

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

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL EM TÚNEL DE VENTO
DOS EFEITOS ESTÁTICOS DE PROTEÇÃO CAUSADOS POR
EDIFICAÇÕES VIZINHAS: CONTRIBUIÇÃO PARA A REVISÃO
DOS FATORES DE VIZINHANÇA DA NBR-6123

Franco Augusto Alberti

Porto Alegre
2015

Franco Augusto Alberti

**DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL EM TÚNEL DE VENTO
DOS EFEITOS ESTÁTICOS DE PROTEÇÃO CAUSADOS POR
EDIFICAÇÕES VIZINHAS: CONTRIBUIÇÃO PARA A
REVISÃO DOS FATORES DE VIZINHANÇA DA NBR-6123**

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

Porto Alegre

2015

FRANCO AUGUSTO ALBERTI

**DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL EM TÚNEL DE VENTO
DOS EFEITOS ESTÁTICOS DE PROTEÇÃO CAUSADOS POR
EDIFICAÇÕES VIZINHAS: CONTRIBUIÇÃO PARA A
REVISÃO DOS FATORES DE VIZINHANÇA DA NBR-6123**

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

Porto Alegre, 31 de julho de 2015

Prof. Acir Mércio Loredou-Souza
Ph.D., pela University of Western Ontario,
Canada
Orientador

Prof. Marcelo Maia Rocha
Dr.tchen., pela Universität Innsbruck,
Áustria
Coorientador

Prof. Carlos Torres Formoso
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho (UFRGS)
Ph.D. Pela University of Leed, Inglaterra

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

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

Eng. Mário Gustavo Klaus Oliveira (Vento-S)
Dr., pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em especial aos meus familiares e amigos, principalmente aos meus pais Silvana e Julio e ao meu irmão Pedro, por tudo.

Aos meus colegas do curso de mestrado pela amizade desenvolvida, principalmente aos amigos Rodolfo Jaeger e Fabrício Cachuço pelas conversas, dicas e favores prestados, cruciais durante a caminhada.

Aos engenheiros Mario Gustavo Klaus Oliveira e Maria Cristina Dolz Bênia, representantes da empresa Vento-S, pelas breves, porém importantes informações e orientações, fundamentais para o desenvolvimento do presente trabalho.

Ao Prof. Acir Mércio Loredo-Souza por todo conhecimento transmitido, mas também pela amizade, paciência e angustias resolvidas, presentes na orientação deste trabalho e que sem dúvida culminaram na minha evolução pessoal.

Agradeço ao Prof. Marcelo Maia Rocha pela atenção e colaboração dada a esta dissertação.

À equipe do Laboratório de Aerodinâmica das Construções liderada pelo “Prof.” Paulo Bueno, pelo suporte e companheirismo durante as estadas no túnel.

Aos professores do PPGEC da UFRGS, em especial ao Prof. Samir Maghous pelos ensinamentos e por ter acreditado.

À CAPES pela bolsa de estudos concedida.

Há muitas maneiras de avançar, mas só uma maneira de
ficar parado.

Franklin D. Roosevelt

RESUMO

ALBERTI, F. A. **Determinação experimental em túnel de vento dos efeitos estáticos de proteção causados por edificações vizinhas: Contribuição para a revisão dos fatores de vizinhança da NBR-6123.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Efeitos de interferência aerodinâmica por vizinhança ocorrem inevitavelmente em edificações imersas em contexto urbano. Com base nas características da vizinhança que envolve o entorno de uma edificação, estes efeitos conseqüentemente podem reduzir ou majorar as ações do vento sobre a mesma. Tendo em vista a complexidade do problema em estimar o real ambiente em que um edifício estará situado e sua influência no comportamento do vento, torna-se muito difícil a codificação destes efeitos em documentos normativos, específicos para cada situação de projeto. No entanto, fatores de redução e majoração das ações do vento sobre as edificações podem ser determinados de acordo com as características da vizinhança presente no ambiente em que estão inseridas. Neste trabalho são analisados quatro modelos reduzidos de edifícios altos e suas vizinhanças adjacentes. Os modelos foram testados em túnel de vento, no Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob duas configurações de ensaios, uma com a edificação isolada e outra com a edificação na presença da vizinhança na qual estará imerso. A partir dos resultados obtidos no túnel, foram calculados coeficientes de força para cada modelo, em relação a dois eixos ortogonais com origem próxima ao centro de torção da seção transversal correspondente ao pavimento tipo. Dos quatro casos estudados, todos apresentaram variações significativas dos coeficientes de força quando na presença de edificações vizinhas. Para estes edifícios, foram calculados fatores de vizinhança respectivos aos ângulos de vento mais influentes ao dimensionamento estrutural dos mesmos. A respeito das análises, notou-se que sob vizinhança densa, houve uma grande redução das ações do vento, enquanto que brechas entre as estruturas de interferência, traduziram em aumentos das ações do vento sobre as edificações estudadas.

Palavras-chave: *ação do vento; efeitos de vizinhança; efeitos de proteção; carregamentos estáticos; edifícios altos.*

ABSTRACT

ALBERTI, F. A. **Experimental determination in wind tunnel tests of static protection effects caused by neighboring buildings: Contribution to the review of neighborhood factors of NBR-6123.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Neighborhood interference effects due to nearby structures, inevitably occur on buildings immersed in urban context. Based on the characteristics of the neighborhood surrounding the vicinity of a building, these effects therefore can reduce or increase wind actions. Given the complexity of the problem in estimating the real environment where a building is located and its influence on wind behavior, it is extremely hard to encode these effects in regulation codes by specifying situations for each proposed project. However, reduction and increase factors on the wind actions over buildings can be determined according to the characteristics of its neighborhood at the environment in which they locate. This paper analyzes four scale models of tall buildings and its surrounding structures. The models were tested in the wind tunnel at the Laboratório de Aerodinâmica das Construções of the Universidade Federal do Rio Grande do Sul, in two configurations tests, one with the building in isolated situation and the other with the building in the corresponding vicinity. The results obtained in the wind tunnel tests were used to determine strength coefficients for each model in relation to the both orthogonal axes with its origin near the torsional center of the transversal section correspondent to the standard floor of the buildings. For the four cases studied, all the test results showed significant variations at force coefficients in the presence of neighboring structures. For each case studied, interference factors were calculated due to surrounding structures for the most influential wind angles for the structural design. Regarding the analysis it was noticed that under dense neighborhood, there was a large reduction of the wind loads, while gaps between interference structures resulted in increases of wind actions over the studied buildings.

Key-words: *wind action; interference effects; protection effects; static loads; tall buildings.*

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABELAS	14
LISTA DE SÍMBOLOS	15
1 INTRODUÇÃO	19
1.1 BREVE REVISÃO HISTÓRICA	19
1.2 JUSTIFICATIVA DO PROBLEMA	20
1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
1.4 OBJETIVOS	36
2 AÇÃO ESTÁTICA DO VENTO EM EDIFÍCIOS ALTOS: EFEITOS DE VIZINHANÇA	37
2.1 O VENTO NATURAL	37
2.1.1 Camada Limite Atmosférica	37
2.1.2 Ventos Sinóticos	38
2.1.2.1 Perfil de Velocidades Médias	39
2.1.3 Ventos Não Sinóticos	40
2.2 INTERAÇÃO VENTO ESTRUTURA	41
2.2.1 Número de Reynolds	41
2.2.2 Desprendimento de Vórtices	42
2.2.3 Turbulência	44
2.2.4 Esteira	46
2.2.5 Número de Strouhal	48
2.3 INTERFERÊNCIA POR VIZINHANÇA	49
2.3.1 Fenômenos de Interferência por Vizinhança	49
2.3.1.1 Martelamento	50
2.3.1.2 Efeito Venturi	51
2.3.1.3 Deflexão do Vento na Direção Vertical	51
2.3.1.4 Efeito de Proteção	53
2.3.1.5 Turbulência de Esteira	53
2.3.2 Fator de Vizinhança	55
2.3.3 Efeitos de Vizinhança e a NBR-6123/1988	57
3 FORÇAS DEVIDAS AO VENTO	59
3.1 COEFICIENTES DE PRESSÃO	59
3.1.1 Coeficiente de Pressão Média	59

3.1.2 Coeficiente de Pressão Máxima	59
3.1.3 Coeficiente de Pressão Mínima	60
3.1.4 Coeficiente de Pressão RMS	60
3.2 COEFICIENTE DE FORMA	60
3.3 COEFICIENTE DE ATRITO	61
3.4 FORÇAS AERODINÂMICAS	61
3.4.1 Coeficientes de Força	62
3.5 CÁLCULO DA FORÇA DEVIDA AO VENTO PELA NBR-6123/1988	63
3.5.1 Fator Topográfico - S1	65
3.5.2 Fator Rugosidade do Terreno, Dimensões da Edificação e Altura sobre o Terreno - S2	66
3.5.3 Fator Estatístico - S3	68
4 PROGRAMA EXPERIMENTAL	70
4.1 TÚNEL DE VENTO PROFESSOR JOAQUIM BLESSMANN	70
4.2 SIMULAÇÃO DO VENTO NATURAL	72
4.3 MÉTODO DE MEDIDAS DE PRESSÕES – AQUISIÇÃO DE DADOS NO TÚNEL DE VENTO	75
4.4 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS	76
4.5 APRESENTAÇÃO DOS MODELOS	77
4.5.1 Modelo Aerodinâmico Edifício A	79
4.5.2 Modelo Aerodinâmico Edifício B	81
4.5.3 Modelo Aerodinâmico Edifício C	83
4.5.4 Modelo Aerodinâmico Edifício D	85
5 RESULTADOS E ANÁLISES	87
5.1 MODELO AERODINÂMICO EDIFÍCIO A	89
5.2 MODELO AERODINÂMICO EDIFÍCIO B	95
5.3 MODELO AERODINÂMICO EDIFÍCIO C	101
5.4 MODELO AERODINÂMICO EDIFÍCIO D	107
6 COMENTÁRIOS GERAIS E CONCLUSÕES	113
REFERÊNCIAS	118

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Vizinhança em edifícios altos, <i>high-rise building vicinity</i> , cidade de Nova Iorque, década de 20	20
Figura 2: Ensaios no edifício <i>Empire State Building</i>	22
Figura 3: Ensaios realizados por Blessmann e Riera	23
Figura 4: Ensaios realizados por Blessmann	23
Figura 5: Ensaios realizados por Taniike	24
Figura 6: Espectros de arrasto e sustentação	25
Figura 7: Ensaios no edifício <i>Citybank</i>	26
Figura 8: Ensaios no edifício <i>Manhattan</i>	26
Figura 9: Ensaios realizados por Orlando	27
Figura 10: Estudos realizados por Carpeggiani	28
Figura 11: Ensaios realizados por Li	29
Figura 12: Ensaios realizados por Vanin; (a) isolado; (b) sob vizinhança	30
Figura 13: Ensaios realizados por Kim; (a) posições da edificação de interferência; (b) respostas da edificação principal	31
Figura 14: Ensaios realizados por Lam	32
Figura 15: Ensaios realizados por Hui; (a) campo de velocidades; (b) linhas de fluxo; (c) campo de vórtices	35
Figura 16: Previsão das <i>neural networks</i> em comparativo com estudo para FV médio na direção do vento	35
Figura 17: Perfil de velocidades médias e formação da camada limite atmosférica	38
Figura 18: Perfis de velocidades médias para terrenos de diferentes rugosidades	39
Figura 19: Perfil de velocidades horizontais de um <i>downburst</i> próximas ao solo	40
Figura 20: Variação dos coeficientes de arrasto médio e RMS em relação as direções do vento e número de Reynolds	42
Figura 21: Vórtices aleatórios	42
Figura 22: Vórtices sincronizados	43
Figura 23: Formação dos vórtices de Von Kármán	44
Figura 24: Linhas de corrente entorno do modelo	44
Figura 25: Ensaios realizados por Fox	47
Figura 26: Padrão de esteiras formadas por corpos aerodinâmicos e rombudos	48
Figura 27: Canalização do vento, efeito Venturi	51
Figura 28: Deflexão do vento incidente	52
Figura 29: Ensaios realizados por Wise	52

Figura 30: Influência no escoamento do vento devido a uma edificação a barlavento	53
Figura 31: Regimes de escoamento	54
Figura 32: Ensaios realizados por Hui	55
Figura 33: Ensaios realizados por Taniike	56
Figura 34: Componentes de decomposição da força global	62
Figura 35: Coeficientes de arrasto para edificações paralelepípedicas; (a) vento de baixa turbulência; (b) vento de alta	64
Figura 36: Isopletas de velocidade básica do vento	65
Figura 37: Túnel de vento <i>Professor Joaquim Blessmann</i>	70
Figura 38: Planta baixa circuito aerodinâmico túnel de vento <i>Professor Joaquim Blessmann</i>	71
Figura 39: Mecanismos de simulação do vento natural	73
Figura 40: Representação do perfil de velocidades médias, intensidade e escala da componente longitudinal de turbulência para diferentes camadas limites simuladas no túnel de vento <i>Professor Joaquim Blessmann</i>	74
Figura 41: Disposição dos mecanismos de simulação do vento natural para diferentes camadas limites simuladas no túnel de vento <i>Professor Joaquim Blessmann</i> ; (a) grelha; (b) $p=0,11$; (c) $p=0,23$; (d) $p=34$	75
Figura 42: (a) mesa em ensaio isolado; (b) mesa em ensaio com vizinhança	77
Figura 43: Seção transversal com dimensões do retângulo envolvente, eixos de referência e vistas laterais do Edifício A	79
Figura 44: Perspectiva visual do Edifício A em vizinhança	80
Figura 45: Direções dos ventos incidentes ao Edifício A	80
Figura 46: Seção transversal com dimensões do retângulo envolvente, eixos de referência e vistas laterais do Edifício B	81
Figura 47: Perspectiva visual do Edifício B em vizinhança	82
Figura 48: Direções dos ventos incidentes ao Edifício B	82
Figura 49: Seção transversal com dimensões do retângulo envolvente, eixos de referência e vistas laterais do Edifício C	3
Figura 50: Perspectiva visual do Edifício C em vizinhança	84
Figura 51: Direções dos ventos incidentes ao Edifício C	84
Figura 52: Seção transversal com dimensões do retângulo envolvente, eixos de referência e vistas laterais do Edifício D	85
Figura 53: Perspectiva visual do Edifício D em vizinhança	86
Figura 54: Direções dos ventos incidentes ao Edifício D	86
Figura 55: Orientação para leitura de coeficiente de pressão medido em uma tomada em seção: (a) transversal; (b) longitudinal, de um volume qualquer	88
Figura 56: Variação do coeficiente de força C_x em função do vento no Edifício A	89

Figura 57: Variação do coeficiente de força C_y em função do vento no Edifício A	90
Figura 58: Variação do fator de vizinhança FV_x em função do vento no Edifício A	92
Figura 59: Variação do fator de vizinhança FV_y em função do vento no Edifício A	93
Figura 60: Variação do coeficiente de força C_x em função do vento no Edifício B	95
Figura 61: Variação do coeficiente de força C_y em função do vento no Edifício B	96
Figura 62: Variação do fator de vizinhança FV_x em função do vento no Edifício B	98
Figura 63: Variação do fator de vizinhança FV_y em função do vento no Edifício B	99
Figura 64: Variação do coeficiente de força C_x em função do vento no Edifício C	101
Figura 65: Variação do coeficiente de força C_y em função do vento no Edifício C	102
Figura 66: Variação do fator de vizinhança FV_x em função do vento no Edifício C	104
Figura 67: Variação do fator de vizinhança FV_y em função do vento no Edifício C	105
Figura 68: Variação do coeficiente de força C_x em função do vento no Edifício D	107
Figura 69: Variação do coeficiente de força C_y em função do vento no Edifício D	108
Figura 70: Variação do fator de vizinhança FV_x em função do vento no Edifício D	110
Figura 71: Variação do fator de vizinhança FV_y em função do vento no Edifício D	111
Figura 72: Determinação parâmetros de projeto; afastamento (S) e índice de área exposta (ϕ)	114
Figura 73: Relação entre FV e FB dos edifícios estudados	115
Figura 74: Relação entre FV e S dos edifícios estudados	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características dos edifícios estudados	77
Tabela 2: Resultados dos ensaios em função do vento, em coeficiente de força e em esforço cortante na base do Edifício A	90
Tabela 3: Resultados dos ensaios em função do vento, em coeficiente de força e em esforço cortante na base do Edifício B	96
Tabela 4: Resultados dos ensaios em função do vento, em coeficiente de força e em esforço cortante na base do Edifício C	102
Tabela 5: Resultados dos ensaios em função do vento, em coeficiente de força e em esforço cortante na base do Edifício D	108

LISTA DE SÍMBOLOS

A	área da superfície de aplicação da força;
$A_{TOM,i}$	área de atuação da tomada i;
A_e	área frontal efetiva, perpendicular a direção do vento, em m^2 ;
A_t	área frontal total da fachada, limitada pelo contorno da edificação de projeto, em m^2 ;
BX	dimensão nominal da edificação em relação ao eixo X;
BY	dimensão nominal da edificação em relação ao eixo Y;
BF	fator efeito de martelamento;
C	coeficiente de forma;
CV	ensaio da edificação em situação de vizinhança;
C_{at}	coeficiente de atrito;
C_x	coeficiente de força em relação ao eixo X;
C_y	coeficiente de força em relação ao eixo Y ;
C_a	coeficiente de arrasto;
C_{Mx}	coeficiente de flexão em relação ao eixo X;
C_{My}	coeficiente de flexão em relação ao eixo Y;
F	força resultante na base da edificação devido a ação do vento;
F_{at}	força de atrito
F_a	força de arrasto;
F_G	força global;
F_S	força de sustentação;
F_x	força total na base da edificação em relação a direção X;
F_y	força total na base da edificação em relação a direção Y;
FB	fator de bloqueio;
FV	fator de efeito de vizinhança;
F_r	fator de rajada, sempre correspondente à categoria II;

I_1	intensidade da componente longitudinal da turbulência;
ISO	ensaio da edificação em situação isolada;
L	dimensão característica do cilindro;
L_1	macroescala da componente longitudinal da turbulência;
P_{atm}	pressão atmosférica [mmHg];
R_e	número de Reynolds;
S	afastamento entre os planos das faces confrontantes das edificações vizinhas à de projeto;
S_1	fator topográfico;
S_2	fator que leva em consideração a rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno;
S_3	fator estatístico;
S_t	número de Strouhal;
T	temperatura [K];
\bar{V}	velocidade média de escoamento do vento;
$\bar{V}(z)$	velocidade média da partícula;
$\bar{V}(z_{ref})$	velocidade média na altura de referência;
V_0	velocidade básica do vento, em m/s;
V_k	velocidade característica do vento, em m/s;
V_{cr}	velocidade crítica de desprendimento de vórtices;
X	eixo de referência longitudinal;
Y	eixo de referencia vertical;
a	maior dimensão em planta;
at	escoamento do vento em alta turbulência;
b	menor dimensão em planta;
bt	escoamento do vento em baixa turbulência;
c_p	coeficiente de pressão médio;
\hat{c}_p	coeficiente de pressão máximo;

\check{c}_p	coeficiente de pressão mínimo;
\check{c}_p	coeficiente de pressão RMS;
$c_{p,CV}$	coeficiente de pressão médio do ensaio da edificação em vizinhança;
$c_{p,ISO}$	coeficiente de pressão médio do ensaio da edificação isolada;
e	excentricidade de aplicação da força na seção de referência;
f_n	frequência natural da estrutura;
f_s	frequência de desprendimento de um par de vórtices;
h	altura da edificação sobre o terreno;
i	número da tomada de pressão;
k_0	fator de calibração do túnel de vento (adimensional);
p	expoente da lei potencial de variação de S_2 .
$p(t)$	pressão instantânea na superfície de medição, medida em relação a pressão estática de referência;
p_{max}	maior valor de $p(t)$ para o período de amostragem t_a ;
p_{min}	menor valor de $p(t)$ para o período de amostragem t_a ;
\bar{p}	valor médio de $p(t)$ para o período de amostragem t_a ;
q	pressão dinâmica medida ao longe $= \frac{1}{2} \rho_{ar} V^2$;
t	tempo;
t_a	intervalo de tempo de amostragem;
u_{CV}	deslocamento médio no topo da edificação no ensaio em vizinhança
u_{ISO}	deslocamento médio no topo da edificação no ensaio isolado
$\ddot{u}_{rms,CV}$	deslocamento RMS no topo da edificação no ensaio em vizinhança
$\ddot{u}_{rms,ISO}$	deslocamento RMS no topo da edificação no ensaio em vizinhança
z	altura da partícula de ar;
z_0	altura de rugosidade do terreno;

z_{ref}	altura de referência, usual 10m;
z_i	cota na altura i ;
u_*	velocidade de corte;
α	ângulo de incidência do vento ensaiado no túnel;
β	ângulo que dá a orientação da tomada em relação aos eixos de referência, X e Y do modelo;
κ	constante de Von Kármán ($\kappa \sim 0,4$);
ρ_{ar}	massa específica do ar = $0,0474 \frac{P_{atm}}{T} \left[\frac{kgf.s^2}{m^2} \right]$;
ϕ	índice de área exposta = $\frac{A_e}{A_f}$;
Δp_a	pressão de referência (diferença de pressão entre os anéis piezométricos)

1 INTRODUÇÃO

1.1 BREVE INTRODUÇÃO HISTÓRICA

É notável como os seres humanos, ao longo dos anos, passaram a viver em comunidades; seja por motivos econômicos, religiosos ou afetivos, as pessoas se concentraram formando grandes centros urbanos. Não bastando viverem próximas, se aglomeraram em regiões específicas destes centros, tornando-se vizinhas. Graças à evolução em paralelo das engenharias e arquitetura, esse fenômeno, na medida do possível, deu-se de forma ordenada, suprimindo as necessidades das comunidades.

O surgimento dos edifícios iniciou de forma lenta; no começo as construções eram baixas, a ausência de elevadores dificultava a mobilidade dos usuários. Não obstante a isso, as técnicas construtivas tornavam as obras mais altas de difícil execução e ao mesmo tempo onerosas do ponto de vista econômico e humano. Dessa forma, os edifícios construídos eram baixos e amplos, as estruturas eram pesadas e superdimensionadas, tornando-se muito rígidas e conseqüentemente por maior que fosse o conhecimento sobre a influência dos ventos nas edificações, este não era um fator dominante para o dimensionamento das mesmas. Conforme Blessmann (2011), carregamentos verticais, como o peso próprio e cargas acidentais, para estruturas com estas características, são predominantes aos carregamentos gerados pelo vento.

Segundo Wise (1971), o pioneirismo na construção de edifícios altos e modernos, deu-se no final do século XIX no continente norte americano. Graças ao desenvolvimento das técnicas e materiais utilizados na construção civil, juntamente com o advento dos elevadores, novas formas e tamanhos de estruturas tornaram-se possíveis, abrindo portas para construções cada vez maiores, esbeltas e ousadas. A economia também ganhou um novo mercado, o imobiliário, muito rentável, passando a estabelecer padrões e maior eficiência nas construções. Dessa forma surgiram as normas técnicas, as quais estabeleceram uma metodologia de dimensionamento e execução padronizada, garantindo a boa prática da engenharia e atendendo aos padrões requeridos pelo mercado. A crescente necessidade de aproveitamento dos espaços mais nobres das cidades impulsionou a construção de edifícios mais altos, assim como sua densificação nestas regiões (ver figura 1).

À medida que as edificações cresceram, as análises estruturais tiveram que acompanhar esta demanda. Não menos importante, os efeitos causados pelos ventos nas futuras estruturas tornar-se-iam uma realidade eminente. Dá-se assim o surgimento de uma nova área na engenharia estrutural, a Engenharia do Vento, cujo foco é estudar o comportamento das estruturas e seu entorno durante escoamento do vento natural.



Figura 1: Vizinhança em edifícios altos, cidade de Nova Iorque, década de 20.
(Disponível em: <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=34300&page=38>; Acesso em junho de 2015)

1.2 JUSTIFICATIVA DO PROBLEMA

A incerteza no que diz respeito à ação do vento em estruturas tem sido motivo para diversas pesquisas sobre o tema. Este problema é agravado quando estas se encontram na presença de edificações vizinhas, que alteram o comportamento dos ventos devido à efeitos de interferência. O ambiente urbano, em constante transformação, altera de maneira aleatória o comportamento dos ventos, e conseqüentemente, a maneira como estes influenciam na resposta estrutural das edificações estimuladas pelos mesmo. Fenômenos de interferência gerados pela presença de obstáculos ao escoamento do ar, afetam ora positivamente, ora negativamente as edificações imersas na vizinhança. (HUI et al., 2013a).

Khanduri et al. (1998), citam as três razões principais que fomentam a necessidade de se compreender as modificações nas ações do vento causadas pela presença de edificações adjacentes; são elas:

1. A complexidade da natureza do fenômeno, mesmo que para apenas uma edificação de interferência na vizinhança. Isto devido a grande quantidade de variáveis que envolvem o processo, as quais podem ser desde o tamanho e formato das estruturas, suas posições de interferência, direções de incidência do vento ou também fatores topográficos ;
2. A escassez de dados experimentais adequados;
3. A concepção distorcida de que as cargas devidas ao vento sobre as edificações inseridas em vizinhança são obrigatoriamente menores do que aquelas desenvolvidas em edificações isoladas.

A necessidade de se confirmar os reais carregamentos de ventos nas estruturas, implica no uso de uma ferramenta muito comum na Engenharia do Vento, o túnel de vento. Para Mara et al. (2014), esta é a maneira ideal de quantificar a influência desses efeitos na distribuição dos esforços de ventos ocorrentes em edificações situadas em vizinhança.

1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ao longo dos anos em que a Engenharia do Vento tem sido desenvolvida, diversos foram os autores que estudaram os efeitos de interferência causados pela proximidade de estruturas vizinhas. A grande maioria dos estudos são formados por ensaios realizados em túneis de vento, onde a distribuição dos coeficientes de pressão nas fachadas dos modelos foram o foco das análises. Efeitos como o Venturi, de proteção, de martelamento e desprendimento de vórtices foram estudados. Este capítulo trata de apresentar uma revisão cronológica dos trabalhos desenvolvidos a respeito do tema desta dissertação.

Um dos trabalhos pioneiros sobre o assunto foi realizado por Harris (1934). Naquela época, em Nova Iorque, o autor descobriu que a torção no edifício Empire State building duplicaria, caso duas edificações fossem construídas ao longo de ruas adjacentes ao arranha-céu (ver figura 2). Para Khanduri (1998), este estudo foi um grande avanço, uma vez que os pesquisadores na área da Engenharia do Vento, naquela época, estavam focados em

determinar apenas os esforços gerados pelos ventos em edificações isoladas, assim como a influência da topografia na distribuição de velocidades das rajadas e um conceito mais aprofundado da camada limite atmosférica.

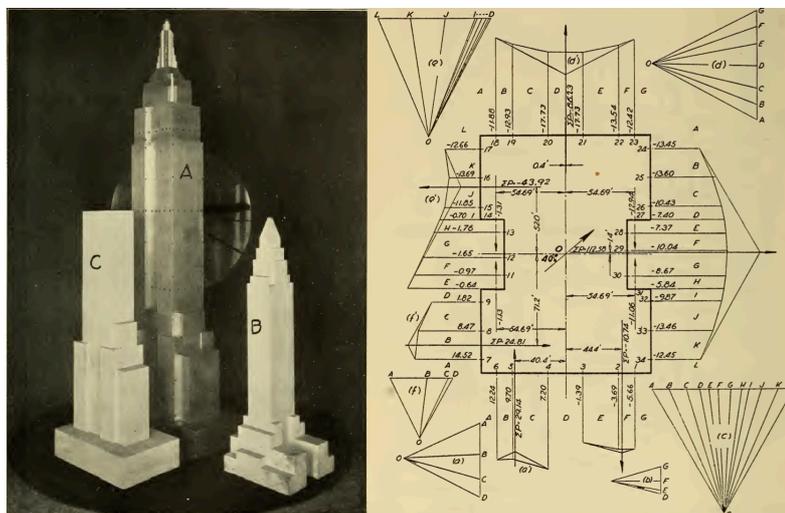


Figura 2: Ensaios no edifício *Empire State Building* (adaptada de HARRIS, 1934)

Foi Sykes (1983), em meados dos anos oitenta, que observou a importância de prosperarem as pesquisas em relação aos efeitos de vizinhança quando ensaiou, em túnel de vento, a interferência gerada entre dois modelos padrões de edifícios altos, do *Commonwealth Aeronautical Research Council* (CAARC). O autor relatou o surgimento de um efeito de proteção quando a interferência era gerada por uma edificação de mesma altura. Ao reduzir pela metade a altura da edificação de interferência notou-se um aumento nas ações do vento atingindo o modelo a sotavento.

Por sua vez, Blessmann e Riera (1985), já conhecendo o comportamento dos modelos sob o efeito de vizinhança em escoamentos suaves, ensaiaram a influência de uma edificação vizinha a barlavento de outra sob a ação de um escoamento turbulento (ver figura 3), buscando simular o vento em ambiente urbano. Os ensaios foram realizados com dois modelos iguais prismáticos de seção quadrada, um instrumentado para a coleta de resultados e outro servindo de barreira ao vento. Foram utilizadas quinze combinações diferentes de posicionamento entre os dois modelos, com ângulo de incidência do vento variando a cada 15° . O objetivo do estudo era analisar os coeficientes de força e momento torçor do modelo instrumentado sob efeito da edificação vizinha. Blessmann e Riera concluíram que sob o efeito das edificações vizinhas, houve um acréscimo nos coeficientes de força atuantes e que o

momento torçor em alguns casos de incidência do vento, chegou a triplicar em relação ao modelo isolado. Em comparação ao estudo sob escoamento uniforme realizado anteriormente, os resultados dos coeficientes de força calculados foram menores para todas as relações de interferência entre os modelos ensaiados.

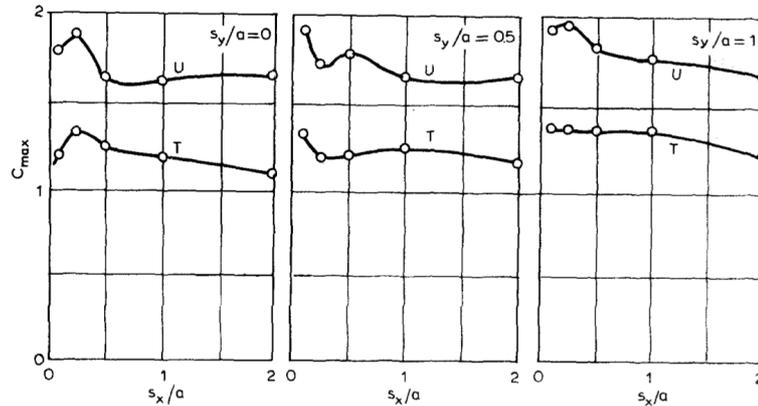


Figura 3: Ensaios realizados por Blessmann e Riera (BLESSMANN; RIERA, 1985)

Em outra pesquisa, Blessmann (1985) estudou o efeito de martelamento ressonante causado por uma edificação vizinha sobre a outra, através de ensaios de dois modelos prismáticos iguais (ver figura 4). Um rígido, servindo de obstáculo a passagem do vento, e outro aeroelástico, o qual foi instrumentado para a coleta de dados. O estudo também levou em consideração dois tipos de escoamento do vento, um suave e outro turbulento. O autor levantou os dados de aceleração do modelo ensaiado compondo uma tabela com o fator de martelamento (BF), para os dois tipos de escoamento em diferentes posições de interferência entre os modelos. O fator de martelamento determinado no estudo foi dado pela razão entre a aceleração RMS do modelo inserido em vizinhança e a aceleração RMS do modelo em situação isolada.

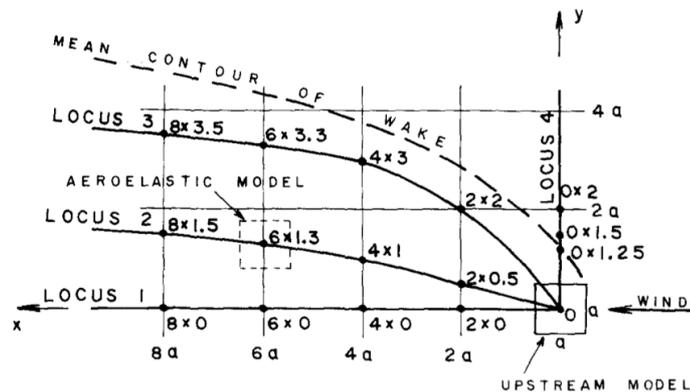


Figura 4: Ensaios realizados por Blessmann (BLESSMANN, 1985)

pequena escala, que aumentaram a velocidade do escoamento incidente na edificação vizinha, e por fim vórtices de esteira sincronizados, que ocasionaram o maior aumento na força flutuante do edifício em estudo.

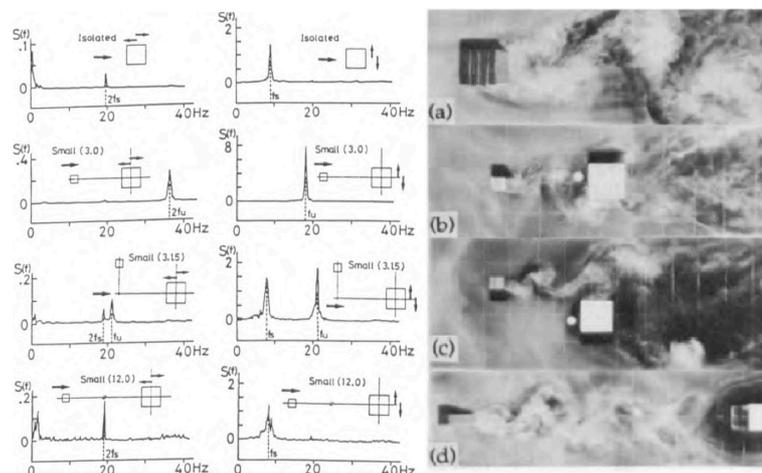


Figura 6: Espectros de arrasto e sustentação (TANIKE, 1992)

Zhang e Melbourne (1992) investigaram a formação de vórtices durante a transição de um escoamento de ar suave a turbulento sob dois cilindros dispostos em formação tandem, ou seja, em fila, um ao lado do outro. Durante escoamento suave, foram registrados quatro regimes de formação de vórtices, em particular no segundo regime foi relatado o maior aumento das pressões flutuantes no modelo a sotavento, ocasionado pela formação de vórtices gerados pela esteira do modelo à barlavento. A medida que o escoamento adquiria características turbulentas a formação de vórtices nos modelos se tornava fraca e desorganizada. A variação de pressões flutuantes no modelo a sotavento, foram menores do que as registradas no escoamento uniforme.

Blessmann (1992) analisou o caso do efeito de vizinhança em duas edificações existentes, o edifício do Citibank, em São Paulo, e o edifício Manhattan, no Rio de Janeiro. A análise do comportamento dessas edificações foi efetuada por meio de ensaios em túnel de vento sob escoamento deslizante, realizados com os modelos isolados e na presença das estruturas de vizinhança. O intuito dos ensaios era coletar dados dos coeficientes de pressão (c_p), para cálculo dos coeficientes de força (C_x , C_y) e de torção (C_t) dos modelos nos dois casos de análise (ver figuras 7 e 8). Os resultados dos ensaios demonstraram que para os dois edifícios, os coeficientes de força sofreram um pequeno aumento na presença da vizinhança em relação a estrutura isolada. No caso do Citibank, os resultados foram fortemente influenciados pelos

modelos vizinhos, já no edifício Manhattan foi observado uma redução das ações do vento na estrutura. Segundo Blessmann, as ações dos ventos dependeram do número de edificações vizinhas e de seu posicionamento em relação ao modelo estudado.

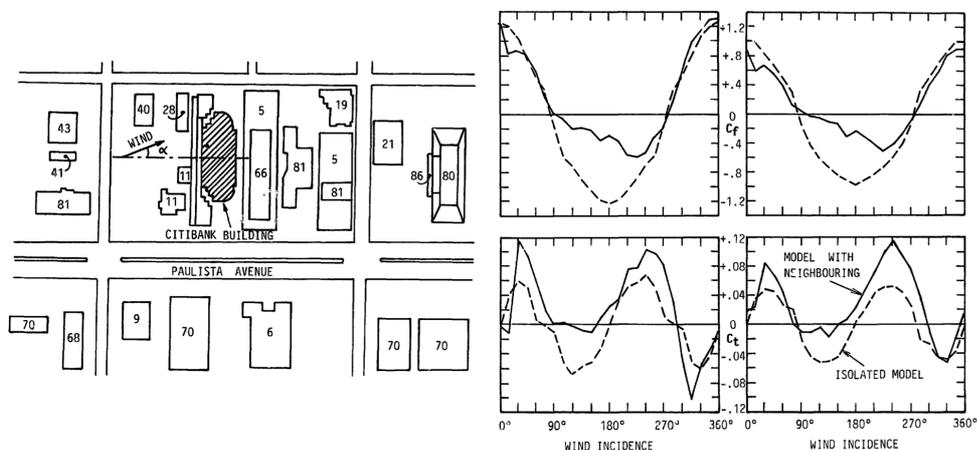


Figura 7: Ensaios no edifício *Citibank* (BLASSMANN, 1992)

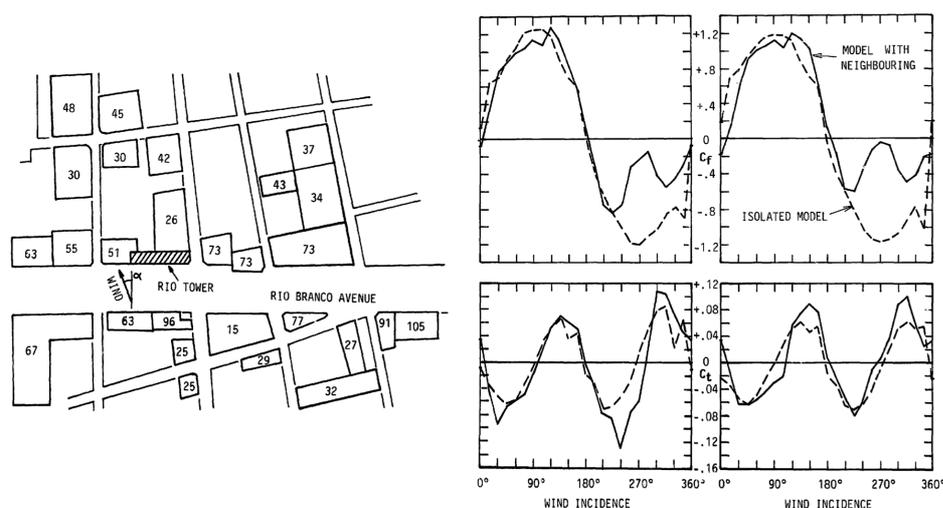


Figura 8: Ensaios no edifício *Manhattan* (BLESSMANN, 1992)

Isyumov et al. (1992) estudaram o comportamento dinâmico de um edifício alto sob a ação do vento com e sem interferência das edificações de vizinhança. Além disso foram alteradas as estruturas de cobertura da edificação em estudo, a fim de obter conhecimento sobre a influência da geometria da cobertura, sobre a resposta flutuante do edifício. Como resultado das análises, foram gerados gráficos dos espectros de forças para a resposta da edificação na direção do vento e transversal a ele.

Orlando (2001), investigou os carregamentos estáticos gerados pelo vento na interferência de duas torres de refrigeração, estruturas de concreto armado usualmente construídas em usinas nucleares de geração de energia. Os ensaios foram realizados em túnel de vento com modelos rígidos das torres posicionadas em configuração tandem, com ventos variando de 0° a 30° . Os resultados dos testes foram comparados com as respostas geradas pelo ensaio do modelo isolado e por cálculos indicados segundo as normas francesa e alemã. Os maiores valores obtidos devido ao efeito de interferência nos esforços de vento experimentados pelas torres, foram observados para ângulos de incidência de ventos menores que 25° e para afastamentos (L), entre os modelos, de uma vez e meia a duas vezes o diâmetro da torre (ver figura 9).

