of Recent Applications. **Wind and Structures**, v. 2, n° 3, 201-251, 1999.

KAREEM, A. Serviceability Issues and Motion Control of Tall Buildings. **Proceedings of Structures Congress**, San Antonio, 1992.

KHAN, F. R., PARMELEE, R. A. Service Criteria for Tall Buildings for Wind Loading. **Proceedings of Third International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures**, Tokyo, Japan, p. 401-407, 1971.

KILPATRICK, J. **The Influence of Wind-Induced Motions on the Performance of Tall Buildings**. 1996. 149 f. Thesis (Master of Engineering Science) – Department of Civil Engineering, University of Western Ontario, Ontario.

KWOK, K. C. S., HITCHCOCK, P. A. Occupant Comfort Test Using a Tall Building Motion Simulator. **Proceedings of Fourth International Conference on Advances in Wind and Structures**, Jeju, Korea, 28-30 May. 2008.

KWOK, K. C. S., HITCHCOCK, P. A., BURTON, M. D. Perception of Vibration and Occupant Comfort in Wind-Excited Tall Building. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 97, p. 368-380, 2009.

KWOK, S. W. et al. Effects of Wind-Induced Tall Building Vibrations on a Tracking Task. **Proceedings of 12th Americas Conference on Wind Engineering**, Seattle, Washington, USA, 16-20 Jun. 2013.

KWON, D. K., KAREEM, A. Comparative Study of Major International Wind Codes and Standards for Wind Effects on Tall Buildings. **Engineering Structures**, v. 51, p. 23-35, 2013.

LAMB, S., KWOK, K. C. S., WALTON, D. Occupant Comfort in Wind-Excited Tall Buildings: Motion Sickness Compensatory Behaviours and Complaint. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 119, p. 1-12, 2013.

LAMB, S., KWOK, K. C. S., WALTON, D. The Effects of Wind-Induced Building Motion on Occupant Wellbeing and Work Performance. **Proceedings of XIII Conference of the Italian Association Wind Engineering**, Genova, Italy, 22- 25 Jun. 2014.

LEE, B. E. The Perception of the Wind-Induced Vibration of a Tall Building—a Personal Viewpoint. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics** 12, 379-384, 1983.

MCMANARA, R., KAREEM, A., KIJEWski, T. Ask the Experts...Perception of Motion Criteria for Tall Buildings Subjected to Wind: a Panel Discussion. **Proceedings of Structures Congress**, 2002.

MELBOURNE, W. H. Comparison of measurements on the CAARC standard tall building model in simulated wind flows. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 6, p. 73-88, 1980.

MELBOURNE, W. H., CHEUNG, J. C. K. Designing for Serviceable Accelerations in Tall Buildings. **Proceedings of Fourth International Conference on Tall Buildings**, Hong Kong and Shanghai, p. 148-155, 1988.

MELBOURNE, W. H., PALMER, T. R. Accelerations and Comfort Criteria for Buildings Undergoing Complex Motions. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, p. 41-44, 105-116, 1992.

MICHAELS, M. N., KWOK, K. C. S., TUNG, Y. K. Exploratory Analyses and Modelling of Parameters Influencing Occupant Behaviour due to Low-Frequency Random Building Motion. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics** 115, 82-92, 2013.

MORAVA, B. et al. Assessment of Occupant Comfort in Wind-Sensitive Buildings Using a Six-Degree-of-Freedom Motion Simulator. **Structures Congress Proceedings**, Orlando, Florida, 12-15 May 2010.

NATIONAL BUILDING CODE OF CANADA. **NBCC**: National Research Council of Canada, Ottawa, 1977.

NATIONAL BUILDING CODE OF CANADA. **NBCC**: National Research Council of Canada, Ottawa, 2010.

NOGUCHI, K. et al. Human Response to Horizontal Motion of Tall Buildings. **Proceedings of International Colloquium on Structural Serviceability of Buildings**, IABSE Reports, vol. 69, Goteborg, Sweden, p. 53-58, 1993.

ROCHA, M. M.; LOREDO-SOUZA, A. M. Resposta Estrutural de Edifícios Altos Frente à Ação Dinâmica do Vento. In: 53º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2011, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: IBRACON, 2011.

SARTORI, F. C. **Uma Comparação de Métodos para Avaliar a Resposta Dinâmica de Edifícios Altos em Túnel de Vento**. 2010. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SHIOYA, K. et al. Human Perception Thresholds of two-dimensional Horizontal Motion. **ASCE Structures Congress 1992 Proceedings**, San Antonio, USA, p. 480-483, 13-15 Apr. 1992.

SHIOYA, K., KANDA, J. Human Perception Thresholds of Horizontal Motion. **Proceedings of International Colloquium on Structural Serviceability of Buildings**, IABSE Reports, vol. 69, Goteborg, Sweden, p. 45-52, 1993.

SMITH, B. S., COULL, A. **Tall Building Structures: Analysis and Design**. New York: John Wiley & Sons, 1991.

TAMURA, Y. et al. Evaluation Perception of Wind-induced Vibrations in Buildings. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers Structures & Buildings**, v. 159, p. 283-293, Oct. 2006.

WU, J. C., CHENG, C. M., CHEN, J. T. Tentative Results on Wind-Induced Comfort Threshold Based on a Newly Constructed Motion Simulator. **Proceedings of Fourth International Conference on Advances in Wind and Structures**, Jeju, Korea, 28-30 May. 2008.

APÊNDICES

**APÊNDICE A – METODOLOGIAS E PROCEDIMENTOS NORMATIVOS
PARA DETERMINAÇÃO DAS ACELERAÇÕES**

A.1 PROCESSO DA NORMA BRASILEIRA ABNT/NBR 6123: FORÇAS DEVIDAS AO VENTO EM EDIFICAÇÕES (1988)

A.1.1 Determinação da amplitude máxima da aceleração

$$a_j = 4\pi^2 f_j^2 u_j \quad (\text{A.1})$$

a_j (m/s^2): amplitude máxima de aceleração;

f_j (Hz): frequência natural no modo j ;

u_j (m): deslocamento no nível z no modo j .

A.2 PROCESSO DA NORMA JAPONESA AIJ (2004)

A.2.1 Determinação da máxima aceleração na direção do vento

Para edifícios acima de 60 metros a norma recomenda a utilização de um método de projeto completo de análise dinâmica. Ainda, um fator de incremento da velocidade da ordem de 1,25 para ventos extremos.

$$a_{Dm\acute{a}x} = \frac{q_H g_{aD} B H C_H C'_g \lambda \sqrt{R_D}}{M_D} \quad (\text{A.2})$$

$a_{Dm\acute{a}x}$ (m/s^2): máxima aceleração na direção do vento no alto do edifício;

g_{aD} : fator de pico;

$$g_{aD} = \sqrt{2 \ln(600 f_D) + 1,2} \quad (\text{A.3})$$

q_H (N/m^2): pressão dinâmica em referência a altura H ;

ρ (kg/m^3): massa específica do ar, tida como 1,22;

$$q_H = \frac{\rho V_H^2}{2} \quad (\text{A.4})$$

C_D : coeficiente de arrasto;

G_D : fator de rajada baseado no momento na base;

A (m^2): área projetada;

V_H (m/s): velocidade de projeto;

$$V_H = V_0 K_D E_H k_{rW} \quad (\text{A.5})$$

V_0 : velocidade básica tomado do mapa das isopletas para 1 ano de recorrência, média de 10 minutos a 10 m sobre o nível de terreno aberto (categoria II);

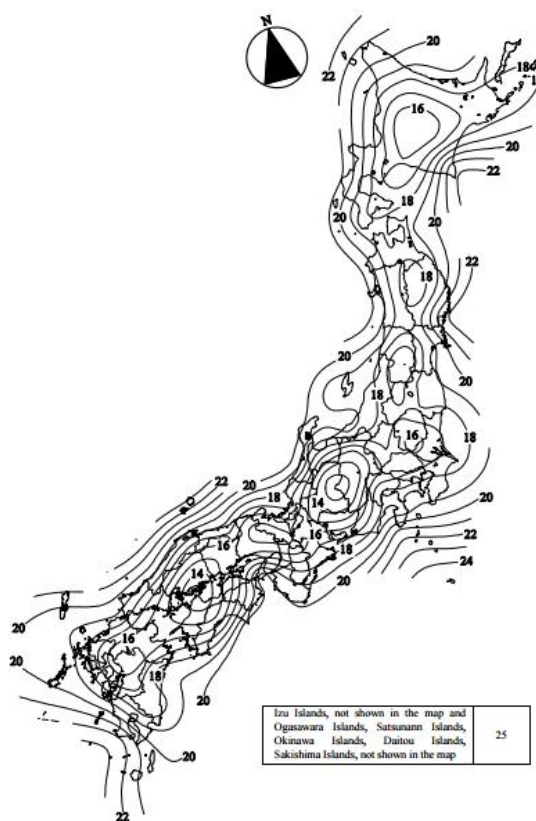


Figura A2.1: Velocidade básica do vento (fonte: AIJ, 2004).

K_D : fator da direção do vento. Se propõem 8 direções de vento. Foi estimado como a razão entre a velocidade média para certa direção V_D e a velocidade básica V_0 (para 100 anos de recorrência), valores que foram tabulados para 142 cidades de Japão;

	Wakkanai	Kitamiesashi	Haboro	Omu	Rumoi	Asahikawa	Abashiri	Otaru	Sapporo	Iwamizawa
NE	0.95	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.9
E	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
SE	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	1	1
S	1	0.85	1	0.85	0.85	1	0.85	0.85	1	1
SW	1	1	1	1	0.95	1	0.85	1	0.85	0.85
W	0.85	1	1	1	0.95	1	0.95	1	0.95	1
NW	0.85	0.85	0.95	0.85	1	0.85	1	1	1	0.95
N	0.95	0.85	0.85	0.85	1	0.85	0.9	0.85	0.85	0.9
	Obihiro	Kushiro	Nemuro	Suttsu	Muroran	Tomakomai	Urakawa	Esashi	Hakodate	Kutchan
NE	0.85	0.85	0.9	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.95	0.85
E	0.85	0.9	0.9	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.95	0.95
SE	0.85	0.9	0.85	1	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.95
S	0.85	0.85	0.85	1	0.85	0.85	0.85	1	1	0.95
SW	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	1	1	0.95
W	1	1	0.95	1	1	0.85	1	1	0.95	1
NW	1	0.9	1	1	1	0.9	1	1	0.9	1
N	0.85	0.85	0.95	0.9	0.85	1	0.85	0.85	0.85	0.85
	Mombetsu	Hiroo	Ofunato	Shinjo	Wakamatsu	Fukaura	Aomori	Mutsu	Hachinohe	Akita
NE	0.9	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
E	0.9	0.85	0.85	0.85	0.9	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
SE	0.85	0.85	0.85	0.85	0.9	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
S	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	1	0.85	0.85	0.85	0.95
SW	1	1	0.85	0.85	0.85	1	1	0.95	1	0.95
W	1	1	0.85	1	1	0.95	1	1	1	1
NW	1	0.85	1	1	1	0.95	0.9	0.85	0.95	1
N	0.9	0.85	0.9	0.85	0.85	0.9	0.85	0.85	0.85	0.85
	Morioka	Miyako	Sakata	Yamagata	Sendai	Ishinomaki	Fukushima	Shirakawa	Onahama	Wajima
NE	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	1	0.85	0.85	1	0.9
E	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.95	0.85	0.85	0.85	0.85
SE	0.85	0.9	0.85	0.85	0.85	0.9	0.85	0.85	0.9	0.85
S	0.85	0.9	0.85	0.9	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.9
SW	0.95	0.95	0.9	1	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	1
W	1	1	1	1	1	1	1	1	0.95	1
NW	1	0.95	1	0.95	1	1	1	1	1	0.95
N	0.95	0.95	0.85	0.85	0.85	1	0.85	0.95	1	0.95
	Aikawa	Niigata	Kanazawa	Fushiki	Toyama	Nagano	Takada	Utsunomiya	Fukui	Takayama
NE	0.85	0.85	0.85	0.9	0.85	0.85	0.85	0.9	0.85	0.85
E	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
SE	0.85	0.85	0.85	0.85	0.9	0.85	0.85	0.85	1	0.9
S	0.85	0.85	0.9	0.85	1	0.85	0.85	0.85	1	1
SW	0.85	1	1	1	0.9	1	0.85	0.85	0.85	0.85
W	0.85	1	0.9	0.95	0.9	1	1	0.85	0.85	0.85
NW	1	1	0.85	0.85	0.85	0.9	0.95	0.85	1	0.85
N	1	0.9	0.85	0.9	0.85	0.85	0.85	1	1	0.85
	Matsumoto	Suwa	Kumagai	Mito	Tsuruga	Gifu	Nagoya	Iida	Kofu	Chichibu
NE	0.85	0.85	0.85	1	0.85	0.85	0.85	0.95	0.85	0.85
E	0.85	1	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
SE	1	1	0.85	0.85	0.85	1	1	0.85	0.85	0.85
S	1	0.95	0.85	0.85	0.85	0.95	1	0.85	0.85	0.85
SW	0.9	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	1	0.85	0.85
W	0.85	1	0.95	0.9	0.85	0.85	0.85	1	0.85	0.9
NW	0.85	1	1	1	1	0.9	0.85	1	1	1
N	0.85	0.85	0.95	1	0.85	0.85	0.85	0.95	1	0.85
	Choshi	Ueno	Tsu	Irako	Hamamatsu	Omaezaki	Shizuoka	Mishima	Tokyo	Owase
NE	0.9	0.85	0.85	0.9	0.95	1	0.85	1	0.85	0.85
E	0.85	1	1	0.95	0.95	1	0.85	0.85	0.85	0.95
SE	0.85	0.9	1	0.95	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
S	0.85	0.85	0.85	0.9	0.85	0.95	0.95	0.85	0.85	0.85
SW	0.85	0.9	0.85	0.85	0.85	0.95	1	0.85	0.85	0.95
W	0.85	0.85	0.95	1	1	1	1	0.85	0.85	1
NW	0.95	0.85	0.9	1	1	0.95	0.85	0.85	1	0.95
N	1	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	1	1	0.85

Figura A2.2: Fator de direcionalidade do vento K_D (fonte: AIJ, 2004).

