



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



ISABELLA DUARTE RODRIGUES DA CUNHA

**ANÁLISE DA RESPOSTA LONGITUDINAL DE EDIFÍCIO
ALTO SOB AÇÃO DO VENTO**

Uberlândia, 2024

ISABELLA DUARTE RODRIGUES DA CUNHA

**ANÁLISE DA RESPOSTA LONGITUDINAL DE EDIFÍCIO
ALTO PADRONIZADO SOB AÇÃO DO VENTO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Estruturas, Construção Civil e Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. Gregório Sandro Vieira
Co-Orientador: Prof. Dr. Thiarly Feitosa Afonso de Lavôr

Uberlândia, 2024

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

C972 Cunha, Isabella Duarte Rodrigues da, 1998-
2024 ANÁLISE DA RESPOSTA LONGITUDINAL DE EDIFÍCIO ALTO SOB
AÇÃO DO VENTO [recurso eletrônico] / Isabella Duarte
Rodrigues da Cunha. - 2024.

Orientador: Gregório Sandro Vieira.

Coorientador: Thiarly Feitosa Afonso de Lavôr.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de
Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Civil.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2024.100>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia civil. I. Vieira, Gregório Sandro, 1981-
, (Orient.). II. Lavôr, Thiarly Feitosa Afonso de,
1991-, (Coorient.). III. Universidade Federal de
Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Civil. IV.
Título.

CDU: 624

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Civil				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 299, PPGEC				
Data:	02 de fevereiro de 2024	Hora de início:	9:08 h	Hora de encerramento:	11:31 h
Matrícula do Discente:	12212ECV003				
Nome do Discente:	Isabella Duarte Rodrigues da Cunha				
Título do Trabalho:	Análise da resposta longitudinal de edifício alto sob ação do vento				
Área de concentração:	Estruturas, Construção Civil e Geotecnia				
Linha de pesquisa:	Estruturas				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Ação do vento em edificações				

Reuniu-se, em <https://conferenciaweb.rnp.br/ufu/defesa-mestrado-isabella>, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, assim composta pelos Professores Doutores: José Luis Vital de Brito - UnB, Eduardo Vicente Wolf Trentin - UFU e Gregório Sandro Vieira, orientador da candidata.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Gregório Sandro Vieira, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu à discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovada

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestra.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Gregorio Sandro Vieira, Presidente**, em 02/02/2024, às 11:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Vicente Wolf Trentini, Professor(a) do Magistério Superior**, em 02/02/2024, às 11:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Luís Vital de Brito, Usuário Externo**, em 02/02/2024, às 23:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5092134** e o código CRC **A81576E1**.

Referência: Processo nº 23117.002040/2024-60

SEI nº 5092134

*Dedico este trabalho a meus pais Maria das Graças e Romeu.
E a todos que me apoiaram ao longo da elaboração desse trabalho.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade de trilhar o caminho até aqui.

Aos meus pais por todo apoio e suporte essencial.

A Universidade Federal de Uberlândia, em especial ao Departamento de Engenharia Civil.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Professor Gregório Sandro Vieira pela orientação e apoio ao longo de todo o trabalho.

Ao Professor Thiarly Feitosa Afonso de Lavôr pela co-orientação e todos os ensinamentos.

Aos demais professores do Departamento de Engenharia Civil pelos ensinamentos e disciplinas ministradas.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Civil pela dedicação e seriedade constantes.

Enfim, minha gratidão a todos aqueles que de alguma forma me apoiaram e auxiliaram na concretização deste trabalho.

RESUMO

O atual cenário das construções traz edificações cada vez mais esbeltas, realizando a verticalização das grandes cidades com intuito de melhor aproveitamento dos espaços. Com esse avanço, se tem maiores complexidades na análise estrutural das construções, dentre todas as ações as quais elas possam estar sujeitas, tem-se a consideração das forças e efeitos do vento, ação essa que exige estudos estáticos e dinâmicos. O presente trabalho teve como objetivo a análise da resposta longitudinal de um edifício alto sob ação do vento. Foi analisado o vento atuando nas duas incidências principais, 0° e 90° . Para tal análise foi feito uso de esforços já anteriormente obtidos, a partir de ensaios realizados em um modelo reduzido do edifício padrão do *Commonwealth Advisory Aeronautical Council* (CAARC) em túnel de vento, por Vieira (2016), sendo analisados através de rotina computacional, juntamente com os conceitos e aplicações do Método de Integração de Pressões em Alta Frequência (HFPI - *High Frequency Pressure Integration*). Os resultados obtidos foram comparados com métodos teóricos consagrados, como o método de Davenport, e com indicações normativas, como as propostas pela norma brasileira. Os resultados mostraram que a norma brasileira, mesmo com mudanças em seu procedimento de cálculo continua abaixo dos resultados em túnel de vento, e para o edifício com vizinhança a resposta transversal foi mais significativa que a longitudinal.

Palavras-chave: Resposta longitudinal – Análise dinâmica – Vento – HFPI – CAARC

ABSTRACT

The current construction scenario brings increasingly slender buildings, creating the verticalization of large cities in order to make better use of space. With this advancement, there are greater complexities in the structural analysis of buildings, among all the actions to which they may be subject, there is the consideration of the forces and effects of the wind, an action that requires static and dynamic studies. The present work aimed to analyze the longitudinal response of a tall building under wind action. The wind acting at the two main incidences, 0° and 90° , was analyzed. For this analysis, efforts were previously obtained, based on tests carried out in a reduced model of the standard building of the Commonwealth Advisory Aeronautical Council (CAARC) in a wind tunnel, by Vieira (2016), being analyzed through a computational routine, together with the concepts and applications of the High Frequency Pressure Integration Method (HFPI). The results obtained were compared with established theoretical methods, such as the Davenport method, and with normative indications, such as those proposed by the Brazilian standard. The results showed that the Brazilian standard, even with changes in its calculation procedure, remains below the results in the wind tunnel, and for the neighboring building the transverse response was more significant than the longitudinal one.

Keywords: Longitudinal response – Dynamic analysis – Wind – HFPI – CAARC

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-	Resumo do trabalho desenvolvido.....	19
Figura 2-	Esquema para modelo dinâmico discreto.....	26
Figura 3-	Modelo de tomadas de pressões do CAARC Standard Tall Building.....	29
Figura 4-	Linhas de influência em edifícios altos.....	34
Figura 5-	Intensidade da turbulência longitudinal para três terrenos típicos.....	35
Figura 6-	Processo probabilístico de Davenport.....	37
Figura 7-	Dimensões do edifício analisado.....	41
Figura 8-	Edifício padronizado alto a ser analisado.....	47
Figura 9-	Circuito aerodinâmico do Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann (Medidas em cm)	49
Figura 10-	Características do vento deslizante e turbulento simulado com expoente $p = 0,23$	50
Figura 11-	Blocos de piso utilizados para simulação da rugosidade do terreno durante os ensaios.....	50
Figura 12-	Grelhas utilizadas para simulação do perfil do vento durante os ensaios...51	
Figura 13-	Distância vertical dos pontos de tomada de pressão.....	51
Figura 14-	Distância em nível dos pontos de tomada de pressão.....	52
Figura 15-	Distâncias adotadas para o posicionamento da vizinhança no ensaio de túnel de vento.....	52
Figura 16-	Vizinhança V1 em planta e em perspectiva.....	53
Figura 17-	Vizinhança V2 em planta e em perspectiva.....	53
Figura 18-	Vizinhança V3 em planta e em perspectiva.....	53
Figura 19-	Propriedades do CAARC.....	57
Figura 20-	Deslocamento flutuante, médio e desvio padrão, para as direções X e Y para vento a 0°	59
Figura 21-	Deslocamento horizontal normalizado, médio e desvio padrão, transversal para vento a 90°	60
Figura 22-	Desvio padrão do deslocamento horizontal normalizado transversal para vento a 90°	61
Figura 23-	Esforços longitudinais com vento a 0°	66
Figura 24-	Esforços longitudinais com vento a 90°	67

Figura 25-	Fator de vizinhança com vento a 0°	69
Figura 26-	Fator de vizinhança com vento a 90°	70
Figura 27-	Fator de vizinhança com vento a 0° em relação as distâncias.....	72
Figura 28-	Fator de vizinhança com vento a 90° em relação as distâncias.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-	Parâmetros para a determinação de efeitos dinâmicos.....	24
Tabela 2-	Expoente p e parâmetro b.....	25
Tabela 3-	Procedimento de cálculo do deslocamento de topo pela norma brasileira de vento.....	63
Tabela A.1-	Fator de vizinhança médio na direção X para vento a 0° em V1.....	79
Tabela A.2-	Fator de vizinhança RMS na direção X para vento a 0° em V1.....	79
Tabela A.3-	Fator de vizinhança médio na direção Y para vento a 0° em V1.....	80
Tabela A.4-	Fator de vizinhança RMS na direção Y para vento a 0° em V1.....	80
Tabela A.5-	Fator de vizinhança médio na direção X para vento a 90° em V1.....	81
Tabela A.6-	Fator de vizinhança RMS na direção X para vento a 90° em V1.....	81
Tabela A.7-	Fator de vizinhança médio na direção Y para vento a 90° em V1.....	83
Tabela A.8-	Fator de vizinhança RMS na direção Y para vento a 90° em V1.....	83
Tabela A.9-	Fator de vizinhança médio na direção X para vento a 0° em V2.....	84
Tabela A.10-	Fator de vizinhança RMS na direção X para vento a 0° em V2.....	84
Tabela A.11-	Fator de vizinhança médio na direção Y para vento a 0° em V2.....	85
Tabela A.12-	Fator de vizinhança RMS na direção Y para vento a 0° em V2.....	85
Tabela A.13-	Fator de vizinhança médio na direção X para vento a 90° em V2.....	86
Tabela A.14-	Fator de vizinhança RMS na direção X para vento a 90° em V2.....	87
Tabela A.15-	Fator de vizinhança médio na direção Y para vento a 90° em V2.....	88
Tabela A.16-	Fator de vizinhança RMS na direção Y para vento a 90° em V2.....	88
Tabela A.17-	Fator de vizinhança médio na direção X para vento a 0° em V3.....	89
Tabela A.18-	Fator de vizinhança RMS na direção X para vento a 0° em V3.....	89
Tabela A.19-	Fator de vizinhança médio na direção Y para vento a 0° em V3.....	90
Tabela A.20-	Fator de vizinhança RMS na direção Y para vento a 0° em V3.....	90
Tabela A.21-	Fator de vizinhança médio na direção X para vento a 90° em V3.....	92
Tabela A.22-	Fator de vizinhança RMS na direção X para vento a 90° em V3.....	92
Tabela A.23-	Fator de vizinhança médio na direção Y para vento a 90° em V3.....	93
Tabela A.24-	Fator de vizinhança RMS na direção Y para vento a 90° em V3.....	93

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos do Alfabeto Grego

α	- Parâmetro do Eurocode
α_l	- Amplitude-limite normalizada
γ	- Parâmetro de efeito dinâmico
Δ	- Deslocamento no topo do edifício
ζ_{aer}	- Coeficiente de amortecimento aerodinâmico da edificação
ζ_{est}	- Coeficiente de amortecimento estrutural da edificação
μ_1	- Modo de vibração correspondente a primeira frequência
ν	- Frequência efetiva da resposta, frequência de passagens ascendentes
ξ	- Coeficiente de amplificação dinâmica
ρ	- Massa específica da edificação
ρ_{ar}	- Massa específica do ar
σ_u	- Desvio padrão das flutuações da velocidade
σ_y	- Desvio-padrão do deslocamento no topo da estrutura
ς	- Razão de amortecimento crítico
$\phi(z)$	- Índice de área exposta
$\phi_D(z)$	- Variação da largura do edifício
$\phi_U^2(z)$	- Perfil de velocidade do vento

Símbolos do Alfabeto Latino

a	- Lado maior da base do modelo ensaiado
A_b	- Soma das áreas frontais efetivas dos modelos (“área de sombra”)
A_i	- Área de influência correspondente à coordenada i
A_t	- Área da seção de teste do túnel de vento
A_0	- Área arbitrária de referência
b	- Lado menor da base do modelo ensaiado
B^2	- Coeficiente de resposta quase-estática
c	- Altura do modelo ensaiado
c_f	- Coeficiente de força (arrasto)
c_r	- Coeficiente de rugosidade
$c_s c_d$	- Coeficiente estrutural

C	- Matriz de amortecimento ou Coeficiente de decaimento ou coeficiente aerodinâmico
C_{ai}	- Coeficiente de arrasto
d^*	- Menor das duas dimensões, menor lado da edificação em planta ou sua semidiagonal
d_0	- Diâmetro da seção circular ou maior dimensão da base do edifício analisado
D_H	- Largura do edifício
f	- Frequência de vibração em torno do eixo considerado
f_j	- Frequência natural
$f_j S_{GF_j}(f_j)$	- Espectro de força generalizado dos j modos μ_j , associados às frequências naturais f_j da estrutura
f_l	- Frequência fundamental
$F(t)$	- Força resultante no tempo t
$F_i(t)$	- Vetor de forças instantâneas na tomada i
F_w	- Força exercida pelo vento
$F_x(t)$	- Força resultante instantânea no eixo x
$F_y(t)$	- Força resultante instantânea no eixo y
$\vec{F}(t)$	- Vetor de forças externas em função do tempo.
FV	- Fator de vizinhança
g	- Fator de pico
G	- Fator de rajada
H	- Altura do elemento/estrutura
$i_r(z)$	- Linhas de influência
I_m	- Momento de inércia de massa do modelo acoplado à base
I_{mx}	- Momento de inércia de massa em relação ao eixo x
I_{my}	- Momento de inércia de massa em relação ao eixo y
$I_u(z)$	- Intensidade da turbulência
k_p	- Fator de pico
k_r	- Coeficiente de terreno
k_θ	- Rigidez rotacional em torno do eixo considerado

K	- Matriz de rigidez ou parâmetro que relaciona os amortecimentos estrutural e aerodinâmico
K_{a0}	- Parâmetro de amortecimento aerodinâmico
l_l	- Largura ou diâmetro da edificação
L	- Constante de comprimento, escala de turbulência
L_i	- Distância ortogonal do eixo de atuação da pressão na i -ésima tomada à origem do sistema de referência (centro de rigidez)
$L_u(z)$	- Escala de turbulência longitudinal do vento
m	- Massa total do modelo
m_i	- Massa discreta correspondente à coordenada i
m_m	- Valor médio da massa por unidade de comprimento do terço superior da estrutura
m_0	- Massa arbitrária de referência
M	- Matriz de massa
n	- Número de graus de liberdade
n_b	- Parâmetro Eurocode
n_h	- Parâmetro Eurocode
p	- Expoente de rugosidade do terreno
$p_{e,i}(t)$	- Série temporal das pressões medidas
$\vec{p}(t)$	- Série temporal das pressões medidas
$\vec{p}_i(t)$	- Pressão medida na i -ésima tomada no tempo t
q	- Pressão dinâmica
q_b	- Pressão dinâmica corrigida pelo bloqueio
q_H	- Pressão dinâmica na altura H
q_p	- Pressão de pico
\bar{q}_0	- Pressão dinâmica de projeto
\bar{r}	- Resposta média
\hat{r}	- Resposta total
\tilde{r}	- Resposta flutuante
\tilde{r}_B	- Resposta não ressonante
\tilde{r}_R	- Resposta ressonante
R^2	- Coeficiente de resposta em ressonância
R_b	- Função de admitância aerodinâmica

R_h	- Função de admitância aerodinâmica
s	- Afastamento entre os planos das faces confrontantes de duas edificações altas vizinhas
S	- Zona que se deseja ter a força resultante $F(t)$
S_L	- Função de densidade espectral de potência adimensional
T	- Intervalo de tempo
T_1	- Período fundamental
u_i	- Vetor normal unitário
$\vec{u}(t)$	- Deslocamento em função do tempo
\vec{u}_F	- Cossenos diretores na direção que se deseja ter a força resultante $F(t)$
$\dot{\vec{u}}(t)$	- Velocidade em função do tempo
$\ddot{\vec{u}}(t)$	- Aceleração em função do tempo
U_H	- Vento médio
\bar{U}_r	- Velocidade média numa altura de referência z_r
v_b	- Valor de referência da velocidade do vento
v_m	- Velocidade média
V_0	- Velocidade básica
\bar{V}	- Velocidade média
\bar{V}_p	- Velocidade de projeto
x	- Primeiro modo de vibração
x_i	- Deslocamento correspondente à coordenada i
X_i	- Força total
\bar{X}_i	- Parcela de força média
\hat{X}_i	- Parcela flutuante
\vec{X}_j	- Forma modal correspondente ao modo j
X_L	- Frequência adimensional
\hat{y}	- Resposta de pico da estrutura em termos de deslocamento no topo
z	- Altura analisada
z_g	- Altura gradiente
z_i	- Altura do elemento i sobre o nível do terreno
z_r	- Altura de referência
z_s	- Altura de referência

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BD3GDL-	Balança dinâmica de três graus de liberdade
CAARC-	<i>Commonwealth Advisory Aeronautical Council</i> (Conselho de Pesquisa Aeronáutica)
DVC-	<i>Downburst-induced vibration coefficient</i> (Coeficiente de vibração induzida por downburst (uma forte corrente descendente de ar, geralmente associada a chuva intensa ou tempestade))
EV-	Engenharia do Vento
EVC-	Engenharia do Vento Computacional
FVD-	<i>Fluid viscous damper</i> (Amortecedores de fluido viscoso)
HFPI-	<i>High Frequency Pressure Integration</i> (Integração de Pressões em Alta Frequência)
IF-	<i>Interference factor</i> (Fator de interferência)
PSD-	Densidade espectral de potência
TDM-	<i>Tuned Mass Dampers</i> (Amortecedores de Massa Sintonizados)
UFRGS-	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
V1-	Posicionamento 1 de vizinhança
V2-	Posicionamento 2 de vizinhança
V3-	Posicionamento 3 de vizinhança
WDS-	<i>Wind-induced Damage Simulator</i> (Simulador de Danos Induzidos pelo Vento)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	TEORIAS BÁSICAS DO VENTO	20
2.1	MÉTODO DA NBR 6123:2023 PARA DETERMINAÇÃO DA RESPOSTA LONGITUDINAL	21
2.1.1	<i>Velocidade de projeto (V_p)</i>	22
2.1.2	<i>Método simplificado</i>	23
2.1.3	<i>Método discreto</i>	25
2.2	MÉTODO DA NBR 6123:2023 PARA DETERMINAÇÃO DO FATOR DE VIZINHANÇA	28
2.3	INTEGRAÇÃO DE PRESSÕES EM ALTA FREQUÊNCIA (<i>HIGH FREQUENCY PRESSURE INTEGRATION</i>)	28
2.4	MÉTODO DE DAVENPORT	32
2.5	MÉTODO DA NORMA EUROPEIA (EUROCODE) PARA DETERMINAÇÃO DA RESPOSTA GLOBAL DO VENTO	37
2.5.1	<i>Método Coeficiente Estrutural c_{scd}</i>	38
2.5.1.1	<i>Procedimento 1 para a determinação dos parâmetros para obtenção do coeficiente c_{scd} (Anexo B do Eurocode)</i>	40
2.6	CÁLCULO DE ACELERAÇÕES MÁXIMAS PARA VERIFICAÇÃO DO CONFORTO DE ACORDO COM ABNT NBR 6123:2023	42
2.7	TEORIA DA SEMELHANÇA	42
3	ESTADO DA ARTE	44
3.1	ESTRUTURAS HORIZONTAIS	44
3.2	ESTRUTURAS VERTICAIS	45
4	MÉTODO DA PESQUISA	47
4.1	PROPRIEDADES DO MODELO CAARC	47
4.1.1	<i>Propriedades geométricas</i>	47
4.1.2	<i>Propriedades dinâmicas</i>	48
4.2	ENSAIO NO TÚNEL DE VENTO <i>PROFESSOR JOAQUIM BLESSMANN</i>	49
4.3	PROCEDIMENTOS PARA RESULTADOS ESTÁTICOS	54
4.3.1	<i>Dados brutos</i>	54
4.3.2	<i>Correção das tomadas substituídas</i>	54
4.3.3	<i>Correção das tomadas com defeito</i>	54

4.3.4	<i>Correção de bloqueio</i>	54
4.3.5	<i>Forças resultantes</i>	55
4.4	PROCEDIMENTOS PARA RESULTADOS DINÂMICOS	56
4.4.1	<i>Rotina computacional</i>	56
4.4.2	<i>Parâmetros da rotina</i>	56
4.4.3	<i>Validação da rotina</i>	57
4.4.3.1	<i>Edifício isolado</i>	57
4.4.3.2	<i>Edifício com vizinhança (VI)</i>	57
4.4.4	<i>Cálculo de forças e momentos para o edifício isolado</i>	62
4.4.5	<i>Procedimentos com edifício vizinhos</i>	62
4.4.6	<i>Cálculo do fator de vizinhança pela ABNT NBR 6123:2023</i>	63
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
5.1	EDIFÍCIO ISOLADO	64
5.2	EDIFÍCIO COM VIZINHANÇA	68
6	CONCLUSÃO	74
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
	ANEXO A - FATOR DE VIZINHANÇA	79

1 INTRODUÇÃO

Até meados da década de 1960, as construções apresentavam, em sua maioria, baixa altitude, elevado peso próprio e alta rigidez, características que auxiliavam na resistência à ação do vento (Blessmann et al., 2002). Porém, o cenário de construções atual é marcado por edificações cada vez mais altas e esbeltas, o que naturalmente conduz a análises estruturais cada vez mais complexas dessa forma cresce-se a necessidade de inovações e estudos de otimização do ponto de vista da Engenharia do Vento (EV). Uma análise minuciosa da edificação sob a ação do vento é fundamental, pois é de grande importância a análise e consideração das forças e efeitos do vento nos projetos estruturais de edifícios altos para garantir a segurança estrutural e os requisitos de projeto, principalmente no âmbito das ações dinâmicas, tópico que ainda não é muito abordado na formação de engenheiros civis brasileiros. A ação do vento apresenta variação com o tempo, o que resulta em solicitações dinâmicas, característica que aumenta sua complexidade. Os efeitos dinâmicos são determinados pela energia cinética contribuinte nas flutuações e depende de como essa energia será distribuída por meio de diversas frequências, parâmetro estrutural fundamental quando se trata da análise dinâmica do vento (Blessmann, 2013).

Existem vários fenômenos diferentes devidos ao vento que dão origem à resposta dinâmica de estruturas, estes incluem os fenômenos de martelamento, desprendimento de vórtice, galope e drapejamento. Pela atuação do vento em forma de rajadas, principalmente em edifícios altos, a estrutura responde transversalmente e longitudinalmente a essa ação, ocasionando oscilações em ambas as direções, podendo ocorrer até mesmo esforços de momento/torção uma vez que a incidência do vento se dê de forma excêntrica. Essas respostas das edificações a ação do vento vêm sendo estudadas por acadêmicos, em busca do maior entendimento de como elas interferem na vida útil e segurança das construções.

Um dos pioneiros da análise dinâmica da ação do vento em estruturas foi Alan Davenport, que desde 1961 teve como objetivo formular um modelo matemático que fosse capaz de determinar a resposta de estruturas sob ação de rajadas de vento aleatórias (Davenport, 2015). A partir daí, diversos métodos analíticos foram elaborados e utilizados, usualmente baseados em 3 principais metodologias: a análise estática equivalente, a análise no domínio da frequência e a análise no domínio do tempo. Mesmo com esse avanço, os procedimentos ainda se encontram limitados

por alguns parâmetros, sendo eficazes quando aplicados em estruturas altas, com geometrias regulares e incidências homogêneas do vento. Em casos que se extrapole essas condições, o indicado é realizar ensaios em túnel de vento para melhores resultados (Castro et al., 2015).

Além da Engenharia do Vento (EV) aplicada em técnicas experimentais, como o uso de túnel de vento, tem-se a criação da Engenharia do Vento Computacional (EVC), essa vertente da análise estrutural, desenvolvida nas últimas décadas, foi criada para agregar, facilitando o estudo nessa área. No início da aplicação da EVC os problemas analisados eram simples, devido a capacidade de processamento dos computadores da época. Com o avanço tecnológico foi possível a melhora das simulações numéricas, sendo exequível um maior nível de refinamento e um avanço para modelagens mais complexas.

Baseado no trabalho de Lavôr (2017) e de tantos outros acadêmicos, o presente trabalho busca incrementar os resultados sob aspectos dinâmicos produzidos pela ação do vento em edificações, através da análise da resposta do edifício padronizado alto, ensaiado por Vieira (2016). Pretende-se analisar tal resposta de duas maneiras, para a edificação que é ensaiada isolada, seus resultados serão comparados com procedimentos normativos e teoria de Davenport. Para a edificação com vizinhos, esta será analisada através da simulação computacional com uma análise analítica/numérica. Será analisado o fator de vizinhança, ou seja, a comparação entre os esforços da edificação isolada (sem a presença de vizinhos) e quando a mesma está com a vizinhança, verificando como o edifício principal é atingido pela presença de edifícios em seu entorno, tal estudo uniria a investigação em túnel de vento com a simulação computacional, dessa forma seria mais um incentivo para o uso conjunto de tais ferramentas para que cada vez mais se possa otimizar as estruturas, alcançando resultados ainda mais satisfatórios.

O objetivo desta pesquisa é investigar a obtenção da resposta de um edifício alto padronizado sob ação do vento no intuito de mensurar a resposta por meio dos métodos normativos, numéricos e experimentais. Visa-se a obtenção dos valores de forças e momentos para edifício padronizado em situações isolada e para diferentes posições de vizinhança a obtenção do fator de vizinhança para esses casos.

A justificativa para a realização desse trabalho parte da importância de considerar durante o dimensionamento de qualquer tipo de estrutura todos os esforços a qual a construção estará

presente. A temática ação do vento nas estruturas vem sendo bastante abordada em trabalhos recentes, o presente estudo visa contribuir juntamente com tais trabalhos, trazendo análises do efeito de vizinhança, assim como unindo a análise experimental, com métodos normativos e numéricos. A Figura 1, a seguir, indica o fluxograma de desenvolvimento do trabalho, ressaltando os procedimentos seguidos e qual o objetivo do mesmo.

