

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

**ESTUDO EXPERIMENTAL EM TÚNEL DE VENTO DOS
EFEITOS DE INTERFERÊNCIA SOBRE O MODELO
REDUZIDO DO EDIFÍCIO CAARC**

Pedro Henrique Fontes-Silva

Porto Alegre
2021

PEDRO HENRIQUE FONTES-SILVA

**ESTUDO EXPERIMENTAL EM TÚNEL DE VENTO DOS
EFEITOS DE INTERFERÊNCIA SOBRE O MODELO
REDUZIDO DO EDIFÍCIO CAARC**

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
2021

CIP - Catalogação na Publicação

Fontes-Silva, Pedro Henrique
Estudo experimental em túnel de vento dos efeitos
de interferência sobre o modelo reduzido do edifício
CAARC / Pedro Henrique Fontes-Silva. -- 2021.
167 f.
Orientador: Acir Mércio Loredo-Souza.

Coorientador: Marcelo Maia Rocha.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre,
BR-RS, 2021.

1. Aerodinâmica. 2. Efeitos de interferência. 3.
Coeficiente de força e arrasto. 4. Fator de
vizinhança. 5. Estruturas. I. Loredo-Souza, Acir
Mércio, orient. II. Rocha, Marcelo Maia, coorient.
III. Título.

PEDRO HENRIQUE FONTES-SILVA

**ESTUDO EXPERIMENTAL EM TÚNEL DE VENTO DOS
EFEITOS DE INTERFERÊNCIA SOBRE O MODELO
REDUZIDO DO EDIFÍCIO CAARC**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Área de 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, 21 de Dezembro de 2021

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

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

Prof. Lucas Festugato
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Alexandre Luis Braun (UFRGS)
D. Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

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

Prof. Angela Borges Masuero (UFRGS)
D. Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Eng. Mário Gustavo Klaus Oliveira (Vento-S Consultoria)
D. Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ser minha força em todos os momentos.

Agradeço aos meus pais, Maria Lúcia e Elcio, pelo apoio incondicional e por viverem, mesmo à distância, meus sonhos. Agradeço pela presença em mais um ciclo da minha vida.

Agradeço ao meu orientador e amigo, professor Acir Mércio Loredou-Souza, por sua paciência, dedicação à pesquisa e acompanhamento. Pela atenção, diversas conversas, conselhos e explicações. Pela inspiração como profissional e ser humano.

Agradeço a Roges de Mari Leopoldo, Marcelo Zanfelice e Lívio Pires, técnicos do Túnel de Vento Professor Joaquim Blessmann, por toda atenção e suporte.

Agradeço a Matheus Carini pelas valiosas dicas e orientações.

Agradeço a Caroline Molin pela parceria na etapa de pesquisa e ensaios, conselhos, conversas e caronas para o laboratório.

Agradeço aos professores do PPGEC/UFRGS da Área de Estruturas, por todo ensinamento.

Agradeço aos meus colegas do curso de mestrado e da vida, parceiros nessa caminhada, pela amizade e companheirismo.

Deixo registrado, os meus sinceros agradecimentos a todos.

A gente tem que sonhar, senão as coisas não acontecem.

Oscar Niemeyer

RESUMO

FONTES-SILVA, P. H. **Estudo experimental em túnel de vento dos efeitos de interferência sobre o modelo reduzido do edifício CAARC**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre/RS.

A crescente verticalização dos meios urbanos com significativas transformações nas aglomerações urbanas, levou a consideração de carregamentos com influências de forças horizontais, advindas da ação do vento. Diferentes densidades de vizinhança alteram o comportamento do escoamento do vento e refletem em efeitos de interferência que afetam positivamente ou negativamente as edificações, devido à complexidade da sua natureza, composta por variáveis como o tamanho e formato das edificações, suas posições de interferência, tipos de escoamento e direções de incidência do vento. Esta pesquisa consiste na realização de uma caracterização aerodinâmica no modelo reduzido do edifício *CAARC Standard Tall Building*, através de um extenso estudo desenvolvido no túnel de vento do LAC/UFRGS, simulando um perfil com expoente 0,23, realizado com a inserção de distintas densidades de vizinhança a barlavento, através de três configurações de vizinhança, denominadas Configuração I (um modelo interferente), Configuração II (dois modelos) e Configuração III (três modelos), com diferentes posições relativas entre os modelos, D, 2D, 4D e 8D, onde D é a menor dimensão do modelo aerodinâmico, visando compreender a relação de interação entre tais parâmetros na caracterização dos efeitos de interferência da vizinhança. Com base nos resultados, tanto a quantidade de edifícios interferentes quanto o espaçamento influenciam na determinação dos coeficientes. Os coeficientes de força no eixo x são similares em todas as configurações com vizinhança. Já os coeficientes de força no eixo y apresentam diferenças consideráveis conforme a inserção e a variação da quantidade e espaçamento das edificações. Para os fatores de vizinhança (FV), a grande maioria das forças no eixo x foram majoradas (96,2%), em contrapartida no eixo y, a maioria das ações foram reduzidas (65,4%). Os resultados indicam que os valores de FV são dados principalmente em função da proximidade e do tamanho das edificações diretamente no entorno. A adição de outros modelos interferentes não altera significativamente os resultados para os fatores de vizinhança, estando em conformidade com as preconizações do Anexo G da NBR6123:1988.

Palavras-chave: *ação do vento; estruturas; edifícios altos; coeficiente de força e arrasto; efeitos de vizinhança; fator de vizinhança; aerodinâmica.*

ABSTRACT

FONTES-SILVA, P. H. **Experimental wind tunnel study of the interference effects on the CAARC building reduced model.** 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre/RS.

The growing verticalization of urban areas with significant transformations in urban agglomerations, led to the consideration of loads with influences from horizontal forces, arising from the action of the wind. Different neighborhood densities change the behavior of wind flow and reflect in interference effects that positively or negatively affect buildings, due to the complexity of their nature, composed of variables such as the size and shape of buildings, their positions of interference, types of flow and wind incidence directions. This research consists of conducting an aerodynamic characterization of the reduced model of the CAARC Standard Tall Building, through an extensive study developed in the LAC/UFRGS wind tunnel, simulating a profile with 0.23 exponent, performed with the insertion of different windward neighborhood densities, through three neighborhood configurations, called Configuration I (one interfering model), Configuration II (two models) and Configuration III (three models), with different relative positions between models, D, 2D, 4D and 8D, where D is the smallest dimension of the aerodynamic model, aiming to understand the interaction relationship between such parameters in the characterization of neighborhood interference effects. Based on the results, both the amount of interfering buildings and the spacing influence the determination of the coefficients. The force coefficients on the x-axis are similar in all configurations with neighborhood. The force coefficients on the y-axis, on the other hand, show considerable differences according to the insertion and variation in the quantity and spacing of buildings. For neighborhood factors (FV), most forces on the x-axis have been increased (96.2%), on the other hand, in the y-axis, most actions have been reduced (65.4%). The results indicate that the FV values are mainly given as a function of the proximity and size of the buildings directly in the surroundings. The addition of other interfering models, didn't significantly change the results for the neighborhood factors, being in accordance with the recommendations of Annex G of NBR6123:1988.

Key-words: *wind action; structures; tall buildings; force and drag coefficient; neighborhood effects; neighborhood factor; aerodynamics.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Configuração de escoamento de alta turbulência.....	22
Figura 2 – Edifícios altos em Nova York na década de 20	27
Figura 3 – Modelo do <i>Empire State Building</i> e edifícios adjacentes.....	28
Figura 4 – Modelos prismáticos de seção quadrada utilizados nos estudos.....	30
Figura 5 – Edifícios interferentes de vários tamanhos no estudo de Taniike (1991)	31
Figura 6 – Configurações das edificações no estudo de Xie & Gu (2004)	35
Figura 7 – Modelos arquitetônicos com seções transversais distintas.....	36
Figura 8 – Variação dos coeficientes de força em função da incidência do vento.....	36
Figura 9 – Força global F_y [kN] na base da Torre Sul e Norte, respectivamente.....	37
Figura 10 – Modelos instrumentados (a); Modelos mudos (b); Set-1 (c); Set-2 (d).....	38
Figura 11 – Configurações de ensaio dos estudos de Bênia (2013)	39
Figura 12 – Variação do coeficiente de força C_x em função do vento no Edifício B.....	41
Figura 13 – Configurações de ensaio: distâncias D1 a D4 e vizinhanças V1 a V8 (a até h)....	42
Figura 14 – Modelos dos edifícios altos e tomadas de pressão do estudo de Melo (2020).....	43
Figura 15 – Perfil de velocidades médias do vento	46
Figura 16 – Perfil de velocidade média sobre terrenos com diferentes rugosidades.....	49
Figura 17 – Corpos aerodinâmicos e não aerodinâmicos em escoamento	52
Figura 18 – Efeito de proteção	55
Figura 19 – Efeito Venturi.....	57
Figura 20 – Deflexão do vento na direção vertical.....	58
Figura 21 – Turbulência da esteira	59
Figura 22 – Regime de escoamento de corpo isolado	59
Figura 23 – Regime de escoamento deslizante.....	60
Figura 24 – Regime de escoamento de interferência de esteira	60
Figura 25 – Gráfico das isopletas da velocidade básica no Brasil.....	62
Figura 26 – Forças aerodinâmicas	68
Figura 27 – Coeficiente de arrasto (c_a) para edificações paralelepípedicas em vento de baixa turbulência	70
Figura 28 – Coeficiente de arrasto (c_a) para edificações paralelepípedicas em vento de alta turbulência	70
Figura 29 – Configurações do Edifício E01 (A)	76
Figura 30 – Resultados do Edifício E01 (A)	77

Figura 31 – Exemplos da classificação dos edifícios em densidade alta ou baixa.....	78
Figura 32 – Resultados dos coeficientes de força do Acervo do LAC.....	81
Figura 33 – Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann.....	83
Figura 34 – Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann.....	84
Figura 35 – Dispositivos de geração das diferentes camadas limites do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann. (a) grelha; (b) $p = 0,11$; (c) $p = 0,23$; (d) $p = 0,34$	88
Figura 36 – Seção transversal do <i>CAARC Standard Tall Building</i>	91
Figura 37 – Fachadas do <i>CAARC Standard Tall Building</i>	91
Figura 38 – Dimensões do modelo reduzido do <i>CAARC</i>	92
Figura 39 – Referência dos ângulos de incidência do vento na configuração isolada	93
Figura 40 – Referência geral dos ensaios e ângulo de incidência	94
Figura 41 – Representação da Configuração I e dimensões de referência	95
Figura 42 – Perspectivas dos ensaios e ângulos de incidência do vento na Configuração I... ..	96
Figura 43 – Representação da Configuração II e dimensões de referência.....	97
Figura 44 – Perspectivas dos ensaios e ângulos de incidência do vento na Configuração II... ..	97
Figura 45 – Representação da Configuração III e dimensões de referência	98
Figura 46 – Perspectivas dos ensaios e ângulos de incidência do vento na Configuração III.. ..	99
Figura 47 – Modelo reduzido do <i>CAARC</i> no interior do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann.....	100
Figura 48 – Fluxograma dos ensaios	101
Figura 49 – Representação de uma configuração de ensaio inserida no túnel de vento.....	101
Figura 50 – Dispositivos no interior do túnel para simulação do perfil com expoente $p = 0,23$	102
Figura 51 – Coeficientes de força (C_x e C_y) na Configuração Isolado.....	107
Figura 52 – Modelos posicionados no interior do túnel de vento (Configuração I).....	107
Figura 53 – Coeficientes de força (C_x e C_y) na Configuração I.....	108
Figura 54 – Coeficientes de força ($C_{x,iso}$ e $C_{x,cv}$, $C_{y,iso}$ e $C_{y,cv}$) na Configuração Ia	109
Figura 55 – Fator de vizinhança (FV_x e FV_y) na Configuração Ia.....	111
Figura 56 – Fator de vizinhança (FV) na Configuração Ia.....	113
Figura 57 – Coeficientes de força ($C_{x,iso}$ e $C_{x,cv}$, $C_{y,iso}$ e $C_{y,cv}$) na Configuração Ib	113
Figura 58 – Fator de vizinhança (FV_x e FV_y) na Configuração Ib.....	115
Figura 59 – Fator de vizinhança (FV) na Configuração Ib.....	117
Figura 60 – Modelos posicionados no interior do túnel de vento (Configuração II)	118
Figura 61 – Coeficientes de força (C_x e C_y) na Configuração II.....	119

Figura 62 – Coeficientes de força ($C_{x,iso}$ e $C_{x,cv}$, $C_{y,iso}$ e $C_{y,cv}$) na Configuração IIa	120
Figura 63 – Fator de vizinhança (FV_x e FV_y) na Configuração IIa.....	121
Figura 64 – Fator de vizinhança (FV) na Configuração IIa	123
Figura 65 – Coeficientes de força ($C_{x,iso}$ e $C_{x,cv}$, $C_{y,iso}$ e $C_{y,cv}$) na Configuração IIb.....	124
Figura 66 – Fator de vizinhança (FV_x e FV_y) na Configuração IIb	125
Figura 67 – Fator de vizinhança (FV) na Configuração IIb	127
Figura 68 – Modelos posicionados no interior do túnel de vento (Configuração III).....	128
Figura 69 – Coeficientes de força (C_x e C_y) na Configuração III	129
Figura 70 – Coeficientes de força ($C_{x,iso}$ e $C_{x,cv}$, $C_{y,iso}$ e $C_{y,cv}$) na Configuração IIIa....	130
Figura 71 – Fator de vizinhança (FV_x e FV_y) na Configuração IIIa	132
Figura 72 – Fator de vizinhança (FV) na Configuração IIIa	134
Figura 73 – Coeficientes de força ($C_{x,iso}$ e $C_{x,cv}$, $C_{y,iso}$ e $C_{y,cv}$) na Configuração IIIb ...	134
Figura 74 – Fator de vizinhança (FV_x e FV_y) na Configuração IIIb.....	136
Figura 75 – Fator de vizinhança (FV) na Configuração IIIb.....	138
Figura 76 – Coeficiente de arrasto (C_a) em todas as configurações	141
Figura 77 – Coeficiente de força (C_x) em todas as configurações.....	141
Figura 78 – Coeficiente de força (C_y) em todas as configurações.....	141
Figura 79 – Resultados (FV_x e FV_y) em porcentagem conforme as configurações.....	143
Figura 80 – Resultados (FV) em porcentagem conforme as configurações.....	144
Figura 81 – Resultado fator de vizinhança (FV)	145

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Configuração de ensaio e valores máximos do coeficiente de força horizontal.....	30
Tabela 2 – Categorias das rugosidades dos terrenos	64
Tabela 3 – Classes de edificações	64
Tabela 4 – Determinação do Fator S_2	65
Tabela 5 – Determinação do Fator S_3	66
Tabela 6 – Parâmetros para determinação do FV.....	72
Tabela 7 – Valores representativos de FV.....	73
Tabela 8 – Principais características dos edifícios do acervo do LAC.....	75
Tabela 9 – Resultados $C_{x,cv}$ (Acervo do LAC), classificados conforme densidade	79
Tabela 10 – Resultados $C_{y,cv}$ (Acervo do LAC), classificados conforme densidade	79
Tabela 11 – Mesas do Túnel de Vento Prof ^o . Joaquim Blessmann.....	84
Tabela 12 – Tipo de simulação e obstáculo empregado.....	87
Tabela 13 – Principais características do modelo reduzido do CAARC.....	92
Tabela 14 – Características e informações necessárias	102
Tabela 15 – Resultados do C_a (Configuração I)	109
Tabela 16 – Coeficientes de força (C_x e C_y) e fator de vizinhança (FV_x e FV_y) na Configuração Ia	110
Tabela 17 – Resultados (FV_x e FV_y) na Configuração Ia	111
Tabela 18 – Resultados (FV_x e FV_y) em porcentagem na Configuração Ia.....	112
Tabela 19 – Resultados (FV) na Configuração Ia	113
Tabela 20 – Resultados (FV) em porcentagem na Configuração Ia.....	113
Tabela 21 – Coeficientes de força (C_x e C_y) e fator de vizinhança (FV_x e FV_y) na Configuração Ib.....	114
Tabela 22 – Resultados (FV_x e FV_y) na Configuração Ib	115
Tabela 23 – Resultados (FV_x e FV_y) em porcentagem na Configuração Ib.....	116
Tabela 24 – Resultados (FV) na Configuração Ib	117
Tabela 25 – Resultados (FV) em porcentagem na Configuração Ib.....	117
Tabela 26 – Resultados do C_a (Configuração II)	120
Tabela 27 – Coeficientes de força (C_x e C_y) e fator de vizinhança (FV_x e FV_y) na Configuração IIa.....	121
Tabela 28 – Resultados (FV_x e FV_y) na Configuração IIa	122
Tabela 29 – Resultados (FV_x e FV_y) em porcentagem na Configuração IIa.....	122

Tabela 30 – Resultados (FV) na Configuração IIa	123
Tabela 31 – Resultados (FV) em porcentagem na Configuração IIa	123
Tabela 32 – Coeficientes de força (Cx e Cy) e fator de vizinhança (FVx e FVy) na Configuração IIb.....	125
Tabela 33 – Resultados (FVx e FVy) na Configuração IIb.....	126
Tabela 34 – Resultados (FVx e FVy) em porcentagem na Configuração IIb	126
Tabela 35 – Resultados (FV) na Configuração IIb.....	127
Tabela 36 – Resultados (FV) em porcentagem na Configuração IIb	128
Tabela 37 – Resultados do Ca (Configuração III).....	130
Tabela 38 – Coeficientes de força (Cx e Cy) e fator de vizinhança (FVx e FVy) na Configuração IIIa.....	131
Tabela 39 – Resultados (FVx e FVy) na Configuração IIIa.....	132
Tabela 40 – Resultados (FVx e FVy) em porcentagem na Configuração IIIa	133
Tabela 41 – Resultados (FV) na Configuração IIIa.....	134
Tabela 42 – Resultados (FV) em porcentagem na Configuração IIIa	134
Tabela 43 – Coeficientes de força (Cx e Cy) e fator de vizinhança (FVx e FVy) na Configuração IIIb	135
Tabela 44 – Resultados (FVx e FVy) na Configuração IIIb.....	136
Tabela 45 – Resultados (FVx e FVy) em porcentagem na Configuração IIIb	137
Tabela 46 – Resultados (FV) na Configuração IIIb	138
Tabela 47 – Resultados (FV) em porcentagem na Configuração IIIb.....	138
Tabela 48 – Resultado dos coeficientes de arrasto (Ca), configurações I, II e III.....	139
Tabela 49 – Resultados totais (FVx e FVy) em porcentagem.....	143
Tabela 50 – Resultados totais (FV) em porcentagem.....	144
Tabela 51 – Resultado fator de vizinhança (FV).....	145

LISTA DE SIGLAS

BD3GDL – Balança dinâmica de três graus de liberdade

CAARC – *Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council*

CLA – Camada limite atmosférica

EPS – *Extended mature pressure systems* ou *extratropical pressure systems*

FV – Fator de efeito de vizinhança

LAC – Laboratório de Aerodinâmica das Construções

M-I, M-II, M-III e M-IV – Mesas de ensaio do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann

NBR6123:1988 – Norma Brasileira de Forças Devidas ao Vento em Edificações

RMS – Root mean square (valor quadrático médio)

RS – Rio Grande do Sul

TS – Trovoadas ou tormentas (*thunderstorms*)

TV-2 – Túnel de Vento da UFRGS

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

- A – Área de referência (m^2)
- A_e – Área frontal efetiva: área da projeção ortogonal da edificação, estrutura ou elemento estrutural sobre um plano perpendicular à direção do vento (“área de sombra”) (m^2)
- A_x e A_y – Áreas projetadas de referência (m^2)
- a – Maior dimensão em planta da seção transversal (m)
- $a \times b$ – Dimensões em planta das edificações (m)
- b – Menor dimensão em planta da seção transversal (m)
- B_x e B_y – Dimensões nominais da seção transversal da edificação (m)
- C – Coeficiente de forma (adm)
- C_a – Coeficiente de arrasto (adm)
- C_e – Coeficiente de forma externa (adm)
- C_f – Coeficiente de força (adm)
- C_x – Coeficientes de força global em relação ao eixo x (adm)
- $C_{x,cv}$ – Coeficiente de força da edificação com vizinhança em relação ao eixo x (adm)
- $C_{x,iso}$ – Coeficiente de força da edificação isolada em relação ao eixo x (adm)
- C_y – Coeficientes de força global em relação ao eixo y (adm)
- $C_{y,cv}$ – Coeficiente de força da edificação com vizinhança em relação ao eixo y (adm)
- $C_{y,iso}$ – Coeficiente de força da edificação isolada em relação ao eixo y (adm)
- \hat{c}_p – Coeficiente de pressão máximo (adm)
- \bar{c}_p – Coeficiente de pressão média (adm)
- \check{c}_p – Coeficiente de pressão mínimo (adm)
- \tilde{c}_p – Coeficiente de pressão rms (adm)
- $c_{p,cv}$ – Coeficiente de pressão nos modelos com vizinhança (adm)
- $c_{p,ISO}$ – Coeficiente de pressão nos modelos isolados (adm)
- $C_{pe\ médio}$ – Valor médio do coeficiente de pressão (adm)
- C_t – Coeficiente de torção (adm)
- d^* – Menor das duas dimensões (m)
- d – Dimensão característica (área da face do edifício)
- D – Dimensão do menor lado da seção transversal do CAARC (mm)
- D_{\min} – Distâncias mínimas (m)

FV – Fator de efeito de vizinhança (adm)

F_R – Fator de rajada (adm)

F – Força global (N)

F_g – Força global (N)

F_s – Componente vertical, força de sustentação (N)

F_h – Componente horizontal (N)

F_a – Força de arrasto (N)

F_l – Força lateral (N)

F_x – Força global em relação ao eixo x (N)

F_y – Força global em relação ao eixo y (N)

F – Resultante das pressões externas sobre a superfície plana (uma força perpendicular a esta superfície) (N)

H – Altura de referência (m)

h – Altura (m)

$h_{média}$ – Média das alturas (m)

IF – Fator de interferência de vizinhança (adm)

k – Constante de Von Kármán ($k \cong 0,4$)

k_o – Fator de calibração do túnel de vento (adm)

p – Expoente que representa a classe de rugosidade superficial do terreno (adm)

P_{atm} – Pressão atmosférica (mmHg)

$p(t)$ – Pressão instantânea, na superfície da edificação, medida em relação à pressão estática de referência (N/m^2)