	Sumoto	Wakayama	Shionomisaki	Nara	Yamaguchi	Izuhara	Hirado	Fukuoka	Iizuka	Sasebo
NE	0.85	0.85	0.95	1	0.85	0.85	0.9	0.85	0.85	1
E	0.85	0.85	0.95	1	0.9	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
SE	0.9	1	0.85	0.85	1	0.85	0.85	1	0.85	0.85
S	1	1	0.9	0.85	0.85	0.95	0.85	1	0.9	0.85
SW	0.85	0.95	0.95	0.85	0.85	1	0.85	0.85	0.9	0.85
W	0.85	1	1	0.85	0.85	0.9	0.85	1	0.85	0.9
NW	0.85	1	1	0.85	0.85	0.95	0.95	1	1	0.9
N	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	1	1	1	1	1

	Saga	Hita	Oita	Nagasaki	Kumamoto	Nobeoka	Akune	Kagoshima	Miyakonojo	Miyazaki
NE	0.85	0.85	0.85	0.9	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.9
E	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.9	0.85
SE	0.85	0.85	1	0.85	0.85	0.95	0.85	0.95	1	1
S	1	1	0.85	0.9	1	1	1	0.95	1	0.85
SW	0.85	1	0.85	1	1	0.85	0.9	1	0.9	0.85
W	0.85	0.95	0.9	1	0.95	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
NW	0.95	0.85	0.9	0.95	1	0.9	0.85	0.85	0.85	0.85
N	0.95	0.85	0.85	0.9	1	0.9	0.85	0.85	0.85	0.9

	Irozaki	Ajiro	Yokohama	Tateyama	Katsuura	Oshima	Miyakojima	Hachijojima	Chiba	Yokkaichi
NE	0.85	0.95	0.85	0.85	0.85	1	0.85	0.85	0.85	0.85
E	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.9	1
SE	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.9	1
S	0.85	0.85	0.85	0.85	1	0.85	0.85	1	0.95	0.85
SW	0.9	1	0.85	0.85	1	0.95	0.85	1	0.95	1
W	1	1	0.85	0.85	0.85	0.9	0.95	0.9	0.85	1
NW	0.85	0.85	1	1	1	0.85	1	0.9	1	0.85
N	0.85	0.95	1	1	0.9	1	1	0.9	1	0.85

	Saigo	Matsue	Sakai	Yonago	Tottori	Toyooka	Maizuru	Hagi	Hamada	Tsuyama
NE	0.9	0.9	0.95	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
E	0.85	0.85	0.95	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.95
SE	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	1	0.9	0.85	0.95
S	0.85	0.85	0.85	0.85	1	0.85	1	0.9	0.85	0.85
SW	0.85	0.9	0.95	0.95	0.85	0.85	0.85	0.85	0.9	0.85
W	0.85	1	1	1	0.85	0.85	0.85	0.9	1	0.95
NW	0.85	0.95	0.85	1	0.9	1	1	1	0.85	0.95
N	1	0.95	0.85	1	0.9	1	1	1	1	1

	Kyoto	Hikone	Shimonoseki	Hiroshima	Kure	Fukuyama	Okayama	Himeji	Kobe	Osaka
NE	1	0.85	0.85	0.85	1	0.95	0.85	0.85	1	0.9
E	0.95	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	1	0.85
SE	0.85	0.85	0.85	0.95	0.85	0.85	0.85	1	0.85	0.85
S	0.85	0.85	0.85	1	0.9	0.85	0.85	1	0.85	1
SW	0.85	0.85	0.85	1	0.9	0.85	1	0.85	0.85	1
W	0.85	0.95	0.85	0.85	0.9	0.85	0.85	0.9	0.85	1
NW	0.95	1	1	0.85	1	0.85	0.85	0.9	1	1
N	0.95	0.85	0.95	0.85	1	1	0.85	0.85	1	1

	Makurazaki	Aburatsubo	Yakushima	Tanegashima	Ushibuka	Fukue	Matsuyama	Tadotsu	Takamatsu	Uwajima
NE	0.85	0.95	0.85	0.85	0.85	0.85	0.9	0.85	0.9	0.95
E	1	0.9	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.95
SE	1	0.9	0.95	0.95	0.85	0.9	1	0.85	0.85	1
S	1	1	1	1	0.85	0.95	1	0.85	0.85	1
SW	1	1	1	0.9	0.9	0.95	0.95	1	0.95	0.85
W	0.95	0.85	0.85	0.9	1	0.95	0.95	1	1	0.85
NW	0.95	0.85	0.85	0.85	0.85	1	0.9	0.85	0.9	0.85
N	0.95	0.95	0.85	0.85	0.85	1	0.9	0.85	0.9	0.85

	Kouchi	Tokushima	Sukumo	Shimizu	Murotomisaki	Naze	Miyakojima	Kumejima	Naha	Nago
NE	0.85	0.85	0.85	0.85	1	0.85	0.95	0.85	0.85	0.85
E	1	0.85	0.95	0.95	1	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
SE	1	1	0.95	0.9	0.9	0.9	0.85	0.95	0.95	0.9
S	0.85	1	0.9	0.95	0.85	0.85	0.95	1	1	1
SW	0.85	0.85	1	0.95	0.95	0.85	0.85	1	1	1
W	0.85	0.85	1	1	1	0.85	0.95	0.85	1	0.85
NW	0.85	0.85	1	0.85	0.9	1	1	1	1	0.9
N	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	1	1	1	1	0.85

	Okinoerabu	Minamidaitojima
NE	0.85	0.9
E	0.85	0.85
SE	1	0.95
S	1	0.95
SW	0.85	0.85
W	0.85	0.85
NW	0.9	1
N	0.95	1

Figura A2.2: (continuação).

E_H : fator de perfil de velocidade em referência a altura H. Em sua formulação tem-se em conta a topografia, rugosidade e a velocidade em função da altura;

$$E_H = E_r E_g \quad (\text{A.6})$$

E_r : fator de exposição para categorias de terreno plano;

$$E_r = \begin{cases} 1,7 \left(\frac{Z}{Z_G} \right)^\alpha & Z_b < Z < Z_G \\ 1,7 \left(\frac{Z_b}{Z_G} \right)^\alpha & Z < Z_b \end{cases} \quad (\text{A.7})$$

Z (m): altura cima do solo;

Z_b , Z_G e α : parâmetros que determinam o fator de exposição E_r ;

Quadro A2.1: Categorias de terreno plano.

	Category	Condition at construction site and upwind region
Smooth ↑	I	Open, no significant obstruction, sea, lake
	II	Open, few obstructions, grassland, agricultural field
	III	Suburban, wooded terrain, few tall buildings (4 to 9-story)
↓ Rough	IV	City, tall buildings (4 to 9-story)
	V	City, heavy concentration of tall buildings (higher than 10-story)

(fonte: AIJ, 2004)

Quadro A2.2: Parâmetros que determinam E_r .

Category	I	II	III	IV	V
Z_b (m)	5	5	10	20	30
Z_G (m)	250	350	450	550	650
α	0.1	0.15	0.2	0.27	0.35

(fonte: AIJ, 2004)

E_g : fator de topografia para a velocidade do vento;

$$E_g = (C_1 - 1) \left\{ C_2 \left(\frac{Z}{H_s} - C_3 \right) + 1 \right\} \exp \left\{ -C_2 \left(\frac{Z}{H_s} - C_3 \right) \right\} + 1 \quad e \quad E_g \geq 1 \quad (\text{A.8})$$

C_1, C_2 e C_3 : fator de topografia para a velocidade do vento;

H_s (m): altura da topografia;

L_s (m): distância horizontal a partir do topo da topografia ao ponto em que a altura é a metade da altura topográfica;

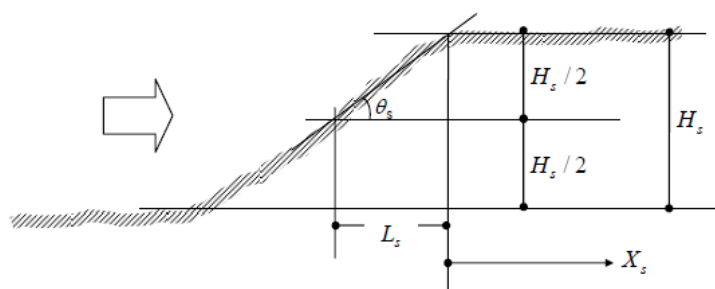


Figura A2.3: Taludes (fonte: AIJ, 2004).

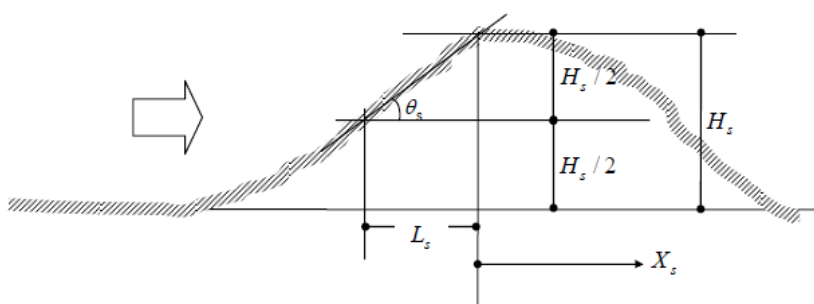


Figura A2.4: Topografia em forma de cume (fonte: AIJ, 2004).

Quadro A2.3: Parâmetros que determinam E_g (taludes).

θ_s		X_s/H_s									
		-4	-2	-1	-0.5	0	0.5	1	2	4	8
7.5°	C_1	1.15	1.3	1.5	1.5	1.6	1.45	1.3	1.3	1.2	1.15
	C_2	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.6	0.6	0.5	0.4
	C_3	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2
15°	C_1	0.4	1	1.2	1.55	2.1	1.65	1.5	1.3	1.2	1.15
	C_2	0.9	0	0.65	0.85	1	0.8	0.7	0.55	0.45	0.35
	C_3	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2
30°	C_1	0.7	-0.5	1.05	1.1	1.3	1.3	1.25	1.2	1.15	1.1
	C_2	0.65	1.2	1.65	1.5	1.45	1.3	0.9	0.9	0.85	0.6
	C_3	-2	-2	1	0.8	0.3	0.3	0.5	0.7	1.2	1.4
45°	C_1	0.8	0	-3.5	1.1	1.2	1.35	1.3	1.2	1.15	1.1
	C_2	0.5	1	1.6	2	1.1	1.3	1.3	1.3	0.9	0.55
	C_3	-2	-2	-2	0.8	0.3	0.2	0.75	1.05	1.4	2
60°	C_1	0.6	0.1	-1.8	-2.4	1.2	1.4	1.35	1.25	1.15	1.1
	C_2	0.65	0.9	1.3	2.6	2	1.8	1.7	1.5	0.85	0.45
	C_3	-2	-2	-2	-1	0.5	0.5	0.8	1.2	1.9	3.1

(fonte: AIJ, 2004)

Quadro A2.4: Parâmetros que determinam E_g (cume).