FIGURA 1 – Fluxograma do trabalho desenvolvido



Este trabalho é constituído de cinco capítulos, no Capítulo 1 encontra-se uma introdução ao tema da pesquisa, indicando os objetivos a serem alcançados e a metodologia utilizada. O Capítulo 2 apresenta os conceitos básicos do tema e as principais teorias já consagradas para obtenção das respostas dinâmicas das edificações sujeitas a ação do vento. O Capítulo 3 aborda o estado da arte, ou seja, estudos mais recentes com temáticas similares ao tema da pesquisa e que auxiliam a indicar o que vem sendo estudado e identificar as lacunas ainda existentes. O Capítulo 4 discretiza as propriedades do edifício analisado e o procedimento realizado para obtenção dos resultados. No Capítulo 5 encontra-se os resultados obtidos pela análise realizada. No Capítulo 6 estão apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 TEORIAS BÁSICAS DO VENTO

A maioria das estruturas são suscetíveis a uma ampla variabilidade de forças ao longo de sua vida útil, como a ação do vento. O vento exerce uma força constante e duradoura, cujos efeitos precisam ser antecipados devido à incerteza associada à sua ocorrência. A dificuldade em prever esses efeitos sobre a estrutura é evidente, como demonstram vários estudos, devido a uma série de parâmetros que podem influenciar consideravelmente o comportamento do objeto de estudo, incluindo a velocidade do vento, a formação de vórtices e a geometria da edificação. Com a demanda em determinar os esforços e as reações das estruturas, a partir da ação do vento, diversos países publicaram normas e padrões para guiar a consideração do vento no dimensionamento das edificações, porém é preciso atentar-se as peculiaridades de cada regulamento.

Com o aprofundamento nos estudos da resposta dinâmica, independentemente do tipo de análise, tornou-se necessário o uso de métodos capazes de simular a ação do vento, destacando a relevância de prever o comportamento e forças aerodinâmicas. Uma das principais ferramentas é o monitoramento em escala, ou seja, a simulação em túnel de vento, conforme salientado por Kareem, sendo capaz de garantir que as premissas de projetos sejam comparadas com as propriedades dinâmicas *in-situ* (Bashor et al., 2012). O uso do túnel de vento é difundido para diversas áreas, como em análises de aeronaves e setor energético. Além do túnel de vento, há outras ferramentas capazes de simular as respostas a partir de excitações dinâmicas, como o uso de mesa vibratória. Outros tipos de simuladores, como o estudado por Dragomirescu, vêm sendo estudados para que sejam possíveis a simulações mais completas e fidedignas, por exemplo, o novo Simulador de Danos Induzidos pelo Vento (WDS), localizado e construído na Universidade de Ottawa, capaz de simular pressões induzidas por ventos multidirecionais (Williams; Dragomirescu, 2023).

Além da forma experimental de análise, com os avanços tecnológicos tornou-se possível a análise puramente numérica da estrutura que é solicitada pela ação do vento. Com o auxílio das equações de movimento desenvolvidas na mecânica geral e estudo de elementos finitos, experimentos numéricos são usados para investigar os efeitos do vento em escalas de comprimento integral. Uma das vantagens da análise numérica, está na possibilidade de teste de diferentes cenários, prevendo de forma mais veloz, o comportamento de estruturas em

diversas situações, resultando em valores convergentes com a literatura, como determinado por Castro (Daniels; Castro; Xie, 2013). Outra vantagem está na capacidade de prever forças de vento que possuem aleatoriedade em sua atuação, conseguindo considerar de forma mais fidedigna o vento no dimensionamento de estruturas. O uso de algoritmos e ferramentas numéricas, atualmente, vai além da análise estrutural, sendo usados, até mesmo, em aplicações práticas para atenuar respostas de vibração em estruturas inteligentes, como o uso de Amortecedores de Massa Sintonizados (TMD) utilizado por Zhang (Zhang; Schauer; Bleicher, 2022).

Dentre as respostas que o vento pode exercer em uma estrutura tem-se a resposta transversal, longitudinal e torsional. Estudos indicam que quando comparada com a resposta transversal, a resposta longitudinal pode apresentar pouca relevância em termos de amplitude de valores. Porém, há estudos que mostram que excitações específicas podem levar a respostas longitudinais significantes, principalmente, quando a magnitude da excitação é fraca. Como mostrado por Zhang, a resposta longitudinal pode influenciar na resposta transversal, gerando uma amplificação do movimento transversal, sendo necessário realizar a mensuração dessa influência (Yang; Zhang, 2014). Outros estudos, como o de Wang (Wang; Ni, 2022), mostram que parâmetros específicos da ação do vento, como a velocidade média, podem ser extremamente significantes para a relação entre os tipos de respostas na edificação, influenciando na resposta longitudinal.

Para a determinação das respostas dinâmicas de edificações sujeitas a ação do vento tem-se procedimentos de cálculos indicados por padrões normativos e estudiosos da área, a seguir são explicados alguns dos principais métodos de cálculo, os quais foram usados no presente trabalho.

2.1 MÉTODO DA NBR 6123:2023 PARA DETERMINAÇÃO DA RESPOSTA LONGITUDINAL

A norma brasileira para a consideração da ação do vento em estruturas, ABNT NBR 6123:(2023), traz indicações para a obtenção dos efeitos dinâmicos devidos à turbulência atmosférica em seu capítulo 9, apresentando dois métodos de cálculo, modelo contínuo simplificado ou modelo discreto.

A consideração dos efeitos dinâmicos parte da análise da velocidade do vento natural, nele o módulo e a orientação da velocidade apresentam flutuações em torno da velocidade média (\bar{V}), flutuações essas denominadas de rajadas. A velocidade é então dividida em duas partes, uma parte considerada velocidade média, a qual se mantém constante durante um intervalo de tempo de 10 minutos ou mais, e outra parte, flutuações, que apresentam variações em torno da velocidade média. A velocidade média produz nas estruturas efeitos puramente estáticos, chamados de resposta média. Já as flutuações induzem em estruturas muito flexíveis, principalmente em edificações altas e esbeltas, oscilações importantes na direção da velocidade média, chamadas de resposta flutuante.

Pelo cálculo básico apresentado na norma, obtêm-se os esforços referentes a apenas a resposta média, tal procedimento de cálculo é indicado quando a edificação analisada possuir período fundamental T_1 igual ou inferior a 1 segundo, pois nessa situação a parcela de resposta flutuante é pequena, sendo sua influência já contabilizada na determinação do fator S_2 , fator esse utilizado no cálculo da velocidade básica do vento. Para edificações com período fundamental superior a 1 segundo, em especial àquelas que são fracamente amortecidas, a resposta flutuante pode caracterizar grande influência nos esforços totais da estrutura. Neste segundo caso, a resposta dinâmica total, sendo a superposição das respostas média e flutuante, pode ser obtida pelos cálculos indicados no capítulo 9 da ABNT NBR 6123:2023.

A norma brasileira foi atualizada, para efeito de comparação o cálculo dos esforços dinâmicos do edifício analisado será realizado nas duas versões da norma, versão em vigor e versão antiga. A norma apresenta dois modelos de cálculo, os quais serão apresentados nas seções a seguir, as diferenças entre as duas versões da norma serão indicadas no passo a passo do cálculo.

2.1.1 Velocidade de projeto (\bar{V}_p)

A seção 9.2.1 da norma brasileira indica que a velocidade de projeto, correspondente à velocidade média sobre 10 minutos a 10 metros de altura sobre o solo, em terreno de categoria II, é obtida pela Equação 1 a seguir:

$$\bar{V}_p = 0,69 \times V_0 \times S_1 \times S_3 \quad (1)$$

Sendo, \bar{V}_p , velocidade de projeto, [m/s]; 0,69, fator de rajada para o intervalo de tempo de 600 s; V_0 , velocidade básica, [m/s]; S_1 fator topográfico; S_3 , fator estatístico.

A velocidade básica do vento, V_0 , segundo a ABNT 6123:2023, é a velocidade de uma rajada de 3 s, excedida em média uma vez em 50 anos, a 10 m acima do terreno, e é determinada através do mapa de isopleias apresentado na Figura 1 da referida norma.

O fator topográfico S_1 , segundo a ABNT 6123:2023, considera as variações do relevo do terreno. Tal fator majora a velocidade quando a edificação está em taludes e morros, e minora a velocidade para situações de vales profundos. Para terrenos planos ou fracamente acidentado, o fator S_1 é adotado como 1,0.

O fator estatístico S_3 , segundo a ABNT 6123:2023, é utilizado para caracterizar o nível de segurança necessário para a edificação a partir do seu uso. Na Tabela 3 da referida norma as edificações são classificadas em 5 grupos com base na descrição de utilidade das mesmas, onde é apresentado o valor do fator estatístico para cada uma delas.

2.1.2 Método simplificado

Para edificações de seção constante, distribuição uniforme de massa, apoiadas exclusivamente na base e de altura inferior a 150m, pode ser adotado um modelo contínuo simplificado de acordo com a norma brasileira. Na resposta dinâmica, a partir desse método, é considerado unicamente a contribuição do modo fundamental. A norma em vigor indica que a retenção só do primeiro modo na solução conduz a erros inferiores a 10%.

O primeiro modo de vibração (x) pode ser representado pela Equação 2:

$$x = \left(\frac{z}{h}\right)^\gamma \quad (2)$$

Sendo z a altura analisada e h a altura do elemento/estrutura. A Tabela 1, extraída da Tabela 19 presente na ABNT NBR 6123:2023, contém valores aproximados de γ e equações, também aproximadas, que permitem o cálculo da frequência fundamental f_1 (Hz) para vários tipos de

edificações usuais. A razão de amortecimento crítico (ζ) também está indicada na Tabela 1, em função do tipo de estrutura.

Tabela 1. Parâmetros para a determinação de efeitos dinâmicos

Tipo de edificação	γ	ζ	$T1 = 1/f1$
Edifícios com estrutura apertada de concreto, sem cortinas	1,2	0,020	$0,05 + 0,015h$ (h em metros)
Edifícios com estrutura de concreto, com cortinas para a absorção de forças horizontais	1,6	0,015	$0,05 + 0,012h$
Torres e chaminés de concreto, seção variável	2,7	0,015	$0,02h$
Torres, mastros e chaminés de concreto, seção uniforme	1,7	0,010	$0,015h$
Edifícios com estrutura de aço soldada	1,2	0,010	$0,29\sqrt{h} - 0,4$
Torres e chaminés de aço, seção uniforme	1,7	0,008	
Estruturas de madeira	--	0,030	

Fonte: ABNT NBR 6123:2023.

Na versão atualizada da norma o valor de T1 para ‘*Edifícios com estrutura de concreto, com cortinas para a absorção de forças horizontais*’ é calculado pela equação $0,05 + 0,012h$.

Para o método simplificado, conforme a ABNT NBR 6123:2023, a variação da pressão dinâmica com a altura é expressa pela Equação 3:

$$q(z) = \bar{q}_0 b^2 \left[\left(\frac{z}{z_r} \right)^{2p} + \left(\frac{h}{z_r} \right)^p \left(\frac{z}{h} \right)^\gamma \frac{1 + 2\gamma}{1 + \gamma + p} \xi \right] \quad (3)$$

Pela versão atualizada da norma o fator b passou por mudança no seu símbolo, sendo identificado por b_m , porém os seus valores continuam os mesmos.

A pressão dinâmica de projeto, \bar{q}_0 , é definida pela Equação 4:

$$\bar{q}_0 = 0,613 \bar{V}_p^2 \quad [\bar{q}_0 \text{ em N/m}^2, \bar{V}_p \text{ em m/s}] \quad (4)$$

A pressão $q(z)$ é uma função contínua da altura z sobre o terreno. A força estática equivalente, ou seja, uma distribuição de força que aplicada estaticamente na estrutura produz o deslocamento máximo, que engloba as ações estáticas e dinâmicas do vento, por unidade de

altura resulta igual a $q(z) l_1 C_a$, sendo l_1 a largura ou o diâmetro da edificação e C_a o coeficiente de arrasto.

Na Equação 3 o primeiro termo dentro dos colchetes corresponde à resposta média e o segundo representa a amplitude máxima da resposta flutuante. O coeficiente de amplificação dinâmica (ξ), função das dimensões da edificação, da razão de amortecimento crítico ζ , da frequência (f) (através da relação adimensional $\bar{V}_p / f L$), é apresentado em gráficos na norma para as cinco categorias de rugosidade de terreno. O gráfico utilizado para a situação analisada no presente trabalho é a Figura 16 da norma brasileira, sendo o gráfico para a categoria III. Na versão atualizada da norma é utilizado o gráfico a) da Figura 22 da norma disponível para consulta nacional, tendo sido atualizados os valores do coeficiente de amplificação dinâmica, sendo, nos cálculos, a mudança mais significativa entre as versões da norma. O expoente p e o coeficiente b dependem da categoria de rugosidade do terreno, de acordo com o indicado na Tabela 2.

Tabela 2. Expoente p e parâmetro b

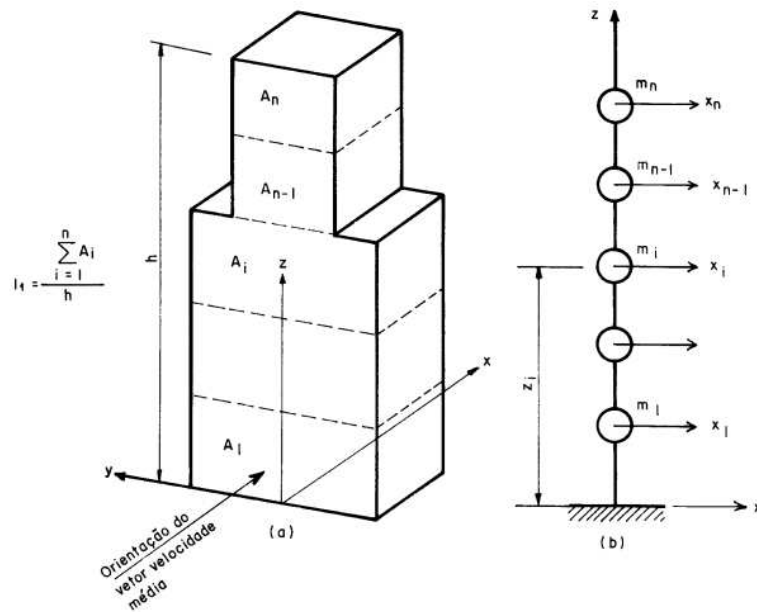
Categoria	Descrição	p	b
I	Superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5 km de extensão, medida na direção e sentido vento incidente	0,095	1,23
II	Terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas	0,15	1,00
III	Terrenos planos ou ondulados com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas	0,185	0,86
IV	Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e poucos espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada	0,23	0,71
V	Terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados	0,31	0,50

Fonte: ABNT NBR 6123:2023.

2.1.3 Método discreto

Para edificações com propriedades variáveis com a altura, a ABNT NBR 6123:2023 indica que a estrutura deve ser representada por meio de um modelo discreto, conforme mostrado na Figura 2:

FIGURA 2 – Esquema para modelo dinâmico discreto



Fonte: ABNT NBR 6123:2023.

Sendo, x_i , deslocamento correspondente à coordenada i ; A_i , área de influência correspondente à coordenada i ; m_i , massa discreta correspondente à coordenada i ; C_{ai} , coeficiente de arrasto correspondente à coordenada i ; z_i , altura do elemento i sobre o nível do terreno; z_r , altura de referência, $z_r = 10\text{m}$; e n , número de graus de liberdade ($i = 1, 2, \dots, n$). De acordo com a norma, a adoção de 10 números de graus de liberdade já é o suficiente para uma boa precisão nos resultados. Caso a edificação tenha variações importantes em suas características, pode ser adotado um valor maior para n .

Uma vez determinado o modelo a ser utilizado, na seção 9.2.2.2 da ABNT NBR 6123:2023 há indicação que o próximo passo é determinar a frequência natural f_j (Hz) e a forma modal \vec{X}_j , correspondentes ao modo j , para $j = 1, 2, \dots, r$, sendo $r < n$, o número de modos que serão retidos na solução. A retenção de um único modo ($r = 1$) é usualmente suficiente, exceto no caso de edificações muito esbeltas e/ou com rigidez fortemente variável. Nestes casos, devem ser computadas sucessivamente as contribuições dos modos 1,2, etc., até que as forças equivalentes associadas ao último modo calculado ($j = r$) sejam desprezíveis.

No método discreto para a obtenção da resposta longitudinal, de acordo com a norma brasileira, para cada modo de vibração j , com componentes $(x_i)_j = x_i$, ou seja, os deslocamentos correspondentes à coordenada i devido a cada um dos modos de vibração j , a uma força total X_i , devida ao vento na direção desta coordenada i é dada pela Equação 5:

$$X_i = \bar{X}_i + \hat{X}_i \quad (5)$$

Sendo, X_i , a força total, [N]; \bar{X}_i , a parcela de força média, [N]; e \hat{X}_i , a parcela flutuante, [N].

A força média é calculada pela Equação 6:

$$\bar{X}_i = \bar{q}_0 b^2 C_{ai} A_i \left(\frac{z_i}{z_r} \right)^{2p} \quad (6)$$

A componente flutuante é dada pela Equação 7:

$$\hat{X}_i = F_H \psi_i x_i \quad (7)$$

Sendo, x_i , o deslocamento correspondente à coordenada i , [m].

O parâmetro ψ_i é obtido pela Equação 8:

$$\psi_i = \frac{m_i}{m_0} \quad (8)$$

Sendo, m_i , a massa discreta referente à coordenada i ; e m_0 , a massa arbitrária de referência.

Já a força F_H é calculada pela Equação 9:

$$F_H = \bar{q}_0 b^2 A_0 \frac{\sum_{i=1}^n \beta_i X_i}{\sum_{i=1}^n \psi_i X_i^2} \xi \quad (9)$$

Sendo, A_0 , área arbitrária de referência, [m²]; n , é o número de coordenadas discretizadas; ξ , é o coeficiente de amplificação dinâmica. O valor de β_i é calculado pela Equação 10:

$$\beta_i = C_{ai} \left(\frac{A_i}{A_0} \right) \left(\frac{z_i}{z_r} \right)^p \quad (10)$$

2.2 MÉTODO DA NBR 6123:2023 PARA DETERMINAÇÃO DO FATOR DE VIZINHANÇA

A norma brasileira traz em seu Anexo G orientações de cálculo sobre o fator de vizinhança (FV), ou seja, como considerar a influência de edificações situadas nas vizinhanças daquela em estudo. Na norma é considerado que o edifício vizinho pode gerar o aumento das forças do vento no edifício analisado, para que se considere esse aumento é indicado o uso de um fator de majoração calculado a partir da distância entre os edifícios vizinhos e as dimensões do edifício analisado. A seguir é apresentado o procedimento para determinar o fator de vizinhança proposto por norma.

Para a consideração do fator de vizinhança em paredes, se tem as seguintes relações:

$$s/d^* \leq 1,0 \rightarrow FV = 1,3$$

$$s/d^* \geq 3,0 \rightarrow FV = 1,0$$

Sendo s o afastamento entre os planos das faces confrontantes de duas edificações altas vizinhas, FV o fator de efeito de vizinhança e d^* a menor das duas dimensões, sendo o lado menor da edificação em planta ou a sua semidiagonal calculada pela Equação 11:

$$\text{semidiagonal} = \frac{1}{2} \sqrt{a^2 + b^2} \quad (11)$$

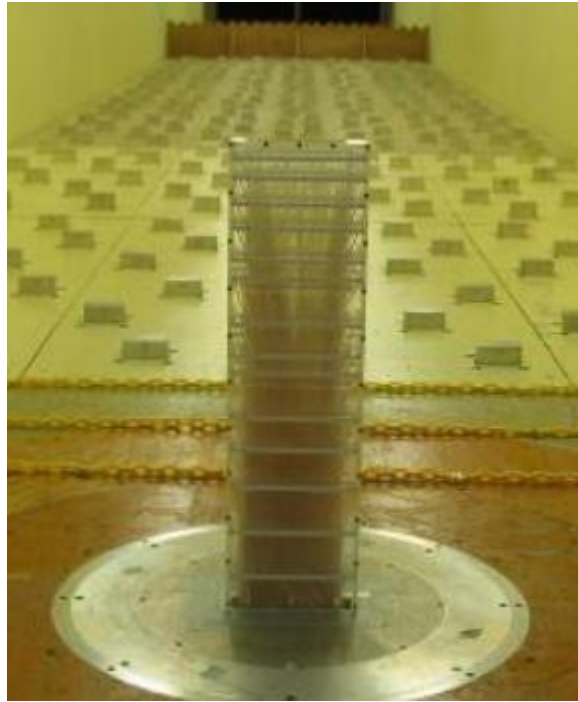
Sendo a a maior dimensão da edificação em planta.

2.3 INTEGRAÇÃO DE PRESSÕES EM ALTA FREQUÊNCIA (*HIGH FREQUENCY PRESSURE INTEGRATION*)

O HFPI (*High Frequency Pressure Integration*) é uma técnica de Integração de Pressões em Alta Frequência, utilizada para obter variação das forças aerodinâmicas e dos momentos fletor e torçor ao longo da altura da estrutura, e não somente na base, proporcionando mais precisão no cálculo do torçor, bem como a excitação de múltiplos modos de vibração. O método parte da hipótese de que não há interação entre fluido e estrutura.

A técnica consiste na medição de pressões dinâmicas no edifício de forma simultânea. Essas pressões são medidas através de sensores eletrônicos posicionados no modelo ensaiado no túnel de vento (Figura 3), e registradas por meio de um sistema de aquisição de dados para que, posteriormente, se faça o processamento numérico.

FIGURA 3 - Modelo de tomadas de pressões do CAARC Standard Tall Building



Fonte: Lavôr (2017).

Os registros de pressões realizados durante o ensaio são um alto número de séries temporais correlacionadas (Sartori, 2010). As séries temporais medidas estão correlacionadas e incorporam as densidades espectrais e funções de coerência corretas para o vento natural simulado. Assim, a função de admitância aerodinâmica está automaticamente considerada na integração (Sartori, 2010). Relaciona-se cada tomada de pressão instalada no modelo com a área de influência A_i da zona de medição, obtendo-se a força resultante pela Equação 12.

$$F(t) = \int_S [\vec{p}(t)\vec{u}_F] dA \cong \sum_{i=1}^n [\vec{p}_i(t)\vec{u}_F A_i] \quad (12)$$

Sendo $F(t)$ força resultante no tempo t , $\vec{p}(t)$ pressão local no tempo t , \vec{u}_F cossenos diretores na direção que se deseja ter a força resultante $F(t)$, S é a zona que se deseja ter a força resultante

$F(t)$, n número de tomadas da zona de integração, $\vec{p}_i(t)$ pressão medida na i -ésima tomada no tempo t e A_i área de influência da i -ésima tomada.

Também é possível a obtenção da componente de esforços no eixo vertical a partir da Equação 13, a qual corresponde a torção no eixo z :

$$M_z(t) \cong \sum_{i=1}^n \vec{p}_i(t) L_i A_i \quad (13)$$

Sendo L_i a distância ortogonal do eixo de atuação da pressão na i -ésima tomada ao eixo que passa pela origem.

Tendo sido determinados as forças e momentos de todas as zonas, dá-se prosseguimento ao cálculo da resposta dinâmica por superposição modal. Parte-se da equação matricial do movimento, Equação 14:

$$M\ddot{\vec{u}}(t) + C\dot{\vec{u}}(t) + K\vec{u}(t) = \vec{P}(t) \quad (14)$$

Sendo M é a matriz de massa, $\ddot{\vec{u}}(t)$ é o vetor de aceleração em função do tempo, C é a matriz de amortecimento, $\dot{\vec{u}}(t)$ é o vetor de velocidade em função do tempo, K é a matriz de rigidez, $\vec{u}(t)$ é o vetor de deslocamento em função do tempo e $\vec{P}(t)$ é o vetor de forças externas em função do tempo.

Por meio da consideração de que a matriz de amortecimento seja proporcional, as equações podem ser desacopladas resultando em um sistema de n equações diferenciais lineares de segunda ordem, resultando em uma forma alternativa da equação clássica de equilíbrio dinâmico (Equação 15):

$$\ddot{u}_k + 2\zeta_k \omega_k \dot{u}_k + \omega_k^2 u_k = \frac{F_k(t)}{M_k} = f_k(t) \quad (15)$$

Sendo u_k o deslocamento generalizado, ζ_k a razão de amortecimento crítico, ω_k a frequência angular natural, $M_k = \vec{\phi}_k^T M \vec{\phi}_k = 1$, sendo M a matriz de massa (momento de inércia de massa)

e $\vec{\phi}_k = \{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n\}^T$ o vetor de modos de vibração com $\phi = (z/H)^\gamma$ e γ sendo o expoente do modo de vibração que condiciona a distribuição modal ao longo da altura z do edifício com altura total H .