\bar{p} – Valor médio de $p(t)$ para o período de amostragem T (N/m^2)

p_{max} – Valor máximo de $p(t)$ para o período de amostragem T (N/m^2)

p_{min} – Valor mínimo de $p(t)$ para o período de amostragem T (N/m^2)

q – Pressão dinâmica de referência, no topo da edificação (N/m^2)

q – Pressão dinâmica ao longe (mmH_2O)

q_k – Pressão dinâmica de projeto (N/m^2)

Re – Número de Reynolds (adm)

s – Afastamento entre os planos das faces confrontantes de duas edificações altas vizinhas

S/b – Afastamento (adm)

S_1 – Fator topográfico (adm)

S_2 – Fator rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno (adm)

S_3 – Fator estatístico (adm)

T – Intervalo de tempo de amostragem (s)

T – Período de medição

T – Temperatura (K)

t – Tempo (s)

u_* – Velocidade de corte (m/s)

ν – viscosidade cinemática do fluido (m²/s)

\bar{V} – Velocidade média do vento na altura de referência (m/s)

$\bar{V}(z_{ref})$ – Velocidade média do vento em uma altura de referência (m/s)

$\bar{V}(z)$ – Velocidade média na altura de interesse, velocidade média da partícula (m/s)

V_0 – Velocidade básica do vento (m/s)

V_k – Velocidade característica do vento (m/s)

$\underline{V}(\underline{x}, t)$ – Vetor velocidade instantânea em uma posição no espaço \underline{x} e instante t

$\bar{\underline{V}}(\underline{x})$ – Vetor velocidade média

$\underline{v}(\underline{x}, t)$ – Vetor flutuação de velocidade

X e Y – Eixos ortogonais

z – Altura acima do nível do terreno, altura da partícula de ar (m)

z_d – Altura da subcamada sobre a superfície, deslocamento de plano-zero (m)

z_g – Altura gradiente (m)

z_o – Altura da rugosidade local do terreno, rugosidade aerodinâmica (m)

z_{ref} – Altura de referência (m)

α – Ângulo de incidência do vento ensaiado no túnel de vento (graus)

ϕ – Índice de área exposta (adm)

ρ – Massa específica do ar (kg/m³)

Δp_a – Diferença de pressão estática (Pa)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
2	DIRETRIZES DA PESQUISA	25
2.1	OBJETIVOS	25
2.2	JUSTIFICATIVA	26
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
4	CONCEITOS FUNDAMENTAIS	44
4.1	CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA	45
4.2	VELOCIDADE MÉDIA DO VENTO	47
4.3	LEI POTENCIAL	48
4.4	LEI LOGARÍTMICA	49
4.5	INTERAÇÃO VENTO-ESTRUTURA	50
4.5.1	Número de Reynolds	50
4.5.2	Desprendimento de vórtices	51
4.5.3	Turbulência	53
4.5.4	Esteira	54
4.6	EFEITOS DE VIZINHANÇA	56
4.6.1	Efeito Venturi	57
4.6.2	Deflexão do vento na direção vertical	58
4.6.3	Turbulência da esteira	58
4.6.3.1	Regimes de escoamento	59
4.7	MÉTODO ATRAVÉS DA NBR6123:1988	61
4.7.1	Velocidade básica do vento	61
4.7.2	Forças devidas ao vento	67
4.7.3	Fator de vizinhança	71
5	ACERVO DO LAC	74

6 PROGRAMA EXPERIMENTAL	82
6.1 TÚNEL DE VENTO PROFº. JOAQUIM BLESSMANN.....	82
6.2 AQUISIÇÃO DE DADOS (MÉTODO DE MEDIDAS DE PRESSÕES).....	89
6.3 APRESENTAÇÃO DO MODELO AERODINÂMICO	90
6.4 CONFIGURAÇÕES DE VIZINHANÇA	93
6.4.1 Configuração I	95
6.4.2 Configuração II	96
6.4.3 Configuração III	98
6.5 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS.....	99
6.6 CÁLCULO DOS COEFICIENTES	103
7 ANÁLISE DOS RESULTADOS	106
7.1 CONFIGURAÇÃO I.....	107
7.2 CONFIGURAÇÃO II.....	118
7.3 CONFIGURAÇÃO III	128
8 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	139
REFERÊNCIAS	147
ANEXOS	151

1 INTRODUÇÃO

A construção civil em sua grande área de abrangência está sempre em evolução e em busca de soluções nos mais diversos campos, através de uma constante otimização e aprimoramento das técnicas de construção e estabelecimento de novos métodos. A crescente verticalização dos meios urbanos com a demanda cada vez maior por edifícios altos, em conjunto com as exigências do mercado por obras mais racionais, repletas de conforto e segurança, e somadas à economia de materiais, são desafios para os profissionais envolvidos e que necessitam da aquisição de conhecimentos específicos para a elaboração dos projetos.

Uma reflexão com relação ao crescimento da população e em consequência da urbanização, demonstra as significativas transformações nas aglomerações urbanas em grandes cidades, através da verticalização das edificações e densificação dessas áreas construídas, exigindo novos conceitos e uma revisão nas metodologias de cálculo estrutural. Nesse contexto, tem-se a utilização de novas técnicas construtivas no desenvolvimento de edificações mais altas, esbeltas e flexíveis, materiais mais resistentes e a consideração de carregamentos com influências de forças horizontais, advindas da ação do vento sobre edificações (GRALA, 2016).

A tendência e o aumento da construção de edifícios altos que são tradicionalmente projetados de forma retangular simétrica, triangulares ou circulares, tem se libertado do design de formas simétricas convencionais e formas não convencionais estão sendo adotadas. O desenvolvimento de técnicas analíticas e de controle da ação do vento contribuíram para essa tendência, devido a essas formas seccionais bastante complicadas poderem reduzir as cargas de vento, questão importante no projeto de edifícios altos. A eficácia da modificação aerodinâmica para reduzir as cargas de vento tem sido amplamente relatada, sendo consideradas eficazes aquelas que incluem novos formatos seccionais (horizontalmente), diferentes formas do edifício (verticalmente), bem como a introdução de aberturas (TANAKA *et al.*, 2012).

Entre essas solicitações atuantes nas diversas edificações, tem-se a importância da ação do vento como um carregamento horizontal. O vento é considerado um fenômeno meteorológico formado pelo movimento do ar na atmosfera, é gerado através da influência de vários fatores e fenômenos naturais. O escoamento do vento na superfície terrestre é diretamente afetado pelo atrito causado pela interação do movimento de ar com a rugosidade natural e artificial da superfície, que assim como os processos de convecção causados pelas variações térmicas na

atmosfera, causam turbulência, uma agitação mecânica no escoamento do vento, caracterizada em baixa e alta turbulência (BLESSMANN, 1995).

Grandes acontecimentos advindos da ação do vento despertaram o crescente interesse nessa solicitação direta nas edificações, resultando em vários estudos relacionados ao tema no decorrer dos anos. A determinação dessas solicitações é uma etapa fundamental no correto dimensionamento das estruturas e vem despertando interesse de muitos pesquisadores, vista a ampliação da demanda por edifícios mais arrojados e esbeltos, apresentando efeitos estáticos e dinâmicos não previstos adequadamente em recomendações normativas e códigos.

A NBR6123:1988 – Forças devidas ao vento em edificações, é a norma brasileira que fixa as condições exigíveis na consideração das forças devidas a ação estática e dinâmica do vento em diversas estruturas, visando os variados efeitos possíveis para o cálculo de edificações. A norma apresenta uma série de definições e procedimentos para a consideração e análise da atuação do vento em algumas formas de estruturas, atendendo a certas situações e incidências do escoamento. Suas preconizações não se aplicam adequadamente a edificações de formas, dimensões ou localizações não habituais. Nesses casos, devem ser realizados estudos especiais com a utilização de ensaios experimentais em túneis de vento.

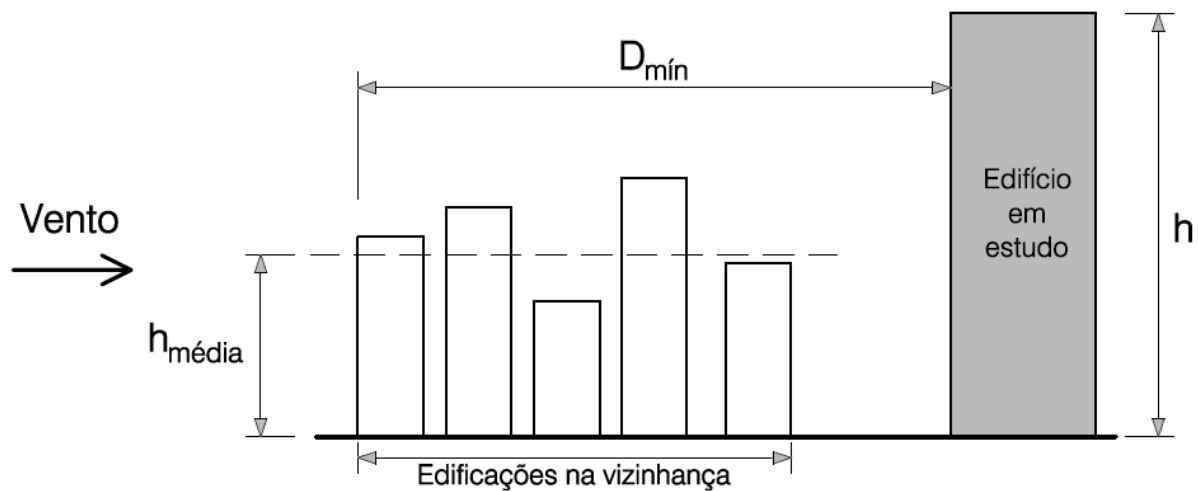
O procedimento para o cálculo das forças devidas ao vento através da NBR6123:1988, em edificações, estruturas ou componentes, considera que devem ser calculadas em separado as forças para elementos de vedação e suas fixações, partes da edificação, como telhados e paredes, e para a edificação como um todo. Nesse método, a força exercida pelo vento está vinculada a uma pressão dinâmica, a uma área de referência e a um coeficiente aerodinâmico de força ou de pressão, sendo os coeficientes disponibilizados na norma denominados coeficientes de arrasto. Tais coeficientes são determinados para escoamentos de baixa ou alta turbulência, ficando a cargo do calculista a utilização do coeficiente correto conforme as características da edificação e seu entorno.

De acordo com a NBR6123:1988, a maioria das edificações se enquadram em vento de baixa turbulência, sendo que para uma edificação ser considerada em vento de alta turbulência deve-se atender as prescrições do item 6.5.3 da norma, que estabelece uma relação da altura (h) da edificação em estudo com a média das alturas ($h_{média}$) das edificações presentes na vizinhança e que se estendem, na direção e sentido do vento incidente, em determinadas distâncias mínimas (D_{min}) dessa edificação, conforme representado na Figura 1.

“6.5.3 Uma edificação pode ser considerada em vento de alta turbulência quando sua altura não excede duas vezes a altura média das edificações nas vizinhanças, estendendo-se estas, na direção e no sentido do vento incidente, a uma distância mínima de:

- 500 m, para uma edificação de até 40 m de altura;
- 1000 m, para uma edificação de até 55 m de altura;
- 2000 m, para uma edificação de até 70m de altura;
- 3000 m, para uma edificação de até 80 m de altura.”

Figura 1 – Configuração de escoamento de alta turbulência



Fonte: elaborado pelo autor

No entanto, essas informações presentes no tópico 6.5 – Reduções nos coeficientes de forma e de arrasto, item 6.5.3 da NBR6123:1988, não se referem à densidade dessa vizinhança e das edificações situadas a barlavento da edificação em estudo. Considerando ainda, essas extensas distâncias indicadas nesse item para o enquadramento em um escoamento de alta turbulência, visto que diferentes densidades de vizinhança podem interferir diretamente na organização dos vórtices desprendidos das edificações. A determinação do coeficiente correto para os cálculos é um ponto importante, sendo motivo de dúvida e discussão entre os projetistas, considerando-se a diferença entre os valores dos coeficientes de arrasto para escoamentos do vento em baixa ou alta turbulência.

Devido à importância desse coeficiente na determinação das forças devidas ao vento através da norma, tem-se a relevância de uma análise da relação entre diferentes densidades de vizinhança interferindo na determinação desses parâmetros. Nesse sentido, buscando-se iniciar um estudo visando estabelecer critérios mais abrangentes que incluam outros parâmetros para a determinação desses coeficientes através da norma, realizou-se uma revisão em diversos

ensaios presentes no acervo do Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC/UFRGS), conforme Capítulo 5, compreendendo diferentes edificações e configurações de vizinhança.

Na análise da ação do vento considerando a presença de edificações na vizinhança com edifícios agrupados em grande proximidade, cada componente presente nesse espaço pode afetar o campo aerodinâmico dos outros, influenciando os carregamentos devidos ao vento. Tais alterações na ação do vento, causadas pela presença de edificações vizinhas, podem tanto proteger a edificação quanto gerar uma ação desfavorável, devido à grande quantidade de variáveis que envolvem o processo, como o tamanho, posicionamento e formato das edificações, direções de incidência do vento e fatores topográficos (KHANDURI *et al.*, 1998).

Devido à importância desses efeitos de interferência causados pelas edificações vizinhas, na NBR6123:1988 consta o Anexo G – Efeitos de vizinhança, que trata especificamente dessas interações através do cálculo do fator de vizinhança, que é um parâmetro fundamental para definição, via procedimentos normativos, da força que o vento irá exercer sobre uma edificação considerando tais obstáculos que o vento deve transpor até atingir a estrutura estudada. O fator de vizinhança indicado pela norma é resultado de um extenso e sistemático estudo de interação entre uma ou duas edificações prismáticas em diversas posições relativas de afastamento. No entanto, diferentes estudos indicam uma alteração nesses fatores quando realizada a inserção de outras edificações interferentes. Nesse sentido, tem-se novamente a relevância de uma análise da relação entre diferentes densidades de vizinhança e espaçamentos, influenciando nos efeitos de interferência da vizinhança e na determinação dos fatores de vizinhança.

Diversos estudos foram realizados em outros países considerando as modificações na carga de vento através dos efeitos de interferência, causados pela presença de edificações vizinhas. No entanto, devido ao fato de que existem milhares de situações de vizinhança totalmente distintas, ainda são necessários novos trabalhos e diretrizes que abranjam um maior número de situações. Essas necessidades são explicadas por razões como a natureza complexa desses problemas, mesmo para uma única edificação interferente, pela escassez de dados experimentais adequados às diversas situações, e ainda, a noção amplamente aceita de que as cargas de vento em uma edificação devem ser geralmente menos severas se cercadas por outras estruturas do que quando isoladas, embora observados efeitos bastante adversos (CHO *et al.*, 2004).

A determinação das forças aerodinâmicas em edifícios altos considerando todos os parâmetros e variáveis que influenciam nesse carregamento, pode ser complexa de se solucionar através de

métodos normativos, principalmente para edificações não convencionais, assim, devendo-se adotar métodos experimentais, via ensaios em túneis de vento. A importância do estudo da ação do vento através de métodos experimentais se estabeleceu com a observação dos efeitos, às vezes desastrosos, da ação do vento em edifícios altos. Esses estudos eram inicialmente conduzidos em túneis de vento aeronáuticos, onde se constatou que as simulações conduziam a resultados discrepantes da realidade. Assim, com o avanço da aerodinâmica e a contribuição de diversos pesquisadores, foram desenvolvidos túneis e técnicas que simulavam a camada limite atmosférica, tornando os resultados dos modelos reduzidos adequados e em concordância com as edificações reais (BLESSMANN, 2011).

Na área de ensaios e análises da atuação do vento em estruturas, o Brasil conta com um conceituado laboratório especializado em simulações através de modelos em escala reduzida de edificações, localizado na cidade de Porto Alegre/RS, especificamente na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), onde os ensaios são realizados no Túnel de Vento Prof^o. Joaquim Blessmann no Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC). Desde simples edificações até grandes arranha-céus, existem diversas estruturas que estão diretamente em contato com a ação do vento e foram ensaiadas no laboratório, como pontes, viadutos, silos industriais, estádios de futebol, entre outras. Evidenciando os benefícios da utilização do túnel como ferramenta de projeto, viabilizando a construção de edificações altas, esbeltas e com arrojados projetos arquitetônicos (LOREDO-SOUZA *et al.*, 2012).

Portanto, esta pesquisa consiste na realização de uma caracterização aerodinâmica no modelo reduzido do edifício *CAARC Standard Tall Building*, modelo padrão desenvolvido para auxiliar nos experimentos referentes à ação do vento em edificações e utilizado para calibração de túneis de vento. Através de um extenso estudo desenvolvido no LAC/UFRGS, realizado com a inserção de distintas densidades de vizinhança a barlavento desse modelo aerodinâmico, com diferentes posições relativas entre os modelos, visando compreender a relação de interação entre tais parâmetros na caracterização dos efeitos de interferência da vizinhança. As ferramentas de pesquisa utilizadas são o Túnel de Vento Prof^o Joaquim Blessmann, a aplicação das preconizações da NBR6123:1988 e estudos desenvolvidos por outros pesquisadores. Através de ensaios realizados em túneis de vento é possível analisar de forma mais adequada as interferências que ocorrem nas interações entre vento e estrutura.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

2.1 OBJETIVOS

Considerando a complexidade relacionada aos efeitos de interferência causados pelas edificações presentes na vizinhança, o objetivo principal dessa pesquisa é compreender de que forma as forças devidas a ação do vento são influenciadas pelas características das edificações e de diferentes densidades de vizinhança, realizando uma caracterização aerodinâmica em um modelo reduzido no que tange aos carregamentos estáticos devidos ao vento.

Para a caracterização aerodinâmica busca-se realizar ensaios no Túnel de Vento Prof^o. Joaquim Blessmann, utilizando um modelo em escala reduzida do edifício *CAARC Standard Tall Building*, considerando o modelo em situação isolada e com distintas densidades de vizinhança. Essas densidades de vizinhança são diferenciadas pela adição de modelos interferentes a barlavento do modelo aerodinâmico, inseridos em diferentes posições relativas através do aumento do espaçamento entre os modelos, conforme cada configuração de ensaio. Foram adotadas 3 (três) configurações de vizinhança com 4 (quatro) posições relativas de espaçamento entre os modelos em cada configuração, totalizando 12 (doze) configurações de ensaio.

Dessa forma, considerando a influência dessas configurações de vizinhança na caracterização dos efeitos de interferência, esse estudo é desenvolvido usando-se dois enfoques: (1) analisar a variação dos coeficientes de força e de arrasto, atentando para as preconizações da NBR6123:1988; (2) analisar a influência desses parâmetros adotados em cada configuração através dos coeficientes de força determinados em túnel de vento e cálculo analítico dos fatores de vizinhança. Com isso, possibilita-se a proposição de novos estudos para a norma brasileira e a contribuição com as pesquisas desenvolvidas nessa área de estudo, somando-se ao extenso banco de dados do Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

2.2 JUSTIFICATIVA

Devido à grande quantidade de variáveis que influenciam a ação do vento em edificações, relacionadas com a consideração da presença de diferentes densidades de vizinhança no entorno que alteram o comportamento do escoamento do vento e refletem em efeitos de interferência entre as edificações, teve-se no decorrer dos anos o desenvolvimento de diversas pesquisas sobre esse amplo tema. Esses fenômenos, gerados pela presença de obstáculos no escoamento do ar, afetam positivamente ou negativamente as edificações imersas no meio urbano, em contrapartida com a concepção distorcida de que as cargas devidas ao vento nessas situações são obrigatoriamente menores do que aquelas desenvolvidas em edificações isoladas. A importância dessa área se dá em virtude da complexidade da natureza do fenômeno, composto por diversas variáveis que vão desde o tamanho e formato das estruturas, suas posições de interferência, tipos de escoamento e direções de incidência do vento, a fatores topográficos. Ainda que, diante de diversos estudos, a escassez de dados experimentais adequados considerando diferentes densidades de vizinhança é algo recorrente e que carece de uma constante atenção e renovação. Sendo assim, a escolha dessa área de pesquisa passa pela necessidade de fomentar cada vez mais o banco de dados referente a ação do vento, considerando a interação dos fenômenos destacados, visto que diversos projetos não possuem condições de ter acesso a ensaios realizados em túneis de vento, facilitando o acesso a essas informações e caracterizando a aquisição de conhecimento específico sobre o tema.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A influência nas cargas atuantes em estruturas, causando efeitos estáticos e dinâmicos, advindos da ação do vento e de interações entre edificações baixas e altas, situadas na vizinhança da edificação em estudo, foram tema de diversos estudos de diferentes pesquisadores: Harris (1934), Bailey & Vincent (1943), Davenport (1961), Scruton & Newberry (1963), Blessmann (1966, 1982, 1989, 1992), Leutheusser (1971), Sykes (1983), Blessmann & Riera (1978, 1980, 1985), Khanduri *et al.* (1998), Holmes (2001), Loredou-Souza *et al.* (2004, 2006, 2010, 2012), Cho *et al.* (2004), Xie & Gu (2004), Núñez *et al.* (2012), Hui *et al.* (2012, 2013), Alberti (2015), Grala (2016, 2020), Vieira *et al.* (2018), Melo (2020), entre outros.

No entanto, inicialmente os estudos relacionados à ação do vento em estruturas se limitavam aos ensaios da interação entre apenas dois edifícios, sem considerar os efeitos de interferência que poderiam ser causados por mais edificações, situadas na vizinhança da edificação em estudo. Nesse sentido, o advento das construções de edifícios altos imersos em centros de grandes cidades, como na Figura 2, levou ao avanço de diversas pesquisas relacionadas aos efeitos de interferência causados por edificações adjacentes, desenvolvidas em túneis de vento, através de simulações das principais características da vizinhança e dos ventos naturais.

Figura 2 – Edifícios altos em Nova York na década de 20

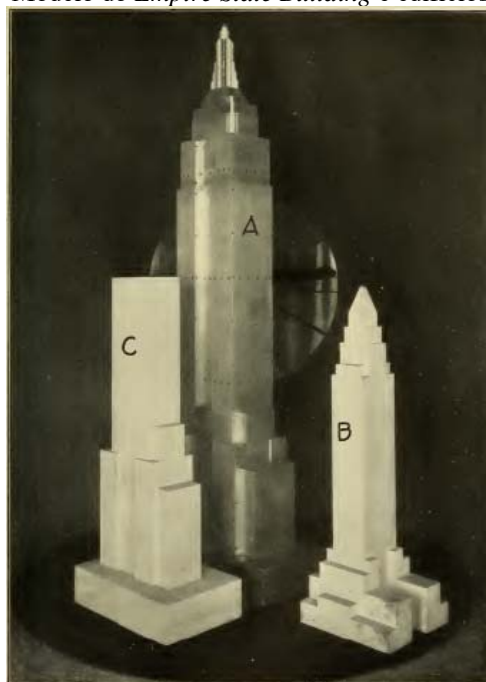


Fonte: Alberti (2015)

Em meados de 1930, através do desenvolvimento das construções de arranha-céus nos Estados Unidos, efetuaram-se estudos relevantes com relação à ação do vento em edifícios altos. Nessa época, o cálculo estrutural era baseado apenas em cargas estáticas obtidas a partir das máximas velocidades do vento observadas, considerando a variação da velocidade com a altura acima do terreno. Os coeficientes aerodinâmicos eram obtidos em ensaios em túneis de vento aeronáuticos que futuramente seriam substituídos por túneis de vento capazes de reproduzir condições ideais para ensaios com ventos naturais. Nesses trabalhos iniciais, foram realizados estudos teóricos das pressões, problemas de vibrações, tratamento das velocidades máximas do vento, além de medições em diversos edifícios de grande altura (CARPEGIANI, 2004).