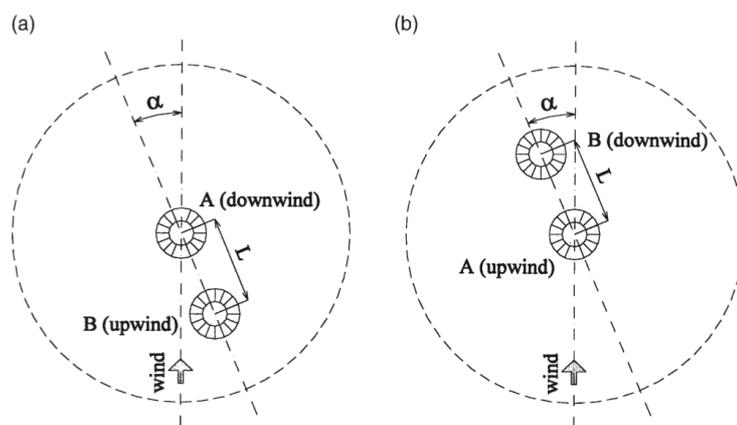


Figura 9: Ensaio realizado por Orlando (ORLANDO, 2001)

Thepmongkorn et al. (2002), por meio de ensaios em túnel de vento, investigaram os efeitos de interferência causados na presença de edificações vizinhas no que diz respeito ao movimento translacional e torcional acoplados, sobre os modelos do CAARC *Standard Tall Building*. Para diversas configurações de interferência, os autores registraram um aumento significativo nas respostas do modelo, principalmente quando o despreendimento de vórtices, oriundo da edificação de interferência à barlavento, coincidia com a frequência natural de vibração do CAARC, efeito este chamado de martelamento ressonante. As respostas em relação aos momentos fletores e torçores foram aumentadas quando a edificação de interferência encontrava-se posicionada diagonalmente à barlavento do modelo estudado.

No Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Carpeggiani (2004) estudou os carregamentos gerados em diversos modelos de edificações altas devido à ação do vento através de ensaios em túnel de vento. Em especial os esforços de torção, obtidos nos ensaios do túnel, foram comparados aos resultados

calculados segundo as normas de vento alemã, DIN-1055 (1977), brasileira, NBR-6123 (1988) e canadense, NBCC (1990). O autor conclui em relação a norma brasileira que 43% dos casos estudados apresentaram momentos torçores acima dos previstos pelo código. Mais precisamente nos casos em que o formato da edificação e sua seção transversal divergiram das formas paralelepípedicas padronizadas pela norma. Para estes edifícios, os resultados dos ensaios no túnel se mostraram ainda mais divergentes aos cálculos que seriam obtidos aproximadamente pelo código brasileiro (ver figura 10). Por fim, Carpeggiani recomenda que a norma brasileira Forças Devido a Ação do Vento em Edificações, NBR-6123 (1988), adote o maior valor de excentricidade para cálculo dos esforços torçores, tanto para edificações isoladas, quanto em vizinhança.

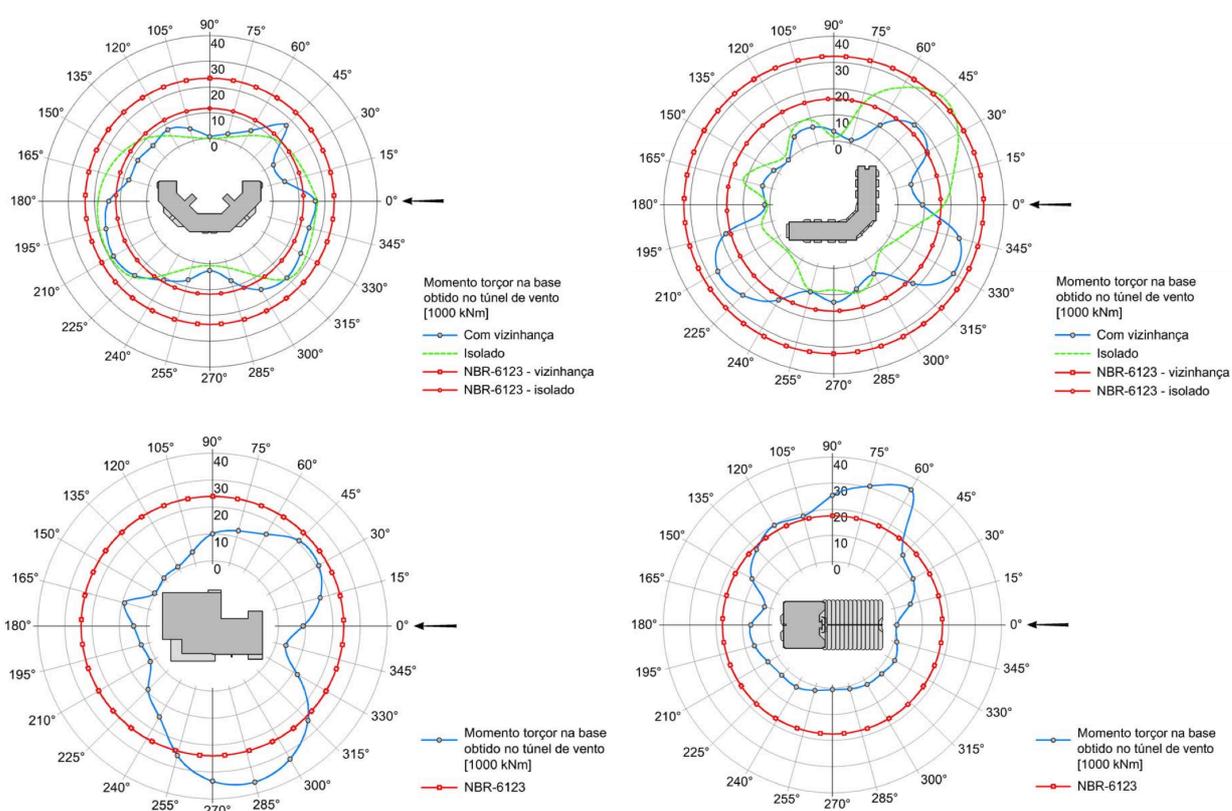


Figura 10: Estudos realizados por Carpeggiani (adaptada de CARPEGGIANI, 2004)

Xie e Gu (2004), estudaram os esforços devidos ao vento causados pelos fenômenos de interferência por vizinhança entre dois e três modelos de edifícios altos. O objetivo do estudo era calcular o fator de vizinhança (FV) através da razão dos momentos médios na base dos edifícios em situação de vizinhança, pelo momento médio gerado na base do modelo no ensaio isolado. Os autores salientam que há dois principais tipos de FV. Um representando os

valores médios dos esforços gerados pelo vento e o outro os valores dinâmicos, ocasionados pela ação flutuante do vento nos modelos. Xi e Gu registraram que os principais efeitos causados pela presença da vizinhança no modelo principal foram efeitos de proteção e Venturi. Ainda, concluíram que os principais fatores que regem o tipo de interferência e sua intensidade, são a proximidade da vizinhança em relação ao modelo principal e também as alturas e larguras dos modelos de interferência.

Na China, Li et al. (2006) realizaram um detalhado estudo sobre o efeito de ventos fortes no super arranha-céu *Jin Mao Building*, o maior edifício já construído no território chinês, até aquela data. Através de ensaios em túnel de vento utilizando o método *High Frequency Force Balance* (HFFB), o modelo foi exposto a ensaios isolado e em vizinhança, onde foram registrados diversos efeitos causados pelo vento, e assim, determinadas as respostas médias e flutuantes do edifício, no que diz respeito a esforços solicitantes, deslocamentos, acelerações e coeficientes aerodinâmicos (ver figura 11). Além disso, um estudo em escala real foi realizado após a construção do edifício durante a passagem do furacão *Ranarin*, ocorrida em agosto de 2004. Este estudo teve por objetivo registrar o comportamento real do edifício à passagem de um furacão e compara-lo aos ensaios realizados na fase de projeto, o que se mostrou em boa concordância às previsões obtidas no túnel de vento.

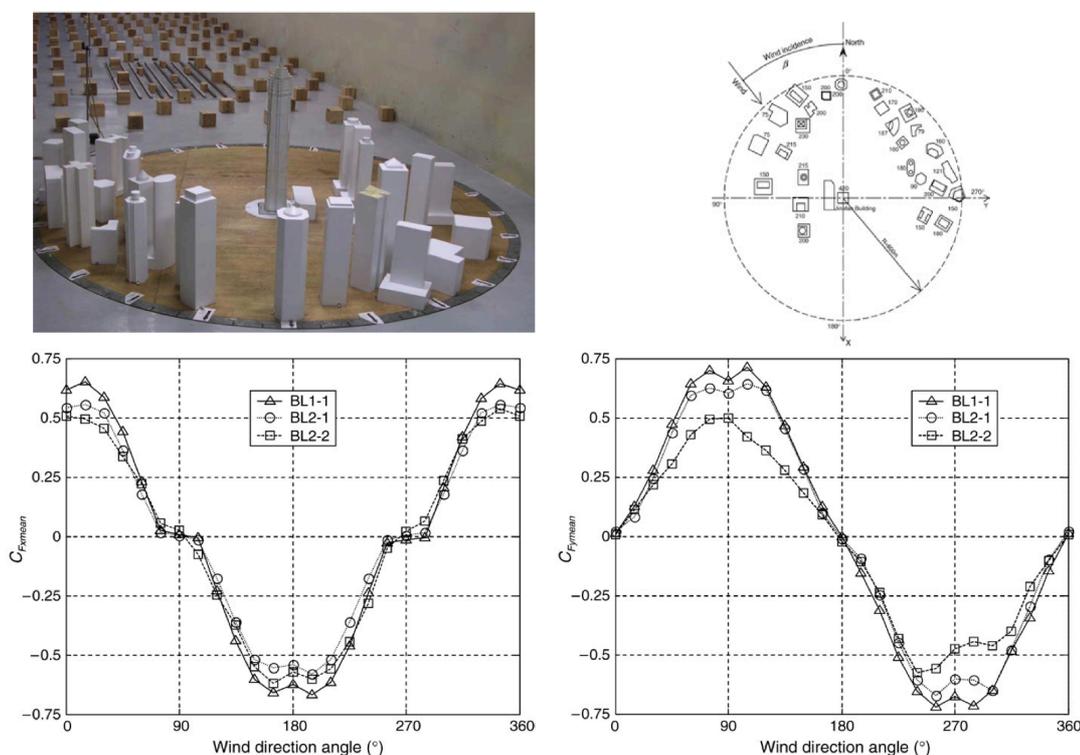


Figura 11: Ensaios realizados por Li (adaptada de LI et al., 2006)

Lam et al. (2008), investigaram os efeitos de interferência gerados por cinco edificações muito próximas uma da outra, dispostas em fila. Carregamentos médios e flutuantes do vento foram medidos. Um forte efeito de escudo foi observado para a maioria dos ângulos de vento paralelos e semi-paralelos a formação das edificações. Outros efeitos de interferência foram observados principalmente para a última edificação do alinhamento, na qual notaram-se resultados ainda maiores que os observados em ensaios da edificação isolada. Os autores constataram que devido a proximidade dos modelos, um grande efeito de canalização do vento no espaço entre os edifícios foi registrado, ocasionando aumento nos coeficientes de pressão negativos nas faces confrontantes entre os edifícios. Para incidências de vento normais ao alinhamento das edificações, não houveram mudanças significativas nos esforços gerados pela velocidade média do vento. Já parcela flutuante do carregamento, nestes casos de vento, obteve forte alteração devido ao desaparecimento quase total dos vórtices alternados, também conhecidos como vórtices de von Kármán.

Também no LAC, Vanin (2011) realizou ensaios no túnel de vento *Professor Joaquim Blessmann*, sendo um deles com um modelo de edificação real em escala reduzida, a fim de obter as respostas dinâmicas e estáticas frente à ação do vento. O objetivo do trabalho era estimar os deslocamentos longitudinais e transversais à direção do vento, com auxílio de uma balança dinâmica de três graus de liberdade acoplada à base do modelo. A pesquisa comparou os resultados da balança com o método do *High Frequency Pressure Integration* (HFPI), o que se mostrou em boa concordância; além disso o estudo levou em consideração ensaios com a edificação isolada e sob situação de vizinhança (ver figura 12).

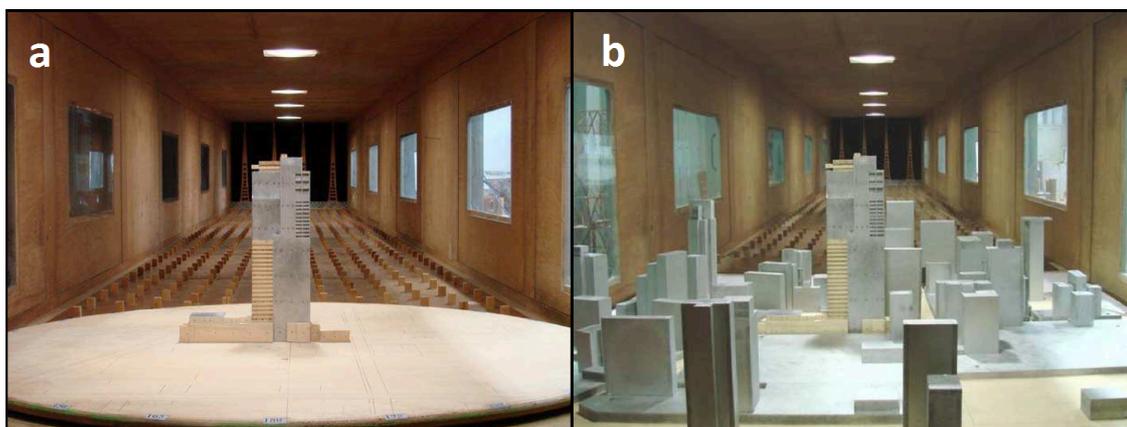


Figura 12: Ensaios realizados por Vanin; (a) isolado; (b) sob vizinhança (adaptada de VANIN, 2011)

KIM et al. (2011), a fim de ampliarem a abrangência da norma de vento australiana, neozelandesa e japonesa sobre o efeito de vizinhança entre edificações, geraram uma base de resultados ao estudarem o fenômeno através de ensaios em túnel de vento. O estudo proposto objetivava investigar a influência na distribuição de pressões locais nas faces de uma edificação posicionada nas proximidades da outra, registrando o posicionamento entre as edificações a qual gerava aquela configuração de efeitos. Foram registrados casos de aumento e diminuição dos coeficientes de pressão na face do modelo principal, devido à mudança de posicionamento e altura do modelo vizinho (ver figura 13).

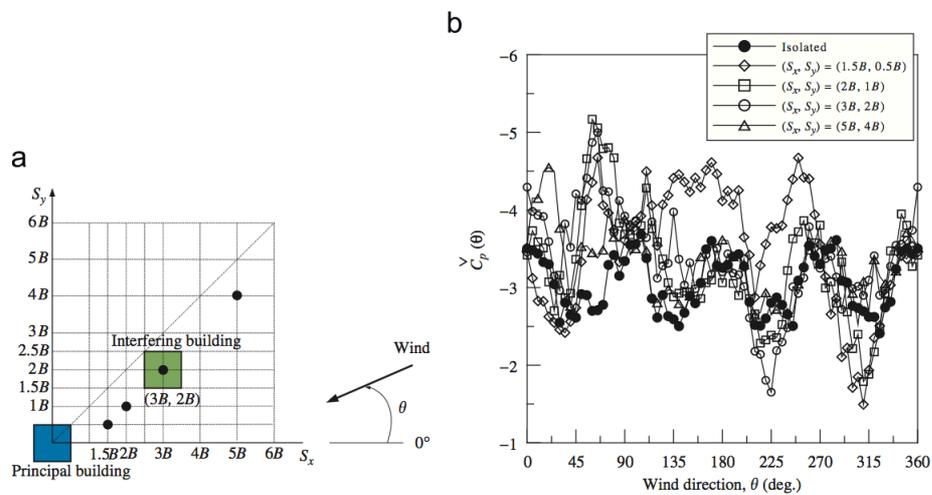


Figura 13: Ensaios realizados por Kim; (a) posições da edificação de interferência; (b) respostas da edificação principal (adaptada de KIM et al., 2011)

Novamente Lam et al. (2011) ensaiaram em túnel de vento os efeitos de interferência gerados por cinco edificações alinhadas uma ao lado da outra, desta vez em formação diamante. Mais uma vez carregamentos médios e flutuantes do vento foram medidos para cada edificação da formação. A determinação das respostas dinâmicas dos modelos foi realizada pelo método *High-Frequency Force Balance* (HFFB). Foi observado um aumento nos carregamentos médios do vento em relação ao estudo anterior. Segundo os autores isto ocorre devido à amplificação no efeito de canalização do vento nas aberturas formadas entre as edificações, que ocasionou aumento nos coeficientes de pressões positivos. Os carregamentos flutuantes, também aumentaram devido a excitação ocasionada pelo desprendimento de vórtices alternados. A seguir, figura 14, com representação da disposição dos modelos utilizados para os ensaios realizados por Lam et al. (2011).

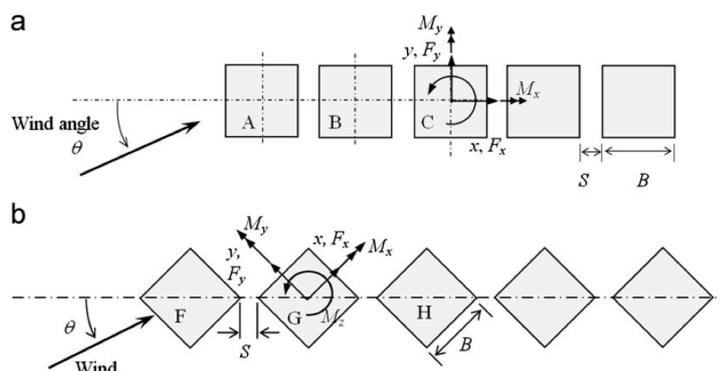


Figura 14: Ensaio realizados por Lam; (a) formação tandem; (b) formação diamante (LAM et al., 2011)

Loredou-Souza et al. (2012), a partir de ensaios em túnel de vento, estudaram os esforços gerados pela ação do vento em uma edificação alta sob situação isolada e em vizinhança. Um dos motivos do estudo deu-se ao formato não usual da seção transversal da edificação, em forma de “*bumerangue*”, uma vez que a norma brasileira, NBR-6123 (1988), indica valores de coeficientes aerodinâmicos para seções transversais retangulares de edificações. Outro motivo, foi que a mesma norma não prevê a incidência de ventos oblíquos às estruturas, dessa forma dificultando as estimativas dos esforços oriundos devido ao vento para outras direções diferentes das ortogonais. Quanto aos resultados dos ensaios no túnel, de uma forma geral estes demonstraram uma redução significativa dos esforços gerados na edificação, quando em comparação aos cálculos analíticos realizados através de uma aproximação dos dados da norma de vento brasileira.

Hui et al. (2012), estudaram o efeito de vizinhança através de ensaios em túnel de vento em dois edifícios, um com seção transversal retangular e outro quadrada, ambos de mesma altura. O objetivo do trabalho era analisar a distribuição de pressões externas, nas fachadas dos modelos, ocasionada pela interferência gerada entre as edificações. Durante os ensaios, foram utilizados dois pares de modelos para cada uma das seções propostas. Dois deles, instrumentados com tomadas de pressão ao longo das fachadas, e outros mudos, não instrumentados, servindo de barreira ao vento. Os modelos principais eram os instrumentados e tinham suas posições fixas, enquanto que os modelos mudos, serviam apenas de obstáculo para a passagem do vento. Os resultados foram interpretados com base no fator de vizinhança (FV), que pode ser medido pela razão entre os coeficientes de pressão nos modelos sob vizinhança ($c_{p,CV}$) e os coeficientes de pressão nos modelos isolados ($c_{p,ISO}$) conforme equação 1.

Determinação experimental em túnel de vento dos efeitos estáticos de proteção causados por edificações vizinhas: Contribuição para a revisão dos fatores de vizinhança da NBR-6123.

$$FV = \frac{C_{p,CV}}{C_{p,ISO}} \quad (\text{Equação 1})$$

Mara et al. (2012) relatam que a proximidade entre as edificações podem significativamente impactar nos carregamentos do vento em uma determinada estrutura que esteja inserida no contexto da vizinhança. Fenômenos como martelamento, efeito Venturi e de proteção geram carregamentos únicos e imprevisíveis. Os autores concluem como inevitável a interferência gerada por vizinhança em um ambiente urbano, e que os fatores mais importantes que influenciam neste mecanismo são: a frequência natural, a geometria e a distância da edificação de projeto para com estrutura de interferência. Com isso, os autores apresentam uma série de recomendações a serem observadas pelos projetistas para que sejam identificadas situações de carregamento de vento problemáticas, ainda em fase de projeto. Algumas das recomendações são as seguintes:

- a) Há alguma edificação de mesmo tamanho ou maior do que a edificação de projeto em sua zona de influência? A medida da zona de influência é dada por $8D$, onde D é a dimensão em planta da face a barlavento da edificação de projeto. Estruturas que estiverem muito próximas, D a $2D$, da edificação de projeto, tendem a gerar interferência na resposta torcional do edifício estudado. Uma distância a barlavento de $3D$ a $5D$ tem-se potencialmente mostrado influenciar a resposta transversal ao vento. Ao passo que interferências que geram diferenças na resposta longitudinal tem-se mostrado muito mais variáveis em relação a distância da edificação de estudo, acima até mesmo de $8D$.
- b) Qual seria o formato da estrutura de interferência? Estruturas de tamanho compacto e seção transversal constante ao longo de sua altura, tendem a gerar vórtices mais organizados. O espectro de energia mantido na esteira turbulenta deste tipo de estrutura possivelmente irá se concentrar em torno de uma frequência específica. Sendo assim, com o intuito de evitar o martelamento ressonante, a frequência natural da edificação situada na esteira da estrutura de interferência, deverá ser analisada, a fim de se obter a correta resposta dinâmica da edificação em estudo.

Por meio de ensaios no túnel de vento *Professor Joaquim Blessmann* do LAC, Bênia (2013) apresentou conclusões em relação aos efeitos ocasionados pela proximidade de edifícios vizinhos a um modelo de edificação alta padronizado pelo *Commonwealth Aeronautical Research Council* (CAARC), sob diversas configurações de interferência. Os resultados foram obtidos através da utilização de uma balança de força de três graus de liberdade, onde o modelo do CAARC foi fixado. Ambos os esforços, estáticos e dinâmicos, foram obtidos em relação ao modelo isolado e comparados aos esforços obtidos ao modelo em ensaios com variação da proximidade e altura das edificações de interferências. Bênia (2013), concluiu que apenas uma edificação de interferência, independente de seu posicionamento em relação ao modelo, não afetou significativamente a resposta transversal média do edifício estudado. Conseqüentemente para outros ensaios, onde haviam duas edificações de interferência situadas a barlavento do modelo, o principal fator de divergência entre os resultados obtidos no modelo isolado, foi dado pelo afastamento da vizinhança ao CAARC. Bênia (2013) ressalta que o efeito de martelamento esteve presente em todas configurações de ensaios em que o modelo em questão encontrava-se na esteira dos modelos vizinhos. O estudo da autora levou em consideração momentos fletores e torçores, assim como a amplitude dos deslocamentos gerados pelas ações do vento no modelo do *CAARC Standard Tall Building*.

Recentemente Hui et al. (2013a), estudaram as causas devidas aos efeitos de interferência por vizinhança ao ensaiarem em túnel de vento os fenômenos gerados no escoamento resultante entre dois modelos de edificações, em diversas posições de interação. O método utilizado para visualizar o escoamento do vento, foi através do *Particle Image Velocimetry* (PIV), auxiliado por pontos de tomadas de pressão, instalados em locais estratégicos das edificações. O método possibilita a identificação, por meio de imagens de campo das velocidades, das linhas de correntes e também da formação de vórtices, gerados a partir do escoamento de ar no entorno dos modelos (ver figura 15). Para o autor, o estudo do campo de escoamento, pode ajudar engenheiros e pesquisadores da área a visualizarem com mais clareza os efeitos causados pelos carregamentos de vento nas estruturas, e assim tomarem medidas mais eficientes para solução de problemas provocados pelos efeitos de interferência.

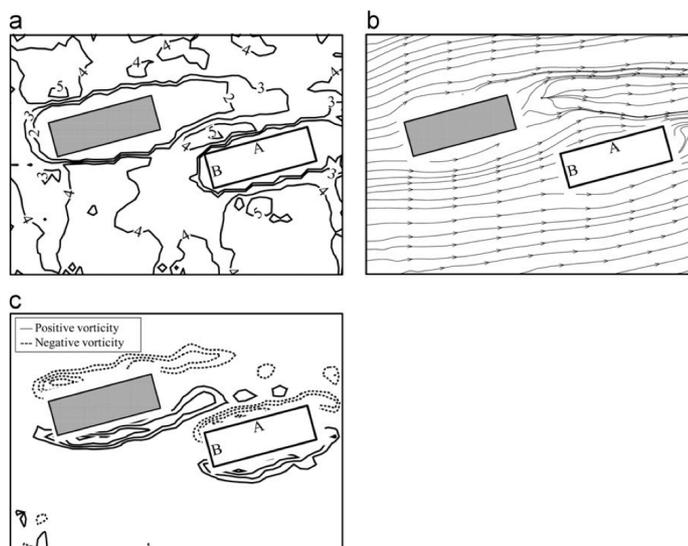


Figura 15: Ensaios realizados por Hui; (a) campo de velocidade; (b) linhas de fluxo; (c) campo de vórtices (HUI et al., 2013a)

Atualmente há uma novo ramo na Engenharia do Vento formando-se no estudo a respeito das interferências geradas pelos efeitos de vizinhança, no comportamento das edificações sob a ação do vento, com base em análises por processamentos computacionais, mais precisamente, em sistemas de inteligência artificial (AI). Através da utilização de redes neurais, *neural networks* (NN) e sistemas baseados no conhecimento, *knowledge based systems* (KBS), estes sistemas tem demonstrado, com facilidade, interpolar e extrapolar casos de interação entre vizinhanças a partir do *input* de dados, previamente conhecidos, de ensaios em túnel de vento (ver figura 16). As redes neurais em concordância ao sistemas KBS, são capazes de desenvolverem relações funcionais entre dados experimentais documentados a fim de expandir os casos de interferência, proporcionando uma série de ensaios de túnel de vento virtuais, o que seria improvável, na prática, de serem realizados experimentalmente. (KHANDURI et al. 1998)

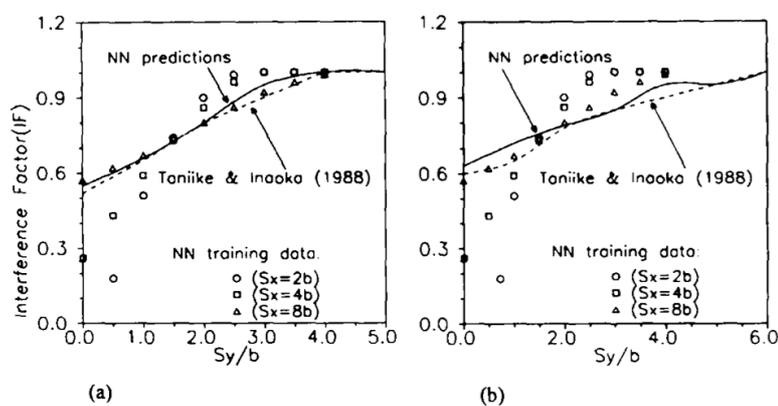


Figura 16: Previsões das *neural networks* em comparativo com estudo para FV médio na direção do vento (KHANDURI et al., 1998)

A busca de um instrumento prático na análise de projetos com a utilização destes sistemas tem sido idealizada com o intuito de proporcionar carregamentos de vento que simulem condições de vizinhança nas edificações de projeto. Esta ferramenta é composta das seguintes etapas:

- a) Conhecimento e coleta de dados pelo KBS;
- b) Generalização e avaliação dos casos pelas NN;
- c) Conclusões e diretrizes de projetos pelo KBS;

Para Khanduri et al. (1998) a capacidade de resolver problemas mal estruturados, de multi-variáveis complexas e não lineares, com informações incompletas ou confusas, como os problemas onde atuam efeitos aerodinâmicos de interferências por vizinhança, tornam a utilização dos sistemas computacionais inevitáveis às futuras análises estruturais.

1.4 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo contribuir para o acréscimo de conhecimento na determinação dos efeitos de vizinhança provocados pela parcela estática dos esforços devido a ação do vento em edifícios altos. Os dados utilizados na pesquisa são oriundos de medidas de pressões nas superfícies dos modelos em escala reduzida, de edificações altas, submetidas a ensaios em túnel de vento, e serviram de base para o cálculo dos coeficientes de força em relação a dois eixos ortogonais com origem próxima ao centro de torção da seção transversal correspondente ao pavimento tipo de cada edifício estudado. Outros modelos de edificações, mudos, não instrumentados, servirão de interferência a passagem do escoamento conforme vizinhança dos modelo aerodinâmicos propostos. Especialmente serão determinados os fatores de vizinhanças (FV), em 24 ângulos de incidência de vento para cada um dos modelos. Fenômenos como: efeito Venturi, efeito de proteção, desprendimento de vórtices e martelamento também serão comentados.

O trabalho segue a linha de pesquisa já iniciada no Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul no que diz respeito aos efeitos do vento nas edificações. O desenvolvimento deste estudo, proporcionará um padrão de resultados que servirá de base para revisão da norma NBR-6123 (1988), no que se refere aos efeitos provocados por edificações vizinhas aos carregamentos de vento nas edificações de projeto com características semelhantes aos modelos analisados.

2 AÇÃO ESTÁTICA DO VENTO EM EDIFÍCIOS ALTOS: EFEITOS DE VIZINHANÇA

2.1 O VENTO NATURAL

“O movimento do ar sobre a superfície terrestre (vento) tem como causa imediata principal as diferenças na pressão atmosférica, causadas pela energia proveniente do sol que origina variações na temperatura do ar. As pressões desequilibradas originam forças que deslocam parcelas do ar atmosférico das zonas de maior pressão para as de menor pressão.”
Blessmann (1995)

2.1.1 Camada Limite Atmosférica

Em Blessmann (2011), a camada limite com base nos estudos de Prandtl, é dita como sendo uma fina camada em torno da superfície dos corpos que sofre influência da viscosidade. Dela depende diretamente a resistência de atrito e indiretamente a resistência de forma dos corpos. No caso da resistência de forma, os efeitos da viscosidade alteram o padrão de escoamento do fluxo do fluido, modificando a formação dos turbilhões e conseqüentemente a distribuição de pressões, fatores diretamente ligados ao formato aerodinâmico dos corpos. Já no caso da resistência por atrito, a influência da viscosidade atua na região da camada limite onde a velocidade varia de zero à velocidade do fluxo. Dependendo do coeficiente de atrito da camada, poderão ser gerados fortes gradientes de velocidade, que se transmitem por esforços tangenciais, visualizados nos perfis de velocidades do fluxo.

Para Blessmann (2011), a formação da camada limite é composta por três zonas características:

- a) Zona Laminar: Ocorre a formação do contorno da camada, onde as linhas de correntes inclinam pouco, sendo o fluxo laminar.
- b) Zona de Transição: Região muito breve, onde há o crescimento da camada limite devido ao atrito, o perfil de velocidades é variável a sotavento do escoamento.
- c) Zona de Turbulência: Onde ocorre manutenção da camada limite, o perfil de velocidades estabiliza-se. Caso não haja alteração na pressão estática e na superfície de escoamento a camada prolonga-se indefinidamente.

Na atmosfera, a camada limite é a região na qual o ar recebe influência de atrito viscoso com a superfície terrestre, daí então chamada de camada limite atmosférica (SOCKEL, 1994).

Segundo Blessmann (2011), o escoamento do ar sobre a camada limite atmosférica segue a teoria apresentada por Euler, onde se descreve o movimento das partículas contidas no fluxo pelo conceito de campo, não havendo a individualização das partículas em deslocamento no fluido, o escoamento é considerado sob o conjunto de partículas da massa de ar.

Em Simiu (2011), a formação da camada limite atmosférica depende dos seguintes fatores (ver figura 17):

1. Das velocidades do vento em um determinado período de tempo;
2. Da variação da velocidade do vento com a altura em relação ao solo (h), cujo fator depende da rugosidade do terreno, distância (x) de abrangência da rugosidade do terreno ao ponto de medição, topografia da região e intensidade do vento (velocidade e turbulência);
3. Da turbulência atmosférica, que além de interferir nas velocidades do vento em um determinado período, afeta fortemente o carregamento dinâmico das estruturas.

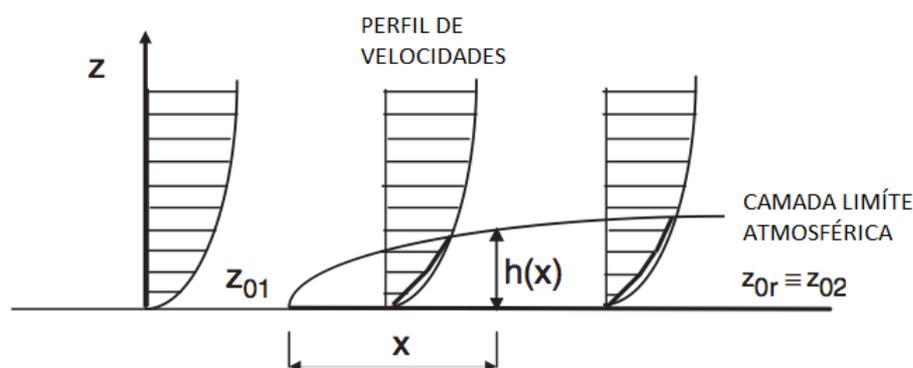


Figura 17: Perfil de velocidades médias e formação da camada limite atmosférica (adaptada de SIMIU, 2011)

2.1.2 Ventos Sinóticos

São os ventos que ocorrem em larga escala, dentro da camada limite atmosférica, pela ação de grandes sistemas climáticos de alta e baixa pressão atmosférica, tipicamente representados por ventos sazonais, de monções ou frentes frias, que deslocam-se regularmente na superfície terrestre (HOLMES, 2007).

2.1.2.1 Perfil de Velocidade Médias

Dentro da camada limite atmosférica, o ar se propaga em um perfil de velocidades crescentes que varia de zero, nas proximidades do solo, até o limite da camada atmosférica, sem mais receber a influência do atrito superficial (ver figura 18). As principais leis que representam melhor o perfil de velocidades para ventos sinóticos são as seguintes:

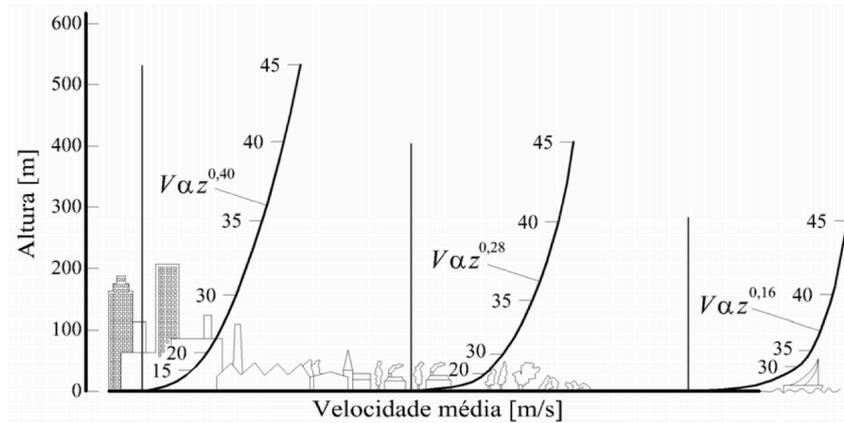


Figura 18: Perfis de velocidades médias para terrenos de diferentes rugosidades (CARPEGIANI, 2004 apud COOK 1990)

I. Lei Potencial

Baseada na lei dos efeitos de intercâmbio da quantidade de movimento em uma camada limite turbulenta, a lei potencial (equação 2) descreve o perfil de velocidades médias das partículas de ar entre duas alturas quaisquer dentro da camada limite atmosférica (Blessmann, 1995).

$$\frac{\bar{V}(z)}{\bar{V}(z_{\text{ref}})} = \left(\frac{z}{z_{\text{ref}}}\right)^p \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

- z Altura da partícula de ar;
- z_{ref} Altura de referência, usual 10m;
- $\bar{V}(z)$ Velocidade média da partícula;
- $\bar{V}(z_{\text{ref}})$ Velocidade média de referência;
- p Classe do terreno quanto a rugosidade superficial. Varia de 0,11 para terrenos predominantemente planos a 0,35 para centros urbanos com predomínio de edificações altas;

A lei potencial apesar de não descrever muito bem o perfil de velocidades média para as regiões mais próximas à superfície do solo, representa bem o perfil de velocidade média ao longo da camada limite atmosférica.

II. Lei Logarítmica

Segundo Blessmann (1995), a lei logarítmica (equação 3) descreve melhor o perfil de velocidade média às camadas mais próximas à superfície do solo, no entanto perde a concordância para regiões mais altas da camada limite atmosférica.

$$\frac{\bar{V}(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

z	Altura da partícula de ar;
z_0	Altura de rugosidade do terreno;
$\bar{V}(z)$	Velocidade média da partícula;
u_*	Velocidade de corte;
κ	Constante de Von Kármán ($\kappa \sim 0,4$);

2.1.3 Ventos Não Sinóticos

Em engenharia estrutural, os ventos não sinóticos são representados por fenômenos atmosféricos extremamente violentos e localizados, como por exemplo tornados e *downbursts*. Segundo Holmes (2007), o perfil de velocidades médias destes tipos de ventos, ocorre com as maiores velocidades em aproximadamente 100 m da superfície terrestre e reduzem para as camadas mais altas do fenômeno, conforme representado na figura 19. No Brasil, uma indicação das regiões onde estes fenômenos são relevantes é apresentada por Lima (2004).

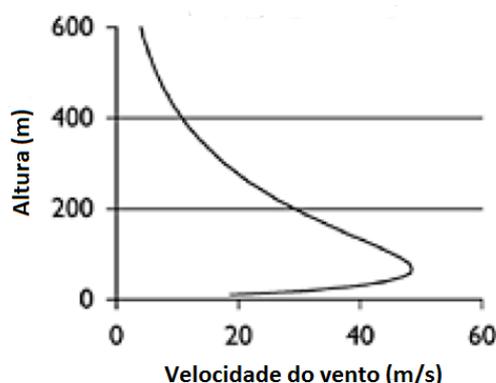


Figura 19: Perfil de velocidades horizontais de um *downburst* próximas ao solo (adaptada de HOLMES, 2007)

2.2 INTERAÇÃO VENTO ESTRUTURA

2.2.1 Número de Reynolds

$$R_e = \frac{\bar{V} d}{\nu} \quad (\text{Equação 4})$$

O número de Reynolds (R_e) (equação 4) é uma grandeza adimensional obtida através da relação entre as forças inerciais ($\bar{V} d$) e as de viscosidade (ν), cujo valor representa a característica do escoamento gerado no entorno dos corpos submetidos à passagem de um fluido. Blessmann (2011) afirma que nos corpos aerodinâmicos, a distribuição de pressões dá-se quase que exclusivamente à resistência de atrito destes corpos, influenciadas pelo turbilhonamento da corrente de fluxo e a rugosidade superficial dos corpos submetidos ao escoamento. Neste caso o número de Reynolds obtido para o escoamento do fluido, nestes objetos, será pequeno. Por outro lado, valores altos de R_e traduzem em forças inerciais mais fortes do que forças de viscosidade, ou seja, alta resistência a passagem do fluido oferecida pela forma dos objetos, característica encontrada em escoamentos sobre corpos rombudos (não aerodinâmicos).