A força deve ser normalizada pela pressão dinâmica do túnel de vento para que se possa utilizar outras velocidades no topo do protótipo teórico do edifício, desde que respeitando a rugosidade do ensaio. Logo, pode-se destacar, a partir da Equação 14, a função da força generalizada (Equação 16):

$$f_k(t) = \frac{\vec{\phi}_k^T \vec{F}(t)}{M_k} \quad (16)$$

Para obter o deslocamento máximo de pico faz-se a superposição modal das parcelas estáticas e flutuantes, o que representa o deslocamento da edificação com amplificação dinâmica (ressonância) (Equação 17):

$$\vec{u}_{max} = \vec{u}_{med} + \vec{u}_{flu} = \sum_{k=1}^n \bar{u}_k(t) \vec{\phi}_k + \sum_{k=1}^n \tilde{u}_k(t) \vec{\phi}_k \quad (17)$$

As parcelas média e flutuante são determinadas pelas equações 18 e 19:

$$\bar{u}_k = \frac{\bar{f}_k}{K_k} = \frac{\bar{f}_k}{\omega_k^2 M_k} = \frac{\bar{f}_k}{\omega_k^2} \quad (18)$$

$$\tilde{u}_k = g_k \sigma_{u_k} \quad (19)$$

Sendo \bar{u}_k e \tilde{u}_k , respectivamente, as parcelas média e flutuante do deslocamento no tempo, \bar{f}_k a média do registro de forças em cada modo, g_k é o fator de pico, sugerido por Davenport, e calculado pela equação 20.

$$g = \sqrt{2 \ln(vT)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln(vT)}} \quad (20)$$

Sendo T o intervalo de tempo da estimativa e ν a frequência efetiva da resposta, esta determinada pela Equação 21.

$$\nu = f_j \sqrt{\frac{\tilde{r}_R^2}{\tilde{r}_B^2 + \tilde{r}_R^2}} \quad (21)$$

O termo σ_{u_k} é o desvio padrão do deslocamento modal determinado a partir da Equação 22:

$$\sigma_{u_k} = \sqrt{\sigma_{u_k}^2} = \sqrt{\int_0^\infty |H(\omega)|^2 S_{f_k}(\omega) d\omega} \quad (22)$$

Sendo $\sigma_{u_k}^2$ a variância do deslocamento flutuante, ω o intervalo de frequências analisadas, $S_{f_k}(\omega)$ é a densidade espectral de potência (PSD) da força generalizada e $|H(\omega)|^2$ é a admitância mecânica determinada pela Equação 23:

$$|H(\omega)|^2 = \frac{1}{(\omega_k^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta_k \omega_k \omega)^2} \quad (23)$$

2.4 MÉTODO DE DAVENPORT

Um dos métodos mais consagrados para obtenção de esforços dinâmicos é o método de Davenport. O método decompõe o vento natural em duas parcelas: média e flutuante, sendo a parcela média correspondente aos esforços estáticos e a parcela flutuante representação dos esforços dinâmicos. Por sua vez, a parte flutuante do vento é dividida em resposta não ressonante (\tilde{r}_B) e resposta ressonante (\tilde{r}_R). As respostas dinâmicas podem ser predominantemente não ressonantes, quando a maior parte da energia contida no espectro de potência da resposta está abaixo da menor frequência de vibração natural da estrutura (\tilde{r}_B), e podem ser predominantemente ressonantes, quando a parcela maior dessa energia contiver as frequências naturais de vibração da estrutura (\tilde{r}_R) (Davenport, 1995a).

O método de Davenport considera as linhas de influência ($i_r(z)$), a variação dos coeficientes de arrasto ($C_a(z)$), da geometria do edifício, de sua massa, perfil da velocidade do vento e

índice de área exposta. A força média do vento na estrutura a uma altitude normalizada z , é obtida pela Equação 24:

$$\bar{F}(z) = [q_H D_H H] \phi(z) C_a(z) \phi_U^2(z) \phi_D(z) \quad (24)$$

Sendo q_H a pressão dinâmica, D_H a largura, H a altura, $\phi(z)$ índice de área exposta, $C_a(z)$ o coeficiente de arrasto, $\phi_U^2(z)$ o perfil de velocidade do vento e $\phi_D(z)$ a variação da altura z .

O perfil de velocidade pode ser determinado por diversas leis já consagradas, sendo uma delas a lei potencial, a qual apresenta boa concordância com os dados experimentais (Lavôr, 2017), Equação 25:

$$U(z) = z^p \quad (25)$$

Sendo z a altura normalizada analisada e o expoente p dependente da rugosidade do terreno.

A pressão dinâmica de referência no topo da estrutura é obtida pela Equação 26:

$$q_H = \frac{1}{2} \rho_{ar} U_H^2 \quad (26)$$

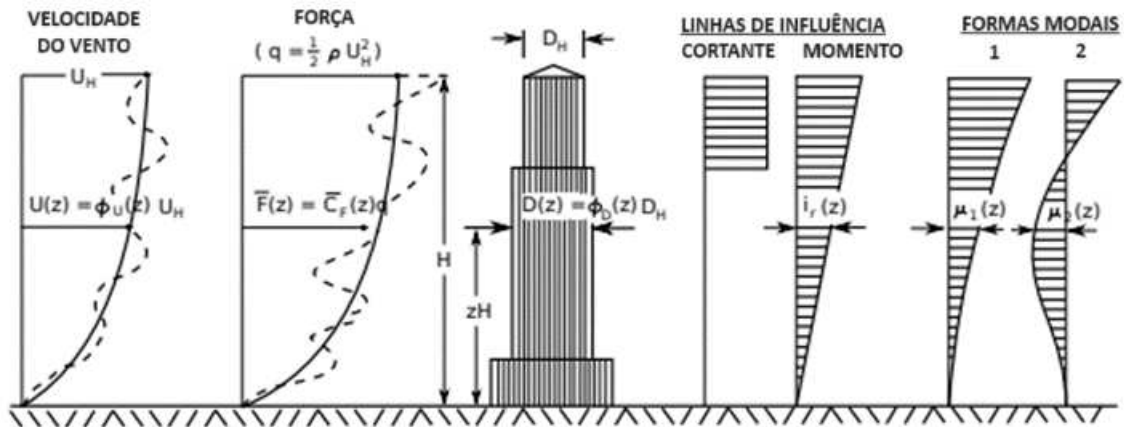
Sendo ρ_{ar} a massa específica do ar e U_H o vento médio.

A resposta média é dada pela Equação 27:

$$\bar{r} = \int_0^1 \bar{F}(z) i_r(z) dz = [q_H D_H H] \int_0^1 \phi(z) C_a(z) \phi_U^2(z) \phi_D(z) i_r(z) dz \quad (27)$$

As linhas de influências podem ser representadas como mostrado na Figura 4, sendo obtida pela Equação 28.

FIGURA 4 – Linhas de influência em edifícios altos



Fonte: Davenport (1995b) (Adaptado).

$$i_r(z) = \Delta \mu_1 \quad (28)$$

Sendo Δ o deslocamento no topo do edifício e μ_1 o modo de vibração correspondente a primeira frequência.

A parte flutuante da força do vento é calculada pela Equação 29:

$$\tilde{F}(z) = [q_H D_H H] C_a(z) \phi_U(z) \phi_D(z) 2I_u(z) \quad (29)$$

Sendo $I_u(z)$ a intensidade da turbulência, que por sua vez pode ser determinada pelo ábaco apresentado na Figura 5.

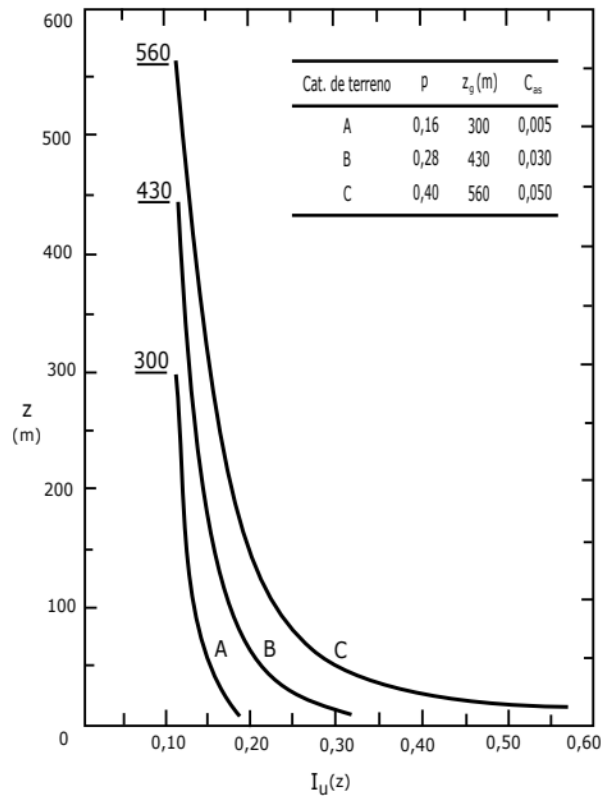
A resposta não ressonante é determinada pela Equação 30:

$$\tilde{r}_B = [q_H D_H H 2I_u(z)] \left[1 + \left(\frac{H}{2L_u(z)} \right) \left(\frac{G_0}{G_\infty} \right) \right]^{-\frac{1}{2}} \int_0^1 \phi(z) C_a(z) \phi_U(z) \phi_D(z) i_r(z) dz \quad (30)$$

Sendo $L_u(z)$ é a escala de turbulência longitudinal do vento, que por sua vez é determinada pela Equação 31:

$$L_u(z) = K \left(\frac{z}{z_r} \right)^n \quad (31)$$

FIGURA 5 – Intensidade da turbulência longitudinal para três terrenos típicos



Fonte: Blessmann (2013).

Alguns autores como Harris (1968) e Davenport (1961) definem $K = 0,084L$. Sendo L uma constante de comprimento, onde o primeiro autor sugere $L = 1800$ m e o segundo $L = 1200$ m, de acordo com resultados experimentais. O fator n equivale ao expoente p da lei potencial de velocidade média.

A razão G_0/G_∞ é determinada pela Equação 32:

$$\frac{G_0}{G_\infty} = \frac{\left[\int_0^1 \phi(z) C_a(z) \phi_U(z) \phi_D(z) i_r(z) dz \right]^2}{\int_0^1 \phi(z) C_a^2(z) \phi_U^2(z) \phi_D^2(z) i_r^2(z) dz} \quad (32)$$

A resposta ressonante do modo j é dada pela Equação 33:

$$\tilde{r}_{Rj} = \left[\frac{\pi f_j S_{GF_j}(f_j)}{4 (\zeta_{est} + \zeta_{aer})} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{\int_0^1 \phi_m(z) \mu_j(z) i_r(z) dz}{\int_0^1 \phi_m(z) \mu_j^2(z) dz} \quad (33)$$

Sendo ζ_{est} o coeficiente de amortecimento estrutural da edificação. O termo ζ_{aer} é determinado pela Equação 34:

$$\zeta_{aer} = \frac{\int_0^1 A(z)\mu_j^2(z)dz}{4\pi f_j m_H \int_0^1 \phi_m(z)\mu_j^2(z)dz} \quad (34)$$

Sendo o termo $A(z)$ obtido pela Equação 35:

$$A(z) = \rho U_H \phi(z) D_H C_a(z) \phi_U(z) \phi_D(z) \quad (35)$$

Sendo ρ a massa específica do edifício.

O termo $f_j S_{GF_j}(f_j)$ corresponde ao espectro de força generalizado dos j modos μ_j , associados às frequências naturais f_j da estrutura, calculado pela Equação 36:

$$\begin{aligned} f_j S_{GF_j}(f_j) & \quad (36) \\ & = [q_H D_H H]^2 4I_u^2 \frac{2}{C} \left[\frac{U_H}{f_j H} \right]^{\frac{5}{3}} 0.045 \int_0^1 \left[\phi^2(z) C_a^2(z) \phi_U^{\frac{11}{3}}(z) \phi_D^2(z) \mu_j^2(z) \right] z^{-\frac{2}{3}} dz \end{aligned}$$

Sendo C o coeficiente de decaimento que varia de 6 a 10 (CARRIL, 2000).

A resposta total, valor de pico, da estrutura é calculada pela Equação 37:

$$\hat{r} = \bar{r} + g\tilde{r} \quad (37)$$

Sendo g o fator de pico (Equação 19) e \tilde{r} o desvio padrão ou resposta flutuante definido pela Equação 38.

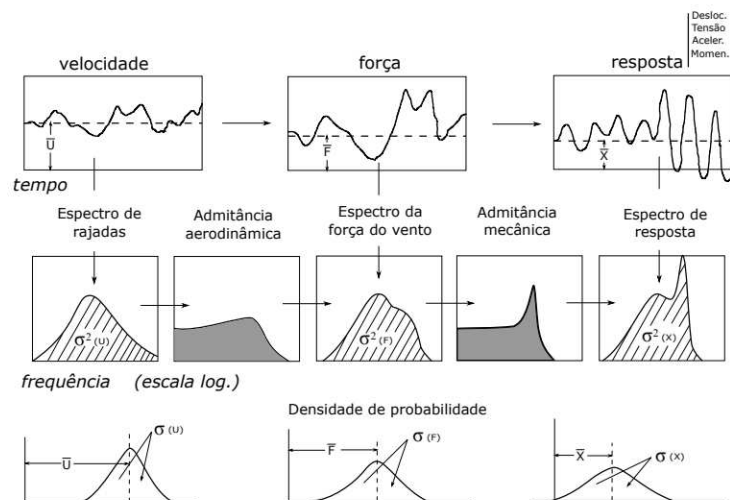
$$\tilde{r} = \sqrt{\tilde{r}_B^2 + \sum \tilde{r}_{R_j}^2} \quad (38)$$

Por fim, o fator de rajada, representando a separação da resposta, é dado pela Equação 39:

$$G = \frac{\hat{r}}{\bar{r}} = 1 + \frac{g}{\bar{r}} \sqrt{\tilde{r}_B^2 + \tilde{r}_R^2} \quad (39)$$

Na Figura 6 está a síntese visual do processo de Davenport, sendo na primeira linha os gráficos da variação da velocidade do vento no tempo, das respectivas pressões e da resposta da estrutura (deslocamento, força, aceleração, momento etc.). Na segunda linha as figuras mostram a sequência de operações que, a partir do espectro de rajadas, chega ao espectro da resposta, tendo como funções de transferência a admitância aerodinâmica e a admitância mecânica. Na última linha aparecem as densidades de probabilidade, gaussianas, da velocidade, pressão e resposta (Blessmann, 2005).

FIGURA 6 – Processo probabilístico de Davenport



Fonte: Davenport (1967) (Adaptado).

2.5 MÉTODO DA NORMA EUROPEIA (EUROCODE) PARA DETERMINAÇÃO DA RESPOSTA GLOBAL DO VENTO

O Eurocode, norma europeia EM 1991:1-4, traz indicações, com base no método de fator de rajada de Davenport, para determinar as ações do vento para projetos de estruturas civis, tratando de uma análise global e de elementos específicos. Em seus anexos há diferenciação de condições físicas e climáticas para cada país, além de quantificar o comportamento fluido-estrutura e obter algumas propriedades dinâmicas das edificações. A norma possui uma limitação, não sendo aplicável a edificações com alturas superiores a 200 metros, assim como a norma brasileira de vento.

2.5.1 Método Coeficiente Estrutural $c_s c_d$

O método indicado a seguir refere-se a resposta dinâmica devida à turbulência na direção longitudinal do vento em ressonância com as vibrações na direção deste, segundo o modo fundamental de vibração das estruturas. A resposta dinâmica da edificação é gerada pelas forças exercidas pelo vento em função da pressão de pico definida de maneira direta. A pressão de pico é dada pela Equação 40:

$$q_p(z) = [1 + 7I_u(z)] \frac{1}{2} \rho_{ar} v_m^2(z) \quad (40)$$

Sendo ρ_{ar} a massa específica do ar; I_u a intensidade de turbulência à altura z , calculada pela Equação 41 e v_m a velocidade média do vento à altura z acima da superfície, calculada pela Equação 42.

$$I_u(z) = \frac{\sigma_u}{v_m(z)} \text{ para } z_{min} \leq z \leq z_{max} \quad (41)$$

$$v_m(z) = c_r(z) c_o(z) v_b \quad (42)$$

Sendo σ_u o desvio padrão das flutuações da velocidade para as componentes nas direções dos três eixos de referência, calculado pela Equação 43; z_{min} a altura mínima definida no Quadro 4.1 do Eurocode; z_{max} a altura máxima igual a 200 m (limite adotado pelo Eurocode); c_r o coeficiente de rugosidade, calculado pelas equações 44 e 45; c_o o coeficiente de orografia determinado pelas considerações do Anexo A.3 do Eurocode, para terrenos com baixa inclinação tal fator pode ser adotado como 1,0; v_b o valor de referência da velocidade do vento relacionada à direção do vento e à época do ano a uma altura de 10 m acima da superfície em um terreno plano, calculada pela Equação 46.

$$\sigma_u = k_r v_b k_1 \quad (43)$$

$$c_r(z) = k_r \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \text{ para } z_{min} \leq z \leq z_{max} \quad (44)$$

$$c_r(z) = c_r(z_{min}) \text{ para } z \leq z_{min} \quad (45)$$

$$v_b = c_{dir} c_{season} v_{b,0} \quad (46)$$

Sendo k_r o coeficiente de terreno, calculado pela Equação 47; k_1 o coeficiente de turbulência, sendo o valor recomendado pelo Eurocode como 1,0; z_0 é o comprimento de rugosidade do terreno definido no Quadro 4.1 do Eurocode; c_{dir} o fator direcional sendo o valor recomendado pelo Eurocode como 1,0; c_{season} o fator temporada sendo o valor recomendado pelo Eurocode como 1,0; $v_{b,0}$ o valor fundamental da velocidade básica do vento, obtido nos Anexos Nacionais.

$$k_r = 0,19 \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} \quad (47)$$

Sendo $z_{0,II} = 0,05 \text{ m}$ pelo Quadro A.1 do Eurocode.

Pelo Eurocode a força exercida pelo vento sobre uma construção pode ser obtida pela Equação 48:

$$F_w = c_s c_d \sum_{\text{elementos}} c_f q_p(z_e) A_{ref} \quad (48)$$

Sendo $c_s c_d$ o coeficiente estrutural obtido pela Equação 49; c_f o coeficiente de força (arrasto) pela Equação 50; A_{ref} a área de referência da construção ou do elemento analisado.

$$c_s c_d = \frac{1 + 2k_p I_u(z_s) \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7I_u(z_s)} \quad (49)$$

$$c_f = c_{f,0} \psi_r \psi_\lambda \quad (50)$$

Sendo $c_{f,0}$ o coeficiente de força obtido pela Figura 7.23 do Eurocode; ψ_r o coeficiente de redução obtido pela Figura 7.23 do Eurocode; ψ_λ o coeficiente de efeitos de extremidade obtido pela Figura 7.36 do Eurocode; z_s a altura de referência calculada pela Equação 51. Os

parâmetros da Equação 49 podem ser calculados por dois procedimentos distintos indicados no Anexo B e Anexo C do Eurocode, sendo o método mais recomendado pela norma o descrito no Anexo B, o qual será indicado a seguir.

$$z_s = 0,6h \leq z_{min} \quad (51)$$

Sendo h a altura total da edificação.

2.5.1.1 Procedimento 1 para a determinação dos parâmetros para obtenção do coeficiente $c_s c_d$ (Anexo B do Eurocode)

O fator de pico, k_p , é obtido pela Equação 52:

$$k_p = \sqrt{2\ln(vT)} + \frac{0,6}{\sqrt{2\ln(vT)}} \geq 3 \quad (52)$$

Sendo v a frequência de passagens ascendentes, calculada pela Equação 53; $T = 600$ s a duração de integração da velocidade média do vento.

$$v = n_{1,x} \sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}} \geq 0,08\text{Hz} \quad (53)$$

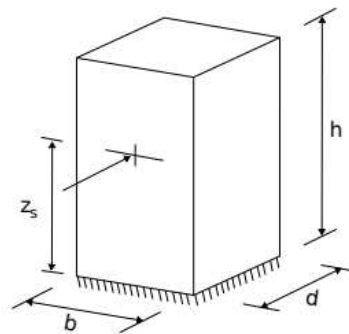
Sendo $n_{1,x}$ a frequência própria (natural ou fundamental da estrutura); B^2 o coeficiente de resposta quase-estática, calculada pela Equação 54; R^2 o coeficiente de resposta em ressonância, calculada pela Equação 55.

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0,9 \left(\frac{b+h}{L(z_s)} \right)^{0,63}} \quad (54)$$

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2\delta} S_L(z_s, n_{1,x}) R_h(n_h) R_b(n_b) \quad (55)$$

Sendo b e h , respectivamente, a largura correspondente a face analisada e a altura da construção conforme Figura 7; $L(z_s)$ a escala de turbulência na altura de referência z_s , calculada pela Equação 56; δ o decremento logarítmico total de amortecimento, calculado pela Equação 57; S_L a função de densidade espectral de potência adimensional calculada pela Equação 58; R_h e R_b função de admitância aerodinâmica, calculadas pelas Equações 59 e 60.

FIGURA 7 – Dimensões do edifício analisado



Fonte: Eurocode (2005).

$$L(z_s) = L_r \left(\frac{z}{z_r} \right)^\alpha \quad (56)$$

$$\delta = 2\pi\zeta \quad (57)$$

$$S_L = \frac{6,8X_L(f_n, z)}{[1 + 10,2X_L(f_n, z)]^{5/3}} \quad (58)$$

$$R_h = \frac{1}{n_h} - \frac{1}{2n_h^2} (1 - e^{-2n_h}); R_h = 1 \text{ para } n_h = 0 \quad (59)$$

$$R_b = \frac{1}{n_b} - \frac{1}{2n_b^2} (1 - e^{-2n_b}); R_b = 1 \text{ para } n_b = 0 \quad (60)$$

Sendo $L_r = 300 \text{ m}$; $z_r = 200 \text{ m}$; α o parâmetro calculado pela Equação 61; ζ a razão de amortecimento crítico definido na admitância mecânica; f_n a frequência natural ou própria da estrutura; $X_L(f_n, z)$ a frequência adimensional, calculada pela Equação 62; n_h e n_b parâmetros calculados pelas Equações 63 e 64.

$$\alpha = 0,67 + 0,05 \ln(z_0) \quad (61)$$

$$X_L(f_n, z) = \frac{f_n L(z_s)}{\bar{U}(z)} \quad (62)$$

$$n_h = \frac{4,6h}{L(z_s)} X_L(f_n, z) \quad (63)$$

$$n_b = \frac{4,6b}{L(z_s)} X_L(f_n, z) \quad (64)$$

2.6 CÁLCULO DE ACELERAÇÕES MÁXIMAS PARA VERIFICAÇÃO DO CONFORTO DE ACORDO COM ABNT NBR 6123:2023

Além dos cálculos para obtenção dos esforços dinâmicos pela norma brasileira de vento, a mesma também indica uma verificação capaz de mensurar o conforto do usuário na edificação quando sujeito a ação do vento. A verificação é feita a partir do cálculo de aceleração máxima (Equação 65):

$$a_j = 4\pi^2 f_j^2 u_j^2 \quad (65)$$

Sendo a_j a máxima aceleração no nível analisado, f_j frequências naturais e u_j o deslocamento no nível z devido à resposta flutuante no modo j .

Como indicação da norma a amplitude máxima não deve exceder $0,1 \text{ m/s}^2$, sendo feita a verificação para velocidades do vento com maior probabilidade de ocorrência que a velocidade do projeto estrutural, a ser definido pelo projetista. Aceita-se que a amplitude máxima de aceleração seja excedida, em média, uma vez a cada dez anos.

2.7 TEORIA DA SEMELHANÇA

A teoria da semelhança, também chamada de princípio da semelhança, é uma abordagem importante nos estudos de fluidos, como o vento. Tal teoria indica a possibilidade de usar

modelos em escala (protótipos) para estudar o comportamento de fluidos em condições reais, desde que certas proporções entre modelo e sistema real sejam mantidas. No estudo do vento, a teoria da semelhança é frequentemente aplicada para compreender como o vento interage com as estruturas, ela permite que sejam criados modelos em escala reduzida dessas construções que sejam ensaiados em túneis de vento sob condições controladas, uma vez ensaiados, os resultados podem ser extrapolados para prever o comportamento do vento em situações reais (Simiu; Yeo, 2019).

Existem 3 principais tipos de semelhança que devem ser mantidas em consideração a teoria da semelhança para estudo do vento:

1. Semelhança geométrica: As dimensões físicas do modelo em escala devem possuir a mesma proporção que o edifício real possui;
2. Semelhança cinemática: A velocidade do vento no modelo em escala deve ser proporcional a velocidade do vento no sistema real, garantindo que os efeitos dinâmicos do vento sejam semelhantes;
3. Semelhança dinâmica: A relação entre os esforços que atuam no protótipo e na estrutura real deve ser a mesma, possibilitando que efeitos do vento, como pressão e arrasto, sejam reproduzidos com precisão no modelo em escala.

Em específico, a semelhança cinemática é extremamente importante para o presente trabalho, pois a relação de velocidade é um ponto sensível quando se trabalha com resultados de desvio padrão, em que considera a variação das flutuações, por isso o uso da velocidade reduzida em alguns casos. A velocidade reduzida garante a proporcionalidade a velocidade do fluido no sistema real, sendo parte fundamental da teoria da semelhança.

Além da semelhança cinemática, a semelhança geométrica também é considerada no ensaio em túnel de vento, no qual o objeto de estudo, edifício alto de seção regular, em função das dimensões do túnel e do material já disponível para o desenvolvimento do mesmo, foi confeccionado em acrílico com uma escala de 1:406.

3 ESTADO DA ARTE

No presente capítulo tem-se como objetivo traçar uma linha do tempo, mostrando como a ação do vento vem sendo estudada a partir dos tipos de estruturas, passando pelas principais estruturas horizontais, como passarelas e pontes, até chegar na verticalização das estruturas, que é a característica do cenário atual, em que se tem estruturas altas e esbeltas. O capítulo também tem como foco mostrar, principalmente, como a resposta longitudinal é estudada para os diferentes tipos de estruturas, finalizando com a consideração da mesma para edifícios altos, o qual é o objetivo do presente trabalho.

3.1 ESTRUTURAS HORIZONTAIS

Tem-se uma ideia natural de que o vento está prioritariamente vinculado a construções altas e esbeltas, porém estudos mostram a necessidade e importância da análise em edificações horizontais, como pontes, túneis e passarelas. Para lidar com a influência do vento em estruturas desse tipo, é importante considerar as incertezas decorrentes das diversas combinações de vento, conforme abordado por Yongle Li. Essas variações podem levar a diferenças significativas nos resultados. Portanto, é crucial empregar métodos eficazes que relacionem o vento com outras forças que afetam as estruturas (Li et al., 2019). Nos estudos realizados em estruturas de pontes ficam evidentes os aspectos dinâmicos que majoritariamente estão presentes e que influenciam nas respostas dinâmicas desse tipo de construção, como vibração, geometria esbelta, deslocamentos de picos, frequência etc., e em como esses parâmetros precisam ser considerados na etapa de dimensionamento dessas estruturas (Liu et al., 2022).