Harris (1934) realizou medições da pressão do vento sobre um modelo do *Empire State Building* em Nova York (Figura 3), considerando a interferência causada pela presença de dois modelos vizinhos menores, objetivando determinar os efeitos decorrentes dessa interação. Os resultados indicaram um aumento na pressão em certas faces do edifício com a presença dessas estruturas vizinhas, a pressão resultante na face de barlavento e a sucção na face de sotavento diminuíram, a redução foi maior quando a estrutura interferente estava próxima e diretamente a barlavento. As edificações adjacentes provocaram um efeito de proteção com relação às forças de arrasto, no entanto, o momento torçor máximo no edifício em estudo quase dobraria, até a altura do topo dos dois edifícios adjacentes. Diversos estudos vinham apontando, desde essa época, para a interferência das edificações adjacentes em comparação aos resultados da edificação isolada.

Figura 3 – Modelo do *Empire State Building* e edifícios adjacentes

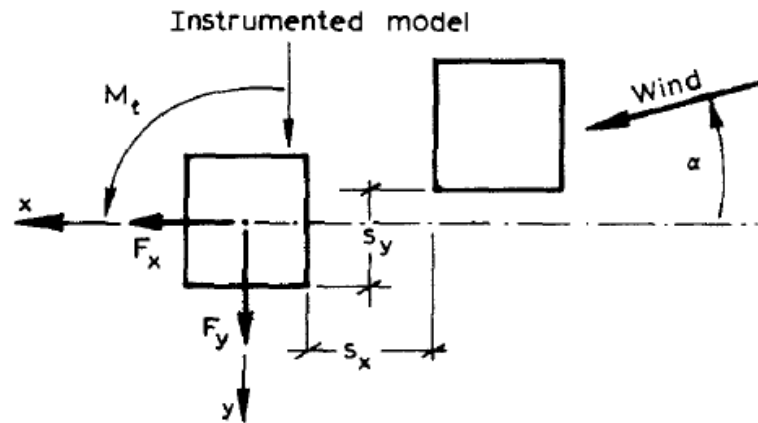


Fonte: Harris (1934)

Davenport (1961) estudou os conceitos estatísticos das séries temporais estacionárias para a determinação da resposta de estruturas simples a vento turbulento e tempestuoso, em termos da velocidade média do vento, do espectro de rajadas de vento e das propriedades mecânicas e aerodinâmicas das estruturas. Tradicionalmente, as pressões eram calculadas com base no pressuposto de que as flutuações na velocidade devido às rajadas de vento poderiam ser desprezadas com segurança e que a velocidade poderia ser considerada invariável no espaço e no tempo. Essa simplificação foi conveniente pois as pressões poderiam ser consideradas estáticas e determinadas a partir de ensaios em túnel de vento em modelos em uma corrente de ar constante. A partir desses experimentos foram encontrados determinados coeficientes aerodinâmicos, como os coeficientes de pressão e arrasto.

Blessmann & Riera (1978, 1980, 1985) e Blessmann (1989) apresentaram relatos de um estudo de interação extenso e sistemático realizado no LAC com dois modelos de edifícios prismáticos de seção quadrada (Figura 4), com altura igual a seis vezes a aresta da base, a , separados em quinze posições relativas de vizinhança, através de uma análise estática e dinâmica, como as forças horizontais, forças de flexão, momentos de torção e martelamento. Os modelos foram submetidos a um vento de baixa turbulência, vento uniforme e suave, e ainda, a uma corrente de ar que simulava as principais características do vento natural, vento turbulento e deslizante, com um expoente do perfil de velocidades médias $p = 0,34$, apresentando diferentes resultados conforme a mudança de escoamento. Foram realizadas medidas de pressão no modelo principal, variando o afastamento do modelo interferente, nos eixos x e y , conforme as posições relativas predeterminadas, e ainda, variando o ângulo de incidência do vento em intervalos de 15° , sendo que, quando os modelos estavam alinhados à barlavento, foram medidas as pressões de 0° até 180° , e quando o modelo interferente deslocava em ambos os eixos, foram medidas as pressões de 0° a 360° . A presença de vizinhança ocasionou diferença nos resultados obtidos, quando relacionados aos ensaios preliminares com o modelo isolado, destacando-se aumentos percentuais nos coeficientes de força horizontal e de momento torçor, sendo observada essa influência até para os maiores afastamentos ensaiados. A Tabela 1 apresenta a relação entre a configuração desses ensaios e o tipo de escoamento, com os valores máximos dos coeficientes de força horizontal e o ângulo de incidência do vento de ocorrência dessa ação. Tais valores, quando comparados ao coeficiente máximo do modelo isolado, possibilitaram encontrar fatores de vizinhança, representando essa influência, servindo de base para definição desses parâmetros no Anexo G da NBR6123:1988.

Figura 4 – Modelos prismáticos de seção quadrada utilizados nos estudos



Fonte: Blessmann & Riera (1985)

Tabela 1 – Configuração de ensaio e valores máximos do coeficiente de força horizontal

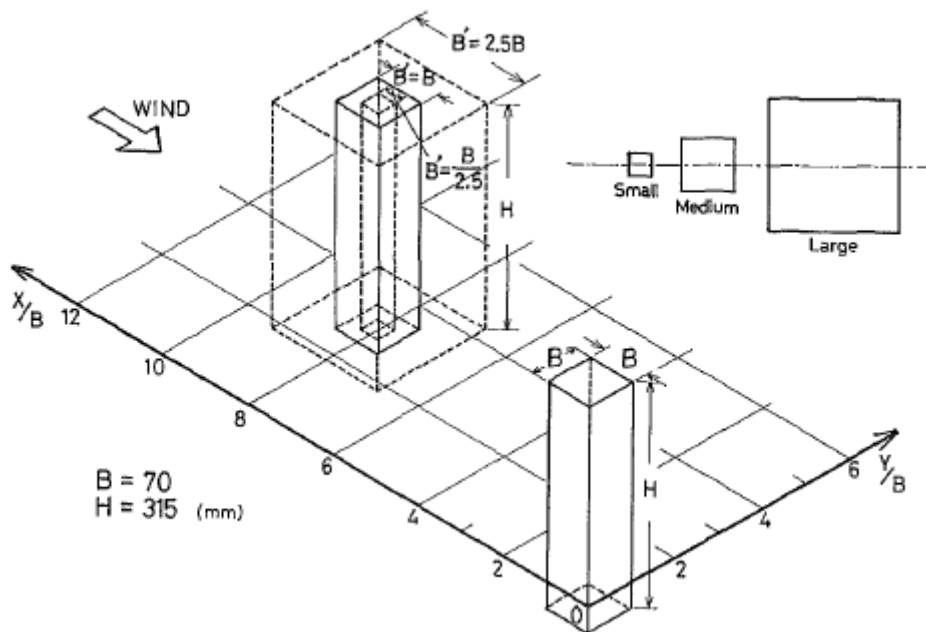
Vento	s_y/a	C_{max} para $s_x/a =$					
		0,10	0,25	0,50	1,00	2,00	∞
Uniforme	0	1,80 (135°)	1,89 (135°)	1,65 (135°)	1,63 (105°)	1,66 (105°)	1,46 (90°)
	0,50	1,91 (150°)	1,72 (135°)	1,77 (135°)	1,65 (105°)	1,66 (270°)	1,46 (90°)
	1,00	1,92 (150°)	1,95 (150°)	1,82 (150°)	1,76 (135°)	1,68 (135°)	1,46 (90°)
Turbulento	0	1,21 (135°)	1,32 (225°)	1,26 (135°)	1,19 (225°)	1,09 (135°)	1,02 (45°)
	0,50	1,32 (150°)	1,19 (135°)	1,21 (135°)	1,24 (135°)	1,17 (135°)	1,02 (45°)
	1,00	1,37 (270°)	1,37 (270°)	1,36 (150°)	1,36 (135°)	1,22 (135°)	1,02 (45°)

Fonte: Blessmann (1989)

Sykes (1983) através de ensaios em túnel de vento empregando o modelo da *Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council (CAARC)*, bastante utilizado para calibração de túneis de vento em todo mundo, observou a importância do desenvolvimento de pesquisas com relação aos efeitos de vizinhança, em circunstância da interferência gerada entre dois desses modelos com mesma seção transversal, adotando duas alturas e posicionamentos para o modelo interferente, a mesma altura do modelo principal e metade dessa altura, ensaiados em diferentes velocidades do vento. Relatou-se o surgimento de um efeito de proteção quando a interferência era gerada por uma edificação adjacente de mesma altura, e um aumento nas ações do vento atingindo o modelo localizado a sotavento, quando realizada a redução pela metade da altura da edificação de interferência. Os resultados desse estudo foram analisados através do fator de interferência da vizinhança, razão entre o deslocamento no topo do modelo com vizinhança e o deslocamento no modelo isolado.

Taniike (1991) investigou a interferência mútua entre edifícios altos vizinhos com seção transversal quadrada em extensos ensaios, adotando diferentes tamanhos e larguras, conforme Figura 5, e simulando um escoamento altamente turbulento sobre uma área urbana, com expoente $p = 0,25$ da lei potencial. Os efeitos da turbulência na interferência mútua foram comparados com outros resultados encontrados para um escoamento com turbulência relativamente baixa. Os resultados mostraram que as respostas da edificação na direção de incidência do vento e transversal a incidência, são significativamente alteradas devido à presença de um modelo de tamanho qualquer a barlavento em escoamento turbulento, exceto quando um edifício delgado está imediatamente próximo do modelo principal, devido aos vórtices não serem claramente formados na esteira do edifício a barlavento, em consequência do aumento no arrasto do vento gerado pela alta turbulência do escoamento. Outro resultado significativo se refere a respostas da edificação afetada pela esteira do edifício a barlavento em escoamento de baixa turbulência, que foram parecidas com as respostas geradas pelo modelo isolado em escoamento de alta turbulência. Através do fator de martelamento (*buffeting factor*, BF), o autor analisou os deslocamentos provocados pela formação de vórtices desprendidos na esteira das edificações de interferência, quantificando a relação entre as distâncias das duas edificações na resposta ao vento que a estrutura de interferência provocaria no modelo principal. Os efeitos, induzidos em edificações imersas na esteira, podem ser amplificados pela força aerodinâmica devida ao desprendimento de vórtices da edificação a barlavento.

Figura 5 – Edifícios interferentes de vários tamanhos no estudo de Taniike (1991)



Fonte: Taniike (1991)

Taniike (1992), em novo estudo, analisou o aumento das forças e movimentos em um edifício alto com seção transversal quadrada, advindos dos efeitos de proximidade de edificações vizinhas, utilizando novamente as configurações do estudo anterior, conforme Figura 5, mas simulando um escoamento de baixa turbulência, com expoente $p = 0,14$ da lei potencial. Considerando que quando dois ou mais edifícios altos são construídos nas proximidades, o escoamento do vento em torno dessas edificações pode ser significativamente deformado e de natureza muito mais complexa. Os resultados mostraram que as forças flutuantes no modelo principal devido à interferência de modelos de qualquer tamanho, localizados a barlavento, geralmente aumentam, destacando prováveis causas: vórtices de esteira atingindo diretamente a edificação a sotavento, causando aumento no momento torçor; transição para vórtices de menor escala através de um processo de convecção, aumentando a velocidade do escoamento incidente; e/ou vórtices de esteira sincronizados (com circulação oposta) entres os modelos, ocasionando aumento na força flutuante no modelo principal. Foram realizadas medições das forças médias e flutuantes atuando no modelo a sotavento, bem como medições das pressões médias e flutuantes no piso de base ao redor do edifício, devido à importância desse problema, não apenas para projetos estruturais, mas também na minimização dos desconfortos causados em transeuntes.

Blessmann (1992) tratou da ação do vento estático em dois modelos de edifícios altos inseridos em aglomerações urbanas de duas capitais: o primeiro em São Paulo (Edifício Citibank), com 97,0 m de altura, e o segundo no Rio de Janeiro (Edifício Manhattan), com 98,15 m de altura. A simulação dos ensaios foi realizada em escoamento turbulento com expoente da lei potencial do perfil médio de velocidade do vento igual a 0,34, para incidência de vento a cada 15°. Os resultados mostraram que a ação do vento em um edifício varia bastante, dependendo do número e da localização específica dos edifícios vizinhos. Nos resultados obtidos com a presença da vizinhança, observou-se um pequeno incremento nos coeficientes de força (C_x , C_y) em ambos modelos, aumentos significativos nos coeficientes de torção (C_t) e o efeito de vizinhança (FV) apresentando valores da ordem de 2,25 em algumas zonas do modelo paulista e de 1,54 para o modelo carioca. No entanto, os coeficientes foram fortemente influenciados pelos efeitos de vizinhança para o modelo de São Paulo, enquanto que no modelo do Rio de Janeiro, a maioria dos resultados apresenta uma redução nas ações do vento. Segundo o autor, existem casos em que os efeitos de vizinhança são favoráveis e outros em que a ação do vento na edificação em estudo se torna desfavorável, as sucções locais nas paredes e nos telhados podem aumentar em 100-200% ou mais e as forças horizontais em cerca de 50%.

Khanduri *et al.* (1998) realizaram uma extensa análise de décadas de trabalhos relacionado aos efeitos de interferência, na tentativa de fornecer recomendações generalizadas em relação ao fenômeno, que não foram bem-sucedidas, devido à natureza complexa do problema e à grande variação entre os diversos estudos, tornando imperativo abordar o problema da interferência de maneira sistemática. A análise da ação do vento em edifícios é realizada principalmente via códigos e normas, sendo que essas especificações são geralmente baseadas em ensaios em túneis de vento com estruturas isoladas em terreno aberto. No entanto, as cargas de vento em ambientes realistas podem ser consideravelmente diferentes. Os autores defendem que efeitos máximos de interferência podem ser esperados em terrenos abertos, reduzindo constantemente para o subúrbio e atingindo um mínimo para os terrenos urbanos, devido à baixa turbulência apresentar esteiras bem organizadas e alta energia, em contrapartida com a alta turbulência, derivada de densidades elevadas de vizinhança, que interferem na organização dos vórtices desprendidos dessas edificações, redistribuindo a energia. Com base nas análises e comparações dos dados presentes nas literaturas, os autores destacaram importantes diretrizes:

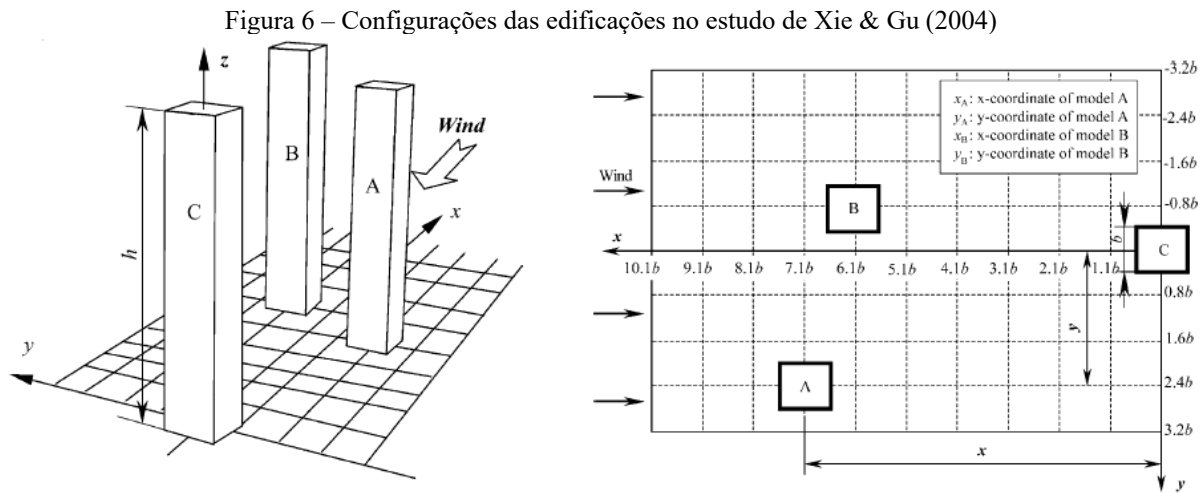
- Os carregamentos médios são reduzidos com o aumento da seção transversal do edifício a barlavento, caracterizando efeito de proteção. No entanto, carregamentos dinâmicos podem apresentar aumentos significativos, em até 200% em um edifício alto e quadrado a sotavento devido a esse edifício de altura semelhante, mas com 2,5 vezes a largura;
- Os efeitos de interferência causados por edifícios mais altos a barlavento em edifícios a sotavento, podem ser mais significativos que o caso inverso. Embora essa configuração acarrete um efeito de proteção nesse edifício imerso na esteira, reduzindo os carregamentos médios ao longo da direção do vento, os carregamentos dinâmicos podem aumentar mais de 70% devido ao efeito de deflexão do vento na direção vertical;
- Os efeitos de interferência em edifícios situados a barlavento, causados por edifícios a sotavento, não são tão significativos quanto a interação contrária, embora em pequenos afastamentos entre as edificações, a esteira formada pelo próprio edifício a barlavento pode causar efeitos dinâmicos significativos no mesmo, produzindo aumentos em até 200% sobre um valor de edifício isolado;
- O formato, geometria e disposição das edificações interferem na definição da incidência do vento mais prejudicial. No entanto, geralmente a incidência do vento perpendicular a fachada do edifício em estudo é quem produz efeitos mais significativos de interação;

- Os carregamentos devidos a ação do vento em uma edificação, geralmente são menos severos, quando cercados por um grande grupo de edificações com tamanhos significativos, ocasionando em efeitos de proteção. No entanto, os efeitos de interferência são mais significativos em edificações imersas em campo aberto, quando localizados ao longo de uma orla à beira-mar ou uma área aberta como um parque.

Cho *et al.* (2004) avaliaram os efeitos de interferência nas cargas de vento em um edifício com seção quadrada afetado por um arranjo de edifícios vizinhos com proporções laterais de 1,0-2,5 ao edifício em estudo. Constatou-se que os efeitos de interferência induzidos pelas edificações vizinhas dependem do tamanho e forma do edifício, da velocidade e direção do vento e, principalmente, da geometria e disposição dessas estruturas, que podem alterar diretamente o escoamento, suas orientações e condições do terreno a barlavento. O fator de interferência foi definido como a razão da força do vento em um edifício com edificações interferentes presentes pela força do vento em um edifício isolado. Caso o fator de interferência (IF) fosse maior que 1, a força do vento do edifício medido é aumentada pelo edifício vizinho, caso contrário, fosse menor que 1, a força do vento seria reduzida por efeito de proteção do edifício a barlavento. Os resultados indicaram, conforme arranjos ensaiados, que o efeito de proteção foi dominante, mas em determinado arranjo o efeito adverso aumentou as cargas do vento de 10 a 20%. Para a direção do vento, em determinado arranjo, a carga do vento aumentou em até 30% quando comparado ao edifício isolado. O momento de torção também pode aumentar em até 40%.

Xie & Gu (2004) analisaram o comportamento dos efeitos de interferência entre três edifícios, devido à maioria dos trabalhos relatarem estudos com apenas duas edificações, mostrando que podem surgir efeitos mais significativos diante dessa configuração. Foram ensaiadas diferentes configurações de vizinhança entre o modelo principal (Edifício C) e os modelos interferentes (Edifícios A e B), em arranjos lado a lado, *tandem* e escalonado, variando nos eixos x e y, como representado na Figura 6, e ainda, em diferentes escoamentos do vento, uniforme e categorias de exposição B e D do *Chinese Load Code* (correspondendo a expoentes da lei potencial 0,16 e 0,30, respectivamente). Os efeitos de proteção e Venturi são relatados como decorrentes da interferência das edificações vizinhas, com os resultados mostrando que edifícios maiores a barlavento poderiam produzir mais efeitos de proteção no edifício principal, diminuindo a carga média do vento, enquanto que edifícios interferentes lado a lado com tamanho maior, poderiam produzir um efeito de canalização (Venturi) mais grave no edifício em estudo, aumentando significativamente a carga média de vento. Além disso, a variação do efeito de proteção é

significativa quando as alturas dos edifícios interferentes variam de 50 a 125% da altura do edifício principal. No entanto, edifícios com interferências mais altas também podem causar efeitos de canalização mais fortes. Os autores destacam que a proximidade das edificações presentes na vizinhança, assim como, suas alturas e larguras, em relação ao modelo em estudo, são os fatores preponderantes na determinação do tipo de interferência e sua intensidade.