Um estudo realizado por Larose et al. (2012), buscou demonstrar a influência do número de Reynolds na manutenção das respostas transversais, de sustentação, ocasionadas pelo desprendimento de vórtices, em um modelo de super arranha-céu de seção transversal quasi-circular. O modelo foi ensaiado em túnel de vento de alta velocidade em escoamentos suaves e turbulentos até atingir número de R_e da ordem de 3 milhões (ver figura 20). O objetivo da pesquisa era determinar se para valores altos de Reynolds, ou seja, regime de escoamento super-crítico, as respostas transversais devido ao desprendimento de vórtices seriam menores que os ensaiados em regimes sub-críticos, com baixos valores de R_e . Em estudos anteriores realizados por Zdravkovich (1997, *apud* Larose et al., 2012), já apresentavam respostas transversais de um modelo cilíndrico em regime de escoamento super-crítico, menores que em regime sub-crítico. Segundo os autores, o baixo custo e as limitações de escala dos túneis de vento, levam os ensaios nos túneis a utilizarem modelos em escala reduzida, onde o regime de escoamento dá-se na região sub-crítica, levando as resposta de estruturas com seções transversais circulares a valores mais conservativos. Para a seção transversal ensaiada, ambos

coeficientes de força, transversal e na direção do vento, aumentaram a medida que o número de Reynolds do ensaio crescia, demonstrando igual importância deste efeito para altos valores R_e . Medições do número de Strouhal referente a direção do vento com maior desprendimento de vórtices também foram feitas e obtiveram boa concordância aos valores medidos nos ensaios em regime sub-críticos.

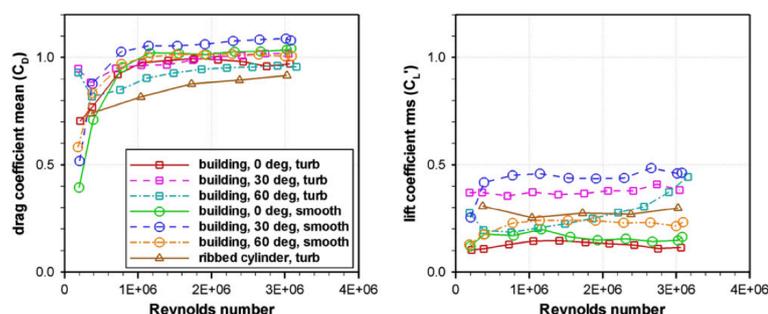


Figura 20: Variação dos coeficientes de arrasto médio e de sustentação RMS, em relação as direções do vento e número de Reynolds (LAROSE et al., 2012)

2.2.2 Desprendimento de Vórtices

Edifícios são classificados como corpos rombudos, o escoamento do ar que descola nos cantos vivos (não aerodinâmicos) formam grandes e periódicos turbilhões transportados ao longo da esteira. (BÊNIA, 2013 *apud* COOK, 1985). A incidência deste efeito causa um fenômeno chamado desprendimento de vórtices, podendo ser muito nocivo à resposta estrutural das edificações, tanto para a estrutura geradora quanto para a estrutura receptora dos vórtices propagados na esteira. Nesta região, o ar, extremamente turbulento propicia a formação de vórtices. (BLESSMANN, 2005).

O desprendimento dos vórtices aleatórios (figura 21), são naturalmente formados a sotavento, nas esteiras das edificações e de um modo geral não representam riscos estruturais para a edificação geradora nem para edificações vizinhas impactadas por estes turbilhões. Rajadas momentâneas de alta intensidades, podem causar danos em estruturas mais leves fixadas às edificações, como por exemplo, revestimento de fachadas e coberturas.

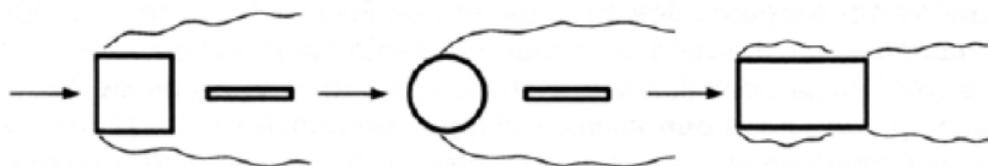


Figura 21: Vórtices aleatórios (BLESSMANN, 2011)

Por outro lado, Blessmann (2005), afirma que corpos rombudos em escoamento suave propiciam a formação dos vórtices sincronizados (figura 22), também chamados de vórtices de von Kármán, caracterizados por apresentarem frequência de desprendimento bem definida. O desprendimento de vórtices deste padrão, causam o aparecimento de forças alternadas ao longo dos corpos formadores do fenômeno, acompanhados por oscilações (deslocamentos). Tais esforços ocorrem de duas formas nas edificações, na direção do vento, onde a frequência de atuação da força se dá ao desprendimento de cada vórtice em individual, as oscilações ocorrem de forma mais fraca, sendo na prática, dificilmente perceptíveis; e outra na direção transversal ao vento, mais nociva à estrutura, ocorrendo na frequência do desprendimento de cada par de vórtices, onde surgem oscilações maiores e consideravelmente perceptíveis nas estruturas.

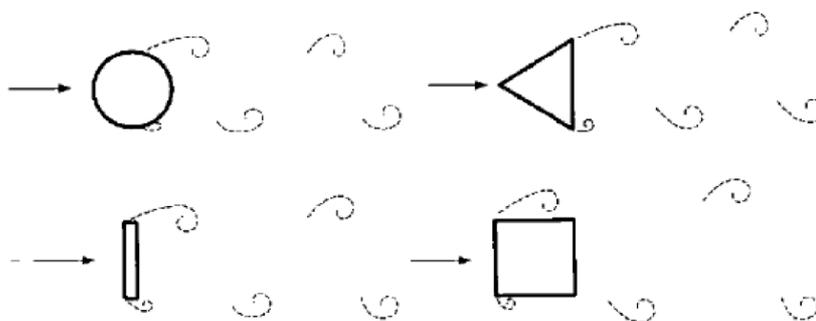


Figura 22 Vórtices sincronizados (BLESSMANN, 2011)

Em Bênia, 2013 *apud* Cook, 1985, tem-se uma explicação detalhada e bastante clara da formação e manutenção deste fenômeno (ver figura 23), segundo o autor, com o aumento da velocidade do vento, há também o aumento do número de Reynolds (R_e), fazendo com que a dupla de vórtices A e B se tornem mais sensíveis às perturbações externas. Caso A seja mais forte do que B, o desequilíbrio fará com que B se mova para a posição entre A e o cilindro, até que B encontre a camada de cisalhamento de A, que possui formação de vórtice com

sentido oposto a de B, desta forma enfraquecendo a formação de A que será levado junto com o escoamento a sotavento do corpo. Imediatamente B toma o lugar de A e cresce com a vorticidade da camada, até que o vórtice C seja criado para repetir o fenômeno descrito, agora sobre o vórtice B. O ciclo se repete fornecendo dois pares de redemoinhos que são propagados na esteira do cilindro.

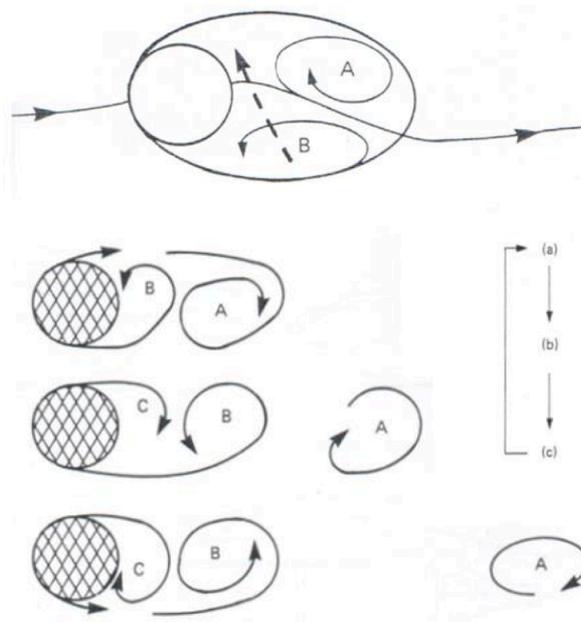


Figura 23: Formação dos vórtices de Von Kármán (adaptada de BÊNIA 2013, apud COOK 1985)

2.2.3 Turbulência

Durante um regime de escoamento natural, qualquer fluido real escoando em atrito direto com uma camada superficial, apresenta um perfil de velocidades variável. As partículas no interior da massa de ar em movimento imediatamente em contato com a superfície de escoamento, aderem a mesma, transferindo o atrito em camadas, formando linhas de corrente de fluxo (ver figura 24). A formação destas linhas, dá-se tangente ao vetor de velocidade e descrevem de forma visual a trajetória, escala de velocidade e turbilhonamento das partículas contidas no escoamento do vento (BLESSMANN, 1983).

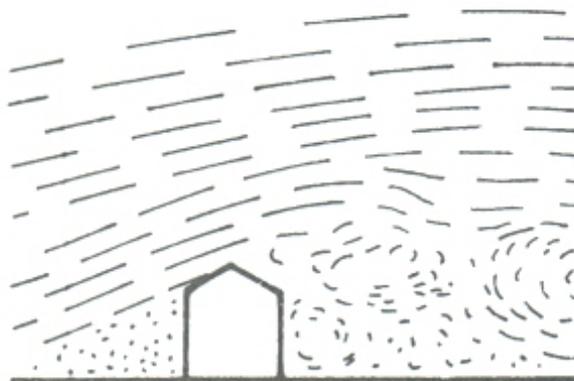


Figura 24: Linhas de corrente entorno do modelo (BLESSMANN, 2011)

Conforme Blessmann (2011), o retardo na velocidade do ar junto as superfícies dos corpos combinado a um gradiente adverso de pressões, ora positivas, ora negativas, faz com que haja a separação da camada limite à superfície de escoamento do fluxo, turbilhonando o ar a sotavento do corpo. Por sua vez, o turbilhonamento atuante nas partículas de uma dada linha de corrente invadem a linha de corrente vizinha, com uma diferença de velocidade em relação a outra, dessa forma diminuindo ou acelerando a velocidade da partícula vizinha. Essa interferência no escoamento das massas de ar dá-se em macroescala, grupos de partículas em movimento caótico quando turbilhonadas invadem regiões de correntes de outras partículas, alterando a quantidade de movimento contida no escoamento. Este intercâmbio de partículas, por fim gera o aparecimento de forças no interior das massas de ar, que ora aceleram o movimento da camada, ora a freiam, turbilhonando o escoamento.

Segundo Blessmann (1995), a distribuição de Gauss representa adequadamente as variações das velocidades do vento, devido à turbulência, em torno do seu valor médio. Através desta distribuição, a intensidade da turbulência é obtida pelo quociente entre o desvio padrão das flutuações ($\sigma_i(z)$) e uma velocidade de referência, que pode ser considerada no ponto em que foi determinado o desvio padrão ($\bar{V}(z)$) (intensidade local da turbulência, equação 5), ou uma velocidade de referência (V_{ref}) (intensidade normalizada da turbulência, equação 6).

$$I_i(z) = \frac{\sigma_i(z)}{\bar{V}(z)}; i = 1,2,3 \quad (\text{Equação 5})$$

$$I_{io}(z) = \frac{\sigma_i(z)}{V_{ref}}; i = 1,2,3 \quad (\text{Equação 6})$$

Os índices ($i = 1,2,3$), referem-se às componentes de turbulência presentes no escoamento da camada limite atmosférica, componente longitudinal, vertical e lateral, respectivamente.

Em Blessmann (1995) a componente da turbulência mais estudada é a componente longitudinal, dada pelo desvio padrão (σ_1) e intensidade de turbulência (I_1), para as outras tem-se (σ_2, σ_3) e (I_2, I_3) respectivamente. Na camada limite atmosférica a relação entre a intensidade das três componentes da turbulência tendem a se tornarem iguais a medida que a altura de referência apresenta-se próxima ao solo, onde a turbulência torna-se isotrópica. O autor, explica ainda que a medida do tamanho dos turbilhões são obtidos por três escalas integrais da turbulência, representadas para cada uma das componentes da turbulência, citadas anteriormente, totalizando assim, nove escalas de turbulência. Para a componente longitudinal da turbulência temos as seguintes escalas de turbulência, L_{11}, L_{12}, L_{13} onde o segundo índice ($j = 1,2,3$) correspondem a direção da componente da escala. A medida das escalas de turbulência, são definidas pela função de correlação espacial, obtidas por um processo aleatório dado por uma medida de intervalo de tempo da turbulência onde exista dependência com os valores médios das flutuações de velocidade.

O conceito de espectro de potência, é fundamental para o entendimento do estudo probabilístico da turbulência. As flutuações do vento, que consistem em um processo aleatório e contínuo, são distribuídas ao longo das frequências em que elas ocorrem. Através do espectro de potência, torna-se possível determinar a quantidade de energia cinética contida nestas flutuações (rajadas) em função das frequência (comprimentos de onda) presentes no escoamento do vento. Em outras palavras, o espectro de potência é uma medida da distribuição de energia cinética contida nas flutuações do vento em função da frequência (BLESSMANN, 1995).

Em resumo, as dimensões dos turbilhões formados no interior das massas de ar, vão da ordem de grandeza da altura da camada limite atmosférica até a grandeza dos milímetros. A energia contida no escoamento do ar tem sua maior parcela dissipada pela rugosidade superficial, o restante da energia é transferida em um processo de cascata dos turbilhões maiores aos menores. Devido ao turbilhonamento da camada de ar, há a formação de rajadas que alteram o padrão de velocidade do vento ocasionando flutuações em torno do seu valor médio. As rajadas mais violentas são formadas pelos turbilhões de dimensões menores propagando-se local e desordenadamente, oferecendo pouca influência na resposta da estrutura devido a alta

frequência em que ocorrem. Por outro lado turbilhões de frequência menores, em fase com a estrutura, influenciam mais na resposta estrutural. Em suma, rajadas de grande intensidade e altas frequências são menos nocivas estruturalmente do que rajadas periódicas de baixas frequências que envolvam toda a estrutura (BLESSMANN, 1995).

2.2.4 Esteira

No âmbito da construção civil, as interferências no escoamento do ar geradas pelas estruturas vizinhas, estão diretamente ligadas a forma geométrica dos corpos envolvidos no escoamento. O volume de um edifício, atua como barreira ao escoamento da massa de ar que está em movimento. Dependendo da forma deste corpo e das condições do escoamento, há a separação da camada de ar na superfície de contato do corpo, o padrão do fluxo de ar é alterado, ocasionando diferenças na distribuição de pressões ao longo desta superfície, ocorrendo portanto, o turbilhonamento do ar, provocado pelo aparecimento de redemoinhos que se propagam através das correntes de fluxo a sotavento do corpo, dando origem a esteira. A esteira pode ser dita como uma assinatura da forma aerodinâmica dos corpos ao padrão de escoamento imposto.

A esteira, que está sempre situada a sotavento do objeto à barlavento, é gerada pelo desequilíbrio de pressões ocasionado pela resistência de forma do corpo a passagem do fluido. Na esteira é onde ocorrem com maior intensidade o turbilhonamento das partículas de ar, é a região onde o ar descarrega sua vortividade. (BLESSMANN, 1983)

Fox (1992), estudou os efeitos de interferência gerado na esteira de dois corpos retangulares, um a sotavento do outro, em configuração cruciforme (ver figura 25), sob escoamento uniforme de baixa turbulência. O autor relata que o movimento do fluido na esteira dos corpos, é consequência direta da atuação de vórtices gerados à sotavento destes corpos, cujo resultado depende, sobre tudo, da distância entre os objetos.

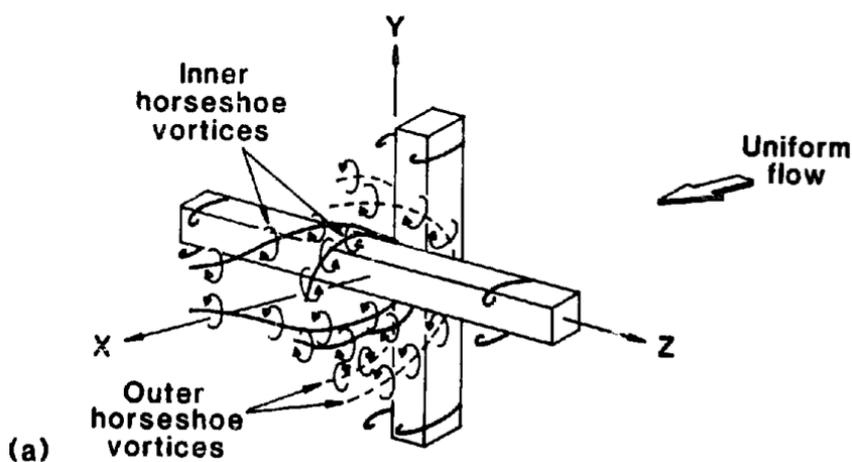


Figura 25: Ensaios realizados por Fox (FOX, 1992)

Blessman (2011) cita três classes de corpos quanto a sua resistência de forma, conforme descritos a seguir e apresentados na figura 26.

- Corpos afilados ou aerodinâmicos: Os gradientes de pressões ocorrem suavemente ao longo do corpo, não há descolamento da camada limite sobre o corpo, a esteira formada é muito estreita, a resistência de forma desse tipo de corpo é muito pequena. Depende diretamente do número de Reynolds, da turbulência do escoamento e da rugosidade superficial. Por exemplo, a asa de um avião em condições normais de voo.
- Corpos rombudos arredondados: O gradiente de pressões e a esteira podem variar dentro de certos limites que dependem das condições do fluxo, grau de descolamento da camada limite, rugosidade superficial, forma e orientação do corpo no escoamento. Depende do número de Reynolds. Por exemplo, telhados curvos e silos.
- Corpos rombudos angulosos: O descolamento da camada de ar dá-se em pontos definidos, além da esteira, nas arestas do volume. As esteiras, normalmente são maiores e mais turbulentas do que as esteiras dos corpos rombudos arredondados. Dependem muito pouco no número de Reynolds. Por exemplo edificações paralelepípedicos com coberturas planas.

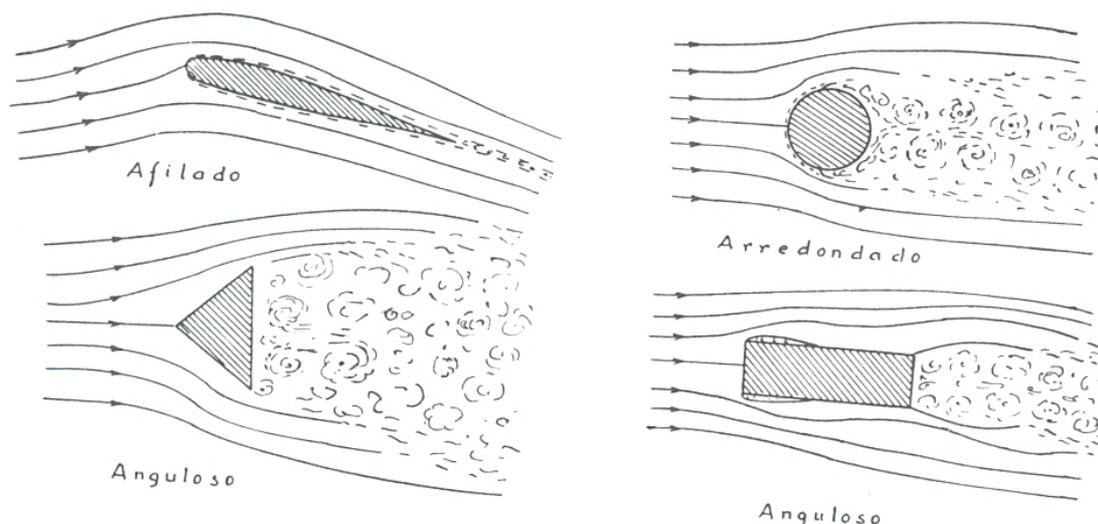


Figura 26: Padrão de esteiras formadas por corpos aerodinâmicos e rombudos (BLESSMANN, 2011)

2.2.5 Número de Strouhal

Blessmann (2005), apresenta o número de Strouhal como sendo um parâmetro de relação entre a frequência de desprendimento de um par de vórtices (f_s), as dimensões do cilindro, dada por meio de uma dimensão característica (L) e a velocidade do vento (V) conforme representado na equação 7.

$$S_t = f_s L/V \quad (\text{Equação 7})$$

O número de S_t depende da forma da seção, da oscilação do cilindro, do acabamento superficial, do número de Reynolds e das características do escoamento. O valor de S_t , representa uma frequência adimensional do desprendimento de vórtices. Este parâmetro está intimamente ligado ao cálculo da velocidade crítica (equação 8), que é a velocidade do vento onde a frequência de desprendimento de um par de vórtices (f_s) situa-se em torno, ou coincide com uma das frequências naturais (f_n) do cilindro.

$$V_{cr} = f_n L/S_t \quad (\text{Equação 8})$$

2.3 INTERFERÊNCIA POR VIZINHANÇA

2.3.1 Fenômenos de Interferência por Vizinhança

Edificações localizadas em proximidade podem apresentar efeitos de interferência bastante significativos, em alguns casos podendo ser favoráveis, porém em outros, gerando aumento nas pressões experimentadas nos edifícios situados sob interferência.

Para Hui et al. (2013a), a interferência mútua entre um grupo de edificações situadas em proximidade, como ocorrem nas grandes cidades, alteram as características de escoamento do vento incidido em cada uma das edificações situadas no grupo. Segundo Sun e Gu (1995) esta interferência, altera os carregamentos médios e flutuantes gerados pelo vento, em relação aqueles observados em situações isoladas. Danos catastróficos podem sobrevir caso os efeitos gerados pela vizinhança não sejam considerados nas cargas de projeto.

As normas de forças devido ao vento nas edificações, tipicamente proporcionam estimativas conservativas para o cálculo destes carregamentos, no entanto não levam em consideração os efeitos de interferência ocorridos em um grupo de edifícios, os quais, em certos casos, podem ser benéficos às estruturas. A causa desta consideração, deve-se ao fato da grande aleatoriedade das variáveis envolvidas no problema, como por exemplo, as diversas variações de geometria dos edifícios, posições relativas das estruturas de interferência, direções de incidência do vento, topografia dos terrenos, entre outros motivos que introduzem incertezas ao estimar analiticamente os carregamentos de vento aplicados às edificações durante suas vidas úteis. (MARA et al., 2014).

Hui et al. (2013a), afirmam que os efeitos de interferência entre edificações, podem amplificar os carregamentos de ventos nas estruturas em relação aqueles ocorrentes em estruturas isoladas. A própria norma brasileira, NBR-6123 (1988), *Forças Devidas ao Vento em Edificações*, alerta quanto a região em que estiver situada a edificação de projeto, havendo a necessidade de se estudar a influência de sua vizinhança para o cálculo dos coeficientes de pressões que nela ocorrem.

A seguir serão apresentados os fenômenos do vento nas edificações, causados por efeitos de vizinhança.

2.3.1.1 Martelamento

A formação compassada dos vórtices de van Kármán ao atingir estrategicamente uma estrutura situada a sotavento, na esteira da outra, diz-se que esta estrutura está sendo

martelada (*buffeting*). O fenômeno de martelamento gerado pelo corpo a barlavento apresenta uma frequência de desprendimento de vórtices predominante, este fenômeno pode gerar grandes efeitos quando a frequência de formação dos turbilhões, coincidir com uma das frequências naturais do edifício martelado, fenômeno conhecido como martelamento ressonante. (BLESSMANN, 2005) .

Blessmann (2005), ressalta que este fenômeno é improvável de ocorrer em edificações situadas na esteira de um número grande de obstáculos, pois nesta região a formação dos turbilhões dá-se em diversas frequências, tornando um espectro de energia bastante alargado, sem uma frequência de desprendimento de vórtices predominante.

Renomados pesquisadores da área do vento, já realizaram ensaios com modelos de dois ou três edifícios simulando o fenômeno de martelamento. Basicamente os ensaios foram providos por modelos mudos, que servem apenas de interferência ao escoamento, e um modelo devidamente instrumentado, posicionado a sotavento dos mudos. Varias formas de seções transversais e posições de interferência dos modelos tem sido estudadas. Nos ensaios são registradas as respostas médias e flutuantes do modelo instrumentado, com o intuito de quantificar os efeitos do fenômeno nas estruturas afetadas, no que diz respeito a deslocamentos dinâmicos, (WHITBREAD; WOOTTON, 1971, *apud* BLESSMANN, 2005); coeficientes de tombamento, (SAUNDERS; MELBOURNE, 1979; MELBOURNE; SHARP, 1976, *apud* BLESSMANN, 2005) e fatores de martelamento (BAILEY; KWOK, 1985; BLESSMANN, 1985; KARREM, 1987; TANIKE, 1992; RUSCHEWEYH, 1979, *apud* BLESSMANN, 2005), entre outras pesquisas.

2.3.1.2 Efeito Venturi

A formação do efeito Venturi, é observada principalmente onde há orientação regular dos mecanismos de interferência. Quando os elementos que interferem no escoamento do vento, formam um caminho para o seguimento do mesmo, dá-se neste trecho uma aceleração no escoamento de ar devido a compressão do fluido ao passar por esse caminho, conseqüentemente alterando a distribuição de pressões ali desenvolvidas. Este efeito é bastante comum entre paredes confrontantes de edificações vizinhas, observadas corriqueiramente nas ruas e avenidas de regiões urbanas onde há afunilamento nas vias de escoamento do vento (figura 27).

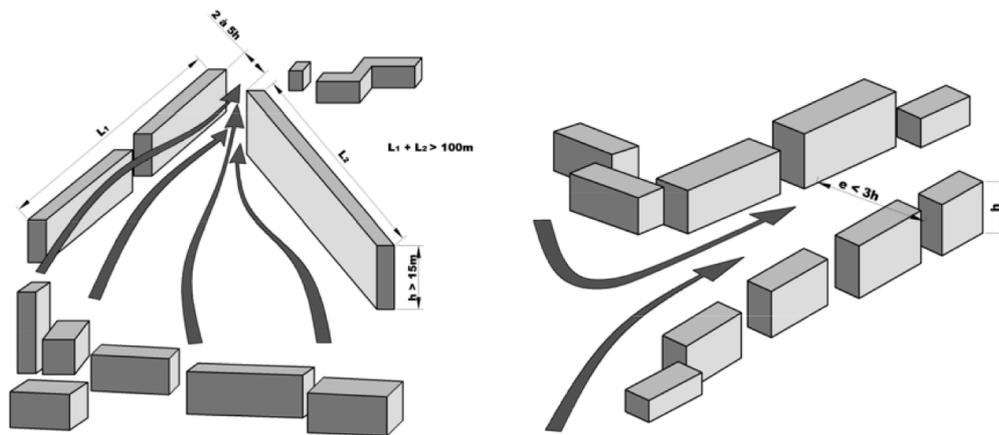


Figura 27: Canalização do vento, efeito Venturi (CARPEGIANI, 2004)

2.3.1.3 Deflexão do Vento na Direção Vertical

Conforme a NBR-6123 (1988), edificações defletem para baixo parte do vento que incide em sua fachada a barlavento (figura 28), aumentando a velocidade em zonas próximas ao solo. Este fenômeno de interferência gera efeitos significativos nos valores dos coeficientes de pressão observados em edificações mais baixas situadas na vizinhança, além de ser um importante fator nos estudos referentes ao conforto de pedestres.

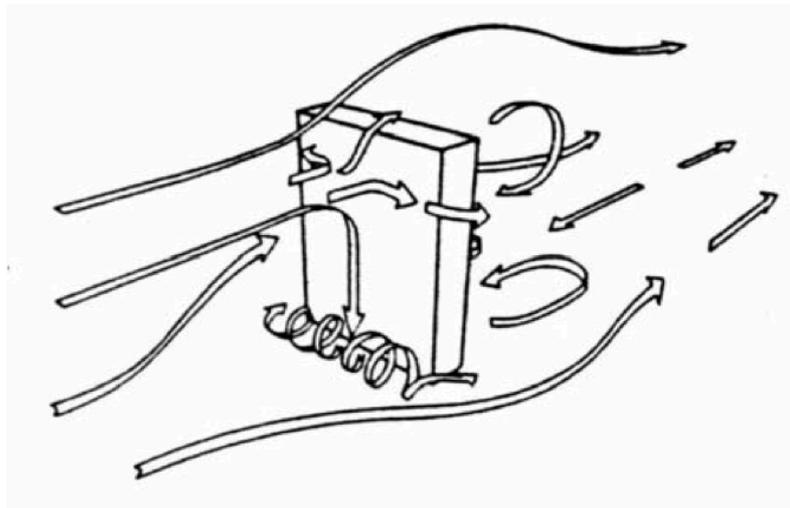


Figura 28: Deflexão do vento incidente (CARPEGIANI, 2004)

De acordo com Wise (1971), o fluxo de vento ao incidir em uma edificação, se separa, defletindo-se principalmente para as laterais e superfície da estrutura. No entanto, edifícios altos são capazes de transmitirem ventos de alta velocidade de cima para baixo, nas regiões próximas ao solo (ver figura 29). Segundo o autor, nestas regiões a velocidade média dos

ventos pode ser até duas vezes a velocidade do vento correspondente a mesma altura em regiões de campo aberto, e de três a quatro vezes superiores daquelas ocorridas em regiões urbanas. O autor estudou diversos empreendimentos a fim de apresentar diretrizes para os projetos com o intuito de extinguir ou e minimizar os efeitos gerados pelo fenômeno.

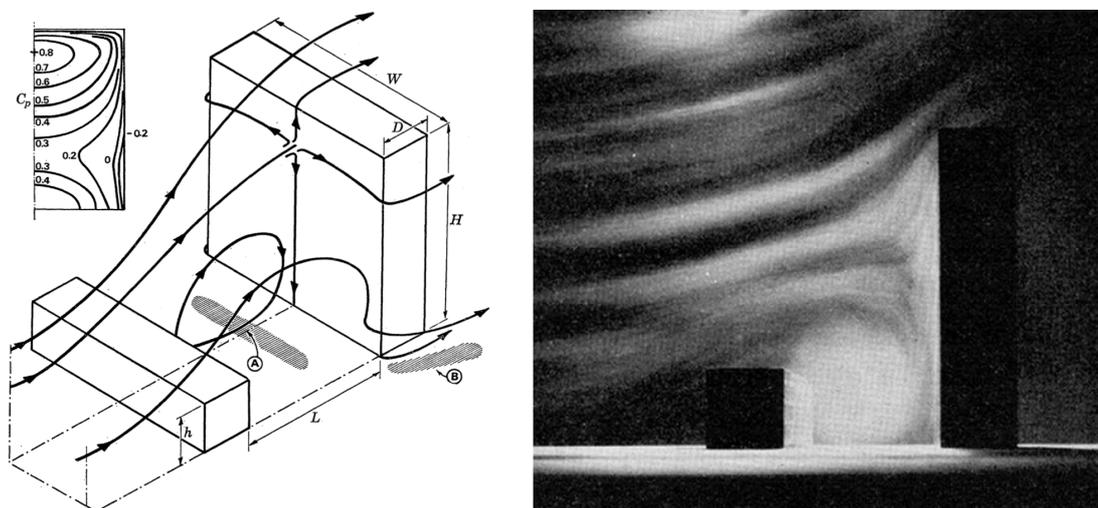


Figura 29: Ensaio realizados por Wise (adaptada de WISE, 1971)

2.3.1.4 Efeito de Proteção

É o caso de interferência gerado pela proteção de uma estrutura a outra, e que normalmente pode ser dito como benéfico. Este efeito caracteriza-se por barrar ou desviar, o escoamento do vento incidente em uma edificação a barlavento de outra (figura 30). A intensidade da proteção gerada, depende de alguns fatores, dentre eles, o espaçamento entre as edificações assim como a relação de altura e largura entre os corpos envolvidos na proteção. Efeitos controversos à proteção são gerados na esteira formada pela edificação à barlavento, ocasionando efeitos prejudiciais às estruturas situadas à sotavento, como por exemplo, o efeito de martelamento conforme comentado anteriormente.

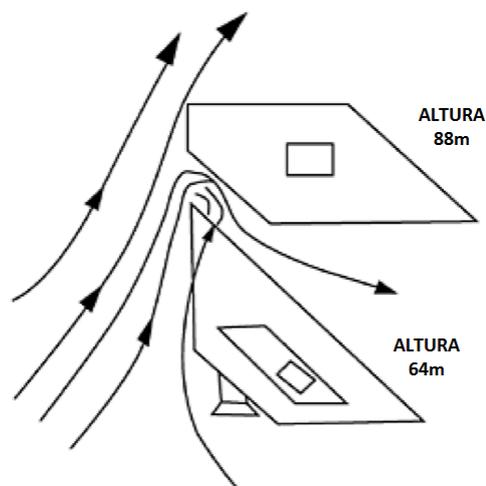


Figura 30: Influência no escoamento do vento devido a uma edificação a barlavento (adaptada de SURRY e MALLAIS 1983, apud HOLMES 2007)

2.3.1.5 Turbulência de Esteira

Segundo a NBR-6123 (1988), uma edificação que se encontra posicionada a sotavento de outro edifício, provavelmente estará sendo afetada pela turbulência formada na esteira da estrutura de interferência, à barlavento, podendo sofrer efeitos dinâmicos e alterações nas pressões exercidas pelo vento.

Na turbulência de esteira o campo de vórtices gerado à sotavento do edifício de interferência, dá a formação de turbilhões com frequências bem maiores daqueles formados durante escoamento da camada limite atmosférica, causando alterações consideráveis nos coeficientes de pressões experimentados pela edificação afetada, causa do fenômeno de martelamento (COOK, 1985).

Para Cook (1990), edificações alinhadas à barlavento uma da outra, podem definir três padrões distintos de regimes de escoamentos (ver figura 31):

1. Regime de escoamento de corpo isolado (figura 31a);
2. Regime de escoamento de interferência na esteira (figura 31b);
3. Regime de escoamento deslizante (figura 31c).

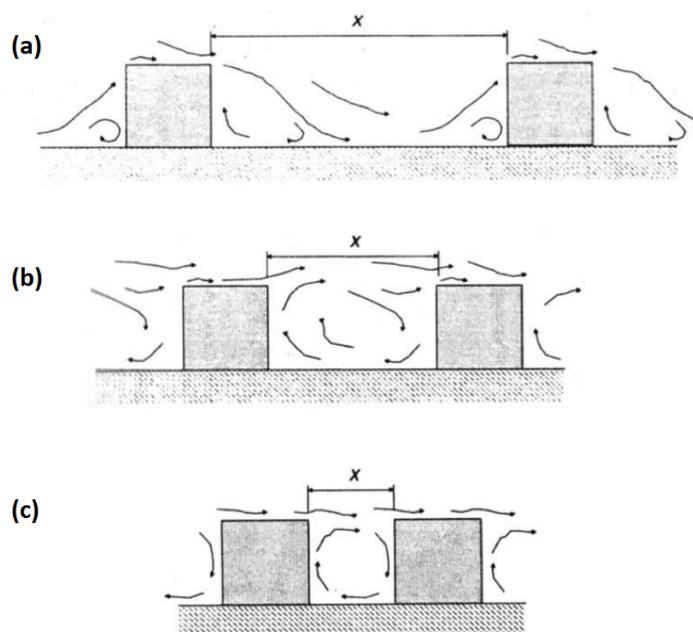


Figura 31: Regimes de escoamento (adaptada de COOK, 1990)

No regime de escoamento de corpo isolado (figura 31a), os corpos estão afastados a uma distância a qual permite a reformulação do padrão de escoamento do vento dado pela camada limite atmosférica atuante, antes de atingir o outro corpo à sotavento do elemento de interferência. Os fenômenos desenvolvidos na esteira do elemento de interferência, são pequenos ou nulos, os esforços do vento sobre a estrutura à sotavento dá-se parecido ao caso isolado.

No regime de escoamento de interferência na esteira (figura 31b), há uma tentativa de reconstituição da camada limite atmosférica entre os corpos, que não ocorre, devido a maior aproximação entre os mesmos, tornando o escoamento turbulento o suficiente para formulação descompassada de vórtices incidentes na estrutura à sotavento.

Por último, o regime de escoamento deslizante (figura 31c), representa uma elevação da camada limite atmosférica dada pela grande proximidade entre os corpos, traduzindo-se em um escoamento deslizante sobre a superfícies dos mesmos. Nota-se um forte efeito de proteção às ações do vento entre as estruturas envolvidas no processo.

2.3.2 Fator de Vizinhança

Na engenharia do vento, o fator de vizinhança (FV) também chamado de fator de interferência, é calculado com objetivo de quantificar a interferência na resposta ao vento,

gerada por obstáculos nas proximidades do objeto em estudo. O FV, é dado pela razão de uma medida feita no modelo ensaiado sob situação de vizinhança, pela mesma medida no modelo ensaiado em condição isolada. Em termos de medida de coeficiente de pressão, por exemplo, é representado pela seguinte relação conforme apresentado na equação 9:

$$FV = \frac{C_{p,CV}}{C_{p,ISO}} \quad (\text{Equação 9})$$

HUI et al. (2013b) utilizam o fator de vizinhança com objetivo de encontrar as situações mais desfavoráveis de interferência entre duas edificações prismáticas através da mudança no posicionamento de uma edificação em relação a outra. Os autores representam valores de FV para cada face da edificação em estudo (ver figura 32).

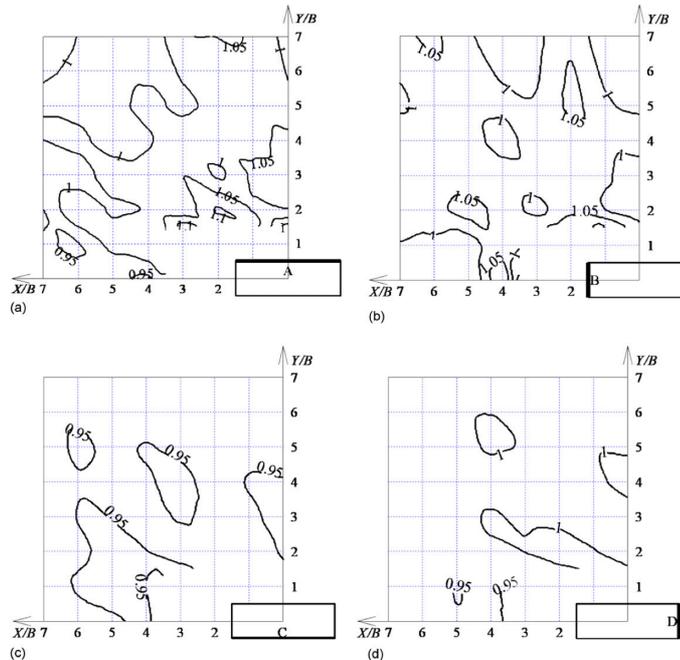


Figura 32: Ensaios realizados por Hui (HUI et al., 2013b)

O uso do fator de vizinhança, possibilita uma boa compreensão entre os ensaios realizados através de diversas configurações de interferência. Mara, et al. (2014) utilizaram o FV para determinar as alterações nas respostas média e RMS da edificação de projeto.