θ_s		X_s/H_s									
		-4	-2	-1	-0.5	0	0.5	1	2	4	8
7.5°	C_1	1.1	1.2	1.35	1.35	1.4	1.3	1.3	1.2	1.1	1
	C_2	1	1	1	1	1.5	1.2	1.1	2	1.6	0
	C_3	0	0	0	0	0.2	0.2	0.2	0.5	0.9	0
15°	C_1	1	1.05	1.2	1.25	1.3	1.4	1.3	1.25	0.35	0.65
	C_2	0	0	1	1	1	1.5	1.5	2	3	2
	C_3	0	0	0	0	0	0.5	0.6	1.1	0.2	0.3
30°	C_1	0.75	0.55	0.85	1	1.2	1.3	1.25	1.2	1.1	1.02
	C_2	1.5	2	2	0	1	2	2	1.6	1.7	1.7
	C_3	0	0	0	0	0	1.1	1.3	2.1	2.2	2.8
45°	C_1	0.75	0.55	0.2	0.75	1.15	1.2	1.15	1.12	1.1	1.02
	C_2	1.5	2	2	3	1	2.5	2.5	2	1.6	1.3
	C_3	0	0	0	0	0	1.2	1.9	2.2	2.5	3.2
60°	C_1	0.75	0.55	0.2	0.2	1.15	1.12	1.15	1.12	1.1	1.02
	C_2	1.5	1.5	1.8	3	1	2.2	2.5	2	1.6	1.3
	C_3	0	0	0	0	0	1.8	2	2.3	2.6	3.4

(fonte: AIJ, 2004)

k_{rW} : fator que toma em consideração a conversão do período de recorrência da estrutura;

$$k_{rW} = 0,63(\lambda_U - 1) \ln r - 2,9\lambda_U + 3,9 \quad (\text{A.9})$$

$$\lambda_U = \frac{U_{500}}{U_0} \quad (\text{A.10})$$

U_{500} : 500 anos de recorrência da velocidade média de 10 minutos do vento a 10 metros acima do solo ao longo de um terreno plano e aberto;

$U_0 = V_0$: velocidade básica do vento;

r : período de recorrência de projeto;

$B(m)$: largura projetada do edifício;

$H(m)$: altura do edifício;

C_H : coeficiente de arrasto na altura H;

C'_g : rms coeficiente de momento de tombamento na direção do vento;

$$C'_g = 2I_H \frac{0,49 - 0,14\alpha}{\left[1 + \frac{0,63 \left(\frac{\sqrt{BH}}{L_H} \right)^{0,56}}{(H/B)^k} \right]} \quad (\text{A.11})$$

$$\text{Sendo } k = \begin{cases} 0,07 & \text{se } H/B \geq 1 \\ 0,15 & \text{se } H/B < 1 \end{cases}$$

L_H : escala de turbulência em relação a altura de referência H;

$$L_H = \begin{cases} 100 \left(\frac{H}{30}\right)^{0,5} & \text{para } 30m < H < Z_G \\ 100 & \text{para } H \leq 30m \end{cases} \quad (\text{A.12})$$

λ : fator de modo de correção da forma modal;

$$\lambda = 1 - 0,4 \ln \beta \quad (\text{A.13})$$

$$\mu = \left(\frac{Z}{H}\right)^\beta \quad (\text{A.14})$$

μ : primeira forma modal para cada componente;

R_D : fator de ressonância para vibração na direção do vento;

$$R_D = \frac{\pi F_D}{4\zeta_D} \quad (\text{A.15})$$

ζ_D : relação de amortecimento crítico para o primeiro modo de na direção do vento;

F_D : fator espectro da força na direção do vento;

$$F_D = \frac{I_H^2 F S_D (0,57 - 0,35\alpha + 2R\sqrt{0,053 - 0,042\alpha})}{C_g'^2} \quad (\text{A.16})$$

F : fator espectro da força de vento;

$$F = \frac{\frac{4f_D L_H}{V_H}}{\left[1 + 71 \left(\frac{f_D L_H}{V_H}\right)^2\right]^{5/6}} \quad (\text{A.17})$$

$M_D(kg)$: massa generalizada do edifício para vibração na direção do vento;

$f_D(Hz)$: frequência natural para o primeiro modo na direção do vento;

S_D : fator efeito de tamanho;

$$S_D = \frac{0,9}{\left[1 + 6 \left(\frac{f_D H}{V_H}\right)^2\right]^{0,5} \left(1 + 3 \left(\frac{f_D B}{V_H}\right)\right)} \quad (\text{A.18})$$

A.2.2 Determinação da máxima aceleração na direção transversal do vento

$$a_{Lmax} = \frac{q_H g_{aL} B H C'_L \lambda \sqrt{R_L}}{M_L} \quad (\text{A.19})$$

$a_{Lmax}(m/s^2)$: máxima aceleração na direção transversal do vento no alto do edifício;

g_{aL} : fator de pico;

$$g_{aL} = \sqrt{2 \ln(600 f_L) + 1,2} \quad (\text{A.20})$$

$q_H(N/m^2)$: pressão dinâmica em referência a altura H;

$B(m)$: largura projetada do edifício;

$H(m)$: altura referência;

C'_L : rms coeficiente de momento de tombamento na direção transversal do vento;

$$C'_L = 0,0082 \left(\frac{D}{B}\right)^3 - 0,071 \left(\frac{D}{B}\right)^2 + 0,22 \left(\frac{D}{B}\right) \quad (\text{A.21})$$

$D(m)$: comprimento do edifício;

λ : fator de modo de correção da forma modal;

R_L : fator de ressonância para vibração na direção transversal do vento;

$$R_L = \frac{\pi F_L}{4\zeta_L} \quad (\text{A.22})$$

F_L : fator espectro da força na direção transversal do vento;

$$F_L = \sum_{j=1}^m \frac{4k_j(1 + 0,6\beta_j)\beta_j}{\pi} \frac{(f_L/f_{sj})^2}{\{1 - (f_L/f_{sj})^2\}^2 + 4\beta_j^2(f_L/f_{sj})^2} \quad (\text{A.23})$$

Onde a somatória pode ter um ou dois valores.

$$m = \begin{cases} 1 & \text{se } D/B < 3 \\ 2 & \text{se } H/B \geq 3 \end{cases}$$

$$k_j = \begin{cases} k_1 = 0,85 \\ k_2 = 0,02 \end{cases}$$

$$\beta_j = \begin{cases} \beta_1 = \frac{(D/B)^4 + 2,3(D/B)^2}{\{2,4(D/B)^4 - 9,2(D/B)^3 + 18(D/B)^2 + 9,5(D/B) - 0,15\}} + \frac{0,12}{(D/B)} \\ \beta_2 = \frac{0,28}{(D/B)^{0,34}} \end{cases} \quad (\text{A.24})$$

$$f_{sj} = \begin{cases} f_{s1} = \frac{0,12}{\{1 + 0,38(D/B)^2\}^{0,89}} \frac{U_H}{B} \\ f_{s2} = \frac{0,56}{(D/B)^{0,85}} \frac{U_H}{B} \end{cases} \quad (\text{A.25})$$

ζ_L : relação de amortecimento crítico para o primeiro modo na direção transversal do vento;

M_L (kg): massa generalizada do edifício para vibração na direção transversal do vento;

f_L (Hz): frequência natural para o primeiro modo na direção transversal do vento.

A.2.3 Determinação da máxima aceleração torcional

$$a_{Tmax} = \frac{0,6q_H g_{aT} B^2 H C'_T \lambda \sqrt{R_T}}{I_T} \quad (\text{A.26})$$

a_{Tmax} (rad/s²): máxima aceleração torcional;

g_{aT} : fator de pico;

$$g_{aT} = \sqrt{2 \ln(600f_T) + 1,2} \quad (\text{A.27})$$

q_H (N/m²): pressão dinâmica em referência a altura H;

B (m): largura projetada do edifício;

H (m): altura referência;

C'_T : rms coeficiente de momento de torção;

$$C'_T = \left[0,0066 + 0,015 \left(\frac{D}{B} \right)^2 \right]^{0,78} \quad (\text{A.28})$$

λ : fator de modo de correção da forma modal;

R_T : fator de ressonância para vibração torcional;

$$R_T = \frac{\pi F_T}{4\zeta_T} \quad (\text{A.29})$$

F_T : fator espectro da força torcional;

$$F_T = \begin{cases} \frac{0,14K_T^2(V_T^*)^{2\beta_T} D(B^2 + D^2)^2}{\pi L^2 B^3} \text{ para } V_T^* \leq 4,5 \text{ e } 6 \leq V_T^* \leq 10 \\ F_{4,5} \exp \left[3,5 \ln \left(\frac{F_6}{F_{4,5}} \right) \ln \left(\frac{V_T^*}{4,5} \right) \right] \text{ para } 4,5 < V_T^* < 6 \end{cases} \quad (\text{A.30})$$

$F_{4,5}$ = valores de F_T quando $V_T^* = 4,5$;

F_6 = valores de F_T quando $V_T^* = 6$

$$V_T^* = \frac{V_H}{f_T \sqrt{BD}} \quad (\text{A.31})$$

$$\beta_T = \begin{cases} \frac{(D/B) + 3,6}{(D/B)^2 - 5,1(D/B) + 9,1} + \frac{0,14}{(D/B)} + 0,14 \text{ para } V_T^* \leq 4,5 \\ \frac{0,44(D/B)^2 - 0,0064}{(D/B)^4 - 0,26(D/B)^2 + 0,1} + 0,2 \text{ para } 6 < V_T^* \leq 10 \end{cases} \quad (\text{A.32})$$

$D(m)$: comprimento do edifício;

$I_T(kgm^2)$: momento de inércia generalizada do edifício para vibração torcional;

$f_T(Hz)$: frequência natural para o primeiro modo na direção torcional.

A.3 PROCESSO DA NORMA AMERICANA ASCE (2010)

A.3.1 Determinação da máxima aceleração na direção do vento

$$\ddot{X}_{m\acute{a}x}(z) = g_{\ddot{x}} \sigma_{\ddot{x}}(z) \quad (\text{A.33})$$

$\ddot{X}_{m\acute{a}x}(z)$: máxima aceleração na direção do vento;

$$g_{\ddot{x}} = \sqrt{2 \ln(T\eta_1)} + \frac{0,5772}{\sqrt{2 \ln(T\eta_1)}} \quad (\text{A.34})$$

$\eta_1 (Hz)$: frequência natural da estrutura no primeiro modo de vibração na direção do vento;

$T (s)$: período de tempo mínimo para cálculo da aceleração, geralmente tido como 3600=1h;

$$\sigma_{\ddot{x}} = \frac{0,85 \Phi(z) \rho B h C_{fs} \hat{v}_z^2}{m_1} I_z K R \quad (\text{A.35})$$

$\sigma_{\ddot{x}}$: valor rms ou desvio padrão da aceleração na direção do vento;

$\Phi(z)$: forma modal fundamental;

$$\Phi(z) = \left(\frac{z}{h}\right)^\xi \quad (\text{A.36})$$

$z (m)$: altura equivalente;

$$z = 0,6h \quad (\text{A.37})$$

h (m): altura da edificação;

ξ : expoente da forma modal;

ρ (kg/m^3): massa específica do ar, tida como 1,225;

B (m): largura da edificação normal ao vento;

C_{fx} : coeficiente de força médio ou arrasto para a componente longitudinal;

\hat{v}_z^2 : quadrado da velocidade do vento médio por hora na altura \bar{z} ;

$$\bar{V}_z = \bar{b} \left(\frac{\bar{z}}{10} \right)^{\bar{\alpha}} V \quad (\text{A.38})$$

$\hat{b}, \hat{\alpha}$: parâmetro dependente da categoria do terreno;

Quadro A3.1: Parâmetros de exposição do terreno (em metros).

Exposure	α	z_t (m)	\hat{a}	\hat{b}	$\bar{\alpha}$	\bar{b}	c	ℓ (m)	$\bar{\epsilon}$	z_{\min} (m)*
B	7.0	365.76	1/7	0.84	1/4.0	0.45	0.30	97.54	1/3.0	9.14
C	9.5	274.32	1/9.5	1.00	1/6.5	0.65	0.20	152.4	1/5.0	4.57
D	11.5	213.36	1/11.5	1.07	1/9.0	0.80	0.15	198.12	1/8.0	2.13

* z_{\min} = minimum height used to ensure that the equivalent height \bar{z} is greater of $0.6h$ or z_{\min} .
For buildings with $h \leq z_{\min}$, \bar{z} shall be taken as z_{\min} .

(fonte: ASCE, 2010)

V (m/s): velocidade básica do vento para 10 anos de recorrência, correspondente a uma rajada de 3 segundos, a 10 metros acima do solo e categoria de exposição C;

Quadro A3.2: Categoria de risco de edifícios e outras estruturas para a inundação, vento, neve, terremoto e grande quantidade de gelo.

Use or Occupancy of Buildings and Structures	Risk Category
Buildings and other structures that represent a low risk to human life in the event of failure	I
All buildings and other structures except those listed in Risk Categories I, III, and IV	II
Buildings and other structures, the failure of which could pose a substantial risk to human life.	III
Buildings and other structures, not included in Risk Category IV, with potential to cause a substantial economic impact and/or mass disruption of day-to-day civilian life in the event of failure.	
Buildings and other structures not included in Risk Category IV (including, but not limited to, facilities that manufacture, process, handle, store, use, or dispose of such substances as hazardous fuels, hazardous chemicals, hazardous waste, or explosives) containing toxic or explosive substances where their quantity exceeds a threshold quantity established by the authority having jurisdiction and is sufficient to pose a threat to the public if released.	
Buildings and other structures designated as essential facilities.	IV
Buildings and other structures, the failure of which could pose a substantial hazard to the community.	
Buildings and other structures (including, but not limited to, facilities that manufacture, process, handle, store, use, or dispose of such substances as hazardous fuels, hazardous chemicals, or hazardous waste) containing sufficient quantities of highly toxic substances where the quantity exceeds a threshold quantity established by the authority having jurisdiction to be dangerous to the public if released and is sufficient to pose a threat to the public if released. ⁴	
Buildings and other structures required to maintain the functionality of other Risk Category IV structures.	