Loredo-Souza *et al.* (2006) verificaram em estudo a adequação da norma brasileira de vento, NBR6123:1988, às estruturas com configurações arquitetônicas distintas daquelas previstas na norma, apresentando resultados em modelos reduzidos da ação estática do vento sobre edifícios altos com diversas seções transversais, conforme alguns modelos apresentados na Figura 7. As normas e métodos analíticos, empregados na concepção dos projetos estruturais de edifícios altos, consideram apenas vento incidindo perpendicularmente a cada uma das fachadas de edifícios de planta retangular, no entanto, diversos resultados de estudos em túneis de vento demonstraram que forças maiores que as previstas nas normas podem ocorrer para incidências oblíquas do vento. Os resultados apresentam gráficos polares do momento torçor na base e gráficos dos coeficientes de força (Figura 8) para os eixos ortogonais x e y indicados, para cada edificação em função do ângulo de incidência do vento, comparativamente com resultados obtidos através da norma. Os resultados comprovaram que as desiguais distribuições de pressões, ao longo das fachadas, originam efeitos de torção, sendo esses mais significativos para edificações com seção transversal não retangular. A aplicação da norma, ao tratar das forças de arrasto na base, conduz a uma estimativa inferior em relação aos resultados experimentais, na maioria dos casos. Os autores concluíram que as recomendações da norma brasileira devem ser revistas, destacando uma revisão para a curva dos coeficientes de arrasto

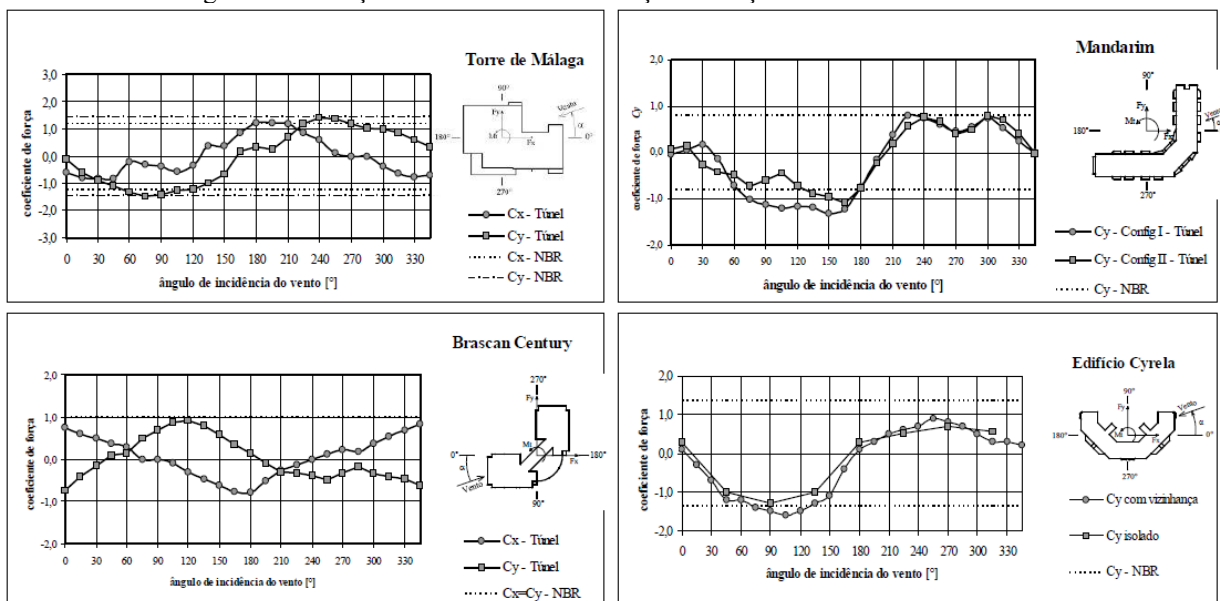
indicada na norma, e apontando a necessidade de mais ensaios em túneis de vento para que uma maior variedade de formas arquitetônicas seja contemplada nas recomendações normativas.

Figura 7 – Modelos arquitetônicos com seções transversais distintas

MODELO	FOTO	SEÇÃO TRANSVERSAL	ALTURA	CIDADE
Torre de Málaga			118,00 m	Londrina/PR
Mandarin			63,50 m	Rio de Janeiro/RJ
Brascan Century			108,60 m	São Paulo/SP
Cyrela Classique Klabin			72,52 m	São Paulo/SP

Fonte: Loredo-Souza *et al.* (2006), adaptado

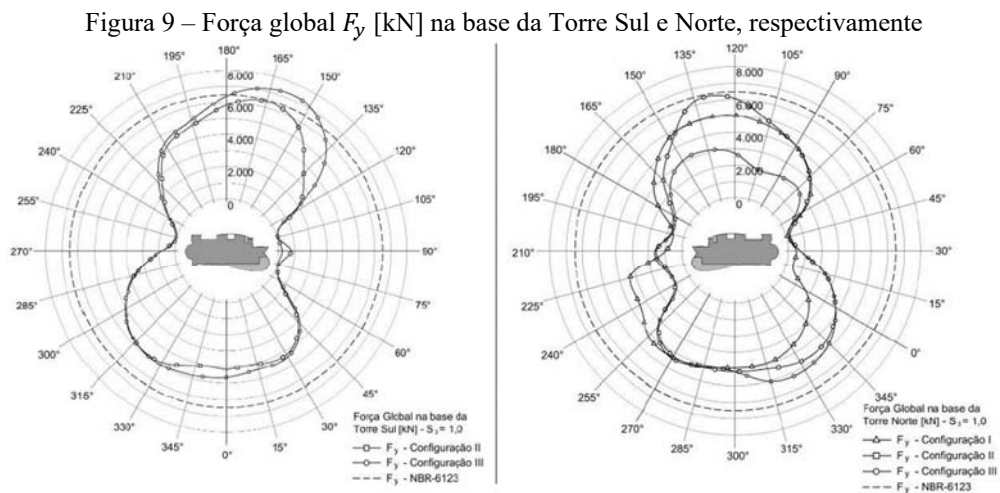
Figura 8 – Variação dos coeficientes de força em função da incidência do vento



Fonte: Loredo-Souza *et al.* (2006), adaptado

Loredo-Souza *et al.* (2009) analisaram os coeficientes aerodinâmicos obtidos através da ação do vento, considerando os efeitos de interferência da vizinhança, em termos dos coeficientes de força, de torção e de pressão para efeitos locais, através de ensaios em túnel de vento, simulando dois edifícios altos com 120 m de altura, idealizados para Natal/RN, identificados por Torre Norte e Torre Sul. Os resultados foram obtidos para três configurações: (I) somente uma torre,

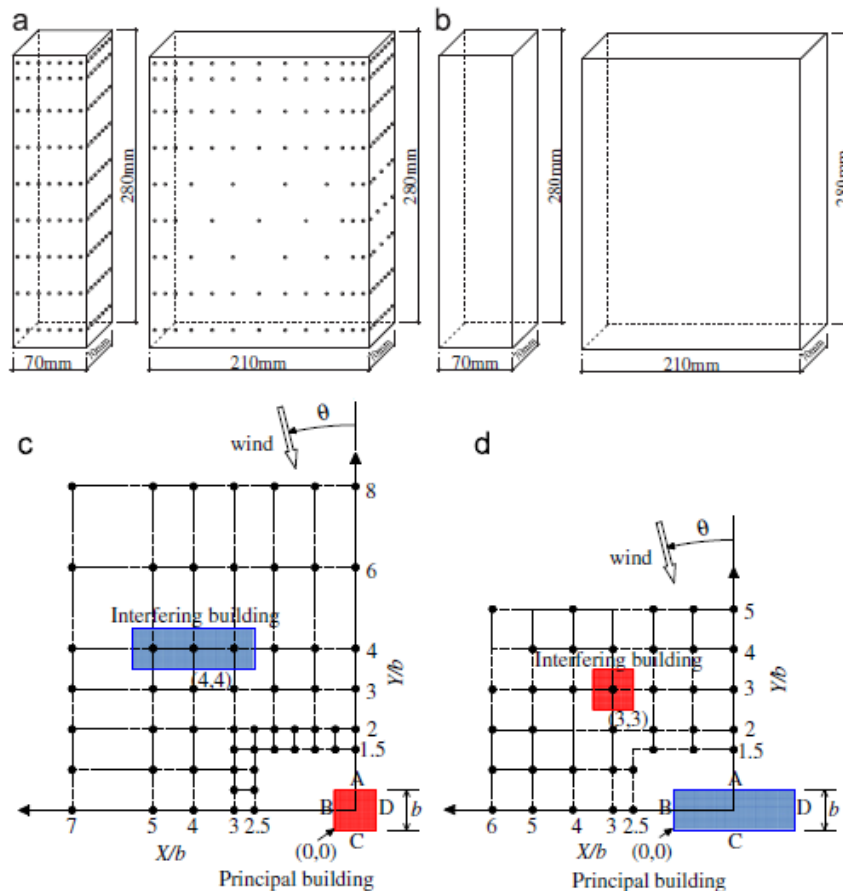
com a vizinhança existente; (II) as duas torres, com a vizinhança existente; (III) as duas torres, com a vizinhança existente e mais quatro edifícios altos projetados para a vizinhança imediata. Os resultados em túnel de vento dos modelos isolados, sem vizinhança, são comparados com aqueles obtidos para cada configuração apresentada e, ainda, comparando esses resultados com os coeficientes fornecidos pela NBR6123:1988. A Figura 9 apresenta alguns dos resultados obtidos nos ensaios, referentes aos valores da força global na base das Torres Sul e Norte, respectivamente, para as três configurações estudadas. Percebe-se o efeito dos edifícios vizinhos no carregamento devido ao vento para determinadas incidências, por vezes majorando e por outras reduzindo os efeitos sobre as edificações. Com relação à força de arrasto na base, os resultados indicaram que a norma fornece valores subestimados de coeficientes, visto que a mesma não considera a incidência oblíqua do vento. Os resultados indicam novamente a necessidade de revisão das recomendações da norma e inclusão de outros valores oriundos dessas incidências oblíquas.



Hui *et al.* (2012) analisaram os efeitos dos formatos das construções nos efeitos de interferência causados pelas edificações na vizinhança, através da distribuição de pressões externas nas fachadas dos modelos principais, ensaiando duas edificações de mesma altura em túnel de vento diferindo, na seção transversal, um edifício de seção quadrada e um edifício retangular com uma razão lateral de 3:1 (Figura 10). Foram utilizados diferentes modelos representando as edificações, sendo modelos instrumentados com tomadas de pressão ao longo das fachadas e posição fixa e modelos mudos não instrumentados, servindo como barreira ao escoamento do vento, utilizando o modelo quadrado como principal e o modelo retangular como o edifício interferente, e vice-versa, ensaiados com várias configurações e direções do vento (Figura 10). A intensidade dos efeitos de interferência das edificações vizinhas foram analisadas através do

fator de interferência, ou fator de vizinhança (FV), determinado pela razão entre o coeficiente de pressão nos modelos com vizinhança ($c_{p,CV}$) e o coeficiente de pressão nos modelos isolados ($c_{p,ISO}$): $FV = c_{p,CV}/c_{p,ISO}$. Os resultados indicaram que o edifício interferente não tem um efeito significativo nos maiores coeficientes máximos de pressão (\hat{C}_p), já que os valores estavam na faixa de 0,9 a 1,1 vezes o \hat{C}_p do edifício isolado, mas um forte efeito de proteção é observado se o edifício retangular estiver em frente ao edifício quadrado. No entanto, o edifício interferente, independentemente da forma, tem um efeito muito forte nos menores coeficientes mínimos de pressão (\check{C}_p), onde o valor absoluto pode ser 40% maior que o \check{C}_p do edifício isolado. A direção de incidência do vento é um dos parâmetros mais cruciais, sendo as formas e posições relativas dos edifícios, os fatores mais importantes que afetam essa incidência desfavorável do vento. De acordo com os autores, na comparação dos resultados com estudos anteriores, tem-se a importância da geometria do edifício de interferência nos efeitos de vizinhança, mas também da geometria do modelo principal afetando esse comportamento, mostrando a necessidade de estudos mais sistemáticos sobre os efeitos de interferência.

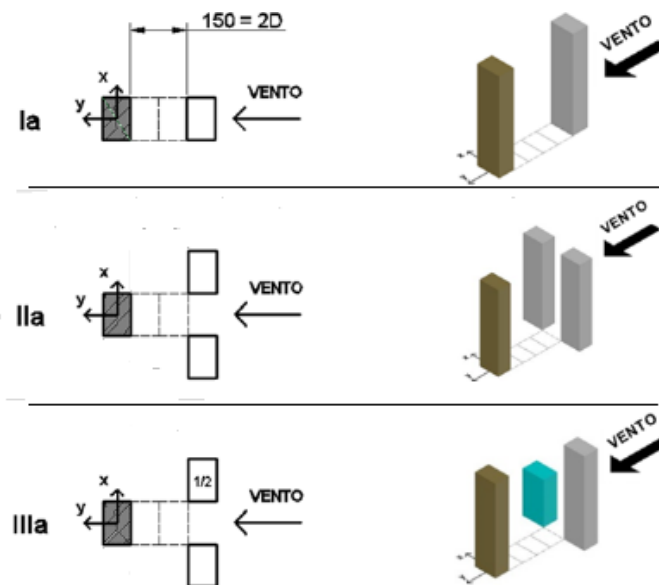
Figura 10 – Modelos instrumentados (a); Modelos mudos (b); Set-1 (c); Set-2 (d)



Fonte: Hui *et al.* (2012), adaptado

Bênia (2013), em seu estudo realizado no LAC/UFRGS, analisou os efeitos de interferência da vizinhança em edifícios altos, através de ensaios realizados em túnel de vento com um modelo reduzido do edifício padrão *CAARC*. Foram empregadas três configurações de vizinhança distintas (Figura 11): um modelo mudo idêntico ao principal (Ia), dois modelos mudos idênticos ao principal e posicionados lado a lado (IIa) e, ainda, um modelo mudo idêntico ao principal e outro modelo mudo com metade da altura (IIIa). Sendo adotados nos ensaios 6 afastamentos para cada configuração, relacionados com o menor lado (D) do modelo principal, compreendendo 18 configurações de vizinhança. Essas configurações foram simuladas em escoamento do vento natural com expoente $p = 0,11$, em um único ângulo de incidência à 90° , perpendicular à maior face do modelo principal, para determinação das respostas dinâmicas do edifício, em termos de suas componentes médias e flutuantes, respostas longitudinais, transversais e torcionais. Os resultados, obtidos através da utilização de balança dinâmica de três graus de liberdade (BD3GDL), mostraram que o efeito de proteção devido às edificações vizinhas provocou a diminuição das respostas médias longitudinal e transversal no edifício em estudo em comparação à edificação isolada. E ainda, efeitos de martelamento, presentes nas configurações em que o modelo principal se encontrava imerso na esteira dos modelos vizinhos. Os resultados mostraram a importância da consideração de efeitos de interferência entre edifícios altos, apresentando ainda, muitas lacunas sobre o fenômeno.

Figura 11 – Configurações de ensaio dos estudos de Bênia (2013)



Fonte: Bênia (2013), adaptado

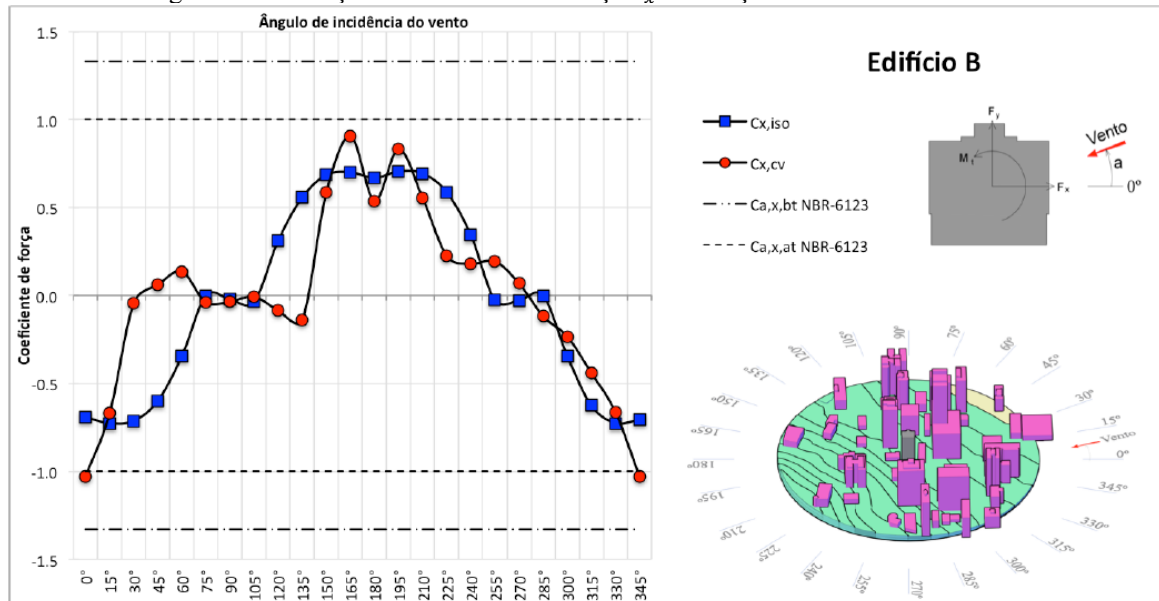
Fontoura (2014), em sua tese realizada no LAC/UFRGS, estudou a influência da vizinhança em edifícios altos, através da manipulação de coeficientes aerodinâmicos para a determinação desses efeitos no edifício *CAARC*, considerando oito vizinhanças propostas e vizinhos de três

alturas diferentes, em 24 ângulos de incidência do vento, visando simular algumas situações encontradas em grandes centros urbanos. A avaliação dos ângulos de incidência e da vizinhança mostram a influência tanto da altura quanto da proximidade dos edifícios vizinhos nos esforços gerados pelo vento nessa edificação. Para o fator de majoração (FV), calculado através do coeficiente de força no eixo x, o edifício instrumentalizado encontra-se protegido na maior parte dos ângulos de incidência do vento ($FV \leq 1$). Para o fator calculado para o eixo y, apesar da maioria das vizinhanças produzirem FV prescrito no valor da norma (1,3), é considerável as angulações que geram proteção (33%) e aquelas que apresentam um FV descoberto pela norma brasileira (25%).

Alberti (2015), em seu trabalho também realizado no LAC/UFRGS, analisou quatro modelos reduzidos de edifícios altos (Edifícios A, B, C e D), isolados e com vizinhanças adjacentes, imersos em configurações urbanas mais densas, analisando os efeitos de interferência dessas vizinhanças através dos ensaios em túnel de vento. Foram calculados coeficientes de força para cada modelo em relação aos dois eixos ortogonais, apresentando 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. Notou-se que sob vizinhança densa, houve uma grande redução das ações do vento, enquanto aberturas entre as edificações de interferência, produziram aumentos das ações do vento sobre os edifícios estudados. Grandes diminuições dos carregamentos de vento foram observadas em 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). Na Figura 12, é possível observar os resultados para o Edifício B em relação ao eixo x, apresentando variação entre os valores registrados no ensaio isolado e com vizinhança. Os $C_{x,iso}$ apresentaram resultados bastante simétricos devido ao formato quasi-prismático do modelo, que se comportou de maneira uniforme. Já para os $C_{x,cv}$, nota-se a intensa interferência da vizinhança em diversos ângulos de incidência do vento, como a 45° , 60° , 120° , 135° , 255° , 270° e 285° , onde houve inversões no sentidos dos esforços em relação ao ensaio isolado. Para os ventos a 165° e 195° , observa-se um repentino aumento do $C_{x,cv}$ acompanhado de uma redução ocorrida no ângulo intermediário, a 180° , o que configura uma interferência abrupta da vizinhança no modelo, possivelmente causado pelo efeito Venturi gerado para esses ângulos.

Através dos resultados, constatou-se uma maior ocorrência de efeitos de proteção em edificações imersas em vizinhanças mais densas. O autor apresentou uma proposta para a norma, relacionando o fator de vizinhança com dois parâmetros: o afastamento (S/b) e o índice de área exposta (ϕ), dado pela razão entre a área efetiva exposta ao vento e a área frontal dessa edificação. Destaca-se uma indicação de redução no limite inferior do valor do FV recomendado pela NBR6123:1988, de 1,0 para 0,8, quando o índice de área exposta for inferior a 30% e o afastamento menor que 2,5.

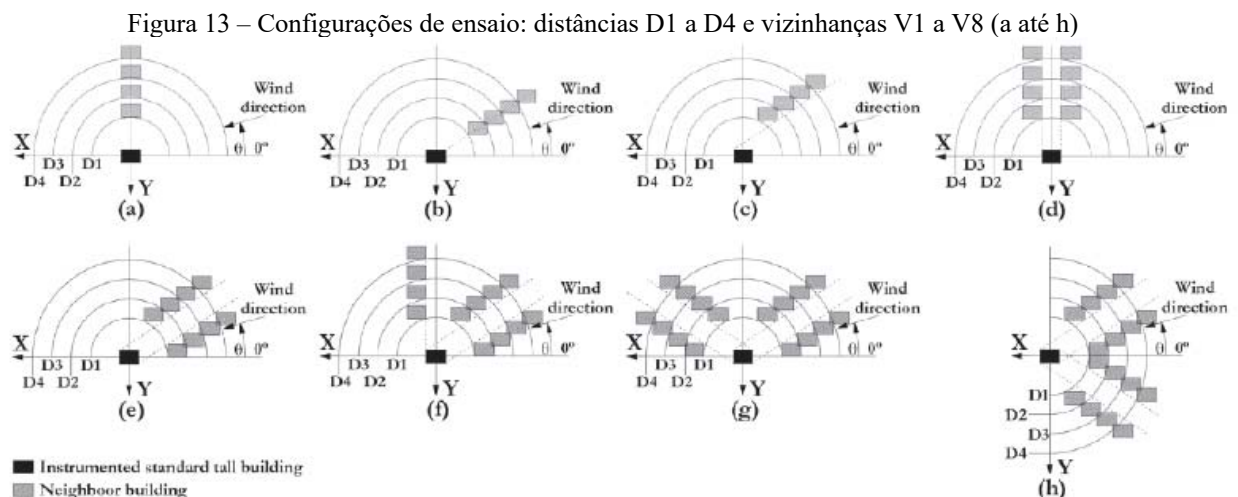
Figura 12 – Variação do coeficiente de força C_x em função do vento no Edifício B



Fonte: Alberti (2015)

Vieira *et al.* (2018) reforçaram as teorias de que os esforços médios atuantes em edificações devidos à ação do vento podem ser significativamente alterados quando considerada a presença de edificações na vizinhança. O trabalho visou ampliar a gama de informações em relação à intensidade da interferência dos edifícios vizinhos, desenvolvido no intuito de verificar os valores atualmente adotados pela norma brasileira. O estudo contou com a realização de ensaios em túnel de vento simulando um perfil com expoente 0,23, turbulência equivalente às categorias III e IV da norma, utilizando como modelo um edifício padronizado, o CAARC. Foram considerados os seguintes parâmetros: a presença de outros edifícios próximos com dimensões idênticas e a quantidade, disposição e afastamento dessas edificações vizinhas. Empregou-se quatro distâncias, respectivamente denominadas $D1 = H$, $D2 = 1,5H$, $D3 = 2,0H$ e $D4 = 2,5H$, onde H é a altura do edifício, e estabelecidas oito configurações de vizinhança, denominadas de V1 a V8, onde cada configuração foi posicionada em cada uma das quatro distâncias ao longo dos alinhamentos, totalizando trinta e dois ensaios (Figura 13). Foram avaliados os

esforços médios do vento na base, torção no eixo do edifício e flexão em torno dos eixos transversais na base do edifício estudado. Concluiu-se que a presença das edificações vizinhas produziu a majoração dos esforços, sendo que tais interferências, em muitas situações, elevaram os esforços acima dos índices sugeridos pela norma brasileira de vento. A presença de edifícios vizinhos interfere significativamente no escoamento do vento e, conseqüentemente, nas deformações produzidas por sua ação, independentemente do posicionamento e da quantidade de vizinhos. Os autores, em um esforço para determinar parâmetros para atualização do fator de vizinhança na norma brasileira, não atingiram os critérios de 95% dos resultados contemplados que é o intervalo de confiança designado para muitos desses arranjos propostos. Sendo assim, são recomendados mais estudos sobre o fator de vizinhança, visando ao aperfeiçoamento das recomendações presentes na norma brasileira de vento, NBR6123:1988.