Outra grandeza utilizada para representar uma interferência por vizinhança foi descrita por Saunders e Melbourne, chamada de fator de martelamento (equação 10), *buffeting factor* (BF), cujo valor representa a razão do deslocamento provocado pelo efeito de martelamento

na edificação em situação de vizinhança pelo deslocamento provocado pelo vento na edificação em situação isolada (SAUNDERS; MELBOURNE, 1979 *apud* TANIIKE, 1991)

$$BF = \frac{u_{CV}}{u_{ISO}} \quad (\text{Equação 10})$$

Taniike (1991) utilizou o fator de martelamento, apresentado por Saunders e Melbourne (1979) para estudar os deslocamentos provocados pela formação de vórtices na esteira das edificações de interferência à sotavento do modelo em estudo. Através deste fator, o autor pode quantificar a relação entre as distâncias das duas edificações na resposta ao vento que a estrutura de interferência provocaria ao modelo principal (figura 33).

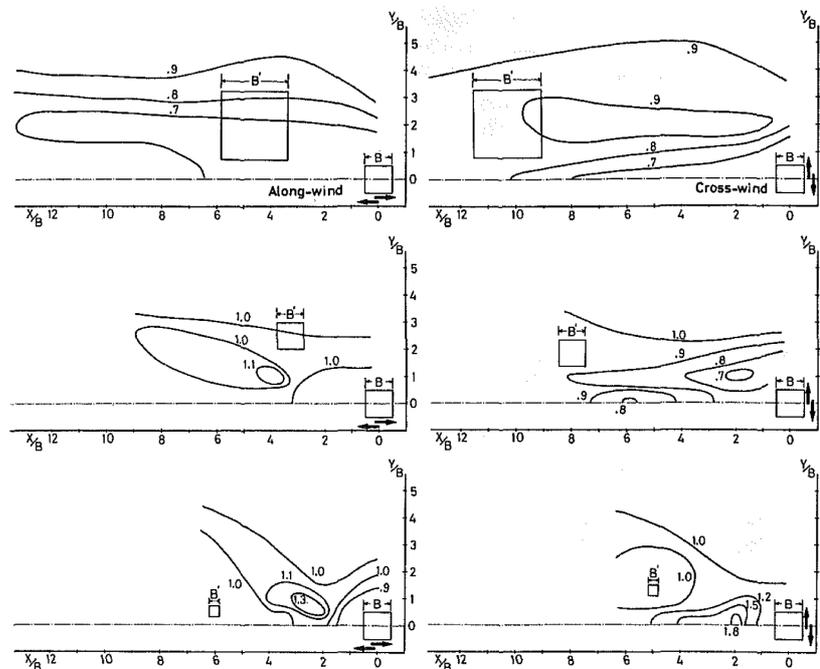


Figura 33: Ensaios realizados por Taniike (TANIIKE, 1991)

Blessmann (1985) também deu sua contribuição na determinação de um fator de martelamento (BF), relacionando grandeza de aceleração RMS dos modelos ensaiados em túnel de vento (equação 11).

$$BF = \frac{\ddot{u}_{rms,CV}}{\ddot{u}_{rms,ISO}} \quad (\text{Equação 11})$$

Em suma, fatores de interferência são representados pela razão de qualquer grandeza dimensionalmente possível em ensaios dos modelos de edificações em situação de interferência sobre a situação isolada.

2.3.3 Efeitos de Vizinhança e a NBR-6123

A norma brasileira de Forças Devidas ao Vento em Edificações, NBR-6123 (1988), no anexo G, trata dos efeitos de vizinhança da seguinte forma:

“Há certas situações em que se é necessário considerar a influência de edificações situadas nas vizinhanças daquela em estudo. Essas edificações podem causar aumento das forças do vento de três modos diferentes:

G-1 Por efeito venturi

Edificações vizinhas podem, por suas dimensões, forma e orientação, causar um “afunilamento” do vento, acelerando o fluxo de ar, com uma conseqüente alteração nas pressões. Este efeito aparece principalmente em edificações muito próximas, caso em que já foram observados coeficientes de pressão negativos (sucções) excedendo, em módulo, o valor 2,0. Estas pontas de sucção verificam-se nas paredes confrontantes das duas edificações, próximo à aresta de barlavento.

G-2 Por deflexão do vento na direção vertical

Edificações altas defletem para baixo parte do vento que incide em sua fachada de barlavento, aumentando a velocidade em zonas próximas ao solo. Edificações mais baixas, situadas nestas zonas, poderão ter as cargas do vento aumentadas por este efeito, com os coeficientes de forma atingindo valores entre -1,5 e -2,0.

G-3 Pela turbulência da esteira

Uma edificação situada a sotavento de outra pode ser afetada sensivelmente pela turbulência gerada na esteira da edificação de barlavento, podendo causar efeitos dinâmicos (“efeito de galope”) consideráveis e alterações nas pressões. Estas são particularmente importantes em edificações com cobertura e painéis de vedação feitos de materiais leves.

G-4 Determinação dos efeitos de vizinhança

Não é possível indicar valores numéricos para efeitos de vizinhança de um modo genérico e normativo.

Estes efeitos podem ser determinados por ensaios em túnel de vento, em que se reproduzam as condições de vizinhança e as características do vento natural que possam influir nos resultados. O problema é agravado pela possibilidade de alterações desfavoráveis das condições de vizinhança durante a vida útil da edificação em estudo.

Uma indicação aproximada dos aumentos que podem sofrer os coeficientes aerodinâmicos por efeitos de vizinhança será dada a seguir.

Seja:

s -- o afastamento entre os planos das faces confrontantes de duas edificações altas vizinhas, sendo axb as dimensões em planta das edificações (axb entre $1x1$ e $4x1$);

d^* -- a menor das duas dimensões:

-- lado menor b ;

-- semi-diagonal $\frac{1}{2}\sqrt{a^2 + b^2}$;

FV -- fator de efeito de vizinhança, definido pela relação

$$FV = \frac{C \text{ na edificação com vizinhança}}{C \text{ na edificação isolada}}$$

C -- coeficiente aerodinâmico em estudo (C_e , $c_{pe,médio}$, C_a)

Valores representativos de FV são os seguintes:

-- para coeficientes de arrasto C_a (Figura 4 e 5); para coeficientes de forma, C_e , e para valor médio do coeficiente de pressão, $c_{pe,médio}$, em paredes confrontantes (faces paralelas ao vento na Tabela 4):

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

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

-- para coeficientes de forma, C_e , e para valor médio do coeficiente de pressão, $c_{pe,médio}$, na cobertura (Tabela 5):

$$s/d^* \leq 0,5 \quad \dots \quad FV = 1,3$$

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

Interpolar linearmente para valores intermediários de s/d^* .

Os fator de vizinhança são considerados até a altura do topo dos edifícios vizinhos.

Os ensaios em que se baseiam as recomendações acima foram feitos com dois ou alguns poucos modelos de alturas aproximadamente iguais. Para o caso de muitos edifícios vizinhos nestas condições, os fatores de vizinhança geralmente serão menores, podendo ficar abaixo de 1,0. Entretanto, pode haver incidências do vento que causam valores de FV próximos ao indicados acima, principalmente quando há “vazios” nas vizinhanças do edifício em estudo.

Efeitos de vizinhança no coeficiente de torção, C_t , foram considerados no item 6.6.”

3 FORÇAS DEVIDAS AO VENTO

Sabe-se que o escoamento do vento, ao incidir sobre um corpo qualquer, cria regiões de pressões externas positivas e negativas na superfície de contorno deste corpo. Estas pressões, são geradas pelo impacto direto do vento sobre o volume do corpo e pelos fenômenos de escoamento ali desenvolvidos. A ação do vento nas edificações comporta-se da mesma maneira, o vento ao incidir sobre um edifício é forçado nas faces da estrutura, criando regiões de sobrepressão e sucção. Para a distribuição de forças e pressões formadas no entorno das edificações, dá-se o nome de coeficientes aerodinâmicos e serão apresentados a seguir:

3.1 COEFICIENTES DE PRESSÃO

Dos ensaios em túnel de vento, são medidos os seguintes coeficientes de pressões.

3.1.1 Coeficiente de Pressão Média

$$c_p = \frac{1}{t_a} \int_0^{t_a} p(t) dt \quad (\text{Equação 12})$$

Sendo:

$p(t)$ Pressão instantânea na superfície de medição, medida em relação a pressão estática de referência;

t Tempo;

t_a Intervalo de tempo de amostragem;

q Pressão dinâmica de referência medida ao longe;

3.1.2 Coeficiente de Pressão Máxima

$$\hat{c}_p = \frac{p_{\max}}{q} \quad (\text{Equação 13})$$

Sendo:

p_{\max} Maior valor de $p(t)$ para o período de amostragem t_a ;

q Pressão dinâmica de referência medida ao longe;

3.1.3 Coeficiente de Pressão Mínima

$$\check{c}_p = \frac{p_{\min}}{q} \quad (\text{Equação 14})$$

Sendo:

p_{\min} Menor valor de $p(t)$ para o período de amostragem t_a ;
 q Pressão dinâmica de referência medida ao longe;

3.1.4 Coeficiente de Pressão RMS

$$\check{c}_p = \frac{\sqrt{\frac{1}{t_a} \int_0^{t_a} (p(t) - \bar{p})^2 dt}}{q} \quad (\text{Equação 15})$$

Sendo:

$p(t)$ Pressão instantânea na superfície de medição, medida em relação a pressão estática de referência;
 \bar{p} Valor médio de $p(t)$ para o período de amostragem t_a ;

3.2 COEFICIENTE DE FORMA

De acordo com Blessmann (2011) os coeficientes de forma (C) são definidos por uma força resultante de pressões (F) aplicada perpendicularmente sobre uma superfície plana de área (A), conforme a equação 16:

$$C = \frac{F}{q A} \quad (\text{Equação 16})$$

Sendo:

$F = F_e - F_i$ Força total normal sobre uma superfície plana de área (A);

Conhecido o coeficiente de forma (C), a força total (F) (equação 17) do vento exercido sobre uma superfície plana será:

$$F = C q A \quad (\text{Equação 17})$$

Sendo:

C	Coeficiente de forma;
q	Pressão dinâmica de referência medida ao longe;
A	Área da superfície de aplicação de F ;

A convenção de sinais utilizada aos coeficientes de forma, assim como aos coeficientes de pressão externos e internos, correspondem a sobrepressões quanto a valores positivos e sucções quanto a valores negativos (Blessmann, 2011).

3.3 COEFICIENTE DE ATRITO

Coeficientes de atrito, representados pela equação 18, são definidos pela força do vento atuando tangencialmente à superfície plana de área (A), (Blessmann, 2011).

$$C_{at} = \frac{F_{at}}{q A} \quad (\text{Equação 18})$$

Sendo:

$F_{at} = \int_A \tau dA$	Força resultante das tensões tangenciais sobre a superfície plana de área (A);
$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta \Gamma}{\Delta A}$	Tensão tangencial atuante;
Γ	Força exercida tangencialmente;
A	Área da superfície plana de aplicação da F_{at} ;
q	Pressão dinâmica de referência medida ao longe;

3.4 FORÇAS AERODINÂMICAS

De acordo com Blessmann (2011), a força resultante gerada pela ação do vento é dita como força global (F_G) e pode ser decomposta em três componentes. Uma vertical, chamada de força de sustentação (F_s), e outras duas horizontais, F_x e F_y , concorrentes ao eixo transversal do corpo. Para o caso em estudo, estudaremos apenas as componentes horizontais das forças devido ao vento (F_x e F_y), conforme figura 34 apresentada a seguir.

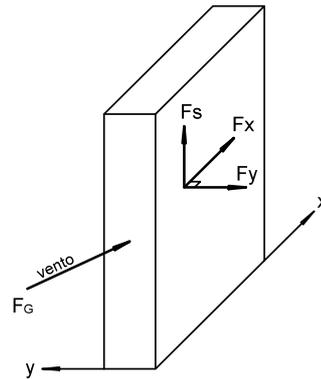


Figura 34: Componentes de decomposição da força global

3.4.1 Coeficientes de Força

Das forças que foram apresentadas anteriormente, os coeficientes de força nas direções X (equação 19) e Y (equação 20), serão definidos da seguinte forma:

$$C_x = \frac{F_x}{q B_Y h} \quad (\text{Equação 19})$$

$$C_y = \frac{F_y}{q B_X h} \quad (\text{Equação 20})$$

Sendo:

F_x	Componente da força horizontal do vento na direção X;
F_y	Componente da força horizontal do vento na direção Y;
q	Pressão dinâmica de referência medida (ao longe);
B_x	Dimensão do retângulo envolvente em X;
B_y	Dimensão do retângulo envolvente em Y;
h	Altura da edificação.

Conforme apresentado por Blessmann (2011), conhecendo os momentos de flexão e a força devido ao carregamento do vento nas direções X e Y, pode-se determinar a excentricidade de aplicação da força (e), dada pela equação 21:

$$e = \frac{M_{x,y}}{F_{x,y}} \quad (\text{Equação 21})$$

Sendo:

e	Excentricidade de aplicação da força na seção de referência;
-----	--

Assim, tem-se que os coeficientes de flexão em X (equação 22) e Y (equação 23), serão dados por:

$$C_{Mx} = \frac{F_x e_x}{q B_Y H} \quad (\text{Equação 22})$$

$$C_{My} = \frac{F_y e_y}{q B_X H} \quad (\text{Equação 23})$$

3.5 CÁLCULO DA FORÇA DEVIDO AO VENTO PELA NBR-6123

Indicado pela norma brasileira de vento, NBR-6123 (1988), o cálculo da força de arrasto (F_a) devido a ação do vento sobre uma edificação ou parte dela, é calculada pelo seguinte equacionamento (equações 24 a 27):

$$F_a = C_a q A_e \quad (\text{Equação 24})$$

Onde:

$$q = 0,613 V_k^2 \quad (\text{Equação 25})$$

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 \quad (\text{Equação 26})$$

$$S_2 = b F_r (z_i/z_g)^p \quad (\text{Equação 27})$$

Sendo:

C_a Coeficiente de arrasto (figura 35), considerados para corpos de seção constante ou fracamente variáveis, classificados em duas categorias: Alta Turbulência (at), usualmente utilizado para escoamentos de ar em centros urbanos ou ambientes com grande número de obstáculos; e Baixa Turbulência (bt), utilizado para escoamentos mais suaves, encontrado normalmente em zonas rurais e periféricas aos centros urbanos. Os valores de coeficientes de arrasto, são obtido nos gráficos das figuras 4 e 5, capítulo 6, da referida norma, para ventos de baixa e alta turbulência, respectivamente;

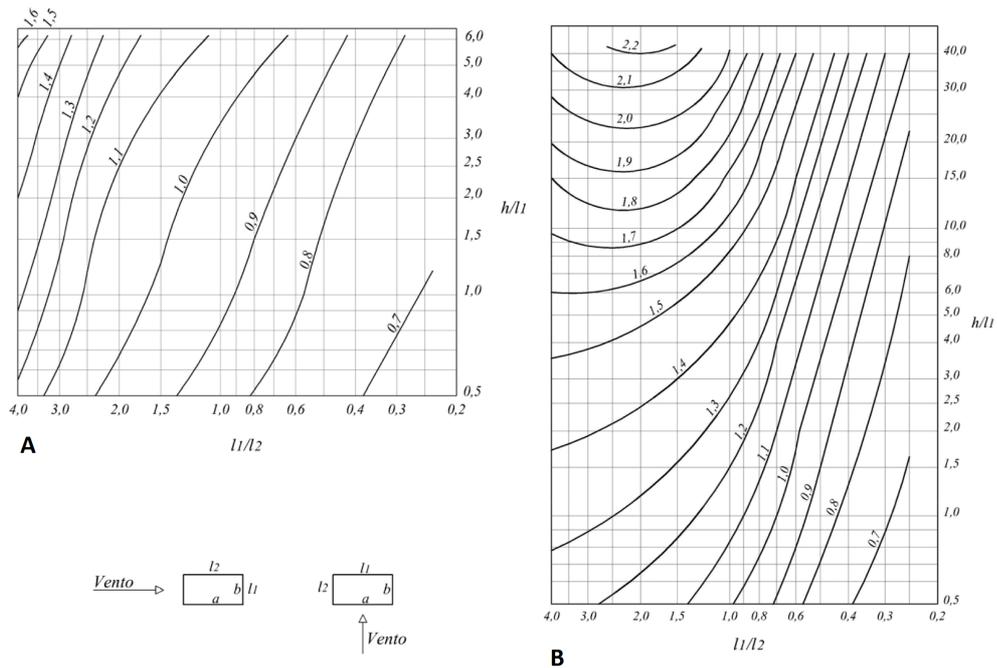


Figura 35: Coeficientes de arrasto para edificações paralelepípedicas; (a) vento de baixa turbulência; (b) vento de alta turbulência (adaptada de NBR-6123, 1988)

q	Pressão dinâmica de referência, em N/m^2 ;
A_e	Área perpendicular a direção do vento, área de sombra em m^2 ;
V_k	Velocidade característica do vento em m/s ;
V_0	Velocidade básica do vento em m/s (figura 36). É a velocidade da rajada ocorrida em três segundos e excedida em média uma vez a cada 50 anos, medida a 10 metros de altura acima do terreno em campo aberto e plano. Este valor é colhido do gráfico das isopletas, figura 1, capítulo 5, da referida norma, para cada região do Brasil;
S_1	Fator topográfico;
S_2	Fator que leva em consideração a rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno;
S_3	Fator estatístico;
b	Parâmetro meteorológico;
F_r	Fator de rajada, sempre correspondente à categoria II;
z_i	Cota na altura i ;
z_{ref}	Cota na altura de referência, usual 10 m;
p	Expoente da lei potencial de variação de S_2 .

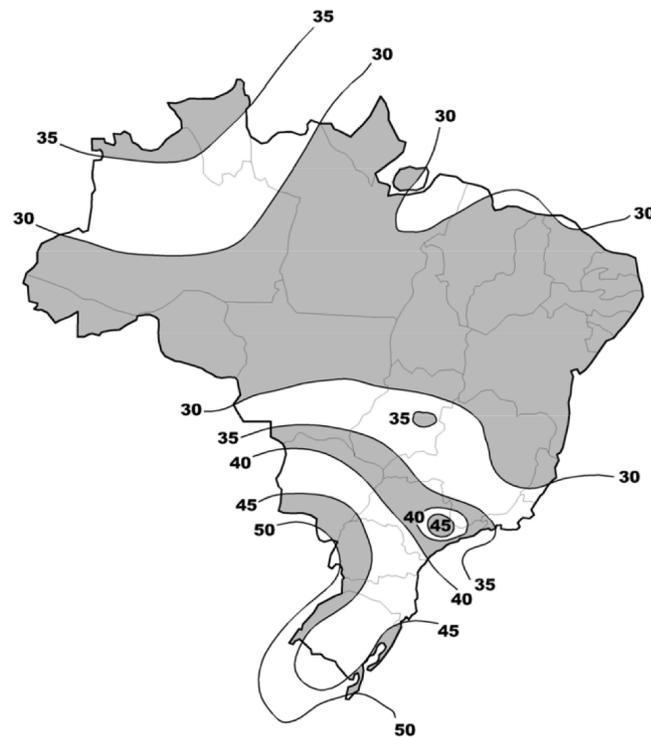


Figura 36: Isopletas de velocidade básica do vento (NBR-6123, 1988)

A NBR-6123 (1988) apresenta as seguintes definições para os fatores S_1 , S_2 e S_3 utilizados no cálculo da força do vento.

3.5.1 Fator Topográfico – S_1

“O fator topográfico S_1 leva em consideração as variações do relevo do terreno e é determinado do seguinte modo:

- a) Terreno plano ou fracamente acidentado

$$S_1 = 1,0$$

- b) Taludes e morros

Taludes e morros alongados nos quais pode ser admitido um fluxo de ar bidimensional soprando no sentido indicado na Fig. 2:

-- No ponto A (morros) e nos pontos A e C (taludes):

$$S_1 = 1,0$$

-- No ponto B [S_1 é uma função $S_1(z)$]:

$$\theta \leq 3^\circ : \quad S_1(z) = 1,0$$

$$\theta \leq 3^\circ \leq 17^\circ : \quad S_1(z) = 1,0 + \left(2,5 - \frac{z}{d}\right) \operatorname{tg}(\theta - 3^\circ) \geq 1$$

$$\theta \leq 3^\circ \leq 17^\circ : \quad S_1(z) = 1,0 + \left(2,5 - \frac{z}{d}\right) 0,31 \geq 1$$

[Interpolar linearmente para $3^\circ < \theta < 6^\circ$ e $17^\circ < \theta < 45^\circ$]

sendo

z — altura medida a partir da superfície do terreno no ponto considerado;

d — diferença de nível entre a base e o topo do talude ou morro;

θ — inclinação média do talude ou encosta do morro.

Entre A e B e entre B e C o fator S_1 é obtido por interpolação linear.

c) Vales profundos, protegidos de ventos de qualquer direção:

$$S_1 = 0,9$$

Os valores indicados nos itens b e c constituem uma primeira aproximação e devem ser usados com precaução.

Se for necessário um conhecimento mais preciso da influência do relevo, ou se a aplicação destas indicações tornar-se difícil pela complexidade do relevo, é recomendado o recurso a ensaios de modelos topográficos em túnel de vento ou a medidas anemométricas no próprio terreno.”

3.5.2 Fator Rugosidade do Terreno Dimensões da Edificação e Altura sobre o Terreno – S_2

“O fator S_2 considera o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação ou parte da edificação em consideração.

Em ventos fortes em estabilidade neutra a velocidade do vento aumenta com a altura acima do terreno. Este aumento depende da rugosidade do terreno e do intervalo de tempo considerado na determinação da velocidade. Este intervalo de tempo está relacionado com as dimensões da edificação, pois edificações pequenas e elementos de edificações são mais afetados por rajadas de curta duração do que grades edificações. Para estas é mais adequado considerar o vento médio calculado com um intervalo de tempo maior.

5.3.1 Rugosidade do terreno

Para fins desta Norma a rugosidade do terreno é classificada em cinco Categorias:

Categoria I: Superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5km de extensão, medida na direção e sentido do vento incidente. Exemplos:

-- mar calmo**;

-- lagos e rios;

-- pântanos sem vegetação;

Categoria II: Terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas. Exemplos:

-- zonas costeiras planas;

-- pântanos com vegetação rala;

-- campos de aviação;

-- pradarias e charnecas;

-- fazendas sem sebes ou muros;

A cota média do topo dos obstáculos é considerada inferior ou igual a 1,0m.

Categoria III: Terrenos planos ou ondulados com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas. Exemplos:

-- granjas e casas de campo, com exceção das partes com matos;

-- fazendas com sebes e/ou muros;

-- subúrbios a considerável distância do centro, com casas baixas e esparsas;

A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 3,0m.

Categoria IV: Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada. Exemplos:

-- zonas de parques e bosques com muitas árvores;

-- cidades pequenas e seus arredores;

-- subúrbios densamente construídos de grandes cidades;

-- áreas industriais plena ou parcialmente desenvolvidas;

A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 10m.

Esta categoria também inclui zonas com obstáculos maiores e que ainda não possam ser consideradas Categoria V.

Categoria V: Terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados. Exemplos:

-- florestas com árvores altas de copas isoladas;

-- centros de grandes cidades;

-- complexos industriais bem desenvolvidos;

A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual ou superior a 25m.

** A critério do projetista poderão ser consideradas Categorias intermediárias, interpolando convenientemente os valores de p e b ou de S_2 indicados no item 5.3.3 ou no anexo A.*

*** Para mar agitado o valor do expoente p para uma hora pode chegar a 0,15, em ventos violentos. Em geral, $p \approx 0,12$.*

5.3.2 Dimensões da edificação

A velocidade do vento varia continuamente e seu valor médio pode ser calculado sobre qualquer intervalo de tempo. Foi verificado que o intervalo mais curto das medidas usuais (três segundos) corresponde a rajadas cujas dimensões envolvem convenientemente obstáculos de até 20 metros na direção do vento médio.

Quanto maior o intervalo de tempo usado no cálculo da velocidade média, tanto maior a distância abrangida pela rajada.

Para a definição das partes da edificação a considerar na determinação das ações do vento, é necessário considerar características construtivas ou estruturais que originam pouca ou nenhuma continuidade estrutural ao longo da edificação, tais como:

-- edificações com juntas que separem a estrutura em duas ou mais partes estruturalmente independentes;

-- edificações com pouca rigidez na direção perpendicular à direção do vento, e por isso com pouca capacidade de redistribuição de cargas.

Foram escolhidas as seguintes classes de edificações, partes de edificações e seus elementos, com intervalos de tempo para cálculo da velocidade média de, respectivamente, 3, 5 e 10 segundos:

Classe A: Todas as unidades de vegetação, seus elementos de fixação e peças individuais de estruturas sem vedação. Toda edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical não exceda 20 metros.

Classe B: Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja entre 20 e 50 metros.

Classe C: Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal excedeu 50 metros.

Para toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 80 metros, o intervalo de tempo correspondente poderá ser determinado de acordo com as indicações do Anexo A.

5.3.3 Altura sobre o terreno

O fator S_2 usado no cálculo da velocidade do vento em uma altura z acima do nível geral do terreno é obtida pela expressão

$$S_2 = b F_r (z/10)^p$$

sendo que o fator de rajada F_r é sempre o correspondente à categoria II. A expressão acima é aplicável até a altura z_g , que define o contorno superior da camada limite atmosférica.

Os parâmetros que permitem determinar S_2 para as cinco Categorias desta Norma são apresentados na Tabela 1.

Os valores de S_2 para as diversas Categorias de rugosidade do terreno e Classes de dimensões das edificações definidos nesta Norma são dados na Tabela 2. Para o estudo dos elementos de vedação é recomendado usar o fator S_2 correspondente ao topo da edificação. Esta recomendação é baseada no fato de que na fachada de barlavento e nas fachadas laterais o vento é defletido para baixo com um consequente aumento de pressão dinâmica na parte inferior da edificação. Pela mesma razão o fator S_2 é considerado constante até 10 metros de altura na Categoria V.

5.3.4 O Anexo A desta Norma indica a determinação do fator S_2 para intervalos de tempo entre três segundos e uma hora para qualquer rugosidade do terreno.”

3.5.3 Fator Estatístico – S_3

“O fator estatístico S_3 é baseado em conceitos estatísticos e considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação. Segundo a definição dada em 5.1, a velocidade básica V_0 é a velocidade do vento que apresenta um período de recorrência médio de 50 anos. A probabilidade de que a velocidade V_0 seja igualada ou excedida neste período é de 63%.

O nível de probabilidade (0,63) e a vida útil (50 anos) adotados são considerados adequados para as edificações normais destinadas a moradias, hotéis, escritórios, etc (Grupo2). Na falta de uma norma específica sobre segurança nas edificações, ou de indicações correspondentes na norma estrutural, os valores mínimos do fator S_3 são os indicados na Tabela 3.

5.4.1 O Anexo B desta Norma indica a determinação do fator S_3 para outros níveis de probabilidade e para outros períodos de exposição da edificação à ação do vento.”

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1 TÚNEL DE VENTO PROFESSOR JOAQUIM BLESSMANN

O túnel de vento Professor Joaquim Blessmann (TV-2), em operação desde 1977, encontra-se situado no Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). É um túnel do tipo circuito fechado que simula camada limite atmosférica e vem sendo utilizado para estudos na área da Engenharia do Vento associados à construção civil e aeronáutica (figura 37).



Figura 37: Túnel do vento *Professor Joaquim Blessmann*

Ao longo dos anos o LAC tem se tornado referência internacional no assunto, viabilizando análises do tipo estáticas e dinâmicas dos esforços gerados pelos ventos nas edificações. Também tem realizado estudos das ações do vento em transeuntes, dissipação de gases, estudos das características das camadas limites atmosféricas, ventilação interna, estudos hidráulicos com base aerodinâmica, entre outros.

Atualmente o túnel é composto por quatro mesas (ver figura 38) com características específicas para simulação aerodinâmica de modelos reduzidos em escala, são elas:

- Mesa M-I: Ensaios aeronáuticos realizados no piso do túnel. Ensaios para construção civil com geradores de turbulência fixados na câmara de simuladores. Apresenta camada limite de pequena espessura e fluxo de ar de baixa turbulência, usual para modelos básicos e de formato simples bi ou tridimensionais.
- Mesa M-II: Ensaios aeronáuticos realizados no eixo do túnel. Ensaios para construção civil com blocos fixados ao longo do piso e/ou geradores de turbulência fixados na câmara de simuladores ou com jatos transversais.
- Mesa M-III: Específica para ensaios dinâmicos em modelos estruturais alteados. Mesa de grande rigidez, as frequências naturais ao longo dos três eixos ortogonais, acima de 500Hz.
- Mesa M-IV: Utilizada para ensaios de dissipação de fumaça, gases industriais, influência da topografia nos ventos, efeitos de interação, modelos de pontes, entre outros estudos.

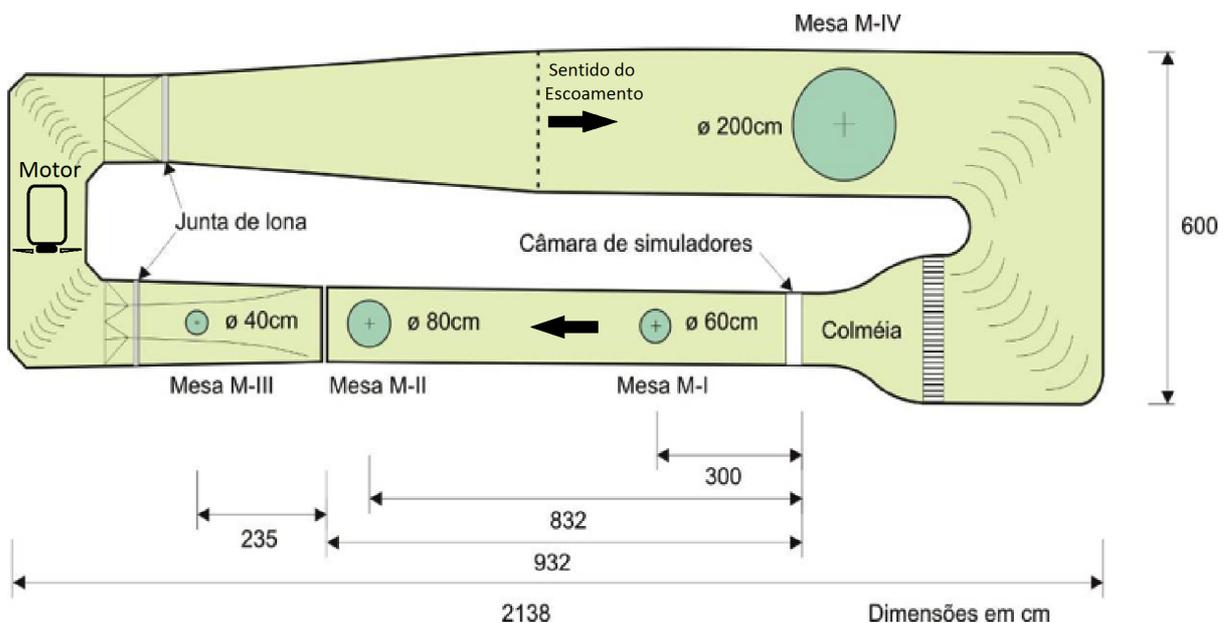


Figura 38: Planta baixa circuito aerodinâmico túnel de vento *Professor Joaquim Blessmann*

Segundo Blessmann (2011), os túneis construídos para fins de simulação de modelos estruturais comuns à construção civil, devem apresentar relação comprimento/altura superior a oito, a fim de simularem com maior fidelidade as características do vento natural. A seção de altas velocidades do túnel de vento professor Joaquim Blessmann, que compõem as mesas M-I e M-II, onde tipicamente são ensaiados os modelos em escala de edificações, apresentam as seguintes características:

- Dimensões médias do canal = 130 x 90 x 932cm (largura x altura x comprimento);
- Relação comprimento/altura $\cong 10,3$;
- Potência do motor elétrico para acionamento das hélices = 100Hp;
- Velocidade máxima de escoamento livre, vento uniforme e suave $\cong 44\text{m/s} \cong 160\text{km/h}$;
- Número de Reynolds = $2,6 \times 10^6$ ($d=0,9\text{m}$);

4.2 SIMULAÇÃO DO VENTO NATURAL

Segundo Blessmann (2011), são três os mecanismos de simulação das características do vento natural em um túnel de vento (figura 39).

PRIMEIRO: Cobrindo uma camada considerável do piso do túnel, ao longo do canal de ensaios dos modelos, com material de rugosidade adequada como blocos paralelepípedicos ou semiesferas. Mecanismo que corresponde a principal fonte de turbulência atmosférica em baixa altitude.

SEGUNDO: Através do uso de obstáculos posicionados a barlavento dos modelos, mais especificamente no início da câmara de ensaios, denominados como dispositivos de mistura. Os quais são:

- Telas curvas ou planas de malha variável;
- Grelhas de barras horizontais de seção retangular ou circular;
- Grelhas de malha quadrada ou retangular;
- Grelha única de malha variável ou diversas grelhas superpostas;
- Tela uniforme;
- Barras finas metálicas de seção circular;
- Triângulos de diversas dimensões e proporções, cheios ou vazados;

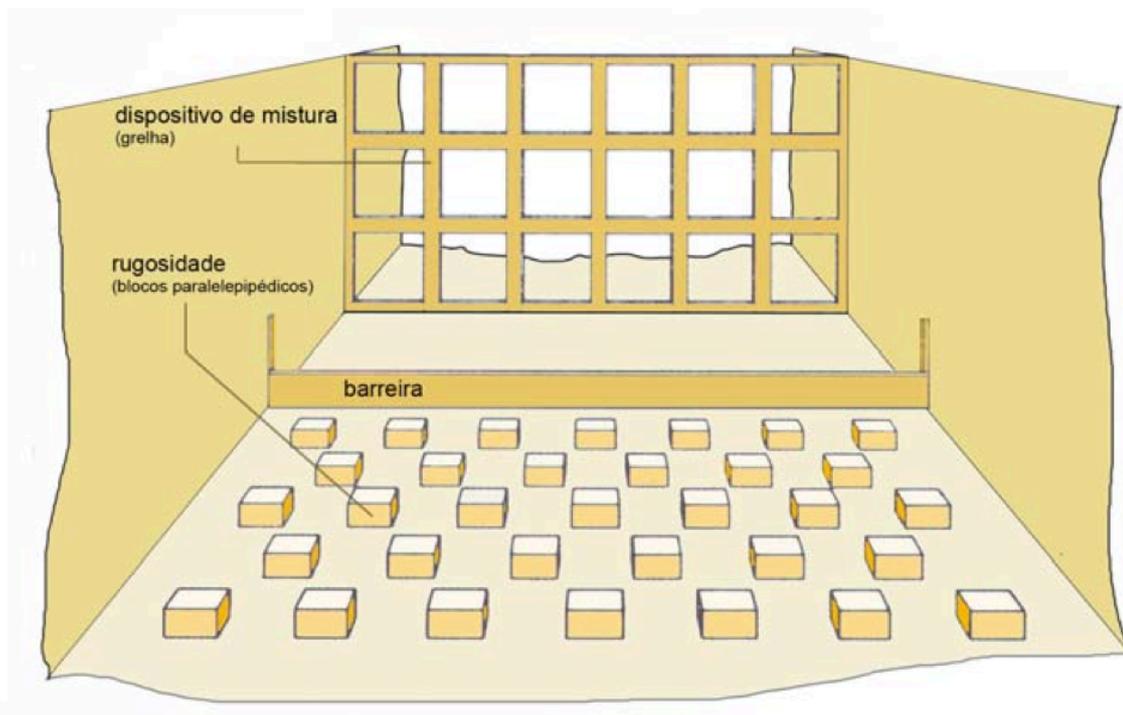


Figura 39: Mecanismos de simulação do vento natural (LOREDO-SOUZA et al., 2004, apud COOK 1990)

Ambos mecanismos apresentados utilizam componentes sólidos, que se opõem ao escoamento, causando turbulência, modelando as características do vento natural de acordo com a necessidade dos ensaios. Estes dispositivos, sólidos, causam diminuição de até 80% da velocidade média obtida no túnel de vento (Blessmann, 2011).

TERCEIRO: Por meios puramente aerodinâmicos através de jatos de ar, lançados do piso, perpendicularmente ao escoamento gerado no túnel de vento. Conforme Blessmann (1990), este método apresenta vantagens tais como:

- Não diminuição da velocidade média da corrente de ar, pelo contrário, aumento da velocidade média do escoamento;
- Controle parcial das características do vento, sem interrupção dos ensaios;

Neste trabalho, foram utilizados o primeiro e o segundo mecanismos de simulação das características do vento natural, para obtenção do perfil de velocidades médias e escala de turbulência, referente as categorias de terreno descritas pela NBR-6123 (1988), necessárias aos ensaios. O perfil de velocidades médias foi descrito pela equação da lei potencial, onde o valor do expoente p , relaciona o perfil de velocidades médias para com as categorias de

terrenos indicados pela referida norma. A figura 40, representa os perfis de velocidades médias e as componentes longitudinais de intensidade e escala da turbulência, para quatro categorias de terrenos (Categoria II, $p = 0,11$; Categoria III e IV, $p = 0,23$ e Categoria V, $p = 0,34$) simuladas no túnel de vento Professor Joaquim Blessmann.

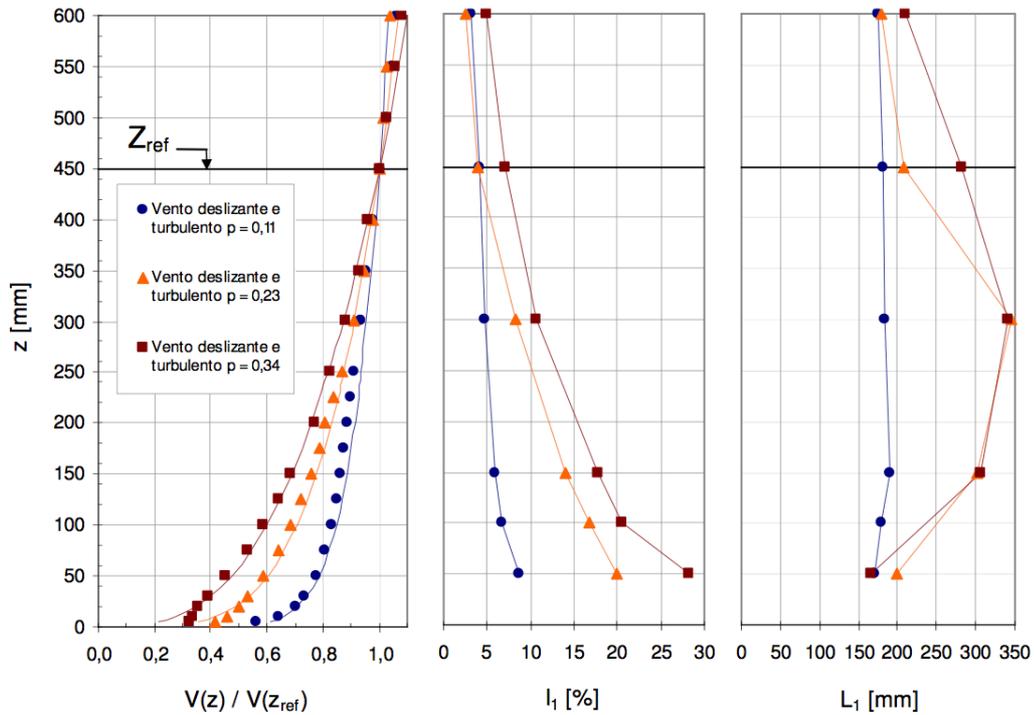


Figura 40: Representação do perfil de velocidades médias, intensidade e escala da componente longitudinal de turbulência para diferentes camadas limites simuladas no túnel de vento *Professor Joaquim Blessmann*

Na sequência, a figura 41, representa a configuração dos mecanismos de simulação do vento natural, instalados no início da tomada de ar da câmara de ensaios, mesas M-I e M-II, do túnel de vento professor Joaquim Blessmann.