Outros elementos horizontais, como passarelas, também possuem importantes aspectos estáticos e dinâmicos, sendo importantes os trabalhos que validam e comparam os modelos teóricos, analíticos e números disponíveis nas etapas preliminares de projeto, como feito por Bandeira (Tadeu et al., 2022). Outras estruturas horizontais comumente analisadas são os túneis, os quais estão sujeitos a ações sísmicas, de vento e, em casos submersos, de água, onde estudos mostram que tais esforços influenciam significativamente nas respostas dinâmicas desse tipo de construção, como estudado por Wang, em que se conclui que tais parâmetros influenciam nas respostas transversais, sendo mais significativa que as longitudinais para esse tipo de estrutura (Wang; Jiang; Gao, 2019).

Dentre os estudos voltados especificamente para a resposta longitudinal, em se tratando de pontes, quando comparada com a resposta transversal, as normas não apresentam procedimentos de cálculo para a resposta longitudinal, logo, se tem estudos com sugestões de procedimento de cálculos para complementar as legislações vigentes (Carrion-Cabrera; Bruneau, 2022). O uso de equações para estimar a resposta longitudinal, ou seja, a resposta que se dá na mesma direção da incidência do vento, auxiliam no dimensionamento das estruturas, podem entender melhor seu comportamento, sua influência, até mesmo incentivar a criação de estratégias para atenuar a resposta, quando necessário.

Em outros elementos horizontais também se tem estudos sobre respostas dinâmicas, como análise de esforços em túneis, os resultados de Yang (2020) mostram a influência do tipo de terreno na resposta longitudinal, sendo menores em solos mais rígidos. Estudos em outros elementos horizontais, como vigas, ajudam a ampliar o entendimento sobre respostas dinâmicas, chegando em técnicas que preveem a excitação longitudinal mais facilmente, o que foi desenvolvido por Sorokin (2021) e Longxiang Ma (2019), até mesmo em teorias para análise de vibração que podem ser expandidas para outros elementos horizontais, como é o caso da teoria de Rayleigh-Love (Banerjee; Ananthapuvirajah; Papkov, 2020).

3.2 ESTRUTURAS VERTICAIS

As tendências da arquitetura contemporânea estão vinculadas a verticalização das estruturas, até mesmo como uma opção para melhor aproveitamento do solo, e criação de edifícios com formas geométricas únicas, trazendo autenticidade para cada estrutura. Conseqüentemente, a avaliação dos movimentos induzidos pelo vento nesse tipo de edificação se torna mais significativo e mais complexo, elevando também a necessidade de se pensar no impacto dessas modificações no conforto dos ocupantes. Além da altura da edificação, a geometria também pode auxiliar no desempenho aerodinâmico da edificação, a diminuição da área da seção transversal com o aumento da altura dos edifícios, levando a um efeito de afunilamento da estrutura, mostra um desempenho aerodinâmico maior do que estruturas retangulares, como mostrado por Li (2022). Além da altura e de suas configurações físicas, o uso de materiais, até então não muito utilizados para edificações esbeltas, também influencia o comportamento perante a ação do vento, por exemplo o uso de materiais leves.

A altura dos elementos e conjuntos estruturais influenciam outros indicadores, como quanto maior a altura, maior será o valor de coeficiente de resistência. A rigidez também desempenha um papel relevante em arranha-céus, ventos fortes causarão maiores respostas e a escolha de elementos construtivos que enrijeçam a estrutura, levam a um melhor desempenho no controle de vibrações e movimentações. Outro fator relevante, também decorrente da necessidade de aproveitar melhor o solo, está na presença de vizinhança, a interferência causada pela existência de edifícios próximos influencia diretamente nos esforços da estrutura analisado, como momentos, deslocamentos e pressão, aumentando significativamente os efeitos do vento nas faces laterais da edificação, conforme conclui Nagar (Nagar; Raj; Dev, 2022).

A dificuldade em prever as respostas de estruturas verticais sob ação do vento são evidentes ao se analisarem as normas e códigos internacionais, sendo um desafio aplicar uma metodologia de cálculo que sejam simples para a determinação da resposta dinâmica, principalmente para a resposta transversal. Um dos métodos que vem sendo analisados nas pesquisas é o uso de forças estáticas equivalentes, como feito no procedimento de cálculo de Davenport, o qual é capaz de estimar o efeito dinâmico nas estruturas de maneira simplificada e, ao mesmo tempo, tornando o dimensionamento mais fiel e seguro. Foram desenvolvidos por Castro (2015) e Quan (2012) novos equacionamentos capazes de determinar as respostas de edifícios super altos tendo uma boa correlação entre resultados relatados na literatura. Quando comparado os códigos normativos com ensaios em túnel de vento, ferramenta extremamente útil quando se estuda a ação do vento, se vê diferenças, como valores normativos abaixo da média dos dados do túnel, como mostrado por Holmes (2014), sendo muito mais vantajoso a união dessas duas ferramentas, simulações experimentais e códigos/normas de cálculo, fica claro a necessidade de estudos que unam e comparem os métodos normativos, experimentais e numéricos.

4 MÉTODO DA PESQUISA

4.1 PROPRIEDADES DO MODELO CAARC

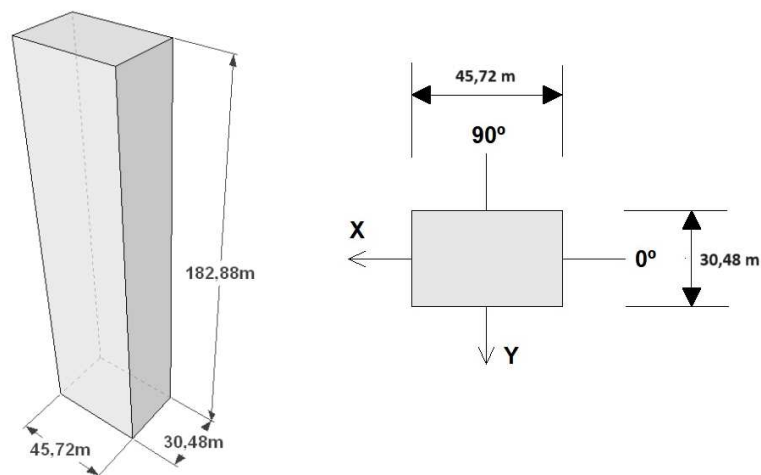
O edifício selecionado para a realização das comparações é considerado um modelo padronizado denominado *CAARC* do Conselho de Pesquisa Aeronáutica, *Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council*, (Melbourne, 1980). Nesse encontro criou-se esse modelo, com dimensões padronizadas, para que se estabeleça um padrão entre os futuros trabalhos, desse modo ganha-se a facilidade entre comparar diferentes técnicas de ensaios.

Para o edifício em questão tem-se acesso a diversos trabalhos realizados anteriormente com resultados disponíveis na literatura. O modelo *CAARC* vem sendo utilizado em estudos que utilizam ensaios de simulação da ação do vento natural em túneis de vento (Tanaka; Lawen, 1986) (Melbourne, 1980), realizando comparações aerodinâmicas desse edifício sob ação do vento em simulações em túnel de vento.

4.1.1 Propriedades geométricas

O formato do edifício trata-se de um prisma retangular com as dimensões 30,48m por 45,72m, sua altura é de 182,88m. O *CAARC* não possui nenhum detalhe geométrico, tendo todas as suas superfícies lisas e horizontais (Figura 8).

FIGURA 8 – Edifício padronizado alto a ser analisado



Fonte: Vieira (2016) (Adaptado).

4.1.2 Propriedades dinâmicas

Para a determinação de suas propriedades dinâmicas, tem-se algumas ponderações, como utilizar apenas o modo fundamental de vibração do modelo, sendo a forma modal dessa tomada considerada como linear e girando em torno de um ponto no nível do terreno. A sua frequência natural é definida como 0,2 Hz em torno dos eixos x e y, os quais são posicionados na base do edifício, ou seja, no nível do terreno, sendo a sua frequência um valor já padronizado na literatura. O amortecimento estrutural, relacionado a partir da razão de amortecimento crítico, deve ser 1%. Sua massa é uniforme, com massa específica de 160 kg/m³.

Outros parâmetros que se podem determinar são os momentos de inércia de massa do edifício. Os momentos de inércia de massa em torno dos eixos da base, eixos x e y, de um edifício com características geométricas de um prisma retangular, são determinados pelas equações 66 e 67, respectivamente:

$$I_{mx} = \frac{1}{12} m (b^2 + c^2) + m \left(\frac{c}{2}\right)^2 \quad (66)$$

$$I_{my} = \frac{1}{12} m (a^2 + c^2) + m \left(\frac{c}{2}\right)^2 \quad (67)$$

Sendo, m , a massa total do modelo, [kg]; a , lado maior da base, 45,72 m; b , lado menor da base, 30,48 m; e c , altura, 182,88 m.

A massa total do modelo CAARC é determinada pela relação entre as dimensões de base e altura do edifício, juntamente com sua massa específica (ρ), sendo $m = 40.776,26$ t.

Substituindo os valores nas equações 66 e 67, tem-se o momento de inércia de massa em relação ao eixo x, $= 457.745.476,00$ tm², e o momento de inércia de massa em relação ao eixo y, $I_{my} = 461.691.558,00$ tm², respectivamente.

As rigidezes rotacionais podem ser obtidas para os eixos x e y a partir do proposto por Thomson (1978), essa propriedade é utilizada para determinar frequência de vibração de osciladores mecânicos, como vigas rotuladas em uma extremidade e livres na outra, podendo ser usada no

cálculo da rigidez rotacional do modelo ensaiado. Seu cálculo é feito pela relação apresentada na Equação 68:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{\theta}}{I_m}} \quad (68)$$

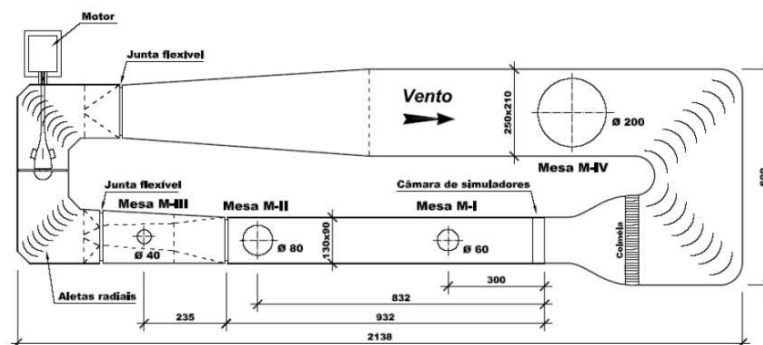
Sendo, f , a frequência de vibração em torno do eixo considerado, [Hz]; k_{θ} , rigidez rotacional em torno do eixo considerado, [Nm/rad]; I_m , momento de inércia de massa do modelo acoplado à base, em relação ao eixo considerado, [kgm²].

Com a frequência sendo 0,2 Hz para os dois eixos, os momentos de inércia de massa já determinados anteriormente para cada eixo, logo, o valor da rigidez em relação ao eixo x, a partir da Equação 42, é $k_{\theta x} = 723$ GNm/rad, e o valor da rigidez em relação ao eixo y é $k_{\theta y} = 729$ G Nm/rad.

4.2 ENSAIO NO TÚNEL DE VENTO *PROFESSOR JOAQUIM BLESSMANN*

Os ensaios foram realizados por Vieira (2016), ensaios na mesa M-II do Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). O túnel de vento é de circuito fechado, tendo sido projetado para ensaios de modelos da construção civil, para análises estáticas e dinâmicas. Na Figura 9 está apresentado um esquema do túnel de vento com suas dimensões.

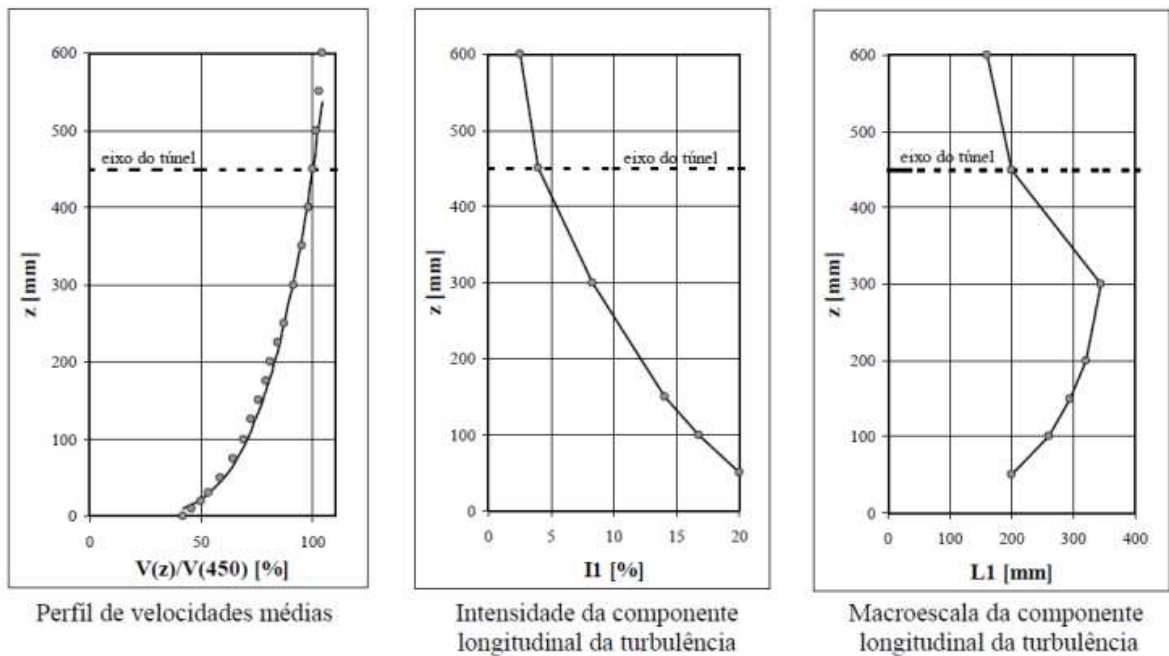
FIGURA 9 - Circuito aerodinâmico do Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann (Medidas em cm)



Fonte: Vieira (2016).

Para os ensaios de todas as vizinhanças propostas foi considerado um vento do tipo deslizante e turbulento com perfil potencial de velocidade média com expoente $p = 0,23$. As características deste vento simulado no ensaio são apresentadas na Figura 10. Este expoente corresponde a ventos com características de terreno entre as Categorias III e IV da NBR 6123, isto é, terrenos com obstáculos numerosos e pouco espaçados, como situações encontradas em cidades pequenas e seus arredores ou subúrbios construídos de grandes cidades. Esta situação foi obtida com a inserção da grelha 54 para o expoente escolhido associada a um conjunto de blocos colocados no piso do túnel conforme apresentado nas Figuras 11 e 12.

FIGURA 10 - Características do vento deslizante e turbulento simulado com expoente $p = 0,23$



Fonte: Vieira (2016).

FIGURA 11 - Blocos de piso utilizados para simulação da rugosidade do terreno durante os ensaios



Fonte: Vieira (2016).

FIGURA 12 - Grelhas utilizadas para simulação do perfil do vento durante os ensaios

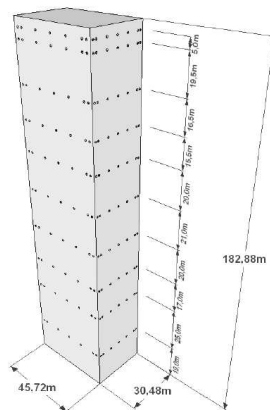


Fonte: Vieira (2016).

O ensaio foi realizado com o modelo do edifício padrão CAARC, baseado nas mesmas características dinâmicas já aqui apresentadas na seção 3.1. O edifício teve suas quatro fachadas divididas em dez zonas em cotas diferentes, onde cada uma tinha 7 pontos de tomada de pressão totalizando 280 pontos, como mostrado nas Figuras 13 e 14.

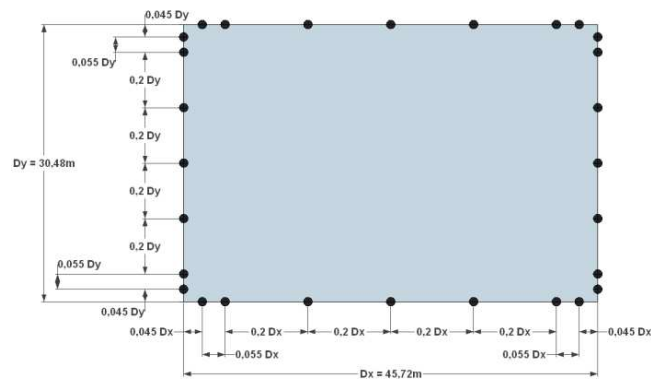
Foram realizadas leituras por um equipamento de aquisição simultânea de pressões flutuantes para cada direção de vento estudado, durante os ensaios foram feitas 8192 leituras de pressão por tomada, em um período de 16s. A escolha do período de 16 s é que para o ensaio 16 s de análise do modelo correspondem a 1 hora do vento na edificação real. Por sua vez, considera-se que um intervalo de tempo típico para a consideração do maior valor provável de esforço é de 1 hora (Blessmann, 2005).

FIGURA 13 – Distância vertical dos pontos de tomada de pressão



Fonte: Vieira (2016) .

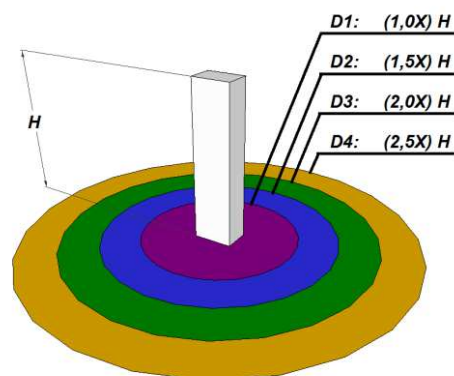
FIGURA 14 – Distância em nível dos pontos de tomada de pressão



Fonte: Vieira (2016).

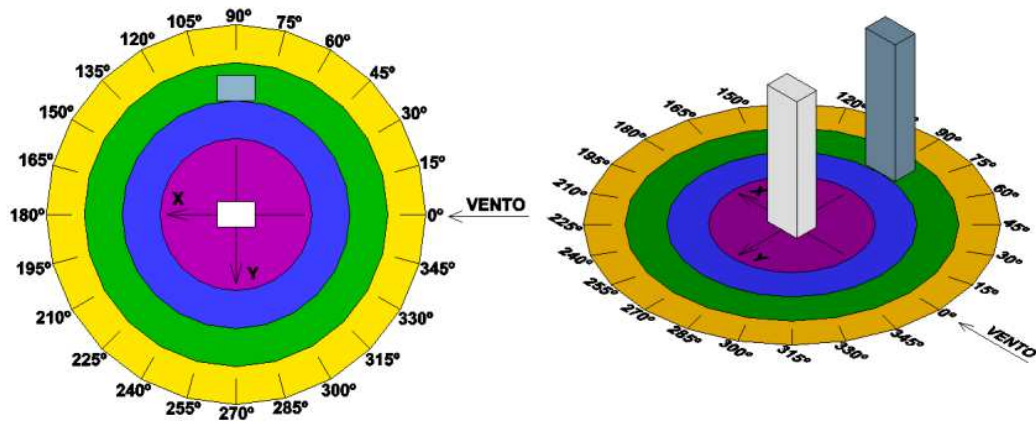
Foram realizados por Vieira o ensaio em túnel de vento para situações do edifício CAARC com vizinhança, e para cada uma das situações foram analisadas em 4 distâncias do CAARC para seus vizinhos. Na Figura 15 está representado as 4 distâncias adotadas, cada uma representada por um dos círculos marcados na imagem. Nas Figuras 16, 17 e 18 estão apresentadas as 3 primeiras situações analisadas por Vieira (2016) nomeadas como V1, V2 e V3. Na situação V1 (Figura 16) o edifício vizinho está alinhado com a maior dimensão no edifício CAARC, para a situação V2 (Figura 17) o edifício vizinho está alinhado em 30° com o CAARC e na situação V3 (Figura 18) o alinhamento é 45° em relação ao edifício CAARC.

FIGURA 15 – Distâncias adotadas para o posicionamento da vizinhança no ensaio de túnel de vento



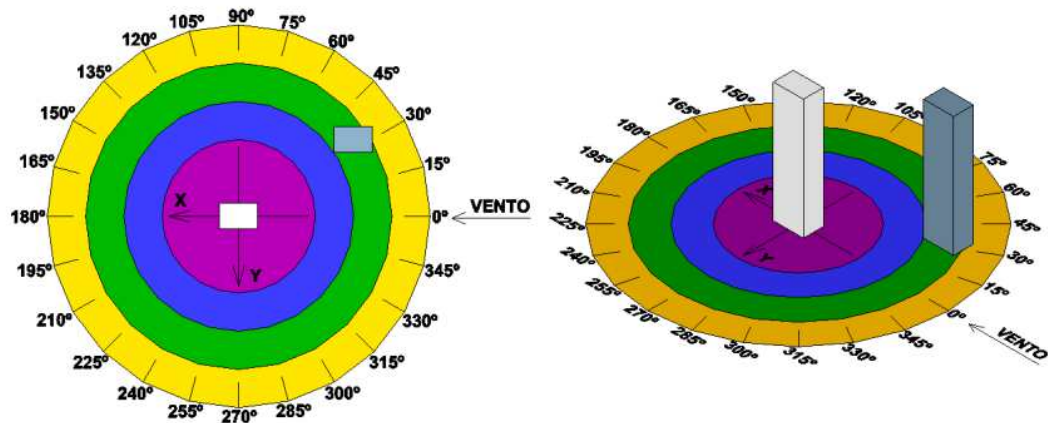
Fonte: Vieira (2016) .

FIGURA 16 – Vizinhança V1 em planta e em perspectiva



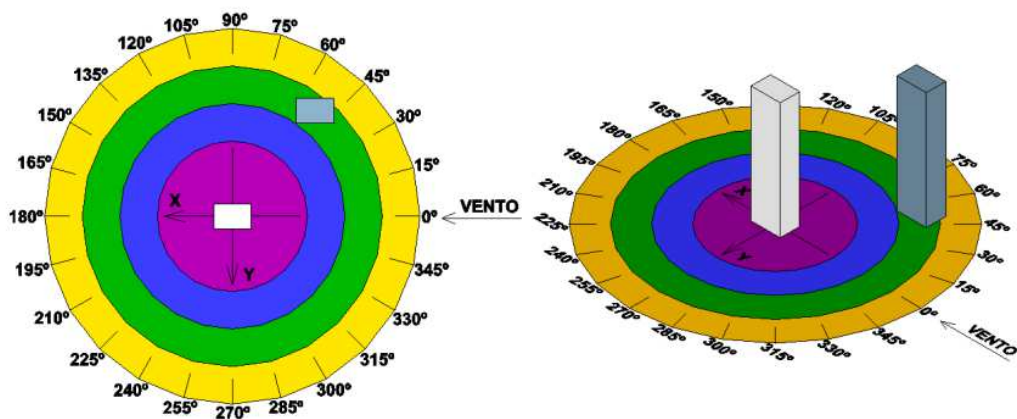
Fonte: Vieira (2016).

FIGURA 17 – Vizinhança V2 em planta e em perspectiva



Fonte: Vieira (2016).

FIGURA 18 – Vizinhança V3 em planta e em perspectiva



Fonte: Vieira (2016).

4.3 PROCEDIMENTOS PARA RESULTADOS ESTÁTICOS

4.3.1 *Dados brutos*

Ao final do ensaio para cada situação analisada se tem arquivos com as pressões lidas em cada uma das 8192 leituras realizadas do modelo. No caso de Vieira (2016) foram analisados diferentes ângulos de incidência do vento, no presente trabalho foram analisadas apenas dois ângulos de incidência do vento, 0° e 90°, considerados pela norma brasileira de vento como as duas direções principais do vento. Logo, para cada posição da vizinhança em cada distância analisada foi analisado dois arquivos de pressões.

4.3.2 *Correção das tomadas substituídas*

No ensaio de Vieira (2016) foram lidos 282 pontos, ao invés de 280, isso se deve a tomadas que apresentaram defeitos durante o ensaio, logo, se fez necessário substituir 2 pontos do ensaio. A substituição desses 2 pontos também foi implementada na rotina.

Primeiro foi lido todos os dados brutos pela rotina computacional e analisado quais pontos apresentaram mais tomadas repetidas, tal característica indica que o ponto pode ter apresentado defeito durante o ensaio, não registrando as possíveis flutuações das pressões que devem ocorrer oriundo da aleatoriedade das rajadas do vento. Uma vez identificados os 2 pontos com mais pressões repetidas, se faz a substituição pelos pontos corrigidos.

4.3.3 *Correção das tomadas com defeito*

Além das tomadas substituídas devido a sua identificação durante o ensaio, pode ocorrer erros que só serão detectados posteriormente na análise dos dados. Ao analisar os dados brutos de pressão é possível constatar valores dispersos dos demais obtidos para um mesmo ponto, nesses casos realiza-se uma média das pressões vizinhas para corrigir esse valor variante.

4.3.4 *Correção de bloqueio*

Como dito anteriormente, das 8 situações de vizinhança analisados por Vieira (2016) apenas 3 foram trabalhadas no presente estudo devido ao problema de bloqueio. Ao analisar mais de um edifício em túnel de vento é preciso se atentar ao fator de bloqueio, onde a soma das áreas de projeção dos edifícios no sentido de incidência do vento não deve ser maior que 10% da seção do túnel de vento.