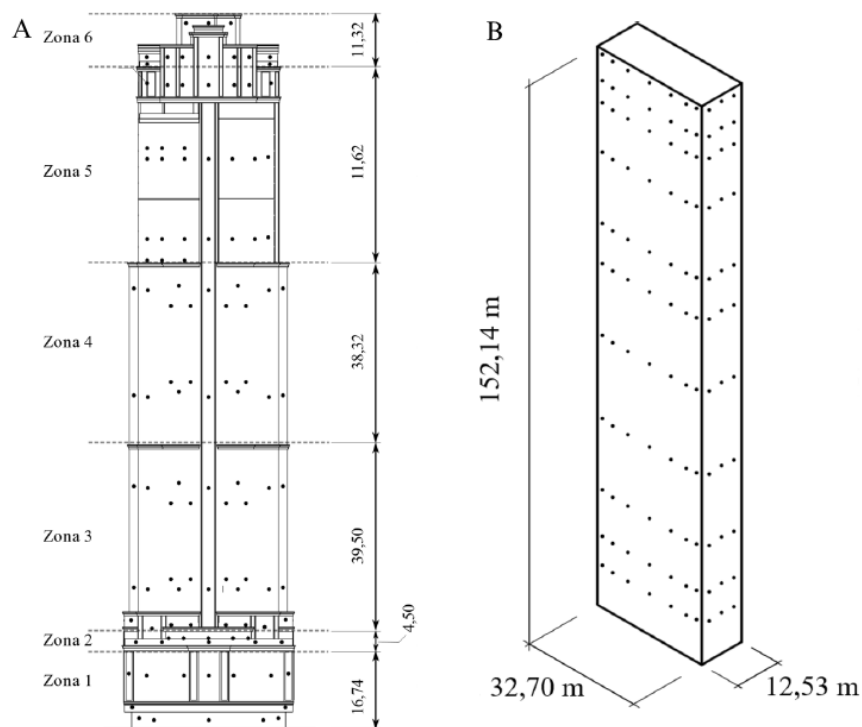


Fonte: Vieira *et al.* (2018)

Melo (2020) e Grala (2020) realizaram estudos recentes no LAC/UFRGS. Melo (2020) realizou a caracterização aerodinâmica de dois modelos rígidos de edifícios altos (Figura 14), um edifício real com riqueza de detalhes geométricos na fachada (A) e um edifício simplificado do primeiro com altura idêntica e fachadas lisas (B), avaliando a interferência causada pela vizinhança inserida em diferentes posições e o efeito causado pelas simplificações geométricas. Foram ensaiados diferentes perfis de vento, visando visualizar a influência que os efeitos de vizinhança, detalhes arquitetônicos e a turbulência possuem sobre a caracterização aerodinâmica desses modelos, em termos de espectros de esforços globais e locais, e obtenção de funções de admitância aerodinâmica. Os resultados indicaram que um modelo de vizinhança a barlavento e em uma posição oblíqua ao modelo principal tende a criar picos de energias que podem ser mais danosos que em outras posições. Já com relação a influência da simplificação

geométrica, os modelos se comportaram de maneira bastante similar com relação às forças globais na direção x (coincidente com a força de arrasto, nesse trabalho). No entanto, os modelos apresentaram diferenças significativas nos esforços de torção e de força na direção transversal ao escoamento, provavelmente devido ao desprendimento de vórtices mais organizado. Com relação a turbulência, comprova-se uma ação atenuadora ao reduzir os picos de energia que são encontrados nos espectros de carregamentos globais. Verificando que a turbulência age no sentido de minimizar os efeitos de vizinhança.

Figura 14 – Modelos dos edifícios altos e tomadas de pressão do estudo de Melo (2020)



Fonte: Melo (2020), adaptado

Grala (2020) estudou a resposta de estruturas paralelepípedicas esbeltas frente ao fenômeno de desprendimento de vórtices, com objetivo de propor uma metodologia para a NBR6123:1988, permitindo o dimensionamento de estruturas de seção transversal retangular frente ao fenômeno. Essa influência é tão importante no projeto estrutural que a arquitetura externa de edifícios proeminentes é desenvolvida de forma a mitigar os esforços gerados pelo desprendimento de vórtices. Essas estruturas, como torres e edifícios, são mais vulneráveis devido a sua esbeltez e forma rombuda. Foram realizados ensaios com dez modelos, com diferentes relações dimensionais e diferentes perfis de vento, visando à obtenção de coeficientes de sustentação e espectros da força de sustentação, comparando os resultados com um modelo em escala reduzida de um edifício real, para a validação do uso desses espectros obtidos em modelos simples, sem detalhes construtivos, revelando-se promissora a metodologia.

4 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Diversas estruturas, desde simples edificações até grandes arranha-céus, pontes, viadutos, estações rodoviárias, postos de gasolina, estádios de futebol, entre outros empreendimentos, estão diretamente em contato com a ação do vento e demais intempéries. Nesse sentido, essas estruturas em contato direto com a população devem receber atenção quanto a importância dos efeitos da ação do vento na etapa de dimensionamento, visto que essas forças induzidas pelo vento e as consequentes respostas das estruturas devem ser consideradas para que se possa garantir bons níveis de segurança e conforto durante sua vida útil (VANIN, 2011).

O vento é considerado um fenômeno meteorológico formado pelo movimento do ar na atmosfera, gerado através da influência de vários fatores e fenômenos naturais, é o movimento do ar próximo da superfície da Terra, caracterizado como vento natural, que se apresenta como uma leve brisa ou um forte vendaval. Sua causa imediata e principal, se deve às diferenças na pressão atmosférica, causadas pelo aquecimento não uniforme da superfície terrestre, por mudanças de temperatura no ar, na terra e na água, que induzem a movimentação das massas de ar mais quentes, as quais sobem devido à redução de sua densidade e são substituídas por massas de ar mais frias e de maior densidade. Assim, através das pressões desequilibradas, originam-se forças que deslocam parcelas do ar atmosférico das zonas de maior pressão para as de menor pressão (BLESSMANN, 1995; JÚNIOR, 2005; TREIN, 2005).

Fenômeno natural instável com o tempo, o vento apresenta flutuações aleatórias em torno de um valor médio de velocidades, definidas como rajadas, apresentando uma ocorrência sequencial de frequência e intensidade de curta duração (CHÁVEZ, 2006). Para a Engenharia Estrutural é de interesse conhecer a velocidade média do vento e as flutuações (rajadas) em torno dessa média, sendo que na prática, tais rajadas são determinadas como médias sobre pequenos intervalos de tempo, da ordem de segundos. Nesse contexto, denomina-se camada limite atmosférica a região na qual a velocidade média do vento é alterada por diversas causas. Nesta região as características do vento dependem principalmente da topografia do terreno, da forma, dimensões e distribuição dos obstáculos naturais ou artificiais e da variação da temperatura na direção vertical (BLESSMANN, 1988; TREIN, 2005).

4.1 CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA

A camada limite atmosférica (CLA) é a camada inferior da troposfera que está em contato com a superfície terrestre e na qual a velocidade do vento é diretamente afetada por diversas características do terreno. Nessa região, essa velocidade do fluxo do vento é influenciada pela topografia do terreno, pelas formas e dimensões dos obstáculos naturais ou artificiais, conhecidos como rugosidade superficial e compostos por diversas estruturas e edificações, e ainda, pela variação da temperatura na direção vertical (BLESSMANN, 1995).

A CLA é uma região descrita na Engenharia do Vento através da influência da superfície terrestre no escoamento do vento. As rugosidades superficiais do terreno influenciam na diminuição da velocidade de escoamento do vento natural nas regiões próximas à superfície, originando uma “camada de ar” onde a velocidade média do vento aumenta com a altura, até atingir um ponto no qual a rugosidade já não interfere no escoamento, na altura que delimita a espessura da CLA, denominada altura gradiente (z_g), dependente da rugosidade do terreno e do *fetch*, que é a distância a barlavento que o vento tem para percorrer sobre o terreno. A CLA está compreendida entre a superfície terrestre e a altura gradiente. Nesta camada também ocorre muita agitação mecânica do ar, turbulência, formando um grande número de turbilhões, responsáveis em grande parte, pelas flutuações do escoamento em torno da velocidade média (LOREDO-SOUZA *et al.*, 2004; VOGADO, 2018).

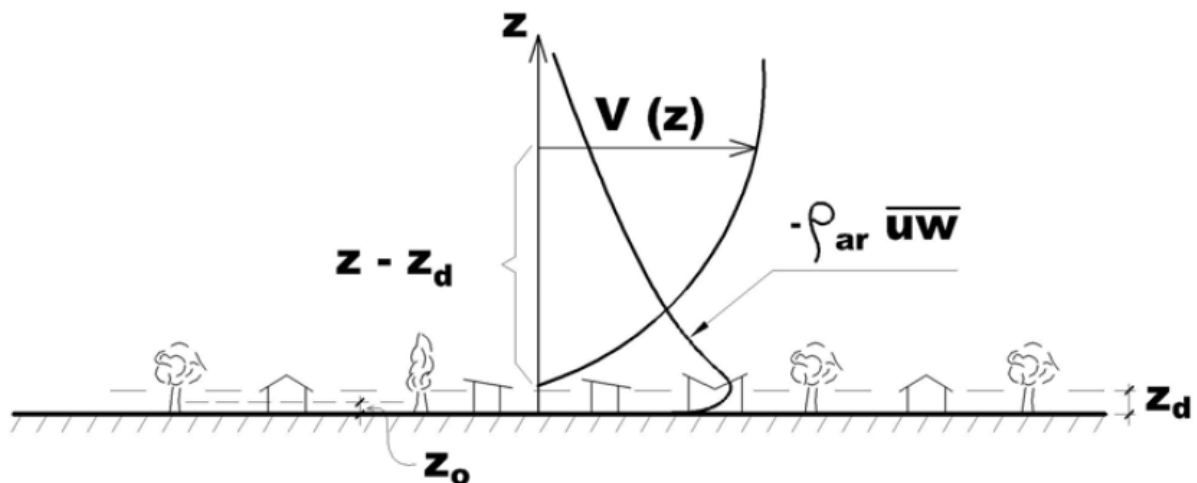
O escoamento do vento está diretamente relacionado com a rugosidade do terreno, que é responsável por afetar os perfis de velocidades médias e introduzir turbulência no escoamento. Nesse sentido, segundo Blessmann (1995), quanto maiores forem as rugosidades superficiais e mais importantes em número e dimensões os grandes obstáculos, presentes na vizinhança, maiores serão a agitação do ar e a altura de interesse, conseqüentemente. Assim, tanto a altura gradiente quanto a turbulência, serão maiores nos centros de grandes cidades quando comparados com esses fatores em campo aberto. A NBR6123:1988 apresenta valores típicos da altura gradiente para diferentes categorias de terreno: Cat. I ($z_g = 250\text{ m}$), Cat. II ($z_g = 300\text{ m}$), Cat. III ($z_g = 350\text{ m}$), Cat. IV ($z_g = 420\text{ m}$) e Cat. V ($z_g = 500\text{ m}$).

A CLA de zonas densamente urbanizadas, como nos centros de grandes cidades, é caracterizada pela presença de obstáculos artificiais, que ocasionam um regime de escoamento do vento turbulento. Sendo que essa camada limite turbulenta é a zona mais importante da CLA nas aplicações da aerodinâmica em construções civis e demais estruturas, visto que é nessa região

turbulenta da camada limite que estão abrangidas grande parte das edificações, compreender suas características é importante para a apropriada consideração das ações do vento sobre essas estruturas (BLESSMANN, 2011).

Para ventos fortes, com velocidades médias horárias superiores a 10 m/s, o escoamento é suficientemente turbulento, fazendo com que os efeitos térmicos possam ser desprezados. O número de Reynolds associado à CLA é grande o suficiente para qualquer velocidade do vento, ocasionando um escoamento sempre turbulento. A transferência de quantidade de movimento na CLA é dada pelas tensões aparentes de Reynolds ou tensões turbulentas, dividida em outras duas camadas, a camada superficial e a camada de Ekman (LOREDO-SOUZA *et al.*, 2004). De acordo com o autor, na Figura 15 está representado o perfil de velocidade média do vento, que é definido através da variação da velocidade do ar em função da altura dentro da CLA, causada pela rugosidade superficial do terreno.

Figura 15 – Perfil de velocidades médias do vento



Fonte: Loredou-Souza *et al.*, (2004)

Através da análise do perfil de velocidades médias do vento, apresentado na figura anterior, observa-se que próximo a superfície, o vento é desacelerado pelas forças de arrasto devido à rugosidade do terreno, que se originam tanto do atrito direto com a superfície quanto pelo efeito da turbulência, a qual gera uma transferência de quantidade de movimento entre camadas de ar que se deslocam horizontalmente. Tem-se que z_0 representa a rugosidade local do terreno, denominada rugosidade aerodinâmica, e o termo z_d , com espessura denominada deslocamento de plano-zero, representa uma fina subcamada da camada limite atmosférica (camada superficial) que está localizada junto à superfície terrestre, composta por obstáculos como árvores, sebes e algumas edificações, variando de um valor máximo no topo da altura média

dos obstáculos até um valor nulo na superfície terrestre. Em terrenos do tipo campo aberto ou sobre o mar, esta subcamada pode ser desprezada, pois a rugosidade da superfície é pequena. A camada de Ekman ($-\rho_{ar}\overline{uw}$) apresenta tensões de Reynolds decrescentes com a altitude: em seu topo, na altura gradiente, valor nulo, e no deslocamento de plano-zero, valor máximo. As forças de pressão e a força de Coriolis (proveniente da rotação da Terra), também atuam nesta camada (LOREDO-SOUZA *et al.*, 2004; BÊNIA, 2013).

Loredou-Souza *et al.* (2004) trataram das técnicas desenvolvidas para a correta simulação da camada limite atmosférica em túneis de vento, apresentando diferentes métodos para obtenção do perfil de velocidades médias do vento, da intensidade de turbulência, da escala integral e do espectro de potência, correspondentes às características do tipo de terreno em que a edificação em estudo deve ser inserida, através da implantação de métodos passivos e ativos.

4.2 VELOCIDADE MÉDIA DO VENTO

A velocidade média é um dado importante na determinação da ação do vento em edificações, devido à natureza turbulenta da camada limite atmosférica. A velocidade do vento em uma determinada localidade está constantemente flutuando, porém, uma avaliação da intensidade do vento pode ser obtida através da sua velocidade média (TREIN, 2005). De acordo com Vanin (2011), a velocidade média do vento é apresentada através de um perfil vertical, onde diferentes tipos de terreno, em conformidade com suas rugosidades superficiais, são representados pelas características típicas (reais) dos seus respectivos perfis verticais.

De acordo com Trein (2005), o significado do termo velocidade média do vento varia de país para país, necessitando ser cuidadosamente definido. No Canadá, a velocidade média é definida como sendo a máxima velocidade média registrada sobre o período de 1 hora. No Brasil, o período de registro da velocidade média se reduz a 3 segundos. Já nos Estados Unidos, as velocidades médias são calculadas a partir do mínimo período de tempo que leva uma massa de ar com uma milha de comprimento para passar por um ponto de registro. Por fim, na Europa, as velocidades médias do vento são obtidas sobre o período de 10 minutos.

Diversas expressões matemáticas são sugeridas na literatura com o intuito de modelar o perfil de velocidades média do vento na camada limite atmosférica. No entanto, duas formulações são comumente mais empregadas: o perfil em lei potencial e o perfil em lei logarítmica (LOREDO-SOUZA *et al.*, 2004; TREIN, 2005).

4.3 LEI POTENCIAL

A lei potencial é a mais difundida forma de cálculo do perfil de velocidades médias do vento entre duas alturas dentro da CLA, conforme equação (LOREDO-SOUZA *et al.*, 2004):

$$\frac{\bar{V}(z)}{\bar{V}(z_{ref})} = \left(\frac{z - z_d}{z_{ref}} \right)^p$$

Sendo:

$\bar{V}(z)$ – velocidade média do vento na altura de interesse (m/s);

$\bar{V}(z_{ref})$ – velocidade média do vento em uma altura de referência (m/s);

z – altura de interesse (m);

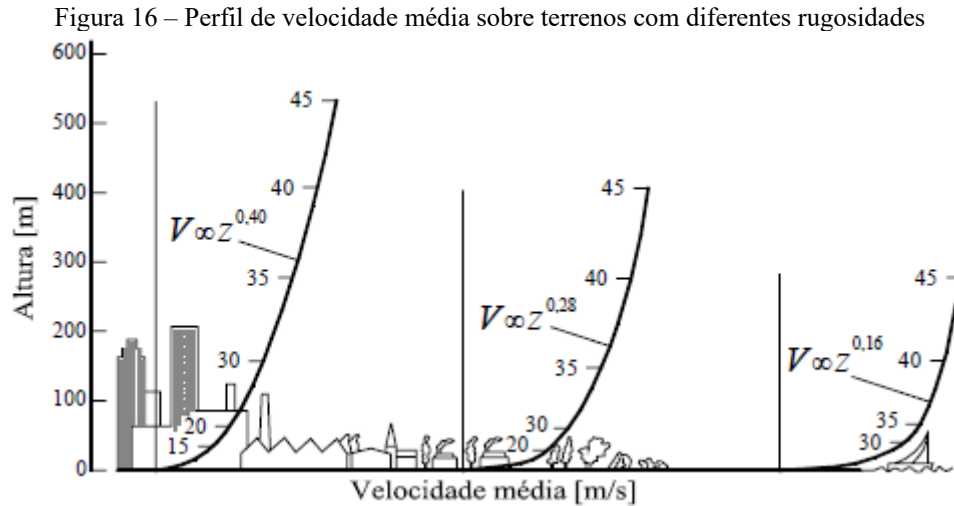
z_d – altura da subcamada sobre a superfície (m);

z_{ref} – altura de referência (m);

p – expoente que representa a classe de rugosidade superficial do terreno (adm).

A utilização da lei potencial apresenta algumas controvérsias, devido a não ter um embasamento teórico e não fornecer valores tão precisos nas regiões próximas à superfície. No entanto, autores com grande conhecimento no assunto, como Blessmann e Davenport, defendem seu uso em virtude da simplicidade de aplicação e adequada representação do comportamento do perfil de velocidades médias do vento que representa, podendo ser aplicada a rajadas a partir de 3 segundos, conforme descrito por Blessmann (2011).

Embora não represente muito bem a região muito próxima da superfície e não tenha uma justificativa teórica, a lei potencial é muito utilizada, pois representa bem o perfil médio de velocidades. O expoente p representa o tipo de terreno, ou seja, a rugosidade da superfície, variando de 0,11 para terrenos predominantemente planos, superfícies mais lisas como mar e lagos, a 0,34 para aglomerações, como centros urbanos com grande densidade de edifícios altos (LOREDO-SOUZA *et al.*, 2004). Em situações reais, Loredou-Souza *et al.* (2006) indicam que o expoente p varia entre 0,16 e 0,40, em função do tipo de terreno e da estabilidade da atmosfera, conforme o perfil de velocidade apresentado na Figura 16.



4.4 LEI LOGARÍTMICA

Uma alternativa para a determinação da velocidade média do vento é a lei logarítmica, que é embasada na lei de Prandtl, dada pela equação (LOREDO-SOUZA *et al.*, 2004):

$$\frac{\bar{V}(z)}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)$$

Sendo:

$\bar{V}(z)$ – velocidade média da partícula (m/s);

u_* – velocidade de corte (m/s);

k – constante de Von Kármán ($k \cong 0,4$);

z – altura da partícula de ar (m);

z_0 – altura de rugosidade do terreno (m).

A lei logarítmica fornece uma descrição mais precisa do vento nas regiões próximas à superfície. Entretanto, devido à complexidade de obtenção de seus parâmetros necessários e conforme sua aplicação a rajadas com intervalos de tempo acima de 10 minutos, acaba limitando sua utilização a apenas esses casos (BLESSMANN, 2011). Apesar de apresentar um bom ajuste na camada próxima à superfície e ser uma lei derivada da teoria, a lei logarítmica não representa bem a região superior da camada limite atmosférica, embora seja a forma mais correta para a descrição do perfil de velocidades médias do vento para grandes intervalos de tempo (LOREDO-SOUZA *et al.*, 2004; BLESSMANN, 1988).

4.5 INTERAÇÃO VENTO-ESTRUTURA

A interação vento-estrutura, decorrente da presença de edificações imersas na passagem do escoamento, está relacionada a diversos fenômenos de interação, ocasionando distintas ações estáticas e dinâmicas nas estruturas. Assim, determinados conceitos básicos são importantes para o entendimento dos efeitos de interferência da vizinhança, que podem acarretar, através dessas interações: efeito venturi, deflexão do vento na direção vertical, turbulência de esteira, efeito de proteção, martelamento, desprendimento de vórtices, galope, drapejamento, etc.

4.5.1 Número de Reynolds

O número de Reynolds (Re) caracteriza a forma do escoamento gerado no entorno dos corpos submetidos à passagem de um fluido e, em consequência, influencia a distribuição de pressões e a força exercida sobre o corpo, sendo utilizado na identificação do regime desse escoamento sobre uma superfície e definido como uma grandeza adimensional (LOREDO-SOUZA *et al.*, 2012). Obtido através da relação entre as forças de inércia ($V d$) e as forças de viscosidade (ν):

$$Re = \frac{V d}{\nu}$$

Sendo:

Re – número de Reynolds;

V – velocidade do escoamento;

d – dimensão característica;

ν – viscosidade cinemática do fluido.