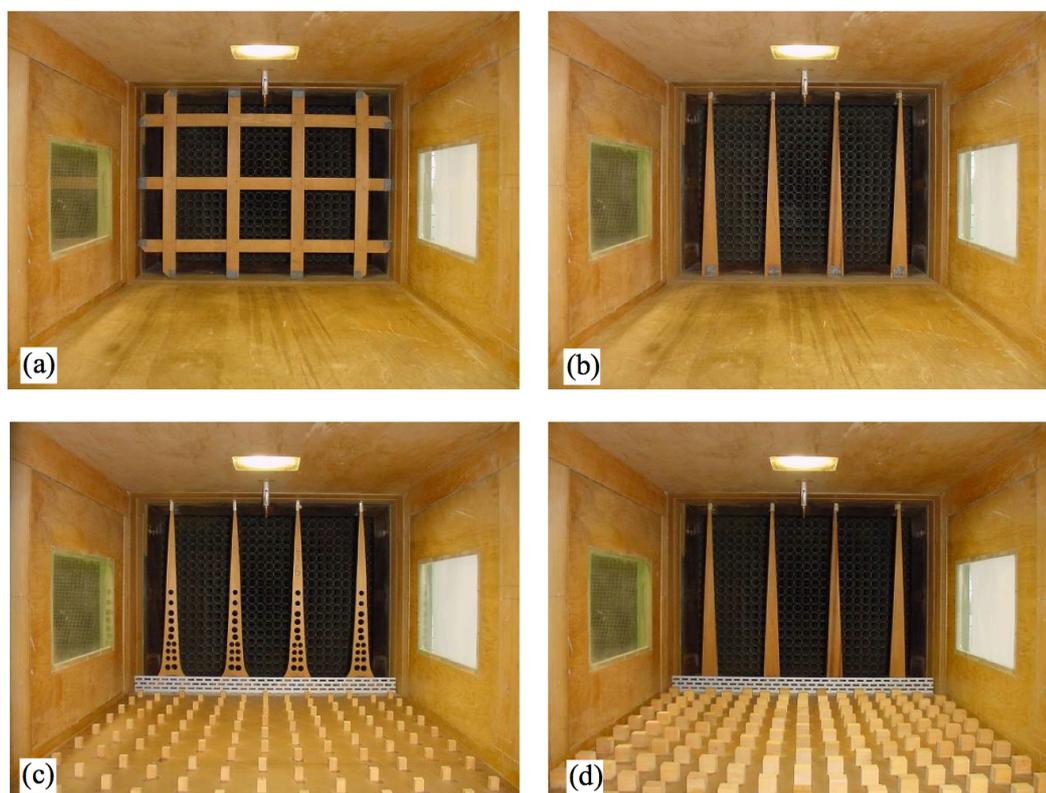


Figura 41: Disposição dos mecanismos de simulação do vento natural para diferentes camadas limites ensaiadas no túnel de vento *Professor Joaquim Blessmann*; (a) Grelha; (b) $p=0,11$; (c) $p=0,23$; (d) $p=0,34$ (LOREDO-SOUZA et al., 2004)

4.3 MÉTODO DE MEDIDAS DE PRESSÕES – AQUISIÇÃO DE DADOS NO TÚNEL DE VENTO

Durante os ensaios, o registro da velocidade média do vento no túnel foi obtido através da diferença entre as medidas de pressões estáticas (Δp_a), lidas nos dois anéis piezométricos instalados na entrada da seção de trabalho, conectadas a um micromanômetro tipo ManoAir 500 para medições. Neste equipamento também foram medidas as temperaturas (T) dos ensaios. A pressão atmosférica (P_{atm}), para o cálculo da massa específica do ar (ρ_{ar}), foi medida por um barômetro digital modelo N1500/691. Assim torna-se viável calcular a pressão dinâmica (equação 28) e a velocidade média do vento (equação 29) em qualquer ponto do escoamento do vento no túnel. Esta relação é dada pelo seguinte equacionamento:

$$q = k_0 \Delta p_a \quad (\text{Equação 28})$$

Onde:

q	Pressão dinâmica ao longe = $\frac{1}{2} \rho_{ar} V^2$;
ρ_{ar}	Massa específica do ar = $0,0474 \frac{P_{atm}}{T} \left[\frac{kgf.s^2}{m^2} \right]$;
P_{atm}	Pressão atmosférica [mmHg];
T	Temperatura [K];
k_0	Fator de calibração do túnel de vento (adimensional);
Δp_a	Pressão de referência (diferença de pressão entre os anéis piezométricos)

Onde a velocidade média do escoamento é:

$$\bar{V} = \sqrt{\frac{2q}{\rho_{ar}}} \quad (\text{Equação 29})$$

Os modelos reduzidos foram instrumentados a partir da instalação de tomadas de pressões estrategicamente fixadas às fachadas dos edifícios, cujas leituras foram realizadas por um equipamento de aquisição simultânea de pressões flutuantes, tipo Scanivalve, marca Dantec, de 6 módulos com 64 canais por módulo e taxa de aquisição máxima do equipamento de até 20 kHz. A partir deste ponto, os dados adquiridos pelo equipamento foram processados em rotinas computacionais desenvolvidas no próprio LAC, onde foram calculados os coeficientes de pressão. Os valores dos coeficientes de pressão médios medidos nos ensaios isolados e em vizinhança, foram utilizados como base de dados para o cálculo dos esforços cortantes, na base dos edifícios, devido a ação estática do vento sobre os modelos estudados.

4.4 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

Primeiramente os ensaios foram realizados com as edificações isoladas, os dados coletados se traduziram em coeficientes de pressão sem a interferência da topografia e de edificações vizinhas. Em uma segunda etapa, os modelos estudados foram ensaiados juntamente com a topografia do terreno e vizinhança local, neste caso, os dados obtidos dos ensaios registraram a influência das edificações de vizinhança e topografia do modelo no escoamento do vento. Os coeficientes de pressão (c_p) já contemplam correções para os efeitos de bloqueio dos ensaios no túnel.

Lembrando que o objetivo deste trabalho, é estudar apenas a influência dos efeitos de vizinhança na variação dos carregamentos de vento ocorridos nos edifícios em análise, optou-se por estudar modelos de edificações cuja localização encontram-se em regiões de topográfica suave, a fim de minimizar a influência do relevo na aquisição dos c_p obtidos dos ensaios no túnel de vento.

Para cada situação da edificação, isolada ou inserida em vizinhança, foram realizados ensaios em 24 direções vento, a cada 15° , simulando o perfil de velocidades médias e intensidade de turbulência de acordo com as categorias de terrenos da NBR-6123 (1988) (figura 42).

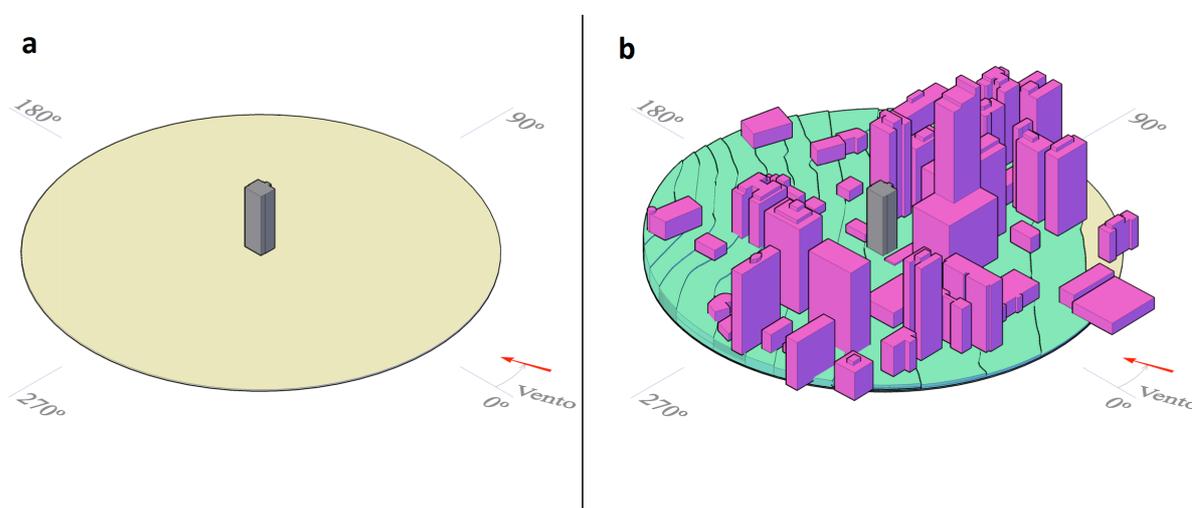


Figura 42: (a) mesa em ensaio isolado; (b) mesa em ensaio com vizinhança

4.5 APRESENTAÇÃO DOS MODELOS

Em sequência, serão apresentadas as quatro edificações estudadas neste trabalho, cujos modelos em escala foram ensaiados sob as duas situações descritas anteriormente, na mesa M-II do túnel de vento Professor Joaquim Blessmann do LAC. Para fins de preservação da identidade dos modelos, os mesmos foram intitulados com a seguinte nomenclatura: Edifício A; Edifício B; Edifício C e Edifício D; aspectos arquitetônicos não serão divulgados, bem como perspectivas artísticas, fotografias dos ensaios, plantas baixas, plantas de situação e localização dos empreendimentos.

Seguindo a padronização formada por Carpeggiani (2004), na tabela 1 serão exibidas informações das edificações quanto à altura h ; às dimensões do retângulo envolvente da seção transversal, sendo a , a maior dimensão em planta e b , a menor; às relações entre largura (a/b)

e altura (h/b); à escala dos modelos; ao número de tomadas instaladas em cada modelo; ao número total de registro de pressões obtidos nos ensaios; ao expoente da lei de potência do perfil de velocidades médias do vento simulado, conforme NBR-6123 (1988); à velocidade básica do vento, V_0 ; ao fator topográfico, S_1 ; ao fator rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o solo, S_2 ; ao fator estatístico, S_3 ; à velocidade de projeto, V_k e à pressão dinâmica de projeto, q_k .

Os modelos reduzidos foram construídos em escala de 1:250 e de 1:400, neles foram representadas a topografia e vizinhança inseridas até o limite da mesa de ensaio do túnel. Para reconhecimento do leitor, nas figuras a seguir, o sólido em cor cinza, situado no centro da mesa, representa o modelo da edificação em estudo. Os outros sólidos, distribuídos ao longo da mesa, na cor magenta, representam as edificações vizinhas ao modelo. A topografia, na cor verde, está representada em curvas de níveis conforme relevo do terreno.

Tabela 1: Características dos edifícios estudados

Edifício	A	B	C	D
h [m]	59,54	48,30	170,50	47,43
a [m]	34,73	15,43	43,40	42,91
b [m]	21,00	14,76	17,96	14,30
a/b	1,65	4,72	2,42	3,00
h/b	2,84	3,27	9,49	3,32
Escala do Modelo	1:250	1:250	1:400	1:250
Número de Tomadas	398	253	577	366
p	0,23	0,23	0,23	0,23
Categoria NBR-6123	III e IV	III e IV	III e IV	III e IV
V_0 [m/s]	42	42	30	38
$S_{1,z=0}$	1	1	1,087	1
S_2	1,079	1,071	1,161	1,040
S_3	1	1	1	1
V_k [m/s]	45,32	44,98	37,86	39,52
q_k [Pa]	1258,93	1240,22	878,67	957,40

4.5.2 Modelo Aerodinâmico - Edifício A

O modelo representa uma edificação com altura de 59,74m inserida em contexto urbano denso, situada em topográfica com inclinação suave. A seção transversal da edificação apresenta formato em “L” e constante ao longo de sua altura, o modelo possui dimensões máximas de 34,73m por 21m. Na figura 43, é representada a seção transversal do modelo com dimensões do retângulo envolvente para determinação dos coeficientes de arrasto a partir da NBR-6123 (1988), e eixo de referência para cálculo dos esforços.

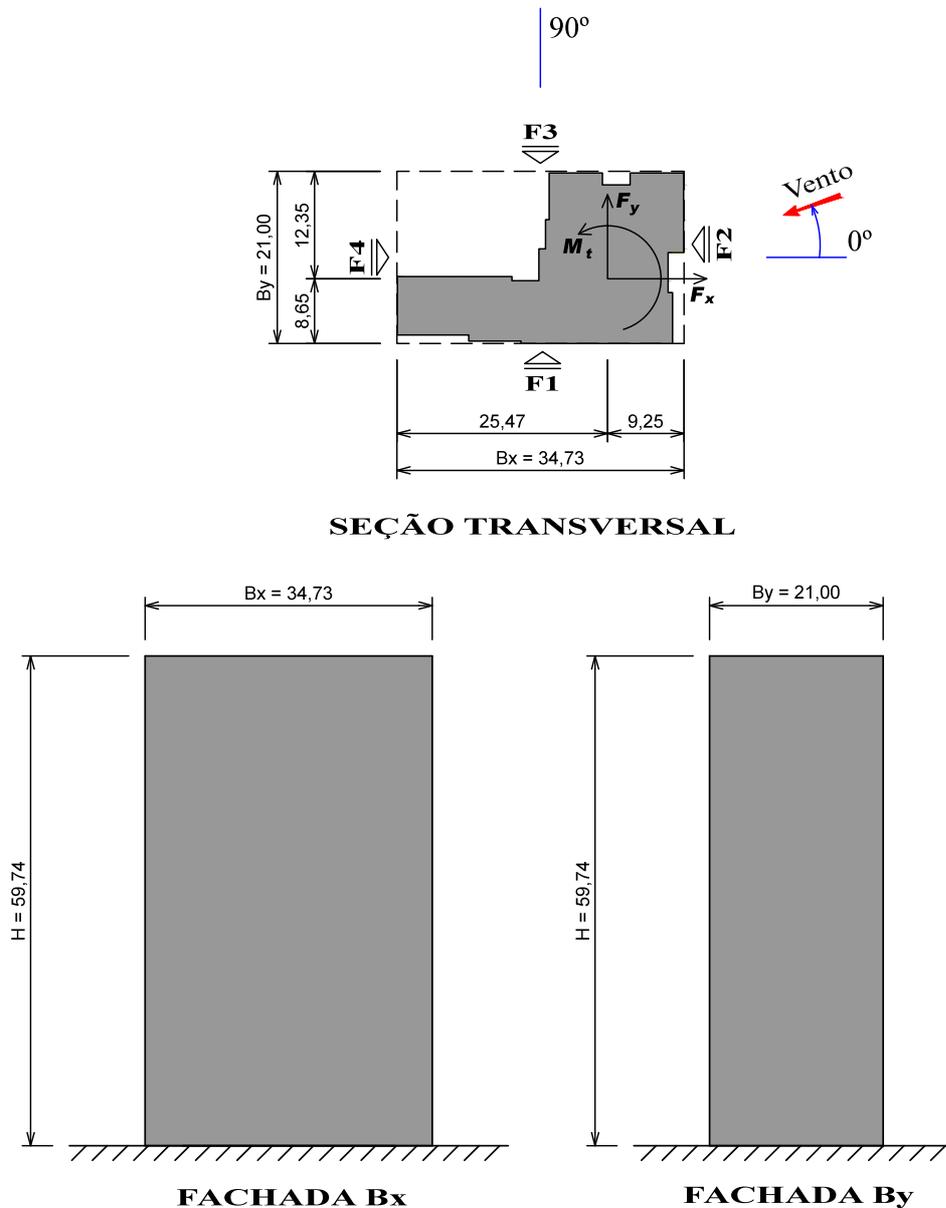


Figura 43: Seção transversal com dimensões do retângulo envolvente, eixos de referência e vistas laterais do Edifício A.

A vizinhança, é composta por edifícios com alturas que variam pouco em relação ao modelo instrumentado, cuja interferência afeta ventos provindos de todas as direções. Na mesa de ensaio, é possível observar a formação de um corredor de edificações para os ventos que sopram a 90° e 270° , conforme ilustrado na figura 44.

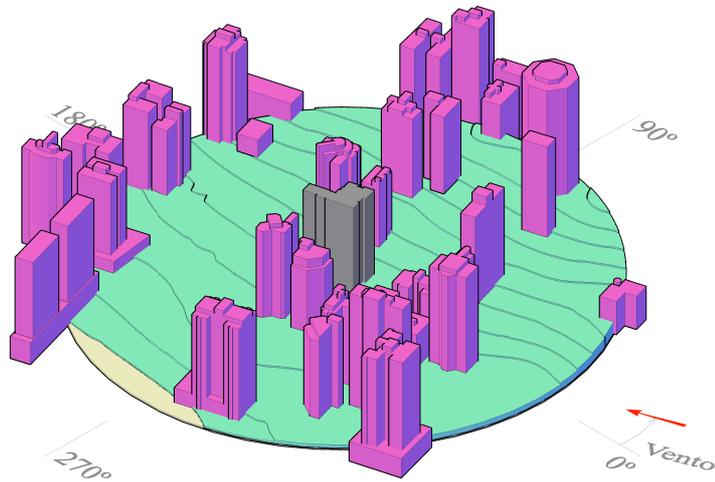


Figura 44: Perspectiva visual do Edifício A em vizinhança.

A figura 45 representa quatro vistas em perspectiva, dos 24 ângulos de incidência de vento, para os quais a edificação foi submetida a ensaios com e sem vizinhança.

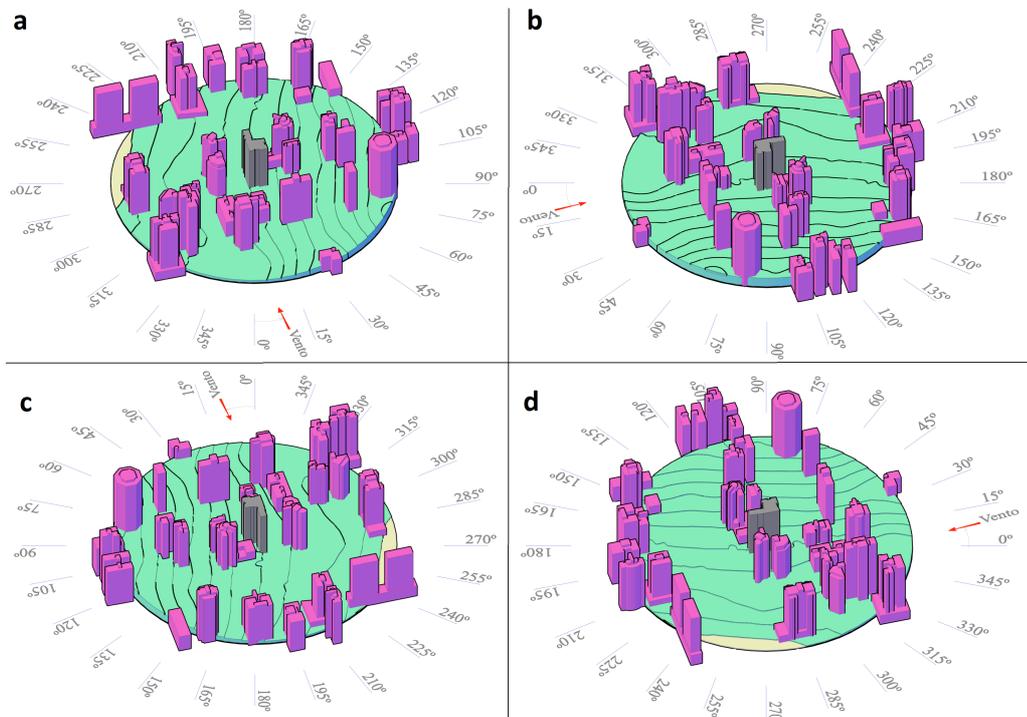


Figura 45: Direções dos ventos incidentes ao Edifício A.

4.5.3 Modelo Aerodinâmico - Edifício B

O modelo representa uma edificação com altura de 48,30m inserida em contexto urbano denso, situada em topográfica com inclinação suave. A seção transversal da edificação é predominantemente quadrada e constante ao longo de sua altura, o modelo possui dimensões máximas de 15,43m por 14,76m. Na figura 46, é apresentada a seção transversal do modelo com dimensões do retângulo envolvente para determinação dos coeficientes de arrasto a partir da NBR-6123 (1988), e eixo de referência para cálculo dos esforços.

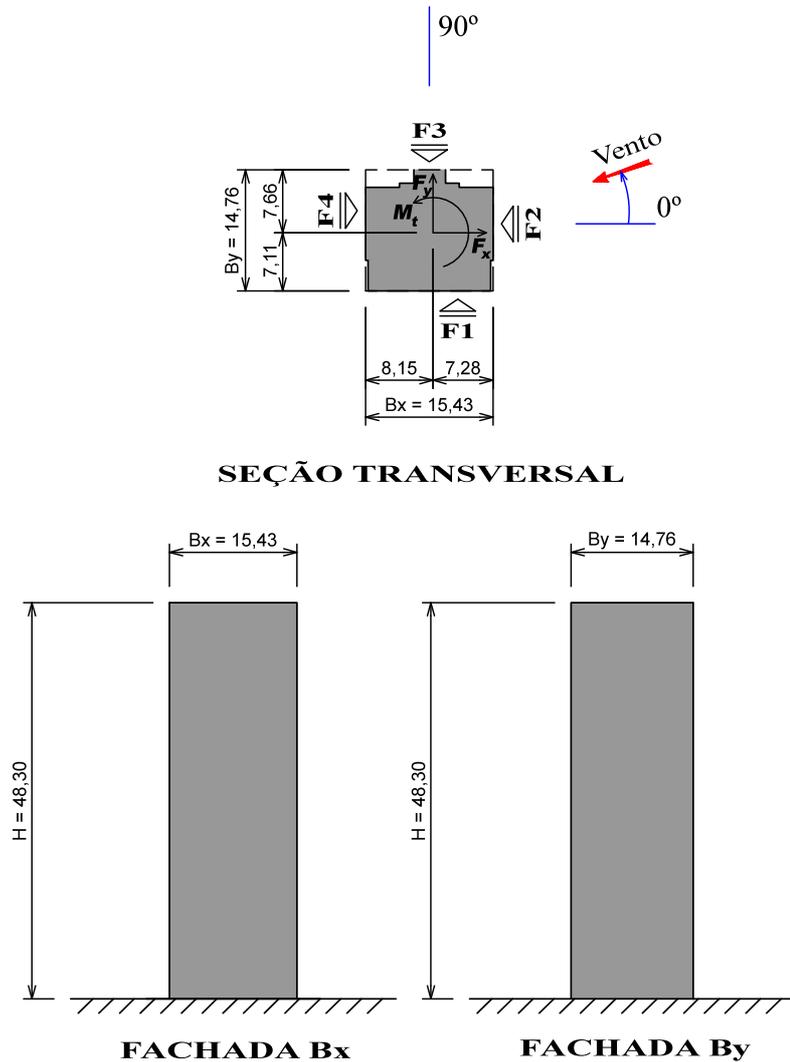


Figura 46: Seção transversal com dimensões do retângulo envolvente, eixos de referência e vistas laterais do Edifício B.

A vizinhança, é formada por edificações cujas alturas são predominantemente maiores à do modelo. Na mesa de ensaio, nota-se que o mesmo está protegido da incidência direta de

ventos provindos da maioria das direções, a não ser para ventos que sopram da direção 180°, onde é possível observar uma brecha para a passagem do mesmo devido a baixa altura das edificações vizinhas presentes nessa direção conforme ilustrado na figura 47.

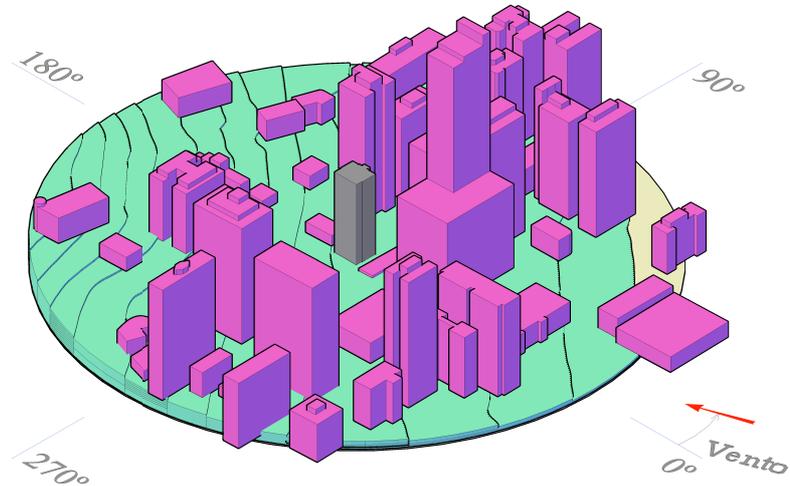


Figura 47: Perspectiva visual do Edifício B em vizinhança.

A figura 48 representa quatro vistas em perspectiva, dos 24 ângulos de incidência de vento, para os quais a edificação foi submetida a ensaios com e sem vizinhança.

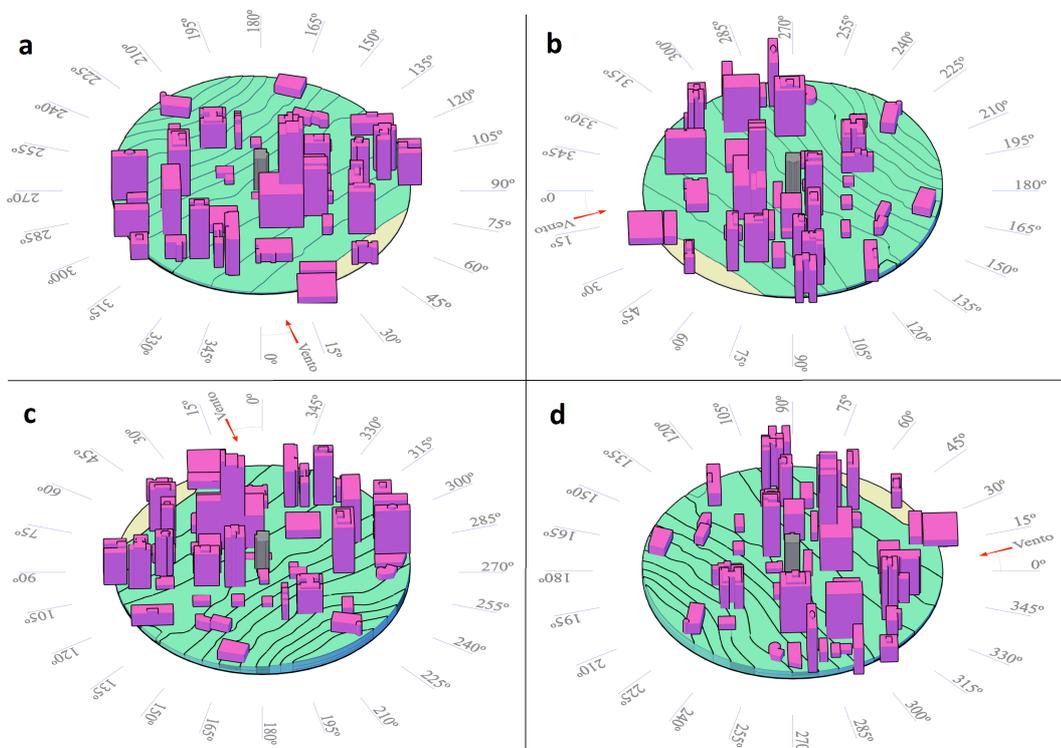


Figura 48: Direções dos ventos incidentes ao Edifício B.

4.5.4 Modelo Aerodinâmico - Edifício C

O modelo representa uma edificação com altura de 170,50m inserida em contexto urbano leve, situada em topográfica com inclinação suave. A forma da seção transversal predominantemente retangular e constante ao longo de sua altura possui dimensões máximas de 43,40 por 17,96m. Na figura 49, é apresentada a seção transversal do modelo com dimensões do retângulo envolvente para determinação dos coeficientes de arrasto a partir da NBR-6123 (1988), e eixo de referência para cálculo dos esforços.

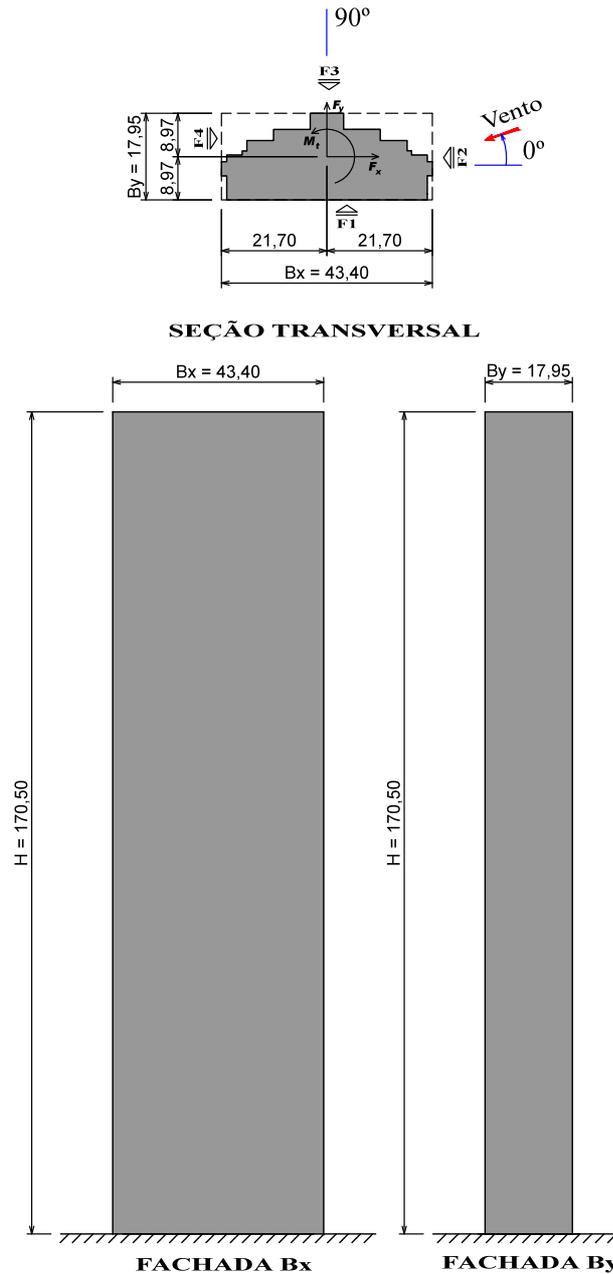


Figura 49: Seção transversal com dimensões do retângulo envolvente, eixos de referência e vistas laterais do Edifício C.

Na mesa de ensaio, observa-se duas configurações de vizinhanças. As edificações a barlavento às direções 225° a 330°, sentido horário, apresentam alturas próximas à edificação em estudo e dispostas afastadas uma da outra. No restante das direções de incidência de ventos, ocorre a presença de modelos vizinhos de forma mais densa, porém com alturas muito menores a do edifício estudado, conforme ilustrado na figura 50.

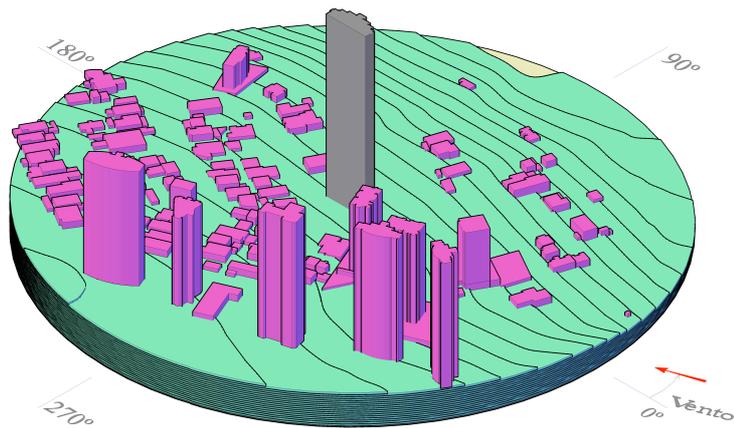


Figura 50: Perspectiva visual do Edifício C em vizinhança.

A figura 51 representa quatro vistas em perspectiva, dos 24 ângulos de incidência de vento, para os quais a edificação foi submetida a ensaios com e sem vizinhança.

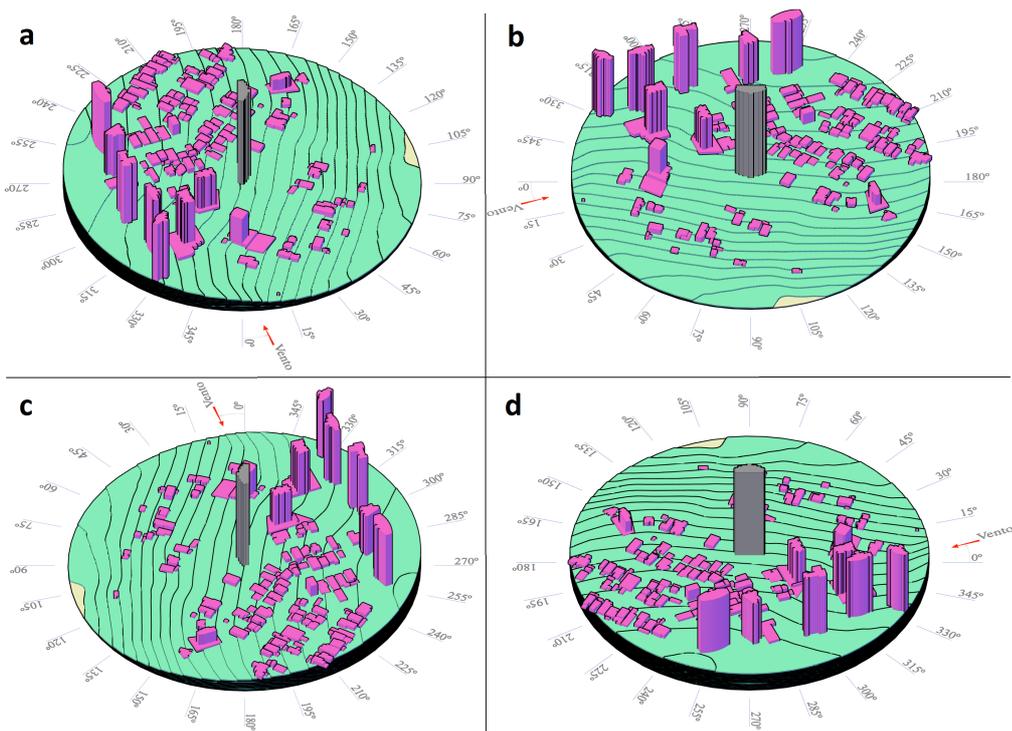


Figura 51: Direções dos ventos incidentes ao Edifício C.

4.5.5 Modelo Aerodinâmico - Edifício D

O modelo representa uma edificação com altura de 47,43m inserida em contexto urbano denso, situada em topográfica plana. A forma da seção transversal plenamente retangular e constante ao longo de sua altura, possui dimensões de 42,91m por 14,30m. Abaixo figura 52, representando a seção transversal do modelo com dimensões do retângulo envolvente para

Determinação experimental em túnel de vento dos efeitos estáticos de proteção causados por edificações vizinhas: Contribuição para a revisão dos fatores de vizinhança da NBR-6123.

determinação dos coeficientes de arrasto junto a NBR-6123 (1988), e eixo de referência para cálculo dos esforços.

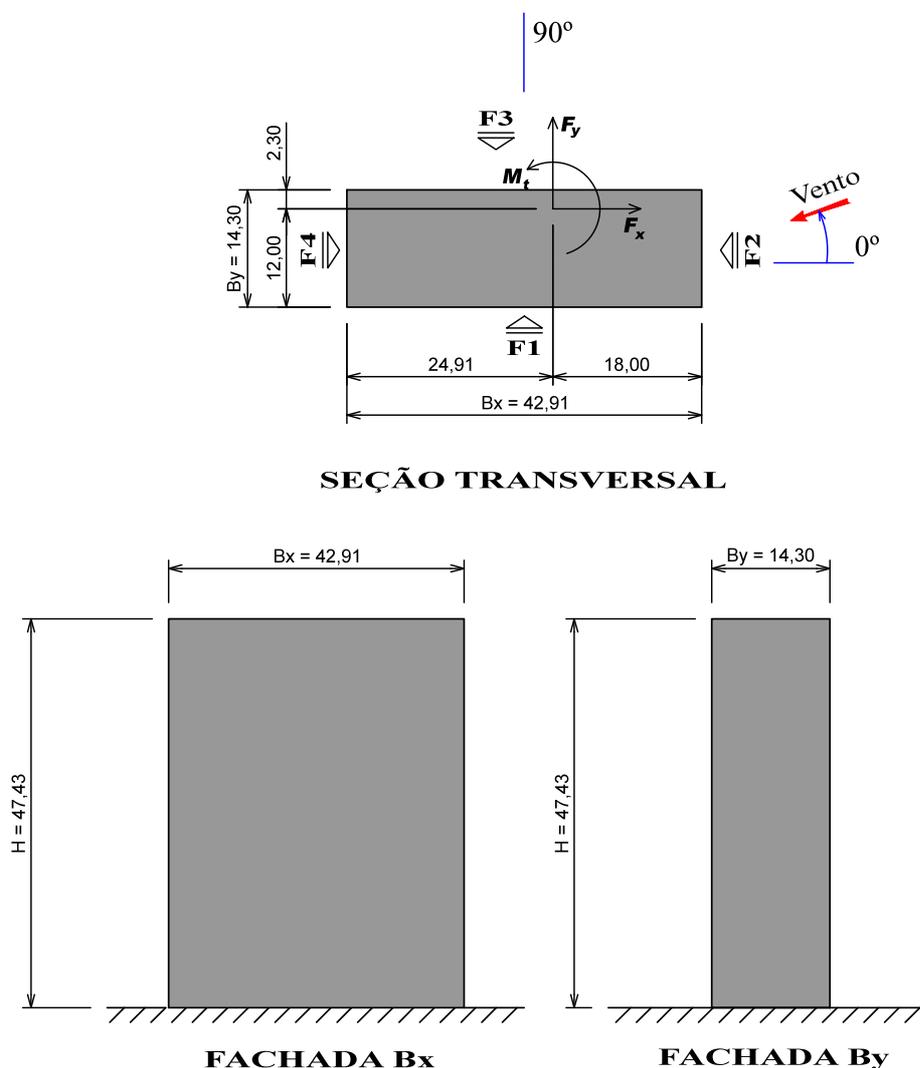


Figura 52: Seção transversal com dimensões do retângulo envolvente, eixos de referência e vistas laterais do Edifício D.

A vizinhança, é composta por edificações cujas alturas variam pouco com relação ao modelo. Na mesa de ensaio, nota-se que o edifício estudado está protegido pelas edificações no seu entorno, da incidência direta de ventos provindos de todas as direções ensaiadas. É possível observar dois corredores para o escoamento dos ventos que sopram das direções a 0° , 90° , 180° e 270° conforme ilustrado na figura 53.

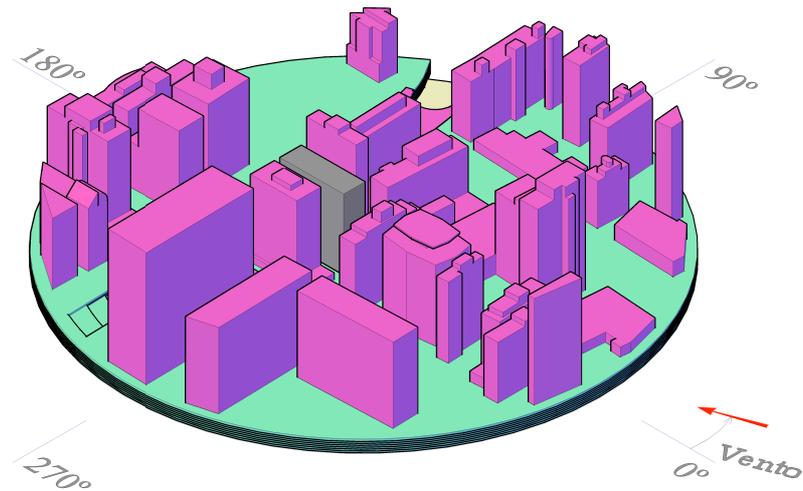


Figura 53: Perspectiva visual do Edifício D em vizinhança.