⁴Buildings and other structures containing toxic, highly toxic, or explosive substances shall be eligible for classification to a lower Risk Category if it can be demonstrated to the satisfaction of the authority having jurisdiction by a hazard assessment as described in Section 1.5.2 that a release of the substances is commensurate with the risk associated with that Risk Category.

(fonte: ASCE, 2010)

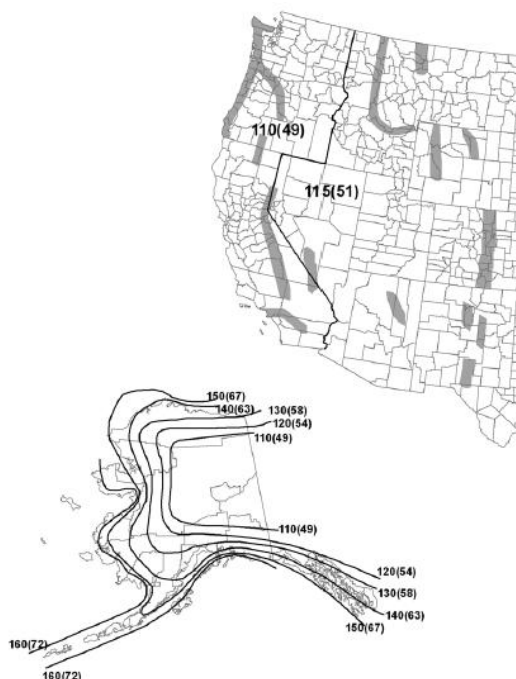


Figura A3.1: Velocidade básica do vento para categoria de ocupação II de edifícios e outras estruturas (fonte: ASCE, 2010).

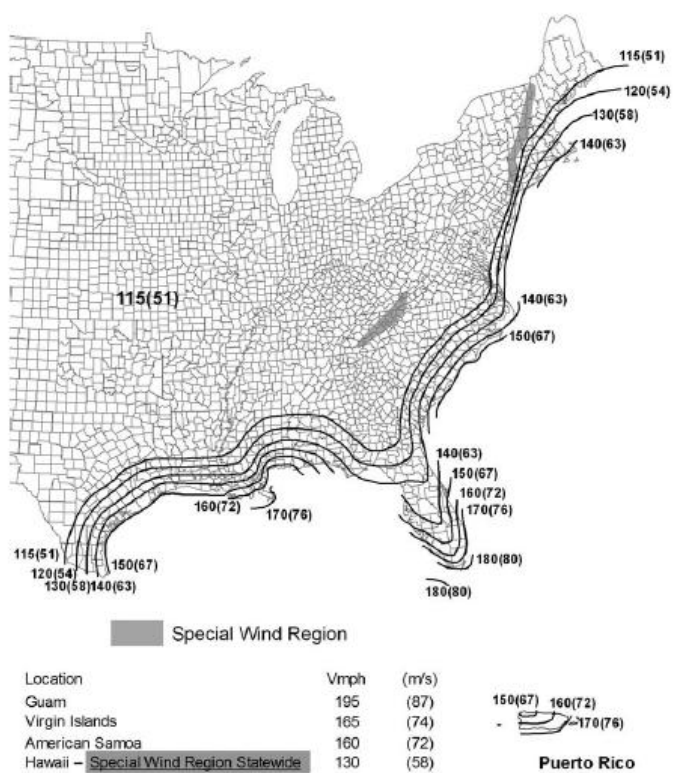


Figura A3.1: (continuação).

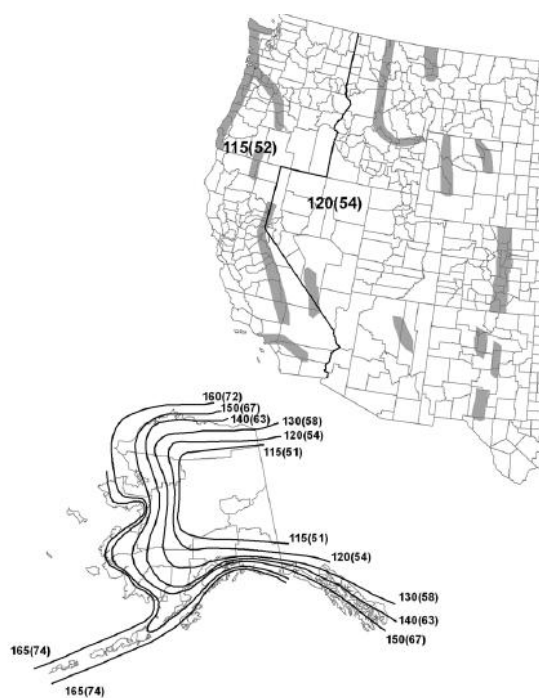


Figura A3.2: Velocidade básica do vento para categoria de ocupação III e IV de edifícios e outras estruturas (fonte: ASCE, 2010).

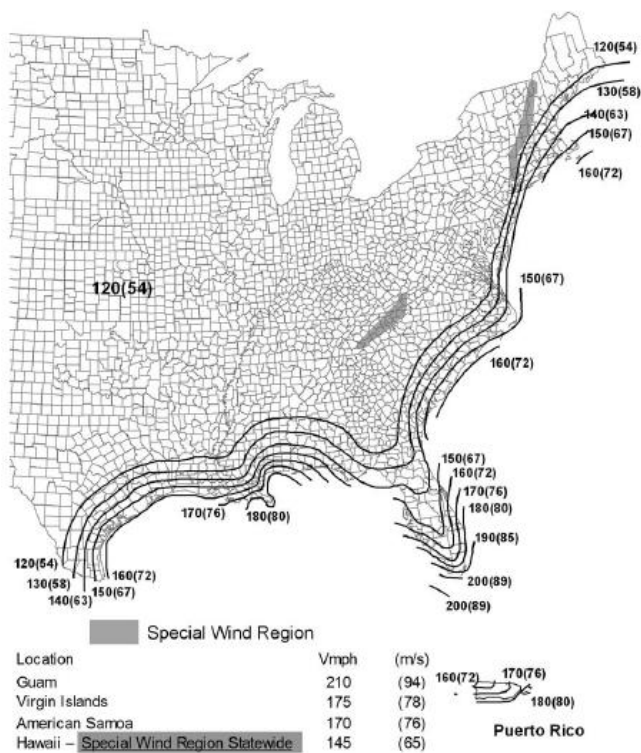


Figura A3.2: (continuação).

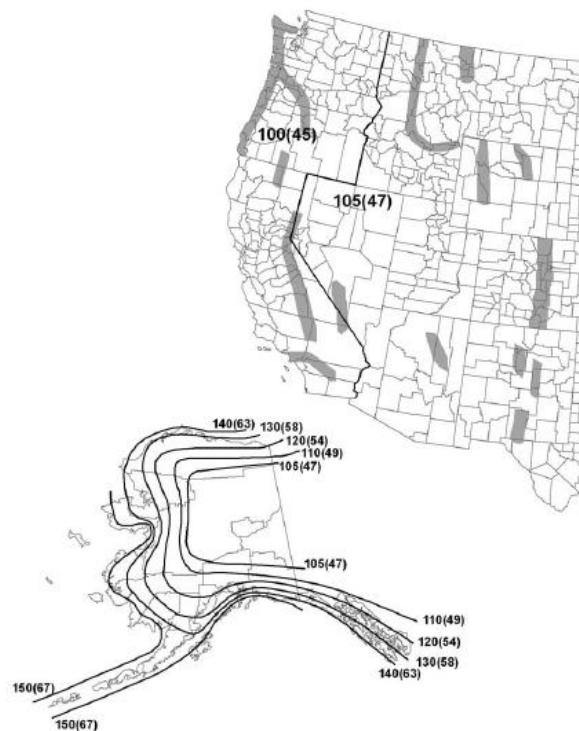


Figura A3.3: Velocidade básica do vento para categoria de ocupação I de edifícios e outras estruturas (fonte: ASCE, 2010).

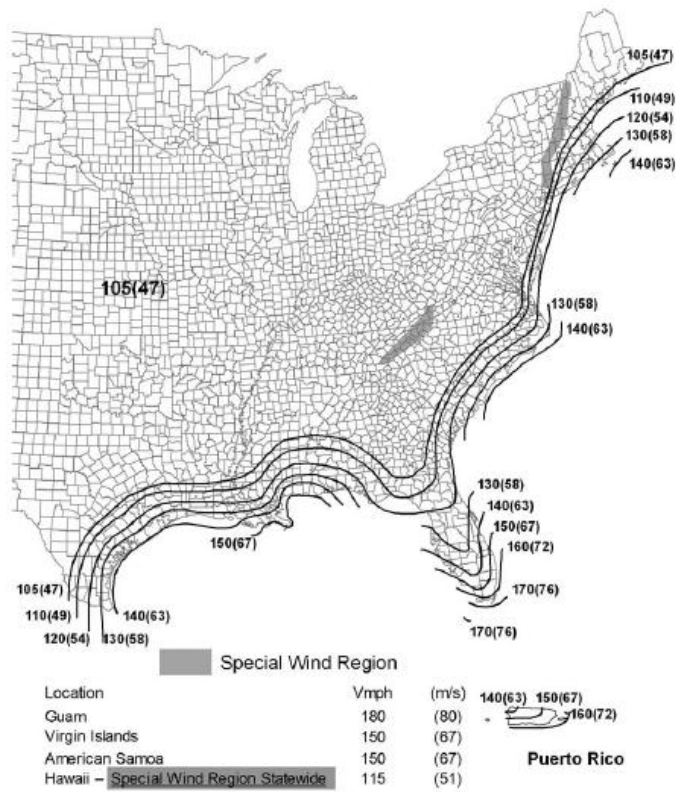


Figura A3.3: (continuação).

m_1 : massa modal;

$$m_1 = \int_0^h \mu(z) \Phi(z)^2 dz \quad (\text{A.39})$$

$\mu(z)$: massa por unidade de comprimento (altura);

$I_{\bar{z}}$: intensidade da turbulência com \bar{z} como altura equivalente da estrutura;

$$I_{\bar{z}} = c \left(\frac{10}{\bar{z}} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (\text{A.40})$$

c : fator de intensidade de turbulência, ver tabela anterior;

$$K = (1,65)^{\hat{\alpha}} / \hat{\alpha} + \xi + 1 \quad (\text{A.41})$$

R : fator da resposta ressonante;

$$R = \sqrt{\frac{1}{\beta} R_n R_h R_B (0,53 + 0,47 R_L)} \quad (\text{A.42})$$

β : razão de amortecimento crítico, usualmente, 2% = 0,02;

R_n : fator da resposta ressonante;

$$R_n = \frac{7,47 N_1}{(1 + 10,3 N_1)^{\frac{5}{3}}} \quad (\text{A.43})$$

N_1 : frequência reduzida;

$$N_1 = \frac{\eta_1 L_{\bar{z}}}{\bar{V}_{\bar{z}}} \quad (\text{A.44})$$

$\bar{V}_{\bar{z}}$ (m/s): velocidade média do vento para 1 hora na altura \bar{z} ;

$$\bar{V}_{\bar{z}} = \bar{b} \left(\frac{\bar{z}}{10} \right)^{\bar{\alpha}} V \quad (\text{A.45})$$

$L_{\bar{z}}$: escala de turbulência;

$$L_{\bar{z}} = \ell \left(\frac{\bar{z}}{10} \right)^{\bar{\epsilon}} \quad (\text{A.46})$$

$\ell(m)$: fator integrante da escala de comprimento, ver tabela anterior;

$\bar{\epsilon}$: parâmetro integrante da escala de comprimento, expoente da lei de potência, ver tabela anterior;

$$R_h = \begin{cases} \frac{1}{\eta} - \frac{1}{2\eta^2} (1 - e^{-2\eta}) & \text{para } \eta > 0 \\ 1 & \text{para } \eta = 0 \end{cases} \quad (\text{A.47})$$

$$\text{Sendo } \eta = \frac{4,6\eta_1 h}{\bar{V}_{\bar{z}}}$$

$$R_B = \begin{cases} \frac{1}{\eta} - \frac{1}{2\eta^2} (1 - e^{-2\eta}) & \text{para } \eta > 0 \\ 1 & \text{para } \eta = 0 \end{cases} \quad (\text{A.48})$$

$$\text{Sendo } \eta = \frac{4,6\eta_1 B}{\bar{V}_{\bar{z}}}$$

$$R_L = \begin{cases} \frac{1}{\eta} - \frac{1}{2\eta^2} (1 - e^{-2\eta}) & \text{para } \eta > 0 \\ 1 & \text{para } \eta = 0 \end{cases} \quad (\text{A.49})$$

$$\text{Sendo } \eta = \frac{15,4\eta_1 L}{\bar{V}_{\bar{z}}}$$

$L(m)$: dimensão da estrutura paralela a direção do vento.