Para bloqueios até 5% não é necessário realizar nenhuma correção nos valores obtidos no ensaio. Para bloqueios de 5 a 10%, de acordo com Barlow et al. (1999), esta correção pode ser determinada pela Equação 69:

$$q_b = q \left(1 + \frac{1}{4} \frac{A_b}{A_t} \right)^2 \quad (69)$$

Sendo q_b a pressão dinâmica corrigida pelo bloqueio, q é a pressão dinâmica medida na altura do modelo do edifício, a área de bloqueio, A_b , é a soma das áreas frontais efetivas dos modelos (“área de sombra”), e A_t é a área da seção de teste do túnel de vento.

4.3.5 Forças resultantes

Para organização e manipulação dos dados brutos utilizou-se uma rotina computacional, fornecida pelo Professor Thiarly Feitosa Afonso de Lavôr, em que se entra com os arquivos brutos vindos do ensaio e se obtém as forças instantâneas do vento atuante em cada ponto do modelo. Para essa transformação de pressão em força utilizou-se a Equação 70:

$$F_i(t) = p_{e,i}(t)A_i u_i \quad (70)$$

Sendo, $F_i(t)$ é o vetor de forças instantâneas na tomada i ; $p_{e,i}(t)$ é a série temporal das pressões medidas; A_i é a área de influência; e u_i é o vetor normal unitário.

Para considerar todas as tomadas obtidas no ensaio, a força resultante instantânea será o somatório da força instantânea da equação anterior, como mostrado nas Equações 71 e 72:

$$F_x(t) = \sum_{i=1}^n F_{x,i}(t) \quad (71)$$

$$F_y(t) = \sum_{i=1}^n F_{y,i}(t) \quad (72)$$

As Equações 70, 71 e 72 foram implementadas na rotina para obtenção das forças resultantes.

4.4 PROCEDIMENTOS PARA RESULTADOS DINÂMICOS

Após a obtenção das forças estáticas pela rotina computacional, aplica-se o HFPI, método que permite determinar a resposta dinâmica de sistemas estruturais. O método usa as forças obtidas da integração de pressões oriundas do ensaio em túnel de vento.

4.4.1 Rotina computacional

Implementou-se o método HFPI, a uma rotina computacional, fornecida pelo Professor Thiarly Feitosa Afonso de Lavôr, capaz de realizar a leitura dos resultados estáticos obtidos na rotina anterior e efetuar os equacionamentos indicados anteriormente, como resultado, se tem os deslocamentos e esforços dinâmicos aos quais o CAARC está sujeito. Na rotina computacional foi implementado todo o equacionamento indicado na seção 2.2 do presente trabalho.

4.4.2 Parâmetros da rotina

Na rotina computacional é necessário estabelecer alguns parâmetros relacionados com a edificação que está sendo analisada, na Figura 19 é possível verificar os parâmetros que foram inseridos na rotina para caracterizar o CAARC.

FIGURA 19 – Propriedades do CAARC

Rugosidade do terreno (p)	0,23
Categoria de rugosidade (ABNT NBR 6123:1988)	IV
Menor dimensão do CAARC (m)	30,48
Maior dimensão do CAARC (m)	45,72
Altura do CAARC (Hz) (m)	182,88
Velocidade no túnel de vento (m/s)	26,00

4.4.3 Validação da rotina

4.4.3.1 Edifício isolado

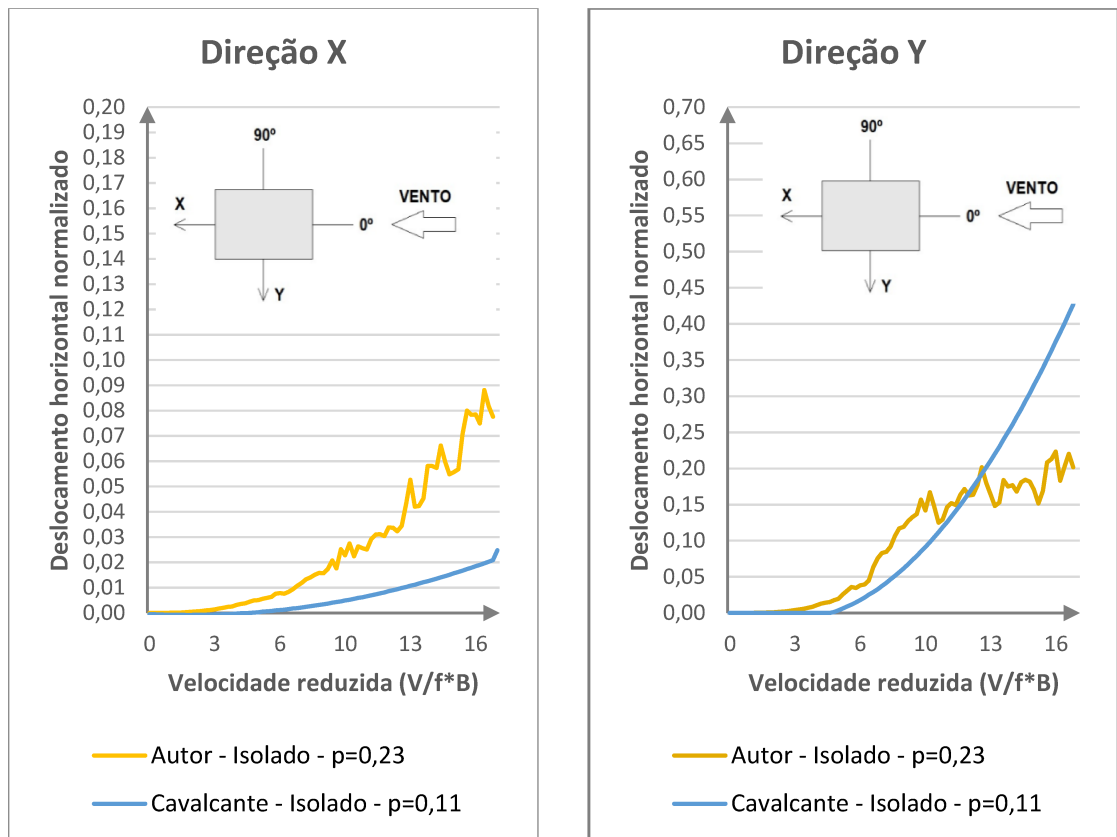
O primeiro procedimento a se fazer com a rotina computacional adotada é a sua validação, ou seja, verificar se os resultados produzidos por ela estão coerentes. Para tal objetivo faz-se uma comparação com resultados de trabalhos similares, no presente trabalho se comparou o deslocamento flutuante para as direções X e Y com vento incidindo a 0° obtido pelos cálculos realizados com os resultados de Cavalcante (2020). A comparação foi feita entre o deslocamento normalizado para cada direção, ou seja, o deslocamento dividido pela menor dimensão da edificação, em relação a velocidade reduzida, sendo a velocidade normalizada com as dimensões da edificação de modo a permitir comparação com outros trabalhos (Figura 20). Os resultados apresentados na Figura 20 mostram que os deslocamentos são diferentes, porém convergentes, apresentando tendências similares. Vale ressaltar a diferença na rugosidade analisada em cada estudo, Cavalcante utiliza p igual a 0,11 e 0,26 enquanto no presente trabalho foi considerado 0,23. Cavalcante também utiliza o método balança dinâmica de três graus de liberdade (BD3GDL), enquanto o presente trabalho utilizou os dados encontrados por meio do método do HFPI. Os dois métodos utilizam o túnel de vento. Logo, pela convergência na tendência dos valores de deslocamentos, tem-se a validação da rotina.

4.4.3.2 Edifício com vizinhança (V1)

Para a validação dos resultados obtidos para os valores com vizinhança comparou-se os deslocamentos horizontais normalizados no topo do modelo na direção transversal com o vento incidente a 90° para a configuração V1 com os resultados de Bênia (2013), novamente se trabalha com os resultados normalizados (Figuras 21 e 22). Também se considerou os resultados

das diferentes distâncias, entre edifício isolado e vizinho, analisadas, no presente trabalho a posição mais próxima entre edifícios se dá em D1, e a mais distante em D4. O mesmo ocorre no trabalho de Bênia, em que, como indicado na legenda, Cia corresponde ao menor distanciamento, aumentando gradativamente até chegar em Cif que seria a maior distância entre edifícios.

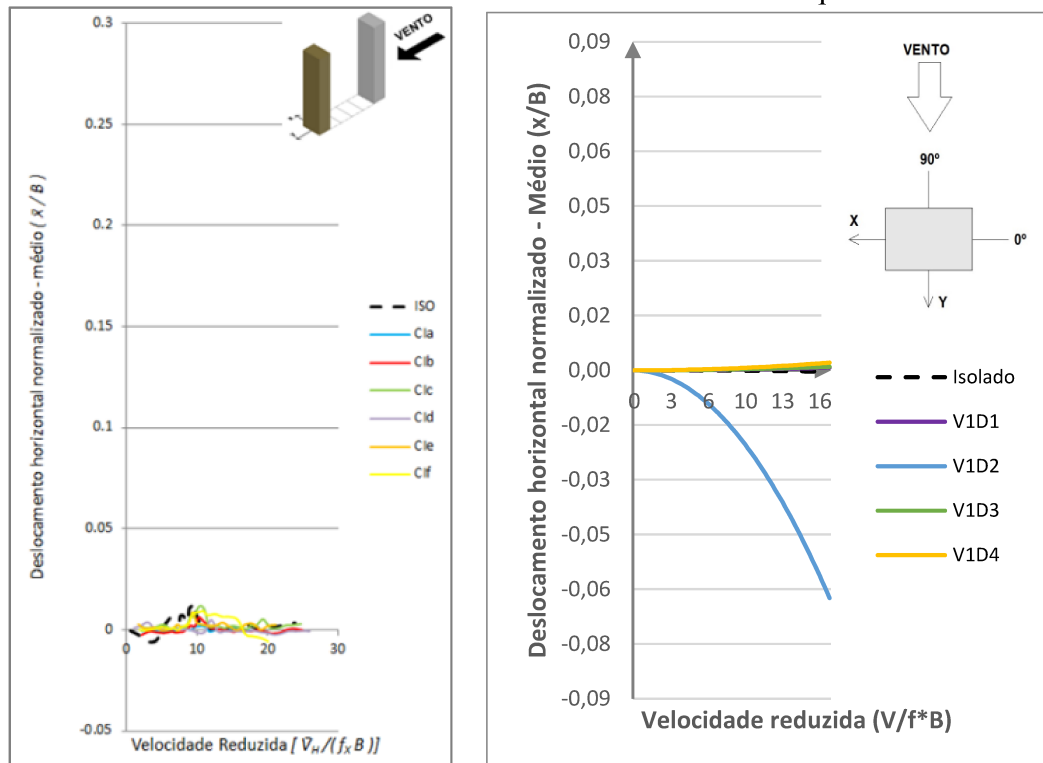
FIGURA 20 – Deslocamento flutuante, médio e desvio padrão, para as direções X e Y para vento a 0°



a) Deslocamento horizontal normalizado em X, com vento incidindo a 0°, em amarelo obtido pelo autor, e em azul adaptado de Cavalcante.

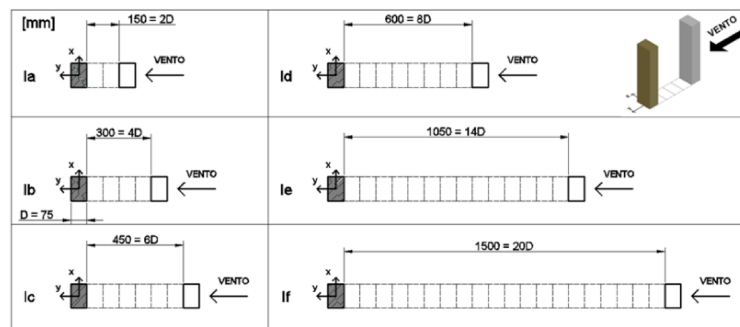
b) Deslocamento horizontal normalizado em Y, com vento incidindo a 0°, em amarelo obtido pelo autor, e em azul adaptado de Cavalcante.

FIGURA 21 – Deslocamento horizontal normalizado médio transversal para vento a 90°

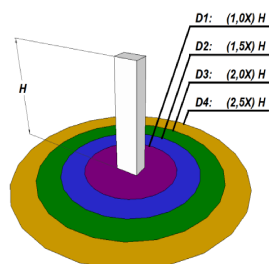


a) Deslocamento horizontal normalizado em Y, com vento incidindo a 90°, obtidos por Bênia

b) Deslocamento horizontal normalizado em Y, com vento incidindo a 90°, obtidos pelo autor



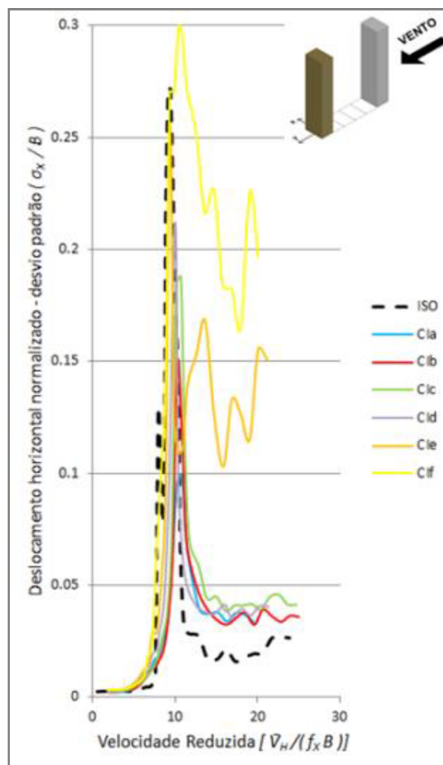
c) Afastamentos entre edifício analisado e vizinho utilizados por Bênia citados no gráfico a)



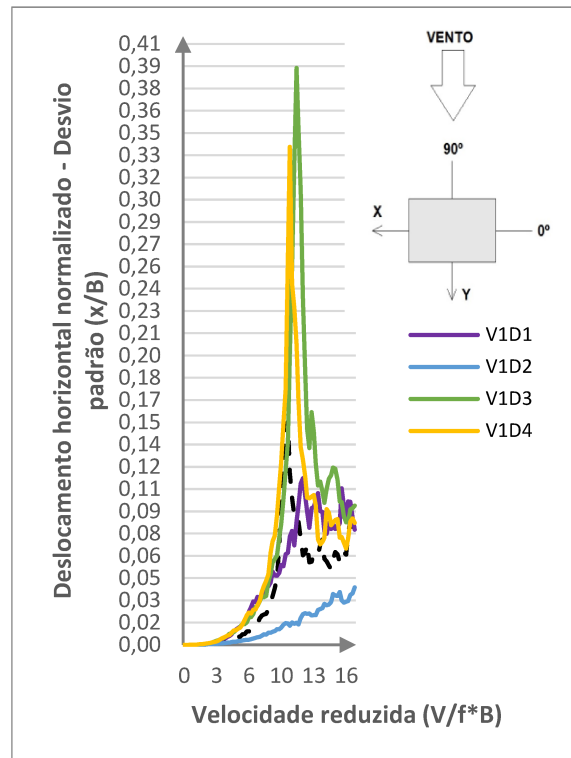
d) Afastamentos entre edifício analisado e vizinho utilizados pelo autor citados no gráfico b)

Fonte: Bênia (2013) (adaptado).

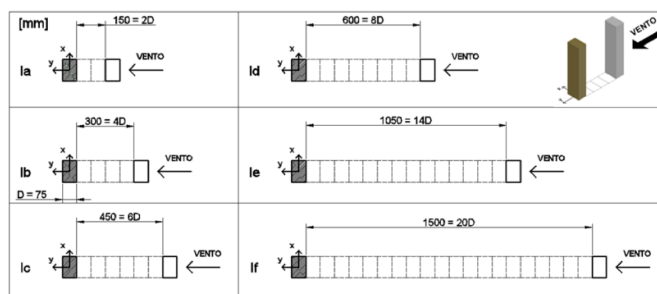
FIGURA 22 – Desvio padrão do deslocamento horizontal normalizado transversal para vento a 90°



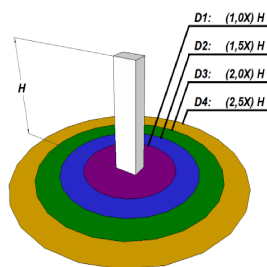
a) Desvio padrão do deslocamento horizontal normalizado em Y, com vento incidindo a 90°, obtidos por Bênia



b) Desvio padrão do deslocamento horizontal normalizado em Y, com vento incidindo a 90°, obtidos pelo autor



c) Afastamentos entre edifício analisado e vizinho utilizados por Bênia citados no gráfico a)



d) Afastamentos entre edifício analisado e vizinho utilizados pelo autor citados no gráfico b)

Fonte: Bênia (2013) (adaptado).

Para a comparação dos resultados vale algumas ressalvas, no trabalho de Bênia é utilizado o método balança dinâmica de três graus de liberdade (BD3GDL), a rugosidade (p) analisada é 0,11 e a autora optou por não fazer as correções de bloqueio dos resultados. Mesmo com tais diferenças é possível verificar que os resultados são convergentes, podendo analisar que, para ambos, o desvio padrão é maior quando o edifício vizinho está mais distante do edifício analisado. Outra observação é acerca dos resultados para a situação V1D2, tal distância é a única que apresenta resultados que fogem da tendência dos demais, levando a crer que possa ter ocorrido algum erro nos dados brutos oriundos do ensaio de túnel de vento, ou até mesmo que tal situação seja um ponto delicado de estudo, necessitando de novas análises. Novamente, pela convergência na tendência dos valores de deslocamentos, tem-se a validação da rotina.

4.4.4 Cálculo de forças e momentos para o edifício isolado

O edifício isolado é analisado para que sirva de comparação com as demais situações a serem analisadas, obtendo assim o fator de interferência da vizinhança sobre o mesmo. Além da análise da vizinhança, o presente estudo se propôs nesse tópico em analisar os esforços longitudinais (forças e momentos), da edificação isolada comparando diferentes métodos, sendo eles: norma brasileira de vento em vigor (2023), norma brasileira de vento antiga (1988), método de Davenport, método do Eurocode e HFPI. Todos os procedimentos de cálculo dos métodos que serão analisados foram descritos no capítulo 2 do presente trabalho.

4.4.5 Procedimentos com edifício vizinhos

Para a análise de edifício vizinho foi considerado as situações V1, V2 e V3 como mostrado nas Figuras 16, 17 e 18. As análises foram feitas com o intuito de verificar o fator de vizinhança, ou seja, conferir qual o efeito o edifício vizinho tem sobre os esforços do edifício analisado, para isso se faz a razão do esforço do edifício analisado na presença do edifício vizinho, nesse caso trabalhando com as forças, e esforço do edifício analisado em situação isolada, valores maiores que 1 indicam que a presença de vizinhança pode levar ao aumento dos esforços da edificação a ser avaliada, por sua vez, valores menores que 1 indicam uma situação de proteção, ou seja, a vizinhança atenuam os esforços do vento na construção analisada.

Outra característica a ser analisada é a interferência da distância da vizinhança em relação ao edifício que está sendo analisado. Para cada uma das situações analisadas foram realizados 4

ensaios, em que o edifício vizinho começa mais próximo ao avaliado, distância denominada D1, e vai se afastando mais 3 vezes, distâncias D2, D3 e D4, sendo D4 a maior distância, conforme indicado na Figura 12 anteriormente.

4.4.6 Cálculo do fator de vizinhança pela ABNT NBR 6123:2023

Para a determinação do fator de vizinhança pela norma brasileira de vento seguiu-se o procedimento de cálculo indicado no tópico 2.2 do presente trabalho. Seguindo as orientações da norma, obteve-se os seguintes resultados mostrados na Tabela 3:

Tabela 3. Procedimento de cálculo do fator de vizinhança pela norma brasileira de vento

		Observações
a (m)	45,72	Maior dimensão da edificação em planta
b (m)	30,48	Menor dimensão da edificação em planta
semidiagonal	27,47	Valor calculado pela equação 11
d*	27,47	Menor valor entre <i>b</i> e <i>semidiagonal</i>
h (m)	182,88	Altura do edifício
s_D1 (m)	182,88	Primeira distância analisada
s_D2 (m)	274,32	Segunda distância analisada
s_D3 (m)	365,76	Terceira distância analisada
s_D4 (m)	457,20	Quarta distância analisada
s/d*_D1	6,66	Relação s/d* para a primeira distância analisada
s/d*_D2	9,98	Relação s/d* para a segunda distância analisada
s/d*_D3	13,31	Relação s/d* para a terceira distância analisada
s/d*_D4	16,64	Relação s/d* para a quarta distância analisada

Para relações s/d^* acima de 3,00, de acordo com a norma brasileira de vento, o fator de vizinhança (FV) é 1,00, ou seja, não é necessário majorar os esforços na consideração de edifícios vizinhos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 EDIFÍCIO ISOLADO

A seguir, Figuras 23 e 24, são apresentados os resultados obtidos do edifício isolado em comparação ao procedimento de cálculo descrito anteriormente, item 4.4.4.

Em relação aos resultados obtidos pelo procedimento da norma brasileira de vento em vigor e sua versão antiga, para os esforços estáticos não houve mudanças, o impacto mais significativo está no fator de amplificação dinâmica, o qual passou de 1,40 para 2,40 no edifício analisado, levando, conseqüentemente, ao aumento dos esforços flutuantes (dinâmicos) e esforços totais, válido para as duas direções analisadas.

Para os esforços estáticos da norma, em ambas as versões, para as duas direções do vento, é possível notar que a norma brasileira apresenta valores inferiores aos outros métodos, cerca de 4% abaixo dos resultados de Davenport e 73% em relação ao HFPI. Já em relação aos esforços flutuantes a nova versão da norma apresenta valores superiores aos demais, sendo cerca de 17% acima do HFPI, 20% em relação a norma antiga e 71% em relação a Davenport. Já em relação aos esforços totais, mesmo com o aumento do esforço flutuante na versão atualizada, a norma permanece abaixo dos resultados encontrados pelo Eurocode e método HFPI, ficando próximo apenas do método de Davenport.

Em relação ao método de Davenport, para ambas as direções do vento, os esforços estáticos ficam próximos aos resultados da norma brasileira de vento, variando apenas 4%. Já para os esforços flutuantes, o método apresenta boa proximidade aos resultados pelo HFPI, variando apenas 2,5%. Para os esforços totais, Davenport indica resultados baixos, ficando, por vezes, abaixo das respostas apresentadas pela norma brasileira de vento vigente.

O método proposto pelo Eurocode calcula apenas os esforços totais atuantes na edificação, em relação as solicitações totais tal método gera esforços bem acima dos demais métodos aqui analisados, podendo haver alguma diferença significativa em adaptar os coeficientes tabelados no Eurocode para as condições dos países europeus para a situação brasileira. Os resultados do Eurocode apresentam valores maiores que o dobro da norma vigente, e até 53% maiores que a

norma em sua versão atualizada, em comparação ao HFPI também apresenta valores maiores em até 56%.

O ensaio em túnel de vento é considerado como a forma mais certa de estimar os esforços aos quais a edificação estará sujeita, utiliza-se o método HFPI para determinar tais esforços. Em relação aos esforços estáticos, o HFPI apresenta valores superiores ao Davenport, uma diferença de aproximadamente 33%, e ao método normativo brasileiro, cerca de 61% de diferença para a versão vigente da norma. Para os esforços flutuantes, o HFPI apresenta boa similaridade a Davenport, diferença de aproximadamente 2,5%, ficando abaixo apenas da versão atualizada da norma brasileira. Por fim, para os esforços totais, o método HFPI fica abaixo apenas do Eurocode, cerca de 56%. Diante disso, em comparação do HFPI para os demais métodos, é possível perceber que a nova versão da norma brasileira é a que mais se aproxima ao HFPI, diferença inferior a 2%, mesmo assim ficando abaixo dos resultados gerados a partir do ensaio de túnel de vento.