A figura 54 representa quatro vistas em perspectiva, dos 24 ângulos de incidência de vento, para os quais a edificação foi submetida a ensaios com e sem vizinhança.

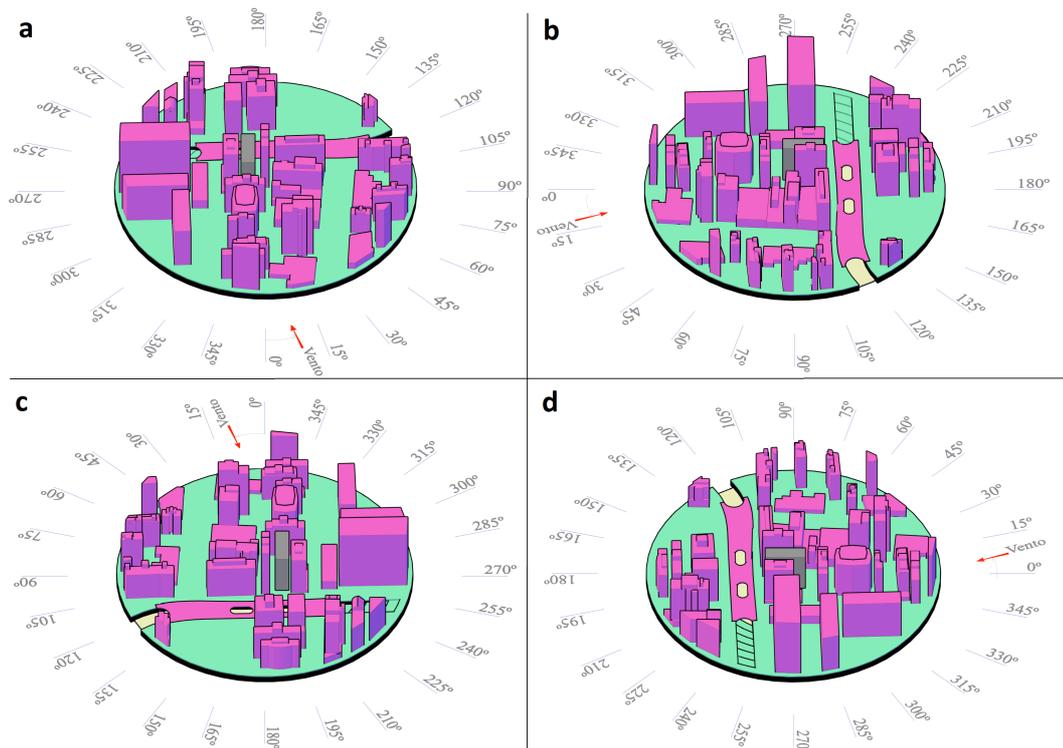


Figura 54: Direções dos ventos incidentes ao Edifício D.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo serão tratadas as análises comparativas dos 4 edifícios estudados, os resultados apresentados estão em termos de coeficientes de força obtidos pela resposta transversal e longitudinal média (em X e Y, respectivamente), para cada situação de ensaio realizada ($C_{x,iso}$, $C_{x,cv}$, $C_{y,iso}$ e $C_{y,cv}$), calculados a partir dos esforços cortantes na base das edificações, gerados pela ação média do vento em 24 direções de incidência do mesmo. Também serão apresentados os fatores de vizinhança (FV) obtidos pela divisão dos coeficientes de força obtidos do ensaio em vizinhança pelo ensaio isolado.

A recomposição dos esforços cortantes na base dos edifícios, foi determinada através do somatório das forças em X (equação 30) e Y (equação 31) de cada tomada instalada ao longo do modelo, desenvolvida para cada ângulo de incidência do vento, respeitando os senos e cossenos diretores das tomadas de pressão dos modelos:

$$F_{x,\alpha} = \sum_n^i c_{p,i,\alpha} q A_{TOM,i} \cos \beta \sin \varphi \quad (\text{Equação 30})$$

$$F_{y,\alpha} = \sum_n^i c_{p,i,\alpha} q A_{TOM,i} \sin \beta \sin \varphi \quad (\text{Equação 31})$$

Onde:

α	Ângulo de incidência do vento ensaiado no túnel;
β	Ângulo que dá a orientação da tomada em relação aos eixos de referência X, Y e Z do modelo, ver figura 55;
c_p	Coeficiente de pressão médio, lido em cada tomada do modelo para o ângulo de vento ensaiado;
i	Número da tomada de pressão;
q	Pressão dinâmica de referência ao longe (ver item 3.3.5);
A_{tom}	Área de atuação de cada tomada de pressão instalada nas faces do modelo;

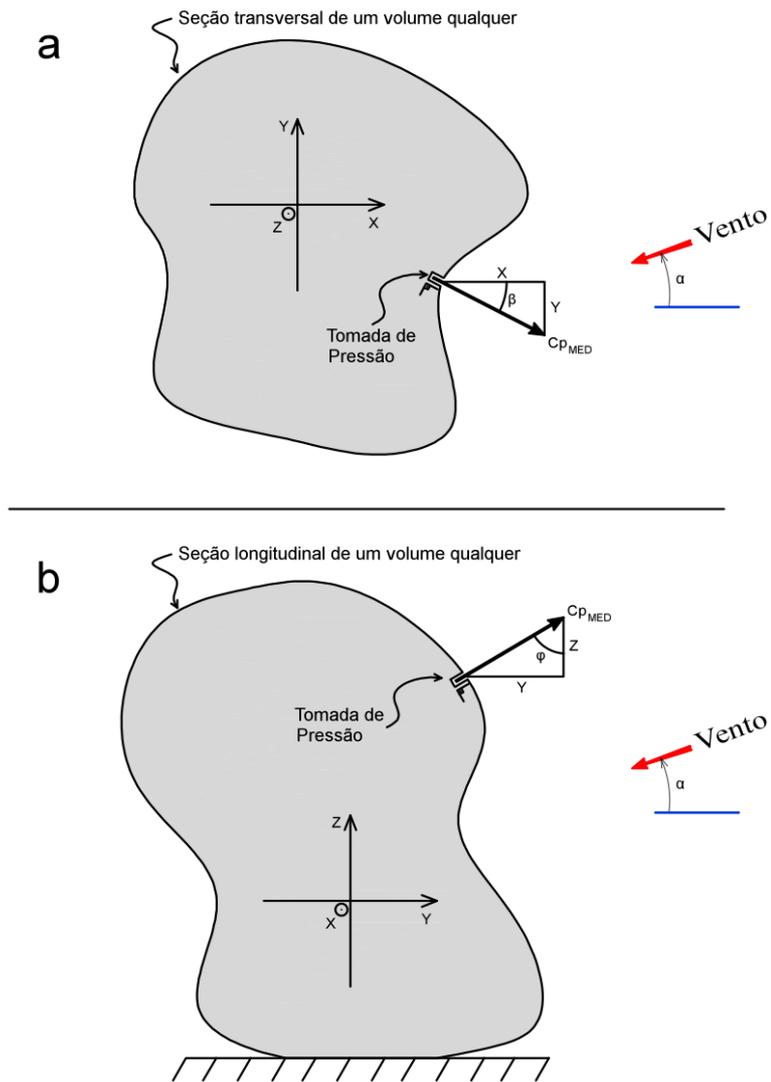


Figura 55: Orientação para leitura de coeficiente de pressão medido em uma tomada em seção: (a) transversal; e (b) longitudinal, de um volume qualquer.

Os cálculos dos coeficientes de força em X e Y ($C_{x,iso}$, $C_{x,cv}$, $C_{y,iso}$ e $C_{y,cv}$), foram obtidos conforme metodologia já apresentada no item 3.4.1.

5.2 MODELO AERODINÂMICO - EDIFÍCIO A

As figuras 56 e 57 a seguir, apresentam a variação do coeficiente de força em relação aos eixos X e Y respectivamente, em função do ângulo de incidência do vento para as duas situações de ensaio realizadas, isolado e em vizinhança, em comparativo aos valores dos coeficientes de arrasto, obtidos através da norma de vento brasileira para escoamento de alta e baixa turbulência. (ver figura 35).

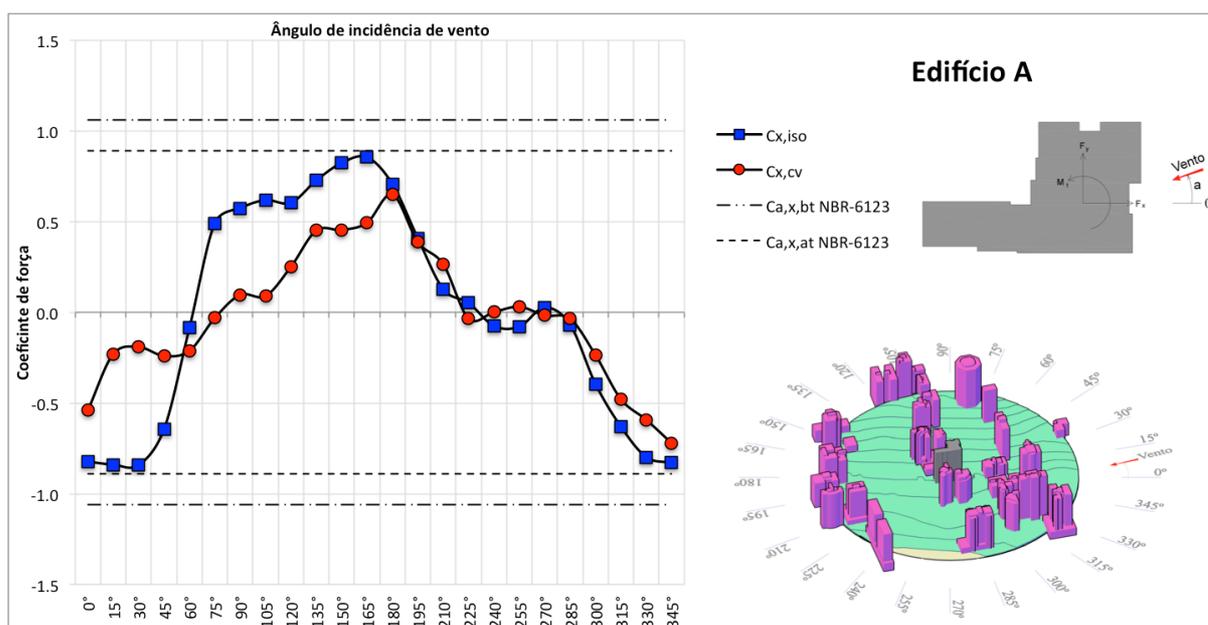


Figura 56: Variação do coeficiente de força C_x em função do vento no Edifício A

Através da análise da figura 56, é possível observar que para os coeficientes de força em relação ao eixo X, o modelo em análise encontra-se parcialmente protegido pela vizinhança adjacente, fenômeno ocorrido principalmente para os ângulos de vento de 0° a 165° . Para os ângulos de 180° a 345° , nota-se uma aproximação dos valores dos coeficientes de força $C_{x,cv}$ aos valores de $C_{x,iso}$, demonstrando pouca influência da vizinhança sob o modelo em relação ao ensaio isolado. Tanto para o caso isolado como em vizinhança, os maiores valores de C_x ocorreram para as direções de ventos próximas ao eixo longitudinal da edificação, com valores máximos a 30° e 165° .

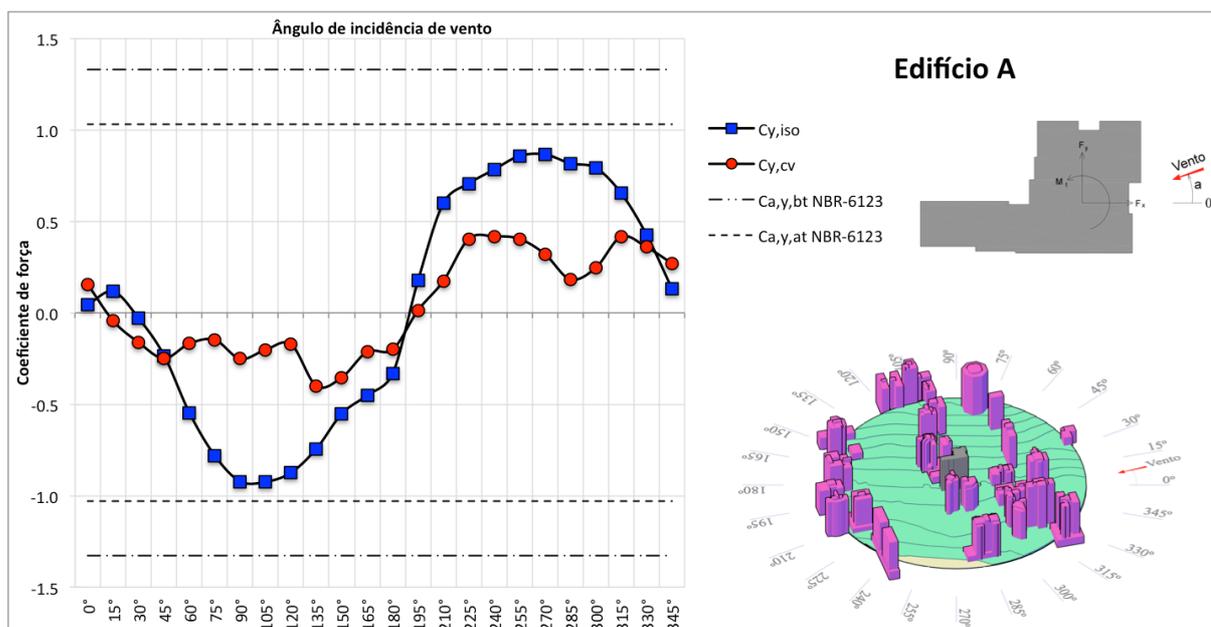


Figura 57: Variação do coeficiente de força C_y em função do vento no Edifício A

Observando a figura 57, no ensaio em vizinhança, nota-se que de um modo geral houve uma redução acentuada dos coeficientes de força ocorridos em relação ao eixo Y. Esta redução nos valores de $C_{y,cv}$ deve-se ao fato da estrutura encontrar-se em sua maioria, protegida pela vizinhança adjacente. Os maiores valores de C_y , ocorram no caso isolado, para ângulos de vento de 90° e 270° . Uma pequena inversão de esforços pode ser observada para o ângulo de vento a 15° . Aumentos sutis de $C_{y,cv}$ em relação a $C_{y,iso}$ são notados nos ventos a 0° e 345° .

Para ambas as figuras comentadas, os resultados dos coeficientes de força obtidos no túnel não ultrapassaram em nenhum caso os coeficientes calculados de acordo com a norma NBR-6123 (1988), tanto para o regime de escoamento de baixa turbulência ($C_{x,y,bt}$) como para o de alta turbulência ($C_{x,y,at}$), indicados pelo código brasileiro. A maior diferença dos resultados de C_x e C_y ocorridos no túnel em relação aos valores calculados pela norma, encontram-se nos ângulos de ventos de incidência oblíqua.

Na sequência a tabela 2, apresenta os resultados dos coeficientes de força e esforços cortantes na base, em relação aos eixos X e Y do Edifício A, calculados através dos resultados obtidos nos ensaios em túnel de vento.

Tabela 2: Resultado dos ensaios em função do vento, em coeficiente de força e em esforço cortante na base no Edifício A

α	$C_{x,iso}$	$F_{x,iso}$ (tf)	$C_{x,cv}$	$F_{x,cv}$ (tf)	$C_{y,iso}$	$F_{y,iso}$ (tf)	$C_{y,cv}$	$F_{y,cv}$ (tf)
0°	-0.82	-122.98	-0.54	-80.27	0.05	11.40	0.16	38.61
15°	-0.84	-125.38	-0.23	-34.41	0.12	28.63	-0.04	-10.97
30°	-0.84	-125.81	-0.19	-28.61	-0.03	-7.41	-0.16	-40.09
45°	-0.64	-96.13	-0.24	-35.86	-0.23	-57.68	-0.25	-61.53
60°	-0.09	-12.91	-0.21	-31.71	-0.55	-135.08	-0.17	-41.59
75°	0.49	73.26	-0.03	-4.70	-0.78	-192.92	-0.15	-36.61
90°	0.57	85.69	0.10	14.33	-0.92	-227.65	-0.25	-62.17
105°	0.62	92.35	0.09	13.41	-0.92	-228.26	-0.20	-49.94
120°	0.60	90.14	0.25	37.48	-0.87	-215.84	-0.17	-42.56
135°	0.73	108.53	0.45	67.32	-0.74	-183.51	-0.40	-98.73
150°	0.82	122.92	0.45	67.76	-0.55	-136.30	-0.35	-87.22
165°	0.85	127.57	0.49	73.76	-0.45	-111.35	-0.21	-52.70
180°	0.71	105.46	0.65	96.89	-0.33	-82.16	-0.20	-49.56
195°	0.41	61.02	0.39	57.86	0.18	43.40	0.01	3.25
210°	0.13	19.09	0.26	39.47	0.60	147.98	0.17	43.00
225°	0.05	7.73	-0.03	-5.17	0.71	174.51	0.40	99.73
240°	-0.08	-11.28	0.00	0.17	0.78	193.46	0.42	103.19
255°	-0.08	-11.79	0.03	4.53	0.86	211.75	0.40	99.66
270°	0.03	3.85	-0.02	-2.61	0.87	213.80	0.32	79.15
285°	-0.07	-10.20	-0.04	-5.34	0.82	201.71	0.18	45.23
300°	-0.39	-58.97	-0.24	-35.21	0.79	195.60	0.25	60.76
315°	-0.63	-94.09	-0.48	-71.45	0.65	161.35	0.42	102.58
330°	-0.80	-119.15	-0.59	-88.49	0.43	105.29	0.36	88.68
345°	-0.83	-123.92	-0.72	-107.74	0.13	32.66	0.27	66.70

As figuras 58 e 59 a seguir apresentam os fatores de vizinhança em relação ao eixo X e Y respectivamente, calculados para as 24 incidências de ventos ensaiados no túnel.

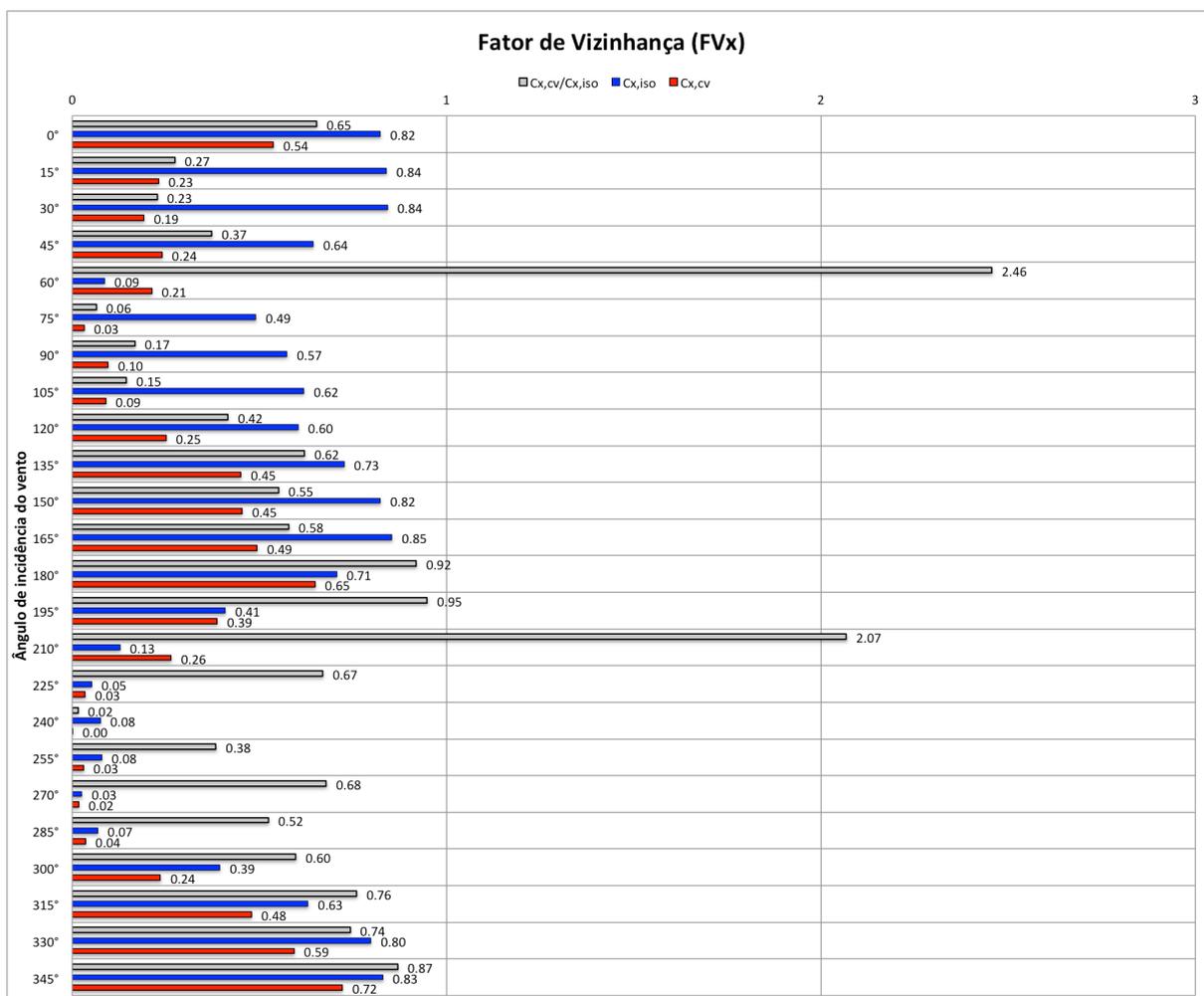


Figura 58: Variação do fator de vizinhança FV_x em função do vento no Edifício A

Pela análise da figura 58, é possível observar que a presença da vizinhança correspondente aos ângulos de ventos mais dominantes ao dimensionamento estrutural em relação ao eixo X, influenciou da seguinte forma os esforços estáticos devido a ação do vento sobre o edifício projetado:

- Vento à 330° (oblíquo): $FV_X = 0,74$ Redução de 26% das ações do vento;
- Vento à 345° (oblíquo): $FV_X = 0,87$ Redução de 13% das ações do vento;
- Vento à 0° (ortogonal): $FV_X = 0,65$ Redução de 35% das ações do vento;
- Vento à 15° (oblíquo): $FV_X = 0,27$ Redução de 73% das ações do vento;
- Vento à 30° (oblíquo): $FV_X = 0,23$ Redução de 77% das ações do vento;

Pelos resultados dos FV_X obtidos para os ângulos de ventos incidentes de 330° à 30° ao Edifício A, conclui-se que houve uma redução dos carregamentos de ventos oriundos destas direções quando na presença dos edifícios de interferência.

- Vento à 120° (oblíquo): $FV_X = 0,42$ Redução de 58% das ações do vento;
- Vento à 135° (oblíquo): $FV_X = 0,62$ Redução de 38% das ações do vento;
- Vento à 150° (oblíquo): $FV_X = 0,55$ Redução de 45% das ações do vento;
- Vento à 165° (oblíquo): $FV_X = 0,58$ Redução de 42% das ações do vento;
- Vento à 180° (ortogonal): $FV_X = 0,92$ Redução de 8% das ações do vento;

Pelos resultados dos FV_X obtidos para os ângulos de ventos incidentes de 120° à 180° ao Edifício A, conclui-se que houve uma redução dos carregamentos de ventos soprados destas direções quando na presença dos edifícios de interferência.

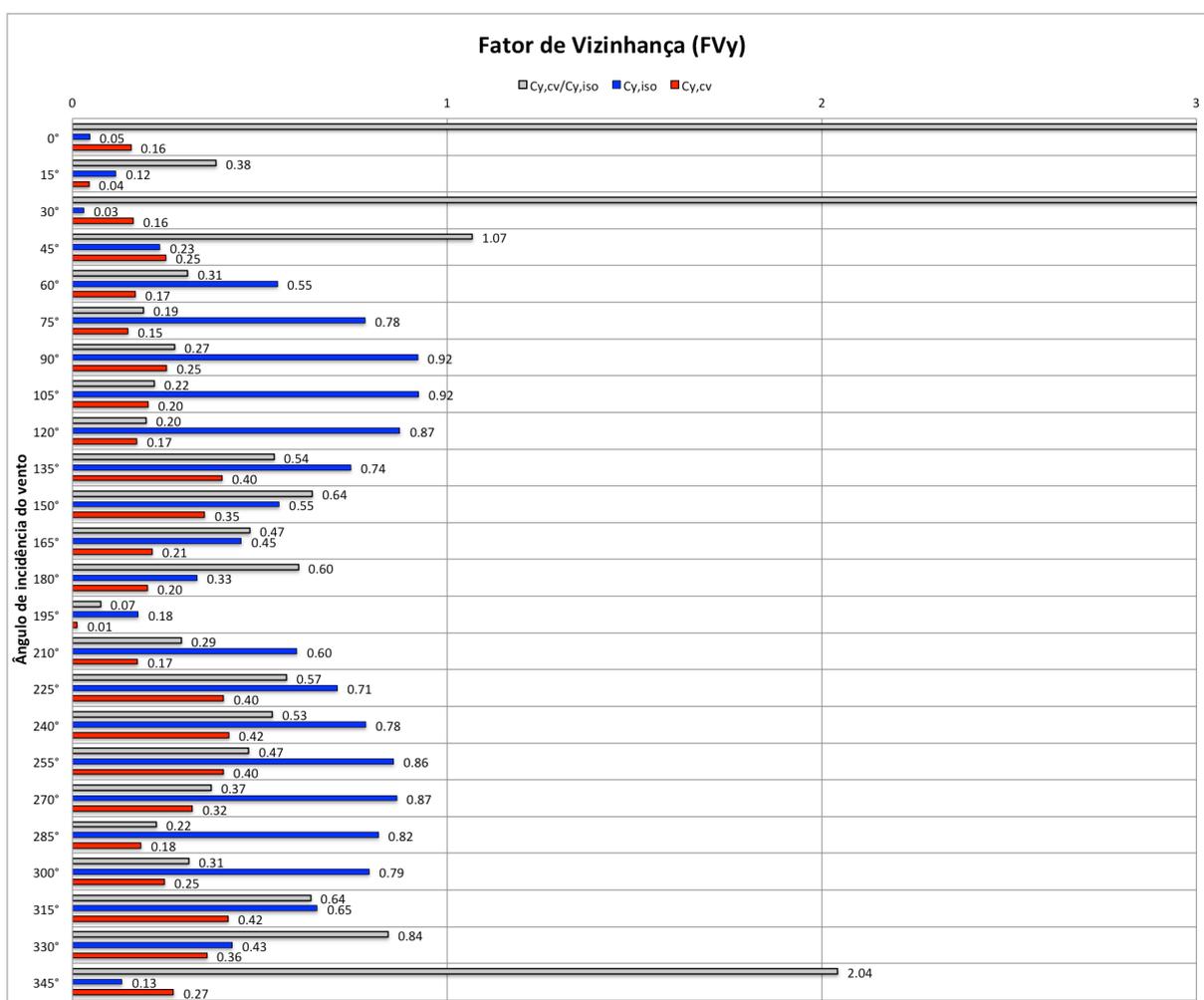


Figura 59: Variação do fator de vizinhança FV_y em função do vento no Edifício A

Analisando a figura 59, é possível observar que a presença da vizinhança correspondente aos ângulos de ventos mais influentes no dimensionamento estrutural em relação ao eixo Y, influenciou da seguinte forma os esforços estáticos devido a ação do vento sobre o edifício projetado:

- Vento à 75° (oblíquo): $FV_Y = 0,19$ Redução de 81% das ações do vento;
- Vento à 90° (ortogonal): $FV_Y = 0,27$ Redução de 73% das ações do vento;
- Vento à 105° (oblíquo): $FV_Y = 0,22$ Redução de 78% das ações do vento;
- Vento à 120° (oblíquo): $FV_Y = 0,20$ Redução de 80% das ações do vento;
- Vento à 135° (oblíquo): $FV_Y = 0,54$ Redução de 46% das ações do vento;

Pelos resultados dos FV_Y obtidos para os ângulos de ventos incidentes de 75° à 135° ao Edifício A, conclui-se que houve uma redução dos carregamentos de ventos soprados destas direções quando na presença dos edifícios de interferência.

- Vento à 240° (oblíquo): $FV_Y = 0,53$ Redução de 47% das ações do vento;
- Vento à 255° (oblíquo): $FV_Y = 0,47$ Redução de 53% das ações do vento;
- Vento à 270° (ortogonal): $FV_Y = 0,37$ Redução de 63% das ações do vento;
- Vento à 285° (oblíquo): $FV_Y = 0,22$ Redução de 78% das ações do vento;
- Vento à 300° (oblíquo): $FV_Y = 0,31$ Redução de 69% das ações do vento;

Pelos resultados dos FV_Y obtidos para os ângulos de ventos incidentes de 240° à 300° ao Edifício A, conclui-se que houve uma redução dos carregamentos de ventos soprados destas direções quando na presença dos edifícios de interferência.

5.3 MODELO AERODINÂMICO - EDIFÍCIO B

As figuras 60 e 61 a seguir, apresentam a variação do coeficiente de força em relação aos eixos X e Y respectivamente, em função do ângulo de incidência do vento para as duas situações de ensaio realizadas, isolado e em vizinhança, em comparativo aos valores dos coeficientes de arrasto, obtidos junto a norma de vento brasileira para escoamento de alta e baixa turbulência.

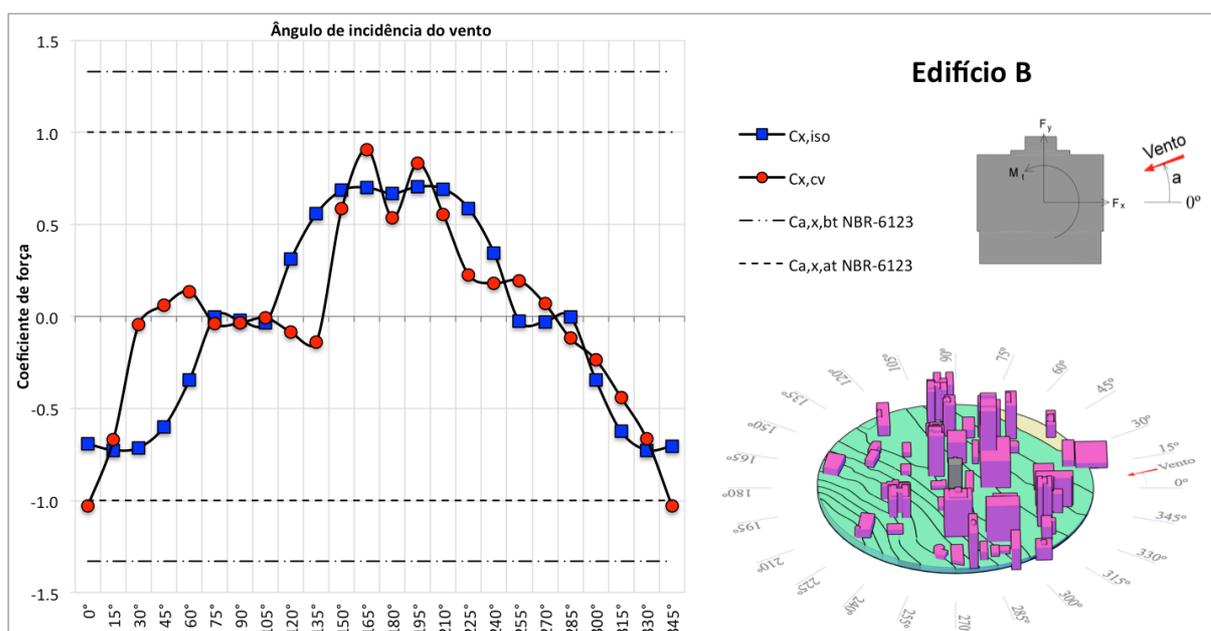


Figura 60: Variação do coeficiente de força C_x em função do vento no Edifício B

Através da análise da figura 60, é possível observar que para os coeficientes de força em relação ao eixo X, houve variação destes valores registrados no ensaio em vizinhança, sobre aqueles ocorridos no ensaio isolado. Os $C_{x,iso}$ apresentaram resultados bastante simétricos devido ao formato quasi-prismático do modelo que se comportou de maneira uniforme durante este ensaio. Já para os $C_{x,cv}$, nota-se a intensa interferência da vizinhança em diversos casos de ventos, como por exemplo à 45°, 60°, 120°, 135°, 255°, 270° e 285°, onde houveram inversões no sentidos dos esforços em relação aos ocorridos no ensaio isolado. Para os ventos 165° e 195°, observa-se um repentino aumento do $C_{x,cv}$ acompanhado de uma redução ocorrida no ângulo intermediário, à 180°, o que configura uma interferência abrupta da vizinhança ao modelo, possível causa de efeito Venturi gerado para estes ângulos de ventos, uma vez que alterada a direção de incidência do mesmo, os valores de $C_{x,cv}$ voltam a ficar menores do que $C_{x,iso}$. Maiores valores de $C_{x,iso}$ ocorreram para ventos no sentido do eixo analisado, o que também ocorreu para o caso isolado, porém de forma mais brusca.

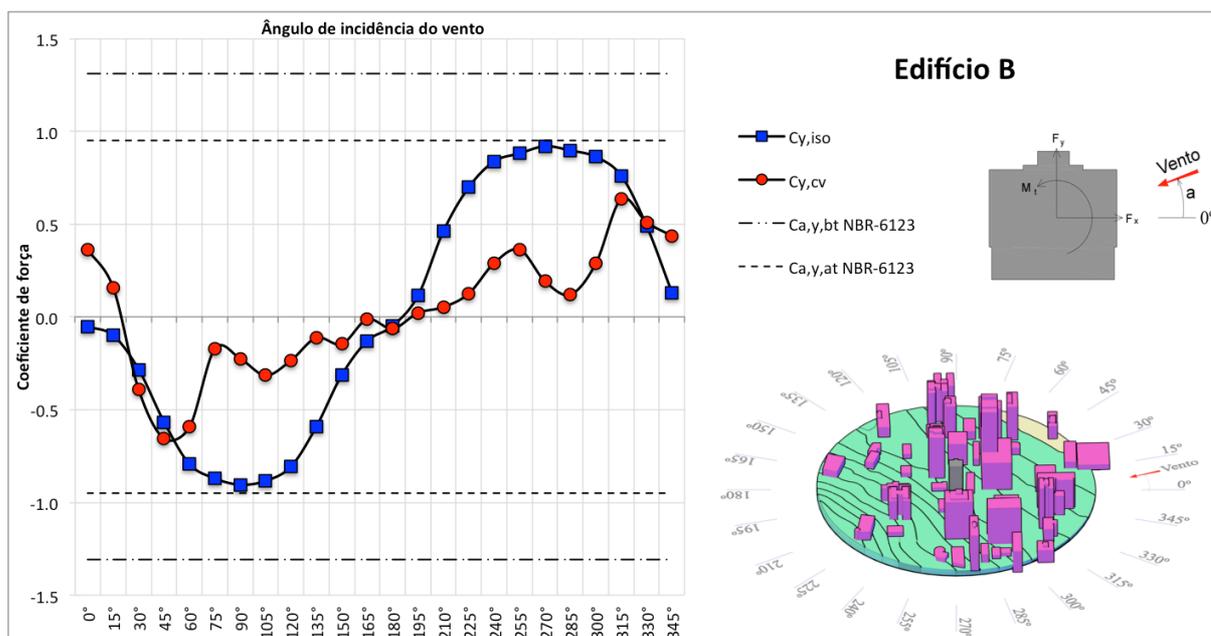


Figura 61: Variação do coeficiente de força C_y em função do vento no Edifício B

Observando a figura 61, no ensaio em vizinhança, nota-se que de um modo geral houve uma redução acentuada dos coeficientes de força ocorridos em relação ao eixo Y. Esta redução nos valores de $C_{y,cv}$ deve-se a estrutura encontrar-se protegida pela vizinhança na maioria dos casos de vento (60° a 315°). Os ângulos de incidência de vento mais desprovidos de obstáculos são os ângulos 165° a 195° , nestas direções há uma clareira entre as edificações da vizinhança, onde o vento incide diretamente sobre o modelo, no entanto devido ao seu formato regular os valores de $C_{y,cv}$ ficaram próximos aos valores de $C_{y,iso}$. Os ventos oriundos das direções 0° e 15° apresentam uma inversão dos esforços em relação ao ensaio isolado. Observa-se um pequeno aumento dos C_y em 30° , 45° e 345° no ensaio em vizinhança.

Para ambas as figuras comentadas, os resultados dos coeficientes de força obtidos no túnel não ultrapassaram em nenhum caso os coeficientes calculados de acordo com a norma NBR-6123 (1988), tanto para o regime de escoamento de baixa turbulência ($C_{x,y,bt}$) como para o de alta turbulência ($C_{x,y,at}$), indicados pelo código brasileiro. A maior diferença dos resultados de $C_{x,y}$ ocorridos no túnel em relação aos valores calculados pela norma, encontram-se nos ângulos de ventos de incidência oblíqua à edificação.

Na sequência a tabela 3, apresenta os resultados dos coeficientes de força e esforços cortantes na base, em relação aos eixos X e Y do Edifício B, calculados através dos resultados obtidos dos ensaios no túnel de vento.

Tabela 3: Resultado dos ensaios em função do vento, em coeficiente de força e em esforço cortante na base no Edifício B

α	$C_{x,iso}$	$F_{x,iso}$ (tf)	$C_{x,cv}$	$F_{x,cv}$ (tf)	$C_{y,iso}$	$F_{y,iso}$ (tf)	$C_{y,cv}$	$F_{y,cv}$ (tf)
0°	-0.69	-58.84	-1.03	-87.44	-0.05	-4.60	0.36	32.29
15°	-0.73	-61.62	-0.67	-56.83	-0.10	-8.87	0.16	13.87
30°	-0.71	-60.53	-0.04	-3.74	-0.28	-25.15	-0.39	-34.77
45°	-0.60	-50.84	0.06	5.07	-0.57	-50.23	-0.66	-58.18
60°	-0.34	-29.26	0.13	11.45	-0.79	-70.32	-0.59	-52.64
75°	0.00	-0.19	-0.04	-3.36	-0.87	-77.20	-0.17	-15.24
90°	-0.02	-1.96	-0.04	-2.99	-0.90	-80.22	-0.23	-19.97
105°	-0.04	-3.08	-0.01	-0.70	-0.88	-78.39	-0.32	-27.94
120°	0.31	26.37	-0.09	-7.25	-0.81	-71.46	-0.23	-20.78
135°	0.56	47.28	-0.14	-11.74	-0.59	-52.36	-0.11	-10.01
150°	0.68	58.03	0.58	49.52	-0.31	-27.73	-0.15	-12.98
165°	0.70	59.36	0.91	76.95	-0.13	-11.51	-0.01	-1.21
180°	0.67	56.70	0.54	45.61	-0.05	-4.35	-0.06	-5.63
195°	0.70	59.76	0.83	70.56	0.12	10.20	0.02	1.89
210°	0.69	58.79	0.55	46.89	0.46	40.99	0.05	4.67
225°	0.59	49.68	0.22	19.09	0.70	61.99	0.13	11.18
240°	0.34	29.15	0.18	15.30	0.84	74.34	0.29	25.72
255°	-0.03	-2.32	0.19	16.35	0.88	78.12	0.36	32.11
270°	-0.03	-2.49	0.07	5.84	0.92	81.57	0.19	17.03
285°	0.00	-0.12	-0.12	-10.03	0.90	79.53	0.12	10.71
300°	-0.34	-29.17	-0.23	-19.86	0.86	76.49	0.29	25.51
315°	-0.62	-52.97	-0.44	-37.37	0.76	67.47	0.64	56.33
330°	-0.73	-61.60	-0.66	-56.24	0.49	43.57	0.51	45.27
345°	-0.71	-59.91	-1.03	-87.22	0.13	11.62	0.44	38.70

As figuras 62 e 63, a seguir apresentam os fatores de vizinhança em relação ao eixo X e Y respectivamente, calculados para as 24 incidências de ventos ensaiados no túnel.