A.4 PROCESSO DA NORMA AUSTRALIANA E NEOZELANDESA AS/NZS 1170 (2011)

A.4.1 Determinação da máxima aceleração na direção do vento

$$\ddot{x}_{max} = \frac{3}{m_0 h^2} \frac{\rho_{ar} g_R I_h \sqrt{\frac{SE_t}{\zeta}}}{(1 + 2g_v I_h)} \left\{ C_{fig,barlavento} \sum_{z=0}^h [V_{des,0}(z)]^2 b_z z \Delta z \right. \\ \left. - C_{fig,sotavento} [V_{des,0}(h)]^2 \sum_{z=0}^h b_z z \Delta z \right\} \quad (A.50)$$

m_0 (kg/m): massa média por unidade de altura;

h (m): altura média do telhado de uma estrutura acima do solo;

ρ_{ar} (kg/m^3): massa específica do ar, tida como 1,2;

g_R : fator de pico para a resposta ressonante (período de 10 minutos);

$$g_R: \sqrt{1,2 + [2 \log_e(600\eta_a)]} \quad (A.51)$$

η_a (Hz): primeiro modo de vibração da frequência natural da estrutura na direção do vento;

I_h : intensidade de turbulência, definindo $z=h$, em função da categoria e da zona em análise;

Quadro A4.1: Intensidade de turbulência I_z .

Height (z) m	Limit state, region and terrain category			
	Serviceability limit states			
	Terrain category 1, all regions	Terrain category 2, all regions	Terrain category 3, all regions	Terrain category 4, all regions
	Ultimate limit states			
	Terrain category 1, Regions A, W and B	Terrain category 2, Regions A, W and B	Terrain category 3, Regions A, W and B Terrain categories 1, 2, and 3: Regions C and D	Terrain category 4, all regions
≤3	0.171	0.207	0.271	0.342
5	0.165	0.196	0.271	0.342
10	0.157	0.183	0.239	0.342
15	0.152	0.176	0.225	0.342
20	0.147	0.171	0.215	0.342
30	0.140	0.162	0.203	0.305
40	0.133	0.156	0.195	0.285
50	0.128	0.151	0.188	0.270
75	0.118	0.140	0.176	0.248
100	0.108	0.131	0.166	0.233
150	0.095	0.117	0.150	0.210
200	0.085	0.107	0.139	0.196

NOTE: For intermediate values of height (z) and terrain category, linear interpolation shall be used.

(fonte: AS/NZS, 2011)

S: fator de redução de tamanho;

$$S = \frac{1}{\left[1 + \frac{3,5 \cdot f_1 \cdot h(1 + g_v I_h)}{V_{des,\theta}}\right] \left[1 + \frac{4 \cdot f_1 \cdot b_{0h}(1 + g_v I_h)}{V_{des,\theta}}\right]} \quad (\text{A.52})$$

g_v : fator de pico para as flutuações de velocidade a contravento, o qual pode ser tomado como 3,4;

b_{0h} : largura média da estrutura entre 0 e h ;

$V_{des,0}(z)(m/s)$: velocidade obtida com o com o valor máximo para a direção β $V_{des,0} = V_{sit,\beta}$;

$$V_{sit,\beta} = V_R \cdot M_d \cdot (M_{z,cat} \cdot M_s \cdot M_t) \quad (\text{A.53})$$

$V_{sit,\beta}$: velocidade dependente da localização da estrutura e direção do vento β . Se determinam 8 direções β a altura z ;

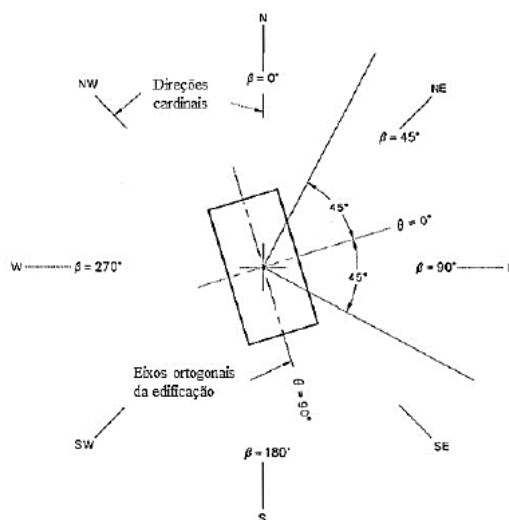


Figura A4.1: Direções β do vento (fonte: AS/NZS, 2011).

V_R : velocidade regional, para R período de recorrência, para uma rajada de 3 segundos, a uma altura de 10 metros acima do solo, em terreno aberto (categoria 2), de acordo com as isopletas nas figuras 3.1 (A) para a norma Australiana e 3.1 (B) para a norma Neozelandesa;

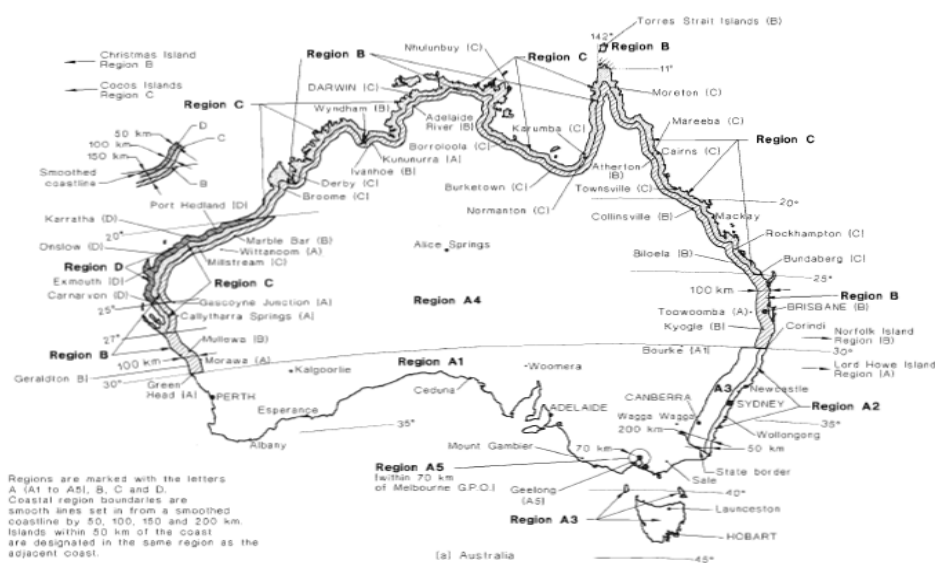


Figura A4.2: Região do vento Austrália (fonte: AS/NZS, 2011).



Figura A4.3: Região do vento Nova Zelândia (fonte: AS/NZS, 2011).

M_d : fator multiplicador em função da direção β analisada conforme tabela 3.2 desta norma;

Quadro A4.2: Fator multiplicador de direção β do vento M_d .

Cardinal directions	Region A1	Region A2	Region A3	Region A4	Region A5	Region A6	Region A7	Region W
N	0.90	0.80	0.85	0.90	1.00	0.85	0.90	1.00
NE	0.80	0.80	0.80	0.85	0.85	0.95	0.90	0.95
E	0.80	0.80	0.80	0.90	0.80	1.00	0.80	0.80
SE	0.80	0.95	0.80	0.90	0.80	0.95	0.90	0.90
S	0.85	0.90	0.80	0.95	0.85	0.85	0.90	1.00
SW	0.95	0.95	0.85	0.95	0.90	0.95	0.90	1.00
W	1.00	1.00	0.90	0.95	1.00	1.00	1.00	0.90
NW	0.95	0.95	1.00	0.90	0.95	0.95	1.00	0.95
Any direction	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

(fonte: AS/NZS, 2011)

$M_{z,cat}$: fator multiplicador em dependência da altura z e a categoria do terreno. São definidas 4 categorias e o fator pode ser obtido das tabelas 4.1 (A) e 4.1 (B) da referida norma;

Quadro A4.3: Fator multiplicador em dependência da altura z e a categoria do terreno $M_{z,cat}$, para regiões A1 até A7, W e B.

Height (z) m	Terrain/height multiplier ($M_{z,cat}$)			
	Terrain category 1	Terrain category 2	Terrain category 3	Terrain category 4
≤3	0.99	0.91	0.83	0.75
5	1.05	0.91	0.83	0.75
10	1.12	1.00	0.83	0.75
15	1.16	1.05	0.89	0.75
20	1.19	1.08	0.94	0.75
30	1.22	1.12	1.00	0.80
40	1.24	1.16	1.04	0.85
50	1.25	1.18	1.07	0.90
75	1.27	1.22	1.12	0.98
100	1.29	1.24	1.16	1.03
150	1.31	1.27	1.21	1.11
200	1.32	1.29	1.24	1.16

NOTE: For intermediate values of height z and terrain category, use linear interpolation.

(fonte: AS/NZS, 2011)

Quadro A4.4: Fator multiplicador em dependência da altura z e a categoria do terreno $M_{z,cat}$, para regiões C e D.

Height (z) m	Multiplier ($M_{z,cat}$)	
	Terrain categories 1 and 2	Terrain categories 3 and 4
≤3	0.90	0.80
5	0.95	0.80
10	1.00	0.89
15	1.07	0.95
20	1.13	1.05
30	1.20	1.15
40	1.25	1.25
50	1.29	1.29
75	1.35	1.35
≥100	1.40	1.40

NOTE: For intermediate values of height z and terrain category, use linear interpolation.

(fonte: AS/NZS, 2011)

M_s : fator relativo à proteção, conforme Tabela 4.3 da referida norma, função do parâmetro s ;

Quadro A4.5: Fator multiplicador de proteção.

Shielding parameter (s)	Shielding multiplier (M_s)
≤ 1.5	0.7
3.0	0.8
6.0	0.9
≥ 12.0	1.0

NOTE: For intermediate values of s , use linear interpolation.

(fonte: AS/NZS, 2011)

s : parâmetro de proteção;

$$s = \frac{I_s}{\sqrt{h_s b_s}} \quad (\text{A.54})$$

I_s : espaçamento médio de blindagem de edifícios;

$$I_s = h \left(\frac{10}{n_s} + 5 \right) \quad (\text{A.55})$$

h_s : altura média de blindagem dos edifícios;

b_s : amplitude média de blindagem de edifícios, normais para o fluxo de vento;

h : altura média de telhado, acima do solo, da estrutura a ser protegida;

n_s : número de edifícios de blindagem do vento dentro de um setor de 45° de raio $20h$ e

$h_s \geq z$;

M_t : fator relativo a topografia definido na seção 4.4 da referida Norma;

$$M_t = M_h M_{lee} (1 + 0,00015E) \quad (\text{A.56})$$

M_h : multiplicador da forma do morro;

M_{lee} : multiplicador sotavento (efeito) (tomado como 1,0, exceto na Nova Zelândia zonas de sotavento, ver cláusula 4.4.3 da referida norma);

E (m): elevação local acima do nível do mar;

Em outros lugares, o maior valor dos seguintes:

$$M_t = M_h \quad (\text{A.57})$$

$$M_t = M_{lee} \quad (\text{A.58})$$

E_t : espectro da turbulência na corrente do vento que se aproxima;

$$E_t = \frac{\pi N}{(1 + 70,8N^2)^{5/6}} \quad (\text{A.59})$$

N : frequência adimensionalizada ou reduzida;

$$N_t = \frac{f_1 L_h (1 + g_v I_h)}{V_{des,\theta}} \quad (\text{A.60})$$

L_h (m): escala de turbulência a altura h ;

$$L_h = 85 \left(\frac{h}{10} \right)^{0,25} \quad (\text{A.61})$$

ζ : relação do amortecimento da estrutura e do amortecimento crítico da estrutura;

g_V : fator de pico para as flutuações de velocidade a contravento, o qual pode ser tomado como 3,7;

$C_{fig,bar}$: fator de forma aerodinâmica (arrasto) a barlavento;

$C_{fig,sot}$: fator de forma aerodinâmica (arrasto) a sotavento;

z (m): Altura de referência (analisada) sobre a estrutura acima da média do nível do solo local;

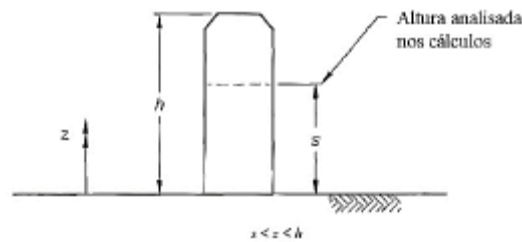


Figura A4.4: Alturas referenciais (fonte: AS/NZS, 2011).

$V_{des,0}(z)$ (m/s): velocidade de projeto do vento em edifícios ortogonais, função da altura z ;

b_z (m): largura média da estrutura na seção da altura z ;

Δ_z (m): altura da seção da estrutura sobre o qual atua a pressão do vento.