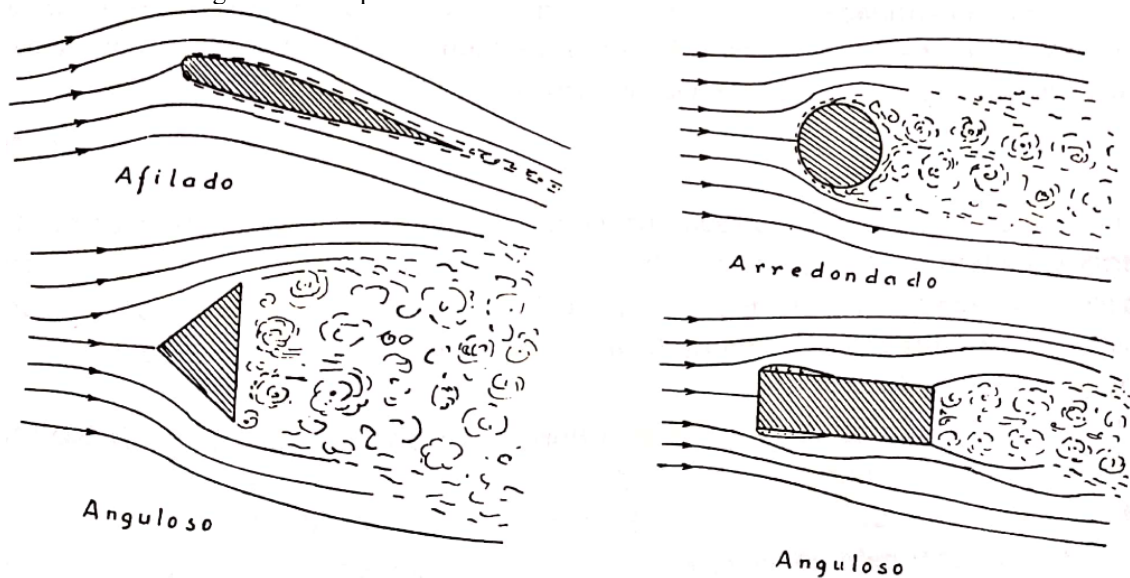
Praticamente para qualquer velocidade do vento, o número de Reynolds no interior da CLA assume valores tão elevados que se espera que o escoamento seja turbulento. O número de Reynolds elevado dos corpos rombudos (não aerodinâmicos) corresponde a uma alta resistência a passagem do fluido oferecida pela forma desses corpos, indicando que as forças de inércia são preponderantes em relação às forças de viscosidade, sendo os efeitos da viscosidade desprezíveis na maior parte do escoamento. Já o número de Reynolds pequeno, se deve à resistência de atrito dos corpos aerodinâmicos, correspondendo a uma maior influência dos efeitos da viscosidade (BLESSMANN, 2011).

4.5.2 Desprendimento de vórtices

O conceito de corpo aerodinâmico e não aerodinâmico (corpo rombudo), Figura 17, é necessário para o entendimento do fenômeno de desprendimento de vórtices. Segundo Blessman (2011), um corpo imerso em um escoamento é diferenciado através de certas classificações, relacionadas à sua resistência de forma, conforme as seguintes descrições:

- **Corpos afilados ou aerodinâmicos:** nesses corpos, os gradientes de pressões são suaves, não ocorrendo a separação do escoamento da camada limite sobre a superfície. A esteira formada, laminar ou turbulenta, é muito estreita, local onde é descarregada a vorticidade. A resistência de forma é muito pequena, causada diretamente pelo atrito, dependendo do número de Reynolds, da turbulência do escoamento e da rugosidade superficial. Exemplo: asas, hélices, turbinas, etc.;
- **Corpos rombudos:** nos corpos rombudos, os gradientes de pressão são fortes, ocorrendo descolamento do escoamento e formação de esteira muito mais larga e turbulenta. Essa esteira turbulenta formada acarreta o bloqueio do escoamento principal e maior resistência de forma em relação à resistência de atrito, influenciando na forma do escoamento e na distribuição de pressões. Os corpos rombudos são classificados ainda, em arredondados e angulosos;
- **Corpos rombudos arredondados:** nos corpos arredondados, o descolamento varia em limites amplos, conforme as condições do escoamento, características da camada, rugosidade superficial do corpo e do terreno, dimensões, forma e orientação do corpo no escoamento. Sendo assim, depende diretamente do número de Reynolds. Exemplo: telhados curvos, silos e etc.;
- **Corpos rombudos angulosos:** nos corpos angulosos, o descolamento da camada limite ocorre em pontos definidos, em arestas, sem grande influência do número de Reynolds. As esteiras são ainda mais largas e turbulentas do que as esteiras dos corpos arredondados. Exemplo: edificações paralelepípedicas e etc.

Figura 17 – Corpos aerodinâmicos e não aerodinâmicos em escoamento



Fonte: Blessmann (2011)

As edificações, em geral, são classificadas como corpos rombudos e esbeltos. Nesse sentido, quando imersas em escoamento de vento, acarretam o descolamento desse escoamento nos cantos vivos (arestas da edificação), ocasionando a formação de grandes e periódicos turbilhões descarregados na esteira a sotavento. Segundo Blessmann (2005), essa interação escoamento-estrutura causa um fenômeno conhecido como desprendimento de vórtices, propagando vórtices na esteira e causando efeitos nas estruturas, como forças na direção transversal à incidência do vento. Vórtices mais organizados geram níveis de força bem maiores, ocorrendo principalmente em estruturas de seção circular, sendo menos organizados quando se desprendem em corpos com seções triangulares, e ainda menos organizados quando se destacam de corpos com seções quadradas (GRALA, 2020).

Edificações com seções transversais retangulares são corpos rombudos com pronunciada separação do escoamento nos vértices das arestas frontais, sendo essa região de desprendimento caracterizada por uma fina camada instável de alto cisalhamento e vorticidade, seguindo em direção à esteira e formando vórtices concentrados. Quando o número de Reynolds atinge certo valor, são desprendidos turbilhões alternadamente de ambos os lados da edificação. Em alguns casos, esses desprendimentos são aleatórios, em outros, alternada e ordenadamente. Tais vórtices sincronizados, que se desprendem alternadamente de ambos os lados com uma frequência bem definida, constituindo duas filas de turbilhões, são denominados vórtices de Kármán. Os vórtices também podem se desprender aos pares, simetricamente, mas devido à configuração não ser estável, desprendem-se na forma alternada periódica (BLESSMANN, 2011; VOGADO, 2018).

Forças periódicas e oblíquas à direção do escoamento são geradas através do desprendimento de vórtices de Kármán. As componentes dessas forças tendem a produzir oscilações nas direções em que atuam: as forças longitudinais na direção do vento ocorrerão na frequência de desprendimento individual dos vórtices; enquanto as forças laterais na direção transversal do vento ocorrerão na frequência de desprendimento de cada par de vórtices. Quando a ocorrência da frequência de desprendimento de vórtices e do surgimento dessas forças laterais coincidir com a frequência natural da estrutura, ocorrerão efeitos ressonantes, podendo provocar grandes amplitudes de deslocamento (BLESSMANN, 2011; VOGADO, 2018).

4.5.3 Turbulência

A velocidade instantânea do vento ao longo da altitude é dividida em duas parcelas: uma média e uma flutuante, causada pela turbulência, que ocorrem em uma sequência aleatória de frequências e de intensidades. A turbulência é a agitação mecânica do escoamento médio causada pela rugosidade da superfície terrestre e pelos movimentos circulatorios da atmosfera, formando um grande número de turbilhões ou redemoinhos. As dimensões desses turbilhões gerados pela rugosidade, constituída por obstáculos naturais da superfície terrestre ou criados pelos seres humanos, variam desde a ordem de grandeza dos milímetros até a ordem de grandeza da altura da camada limite. Quando gerados pelos movimentos circulatorios, advindos das transformações termodinâmicas e do movimento de rotação da terra, provocando o desenvolvimento da força de Coriolis, os turbilhões podem atingir a ordem de grandeza de centenas de quilômetros (BLESSMANN, 1995; BLESSMANN, 2011).

A velocidade instantânea do vento é uma variável aleatória resultante da soma de duas componentes, média e flutuante (designada por rajadas), dadas na equação a seguir:

$$\underline{V}(\underline{x}, t) = \bar{\underline{V}}(\underline{x}) + \underline{v}(\underline{x}, t)$$

Sendo:

$\underline{V}(\underline{x}, t)$ – vetor velocidade instantânea em uma posição no espaço \underline{x} e instante t ;

$\bar{\underline{V}}(\underline{x})$ – vetor velocidade média;

$\underline{v}(\underline{x}, t)$ – vetor flutuação de velocidade.

O escoamento do ar em contato com a superfície dos obstáculos acarreta um retardo na velocidade, fazendo ocorrer a separação da camada limite e turbilhonando o ar a sotavento do obstáculo, em um processo de cascata dos turbilhões maiores aos menores. Nessa transferência,

ocorre a formação de rajadas que alteram o padrão de velocidade do vento, ocasionando flutuações em torno do seu valor médio, devido ao turbilhonamento atuante nas partículas de uma dada linha de corrente invadir a linha de corrente vizinha com uma diferença de velocidade, diminuindo ou acelerando a velocidade dessa partícula. Essa interferência no escoamento das partículas de ar ocorre em macroescala, sendo que grupos de partículas em movimento caótico quando turbilhonadas invadem regiões de correntes de outras partículas, alterando a quantidade de movimento contida no escoamento, ocasionando o aparecimento de forças no interior do escoamento. As rajadas mais violentas são formadas de turbilhões de dimensões bem menores, que se propagam local e desordenadamente, oferecendo pouca influência na resposta da estrutura devido a sua alta frequência. Em contrapartida, turbilhões que envolvam toda a estrutura ocasionam forças de baixa frequência e em fase com a estrutura, os quais tem maior influência na resposta estrutural (BLESSMANN, 1995; BLESSMANN, 2011).

A influência da turbulência é diferente em corpos de seção circular, sem arestas vivas, onde a separação do escoamento obedece ao regime de Reynolds em que o corpo se encontra, e em corpos rombudos de seção transversal quadrada ou retangular, compostos por arestas vivas, onde a separação ocorre sempre na própria aresta à barlavento. Nesses corpos prismáticos, quando a relação entre a dimensão na direção do escoamento e a dimensão na direção transversal ao escoamento for muito grande, presume-se a ocorrência do recolamento do escoamento nessa superfície, impedindo a formação dos vórtices de Kármán bem definidos (GRALA, 2020).

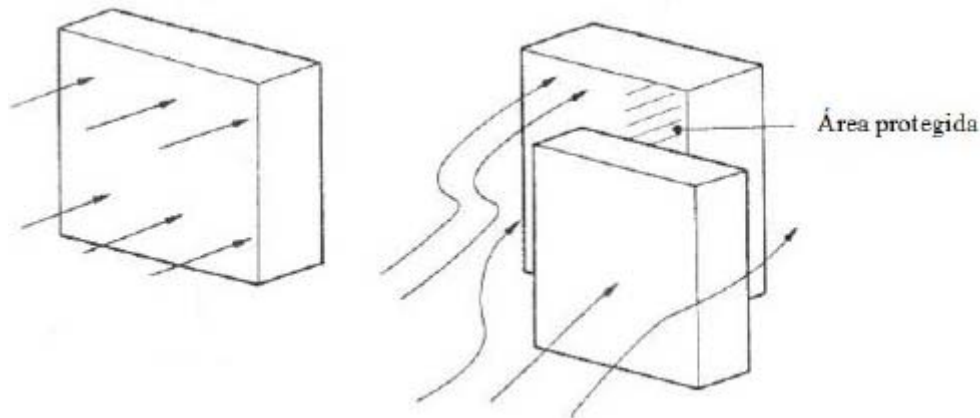
4.5.4 Esteira

Os efeitos de interferência causados pelas edificações imersas no escoamento do ar estão diretamente relacionados com a forma geométrica desses corpos. Assim, dependendo dessas dimensões e condições do escoamento, esses obstáculos desempenham a função de barreira ao escoamento de ar, ocasionando a separação da camada de ar na superfície de contato do corpo. Em consequência, alterando a distribuição de pressões através do turbilhonamento do ar, provocado pelo aparecimento de redemoinhos que se propagam através das correntes de escoamento a sotavento do corpo. Assim, descarregando a vorticidade do ar em uma região conhecida como esteira, caracterizada como uma assinatura da forma aerodinâmica do corpo a barlavento frente ao escoamento do vento (ALBERTI, 2015).

Nesse contexto, as edificações dispostas na vizinhança a barlavento de outra edificação podem interferir minimizando as ações provocadas pelo vento, ocasionando uma proteção normalmente entendida como benéfica, uma vez que minimiza, barrando ou desviando, o escoamento do vento incidente, sendo denominada como efeito de proteção. No entanto, como a maioria dos efeitos causados pela vizinhança, a intensidade do efeito de proteção depende de diferentes fatores, como o espaçamento entre as edificações e a relação de altura e largura entre as estruturas. A turbulência gerada na esteira também pode ocasionar efeitos adversos à proteção, como aumento das pressões nas edificações adjacentes e efeitos dinâmicos, como martelamento (ALBERTI, 2015; VOGADO, 2018).

Efeitos de proteção são observados mais intensamente nas edificações a sotavento, conforme o aumento da largura da edificação situada a barlavento, como pode-se observar na Figura 18. Geralmente, edificações mais altas, largas e finas, situadas a menores distâncias, tendem a aumentar a proteção, diminuindo a carga média de vento na edificação em estudo. Em contrapartida, edificações mais baixas, estreitas e mais afastadas ocasionam menor proteção (XIE & GU, 2004; BÊNIA, 2013).

Figura 18 – Efeito de proteção



Fonte: Houghton; Carruthers (1976) *apud* Bênia (2013), adaptado

A esteira, formada pela edificação a barlavento, sofre influência devido à intensidade da turbulência do escoamento do vento. Em um escoamento pouco turbulento, os vórtices despreendidos da edificação são bem correlacionados e causam cargas adversas no edifício situado a sotavento. No entanto, com o aumento da turbulência no escoamento, a força das flutuações da velocidade na esteira sofre uma diminuição. Nesse sentido, tem-se que o aumento da turbulência no escoamento incidente nas edificações vizinhas a barlavento causa menor interferência quando comparado aos efeitos de interferência, que são mais pronunciados em escoamento com pouca turbulência (KAREEM, 1987 *apud* BÊNIA, 2013).

4.6 EFEITOS DE VIZINHANÇA

As edificações presentes no entorno da edificação em estudo, denominada vizinhança, podem alterar significativamente o escoamento do ar, resultando em um efeito de proteção ou na intensificação das ações, tanto estáticas quanto dinâmicas, através dos efeitos de interferência da vizinhança, considerados na norma: Efeito Venturi, deflexão do vento na direção vertical e turbulência da esteira. A NBR6123:1988, em seu Anexo G – Efeitos de Vizinhança, apresenta os procedimentos para a consideração dos efeitos de vizinhança em edificações, adjacente a determinação das solicitações devidas à ação do vento.

De acordo com Kim *et al.* (2018), os efeitos de interferência causados pela presença de diversas edificações na vizinhança foram estudados por muitos pesquisadores nas últimas décadas, visto que as cargas de vento em edificações altas, em situação de agrupamento com outras edificações, podem ser diferentes daquelas em edificações isoladas, devido à interferência de tais efeitos causados pelas edificações vizinhas.

Essas edificações, localizadas nas imediações de uma edificação em estudo, podem diminuir ou aumentar as forças induzidas pelo escoamento do vento nessa estrutura, dependendo principalmente de sua geometria e arranjo, sua orientação com relação à direção do escoamento do vento e às condições do terreno a barlavento. Nesse sentido, tem-se que esses efeitos de interferência, causados pela vizinhança, devem ser analisados adequadamente, conforme as características e especificações de cada projeto e principalmente com relação ao arranjo das estruturas no entorno dessas edificações, que podem alterar diretamente o escoamento do vento e, assim, as cargas atuantes (KHANDURI *et al.*, 1998; CHO *et al.*, 2004).

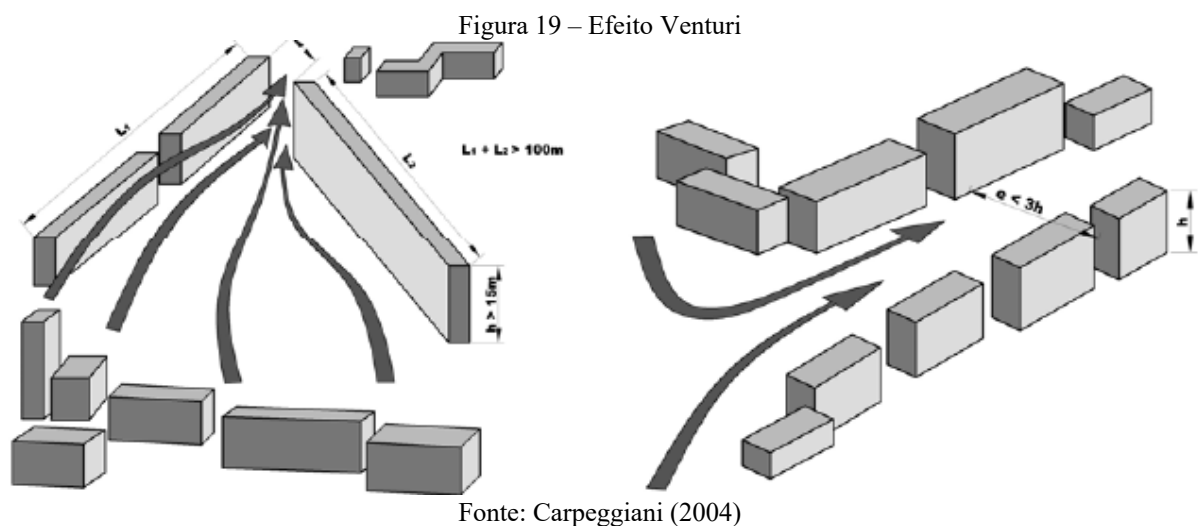
Conforme os resultados apresentados por Blessmann (1992), a variação dos coeficientes advindos da ação do vento em edificações depende ainda do número de edificações presentes na vizinhança e da localização específica dessas estruturas no sentido do escoamento do vento. Sendo assim, tem-se diversos fatores que influenciam nessa questão e que devem ser considerados na análise dos efeitos de vizinhança em edificações.

A seguir, são apresentadas as principais características e as configurações de ocorrência dos efeitos de interferência da vizinhança, considerados pela norma brasileira: Efeito Venturi, Deflexão do vento na direção vertical e Turbulência da esteira.

4.6.1 Efeito Venturi

De acordo com a NBR6123:1988, as edificações localizadas no entorno da edificação em estudo podem causar afunilamento do vento e a aceleração do escoamento do ar, dependendo de suas dimensões, forma e orientação, causando uma consequente alteração nas pressões na edificação, este efeito de vizinhança é denominado Efeito Venturi. A ocorrência desse efeito, conforme a Figura 19, está presente principalmente em edificações localizadas muito próximas, com indicações de casos que apresentaram coeficientes de pressão negativos (sucção), os quais superaram o valor de 2,0, em módulo, sendo verificado em paredes confrontantes de duas edificações, próximo à aresta de barlavento.

De acordo com Alberti (2015), a formação do Efeito Venturi é observada em configurações da vizinhança onde há a orientação regular desses mecanismos de interferência, quando esses elementos formam um caminho para o escoamento do vento, ocorrendo assim uma aceleração no escoamento de ar, devido a compressão do fluido ao passar por esse seguimento. Em consequência, observa-se a alteração na distribuição das pressões nas paredes dessas edificações, presentes em ruas e avenidas de regiões urbanas.

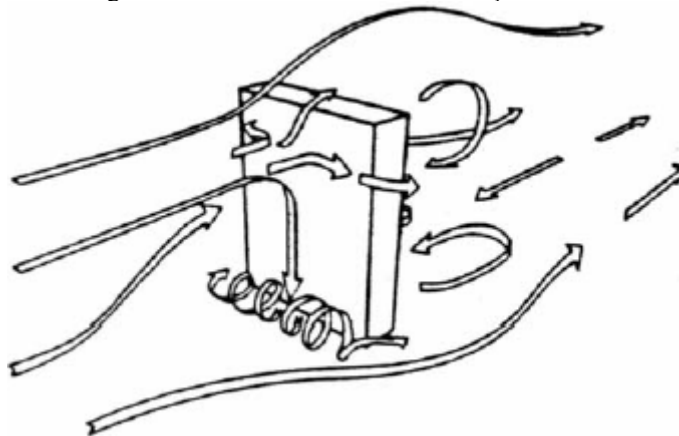


4.6.2 Deflexão do vento na direção vertical

O efeito de vizinhança denominado por deflexão do vento na direção vertical, segundo a NBR6123:1988, se caracteriza por edificações mais altas que defletem para baixo parte do vento que incide em sua fachada de barlavento, aumentando em consequência, a velocidade do vento em zonas próximas ao solo, onde podem estar situadas outras edificações. Nesse sentido, essas edificações mais baixas poderão ter as cargas aumentadas através da ação desse efeito provocado por edificações no entorno (Figura 20). Em situações mais desfavoráveis, como em edificações de menor altura, podem ser obtidos coeficientes de pressão variando de -1,5 a -2,0.

De acordo com Blessmann (2011), existem casos em que a existência de uma edificação mais alta a sotavento de uma outra mais baixa origina velocidades e sucções ainda maiores, visto que a edificação mais alta deflete para baixo, vento com velocidades maiores que as existentes normalmente nas proximidades do terreno. Essa situação se agrava com certas proporções críticas, conforme as alturas das duas edificações e seus afastamentos, que confinam o vórtice de base, ocasionando movimentos circulatorios mais velozes.

Figura 20 – Deflexão do vento na direção vertical

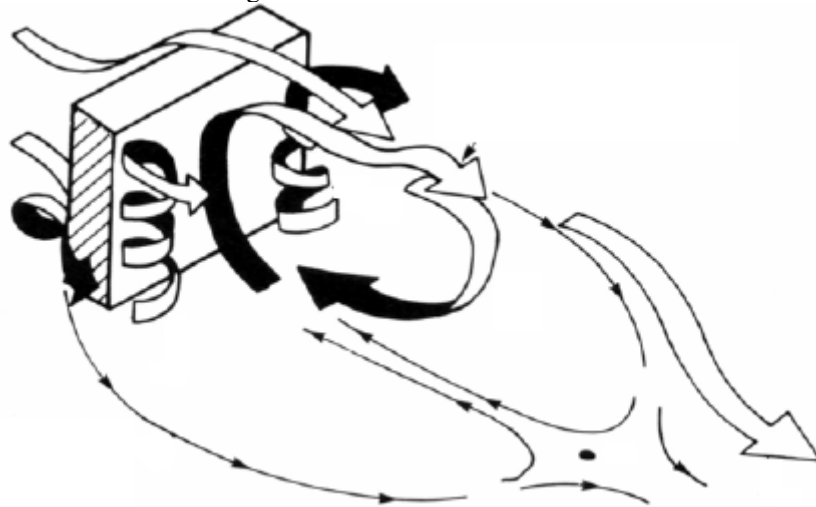


Fonte: Carpeggiani (2004)

4.6.3 Turbulência da esteira

Segundo a NBR6123:1988, o efeito de vizinhança denominado turbulência de esteira (Figura 21) ocorre quando uma edificação localizada a sotavento de outra edificação pode ser afetada sensivelmente pela turbulência gerada na esteira da edificação a barlavento, podendo causar, como consequência, efeitos dinâmicos consideráveis e alterações nas pressões. Esse efeito decorrente da turbulência da esteira é particularmente importante em edificações com coberturas, painéis de vedação e outras estruturas, feitas com materiais mais leves.