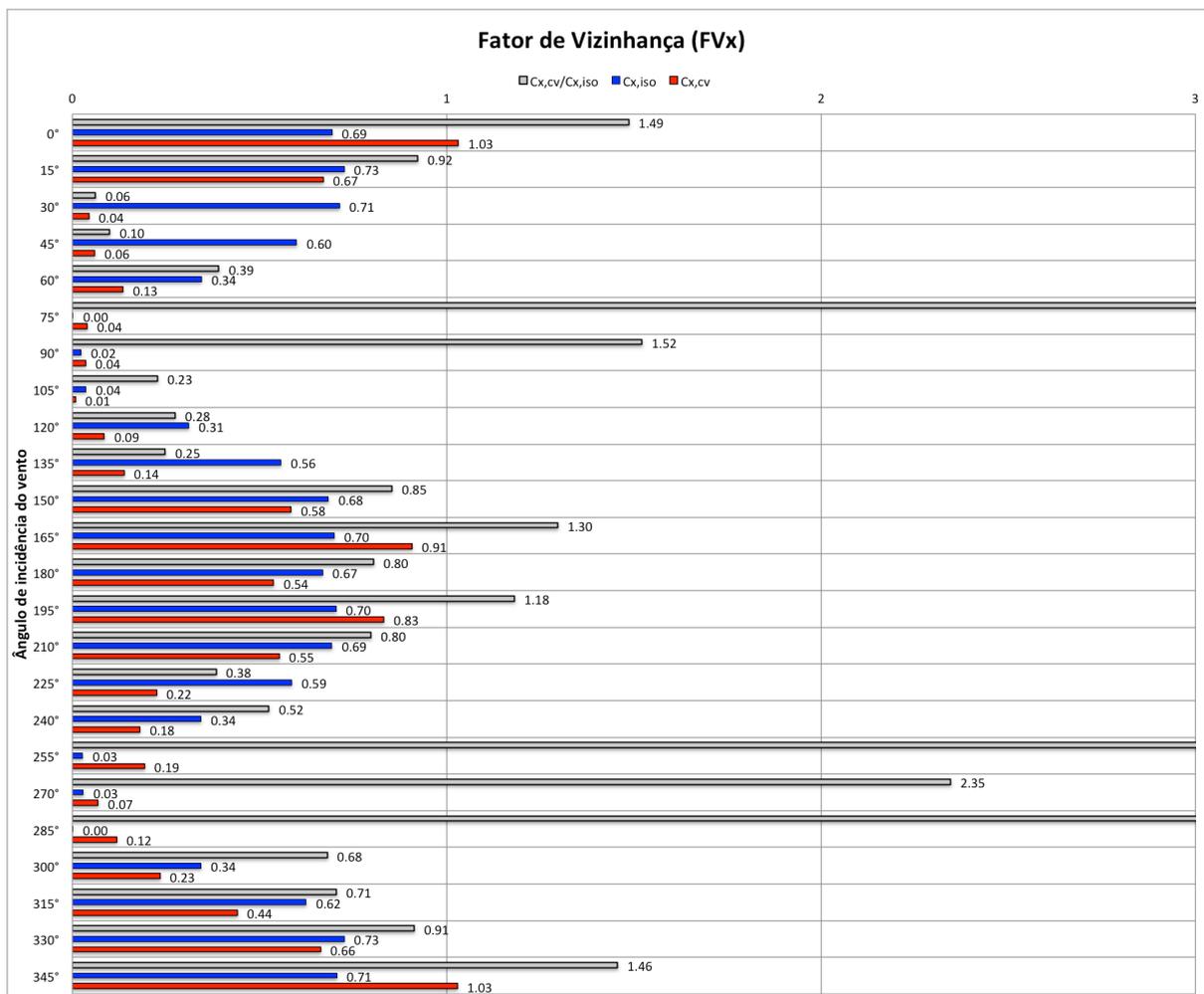


Figura 62: Variação do fator de vizinhança FV_x em função do vento no Edifício B

Pela análise da figura 62, é possível observar que a presença da vizinhança correspondente aos ângulos de ventos mais influentes no dimensionamento estrutural em relação ao eixo X, influenciou da seguinte forma os esforços estáticos devido a ação do vento sobre o edifício projetado:

- Vento à 330° (oblíquo): $FV_X = 0,91$ Redução de 9% das ações do vento;
- Vento à 345° (oblíquo): $FV_X = 1,46$ Majoração de 46% das ações do vento;
- Vento à 0° (ortogonal): $FV_X = 1,49$ Majoração de 49% das ações do vento;
- Vento à 15° (oblíquo): $FV_X = 0,92$ Redução de 8% das ações do vento;
- Vento à 30° (oblíquo): $FV_X = 0,06$ Redução de 94% das ações do vento;

Pelos resultados dos FV_X obtidos para os ângulos de vento incidentes de 330° à 30° no Edifício B, observa-se que na presença da vizinhança há uma grande proteção do modelo para

o vento incidido à 30°, ao passo que para os ventos à 330° e 15°, os carregamentos de vento se mantiveram praticamente os mesmos dos ensaios isolados. O aumento das cargas de vento deu-se de forma equivalente para os ventos à 345° e 0°.

- Vento à 150° (oblíquo): $FV_X = 0,85$ Redução de 15% das ações do vento;
- Vento à 165° (oblíquo): $FV_X = 1,30$ Majoração de 30% das ações do vento;
- Vento à 180° (ortogonal): $FV_X = 0,80$ Redução de 20% das ações do vento;
- Vento à 195° (oblíquo): $FV_X = 1,18$ Majoração de 18% das ações do vento;
- Vento à 210° (oblíquo): $FV_X = 0,80$ Redução de 20% das ações do vento;

Pelos resultados dos FV_X obtidos para os ângulos de ventos incidentes de 150° à 210° no Edifício B, conclui-se que a presença da vizinhança, ora majorou, ora reduziu os carregamentos de vento incidentes destas direções.

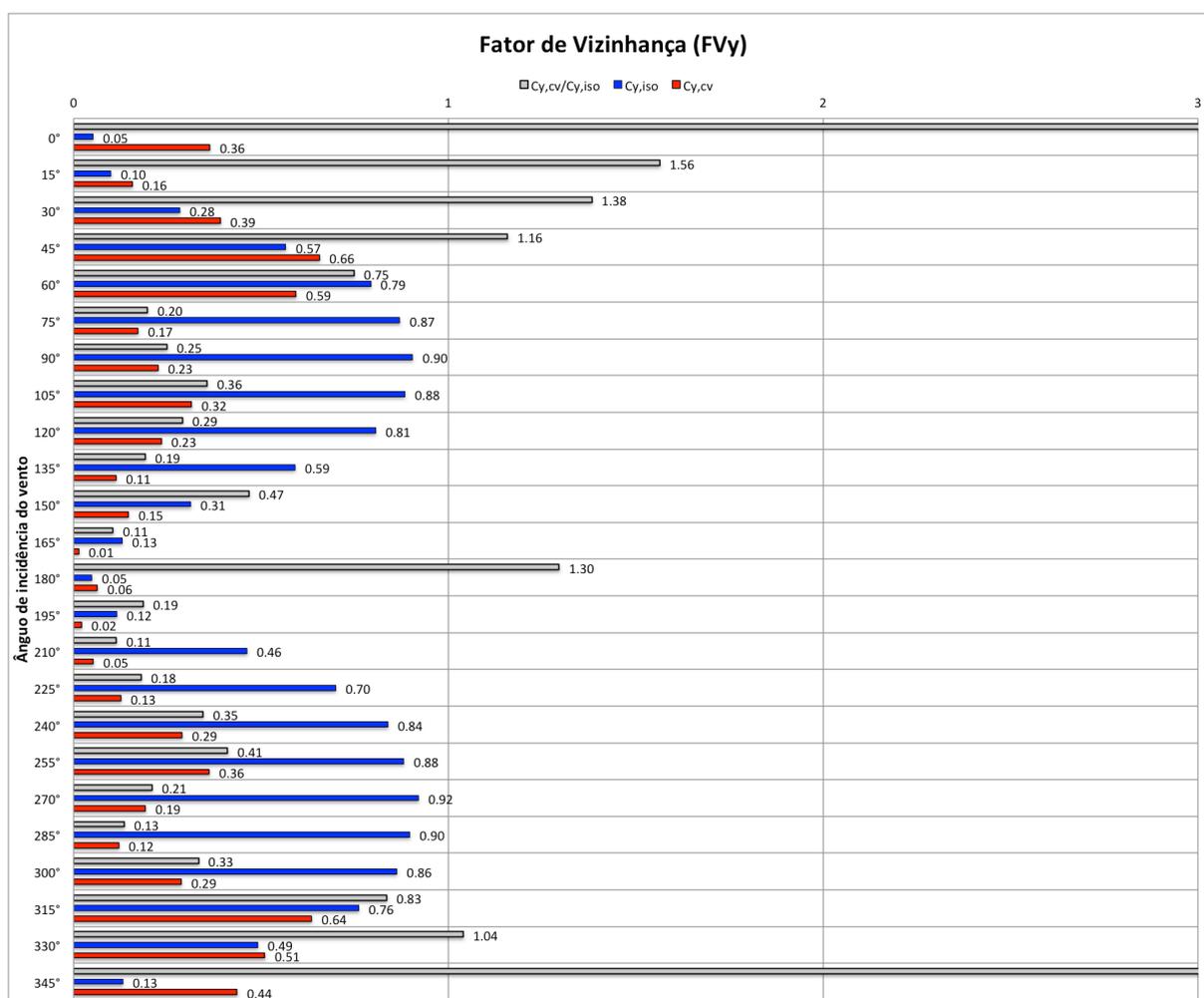


Figura 63: Variação do fator de vizinhança FVy em função do vento no Edifício B

Analisando a figura 63, é possível observar que a presença da vizinhança correspondente aos ângulos de ventos mais influentes no dimensionamento estrutural em relação ao eixo Y, influenciou da seguinte forma os esforços devido a ação estática do vento sobre o edifício projetado:

- Vento à 60° (oblíquo): $FV_Y = 0,75$ Redução de 25% das ações do vento;
- Vento à 75° (oblíquo): $FV_Y = 0,20$ Redução de 80% das ações do vento;
- Vento à 90° (ortogonal): $FV_Y = 0,25$ Redução de 75% das ações do vento;
- Vento à 105° (oblíquo): $FV_Y = 0,36$ Redução de 64% das ações do vento;
- Vento à 120° (oblíquo): $FV_Y = 0,29$ Redução de 71% das ações do vento;

Pelos resultados dos FV_Y obtidos para os ângulos de ventos incidentes de 60° à 120° ao Edifício C, conclui-se que houve uma forte redução dos carregamentos de ventos incididos destas direções, excluindo o vento à 60° onde a redução foi menor, quando na presença dos edifícios de interferência.

- Vento à 240° (oblíquo): $FV_Y = 0,35$ Redução de 65% das ações do vento;
- Vento à 255° (oblíquo): $FV_Y = 0,41$ Redução de 59% das ações do vento;
- Vento à 270° (ortogonal): $FV_Y = 0,21$ Redução de 79% das ações do vento;
- Vento à 285° (oblíquo): $FV_Y = 0,13$ Redução de 87% das ações do vento;
- Vento à 300° (oblíquo): $FV_Y = 0,33$ Redução de 77% das ações do vento;

Pelos resultados dos FV_Y obtidos para os ângulos de ventos incidentes de 240° à 300° ao Edifício C, conclui-se que houve uma forte redução dos carregamentos de ventos incididos destas direções quando na presença dos edifícios de interferência.

5.4 MODELO AERODINÂMICO - EDIFÍCIO C

As figuras 64 e 65 a seguir, apresentam a variação do coeficiente de força em relação aos eixos X e Y respectivamente, em função do ângulo de incidência do vento para as duas situações de ensaio realizadas, isolado e em vizinhança, em comparativo aos valores dos coeficientes de arrasto, obtidos junto a norma de vento brasileira para escoamento de alta e baixa turbulência.

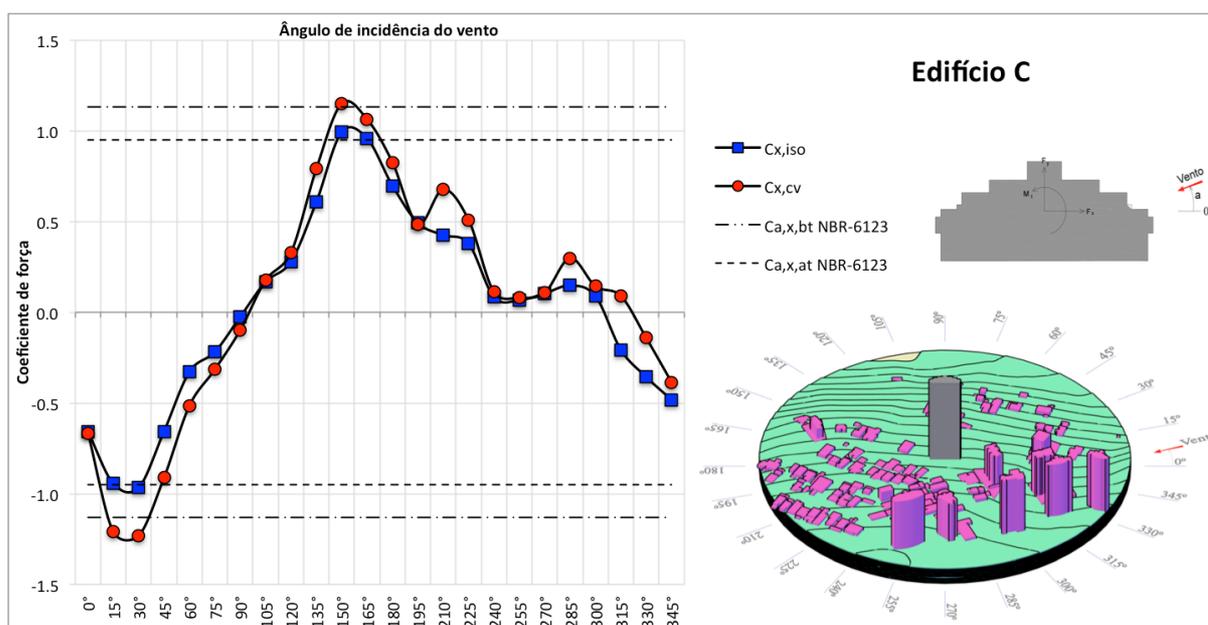


Figura 64: Variação do coeficiente de força Cx em função do vento no Edifício C

Através da análise da figura 64, é possível observar que para os coeficientes de força em relação ao eixo X, o modelo em análise comportou-se de forma bastante coerente, sem variações bruscas. Nota-se uma semelhança nos valores obtidos no ensaio em vizinhança ($C_{x,cv}$) aos valores do ensaio isolado ($C_{x,iso}$). No entanto estes foram maiores do que aqueles para a maioria dos ângulos de incidência de ventos. Os maiores resultados de C_x ocorreram para os ventos à 30° e 150°, tanto para o caso isolado como para o caso em vizinhança. A maior variação entre os dois ensaios também deu-se para estes ângulos de ventos. Alguma interferência é notada à 210° e 285°, elevando repentinamente a ação do vento sobre a edificação nesta direção. À 315° nota-se uma leve inversão nos valores de C_x . Em 330° e 345° observa-se uma proteção do modelo à ação do vento.

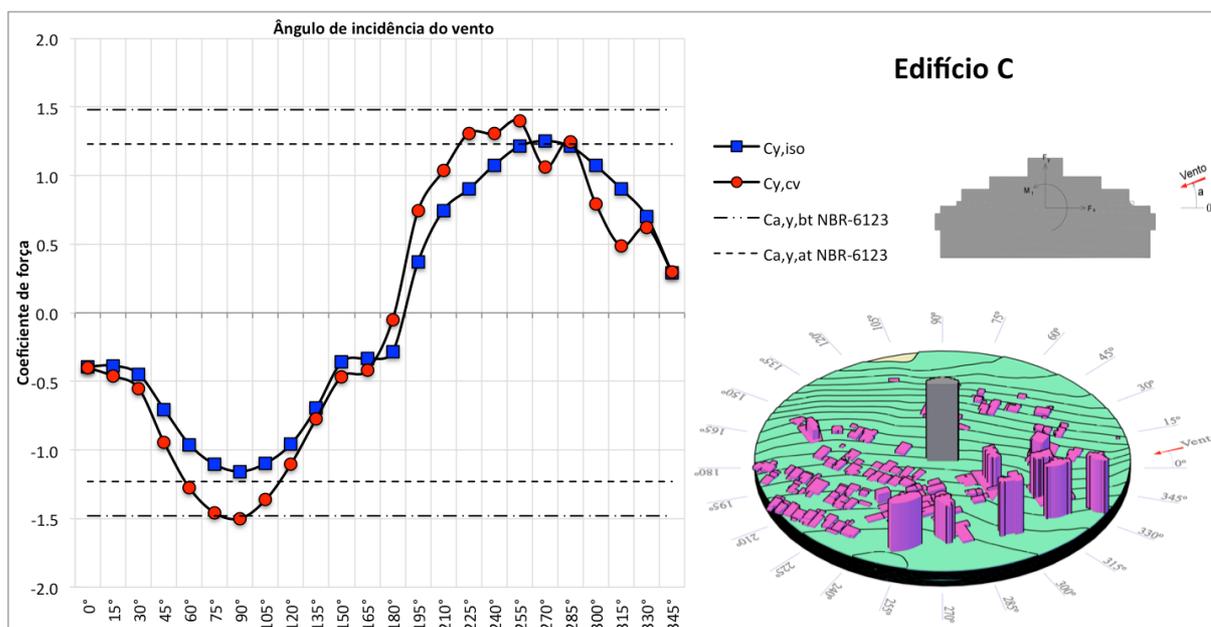


Figura 65: Variação do coeficiente de força C_y em função do vento no Edifício C

Examinando a figura 65, observa-se um comportamento simétrico da edificação em relação aos dois ensaios. Analisando o caso em vizinhança, houve um aumento dos valores dos coeficientes de pressão em Y, principalmente em relação aos ventos oblíquos. Os ângulos de ventos entre 45° a 120° apresentaram um aumento proporcional dos $C_{y,cv}$. Para os ventos que sopram das direções 270° , 300° , 315° e 330° , nota-se uma redução dos esforços sobre o modelo.

Conforme observado na figura 63 dos coeficientes de força em relação a X, os resultados obtidos no túnel ultrapassaram os coeficientes calculados de acordo com a norma NBR-6123 (1988), tanto para o regime de escoamento de baixa turbulência (C_{bt}) como para o de alta turbulência (C_{at}), indicados pelo código brasileiro para os seguintes ângulos de vento, à 15° , 30° , 150° e 165° . Também na figura 65, dos coeficientes de força em relação a Y, alguns casos de vento ultrapassaram os valores dos coeficientes calculados de acordo com a NBR. A ocorrência deu-se para os ângulos oblíquos à 60° , 75° , 105° , 225° , 240° , 255° e 285° , e aos ângulos ortogonais, 90° e 270° .

Na sequência a tabela 4 apresenta os resultados dos coeficientes de força e esforços cortantes na base, em relação aos eixos X e Y do Edifício C, calculados através dos resultados obtidos dos ensaios no túnel de vento.

Tabela 4: Resultado dos ensaios em função do vento, em coeficiente de força e em esforço cortante na base no Edifício C

α	$C_{x,iso}$	$F_{x,iso}$ (tf)	$C_{x,cv}$	$F_{x,cv}$ (tf)	$C_{y,iso}$	$F_{y,iso}$ (tf)	$C_{y,cv}$	$F_{y,cv}$ (tf)
0°	-0.66	-149.54	-0.67	-152.35	-0.39	-215.36	-0.40	-219.46
15°	-0.94	-214.68	-1.21	-275.41	-0.39	-212.43	-0.46	-254.06
30°	-0.96	-219.68	-1.23	-280.29	-0.45	-246.34	-0.55	-304.13
45°	-0.66	-149.42	-0.91	-207.55	-0.70	-386.93	-0.94	-519.98
60°	-0.33	-74.80	-0.52	-117.38	-0.96	-528.34	-1.28	-702.38
75°	-0.22	-49.71	-0.32	-71.89	-1.11	-608.54	-1.46	-802.49
90°	-0.03	-5.77	-0.10	-22.42	-1.16	-636.46	-1.50	-824.96
105°	0.17	38.10	0.18	40.08	-1.10	-603.70	-1.36	-750.14
120°	0.28	63.65	0.33	74.97	-0.96	-526.34	-1.10	-607.06
135°	0.61	138.32	0.79	179.98	-0.69	-381.43	-0.77	-423.79
150°	0.99	226.37	1.15	262.07	-0.36	-198.03	-0.47	-256.11
165°	0.96	218.14	1.06	242.25	-0.33	-182.60	-0.42	-230.36
180°	0.70	158.86	0.83	188.10	-0.28	-156.44	-0.05	-27.42
195°	0.49	112.27	0.49	110.81	0.37	203.30	0.74	408.58
210°	0.43	96.87	0.68	154.25	0.75	411.00	1.04	570.05
225°	0.38	86.23	0.51	115.77	0.90	495.57	1.31	719.30
240°	0.08	18.99	0.11	25.36	1.08	592.04	1.31	718.66
255°	0.07	15.26	0.08	18.37	1.21	667.79	1.40	768.05
270°	0.10	23.64	0.11	24.50	1.25	689.04	1.06	583.12
285°	0.15	33.62	0.30	68.02	1.21	667.15	1.25	686.96
300°	0.09	20.19	0.14	32.71	1.07	589.99	0.79	436.94
315°	-0.21	-47.04	0.09	20.46	0.90	496.68	0.49	268.46
330°	-0.36	-81.18	-0.14	-32.18	0.70	385.97	0.62	342.47
345°	-0.48	-109.86	-0.39	-87.85	0.29	161.14	0.30	162.74

As figuras 66 e 67, a seguir apresentam os fatores de vizinhança em relação aos eixos X e Y respectivamente, calculados para os 24 ângulos de incidência de ventos ensaiados no túnel.

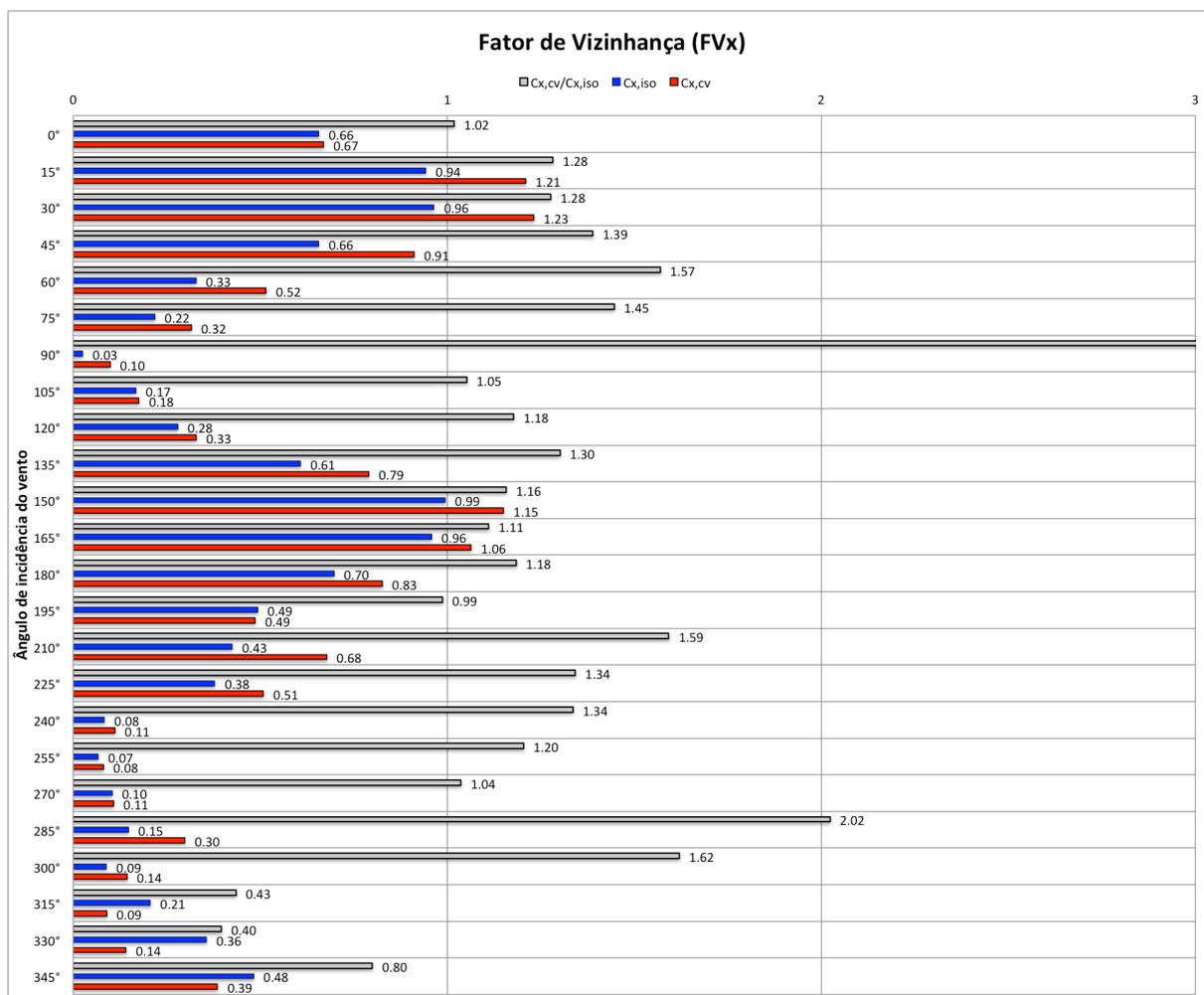


Figura 66: Variação do fator de vizinhança FV_x em função do vento no Edifício C

Pela análise da figura 66, é possível observar que a presença da vizinhança correspondente aos ângulos de ventos mais influentes no dimensionamento estrutural em relação ao eixo X, influenciou da seguinte forma os esforços estáticos devido a ação do vento sobre o edifício projetado:

- Vento à 345° (oblíquo): $FV_X = 0,80$ Redução de 20% das ações do vento;
- Vento à 0° (ortogonal): $FV_X = 1,02$ Majoração de 2% das ações do vento;
- Vento à 15° (oblíquo): $FV_X = 1,28$ Majoração de 28% das ações do vento;
- Vento à 30° (oblíquo): $FV_X = 1,28$ Majoração de 28% das ações do vento;
- Vento à 45° (oblíquo): $FV_X = 1,39$ Majoração de 39% das ações do vento;

Pelos resultados dos FV_X obtidos para os ângulos de ventos incidentes de 345° à 45° ao Edifício C, nota-se que houve uma crescente majoração dos carregamentos de ventos oriundos destas direções ao modelo, quando na presença dos edifícios de interferência.

- Vento à 135° (oblíquo): $FV_X = 1,30$ Majoração de 30% das ações do vento;
- Vento à 150° (oblíquo): $FV_X = 1,16$ Majoração de 16% das ações do vento;
- Vento à 165° (oblíquo): $FV_X = 1,11$ Majoração de 11% das ações do vento;
- Vento à 180° (ortogonal): $FV_X = 1,18$ Majoração de 18% das ações do vento;
- Vento à 195° (oblíquo): $FV_X = 0,99$ Redução de 1% das ações do vento;

Pelos resultados dos FV_X obtidos para os ângulos de ventos incidentes de 135° à 195° ao Edifício C, nota-se que da mesma forma aos resultados dos ângulos apresentados anteriormente que de um modo geral houve um aumento dos carregamentos de ventos oriundos destas direções quando na presença dos edifícios de interferência.

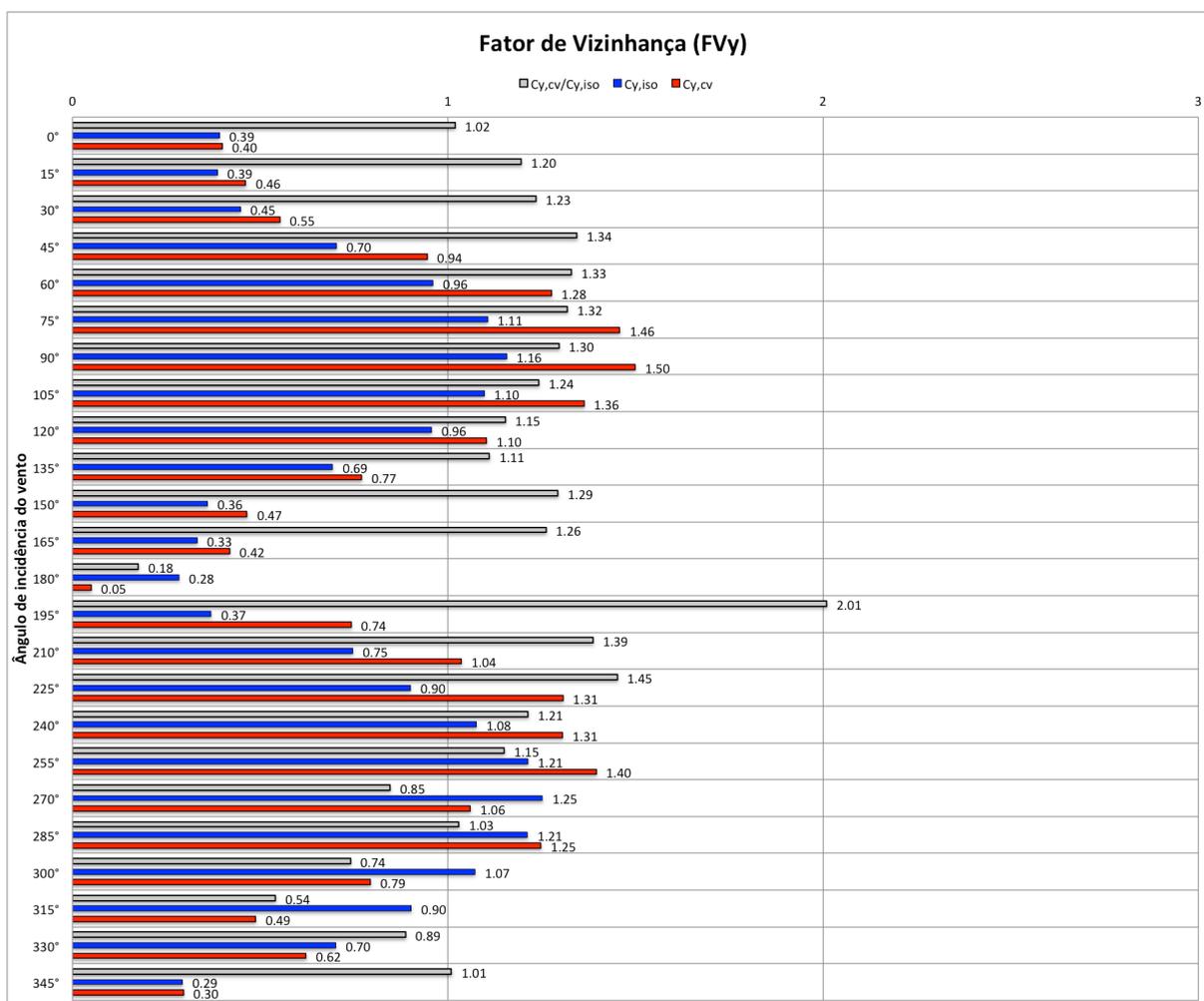


Figura 67: Variação do fator de vizinhança FV_y em função do vento no Edifício C

Da mesma forma analisando a figura 67, é possível observar que a presença da vizinhança correspondente aos ângulos de ventos mais influentes no dimensionamento estrutural em relação ao eixo Y, influenciou da seguinte forma os esforços devido a ação estática do vento sobre o edifício projetado:

- Vento à 60° (oblíquo): $FV_Y = 1,33$ Majoração de 32% das ações do vento;
- Vento à 75° (oblíquo): $FV_Y = 1,32$ Majoração de 32% das ações do vento;
- Vento à 90° (ortogonal): $FV_Y = 1,30$ Majoração de 30% das ações do vento;
- Vento à 105° (oblíquo): $FV_Y = 1,24$ Majoração de 24% das ações do vento;
- Vento à 120° (oblíquo): $FV_Y = 1,15$ Majoração de 15% das ações do vento;

Pelos resultados dos FV_Y obtidos para os ângulos de ventos incidentes de 60° à 120° ao Edifício C, conclui-se que houve um aumento dos carregamentos de ventos oriundos destas direções quando na presença dos edifícios de interferência.

- Vento à 240° (oblíquo): $FV_Y = 1,21$ Majoração de 21% das ações do vento;
- Vento à 255° (oblíquo): $FV_Y = 1,15$ Majoração de 15% das ações do vento;
- Vento à 270° (ortogonal): $FV_Y = 0,85$ Redução de 15% das ações do vento;
- Vento à 285° (oblíquo): $FV_Y = 1,03$ Majoração de 3% das ações do vento;
- Vento à 300° (oblíquo): $FV_Y = 0,74$ Redução de 26% das ações do vento;

Pelos resultados dos FV_Y obtidos para os ângulos de ventos incidentes de 240° à 300° ao Edifício D, nota-se que houve pouca variação entre majoração e redução dos carregamentos de vento na presença da vizinhança, para os vento oriundos destas direções.

5.5 MODELO AERODINÂMICO - EDIFÍCIO D

As figuras 68 e 69 a seguir, apresentam a variação do coeficiente de força em relação aos eixos X e Y respectivamente, em função do ângulo de incidência do vento para as duas situações de ensaio realizadas, isolado e em vizinhança, em comparativo aos valores dos coeficientes de arrasto, obtidos junto a norma de vento brasileira para escoamento de alta e baixa turbulência.

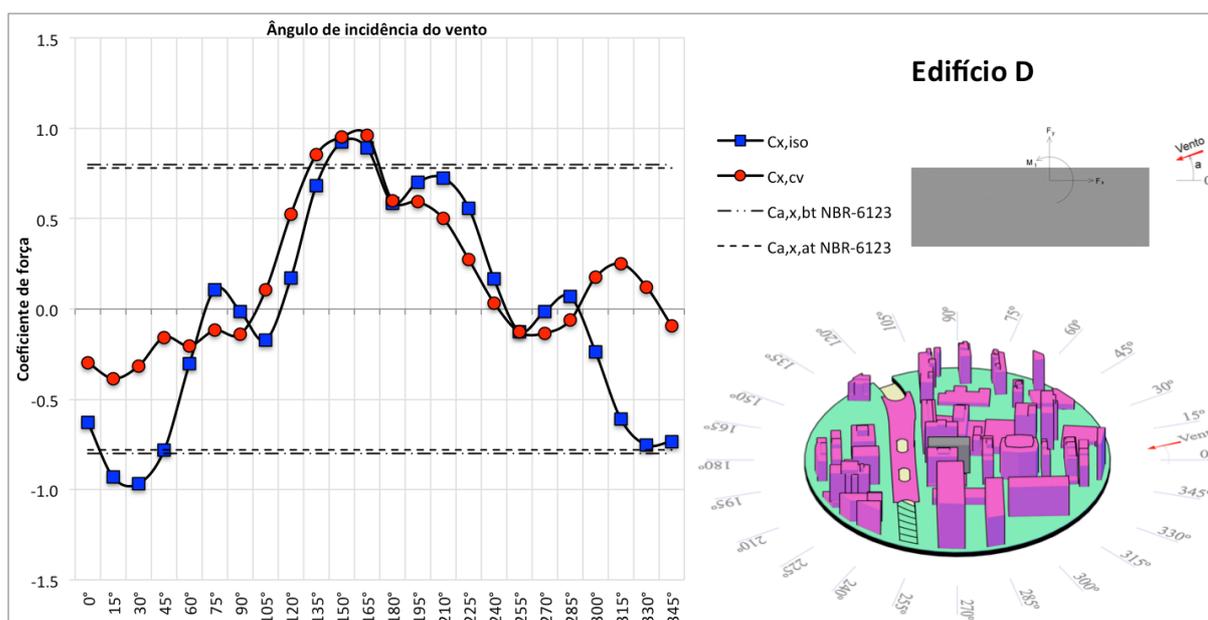


Figura 68: Variação do coeficiente de força C_x em função do vento no Edifício D

Pela análise da figura 68, nota-se que a distribuição dos coeficientes de força em X resultantes do ensaio isolado apresentou um comportamento simétrico da edificação à ação do vento, este comportamento se deve ao formato uniforme do modelo. Maiores valores de $C_{x,iso}$ ocorreram para os ângulos de ventos oblíquos ao modelo à 30° , 150° , 210° , 330° . Analisando o ensaio em vizinhança, observa-se uma região de inversão dos esforços, observada nos ângulos de vento à 300° , 315° e 330° . À 90° e à 270° nota-se uma atuação praticamente nula dos esforços estáticos devido a ação do vento sobre a edificação. Para os ângulos 105° à 180° , houve um aumento regular dos valores de $C_{x,cv}$, posteriormente seguidos de uma redução contínua das ações do vento para os ângulos 195° à 240° . À 345° , 0° , 15° , 30° nota-se uma considerável redução dos coeficientes de força $C_{x,cv}$ em relação aos $C_{x,iso}$, sem a ocorrência de inversões nos sentidos dos esforços.

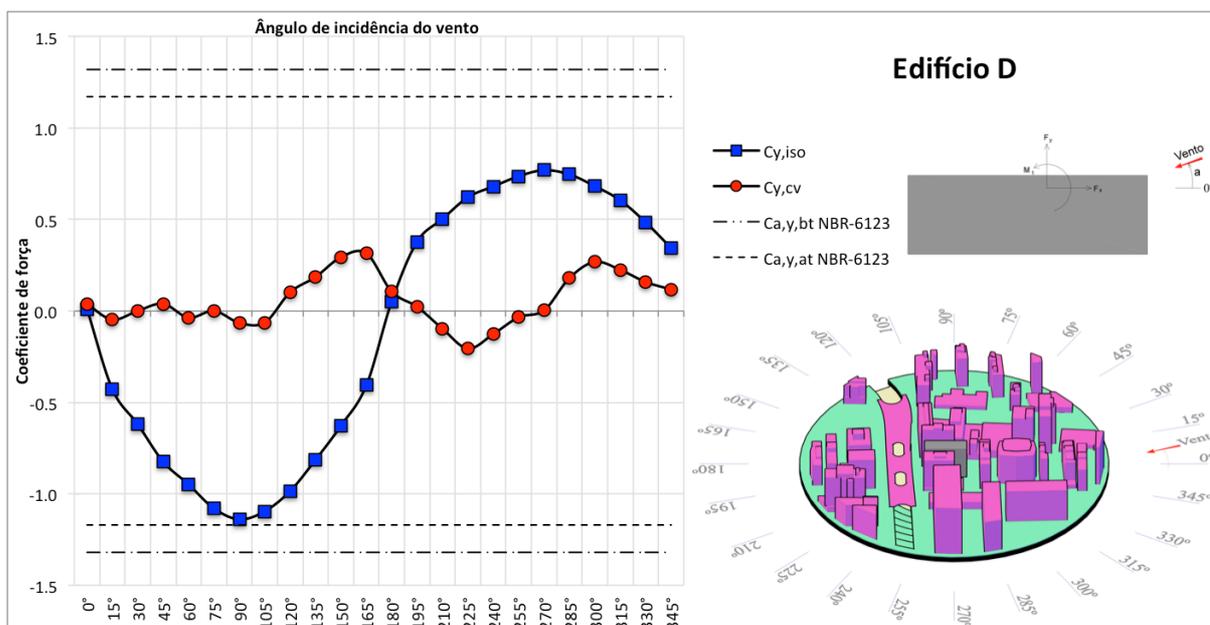


Figura 69: Variação do coeficiente de força C_y em função do vento no Edifício D

Observando a figura 69, acima, que apresenta os resultados dos coeficientes de força em relação ao eixo Y, no caso isolado nota-se novamente a simetria dos resultados devido ao formato prismático regular da edificação. Os maiores valores de $C_{y,iso}$ ocorreram conforme esperado para os ângulos de 90° e 270° , os resultados dos ângulos 0° e 180° obtiveram os menores valores. Inserida a vizinhança, a edificação de um modo geral foi intensamente protegida na totalidade dos casos de ventos. Inversões nos esforços em relação ao eixo Y, são observadas para diversos ângulos, mais acentuadamente entre os ventos 120° à 240° .