A.4.2 Determinação da máxima aceleração na direção transversal do vento

$$\ddot{y}_{max} = \frac{1,5b g_R}{m_0} \left[\frac{0,5\rho_{ar} [V_{des,0}]^2}{(1 + g_v I_h)^2} \right] K_m \sqrt{\frac{\pi C_{fs}}{\zeta}} \quad (\text{A.62})$$

b (m): largura média da estrutura;

g_R : fator de pico para a resposta ressonante (período de 10 min) dado pela equação 4.12:

$$g_R = \sqrt{1,2 + [2 \log(600\eta_c)]} \quad (\text{A.63})$$

η_c (Hz): primeiro modo de vibração da frequência natural da estrutura na direção transversal do vento;

m_0 (kg/m): massa média por unidade de altura;

ρ_{ar} (kg/m³): massa específica do ar, tida como 1,2;

$V_{des,0}(h)$ (m/s): velocidade de projeto do vento em edifícios ortogonais avaliadas em relação a altura h ;

g_V : fator de pico para as flutuações de velocidade contra o vento, o qual pode ser tomado como 3,4;

I_h : intensidade de turbulência, definindo $z=h$, obtida da Tabela 6.1 da referida norma em função da categoria e da zona em análise;

K_m : fator de correção de forma modal para a aceleração na direção transversal do vento, dada pela equação 4.13:

$$K_m = 0,76 + 0,24k \quad (\text{A.64})$$

k : expoente energia da forma modal para o modo fundamental onde os valores do expoente k deve ser tomado como:

: 1,5 para um uniforme balanço;

: 0,5 para uma estrutura delgada;

: 1,0 para um edifício com núcleo central;

: 2,3 para uma torre diminuindo a rigidez com a altura ou com uma grande massa no topo;

: o valor obtido a partir $\phi_1(z) = (z/h)^k$ apropriado a forma modal da estrutura computadorizada;

$\phi_1(z)$: primeira forma modal como uma função da altura z , unidade normalizada para $z=h$;

C_{fs} : coeficiente do espectro da força na direção transversal do vento generalizada para uma forma modal linear;

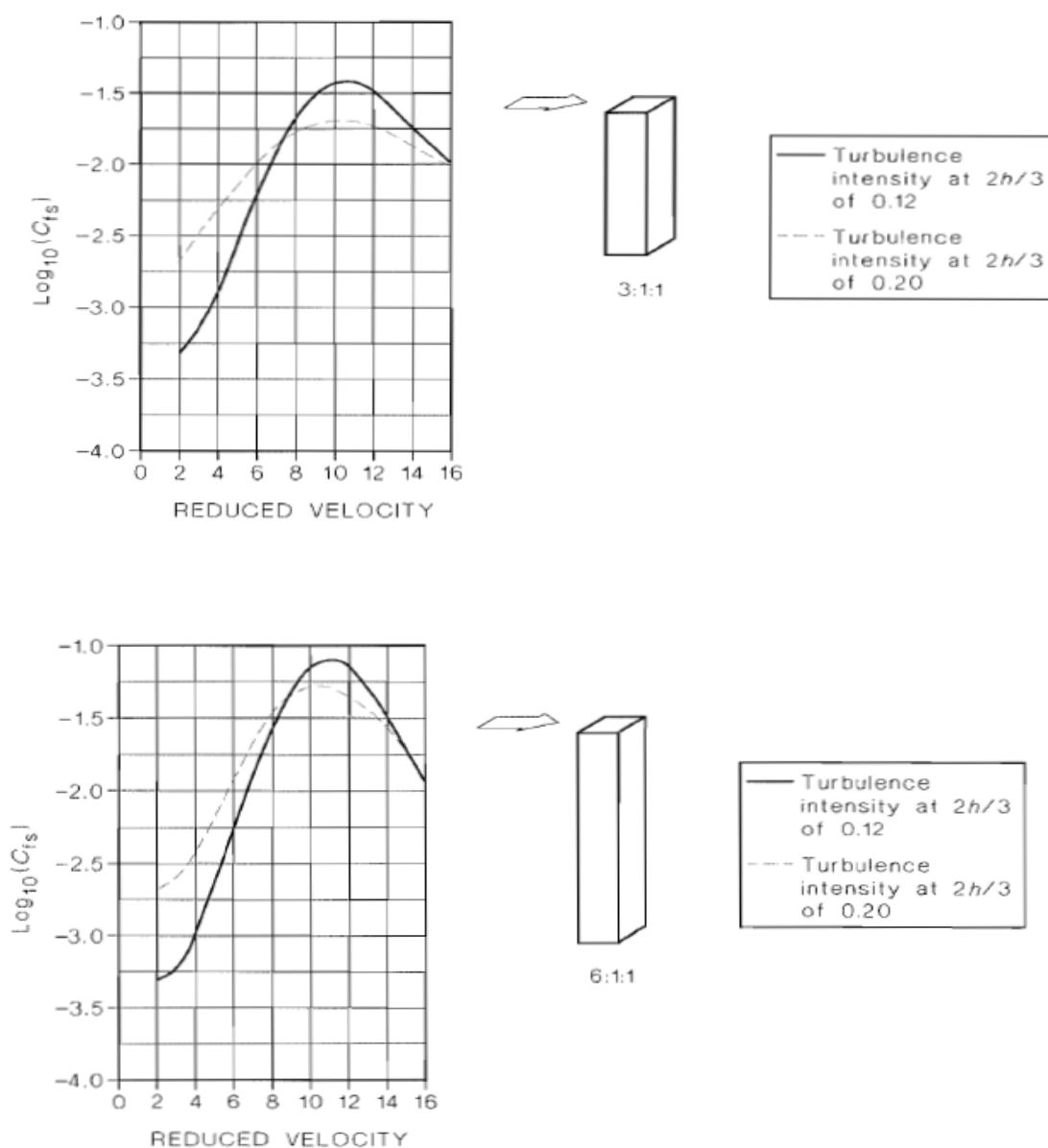


Figura A4.5: Obtenção do coeficiente relativo ao espectro da componente transversal C_{fs} (fonte: AS/NZS, 2011).

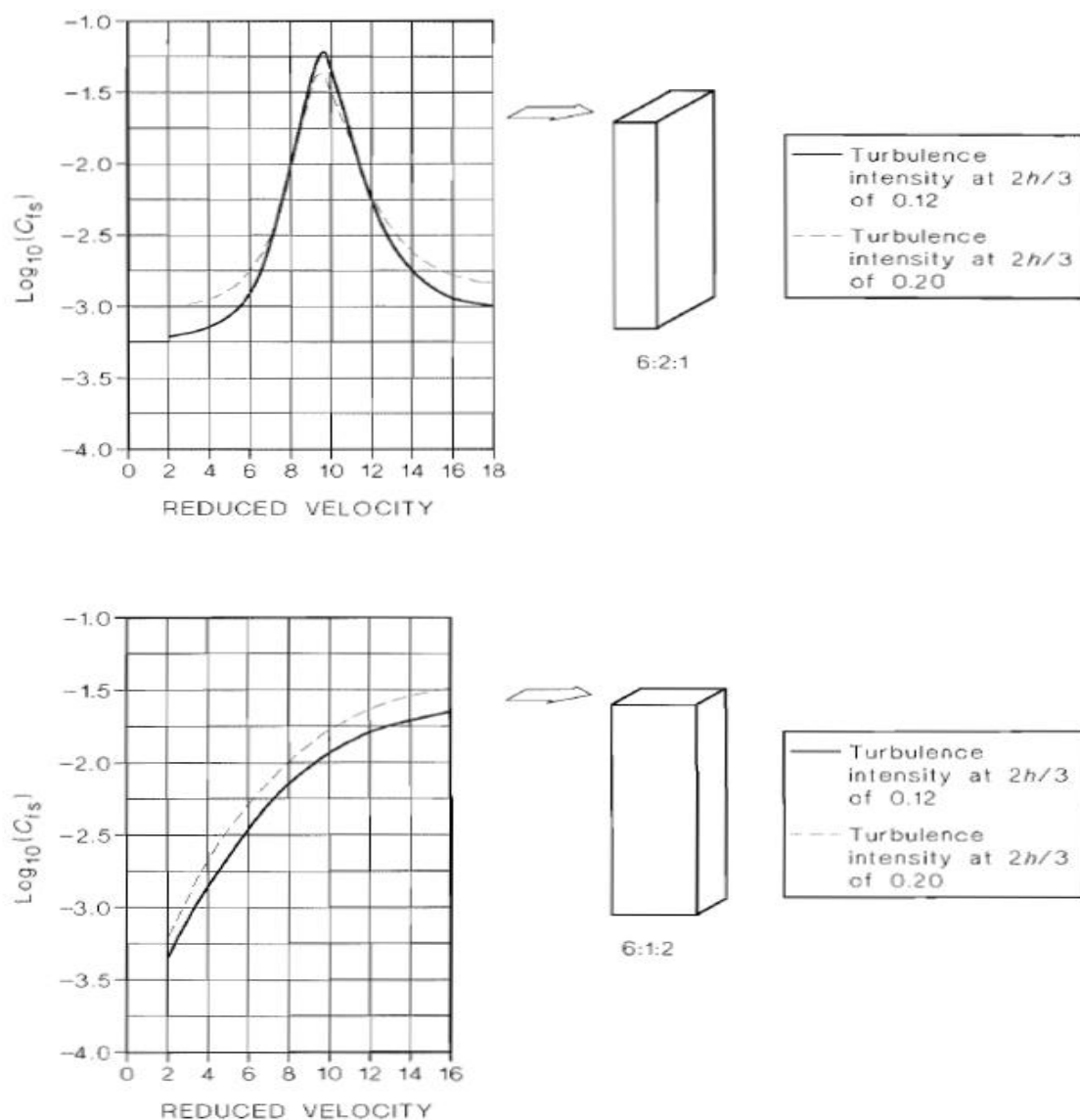


Figura A4.5: (continuação).

ζ : relação do amortecimento da estrutura para o amortecimento crítico da estrutura.

A.5 PROCESSO DA NORMA EUROCODIGO EURO (2010)

A.5.1 Determinação do desvio padrão da aceleração na direção do vento

$$a_{m\acute{a}x} = \sigma_{a,x}(y, z)K_p \quad (\text{A.65})$$

$\sigma_{a,x}(y, z)$: desvio padrão (rms) da aceleração da estrutura;

$$\sigma_{a,x}(y, z) = \frac{c_f \cdot \rho \cdot b \cdot I_v(z_s) \cdot v_m^2(z_s)}{m_{1,x}} \cdot R \cdot K_x \cdot \phi_{1,x}(z) \quad (\text{A.66})$$

c_f : coeficiente de arrasto;

ρ (kg/m^3): massa específica do ar, tida como 1,25;

b (m): largura da estrutura;

$I_v(z_s)$: intensidade da turbulência na altura $z=z_s$ acima do solo;

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_I}{c_o(z) \ln(z/z_0)} \text{ para } z_{mín} \leq z \leq z_{máx}$$

$$I_v(z) = I_v(z_{mín}) \text{ } z \leq z_{mín} \quad (\text{A.67})$$

z (m): altura acima do solo;

$z_{mín}$ (m): altura mínima;

$z_{máx}$ (m): altura máxima, tida como 200;

σ_v : desvio padrão da turbulência;

$$\sigma_v = k_r v_b k_I \quad (\text{A.68})$$

k_r : fator de terreno;

$$k_r = 0,19 \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} \quad (\text{A.69})$$

z_0 (m): comprimento de rugosidade;

$z_{0,II}$ (m): comprimento de rugosidade (categoria de terreno II);

Quadro A5.1: Categorias e parâmetros de terreno.

Terrain category	z_0 m	z_{min} m
0 Sea or coastal area exposed to the open sea	0,003	1
I Lakes or flat and horizontal area with negligible vegetation and without obstacles	0,01	1
II Area with low vegetation such as grass and isolated obstacles (trees, buildings) with separations of at least 20 obstacle heights	0,05	2
III Area with regular cover of vegetation or buildings or with isolated obstacles with separations of maximum 20 obstacle heights (such as villages, suburban terrain, permanent forest)	0,3	5
IV Area in which at least 15 % of the surface is covered with buildings and their average height exceeds 15 m	1,0	10
The terrain categories are illustrated in Annex A.1.		

(fonte: EUROCODIGO, 2010)

v_b (m/s): velocidade básica do vento;

$$v_b = C_{dir} C_{season} v_{b,0} \quad (A.70)$$

C_{dir} : coeficiente de direção, tido como 1,0;

C_{season} : coeficiente de estação, tido como 1,0;

$v_{b,0}$ (m/s): velocidade básica de referência do vento para 50 anos de recorrência, 10 minutos de tempo de medição, independente da direção do vento e da época do ano, a uma altura de 10 metros acima do nível de solo em terreno aberto com vegetação rasteira, correspondente a Categoria II;

k_T : fator de turbulência, tido como 1,0;

z_s (m): altura de referência para a determinação do fator estrutural;

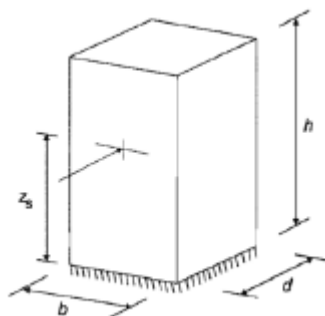


Figura A5.1: Alturas referenciais (fonte: EUROCODIGO, 2010).

$v_m(z_s)$ (m/s): velocidade média do vento para $z=z_s$;

$$v_m = c_r(z)c_o(z)v_b \quad (\text{A.71})$$

$$c_r(z) = k_r \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \text{ para } z_{\text{mín}} \leq z \leq z_{\text{máx}}$$

$$c_r(z) = c_r(z_{\text{mín}}) \text{ para } z \leq z_{\text{mín}} \quad (\text{A.72})$$

$c_o(z)$: fator orográfico, tido como 1,0;

R : raiz quadrada do coeficiente da resposta ressonante;

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2\delta} S_L(z_s, \eta_1) R_h(\eta_h) R_b(\eta_b) \quad (\text{A.73})$$

δ : decremento logarítmico total de amortecimento;

$$\delta = \delta_s + \delta_a + \delta_d \quad (\text{A.74})$$

δ_s : decremento logarítmico de amortecimento estrutural;

Quadro A5.2: Decremento logarítmico de amortecimento estrutural.