FIGURA 23 – Esforços longitudinais com vento a 0°

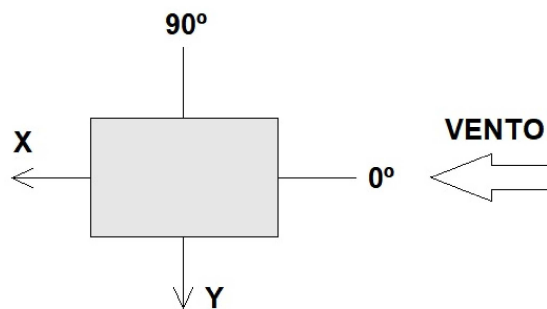
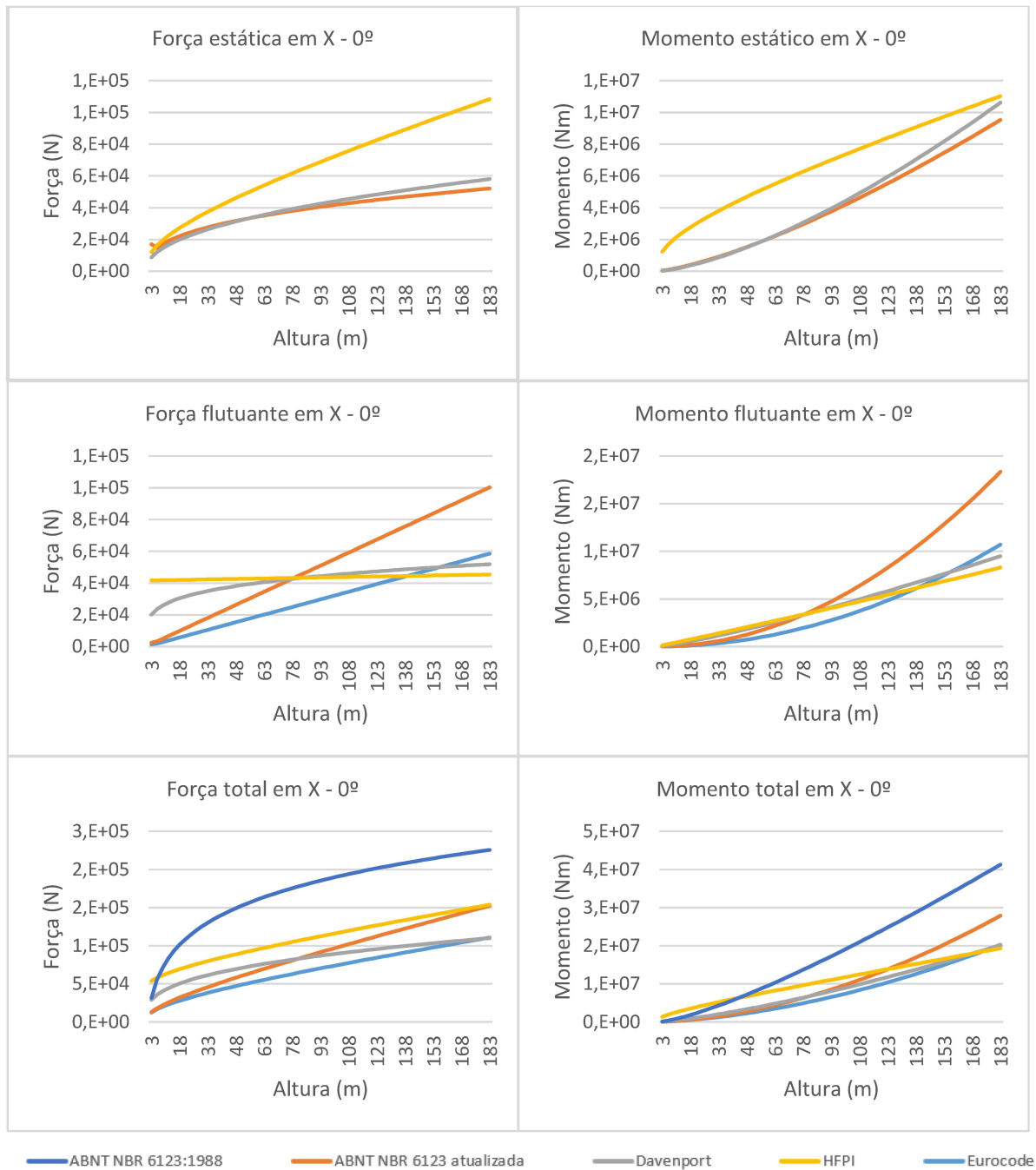
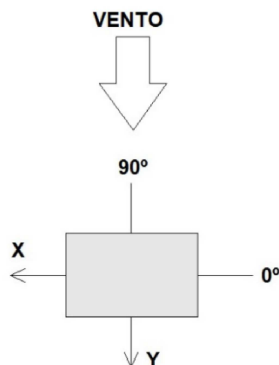
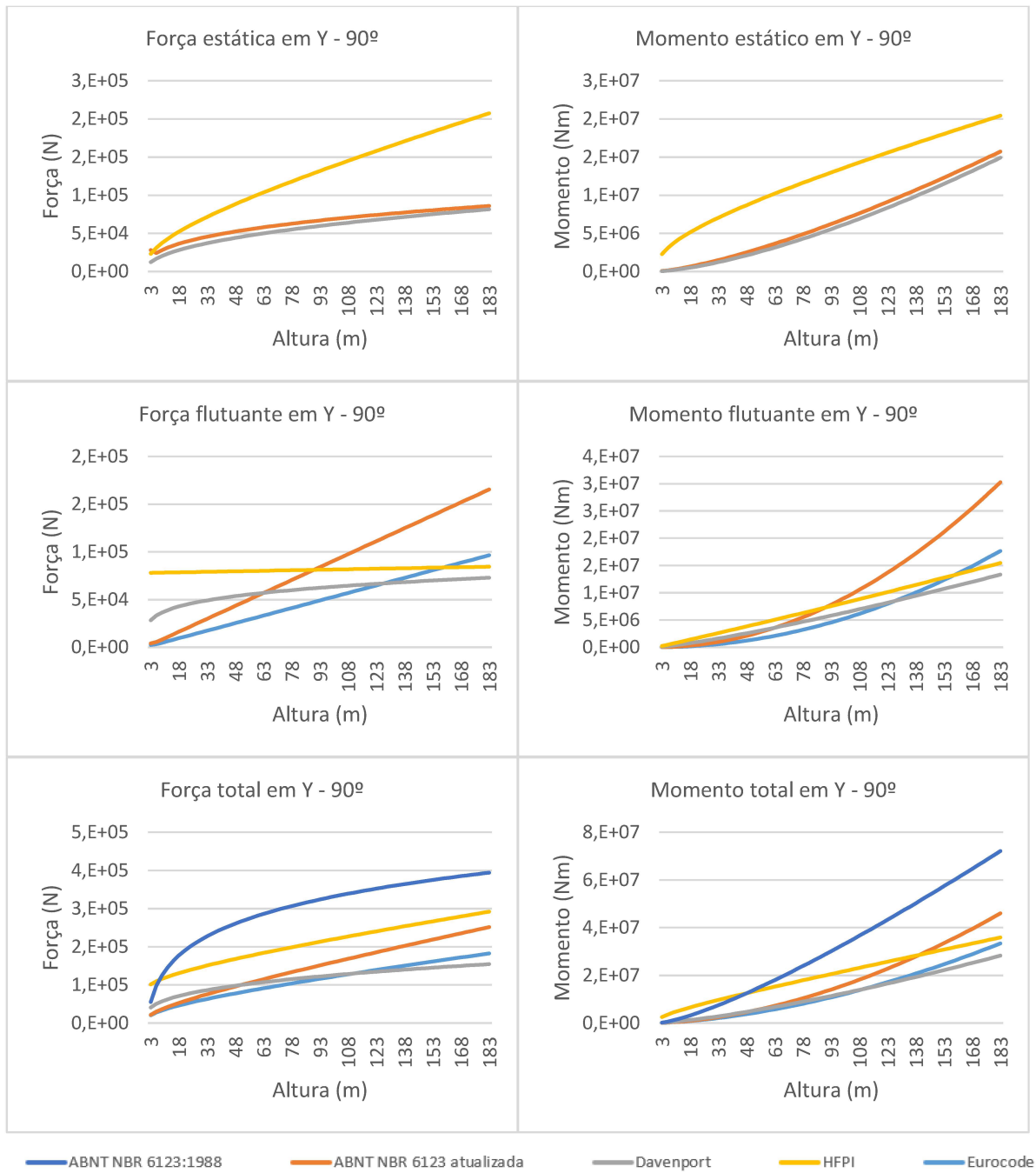


FIGURA 24 – Esforços longitudinais com vento a 90°



5.2 EDIFÍCIO COM VIZINHANÇA

A seguir, Figuras 25 e 26, são apresentados os resultados de fator de vizinhança para as situações analisadas, os valores são apresentados no Anexo A. Os resultados apresentados correspondem ao fator de interferência, ou fator de vizinhança (FV), comumente indicado em inglês como *interference factor* (IF), para as situações V1, V2 e V3 com ventos a 0° e 90°, sendo valores considerando o fator de vizinhança médio e o RMS, ou seja, o desvio padrão, em que considera a variação das flutuações. Vale ressaltar que quando se trabalha com respostas transversais, os resultados mais coerentes são os valores RMS, uma vez que a resposta do edifício isolado para a direção transversal é muito próxima de zero, conseqüentemente, o IF fica elevado. Por conseqüência, optou-se por apresentar, quando se trata de resposta longitudinal, o resultado médio e para resposta transversal os resultados RMS.

Nota-se que a resposta longitudinal para a direção 0° de incidência do vento, resposta na direção X, sofreu pouca alteração em relação a posição do edifício vizinho mantendo, para as 3 situações o valor do fator de vizinhança próximo de 1,40. Para a resposta transversal a 0°, resposta na direção Y, é possível notar uma alteração nos resultados, em que o edifício vizinho alinhado com o edifício analisado (situação V1) levou a valores mais altos do fator de vizinhança, ou seja, um aumento nos esforços do edifício principal.

Nos resultados da situação V1D2, em ambas as direções, a tendência é diferente ao das demais situações avaliadas, o que leva a crer que nos dados brutos do ensaio de túnel de vento, para essa situação, possa ter ocorrido algum erro que leva a distorção dos resultados, ou até mesmo que a distância considerada nessa configuração seja um ponto sensível de estudo, em que se tenha valores distorcidos dos demais. Diante dos resultados, seria necessário refazer os ensaios para essa situação para que se comprove os valores de dados brutos obtidos. Optou-se por não serem apresentados os resultados da situação em questão nos gráficos a seguir.

FIGURA 25 – Fator de vizinhança com vento a 0°

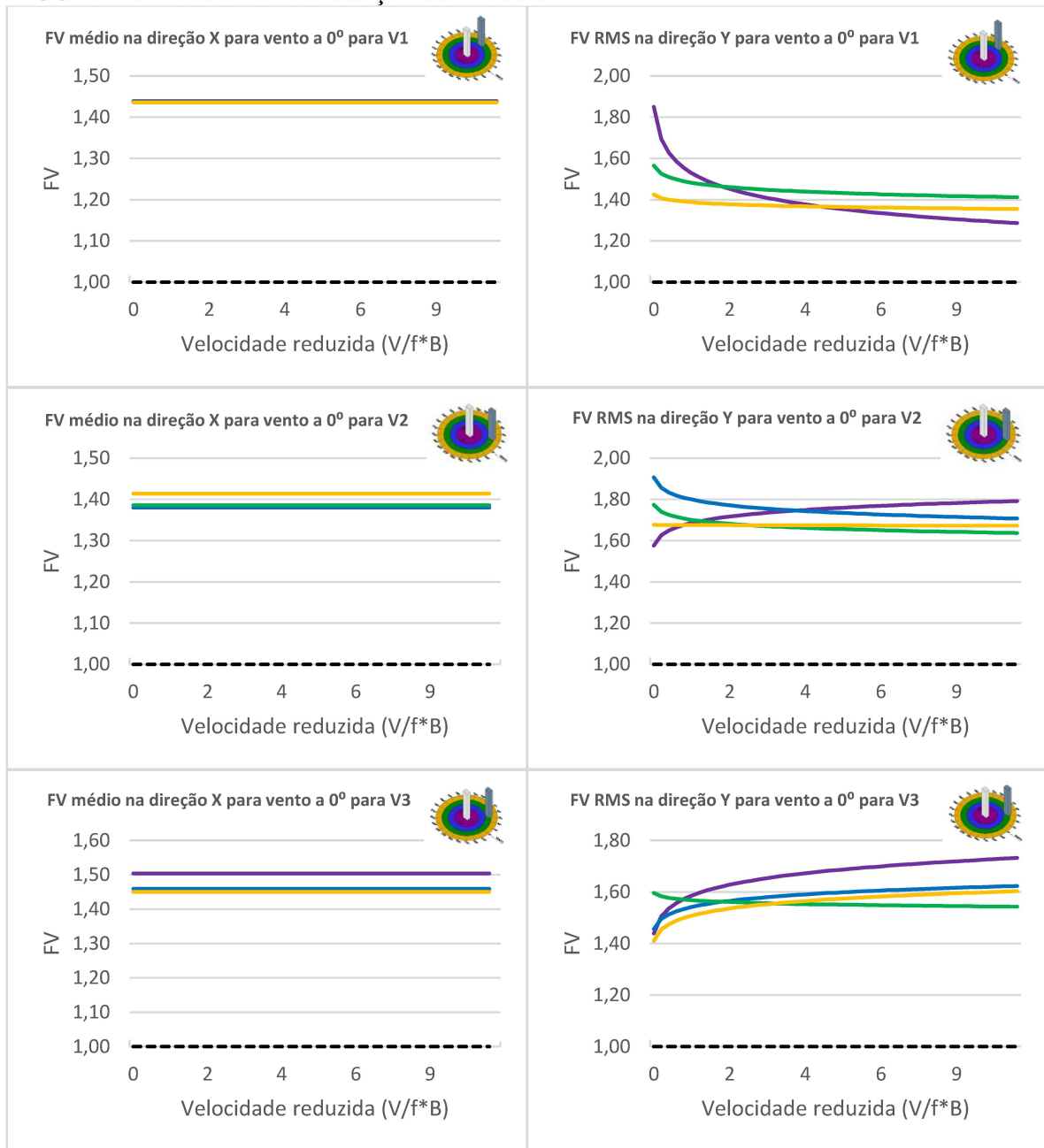
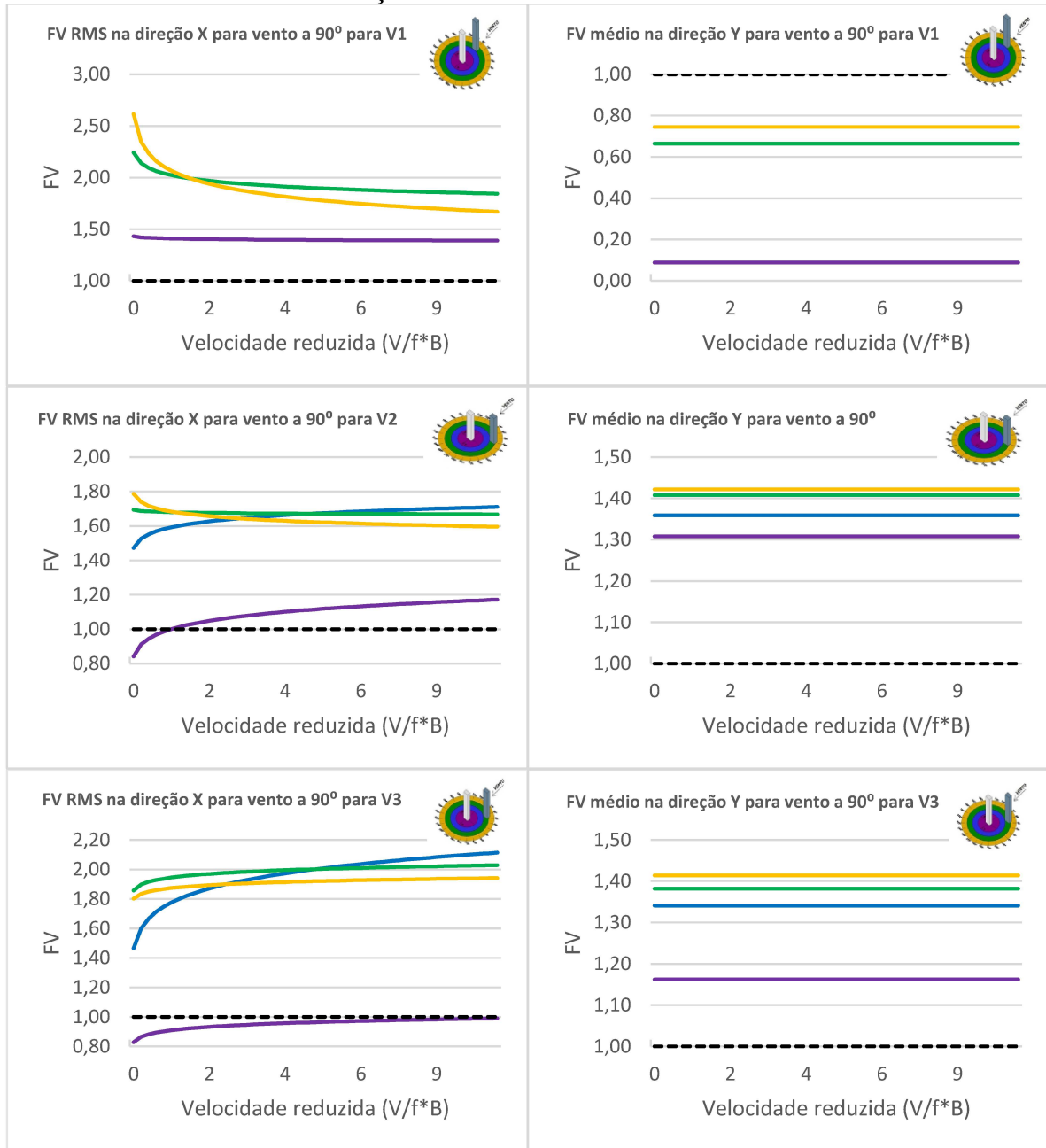


FIGURA 26 – Fator de vizinhança com vento a 90°



Para o vento a 90° em sua resposta longitudinal, resposta na direção Y, é possível notar uma tendência nas situações V2 e V3 semelhante a resposta longitudinal a 0° , em que o fator de vizinhança fica entorno de 1,40. A situação V1, para a resposta longitudinal, apresentou valores de proteção, ou seja, FV abaixo de 1,00. Para a resposta transversal a 90° , direção X, também ocorreu comportamento semelhante aos resultados transversais a 0° , em que a situação V1 apresentou os maiores valores de FV.

Para ambas as incidências do vento, notam-se que as respostas transversais apresentam valores maiores que as longitudinais, ou seja, os fatores da vizinhança no sentido perpendicular à direção do vento incidente, são mais significativos. Na literatura há diversos trabalhos que indicam esse comportamento, o que leva a resposta transversal a ser mais estudada que a longitudinal.

Em relação a comparação dos fatores de vizinhança obtidos pelo método HFPI e ao valor indicado pela norma brasileira de vento, percebe-se que a tendência é a norma brasileira estar contra a segurança, em que grande parte dos resultados obtidos para ambas as direções do vento indicaram FV maiores que 1,00. Vale ressaltar que a norma brasileira indica a necessidade do ensaio de túnel de vento para maior assertividade na consideração em cálculo dos edifícios vizinhos.

A seguir, Figuras 27 e 28, são apresentados os fatores de vizinhança com ênfase na comparação entre as distâncias entre o edifício analisado e o edifício vizinho. Para a resposta longitudinal a 0° é possível verificar que em relação as distâncias da vizinhança, há uma tendência de que quanto mais distante da vizinhança, menos o edifício analisado é afetado, ou seja, FV maiores para a distância D1, a qual é a menor distância entre edifício principal e seu vizinho. Para a resposta transversal é possível notar que a tendência de quanto menor a distância, maior o FV, se mantém, ocorrendo pouca oscilação entre as duas primeiras distâncias, mas sendo mais perceptível à medida que se aumenta a distância.

Para o vento a 90° é possível notar a mesma tendência a 0° , em que quanto menor a distância entre vizinhos, maior o FV. É possível notar, a partir dos gráficos de comparação entre as distâncias, que os valores para a situação V1 apresenta em sua maioria resultados destoantes dos demais.

FIGURA 27 – Fator de vizinhança com vento a 0° em relação as distâncias

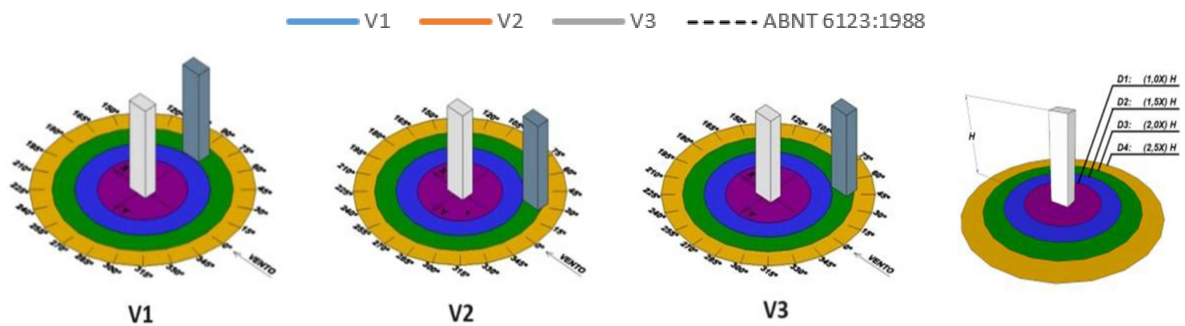
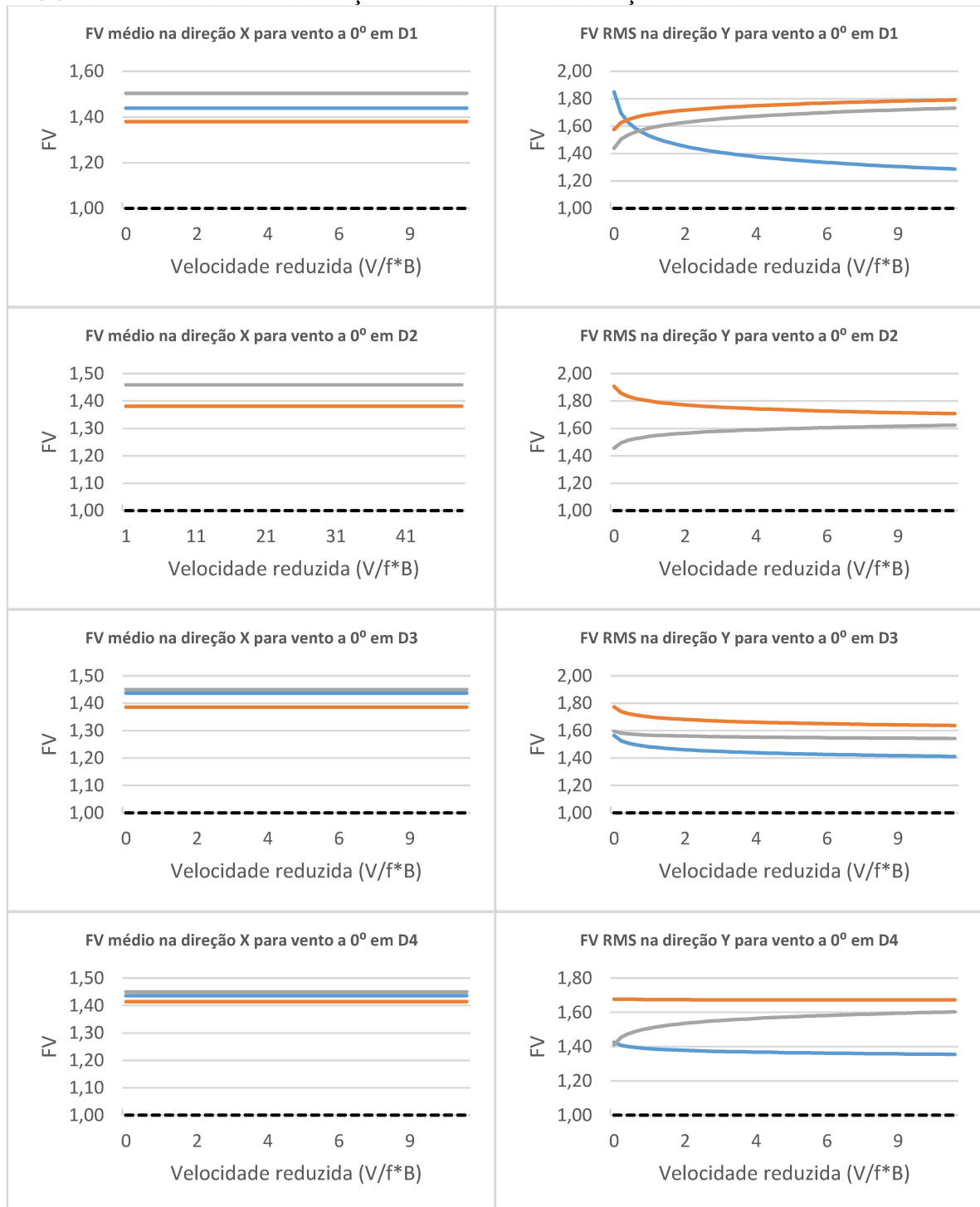
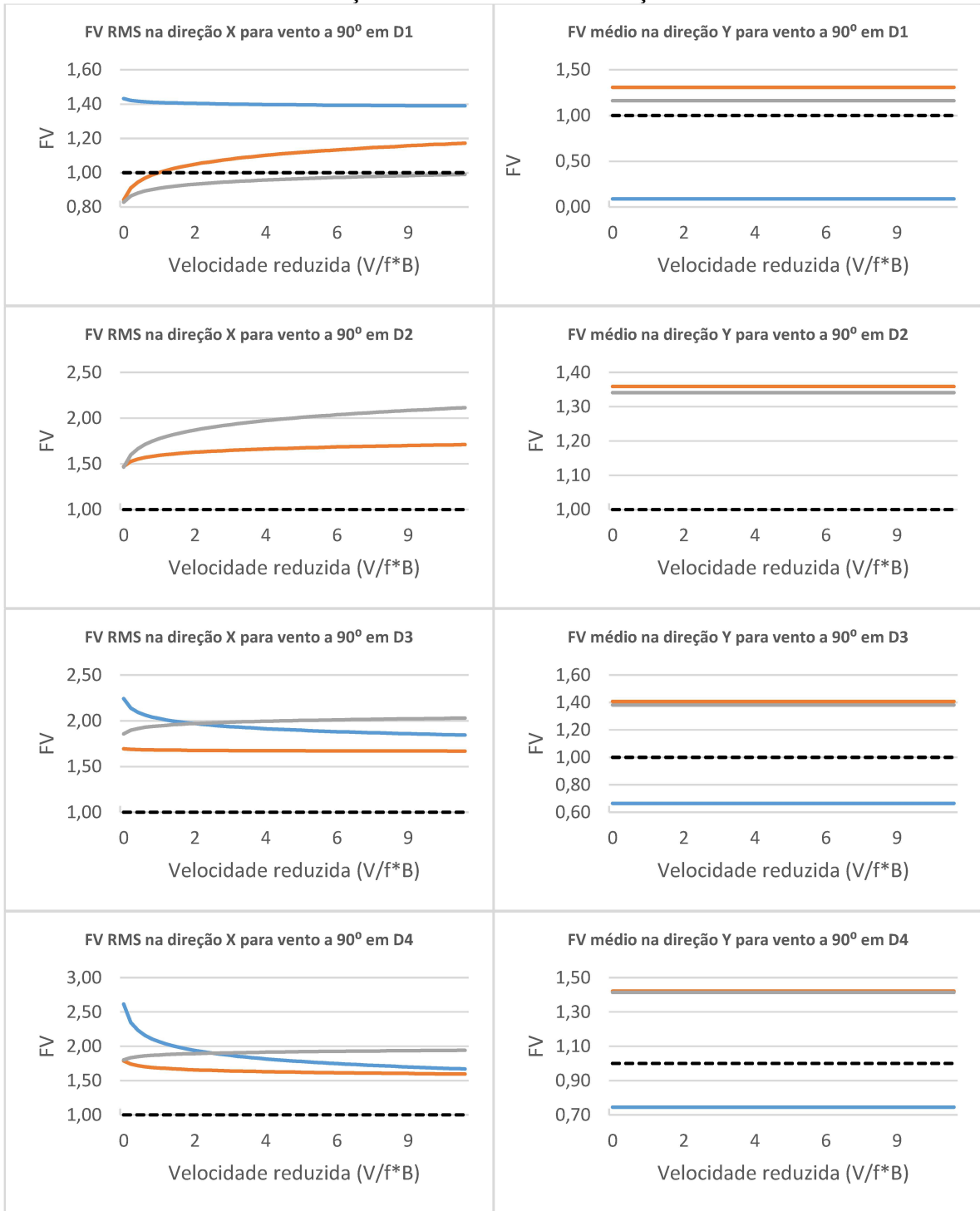
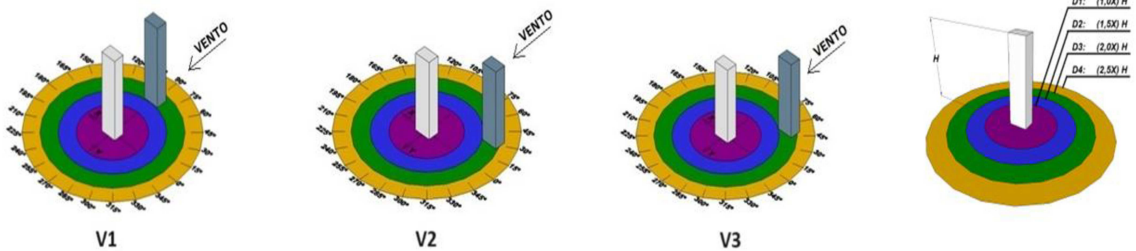


FIGURA 28 – Fator de vizinhança com vento a 90° em relação as distâncias



— V1 — V2 — V3 - - - - ABNT 6123:1988



6 CONCLUSÃO

A principal contribuição deste trabalho foi a implementação de resultados obtidos em túnel de vento juntamente com a técnica HFPI para obtenção de esforços dinâmicos do CAARC avaliando a presença de vizinhança. Pelos resultados obtidos é possível concluir para os resultados do edifício isolado:

- Com a atualização do valor do coeficiente de amplificação dinâmica, a norma leva a valores superiores de esforços dinâmicos quando comparados com os demais métodos, ficando a favor da segurança, sendo cerca de 17% acima do HFPI, 20% em relação a norma antiga e 71% em relação a Davenport. Porém, em relação aos esforços totais, mesmo com o aumento da resposta flutuante, a norma fica abaixo dos valores indicados pelo método HFPI e Eurocode, o que sugere que mesmo com o ajuste do coeficiente, a norma ainda está abaixo dos valores obtidos por túnel de vento;
- O método de Davenport, em relação aos esforços totais, apresenta valores baixos, sendo inferior até mesmo aos valores da norma brasileira vigente, consequentemente, ficando abaixo dos resultados gerados pelo método HFPI;
- O método do Eurocode, em relação aos esforços totais, apresenta valores superiores aos demais métodos, sugerindo alguma diferença significativa em adaptar os coeficientes tabelados no Eurocode para as condições dos países europeus para a situação brasileira. Os resultados do Eurocode apresentam valores maiores que o dobro da norma vigente, e até 53% maiores que a norma em sua versão atualizada, em comparação ao HFPI também apresenta valores maiores em até 56%.