Para a figura 67 dos coeficientes de força em relação a X, diversos resultados obtidos no túnel ultrapassaram os coeficientes calculados de acordo com a norma NBR-6123 (1988), tanto para o regime de escoamento de baixa turbulência ($C_{x,y,bt}$) como para o de alta turbulência ($C_{x,y,at}$), indicados pelo código brasileiro. A extrapolação dos resultados deu-se tanto para o ensaio isolado ($C_{x,iso}$), nas direções 15° , 30° , 45° , 150° e 165° , como para o ensaio em vizinhança ($C_{x,cv}$), nas direções 135° , 150° , 165° . Já os valores obtidos dos coeficientes de força em relação a Y, observados na figura 69, em nenhum caso de vento foram ultrapassados os valores de coeficientes calculados de acordo com a norma para escoamentos em alta e baixa turbulência.

Na sequência a tabela 5 apresenta os resultados dos coeficientes de força e esforços cortantes na base, em relação aos eixos X e Y do Edifício E, calculados através dos resultados obtidos dos ensaios no túnel de vento.

Tabela 5: Resultado dos ensaios em função do vento, em coeficiente de força e em esforço cortante na base no Edifício D

α	$C_{x,iso}$	$F_{x,iso}$ (tf)	$C_{x,cv}$	$F_{x,cv}$ (tf)	$C_{y,iso}$	$F_{y,iso}$ (tf)	$C_{y,cv}$	$F_{y,cv}$ (tf)
0°	-0.63	-40.68	-0.30	-19.24	0.01	1.45	0.04	6.92
15°	-0.93	-60.51	-0.38	-24.96	-0.43	-83.33	-0.05	-9.11
30°	-0.97	-62.83	-0.32	-20.48	-0.62	-120.84	0.00	0.13
45°	-0.78	-50.83	-0.16	-10.16	-0.82	-160.60	0.04	7.62
60°	-0.30	-19.70	-0.20	-13.26	-0.95	-184.85	-0.04	-7.14
75°	0.11	7.08	-0.12	-7.67	-1.08	-210.41	0.00	0.10
90°	-0.01	-0.79	-0.14	-9.07	-1.14	-221.97	-0.06	-12.62
105°	-0.17	-11.18	0.10	6.81	-1.10	-213.43	-0.06	-12.23
120°	0.17	11.22	0.53	34.18	-0.98	-191.82	0.10	19.93
135°	0.68	44.48	0.86	55.54	-0.81	-158.50	0.19	36.21
150°	0.92	60.04	0.95	61.92	-0.63	-122.24	0.29	57.28
165°	0.89	57.84	0.96	62.66	-0.41	-79.26	0.32	61.40
180°	0.59	38.17	0.60	38.92	0.05	10.26	0.11	20.61
195°	0.70	45.68	0.59	38.60	0.38	73.85	0.02	4.41
210°	0.73	47.17	0.50	32.55	0.50	98.07	-0.10	-18.99
225°	0.56	36.37	0.28	17.89	0.62	121.20	-0.21	-40.06
240°	0.17	10.73	0.03	2.23	0.68	132.66	-0.13	-24.59
255°	-0.12	-8.01	-0.13	-8.28	0.74	143.56	-0.03	-6.67
270°	-0.01	-0.86	-0.13	-8.66	0.77	150.04	0.00	0.72
285°	0.07	4.48	-0.06	-4.04	0.75	145.46	0.18	35.18
300°	-0.24	-15.53	0.18	11.42	0.68	132.94	0.27	52.30
315°	-0.61	-39.64	0.25	16.28	0.60	117.88	0.22	43.79
330°	-0.75	-48.89	0.12	7.99	0.48	94.44	0.16	30.90
345°	-0.73	-47.59	-0.09	-6.10	0.34	67.16	0.12	22.95

As figuras 70 e 71 a seguir apresentam os fatores de vizinhança em relação aos eixos X e Y respectivamente, calculados para os 24 ângulos de incidência de ventos ensaiados no túnel.

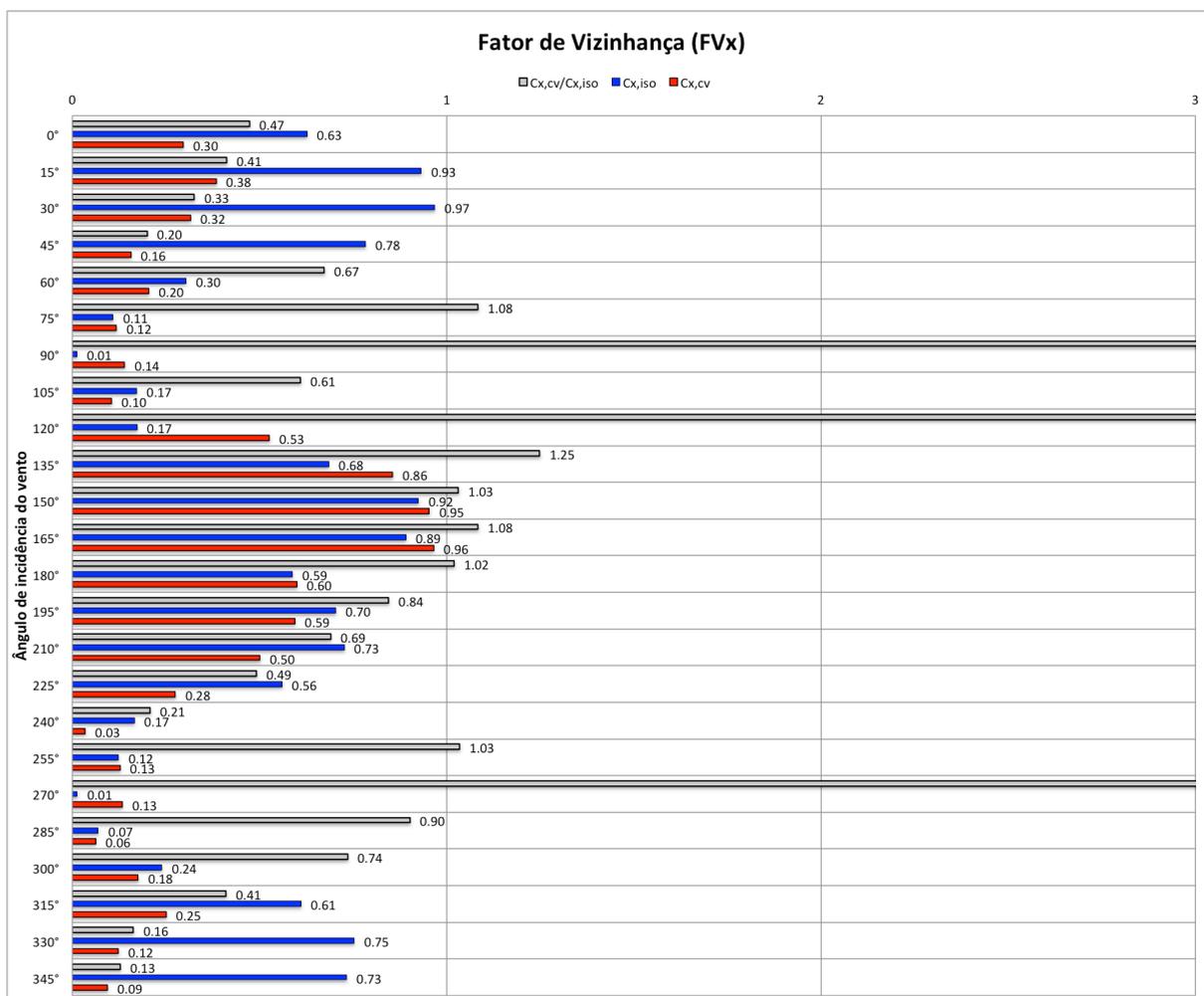


Figura 70: Variação do fator de vizinhança FV_x em função do vento no Edifício D

Pela análise da figura 70, é possível observar que a presença da vizinhança correspondente aos ângulos de vento mais influentes no dimensionamento estrutural em relação ao eixo X, influenciou da seguinte forma os esforços devido a ação estática do vento sobre o edifício projetado:

- Vento à 330° (oblíquo): $FV_X = 0,16$ Redução de 84% das ações do vento;
- Vento à 345° (oblíquo): $FV_X = 0,13$ Redução de 87% das ações do vento;
- Vento à 0° (ortogonal): $FV_X = 0,47$ Redução de 53% das ações do vento;
- Vento à 15° (oblíquo): $FV_X = 0,41$ Redução de 59% das ações do vento;
- Vento à 30° (oblíquo): $FV_X = 0,33$ Redução de 77% das ações do vento;

Pelos resultados dos FV_X obtidos para os ângulos de ventos incidentes de 330° à 30° ao Edifício D, conclui-se que houve uma forte redução dos carregamentos de ventos soprados destas direções quando na presença dos edifícios de interferência.

- Vento à 150° (oblíquo): $FV_X = 1,03$ Majoração de 3% das ações do vento;
- Vento à 165° (oblíquo): $FV_X = 1,08$ Majoração de 8% das ações do vento;
- Vento à 180° (ortogonal): $FV_X = 1,02$ Majoração de 2% das ações do vento;
- Vento à 195° (oblíquo): $FV_X = 0,84$ Redução de 16% das ações do vento;
- Vento à 210° (oblíquo): $FV_X = 0,69$ Redução de 31% das ações do vento;

Pelos resultados dos FV_X obtidos para os ângulos de ventos incidentes de 150° à 180° ao Edifício D, nota-se que houve uma manutenção nos carregamentos de vento dos ensaio isolado em comparação ao ensaio em vizinhança. Nos ventos oriundos dos ângulos à 195° e 210° apresenta-se uma redução gradual dos carregamentos de vento, caracterizando uma proteção do modelo devido a presença da vizinhança.

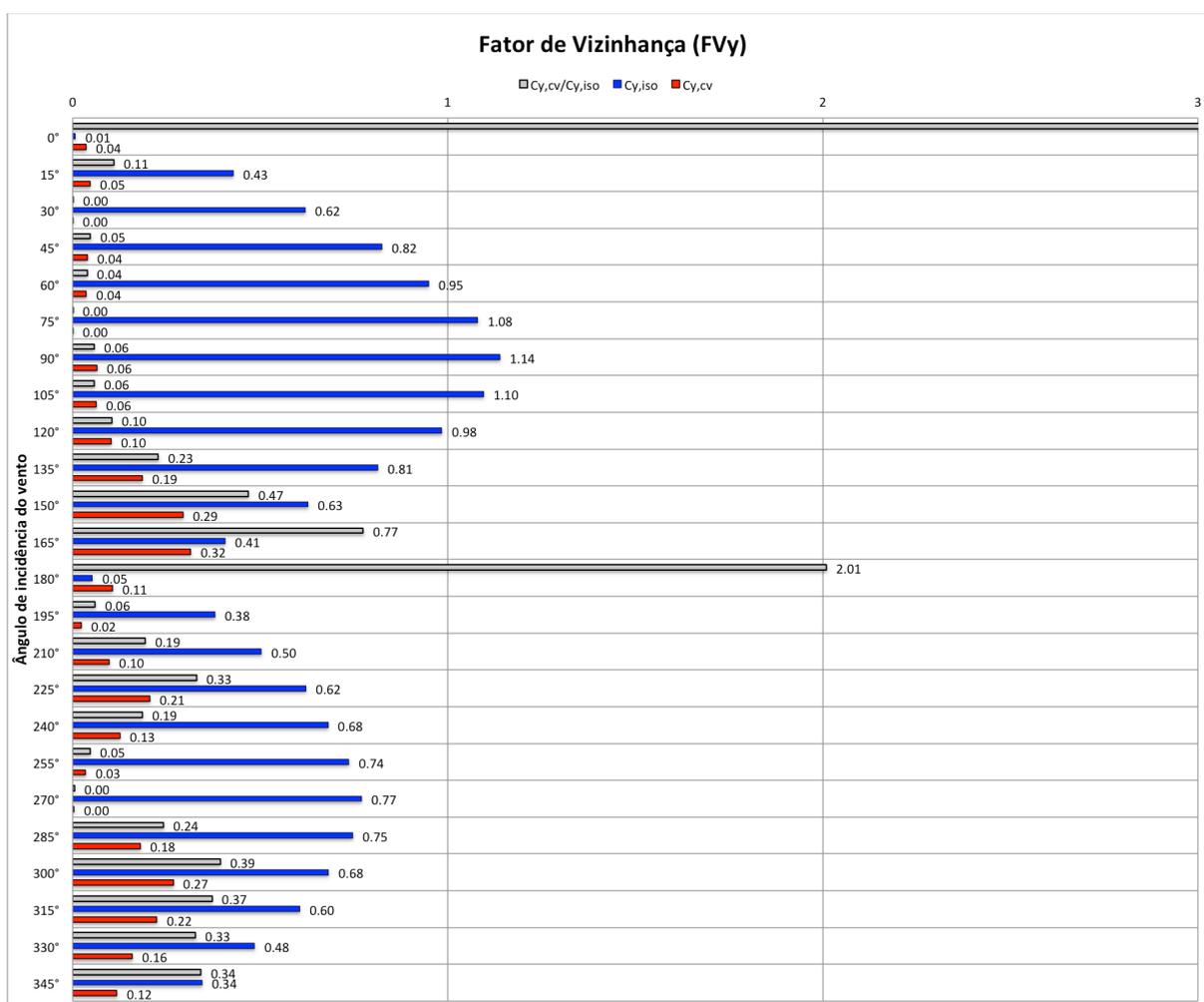


Figura 71: Variação do coeficiente de força FV_y em função do vento no Edifício D

Analisando a figura 71, é possível observar que a presença da vizinhança correspondente aos ângulos de vento mais influentes no dimensionamento estrutural em relação ao eixo Y, influenciou da seguinte forma os esforços devido a ação estática do vento sobre o edifício projetado:

- Vento à 60° (oblíquo): $FV_Y = 0,04$ Redução de 96% das ações do vento;
- Vento à 75° (oblíquo): $FV_Y = 0,00$ Redução de 100% das ações do vento;
- Vento à 90° (ortogonal): $FV_Y = 0,06$ Redução de 94% das ações do vento;
- Vento à 105° (oblíquo): $FV_Y = 0,06$ Redução de 94% das ações do vento;
- Vento à 120° (oblíquo): $FV_Y = 0,10$ Redução de 90% das ações do vento;

Pelos resultados dos FV_Y obtidos para os ângulos de ventos incidentes de 60° à 120° ao Edifício D, conclui-se que o modelo apresentou uma expressiva redução dos carregamentos de ventos oriundos destas direções quando na presença dos edifícios de interferência.

- Vento à 240° (oblíquo): $FV_Y = 0,19$ Redução de 81% das ações do vento;
- Vento à 255° (oblíquo): $FV_Y = 0,05$ Redução de 95% das ações do vento;
- Vento à 270° (ortogonal): $FV_Y = 0,00$ Redução de 100% das ações do vento;
- Vento à 285° (oblíquo): $FV_Y = 0,24$ Redução de 76% das ações do vento;
- Vento à 300° (oblíquo): $FV_Y = 0,39$ Redução de 61% das ações do vento;

Pelos resultados dos FV_Y obtidos para os ângulos de ventos incidentes de 240° à 300° ao Edifício D, conclui-se que da mesma forma que os ângulos de vento apresentados anteriormente, o modelo apresentou uma expressiva diminuição dos carregamentos de ventos para estas direções quando na presença dos edifícios de interferência.

6 COMENTARIOS GERAIS E CONCLUSÕES

Os coeficientes de força calculados a partir dos ensaios isolados apresentaram o comportamento esperado para todas edificações experimentadas no túnel. De um modo geral a distribuição dos C_{iso} apresentaram-se bastante simétricos para as edificações, B, C e D, salvo o Edifício A, que possui forma da seção transversal não simétrica (em formato de “L”).

Em contrapartida os coeficientes de força calculados a partir dos ensaios com vizinhança, são significativamente distintos em relação aos resultados dos ensaios com as edificações isoladas. Em alguns casos houveram grandes diminuições dos carregamentos de vento nos ensaios com as edificações situadas em vizinhança, atingindo casos extremos de proteção ao modelo (maior caso no edifício D, ventos à 75° e 270° , com redução de praticamente 100% do coeficiente de força em relação ao eixo Y, em comparação ao ensaio isolado). Em outros casos, houve aumento dos coeficientes de força em diversas magnitudes, (maior caso no Edifício B, vento a 0° , com majoração de 49% do coeficiente de força em relação ao eixo X, em comparação ao ensaio isolado).

Inversões de esforços foram observadas para casos de ventos em todas edificações estudadas. Foram contabilizados 26 ângulos de incidência de vento que apresentaram inversão no sentido das cargas devidas a ação do vento sob a edificação no ensaio em vizinhança quando comparado ao ensaio isolado. A maior inversão dos carregamentos sobre o modelo ocorreu no Edifício D, caso de vento 120° , de -0,98 (ISO) para 0,10 (CV) em valores de coeficiente de força, em relação ao eixo Y.

O fator de vizinhança (FV) conforme indicado pela NBR-6123 (1988), representa a relação entre as ações devidas ao vento na edificação em vizinhança, em relação a edificação isolada. Valores acima de 1,0 dos FVs, representam o aumento dos carregamentos de vento devido a presença dos edifícios vizinhos, ao passo que valores abaixo de 1 indicam uma redução das ações do vento sobre a estrutura. Atualmente o valor do FV apresentado pela norma, varia de 1,0 à 1,3 com base em uma relação de proximidade da edificação de projeto para com as edificações adjacentes, ou seja, estes valores representam somente fatores de majoração dos carregamentos de vento. No entanto, há casos em que estruturas presentes no entorno do edifício projetado, protegem o mesmo, e dessa forma reduzem as cargas devidas ao vento sobre a edificação em estudo.

O estudo do fator de vizinhança (FV) em termos dos ângulos de ventos mais influentes ao dimensionamento estrutural, em relação aos eixos X e Y das edificações propostas neste trabalho, demonstraram que em diversos casos de incidência de vento, houveram reduções dos carregamentos dos mesmos sobre os modelos. Pela análise dos FVs relacionados no capítulo anterior, nota-se que os modelos cuja a distribuição dos edifícios de vizinhança apresentaram a menor quantidade de aberturas (corredores) para o escoamento do vento e os menores afastamento aos edifícios estudados, resultaram nos menores valores de FVs, conseqüentemente nos maiores índices de proteção dos modelos aos carregamentos de vento.

Com isso, pode-se dizer que o valor de FV é função da proximidade e do tamanho (largura e altura) das edificações vizinhas, e assim determinar dois parâmetros de projeto (ver figura 72) com o objetivo de quantificar a proteção da vizinhança aos carregamentos de vento atuantes na edificação projetada. Esta análise pode ser feita observando a correlação entre os FVs e as características de posicionamento e geometria das estruturas vizinhanças. O primeiro dos parâmetros, que rege a proximidade entre as edificações de vizinhança à de projeto, é o afastamento (S), cujo valor é dado pela distância em planta das faces confrontantes entre as edificações (NBR-6123). O outro parâmetro, é o índice de área exposta (ϕ) (NBR-6123), cujo valor é dado pela relação entre a área frontal efetiva da edificação de projeto, ou seja, a área desprotegida da fachada que recebe vento, pela área frontal da mesma fachada limitada pelo contorno da edificação em estudo (equação 32).

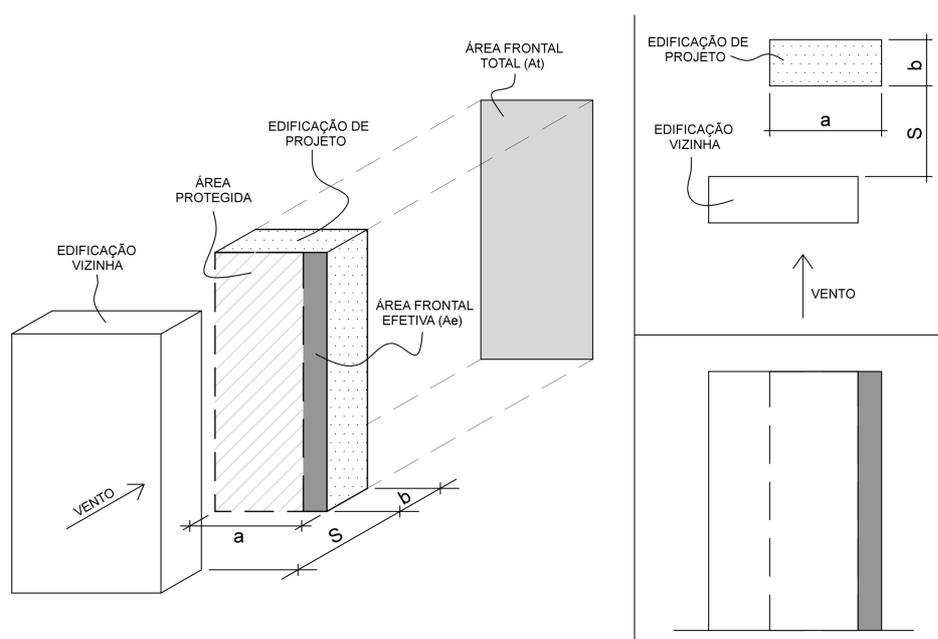


Figura 72: Determinação parâmetros de projeto; afastamento (S) e índice de área exposta (ϕ)

Determinação experimental em túnel de vento dos efeitos estáticos de proteção causados por edificações vizinhas: Contribuição para a revisão dos fatores de vizinhança da NBR-6123.

$$\varphi = \frac{A_e}{A_t} \quad (\text{Equação 32})$$

Onde:

A_e Área frontal efetiva da fachada da edificação de projeto, área desprotegida do vento;

A_t Área frontal total da fachada limitada pelo contorno da edificação de projeto.

Relacionando os casos de FV, obtidos dos ensaios no túnel para as incidências de vento normais às fachadas das edificações (casos similares ao da NBR-6123) que demonstraram reduções dos carregamentos de vento devido a presença da vizinhança, ou seja, FV menor que 1,0, com os dois parâmetros de projeto definidos anteriormente, apresenta-se o gráfico da figura 73, que relaciona o fator de vizinhança (FV) com o índice de área exposta (φ), e o gráfico da figura 74, que relaciona o fator de vizinhança (FV) com a distância em planta entre as faces confrontantes da edificação vizinha à de projeto, afastamento (S).

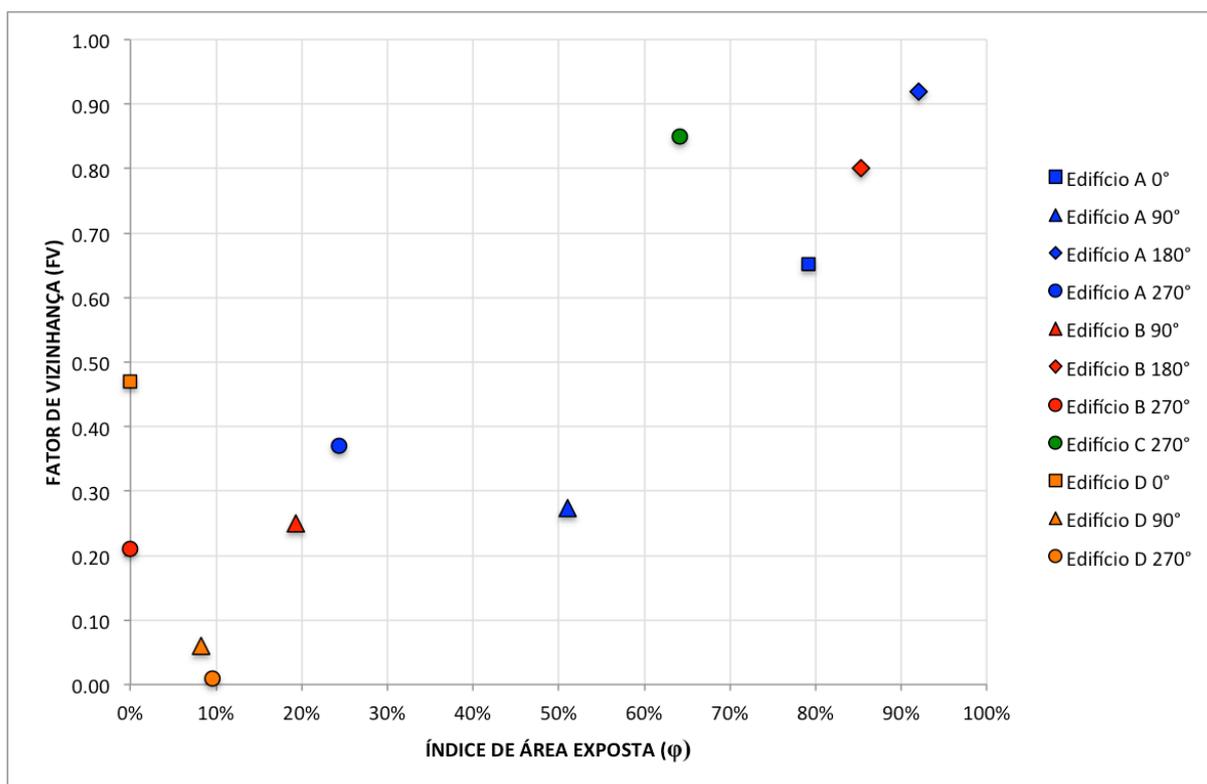


Figura 73: Relação entre o fator de vizinhança e o índice de área exposta, dos edifícios estudados.

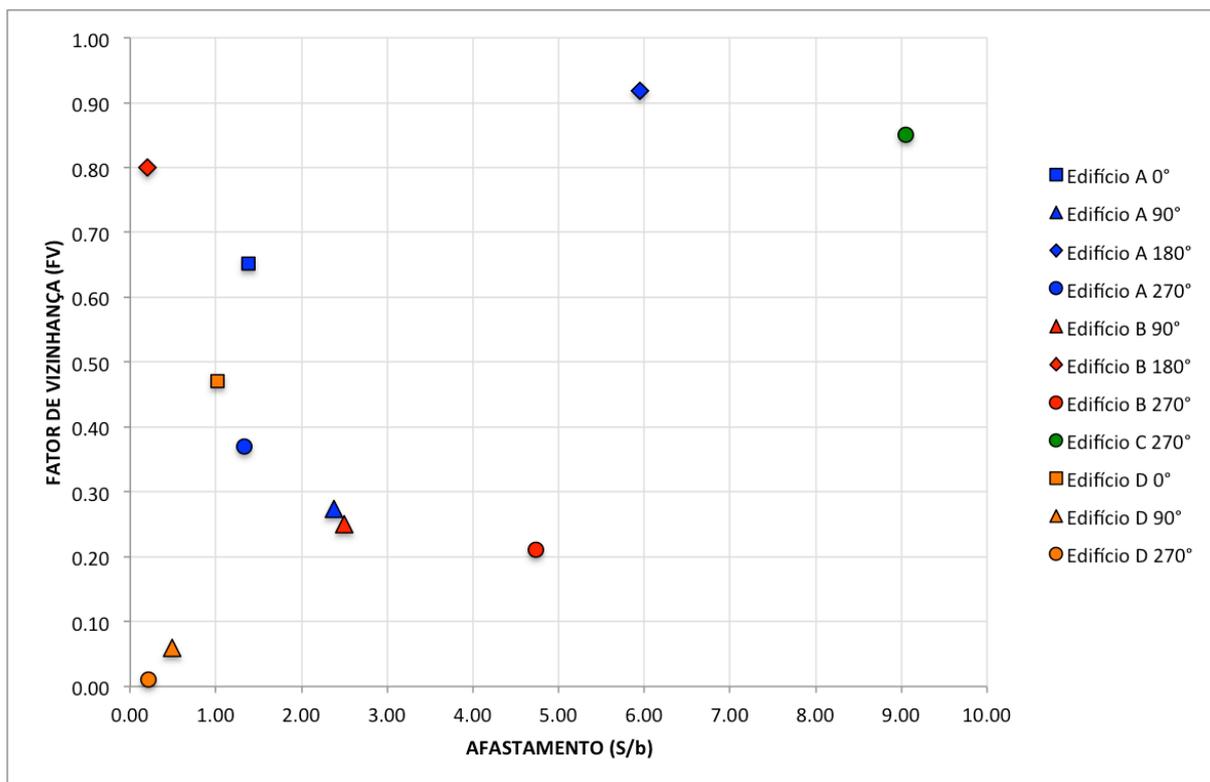


Figura 74: Relação entre o fator de vizinhança e o afastamento, dos edifícios estudados.

Pela análise dos dois gráficos das figuras 73 e 74, conclui-se que o FV é diretamente proporcional a φ e a S (equação 33).

$$FV \propto \varphi; S \quad (\text{Equação 33})$$

Assim, com o intuito de considerar os efeitos de proteção ocorridos na interferência por vizinhança no cálculo dos esforços estáticos devido a ação do vento em edifícios altos e complementar a NBR-6123 (1988) com um fator de vizinhança mais adaptado ao cenário urbano atual, indica-se então, para as direções de vento em que a edificação de projeto encontrar-se protegida por obstáculos de mesma altura e largura, ou maiores, imediatamente próximos à mesma, com índice de área exposta (φ) menor ou igual à 30% para os ângulos de incidência do vento normais às fachadas da edificação projetada (casos de vento similares ao da NBR-6123), respeitando a relação de proximidade entre faces confrontantes das edificações vizinhas à de projeto, com afastamento S/b menor que 2,5 (sendo b, a menor dimensão em planta da edificação de projeto), e para situações de projeto e vizinhança que apresentem características iguais aos modelos estudados neste trabalho, uma redução no limite inferior do valor do FV recomendado pelo código brasileiro, de 1,0 para 0,8.

É importante destacar que, para garantir uma apuração precisa da influência da vizinhança às edificações de projeto, devem ser realizados ensaios em túnel de vento que simulem camada limite atmosférica, ventos sinóticos, e as novas simulações de ventos não sinóticos (atualmente em fase de gestação em alguns laboratórios), assim como a vizinhança no entorno do edifício projetado. Salienta-se também, que os carregamentos devido a ação do vento sobre os modelos estudados neste trabalho, correspondem apenas à parcela estática, e que para obter uma resposta completa frente a ação do vento em uma estrutura real, devem ser levados em consideração os efeitos dinâmicos do vento sobre os mesmos.

Tendo em vista a aleatoriedade das variáveis envolvidas no problema em busca da determinação de um fator de vizinhança adequado, que represente o maior número de situações de projeto, seguem algumas propostas de estudos para dar continuidade ao trabalho desenvolvido:

- Aumentar a quantidade de modelos analisados, com intuito de abranger mais casos de edificações e suas vizinhanças, objetivando a formação de um banco de dados com situações reais de projeto, mais completo;
- Realizar outros estudos com os mesmos modelos apresentados no presente trabalho, porém com ensaios removendo certos edifícios de interferência no entorno da edificação principal, objetivando quantificar a influência da vizinhança nos carregamentos gerados pela ação do vento, na ausência ou inclusão de estruturas adjacentes;
- Analisar a parcela dinâmica devido as ações do vento sobre os modelos estudados no presente trabalho, a fim de contabilizar a influência destas na atualização do fator de vizinhança;
- Desenvolver uma ferramenta computacional conforme proposta de Khanduri et al. (1998), que trabalhe com a aleatoriedade do problema na determinação dos carregamentos de vento em edificações imersas em vizinhança.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, Rio de Janeiro. Norma Brasileira NBR-6123 (NB-599) **Forças devidas ao vento em edificações**. Edição 1988.

BAILEY, P. A.; KOWK, K. C. S. Interference excitation of twin tall buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 21, p. 323-338, 1985.

BÊNIA, M. C. D. **Determinação dos efeitos de vizinhança na resposta dinâmica de edifícios altos sob a ação do vento**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2013.

BLESSMANN, J. **Aerodinâmica das construções**. 3ª.ed. Porto Alegre. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011. 264p.

BLESSMANN, J. **O vento na engenharia estrutural**. 1ª.ed. Porto Alegre. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 166p.

BLESSMANN, J. **Introdução as ações dinâmicas do vento**. 2ª.ed. Porto Alegre. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005. 282p.

BLESSMANN, J. **Ação do vento em edifícios**. 2ª.ed. Porto Alegre. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1989. 81p.

BLESSMANN, J.; RIERA, J. D. Wind excitation of neighbouring tall buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, vol. 18, pp. 91-103. 1985

BLESSMANN, J. Neighbouring wind effect on two tall buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 41, p. 1041-1052, 1992.

BLESSMANN, J. Buffeting effects on neighbouring tall buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 18, p. 105-110, 1985.

CARPEGGIANI, E. A. **Determinação dos efeitos estáticos de torção em edifícios altos devidos à ação do vento**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2004.

COOK, N. J. **The designers guide to wind loading of building structures**. Part 1: background, damage survey, wind data and structural classification. Londres: Butterworths, 1985.

COOK, N. J. **The designers guide to wind loading of bulding structures**. Part 2: static structures. Londres: Butterworth, 1990.

ENGLISH, E. C. Shielding factors from-wind tunnel studies of prismatic structures. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 35, p. 611-619, 1990.

FOX, T. A. Interference in the Wake of two square-section cylinders arranged perpendicular to each other. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 40, p. 75-92, 1992.

HARRIS, C. L. Influence of neighbouring structures on the wind pressure on tall buildings (Research Paper RP637). **Bureau of Standards Journal of Research**, New York/USA, v. 12, p. 103-118, 1934.

HOLMES, J. **Wind loadings structures**. 2^a.ed. New York. Editora Taylor & Francis, 2007. 433p.

HUI, Y.; TAMURA, Y.; YOSHIDA, A. Mutual interference effects between two high-rise building models with different shapes on local peak pressure coefficients. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 104-106, p. 98-108, 2012.

HUI, Y.; TAMURA, Y.; YOSHIDA, A.; KIKUCHI, H. Pressure and flow field investigation of interference effects on external pressures between high-rise buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 115, p. 150-161, 2013a.

HUI, Y.; YOSHIDA, A.; TAMURA, Y. Interference effects between two rectangular-sections high-rise buildings on local peak pressure coefficients. **Journal of Fluids and Structures**, v. 37, p. 120-133, 2013b.

ISYUMOV, N.; FEDIW, A. A.; CALACO, J.; BANAVALKAR, P. V. Performance of a tall building under wind action. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 41-44, p. 1053-1064, 1992.

KHANDURY A. C.; STATHOPOULOS T.; BÉDARD C. Wind-induced interference effects on buildings – a review of the state-of-the-art. **Engineering Structures**, Grã-Bretanha, v. 20, p 617-630, 1998.

KIM, W.; TAMURA, Y.; YOSHIDA, A. Interference effects on local peak pressures between two buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 99, p. 584-600, 2011.

LAM, K. M.; LEUNG, M. Y. H.; ZHAO, J. G. Interference effects on wind loading of a row of closely spaced tall buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 96, p. 562-583, 2008.

LAM, K. M.; ZHAO, J. G.; LEUNG, M. Y. H. Wind-induced loading and dynamic responses of a row of tall buildings under strong interference. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 99, p. 573-583, 2011.

LAROSE, G. L.; WALL, A.; MCAULIFFE, B. R.; KELLY, D.; STONE, G.; YAKYMYK, W. Sectional model investigation at high Reynolds number for a super tall building. . **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 104-106, p.49-55, 2012.

LI, Q. S.; FU, J. Y.; XIAO, Y. Q.; LI, Z. N.; NI, Z. H.; XIE, Z. N.; GU, M. Wind tunnel an full-scale study of wind effects on China's tallest building. **Engineering Structures**, Grã-Bretanha, v. 28, p. 1745-1758, 2006.

LIMA, E. G. **Análise da ocorrência de *downburts* no Brasil e estudo da simulação do fenômeno**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2014.

LOREDO-SOUZA, A. M.; SCHETTINI, E. B. C.; PALUCH, M. J. Simulação da Camada Limite Atmosférica em Túnel de Vento. In: MÖLER, S. V.; SILVESTRINI, J. H. (Org.). **Turbulência**. Porto Alegre: ABCM, 2004, v. 4, p. 137-163.

LOREDO-SOUZA, A. M.; ROCHA, M. M., OLIVIRA, M. G. K., BÊNIA, M. C. D., SIQUEIRA, M. G., CARPEGGIANI, E. A., NÚÑEZ, G. J. Z. Efeitos estáticos do vento sobre um edifício alto de concreto armado em forma de bumerangue. In: XXXV Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, 2012, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro, 2012.

MARA, T. G.; HO, T. C. E.; ISYUMOV, N. Interference and influence of nearby building: A discussion of the design approach. **American Society of Civil Engineering Structure Congress**. 2012.

MARA, T. G.; TERRY, B. K.; HO, T. C. E.; ISYUMOV, N. Aerodynamic and peak response interference factors for an upstream square building of identical height. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 133, p. 200-210. 2014.

ORLANDO, M. Wind-induced interference effects on two adjacent cooling towers. **Engineering Structures**, Grã-Bretanha, v. 23, p. 979-992, 2001.

ROBERTS, S. **Wind Wizzard: Alan G. Davenport and the Art of Wind Engineering**. New Jersey/USA. Princeton University Press, 2013. 278p.

SIMIU, E. **Design of buildings for wind: a guide for ASCE 7-10 standard user and designers of special structures**. 2. ed. New Jersey/USA: John Wiley & Sons, 2011.

SIMIU, E.; SCANLAN, R. H. **Wind effects on structure: an introduction to wind engineering**. 2. ed. New York/USA: John Wiley & Sons, 1986.

SOCKEL, H. **Fundamentals of wind engineering**. CISM Courses and Lectures: wind-excited vibrations, Vienna, v. 335, p. 85-160, 1994.

SUN, T. F.; GU, Z. F. Interference between wind loading on group of structures. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 54-55, p. 213-225, 1995.

SYKES, D. M. Interference effects on the response of a tall building model. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 11, p. 365-380, 1983.

TANIIKE, Y. Turbulence effect on mutual interference of tall buildings. **Journal of Engineering Mechanics**. v. 117, p. 443-465, 1991.

TANIIKE, Y. Interference mechanism for enhance wind forces on neighbouring tall buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 41-44, p. 1073-1083, 1992.

THEPMONGKORN, S.; WOOD, G. S.; KWOK, K. C. S. Interference effects on wind-induced couple motion of a tall building. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 90, p. 1807-1815, 2002.

VANIN, D. D. **Resposta dinâmica de edifícios altos frente à ação do vento: comparação de técnicas experimentais em túnel de vento**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2011.

WISE, A. F. E. Effects due to group of buildings. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, Grã-Bretanha, v. 269, p. 469-485, 1971.

XIE, Z. N.; GU, M. Mean interference effects among tall buildings. **Engineering Structures**, Grã-Bretanha, v. 26, p. 1173-1183, 2004.

ZHANG, H.; MELBOURNE, W. H. Interference between two circular cylinders in tandem in turbulent flow. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 41-44, p. 589-600, 1992.