Structural type	structural damping, δ_s	
reinforced concrete buildings	0,10	
steel buildings	0,05	
mixed structures concrete + steel	0,08	
reinforced concrete towers and chimneys	0,03	
unlined welded steel stacks without external thermal insulation	0,012	
unlined welded steel stack with external thermal insulation	0,020	
steel stack with one liner with external thermal insulation ^a	$h/b < 18$	0,020
	$20 \leq h/b < 24$	0,040
	$h/b \geq 26$	0,014
steel stack with two or more liners with external thermal insulation ^a	$h/b < 18$	0,020
	$20 \leq h/b < 24$	0,040
	$h/b \geq 26$	0,025
steel stack with internal brick liner	0,070	
steel stack with internal gunite	0,030	
coupled stacks without liner	0,015	
guyed steel stack without liner	0,04	
steel bridges + lattice steel towers	welded	0,02
	high resistance bolts	0,03
	ordinary bolts	0,05
composite bridges	0,04	
concrete bridges	prestressed without cracks	0,04
	with cracks	0,10
Timber bridges	0,06 - 0,12	
Bridges, aluminium alloys	0,02	
Bridges, glass or fibre reinforced plastic	0,04 - 0,08	
cables	parallel cables	0,006
	spiral cables	0,020
NOTE 1 The values for timber and plastic composites are indicative only. In cases where aerodynamic effects are found to be significant in the design, more refined figures are needed through specialist advice (agreed if appropriate with the competent Authority).		
NOTE 2 For cable supported bridges the values given in Table F.2 need to be factored by 0,75		
^a For intermediate values of h/b , linear interpolation may be used		

(fonte: EUROCODIGO, 2010)

δ_a : decremento logarítmico de amortecimento aerodinâmico para o modo fundamental;

$$\delta_a = \frac{c_f \rho v_m(z_s)}{2\eta_1 \mu_e} \quad (\text{A.75})$$

η_1 (Hz): frequência fundamental da estrutura;

μ_e (kg/m²): massa equivalente por unidade de área da estrutura;

δ_d : decremento logarítmico de amortecimento devido a dispositivos especiais onde se tais dispositivos especiais dissipativos forem adicionados à estrutura, δ_d deve ser calculado por técnicas adequadas de teóricas ou experimentais;

$S_L(z_s, \eta_1)$: função de densidade espectral de potência adimensional;

$$S_L(z_s, \eta_1) = \frac{6,8f_L(z_s, \eta_1)}{[1 + 10,2f_L(z_s, \eta_1)]^{5/3}} \quad (\text{A.76})$$

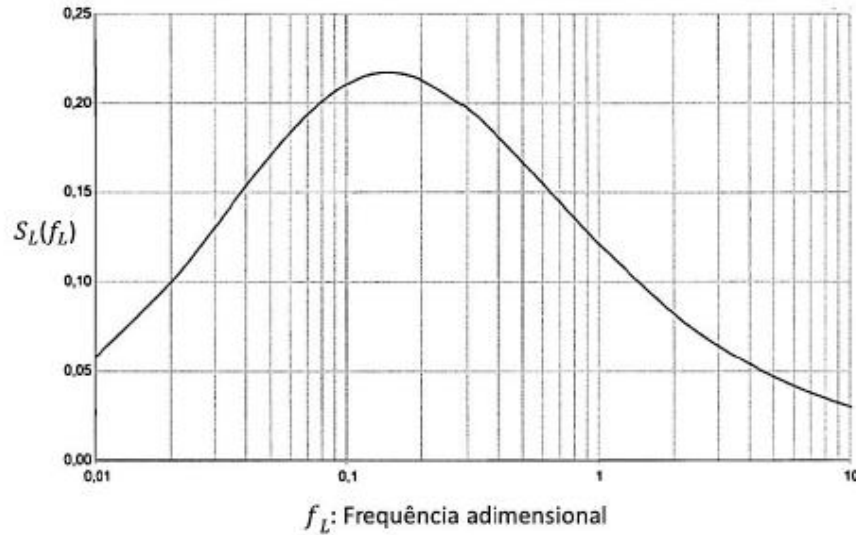


Figura A5.2: Função de densidade espectral de potência adimensional S_L (fonte: EUROCODIGO, 2010).

$f_L(z_s, \eta_1)$: frequência adimensional;

$$f_L(z_s, \eta_1) = \frac{\eta_1 L(z_s)}{v_m(z_s)} \quad (\text{A.77})$$

L_z (m): escala de turbulência, para alturas inferiores ou iguais a 200 metros;

$$L_{(z)} = \begin{cases} L_t \left(\frac{z}{z_t} \right)^\alpha & \text{para } z \geq z_{\text{mín}} \\ L(z_{\text{mín}}) & \text{para } z < z_{\text{mín}} \end{cases}$$

$$\text{Sendo } \begin{cases} L_t(m) = 300 \\ z_t(m) = 200 \end{cases} \quad (\text{A.78})$$

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

$R_h(\eta_h)$: função de admitância aerodinâmica;

$$R_h = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2\eta_h^2} (1 - e^{-2\eta_h})$$

$$\text{Sendo } \eta_h = \frac{4,6h}{L(z_s)} f_L(z_s, \eta_1) \quad (\text{A.79})$$

$$\text{Para } \eta_h = 0, R_h = 1$$

$R_b(\eta_b)$: função de admitância aerodinâmica;

$$R_b = \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2\eta_b^2} (1 - e^{-2\eta_b})$$

$$\text{Sendo } \eta_b = \frac{4,6b}{L(z_s)} f_L(z_s, \eta_1) \quad (\text{A.80})$$

K_x : coeficiente adimensional;

$$K_x = \frac{(2, \zeta + 1) \cdot \left\{ (\zeta + 1) \cdot \left[\ln \left(\frac{z_s}{z_0} \right) + 0,5 \right] - 1 \right\}}{(\zeta + 1)^2 \cdot \ln \left(\frac{z_s}{z_0} \right)} \quad (\text{A.81})$$

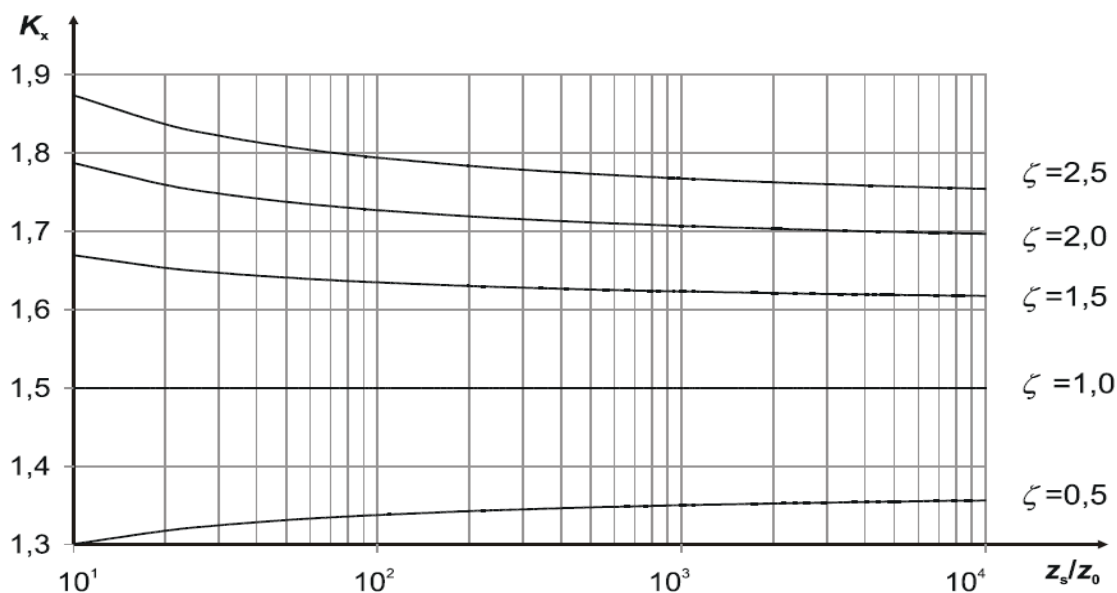


Figura A5.3: Coeficiente adimensional K_x (fonte: EUROCODIGO, 2010).

ζ : expoente de modo de vibração;

$\zeta = 0,6$	for slender frame structures with non load-sharing walling or cladding
$\zeta = 1,0$	for buildings with a central core plus peripheral columns or larger columns plus shear bracings
$\zeta = 1,5$	for slender cantilever buildings and buildings supported by central reinforced concrete cores
$\zeta = 2,0$	for towers and chimneys
$\zeta = 2,5$	for lattice steel towers

Figura A5.4: Expoente de modo de vibração ζ (fonte: EUROCODIGO, 2010).

$m_{1,x}$ (kg/m): massa fundamental equivalente na direção do vento;

$\phi_{1,x}(z)$: forma modal fundamental para o primeiro modo de vibração na direção do vento;

K_p : fator de pico;

$$K_p = \sqrt{2 \ln(vT)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 \ln(vT)}} = \sqrt{2 \ln(600v)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 \ln(vT)}} \quad (\text{A.82})$$

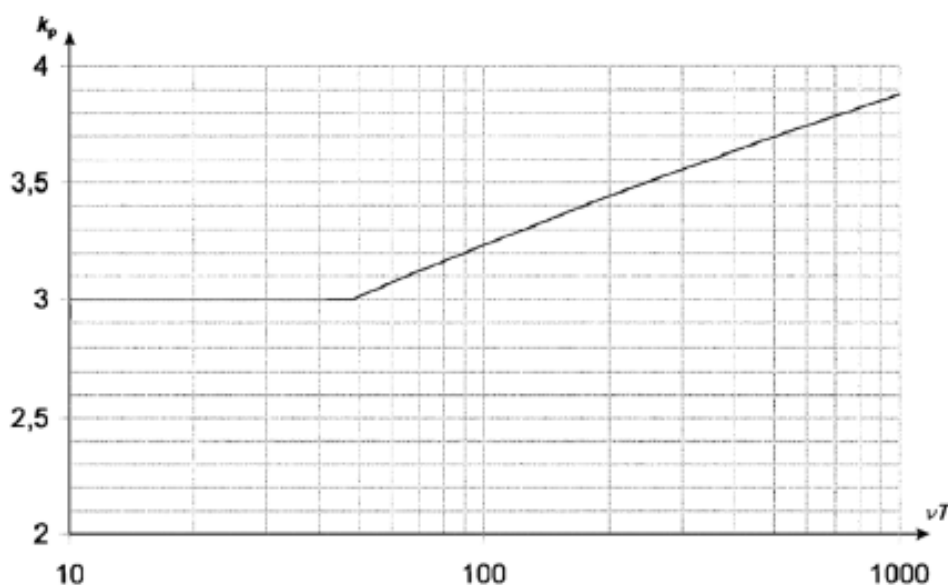


Figura A5.5: Fator de pico K_p (fonte: EUROCODIGO, 2010).