Para os resultados do edifício com vizinhança:

- Nota-se que a resposta longitudinal para a direção 0° de incidência do vento, resposta na direção X, sofreu pouca alteração em relação a posição do edifício vizinho mantendo, para as 3 situações o valor do fator de vizinhança próximo de 1,40;
- Para a resposta transversal a 0°, resposta na direção Y, é possível notar uma alteração nos resultados, em que o edifício vizinho alinhado com o edifício analisado, situação V1, levou a valores mais altos do fator de vizinhança;

- Para o vento a 90° em sua resposta longitudinal, resposta na direção Y, é possível notar uma tendência nas situações V2 e V3 semelhante a resposta longitudinal a 0° , em que o fator de vizinhança fica entorno de 1,40;
- A situação V1, para a resposta longitudinal, apresentou valores de proteção, ou seja, FV abaixo de 1,00;
- Para a resposta transversal a 90° , direção X, também ocorreu comportamento semelhante aos resultados transversais a 0° , em que a situação V1 apresentou os maiores valores de FV;
- Para ambas as incidências do vento, nota-se que as respostas transversais apresentam valores maiores que as longitudinais;
- Em relação a comparação dos fatores de vizinhança obtidos pelo método HFPI e ao valor indicado pela norma brasileira de vento, percebe-se que a tendência é a norma estar contra a segurança, em que grande parte dos resultados obtidos para ambas as direções do vento indicaram FV maiores que 1,00;
- Para a resposta longitudinal a 0° é possível verificar que em relação as distâncias da vizinhança, há uma tendência de que quanto mais distante da vizinhança, menos o edifício analisado é afetado, ou seja, FV maiores para a distância D1, menor distância entre o edifício principal e seu vizinho;
- Para a resposta transversal é possível notar que a tendência de quanto menor a distância, maior o FV, se mantém, ocorrendo pouca oscilação entre as duas primeiras distâncias, mas sendo mais perceptível à medida que se aumenta a distância;
- Para o vento a 90° é possível notar a mesma tendência a 0° , em que quanto menor a distância entre vizinhos, maior o FV.

A seguir está algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Estender a análise do fator de vizinhança para outras posições de edifícios vizinhos;
- Analisar o fator de vizinhança para outros ângulos de incidência do vento;
- Analisar o fator de vizinhança para outras distâncias entre o edifício analisado e seus vizinhos;
- Estender a análise do edifício isolado para outros métodos normativos, como norma americana e neozelandesa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE. NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 66, 2023.

BANERJEE, J. R.; ANANTHAPUVIRAJAH, A.; PAPKOV, S. O. Dynamic stiffness matrix of a conical bar using the Rayleigh-Love theory with applications. **European Journal of Mechanics, A/Solids**, v. 83, n. February, p. 104020, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2020.104020>

BASHOR, R. et al. Full-scale performance evaluation of tall buildings under wind. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 104–106, p. 88–97, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2012.04.007>

BÊNIA, M. C. D. **Determinação dos efeitos de vizinhança na resposta dinâmica de edifícios altos sob a ação do vento**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

BLESSMANN, J. et al. **Acidentes causados pelo vento**. [s.l.] Ed. da UFRGS, 2002.

BLESSMANN, J. **Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento**. [s.l.] Editora da UFRGS, 2005.

BLESSMANN, J. **O Vento na Engenharia Estrutural**. 2. ed. Porto Alegre: [s.n.].

CARRIL, C. F. **Análise numérica e experimental do efeito dinâmico do vento em torres metálicas treliçadas para telecomunicações**. São Paulo, 2000.

CARRION-CABRERA, H.; BRUNEAU, M. Seismic response of regular multi-span bridges having buckling-restrained braces in their longitudinal direction. **Engineering Structures**, v. 259, n. March, p. 114127, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114127>

CASTRO, H. G. et al. A calculation methodology for the determination of the dynamic alongwind response of tall structures under wind action. **Revista Internacional de Metodos Numericos para Calculo y Diseno en Ingenieria**, v. 31, n. 4, p. 235–245, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2014.08.001>

CAVALCANTE, M. Z. Determinação experimental em túnel de vento dos fatores de vizinhança estáticos e dinâmicos para um modelo de edifício alto em distintas condições de vizinhança. 2020.

DANIELS, S. J.; CASTRO, I. P.; XIE, Z. T. Peak loading and surface pressure fluctuations of a tall model building. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 120, p. 19–28, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2013.06.014>

DAVENPORT, A. G. The Spectrum of Horizontal Gustiness Near the Ground in High Wind. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 87, p. 194–211, 1961. <https://doi.org/10.1002/qj.49708737208>

DAVENPORT, A. G. Gust Loading Factors. **Journal of the Structural Division**, v. 93, n. 3,

p. 11–34, 1967. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0001692>

DAVENPORT, A. G. The Response of Slender Structures to Wind. **Wind Climate in Cities**, p. 209–239, 1995a. https://doi.org/10.1007/978-94-017-3686-2_10

DAVENPORT, A. G. How Can We Simplify and Generalize Wind Loads? **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 54, p. 657–669, 1995b. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(94\)00079-S](https://doi.org/10.1016/0167-6105(94)00079-S)

DAVENPORT, A. G. The application of statistical concepts to the wind loading of structures. v. 19, n. 4, p. 449–472, 17 jun. 2015. <https://doi.org/10.1680/iicep.1961.11304>

HARRIS, R. I. Measurements of Wind Structure at Heights up to 598 ft Above Ground Level. **Symposium on Wind Effects on Buildings and Structures**, v. 1, p. 21, 1968.

HOLMES, J. D. Along- and cross-wind response of a generic tall building: Comparison of wind-tunnel data with codes and standards. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 132, p. 136–141, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2014.06.022>

LAVÔR, T. F. A. DE. **Análise Dinâmica do Modelo Padrão de Edifício Alto Sob a Ação do Vento**. [s.l: s.n.].

LI, Y. et al. Frequency domain dynamic analyses of freestanding bridge pylon under wind and waves using a copula model. **Ocean Engineering**, v. 183, n. November 2018, p. 359–371, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.04.089>

LI, Y. et al. Reduction of wind loads on rectangular tall buildings with different taper ratios. **Journal of Building Engineering**, v. 45, n. September 2021, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103588>

LIU, C. et al. Buffeting analysis of a suspension bridge under construction based on adjacent wind field data. **Engineering Structures**, v. 251, n. PA, p. 113490, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113490>

MA, L. et al. A curved 2.5D model for simulating dynamic responses of coupled track-tunnel-soil system in curved section due to moving loads. **Journal of Sound and Vibration**, v. 451, p. 1–31, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.02.044>

MELBOURNE, W. H. Comparison of measurements on the CAARC standard tall building model in simulated model wind flows. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 6, n. 1–2, p. 73–88, 1 jul. 1980. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(80\)90023-9](https://doi.org/10.1016/0167-6105(80)90023-9)

NAGAR, S. K.; RAJ, R.; DEV, N. Proximity effects between two plus-plan shaped high-rise buildings on mean and RMS pressure coefficients. **Scientia Iranica**, v. 29, n. 3 A, p. 990–1005, 2022.

QUAN, Y.; GU, M. Across-wind equivalent static wind loads and responses of super-high-rise buildings. **Advances in Structural Engineering**, v. 15, n. 12, p. 2145–2155, 2012. <https://doi.org/10.1260/1369-4332.15.12.2145>

SARTORI, F. C. **Uma comparação de métodos para avaliar a resposta dinâmica de edifícios altos em túnel de vento.** , 2010.

SIMIU, E.; YEO, D. **Wind Effects on Structures: Modern Structural Design for Wind.** [s.l: s.n.].

SOROKIN, V. S.; THOMSEN, J. J.; BRØNS, M. Coupled longitudinal and transverse vibrations of tensioned Euler-Bernoulli beams with general linear boundary conditions. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 150, p. 107244, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107244>

TADEU, A. et al. Theoretical and experimental analysis of the quasi-static and dynamic behaviour of the world's longest suspension footbridge in 2020. **Engineering Structures**, v. 253, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113830>

TANAKA, H.; LAWEN, N. Test on the CAARC standard tall building model with a length scale of 1 : 1000. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 25, n. 1, p. 15–29, 1986. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(86\)90102-9](https://doi.org/10.1016/0167-6105(86)90102-9)

THOMSON, W. T. **Teoria da vibração com aplicações.** Rio de Janeiro: Interciência, 1978.

VIEIRA, G. S. **Estudo Experimental dos Esforços Solicitantes em um Edifício Alto Devidos à Ação do Vento Considerando a Influência de Edificações Vizinhas.** [s.l: s.n.].

WANG, Y. W.; NI, Y. Q. Full-scale monitoring of wind effects on a supertall structure during six tropical cyclones. **Journal of Building Engineering**, v. 45, p. 103507, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103507>

WANG, Z. Z.; JIANG, L.; GAO, Y. Shaking table test of seismic response of immersed tunnels under effect of water. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v. 116, n. October 2018, p. 436–445, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.10.039>

WILLIAMS, J.; DRAGOMIRESCU, E. Experimental Investigation of Tornado Induced Pressures on Residential Buildings. **Lecture Notes in Civil Engineering**, v. 240, p. 479–488, 2023. https://doi.org/10.1007/978-981-19-0507-0_43

YANG, X. D.; ZHANG, W. Nonlinear dynamics of axially moving beam with coupled longitudinal–transversal vibrations. **Nonlinear Dynamics**, v. 78, n. 4, p. 2547–2556, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11071-014-1609-5>

YANG, Y. et al. Analytical solution for longitudinal seismic response of long tunnels subjected to Rayleigh waves. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, v. 44, n. 10, p. 1371–1385, 2020. <https://doi.org/10.1002/nag.3066>

ZHANG, Y.; SCHAUER, T.; BLEICHER, A. Optimized passive/semi-active vibration control using distributed-multiple tuned facade damping system in tall buildings. **Journal of Building Engineering**, v. 52, n. March, p. 104416, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104416>

ANEXO A - Fator de vizinhança

Tabela A.1. Fator de vizinhança médio na direção X para vento a 0° em V1

FV Médio em X para vento a 0°			
V1D1	V1D2	V1D3	V1D4
1,4390	0,0002	1,4370	1,4360

Tabela A.2. Fator de vizinhança RMS na direção X para vento a 0° em V1

FV RMS em X para vento a 0°				
Velocidade reduzida	V1D1	V1D2	V1D3	V1D4
0,1045	1,7290	1,9420	1,7710	1,7700
0,3149	1,6650	2,3440	1,7050	1,6670
0,5253	1,6360	2,5570	1,6750	1,6210
0,7357	1,6180	2,7080	1,6550	1,5920
0,9460	1,6040	2,8270	1,6410	1,5700
1,1560	1,5930	2,9250	1,6300	1,5530
1,3670	1,5840	3,0100	1,6200	1,5390
1,5770	1,5760	3,0840	1,6120	1,5270
1,7880	1,5690	3,1510	1,6050	1,5170
1,9980	1,5630	3,2110	1,5990	1,5080
2,2080	1,5580	3,2660	1,5940	1,4990
2,4190	1,5530	3,3170	1,5890	1,4920
2,6290	1,5490	3,3650	1,5840	1,4850
2,8390	1,5450	3,4090	1,5800	1,4790
3,0500	1,5410	3,4510	1,5760	1,4730
3,2600	1,5370	3,4900	1,5720	1,4680
3,4710	1,5340	3,5280	1,5690	1,4630
3,6810	1,5310	3,5630	1,5660	1,4580
3,8910	1,5280	3,5970	1,5630	1,4540
4,1020	1,5250	3,6300	1,5600	1,4500
4,3120	1,5230	3,6610	1,5570	1,4460
4,5220	1,5200	3,6900	1,5540	1,4420
4,7330	1,5180	3,7190	1,5520	1,4390
4,9430	1,5160	3,7470	1,5500	1,4350
5,1540	1,5130	3,7740	1,5470	1,4320
5,3640	1,5110	3,7990	1,5450	1,4290
5,5740	1,5090	3,8240	1,5430	1,4260
5,7850	1,5070	3,8490	1,5410	1,4230
5,9950	1,5060	3,8720	1,5390	1,4200
6,2050	1,5040	3,8950	1,5370	1,4170
6,4160	1,5020	3,9170	1,5360	1,4150
6,6260	1,5000	3,9390	1,5340	1,4120
6,8370	1,4990	3,9600	1,5320	1,4100

7,0470	1,4970	3,9800	1,5310	1,4080
7,2570	1,4960	4,0000	1,5290	1,4050
7,4680	1,4940	4,0200	1,5280	1,4030
7,6780	1,4930	4,0390	1,5260	1,4010
7,8880	1,4920	4,0570	1,5250	1,3990
8,0990	1,4900	4,0760	1,5230	1,3970
8,3090	1,4890	4,0930	1,5220	1,3950
8,5200	1,4880	4,1110	1,5210	1,3930
8,7300	1,4860	4,1280	1,5190	1,3910
8,9400	1,4850	4,1450	1,5180	1,3900
9,1510	1,4840	4,1610	1,5170	1,3880
9,3610	1,4830	4,1770	1,5160	1,3860
9,5710	1,4820	4,1930	1,5150	1,3840
9,7820	1,4810	4,2090	1,5130	1,3830
9,9920	1,4800	4,2240	1,5120	1,3810
10,2000	1,4790	4,2390	1,5110	1,3800

Tabela A.3. – Fator de vizinhança médio na direção Y para vento a 0° em V1

FV Médio em Y para vento a 0°			
V1D1	V1D2	V1D3	V1D4
2,2530	5,6090	1,3970	0,7863

Tabela A.4. – Fator de vizinhança RMS na direção Y para vento a 0° em V1

FV RMS em Y para vento a 0°				
Velocidade reduzida	V1D1	V1D2	V1D3	V1D4
0,1045	1,8500	1,5280	1,5650	1,4250
0,3149	1,6950	1,1740	1,5260	1,4080
0,5253	1,6280	1,0390	1,5090	1,4000
0,7357	1,5850	0,9587	1,4980	1,3950
0,9460	1,5540	0,9027	1,4890	1,3910
1,1560	1,5290	0,8604	1,4820	1,3880
1,3670	1,5090	0,8267	1,4770	1,3850
1,5770	1,4920	0,7989	1,4720	1,3830
1,7880	1,4770	0,7753	1,4680	1,3810
1,9980	1,4640	0,7550	1,4640	1,3800
2,2080	1,4530	0,7371	1,4610	1,3780
2,4190	1,4420	0,7213	1,4580	1,3770
2,6290	1,4330	0,7070	1,4550	1,3750
2,8390	1,4240	0,6941	1,4530	1,3740
3,0500	1,4160	0,6824	1,4510	1,3730
3,2600	1,4080	0,6716	1,4480	1,3720
3,4710	1,4020	0,6616	1,4460	1,3710
3,6810	1,3950	0,6524	1,4440	1,3700
3,8910	1,3890	0,6438	1,4430	1,3700

4,1020	1,3830	0,6357	1,4410	1,3690
4,3120	1,3780	0,6282	1,4390	1,3680
4,5220	1,3720	0,6210	1,4380	1,3670
4,7330	1,3670	0,6143	1,4360	1,3670
4,9430	1,3630	0,6080	1,4350	1,3660
5,1540	1,3580	0,6019	1,4340	1,3650
5,3640	1,3540	0,5962	1,4320	1,3650
5,5740	1,3500	0,5908	1,4310	1,3640
5,7850	1,3460	0,5855	1,4300	1,3640
5,9950	1,3420	0,5806	1,4290	1,3630
6,2050	1,3380	0,5758	1,4280	1,3630
6,4160	1,3350	0,5712	1,4260	1,3620
6,6260	1,3320	0,5668	1,4250	1,3620
6,8370	1,3280	0,5626	1,4240	1,3610
7,0470	1,3250	0,5586	1,4230	1,3610
7,2570	1,3220	0,5546	1,4230	1,3600
7,4680	1,3190	0,5509	1,4220	1,3600
7,6780	1,3160	0,5472	1,4210	1,3590
7,8880	1,3130	0,5437	1,4200	1,3590
8,0990	1,3100	0,5403	1,4190	1,3590
8,3090	1,3080	0,5370	1,4180	1,3580
8,5200	1,3050	0,5338	1,4170	1,3580
8,7300	1,3030	0,5307	1,4170	1,3570
8,9400	1,3000	0,5277	1,4160	1,3570
9,1510	1,2980	0,5247	1,4150	1,3570
9,3610	1,2960	0,5219	1,4140	1,3560
9,5710	1,2930	0,5191	1,4140	1,3560
9,7820	1,2910	0,5164	1,4130	1,3560
9,9920	1,2890	0,5138	1,4120	1,3550
10,2000	1,2870	0,5113	1,4120	1,3550

Tabela A.5. Fator de vizinhança médio na direção X para vento a 90° em V1

FV Médio em X para vento a 90°				
V1D1	V1D2	V1D3	V1D4	
2,054	176,900	2,759	5,995	

Tabela A.6. Fator de vizinhança RMS na direção X para vento a 90° em V1

FV RMS em X para vento a 90°				
Velocidade reduzida	V1D1	V1D2	V1D3	V1D4
0,105	1,432	0,608	2,242	2,615
0,315	1,421	0,531	2,139	2,347
0,525	1,417	0,498	2,093	2,232
0,736	1,414	0,478	2,063	2,160
0,946	1,411	0,463	2,041	2,107

1,156	1,409	0,452	2,024	2,066
1,367	1,408	0,442	2,009	2,033
1,577	1,407	0,435	1,997	2,004
1,788	1,405	0,428	1,986	1,980
1,998	1,404	0,422	1,977	1,959
2,208	1,404	0,417	1,969	1,939
2,419	1,403	0,412	1,961	1,922
2,629	1,402	0,408	1,954	1,907
2,839	1,401	0,404	1,948	1,892
3,050	1,401	0,401	1,942	1,879
3,260	1,400	0,397	1,936	1,867
3,471	1,399	0,394	1,931	1,855
3,681	1,399	0,391	1,926	1,845
3,891	1,398	0,389	1,922	1,835
4,102	1,398	0,386	1,917	1,825
4,312	1,397	0,384	1,913	1,816
4,522	1,397	0,381	1,909	1,808
4,733	1,397	0,379	1,906	1,800
4,943	1,396	0,377	1,902	1,792
5,154	1,396	0,375	1,899	1,785
5,364	1,395	0,374	1,896	1,778
5,574	1,395	0,372	1,892	1,771
5,785	1,395	0,370	1,889	1,765
5,995	1,394	0,368	1,887	1,759
6,205	1,394	0,367	1,884	1,753
6,416	1,394	0,365	1,881	1,747
6,626	1,394	0,364	1,879	1,741
6,837	1,393	0,362	1,876	1,736
7,047	1,393	0,361	1,874	1,731
7,257	1,393	0,360	1,871	1,726
7,468	1,392	0,359	1,869	1,721
7,678	1,392	0,357	1,867	1,716
7,888	1,392	0,356	1,865	1,712
8,099	1,392	0,355	1,863	1,708
8,309	1,392	0,354	1,860	1,703
8,520	1,391	0,353	1,859	1,699
8,730	1,391	0,352	1,857	1,695
8,940	1,391	0,351	1,855	1,691
9,151	1,391	0,350	1,853	1,687
9,361	1,390	0,349	1,851	1,683
9,571	1,390	0,348	1,849	1,680
9,782	1,390	0,347	1,848	1,676
9,992	1,390	0,346	1,846	1,673
10,200	1,390	0,345	1,844	1,669

Tabela A.7. Fator de vizinhança médio na direção Y para vento a 90° em V1

FV Médio em Y para vento a 90°			
V1D1	V1D2	V1D3	V1D4
0,088	0,001	0,665	0,745

Tabela A.8. Fator de vizinhança RMS na direção Y para vento a 90° em V1

FV RMS em Y para vento a 90°				
Velocidade reduzida	V1D1	V1D2	V1D3	V1D4
0,105	2,137	1,279	2,505	2,272
0,315	1,895	1,476	2,252	2,063
0,525	1,792	1,578	2,143	1,973
0,736	1,728	1,648	2,075	1,916
0,946	1,681	1,703	2,025	1,874
1,156	1,644	1,748	1,986	1,841
1,367	1,615	1,787	1,955	1,815
1,577	1,590	1,821	1,928	1,792
1,788	1,568	1,850	1,905	1,773
1,998	1,549	1,877	1,884	1,755
2,208	1,533	1,902	1,866	1,740
2,419	1,517	1,925	1,850	1,726
2,629	1,504	1,946	1,835	1,714
2,839	1,491	1,965	1,821	1,702
3,050	1,480	1,984	1,809	1,692
3,260	1,469	2,001	1,797	1,682
3,471	1,459	2,017	1,786	1,673
3,681	1,450	2,033	1,776	1,664
3,891	1,441	2,048	1,767	1,656
4,102	1,433	2,062	1,758	1,648
4,312	1,425	2,075	1,749	1,641
4,522	1,417	2,088	1,741	1,634
4,733	1,410	2,101	1,734	1,628
4,943	1,404	2,112	1,727	1,622
5,154	1,397	2,124	1,720	1,616
5,364	1,391	2,135	1,713	1,610
5,574	1,386	2,146	1,707	1,605
5,785	1,380	2,156	1,701	1,600
5,995	1,375	2,166	1,695	1,595
6,205	1,369	2,176	1,689	1,590
6,416	1,364	2,185	1,684	1,585
6,626	1,360	2,195	1,678	1,581
6,837	1,355	2,204	1,673	1,576
7,047	1,351	2,212	1,668	1,572
7,257	1,346	2,221	1,664	1,568
7,468	1,342	2,229	1,659	1,564

7,678	1,338	2,237	1,655	1,560
7,888	1,334	2,245	1,650	1,557
8,099	1,330	2,253	1,646	1,553
8,309	1,327	2,260	1,642	1,550
8,520	1,323	2,268	1,638	1,546
8,730	1,319	2,275	1,634	1,543
8,940	1,316	2,282	1,631	1,540
9,151	1,313	2,289	1,627	1,537
9,361	1,309	2,296	1,623	1,534
9,571	1,306	2,302	1,620	1,531
9,782	1,303	2,309	1,616	1,528
9,992	1,300	2,315	1,613	1,525
10,200	1,297	2,321	1,610	1,522