Figura 21 – Turbulência da esteira



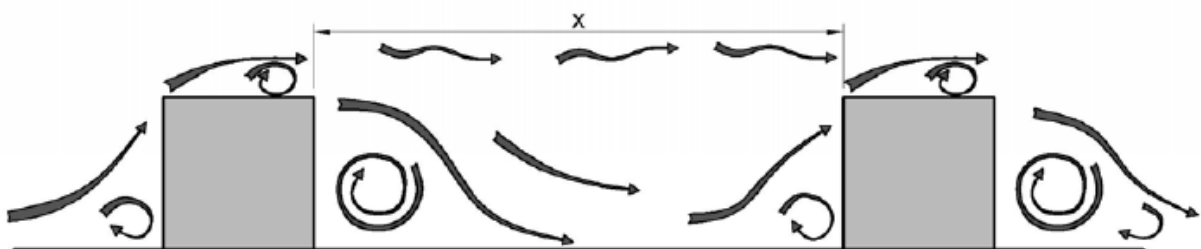
Fonte: Carpeggiani (2004)

Para edificações alinhadas na direção do vento, o efeito de vizinhança denominado turbulência da esteira apresenta três regimes distintos de escoamento do vento, caracterizados através das distâncias entre as edificações situadas a barlavento e sotavento. Sendo assim, tem-se os seguintes padrões de escoamento, mostrados no tópico a seguir: (a) regime de escoamento de corpo isolado, (b) regime de escoamento deslizante e (c) regime de escoamento de interferência de esteira (LOREDO-SOUZA *et al.*, 2009).

4.6.3.1 Regimes de escoamento

No **regime de escoamento de corpo isolado**, Figura 22, as edificações estão suficientemente afastadas de tal forma que os efeitos do vento são isolados. Um vórtice de pé de fachada forma-se em torno de cada edificação individualmente e o escoamento posterior à esteira recolhe ao solo, antes de atingir a próxima edificação. Neste caso, a distância de separação, x , é maior do que a soma dos comprimentos de separação a barlavento e de recolamento a sotavento. O efeito de proteção neste caso é menor e as forças em cada edificação individualmente são similares aos valores correspondentes a uma edificação isolada (LOREDO-SOUZA *et al.*, 2009).

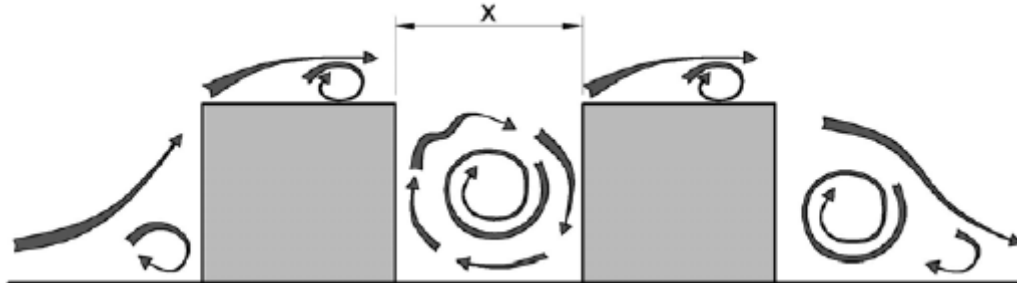
Figura 22 – Regime de escoamento de corpo isolado



Fonte: Carpeggiani (2004)

No **regime de escoamento deslizante**, Figura 23, as edificações são suficientemente próximas de tal forma que um vórtice estável pode se formar no espaço entre elas. O escoamento parece saltar ou deslizar sobre o topo das edificações. O efeito de proteção é grande e as forças nas edificações situadas a sotavento, individualmente, são muito pequenas, pois a edificação se encontra mergulhada na esteira da primeira (LOREDO-SOUZA *et al.*, 2009).

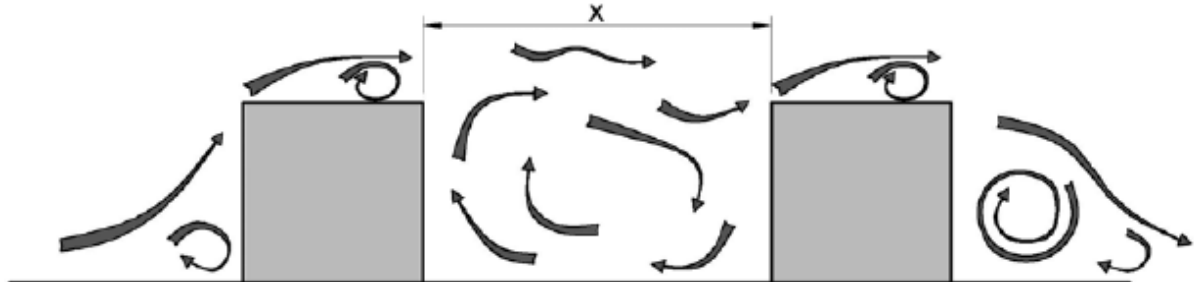
Figura 23 – Regime de escoamento deslizante



Fonte: Carpeggiani (2004)

O **regime de escoamento de interferência de esteira**, Figura 24, representa um estado intermediário entre os regimes de escoamento de corpo isolado e deslizante. Neste caso não há espaço suficiente para a formação completa da esteira, porém a separação é muito grande para que possa existir um vórtice estável (LOREDO-SOUZA *et al.*, 2009).

Figura 24 – Regime de escoamento de interferência de esteira



Fonte: Carpeggiani (2004)

4.7 MÉTODO ATRAVÉS DA NBR6123:1988

O vento é um fenômeno natural aleatório, suas ações são divididas em estáticas e dinâmicas. A resposta estática, resposta média, é causada pela velocidade média do escoamento, produzindo efeitos puramente estáticos. A resposta dinâmica, resposta flutuante, tem origem nas flutuações da velocidade em torno da velocidade média, produzindo oscilações significativas na direção da velocidade média em estruturas flexíveis. A ação do vento em edificações normalmente é avaliada como um acréscimo da componente estática do carregamento sobre as estruturas. No entanto, para edificações com período fundamental superior a 1 s, deve-se quantificar a resposta flutuante na direção do vento médio, através de uma análise dinâmica da estrutura.

A NBR6123:1988 – Forças devidas ao vento em edificações, apresenta procedimentos analíticos para o cálculo das forças devidas ao vento em diferentes tipos de estruturas. As ações estáticas são obtidas a partir de coeficientes aerodinâmicos presentes na norma, determinadas considerando uma velocidade básica do vento (V_0), adequada conforme a localidade, multiplicada pelos fatores S_1 , S_2 e S_3 , com a finalidade de determinar a velocidade característica do vento (V_k) e, assim, a pressão dinâmica (q), fundamental nesse processo.

A seguir, são apresentados os procedimentos do método estático disposto na NBR6123:1988.

4.7.1 Velocidade básica do vento

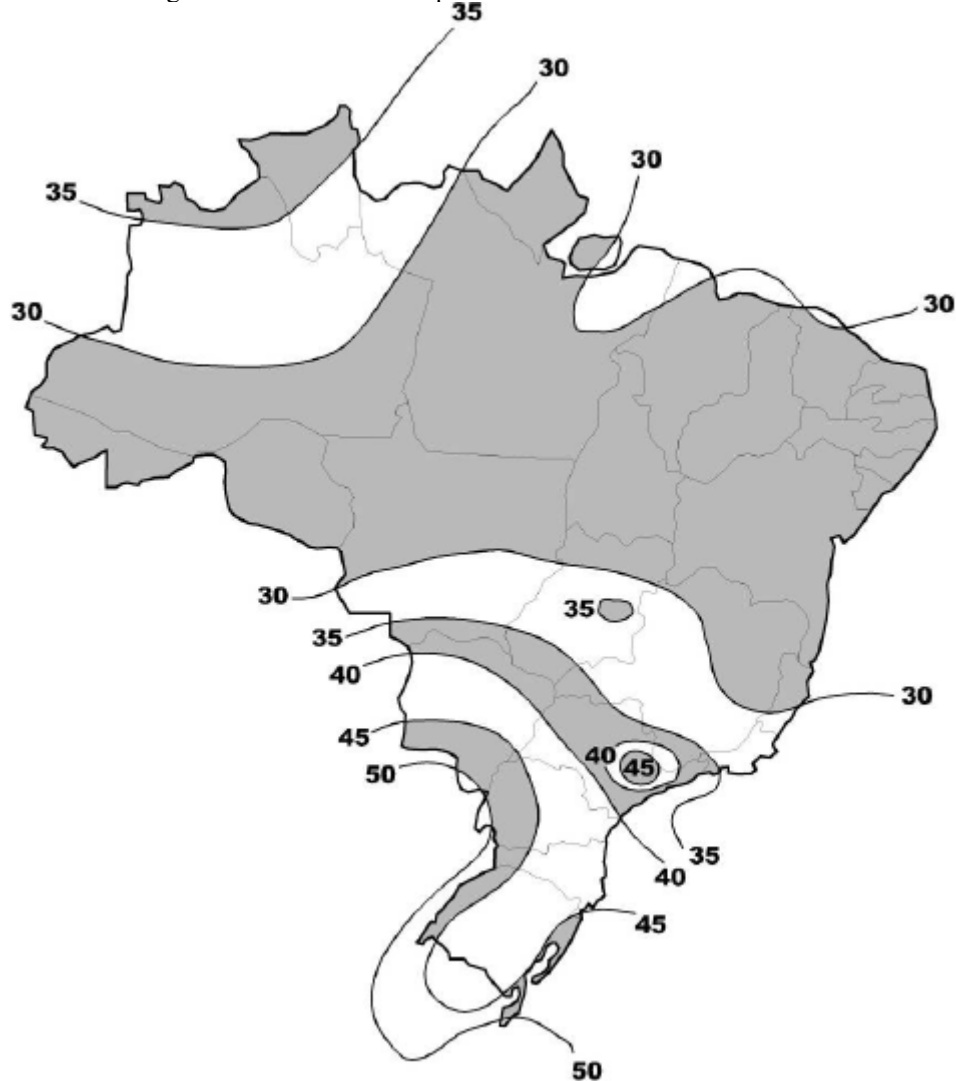
Embora sejam considerados efeitos estáticos do vento atuando nas edificações, a velocidade real e orientação do mesmo são variáveis, ou seja, o vento é uma ação dinâmica. A velocidade básica do vento (V_0) é a velocidade de uma rajada de 3 segundos, excedida em média uma vez em 50 anos, medida a uma altura de 10 metros acima do terreno, em campo aberto e plano, conforme indicado por Blessmann (1995).

A **velocidade básica do vento** é determinada utilizando-se o gráfico das isopletas da velocidade básica no Brasil, disposto na NBR6123:1988, apresentando as velocidades de referência do vento com base na velocidade de rajada de 3 segundos a 10 m de altura em terreno aberto, com período de retorno de 50 anos, variando de 30 m/s, na metade norte do país, a 50 m/s, no extremo sul (LOREDO-SOUZA, 2012). De acordo com o autor, não existe uma separação do tipo de evento climatológico que gerou cada registro de velocidade utilizado para elaboração do gráfico das isopletas. Sendo assim, uma tormenta elétrica (TS), um sistema de pressão extratropical

(EPS) ou mesmo um ciclone tropical (furacão), são tratados da mesma maneira e suas velocidades absorvidas sem diferenciação.

Portanto, conforme a região onde será construída a edificação, tem-se uma velocidade básica do vento diferente, velocidade que é determinada de acordo com os dados presentes no gráfico das isopletras, apresentado na Figura 25, e a critério do projetista.

Figura 25 – Gráfico das isopletras da velocidade básica no Brasil



Fonte: Loredou-Souza *et al.* (2006)

O gráfico das isopletras da velocidade básica regional do vento no Brasil é utilizado como ponto de partida para todos os cálculos de carga de projeto devida ao vento, tendo como base os dados do vento captados em diversos aeródromos localizados em dezenas de estações pelo país, dados referentes aos anos entre 1950 e 1974. Nesse sentido, constantes estudos são necessários e realizados para atualizar as velocidades regionais do vento em todo país, a fim de otimizar tais cargas devidas ao vento. Esse tópico, referente a estimativa da velocidade do vento projetada,

é importante, visto que pode levar à construção de estruturas inadequadas para seus ambientes ou, inversamente, ao uso excessivo de materiais de construção (VALLIS *et al.*, 2017).

De acordo com a NBR6123:1988, as forças estáticas devidas a ação do vento são determinadas através da velocidade básica do vento, que tem relação direta com a localidade onde a estrutura será construída, e através dos fatores S_1 , S_2 e S_3 , que englobam as características da região em estudo, levando a velocidade característica do vento (V_k). Através dessa velocidade, determinada através da multiplicação desses parâmetros, tem-se a pressão dinâmica (q), exercida pelo vento na estrutura, e definida pela seguinte expressão: $q = 0,613 * V_k^2$.

O **fator topográfico (S_1)** deve ser determinado observando-se as variações do relevo do terreno, segundo destacado no item 5.2 da NBR6123:1988, conforme as seguintes situações: terreno plano ou fracamente acidentado ($S_1 = 1,0$); taludes e morros alongados, nos quais pode-se admitir um escoamento de ar bidimensional (variável, conforme indicado na norma); ou ainda, vales profundos, protegidos de ventos de qualquer direção ($S_1 = 0,9$).

A rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno englobam o **fator S_2** , que 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 como um todo ou parte da edificação em consideração, conforme destacado no item 5.3 da NBR6123:1988. A rugosidade do terreno aumenta na medida que os obstáculos se tornam mais numerosos e de maiores dimensões, tendendo a diminuição da velocidade e aumento da turbulência.

De acordo com a NBR6123:1988, a rugosidade do terreno em torno dos empreendimentos em estudo deve ser classificada conforme cinco categorias preestabelecidas, sendo que tais categorias e características das rugosidades dos terrenos são apresentadas na Tabela 2. As dimensões da edificação, na determinação do fator S_2 , são representadas através das classes de edificações, partes de edificações e seus elementos, conforme consta na Tabela 3. O fator S_2 é o responsável por incorporar a influência da resposta flutuante, os efeitos das rajadas, permitindo a aplicação de um método puramente estático em edificações em que o período fundamental da estrutura seja igual ou inferior a 1 s.

Tabela 2 – Categorias das rugosidades dos terrenos

CATEGORIA	CARACTERÍSTICAS DAS RUGOSIDADES DOS TERRENOS
Categoria I	Superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5 km 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. A cota média do topo dos obstáculos é considerada inferior ou igual a 1,0m. Exemplos: zonas costeiras planas; pântanos com vegetação rala; campos de aviação; pradarias e charnecas; fazendas sem sebes ou muros.
Categoria III	Terrenos planos ou ondulados com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas. A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 3,0m. 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.
Categoria IV	Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada. A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 10m. Esta categoria inclui também zonas com obstáculos maiores e que ainda não possam ser consideradas na Cat. V. 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.
Categoria V	Terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados. A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual ou superior a 25m. Exemplos: florestas com árvores altas de copas isoladas; centros de grandes cidades; complexos industriais bem desenvolvidos.

Fonte: NBR6123 (1988)

Tabela 3 – Classes de edificações

CLASSES	CLASSES DE EDIFICAÇÕES
Classe A	Todas as unidades de vedação, 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 da 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 da edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50 metros.

Fonte: NBR6123 (1988)

Sendo assim, considerando tais diretrizes apresentadas, o fator S_2 usado no cálculo da velocidade característica do vento em uma altura z acima do nível geral do terreno é obtido segundo parâmetros tabelados, conforme apresentado na Tabela 4, presente na NBR6123:1988, relacionado às categorias e classes das edificações, e através da seguinte expressão que varia de acordo com a altura da edificação:

$$S_2 = b * F_R * \left(\frac{z}{10}\right)^p$$

Sendo:

S_2 – fator de rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno em uma altura z acima do nível geral do terreno (adm);

b – parâmetro (adm);

F_R – fator de rajada (adm);

z – altura acima do nível do terreno (m);

p – parâmetro (adm).

Tabela 4 – Determinação do Fator S_2

CATEGORIA	Z_g (m)	PARÂMETRO	CLASSES		
			A	B	C
I	250	b	1,10	1,11	1,12
		p	0,06	0,065	0,07
II	300	b	1,00	1,00	1,00
		F_r	1,00	0,98	0,95
III	350	p	0,085	0,09	0,10
		b	0,94	0,94	0,93
IV	420	p	0,10	0,105	0,115
		b	0,86	0,85	0,84
V	500	p	0,12	0,125	0,135
		b	0,74	0,73	0,71
		p	0,15	0,16	0,175

Fonte: NBR6123 (1988)

O **fator estatístico (S_3)** é baseado em conceitos estatísticos, considerando o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação. De acordo com a NBR6123:1988, na falta de uma norma específica sobre segurança nas edificações, ou de indicações correspondentes na norma estrutural, os valores mínimos para o fator S_3 são indicados na Tabela 5, presente na norma.

Tabela 5 – Determinação do Fator S_3

GRUPO	DESCRIÇÃO	S_3
1	Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, centrais de comunicação, etc.).	1,10
2	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação.	1,00
3	Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc.).	0,95
4	Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc.).	0,88
5	Edificações temporárias. Estruturas dos Grupos 1 a 3 durante a construção.	0,83

Fonte: NBR6123 (1988)

Sendo assim, definidos todos os fatores de acordo com a localização e as características da região onde será inserida a edificação em estudo, tem-se o cálculo da velocidade característica do vento (V_k), conforme disposto no item 4.2b da NBR6123:1988:

$$V_k = V_0 * S_1 * S_2 * S_3$$

Sendo:

V_k – velocidade característica do vento, em uma altura z (m/s);

V_0 – velocidade básica do vento (m/s);

S_1 – fator topográfico (adm);

S_2 – fator de rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno em uma altura z acima do nível geral do terreno (adm);

S_3 – fator estatístico (adm).

Portanto, considerando a determinação das pressões externas em uma edificação, visando a definição das solicitações na estrutura, tem-se a pressão dinâmica (q), conforme a variação da altura da edificação, segundo apresentado no item 4.2c da NBR6123:1988:

$$q = 0,613 * V_k^2$$

Sendo:

q – pressão dinâmica, em uma altura z (N/m²);

V_k – velocidade característica do vento, em uma altura z (m/s).

4.7.2 Forças devidas ao vento

A ação do vento nas edificações é similar a ação do escoamento do vento ao incidir sobre um corpo qualquer, o vento ao incidir sobre um edifício é forçado nas faces da estrutura, criando regiões de sobrepressão e sucção, ou seja, regiões de pressões externas positivas e negativas na superfície de contorno desse corpo. Essas pressões são geradas pelo impacto direto do vento sobre o volume do corpo e pelos fenômenos de escoamento ali desenvolvidos, sendo os resultantes dessas distribuições de forças e pressões, formado no entorno das edificações, denominados coeficientes aerodinâmicos (ALBERTI, 2015).

De acordo com Blessmann (2011), os coeficientes aerodinâmicos se alteram em casos de modelos bi ou tridimensionais, assim é necessário ter o conhecimento de alguns conceitos para estudar a influência dessas proporções no estudo da ação do vento em edificações:

- Vento: incide normal ou quase normalmente a uma fachada;
- Seção transversal: fachada perpendicular à direção do vento (ou, em vez da fachada, uma seção a ela paralela e de maior área);
- Seção longitudinal: fachada paralela à direção do vento (ou uma seção a ela paralela, se de maior área);
- Largura: dimensão perpendicular à direção do vento;
- Profundidade: dimensão paralela à direção do vento;
- Altura: dimensão vertical.

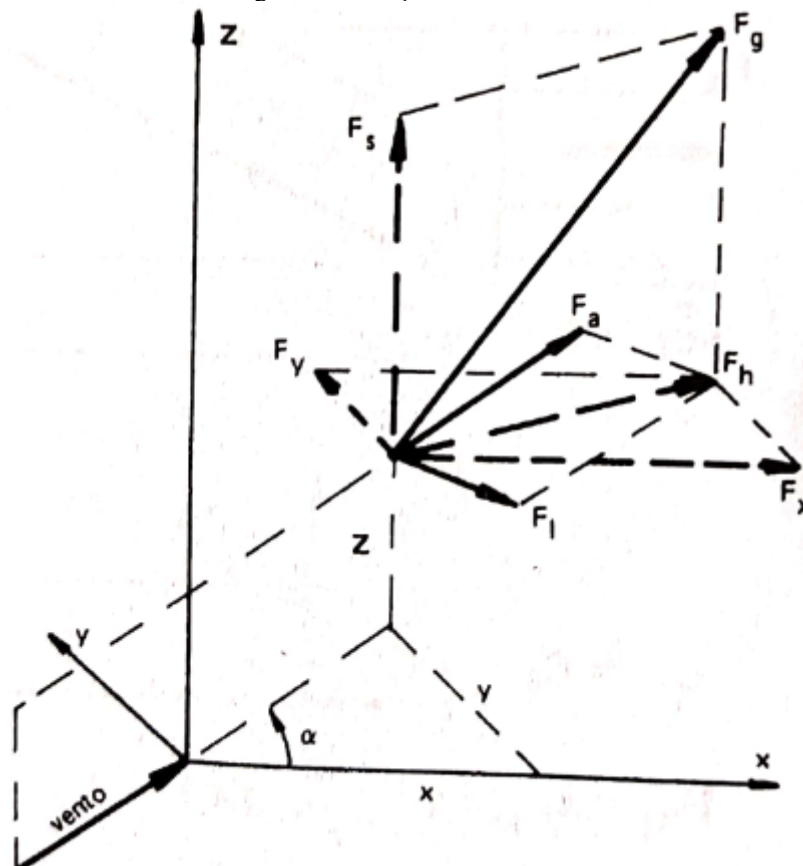
Nesse sentido, tem-se que as edificações idealizadas de forma paralelepípedica podem ser classificadas conforme suas proporções em: alteadas, quando a altura é a dimensão preponderante em relação a largura e a profundidade; alargadas, quando a largura é a dimensão preponderante em relação às outras dimensões; e profundas, quando a profundidade é a dimensão preponderante (BLESSMANN, 2011).