ν : frequência de passagens ascendentes, também chamada de frequência esperada;

$$v = \eta_1 \sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}} \quad (\text{A.83})$$

B^2 : resposta quase-estática, em termos de segurança, é conservativo utilizar $B^2 = 1,0$;

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0,9 \left[\frac{(b+h)}{L(z_s)} \right]^{0,63}} \quad (\text{A.84})$$

$T(s)$: duração de integração da velocidade média do vento, tida como 600;

A.6 PROCESSO DA NORMA CANADENSE NBCC (2010)

A.6.1 Determinação da máxima aceleração na direção do vento

$$a_D = 4\pi^2 f_{nD}^2 g_p \sqrt{\frac{KsF}{C_{eH}\beta_D} \frac{\Delta}{C_g}} \quad (\text{A.85})$$

a_D (m/s^2): aceleração de pico na direção do vento;

f_{nD} (Hz): frequência natural fundamental na direção do vento;

g_p : fator de pico estatístico para o efeito de carga;

$$g_p = \sqrt{2 \ln(vT)} + \frac{0,5772}{\sqrt{2 \ln(vT)}} \quad (\text{A.86})$$

$T(s)$: tempo, tido como $3600=1\text{h}$;

v (ciclos/s): taxa de variação média;

$$v = f_{nD} \sqrt{\frac{sF}{sF + \beta_D B}} \quad (\text{A.87})$$

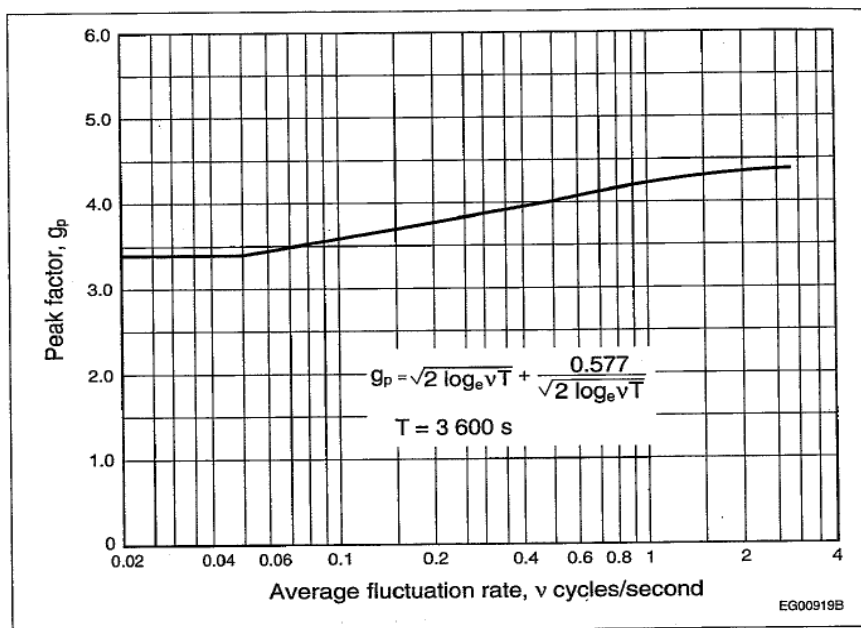


Figura A6.1: Fator de pico estatístico para o efeito de carga g_p (fonte: NBCC, 2010).

s : fator de redução do tamanho;

$$s = \frac{\pi}{3} \left[\frac{1}{1 + \frac{8f_n D H}{3V_H}} \right] \left[\frac{1}{1 + \frac{10f_n D W}{V_H}} \right] \quad (\text{A.88})$$

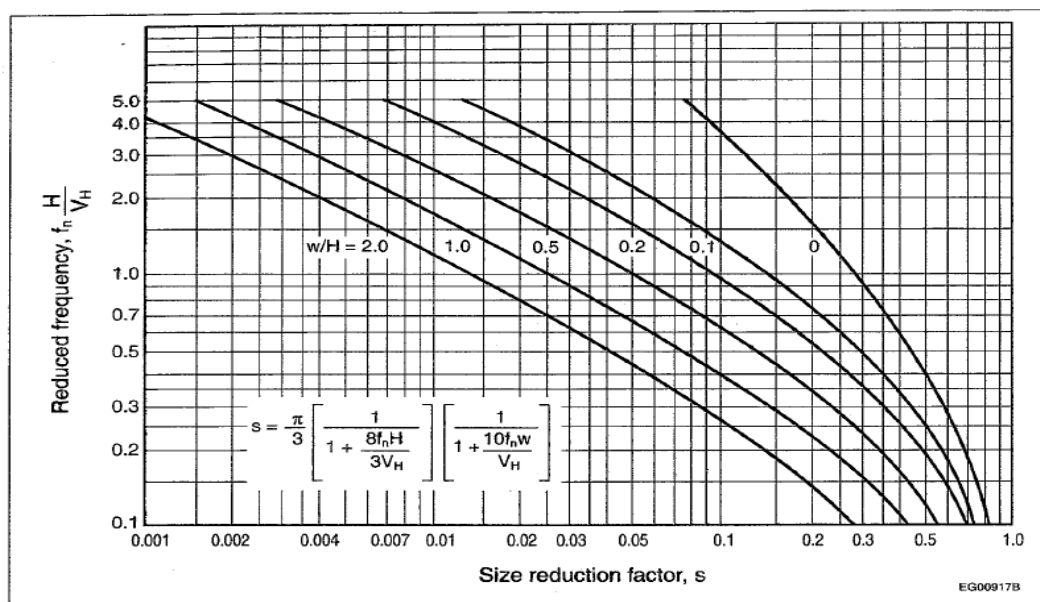


Figura A6.2: Fator de redução do tamanho s (fonte: NBCC, 2010).

H (m): altura da edificação;

W (m): largura da edificação;

V_H (m/s): velocidade média no topo da estrutura H;

$$V_H = \bar{V} \sqrt{C_{eH}} \quad (\text{A.89})$$

\bar{V} (m/s): velocidade de referência, média de uma hora, para 10 metros de altura em terreno aberto (categoria A). Estes dados são referidos em apêndice da referida Norma para 679 lugares e para dois períodos de recorrência, 10 e 50 anos;

$$\bar{V} = 39,2 \sqrt{q} \quad (\text{A.90})$$

q (kPa): pressão dinâmica;

$$q = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (\text{A.91})$$

V (m/s): velocidade básica do vento;

ρ (kg/m³): massa específica média do ar, tida como 1,2929;

C_{eH} : fator de exposição baseado no perfil de velocidade para a altura H;

H (m): altura da edificação H=h;

$$\text{frequencia reduzida} = f_{nD} \frac{H}{V_H} \quad (\text{A.93})$$

F: relação de rajada de energia na frequência natural da estrutura;

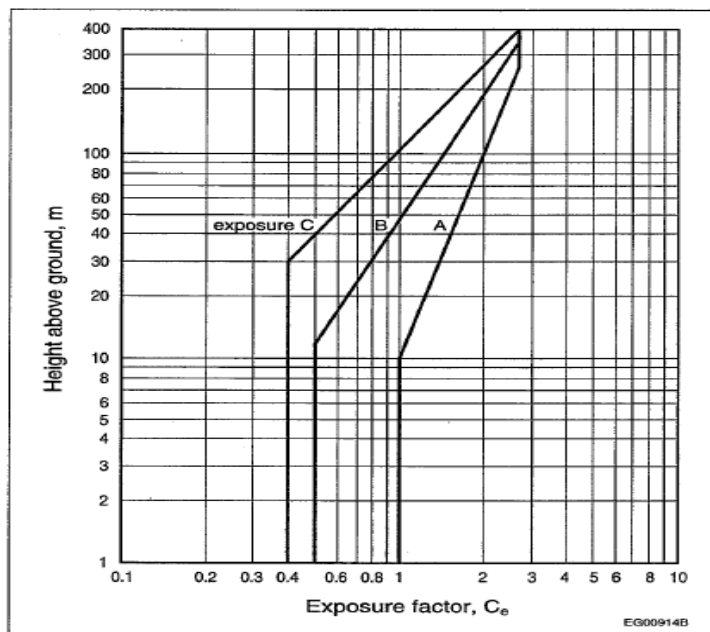


Figura A6.3: Fator de exposição C_{eH} baseado no perfil de velocidade para a altura H (fonte: NBCC, 2010).

$$C_{eH} = \left(\frac{h}{10}\right)^{0,28} \quad \text{para } 1,0 \leq C_{eH} \leq 2,5 \quad \therefore \text{Exposição A}$$

$$C_{eH} = 0,5 \left(\frac{h}{12,7}\right)^{0,50} \quad \text{para } 0,5 \leq C_{eH} \leq 2,5 \quad \therefore \text{Exposição B}$$

(A.92)

$$C_{eH} = 0,4 \left(\frac{h}{30}\right)^{0,72} \quad \text{para } 0,4 \leq C_{eH} \leq 2,5 \quad \therefore \text{Exposição C}$$

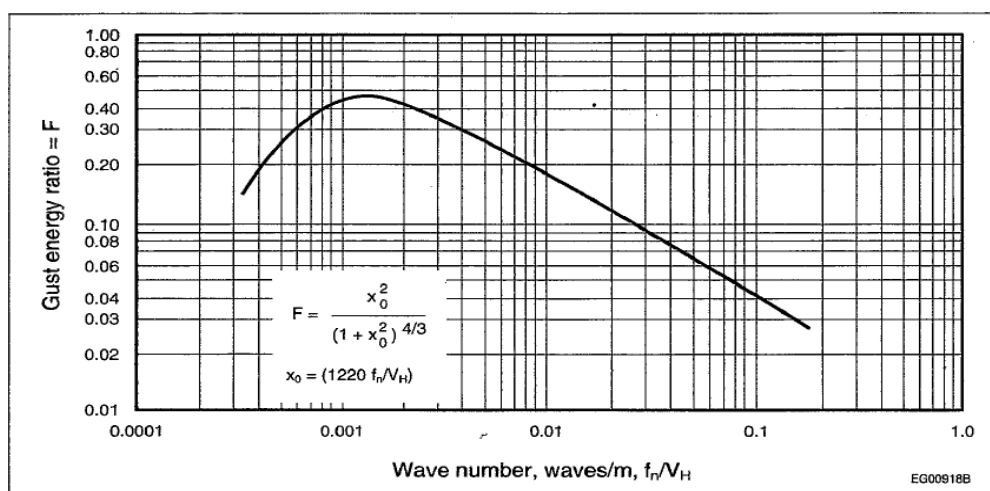


Figura A6.4: Relação de rajada de energia F na frequência natural da estrutura (fonte: NBCC, 2010).

$$F = \frac{x_0^2}{(1 + x_0^2)^{4/3}}$$

$$x_0 = \left(1220 \frac{f_{nD}}{V_H}\right) \quad (\text{A.94})$$

β_D : fração do amortecimento crítico na direção do vento;

B: fator para a parcela de fundo em função da geometria da estrutura;

C_g : fator de efeito de rajada;

$$C_g = 1 + g_p \left(\frac{\sigma}{\mu}\right)$$

$$\frac{\sigma}{\mu} = \sqrt{\frac{K}{C_{eH}} \left(B + \frac{sF}{\beta}\right)} \quad (\text{A.95})$$

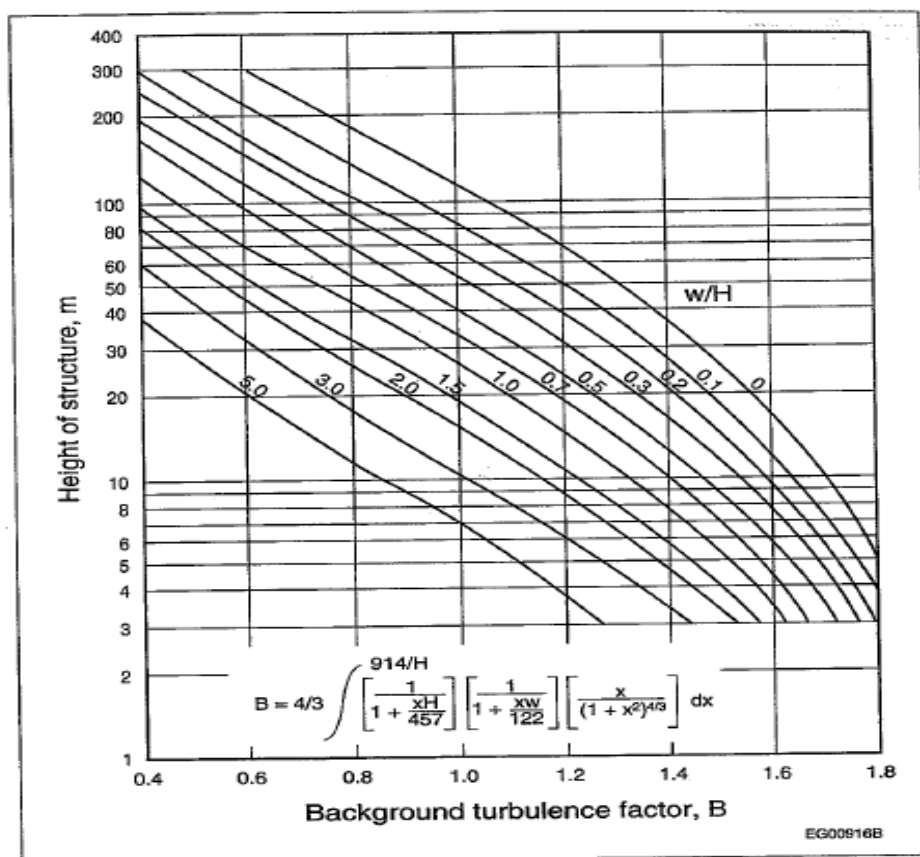


Figura A6.5: Fator para a parcela de fundo B em função da geometria da estrutura (fonte: NBCC, 2010).

K: fator relacionado com o coeficiente de rugosidade da superfície do terreno;

= 0,08 para a exposição A;

= 0,10 para a exposição B;

= 0,14 para a exposição C;

Δ (m): deflexão máxima lateral induzida pelo vento no topo do edifício na direção do vento.

A.6.2 Determinação da máxima aceleração na direção transversal do vento

$$a_w = f_{nW}^2 g_p \sqrt{wd} \left(\frac{a_r}{\rho_B g \sqrt{\beta_w}} \right) \quad (\text{A.96})$$

a_w , (m/s²): aceleração de pico na direção transversal do vento;

f_{nW} (Hz): frequência natural fundamental na direção transversal do vento;

g_p : fator de pico estatístico para o efeito de carga;

w (m): largura efetiva do edifício para a direção transversal do vento;

d (m): profundidade efetiva do edifício para a direção transversal do vento;

$$a_r (\text{N/m}^3) = 78,5 \times 10^{-3} [V_H / (f_{nW} \sqrt{wd})]^{3,3} \quad (\text{A.97})$$

V_H (m/s): velocidade média no topo da estrutura H;

ρ_B (kg/m³): massa específica média do edifício;

g (m/s²): aceleração devido a gravidade, tida como 9,81;

β_w : fração do amortecimento crítico na direção transversal do vento.