Tabela A.9. Fator de vizinhança médio na direção X para vento a 0° em V2

FV Médio em X para vento a 0°			
V2D1	V2D2	V2D3	V2D4
1,3800	1,3810	1,3860	1,4140

Tabela A.10. Fator de vizinhança RMS na direção X para vento a 0° em V2

FV RMS em X para vento a 0°				
Velocidade reduzida	V2D1	V2D2	V2D3	V2D4
0,105	1,9390	1,9640	1,9410	1,7750
0,315	1,8130	1,8730	1,8320	1,7220
0,525	1,7580	1,8320	1,7830	1,6990
0,736	1,7220	1,8050	1,7520	1,6830
0,946	1,6960	1,7860	1,7290	1,6720
1,156	1,6750	1,7700	1,7110	1,6630
1,367	1,6580	1,7580	1,6960	1,6550
1,577	1,6440	1,7470	1,6830	1,6490
1,788	1,6320	1,7370	1,6720	1,6430
1,998	1,6210	1,7290	1,6620	1,6380
2,208	1,6110	1,7220	1,6530	1,6340
2,419	1,6020	1,7150	1,6450	1,6300
2,629	1,5940	1,7090	1,6380	1,6260
2,839	1,5860	1,7030	1,6320	1,6230
3,050	1,5790	1,6980	1,6250	1,6200
3,260	1,5730	1,6930	1,6200	1,6170
3,471	1,5670	1,6880	1,6140	1,6140
3,681	1,5620	1,6840	1,6090	1,6110
3,891	1,5560	1,6800	1,6050	1,6090
4,102	1,5510	1,6760	1,6000	1,6070
4,312	1,5470	1,6730	1,5960	1,6050
4,522	1,5420	1,6690	1,5920	1,6020

4,733	1,5380	1,6660	1,5880	1,6010
4,943	1,5340	1,6630	1,5850	1,5990
5,154	1,5300	1,6600	1,5810	1,5970
5,364	1,5260	1,6570	1,5780	1,5950
5,574	1,5230	1,6540	1,5750	1,5930
5,785	1,5190	1,6510	1,5720	1,5920
5,995	1,5160	1,6490	1,5690	1,5900
6,205	1,5130	1,6460	1,5660	1,5890
6,416	1,5100	1,6440	1,5630	1,5870
6,626	1,5070	1,6420	1,5600	1,5860
6,837	1,5040	1,6400	1,5580	1,5850
7,047	1,5010	1,6370	1,5550	1,5830
7,257	1,4980	1,6350	1,5530	1,5820
7,468	1,4960	1,6330	1,5510	1,5810
7,678	1,4930	1,6310	1,5480	1,5800
7,888	1,4910	1,6290	1,5460	1,5790
8,099	1,4890	1,6280	1,5440	1,5770
8,309	1,4860	1,6260	1,5420	1,5760
8,520	1,4840	1,6240	1,5400	1,5750
8,730	1,4820	1,6220	1,5380	1,5740
8,940	1,4800	1,6210	1,5360	1,5730
9,151	1,4780	1,6190	1,5340	1,5720
9,361	1,4750	1,6170	1,5320	1,5710
9,571	1,4730	1,6160	1,5300	1,5700
9,782	1,4720	1,6140	1,5290	1,5690
9,992	1,4700	1,6130	1,5270	1,5680
10,200	1,4680	1,6110	1,5250	1,5680

Tabela A.11. Fator de vizinhança médio na direção Y para vento a 0° em V2

FV Médio em Y para vento a 0°			
V2D1	V2D2	V2D3	V2D4
1,1440	0,3740	0,5131	0,4109

Tabela A.12. Fator de vizinhança RMS na direção Y para vento a 0° em V2

FV RMS em Y para vento a 0°				
Velocidade reduzida	V2D1	V2D2	V2D3	V2D4
0,105	1,5760	1,9070	1,7740	1,6770
0,315	1,6260	1,8570	1,7400	1,6760
0,525	1,6490	1,8340	1,7250	1,6760
0,736	1,6650	1,8190	1,7150	1,6760
0,946	1,6770	1,8080	1,7070	1,6750
1,156	1,6860	1,8000	1,7010	1,6750
1,367	1,6940	1,7920	1,6960	1,6750
1,577	1,7010	1,7860	1,6920	1,6750

1,788	1,7070	1,7810	1,6880	1,6750
1,998	1,7120	1,7760	1,6850	1,6750
2,208	1,7170	1,7720	1,6820	1,6750
2,419	1,7210	1,7680	1,6790	1,6740
2,629	1,7250	1,7640	1,6770	1,6740
2,839	1,7290	1,7610	1,6740	1,6740
3,050	1,7320	1,7580	1,6720	1,6740
3,260	1,7360	1,7550	1,6700	1,6740
3,471	1,7390	1,7530	1,6680	1,6740
3,681	1,7420	1,7500	1,6670	1,6740
3,891	1,7440	1,7480	1,6650	1,6740
4,102	1,7470	1,7460	1,6640	1,6740
4,312	1,7490	1,7430	1,6620	1,6740
4,522	1,7520	1,7410	1,6610	1,6740
4,733	1,7540	1,7400	1,6590	1,6740
4,943	1,7560	1,7380	1,6580	1,6740
5,154	1,7580	1,7360	1,6570	1,6740
5,364	1,7600	1,7340	1,6560	1,6740
5,574	1,7620	1,7330	1,6550	1,6740
5,785	1,7640	1,7310	1,6540	1,6740
5,995	1,7660	1,7300	1,6530	1,6740
6,205	1,7670	1,7280	1,6520	1,6740
6,416	1,7690	1,7270	1,6510	1,6730
6,626	1,7710	1,7250	1,6500	1,6730
6,837	1,7720	1,7240	1,6490	1,6730
7,047	1,7740	1,7230	1,6480	1,6730
7,257	1,7750	1,7220	1,6470	1,6730
7,468	1,7770	1,7200	1,6460	1,6730
7,678	1,7780	1,7190	1,6450	1,6730
7,888	1,7790	1,7180	1,6450	1,6730
8,099	1,7810	1,7170	1,6440	1,6730
8,309	1,7820	1,7160	1,6430	1,6730
8,520	1,7830	1,7150	1,6420	1,6730
8,730	1,7840	1,7140	1,6420	1,6730
8,940	1,7860	1,7130	1,6410	1,6730
9,151	1,7870	1,7120	1,6400	1,6730
9,361	1,7880	1,7110	1,6400	1,6730
9,571	1,7890	1,7100	1,6390	1,6730
9,782	1,7900	1,7090	1,6380	1,6730
9,992	1,7910	1,7080	1,6380	1,6730
10,200	1,7920	1,7080	1,6370	1,6730

Tabela A.13. Fator de vizinhança médio na direção X para vento a 90° em V2

FV Médio em X para vento a 90°			
V2D1	V2D2	V2D3	V2D4
0,6121	3,3490	4,1340	5,4070

Tabela A.14. Fator de vizinhança RMS na direção X para vento a 90° em V2

FV RMS em X para vento a 90°				
Velocidade reduzida	V2D1	V2D2	V2D3	V2D4
0,105	0,8413	1,4720	1,6940	1,7870
0,315	0,9112	1,5260	1,6870	1,7390
0,525	0,9455	1,5520	1,6850	1,7170
0,736	0,9688	1,5690	1,6830	1,7030
0,946	0,9866	1,5820	1,6810	1,6920
1,156	1,0010	1,5930	1,6800	1,6840
1,367	1,0130	1,6010	1,6790	1,6770
1,577	1,0240	1,6090	1,6780	1,6710
1,788	1,0330	1,6160	1,6780	1,6660
1,998	1,0410	1,6210	1,6770	1,6610
2,208	1,0490	1,6270	1,6770	1,6570
2,419	1,0560	1,6320	1,6760	1,6530
2,629	1,0620	1,6360	1,6760	1,6500
2,839	1,0680	1,6400	1,6750	1,6470
3,050	1,0740	1,6440	1,6750	1,6440
3,260	1,0790	1,6480	1,6740	1,6410
3,471	1,0840	1,6510	1,6740	1,6390
3,681	1,0890	1,6540	1,6740	1,6360
3,891	1,0930	1,6570	1,6730	1,6340
4,102	1,0970	1,6600	1,6730	1,6320
4,312	1,1010	1,6630	1,6730	1,6300
4,522	1,1050	1,6660	1,6730	1,6280
4,733	1,1090	1,6680	1,6720	1,6260
4,943	1,1120	1,6700	1,6720	1,6240
5,154	1,1150	1,6730	1,6720	1,6230
5,364	1,1190	1,6750	1,6720	1,6210
5,574	1,1220	1,6770	1,6710	1,6200
5,785	1,1250	1,6790	1,6710	1,6180
5,995	1,1280	1,6810	1,6710	1,6170
6,205	1,1300	1,6830	1,6710	1,6150
6,416	1,1330	1,6850	1,6710	1,6140
6,626	1,1360	1,6870	1,6710	1,6130
6,837	1,1380	1,6880	1,6700	1,6110
7,047	1,1410	1,6900	1,6700	1,6100
7,257	1,1430	1,6920	1,6700	1,6090
7,468	1,1460	1,6930	1,6700	1,6080
7,678	1,1480	1,6950	1,6700	1,6070
7,888	1,1500	1,6960	1,6700	1,6060
8,099	1,1520	1,6980	1,6690	1,6050
8,309	1,1550	1,6990	1,6690	1,6040
8,520	1,1570	1,7010	1,6690	1,6030
8,730	1,1590	1,7020	1,6690	1,6020

8,940	1,1610	1,7030	1,6690	1,6010
9,151	1,1630	1,7050	1,6690	1,6000
9,361	1,1650	1,7060	1,6690	1,5990
9,571	1,1660	1,7070	1,6690	1,5980
9,782	1,1680	1,7080	1,6680	1,5970
9,992	1,1700	1,7100	1,6680	1,5960
10,200	1,1720	1,7110	1,6680	1,5960

Tabela A.15. Fator de vizinhança médio na direção Y para vento a 90° em V2

FV Médio em Y para vento a 90°			
V2D1	V2D2	V2D3	V2D4
1,3080	1,3590	1,4080	1,4220

Tabela A.16. Fator de vizinhança RMS na direção Y para vento a 90° em V2

FV RMS em Y para vento a 90°				
Velocidade reduzida	V2D1	V2D2	V2D3	V2D4
0,105	1,3080	1,3590	1,6750	1,5210
0,315	1,3080	1,3590	1,6180	1,5170
0,525	1,3080	1,3590	1,5930	1,5150
0,736	1,3080	1,3590	1,5760	1,5140
0,946	1,3080	1,3590	1,5640	1,5130
1,156	1,3080	1,3590	1,5540	1,5120
1,367	1,3080	1,3590	1,5460	1,5120
1,577	1,3080	1,3590	1,5390	1,5110
1,788	1,3080	1,3590	1,5330	1,5110
1,998	1,3080	1,3590	1,5280	1,5100
2,208	1,3080	1,3590	1,5230	1,5100
2,419	1,3080	1,3590	1,5190	1,5100
2,629	1,3080	1,3590	1,5150	1,5090
2,839	1,3080	1,3590	1,5110	1,5090
3,050	1,3080	1,3590	1,5080	1,5090
3,260	1,3080	1,3590	1,5050	1,5090
3,471	1,3080	1,3590	1,5020	1,5080
3,681	1,3080	1,3590	1,4990	1,5080
3,891	1,3080	1,3590	1,4960	1,5080
4,102	1,3080	1,3590	1,4940	1,5080
4,312	1,3080	1,3590	1,4910	1,5080
4,522	1,3080	1,3590	1,4890	1,5070
4,733	1,3080	1,3590	1,4870	1,5070
4,943	1,3080	1,3590	1,4850	1,5070
5,154	1,3080	1,3590	1,4830	1,5070
5,364	1,3080	1,3590	1,4810	1,5070
5,574	1,3080	1,3590	1,4800	1,5070
5,785	1,3080	1,3590	1,4780	1,5060

5,995	1,3080	1,3590	1,4760	1,5060
6,205	1,3080	1,3590	1,4750	1,5060
6,416	1,3080	1,3590	1,4730	1,5060
6,626	1,3080	1,3590	1,4720	1,5060
6,837	1,3080	1,3590	1,4700	1,5060
7,047	1,3080	1,3590	1,4690	1,5060
7,257	1,3080	1,3590	1,4670	1,5060
7,468	1,3080	1,3590	1,4660	1,5060
7,678	1,3080	1,3590	1,4650	1,5050
7,888	1,3080	1,3590	1,4640	1,5050
8,099	1,3080	1,3590	1,4620	1,5050
8,309	1,3080	1,3590	1,4610	1,5050
8,520	1,3080	1,3590	1,4600	1,5050
8,730	1,3080	1,3590	1,4590	1,5050
8,940	1,3080	1,3590	1,4580	1,5050
9,151	1,3080	1,3590	1,4570	1,5050
9,361	1,3080	1,3590	1,4560	1,5050
9,571	1,3080	1,3590	1,4550	1,5050
9,782	1,3080	1,3590	1,4540	1,5050
9,992	1,3080	1,3590	1,4530	1,5040
10,200	1,3080	1,3590	1,4520	1,5040

Tabela A.17. Fator de vizinhança médio na direção X para vento a 0° em V3

FV Médio em X para vento a 0°			
V3D1	V3D2	V3D3	V3D4
1,5040	1,4590	1,4500	1,4500

Tabela A.18. Fator de vizinhança RMS na direção X para vento a 0° em V3

FV RMS em X para vento a 0°				
Velocidade reduzida	V3D1	V3D2	V3D3	V3D4
0,105	1,6690	1,7310	1,7990	1,6840
0,315	1,6530	1,6810	1,7120	1,6510
0,525	1,6460	1,6580	1,6730	1,6360
0,736	1,6410	1,6430	1,6480	1,6260
0,946	1,6380	1,6320	1,6300	1,6190
1,156	1,6350	1,6230	1,6160	1,6130
1,367	1,6330	1,6160	1,6030	1,6090
1,577	1,6310	1,6100	1,5930	1,6040
1,788	1,6290	1,6040	1,5840	1,6010
1,998	1,6270	1,5990	1,5770	1,5980
2,208	1,6260	1,5950	1,5690	1,5950
2,419	1,6250	1,5910	1,5630	1,5920
2,629	1,6240	1,5880	1,5570	1,5900
2,839	1,6230	1,5840	1,5520	1,5880

3,050	1,6220	1,5810	1,5470	1,5860
3,260	1,6210	1,5790	1,5420	1,5840
3,471	1,6200	1,5760	1,5380	1,5820
3,681	1,6190	1,5730	1,5340	1,5800
3,891	1,6180	1,5710	1,5300	1,5790
4,102	1,6170	1,5690	1,5270	1,5770
4,312	1,6170	1,5670	1,5230	1,5760
4,522	1,6160	1,5650	1,5200	1,5750
4,733	1,6150	1,5630	1,5170	1,5730
4,943	1,6150	1,5610	1,5140	1,5720
5,154	1,6140	1,5590	1,5110	1,5710
5,364	1,6140	1,5580	1,5080	1,5700
5,574	1,6130	1,5560	1,5060	1,5690
5,785	1,6130	1,5540	1,5030	1,5680
5,995	1,6120	1,5530	1,5010	1,5670
6,205	1,6120	1,5520	1,4990	1,5660
6,416	1,6110	1,5500	1,4960	1,5650
6,626	1,6110	1,5490	1,4940	1,5640
6,837	1,6100	1,5470	1,4920	1,5630
7,047	1,6100	1,5460	1,4900	1,5620
7,257	1,6100	1,5450	1,4880	1,5610
7,468	1,6090	1,5440	1,4860	1,5610
7,678	1,6090	1,5430	1,4840	1,5600
7,888	1,6080	1,5420	1,4830	1,5590
8,099	1,6080	1,5400	1,4810	1,5580
8,309	1,6080	1,5390	1,4790	1,5580
8,520	1,6070	1,5380	1,4780	1,5570
8,730	1,6070	1,5370	1,4760	1,5560
8,940	1,6070	1,5360	1,4740	1,5560
9,151	1,6060	1,5350	1,4730	1,5550
9,361	1,6060	1,5340	1,4710	1,5540
9,571	1,6060	1,5340	1,4700	1,5540
9,782	1,6050	1,5330	1,4680	1,5530
9,992	1,6050	1,5320	1,4670	1,5530
10,200	1,6050	1,5310	1,4660	1,5520

Tabela A.19. Fator de vizinhança médio na direção Y para vento a 0° em V3

FV Médio em Y para vento a 0°			
V3D1	V3D2	V3D3	V3D4
0,3367	0,8697	0,2666	0,6302

Tabela A.20. Fator de vizinhança RMS na direção Y para vento a 0° em V3

FV RMS em Y para vento a 0°				
Velocidade reduzida	V3D1	V3D2	V3D3	V3D4

0,105	1,4390	1,4560	1,5960	1,4100
0,315	1,5050	1,4950	1,5830	1,4550
0,525	1,5360	1,5130	1,5770	1,4750
0,736	1,5570	1,5250	1,5730	1,4890
0,946	1,5730	1,5340	1,5700	1,5000
1,156	1,5860	1,5420	1,5680	1,5080
1,367	1,5970	1,5480	1,5660	1,5150
1,577	1,6060	1,5530	1,5650	1,5210
1,788	1,6140	1,5580	1,5630	1,5270
1,998	1,6210	1,5620	1,5620	1,5310
2,208	1,6280	1,5650	1,5610	1,5360
2,419	1,6340	1,5690	1,5600	1,5400
2,629	1,6390	1,5720	1,5590	1,5430
2,839	1,6440	1,5750	1,5580	1,5470
3,050	1,6490	1,5770	1,5570	1,5500
3,260	1,6540	1,5800	1,5560	1,5520
3,471	1,6580	1,5820	1,5550	1,5550
3,681	1,6620	1,5840	1,5550	1,5580
3,891	1,6660	1,5870	1,5540	1,5600
4,102	1,6690	1,5890	1,5530	1,5620
4,312	1,6720	1,5900	1,5530	1,5650
4,522	1,6760	1,5920	1,5520	1,5670
4,733	1,6790	1,5940	1,5520	1,5690
4,943	1,6820	1,5960	1,5510	1,5710
5,154	1,6840	1,5970	1,5510	1,5720
5,364	1,6870	1,5990	1,5500	1,5740
5,574	1,6900	1,6000	1,5500	1,5760
5,785	1,6920	1,6020	1,5500	1,5780
5,995	1,6950	1,6030	1,5490	1,5790
6,205	1,6970	1,6040	1,5490	1,5810
6,416	1,6990	1,6050	1,5480	1,5820
6,626	1,7020	1,6070	1,5480	1,5830
6,837	1,7040	1,6080	1,5480	1,5850
7,047	1,7060	1,6090	1,5470	1,5860
7,257	1,7080	1,6100	1,5470	1,5880
7,468	1,7100	1,6110	1,5470	1,5890
7,678	1,7120	1,6120	1,5460	1,5900
7,888	1,7140	1,6130	1,5460	1,5910
8,099	1,7150	1,6140	1,5460	1,5920
8,309	1,7170	1,6150	1,5450	1,5940
8,520	1,7190	1,6160	1,5450	1,5950
8,730	1,7210	1,6170	1,5450	1,5960
8,940	1,7220	1,6180	1,5450	1,5970
9,151	1,7240	1,6190	1,5440	1,5980
9,361	1,7260	1,6200	1,5440	1,5990
9,571	1,7270	1,6210	1,5440	1,6000

9,782	1,7290	1,6220	1,5440	1,6010
9,992	1,7300	1,6220	1,5430	1,6020
10,200	1,7320	1,6230	1,5430	1,6030

Tabela A.21. Fator de vizinhança médio na direção X para vento a 90° em V3

FV Médio em X para vento a 90°			
V3D1	V3D2	V3D3	V3D4
0,2076	13,1100	6,9140	2,7990

Tabela A.22. Fator de vizinhança RMS na direção X para vento a 90° em V3

FV RMS em X para vento a 90°				
Velocidade reduzida	V3D1	V3D2	V3D3	V3D4
0,105	0,8281	1,4650	1,8570	1,8020
0,315	0,8644	1,6000	1,8970	1,8340
0,525	0,8818	1,6670	1,9160	1,8500
0,736	0,8935	1,7130	1,9280	1,8600
0,946	0,9023	1,7480	1,9370	1,8670
1,156	0,9094	1,7760	1,9450	1,8740
1,367	0,9153	1,8000	1,9510	1,8790
1,577	0,9204	1,8210	1,9570	1,8830
1,788	0,9249	1,8390	1,9610	1,8870
1,998	0,9290	1,8550	1,9660	1,8900
2,208	0,9326	1,8700	1,9690	1,8930
2,419	0,9359	1,8840	1,9730	1,8960
2,629	0,9389	1,8970	1,9760	1,8990
2,839	0,9418	1,9080	1,9790	1,9010
3,050	0,9444	1,9190	1,9820	1,9030
3,260	0,9468	1,9290	1,9840	1,9050
3,471	0,9492	1,9390	1,9870	1,9070
3,681	0,9513	1,9480	1,9890	1,9090
3,891	0,9534	1,9570	1,9910	1,9110
4,102	0,9554	1,9650	1,9930	1,9130
4,312	0,9572	1,9730	1,9950	1,9140
4,522	0,9590	1,9810	1,9970	1,9160
4,733	0,9607	1,9880	1,9990	1,9170
4,943	0,9623	1,9950	2,0000	1,9180
5,154	0,9639	2,0010	2,0020	1,9200
5,364	0,9654	2,0080	2,0040	1,9210
5,574	0,9668	2,0140	2,0050	1,9220
5,785	0,9682	2,0200	2,0060	1,9230
5,995	0,9696	2,0260	2,0080	1,9250
6,205	0,9709	2,0310	2,0090	1,9260
6,416	0,9722	2,0370	2,0100	1,9270
6,626	0,9734	2,0420	2,0120	1,9280

6,837	0,9746	2,0470	2,0130	1,9290
7,047	0,9757	2,0520	2,0140	1,9300
7,257	0,9768	2,0570	2,0150	1,9310
7,468	0,9779	2,0620	2,0160	1,9310
7,678	0,9790	2,0660	2,0170	1,9320
7,888	0,9800	2,0710	2,0180	1,9330
8,099	0,9810	2,0750	2,0200	1,9340
8,309	0,9820	2,0790	2,0210	1,9350
8,520	0,9830	2,0840	2,0210	1,9360
8,730	0,9839	2,0880	2,0220	1,9360
8,940	0,9848	2,0920	2,0230	1,9370
9,151	0,9857	2,0950	2,0240	1,9380
9,361	0,9866	2,0990	2,0250	1,9390
9,571	0,9874	2,1030	2,0260	1,9390
9,782	0,9883	2,1070	2,0270	1,9400
9,992	0,9891	2,1100	2,0280	1,9410
10,200	0,9899	2,1140	2,0290	1,9410

Tabela A.23. Fator de vizinhança médio na direção Y para vento a 90° em V3

FV Médio em Y para vento a 90°			
V3D1	V3D2	V3D3	V3D4
1,1620	1,3410	1,3820	1,4140

Tabela A.24. Fator de vizinhança RMS na direção Y para vento a 90° em V3

FV RMS em Y para vento a 90°				
Velocidade reduzida	V3D1	V3D2	V3D3	V3D4
0,105	1,0760	1,5690	1,6000	1,5520
0,315	1,1650	1,5920	1,6100	1,5470
0,525	1,2090	1,6030	1,6150	1,5450
0,736	1,2380	1,6100	1,6180	1,5430
0,946	1,2610	1,6150	1,6200	1,5420
1,156	1,2790	1,6200	1,6220	1,5410
1,367	1,2950	1,6230	1,6230	1,5410
1,577	1,3080	1,6260	1,6250	1,5400
1,788	1,3200	1,6290	1,6260	1,5400
1,998	1,3300	1,6310	1,6270	1,5390
2,208	1,3400	1,6340	1,6280	1,5390
2,419	1,3490	1,6350	1,6290	1,5380
2,629	1,3570	1,6370	1,6290	1,5380
2,839	1,3640	1,6390	1,6300	1,5380
3,050	1,3710	1,6400	1,6310	1,5370
3,260	1,3780	1,6420	1,6310	1,5370
3,471	1,3840	1,6430	1,6320	1,5370
3,681	1,3900	1,6450	1,6320	1,5370

3,891	1,3960	1,6460	1,6330	1,5360
4,102	1,4010	1,6470	1,6330	1,5360
4,312	1,4060	1,6480	1,6340	1,5360
4,522	1,4110	1,6490	1,6340	1,5360
4,733	1,4150	1,6500	1,6350	1,5350
4,943	1,4200	1,6510	1,6350	1,5350
5,154	1,4240	1,6520	1,6360	1,5350
5,364	1,4280	1,6530	1,6360	1,5350
5,574	1,4320	1,6540	1,6360	1,5350
5,785	1,4360	1,6540	1,6370	1,5350
5,995	1,4400	1,6550	1,6370	1,5340
6,205	1,4430	1,6560	1,6370	1,5340
6,416	1,4470	1,6570	1,6380	1,5340
6,626	1,4500	1,6570	1,6380	1,5340
6,837	1,4530	1,6580	1,6380	1,5340
7,047	1,4560	1,6590	1,6390	1,5340
7,257	1,4590	1,6590	1,6390	1,5340
7,468	1,4620	1,6600	1,6390	1,5340
7,678	1,4650	1,6610	1,6390	1,5330
7,888	1,4680	1,6610	1,6400	1,5330
8,099	1,4710	1,6620	1,6400	1,5330
8,309	1,4740	1,6620	1,6400	1,5330
8,520	1,4760	1,6630	1,6400	1,5330
8,730	1,4790	1,6630	1,6410	1,5330
8,940	1,4810	1,6640	1,6410	1,5330
9,151	1,4840	1,6640	1,6410	1,5330
9,361	1,4860	1,6650	1,6410	1,5330
9,571	1,4890	1,6650	1,6410	1,5320
9,782	1,4910	1,6660	1,6420	1,5320
9,992	1,4930	1,6660	1,6420	1,5320
10,200	1,4960	1,6670	1,6420	1,5320