A NBR6123:1988 define os coeficientes aerodinâmicos em: coeficientes de pressão, coeficientes de forma e coeficientes de força. Os coeficientes de pressão são dados tanto para as superfícies externas quanto para as superfícies internas das edificações, devido à força do vento depender da diferença de pressão nessas faces opostas da edificação. Os coeficientes de forma são definidos conforme a força do vento sobre um elemento plano da edificação de área A que atua em direção perpendicular ao mesmo. Os coeficientes de força são definidos de

acordo com a força global (F_g) do vento sobre uma edificação ou parte dela, obtida pela soma vetorial das forças do vento que atuam na estrutura. De acordo com Blessmann (2011), os sinais dos coeficientes aerodinâmicos indicam o estado da atuação do vento na estrutura: positivos quando correspondem a sobrepressões e negativos quando se referirem a sucções.

As forças estáticas induzidas pela ação do vento sobre edificações são devidas à velocidade média do vento e aos turbilhões existentes em um vento turbulento. Essa força global (F_g) é gerada como consequência das pressões exercidas pelo vento sobre uma edificação, quando esse determinado escoamento interage com tais obstáculos originando no domínio da aerodinâmica, um conjunto de forças que são decompostas em uma componente vertical (F_s), denominada força de sustentação, e uma componente horizontal (F_h), que ainda é decomposta em duas componentes paralelas aos eixos (F_x e F_y) ou em uma força na direção longitudinal do escoamento (força de arrasto, F_a) e uma força na direção transversal à direção do escoamento (força lateral, F_l), conforme decomposições apresentadas na Figura 26. Tem-se ainda um momento torçor, gerado pelo desvio destas forças em relação ao centro de torção da seção da edificação (CAMARINHA, 2008; BLESSMANN, 2011; VANIN, 2011).

Figura 26 – Forças aerodinâmicas



Fonte: Blessmann (2011)

As forças devidas a ação do vento, definidas através da NBR6123:1988, são obtidas a partir de coeficientes aerodinâmicos contidos em ábacos ou relatórios de pesquisas. A norma tem seu formato principal baseado em um procedimento quase-estático, com as forças determinadas a partir do produto de uma pressão dinâmica (q), um coeficiente aerodinâmico (C) e uma área de referência (A). Sendo assim, uma componente qualquer da força global atuando em edificações devido à ação do vento, é obtida através da seguinte equação:

$$F = c_f q A$$

Sendo:

F – força global (N);

c_f – coeficiente de força, especificado em cada caso: c_x, c_y, etc (adm);

q – pressão dinâmica (N/m²);

A – área de referência, especificada em cada caso (m²);

Nesse contexto, a força de arrasto, que é a força atuante na direção longitudinal do escoamento do vento, é definida através da NBR6123:1988 pela seguinte equação:

$$F_a = c_a q A_e$$

Sendo:

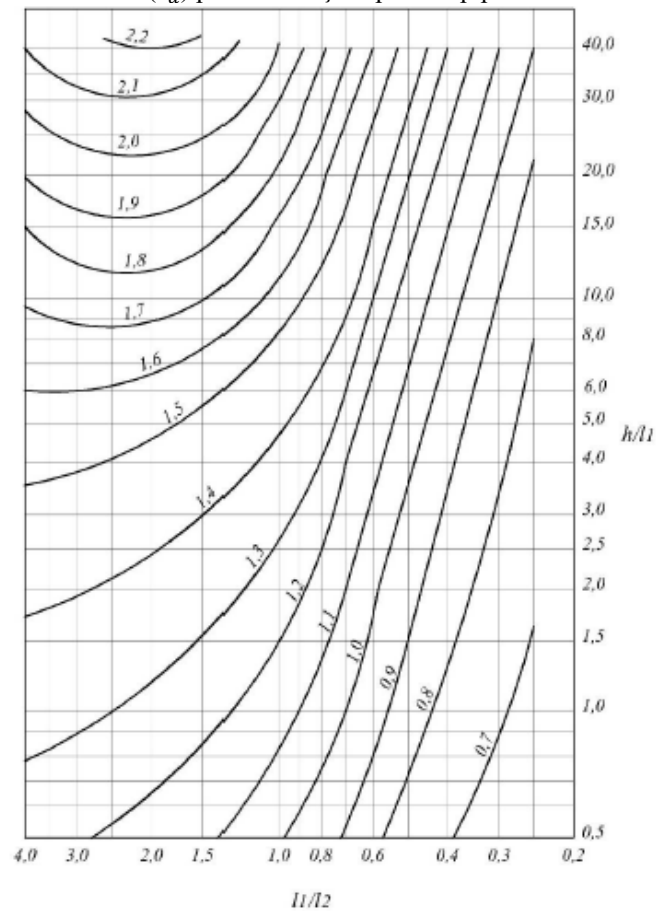
F_a – força de arrasto (N);

c_a – coeficiente de arrasto (adm);

A_e – área frontal efetiva: área da projeção ortogonal da edificação, estrutura ou elemento estrutural sobre um plano perpendicular à direção do vento (“área de sombra”) (m²).

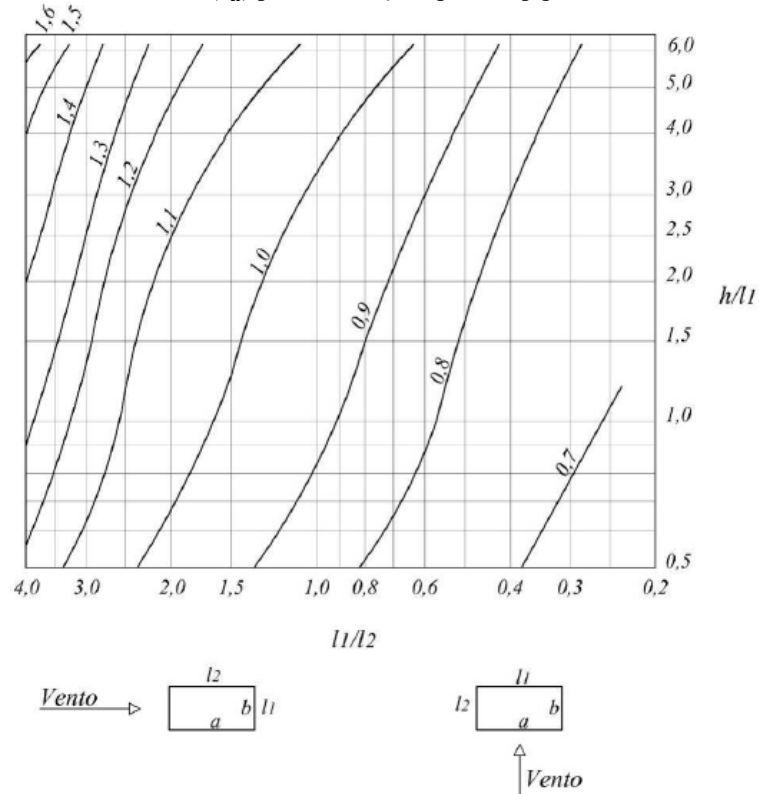
O coeficiente de arrasto (c_a) pode ser obtido através de ábacos presentes na NBR6123:1988, aplicáveis a corpos de seção constante ou fracamente variável e definido para vento incidindo perpendicularmente a cada uma das fachadas de edificações paralelepípedicas. Em vento de baixa turbulência deve-se usar o gráfico representado na Figura 27. Em vento de alta turbulência, casos excepcionais, satisfeitas as exigências do item 6.5.3 da norma, deve-se usar o gráfico representado na Figura 28. Tais coeficientes de arrasto são dados nesses gráficos em função das relações h/l_1 e l_1/l_2 , conforme indicado.

Figura 27 – Coeficiente de arrasto (c_a) para edificações paralelepípedicas em vento de baixa turbulência



Fonte: Loredou-Souza *et al.* (2006)

Figura 28 – Coeficiente de arrasto (c_a) para edificações paralelepípedicas em vento de alta turbulência



Fonte: Loredou-Souza *et al.* (2006)

De acordo com Loredou-Souza *et al.* (2006) e conforme apresentado, a NBR6123:1988 dispõe de coeficientes de arrasto para duas situações bem distintas: primeiramente, caracterizando-se em vento de baixa turbulência, quando a edificação está submetida a escoamento de ar moderadamente suave, aproximadamente o tipo de vento que aparece em campo aberto e plano; em seguida, para a condição em que a edificação está imersa em escoamento do vento de alta turbulência, típico em centros de grandes cidades. Em alta turbulência, há uma diminuição das sucções nas paredes de sotavento de edificações de planta retangulares, exceto para edificações com relação profundidade/largura da ordem de 1/3 ou menos, conforme indicado na norma no tópico 6.5 – Reduções nos coeficientes de forma e de arrasto.

4.7.3 Fator de vizinhança

No estudo dos efeitos de vizinhança, causados pelas edificações situadas nas proximidades, tem-se o fator de vizinhança (*FV*), parâmetro fundamental devido aos efeitos ponderáveis de interação que podem ser causados, aumentando as sucções, forças e momentos. Em aglomerações urbanas, onde vários edifícios altos e outros tipos de edificações encontram-se agrupados em grande proximidade, cada estrutura pode influenciar o campo aerodinâmico e, portanto, as forças do vento agindo sobre os outros ao redor (LOREDO-SOUZA *et al.*, 2009).

Os efeitos de interferência em edificações altas, causadas pela interação do escoamento do vento com essas estruturas, podem aumentar a carga de vento nessas edificações, quando comparados aos dados encontrados na condição isolada dessa estrutura. Resultando em danos às construções, caso esses efeitos de vizinhança não sejam avaliados adequadamente, sendo que é conhecido, através de dados da literatura, que a mudança da carga de vento na edificação em estudo está diretamente ligada à alteração do campo de escoamento ao seu redor, causado pelas edificações interferentes na vizinhança (HUI *et al.*, 2013).

Para se determinar as solicitações nas edificações, considerando o efeito de vizinhança, deve-se utilizar as indicações constantes no Anexo G da NBR6123:1988. Segundo a norma, existem situações onde é necessário considerar a influência de edificações situadas na vizinhança da edificação em estudo, visto que tais edificações podem causar aumento das forças do vento. Esse aumento ocorre de modos diferentes, conforme descrito anteriormente: por Efeito Venturi, por Deflexão do vento na direção vertical e pela Turbulência da esteira.

Os efeitos de vizinhança sobre as edificações são considerados nos cálculos por meio do fator de vizinhança, parâmetro calculado através de procedimentos presentes na NBR6123:1988, ou determinados por meio de ensaios em túnel de vento, onde são reproduzidas as condições de vizinhança e as características do vento natural que possam influenciar na ação do vento. Considerando a impossibilidade de indicar valores numéricos para os efeitos de vizinhança, de um modo genérico e normativo, considerando ainda a possibilidade de alterações desfavoráveis nas condições de vizinhança no decorrer dos anos.

De acordo com a NBR6123:1988, o procedimento de cálculo do fator de vizinhança traz uma indicação aproximada dos aumentos que os coeficientes aerodinâmicos podem sofrer através da consideração dos efeitos de vizinhança no edifício em estudo. Sendo assim, a Tabela 6 apresenta alguns parâmetros importantes que devem ser considerados nesses cálculos.

Tabela 6 – Parâmetros para determinação do FV
PARÂMETROS
<p>s – o afastamento entre os planos das faces confrontantes de duas edificações altas vizinhas, sendo $a \times b$ as dimensões em planta das edificações ($a \times b$ entre 1x1 e 4x1).</p>
<p>d^* – a menor das duas dimensões:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lado menor b; • Semi-diagonal $= \frac{1}{2}\sqrt{a^2 + b^2}$
<p>FV – Fator de efeito de vizinhança, definido pela relação:</p> $FV = \frac{C \text{ na edificação com vizinhança}}{C \text{ na edificação isolada}}$
<p>C – Coeficiente aerodinâmico em estudo ($C_a, C_e, C_{pe \text{ médio}}$)</p>
<p>Fonte: NBR6123 (1988)</p>

Considerando tais parâmetros, a NBR6123:1988 indica valores representativos de FV , definidos conforme cada situação de vizinhança, como consta na Tabela 7. Para valores intermediários de s/d^* deve-se interpolar linearmente. Os fatores de efeito de vizinhança encontrados devem ser considerados até a altura do topo dos edifícios vizinhos.

Tabela 7 – Valores representativos de FV

FATOR DE VIZINHANÇA	
Para coeficiente de arrasto (C_a), coeficiente de forma (C_e) e para valor médio do coeficiente de pressão ($C_{pe\ médio}$), em paredes frontantes (faces paralelas ao vento):	$\frac{s}{d^*} \leq 1,0 \rightarrow FV = 1,3$ $\frac{s}{d^*} \geq 3,0 \rightarrow FV = 1,0$
Para coeficiente de forma (C_e) e para valor médio do coeficiente de pressão ($C_{pe\ médio}$), na cobertura :	$\frac{s}{d^*} \leq 0,5 \rightarrow FV = 1,3$ $\frac{s}{d^*} \geq 3,0 \rightarrow FV = 1,0$

Fonte: NBR6123 (1988)

De acordo com a NBR6123:1988, para elaboração das recomendações para o cálculo dos efeitos de vizinhança, os ensaios realizados como base foram feitos com dois ou alguns poucos modelos de alturas aproximadamente iguais. Sendo que, para casos diferentes, em que haja muitos edifícios vizinhos nestas condições, os fatores de vizinhança geralmente serão menores, podendo ficar abaixo de 1,0. E ainda, podem haver casos em que as incidências do vento causem valores de FV próximos aos indicados, principalmente quando há “vazios” nas vizinhanças do edifício em estudo. Essas considerações da norma representam a variedade de resultados que podem ser adquiridos conforme cada situação de vizinhança, certificando a necessidade de estudos individuais de acordo com cada projeto e a adoção de ensaios em túnel de vento.

Sendo assim, considerando que o fator de vizinhança é definido como a razão dos coeficientes da força do vento de uma edificação com vizinhança pelos coeficientes dessa edificação isolada, tem-se, conforme as características do entorno de cada estudo, situações onde o escoamento do vento pode diminuir ou aumentar sua ação nos edifícios, induzido pelas edificações vizinhas. Se o FV for maior que 1, a força do vento na edificação em estudo é majorada pelas edificações vizinhas; caso FV seja menor que 1, a força do vento será reduzida através desses efeitos de interferência das edificações no entorno (CHO *et al.*, 2004).

5 ACERVO DO LAC

O Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC/UFRGS) dispõe de um acervo com uma extensa base de dados referente a estudos sobre efeitos estáticos e dinâmicos. Esses dados foram adquiridos nas simulações do vento natural atuando em diversas estruturas da construção civil, composto por uma variedade de edifícios com diferentes formas arquitetônicas, ensaiados em túnel de vento com diferentes configurações de vizinhança. Compreendendo em uma rica base de dados referente à ação do vento em edifícios altos, considerando ainda os efeitos causados pelas edificações interferentes.

Nesse contexto, iniciando os estudos referentes aos efeitos de interferência da vizinhança, buscou-se no vasto acervo do LAC, edifícios altos com diferentes seções transversais e diferentes configurações de vizinhança, representando diferentes densidades de vizinhança no entorno das edificações em estudo. A finalidade é compreender, através da análise desses diversos ensaios, como os coeficientes se comportam nessas situações, comparando esses dados adquiridos em túnel de vento através de diferentes densidades de vizinhança. Esse estudo comparativo se deve a importância desses coeficientes na determinação das forças devidas ao vento através da norma, buscando-se dar início a um estudo para estabelecer critérios mais abrangentes que incluam outros parâmetros para a determinação desses coeficientes.

Foram captados dados de 50 edifícios ensaiados no Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann, em uma ou mais configurações de vizinhança, nomeados de E01 a E42, destacando que edifícios ensaiados no mesmo estudo ou com a mesma configuração de vizinhança, foram diferenciados em A e B. A Tabela 8 apresenta as principais características dos edifícios e das configurações estudadas, composta pelos expoentes p utilizados em cada ensaio, as dimensões da seção transversal e altura dos edifícios. Os modelos foram ensaiados com vizinhança, sendo que em algumas configurações foram utilizados perfis de velocidades mistos, compreendendo em diferentes expoentes para certas incidências do vento.

As variadas seções transversais, dimensões de referência dos edifícios e representações das configurações de vizinhança de cada estudo estão dispostas no Anexo A. São apresentados edifícios com fachadas planas, saliências nas fachadas e com variações nas seções transversais, edifícios vizinhos situados um ao lado do outro, diferentes ou idênticos, caracterizando variadas densidades de vizinhança.

Tabela 8 – Principais características dos edifícios do acervo do LAC

Edifício	p	Dimensões		
		B_x (m)	B_y (m)	H (m)
E1 (A)	0.23	25.80	17.58	45.65
E1 (B)	0.23	25.80	24.30	45.65
E2	0.23/0.34	26.49	26.46	67.08
E3	0.23	39.92	19.52	94.33
E4	0.23	60.85	37.98	74.71
E5	0.11/0.23/0.34	34.73	21.00	59.74
E6	0.23	56.55	25.65	64.80
E7	0.23/0.34	30.32	11.98	67.98
E8 (A)	0.23	41.65	17.43	144.12
E8 (B)	0.23	49.96	17.17	66.26
E9 (A)	0.23	51.76	28.96	120.00
E9 (B)	0.23	52.32	20.65	120.00
E10	0.23/0.34	68.93	37.64	110.72
E11	0.23	43.40	17.95	170.50
E12	0.23	55.81	29.20	109.75
E13	0.23	51.90	20.27	152.38
E14	0.23	29.54	17.25	102.36
E15	0.23	74.09	22.06	120.17
E16	0.11/0.23	34.23	30.85	168.92
E17	0.23	32.73	17.46	118.65
E18	0.11/0.23/0.34	75.60	22.53	125.50
E19	0.23	39.25	23.70	126.98
E20	0.23	52.70	19.31	78.85
E21 (A)	0.23	86.21	25.94	97.03
E21 (B)	0.23	32.37	17.45	71.58
E22 (A)	0.23	75.22	19.57	108.53
E22 (B)	0.23	43.57	15.69	79.80
E23	0.23	75.51	24.75	112.12
E24 (A)	0.23	42.66	20.00	142.06
E24 (B)	0.23	35.12	20.24	149.51
E25	0.23	42.38	38.60	107.74
E26 (A)	0.11/0.23	70.65	36.00	119.95
E26 (B)	0.11/0.23	62.85	36.00	87.95
E27	0.23	47.58	19.10	151.75
E28	0.34	50.26	26.90	84.78
E29	0.34	38.86	15.24	111.22
E30	0.23	20.95	17.06	111.83
E31	0.23	47.96	27.47	133.00
E32	0.11/0.23	38.77	24.99	160.95
E33	0.11/0.23	42.42	23.48	111.95
E34	0.11/0.23/0.34	22.40	20.85	82.00
E35	0.23	21.31	18.81	106.88
E36	0.23	41.50	27.13	86.81
E37	0.23	35.82	35.82	170.99

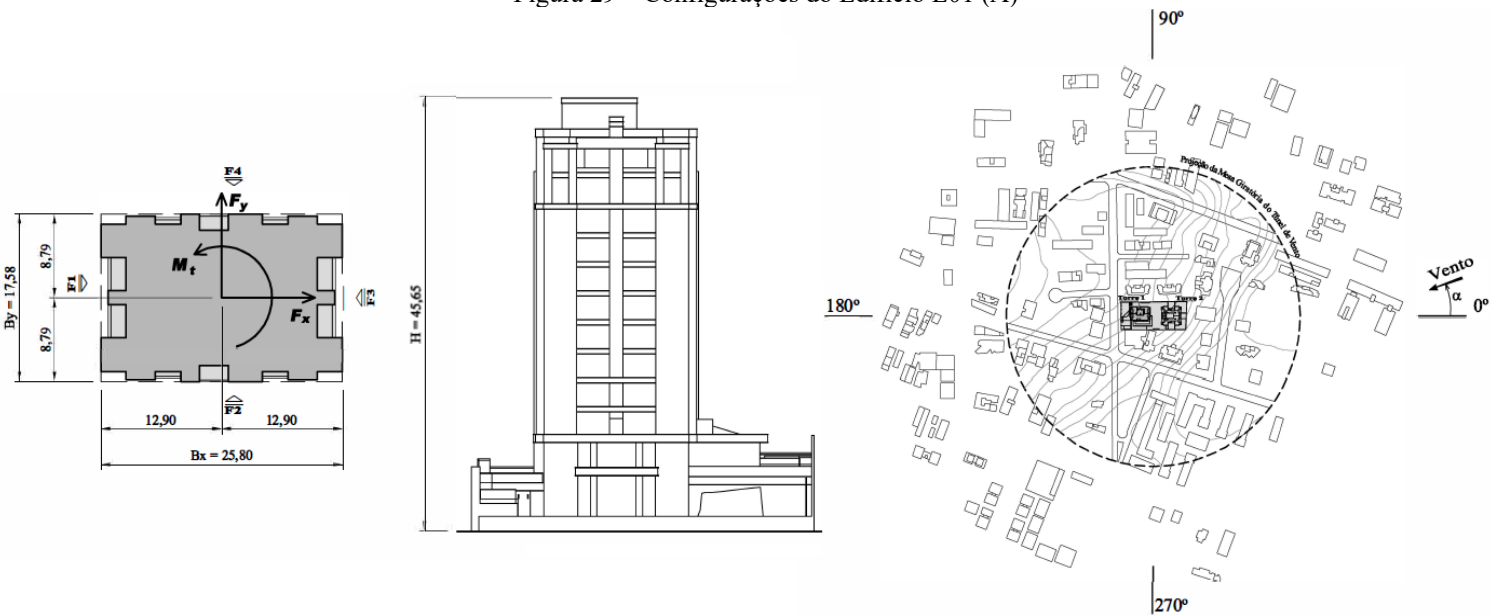
E38 (A)	0.23	25.07	24.69	77.00
E38 (B)	0.23	31.16	23.13	77.00
E39	0.23	22.70	22.50	74.10
E40	0.23	44.10	15.90	88.19
E41	0.23	27.53	10.18	60.83
E42	0.23	15.38	13.36	48.30

Fonte: Acervo do LAC

O procedimento adotado nesse início de estudo seguiu metodologia utilizada por Carini (2017). Inicialmente, analisaram-se os resultados obtidos para cada edifício ensaiado no túnel de vento do LAC, conforme exemplificado para o edifício E01 (A) (Figura 29), onde captaram-se as dimensões do edifício e as características da vizinhança, dispondo esses dados em uma planilha. A Figura 30 apresenta os resultados obtidos para o edifício E01 (A) para cada ângulo de incidência do vento ensaiado, representando os coeficientes de força calculados através das séries temporais de pressões. Nessa etapa, foram selecionados os dados referentes ao maior valor absoluto dos coeficientes de força nas duas direções, $C_{x,cv}$ e $C_{y,cv}$, para cada edifício listado na Tabela 8, inserindo-os em uma planilha.

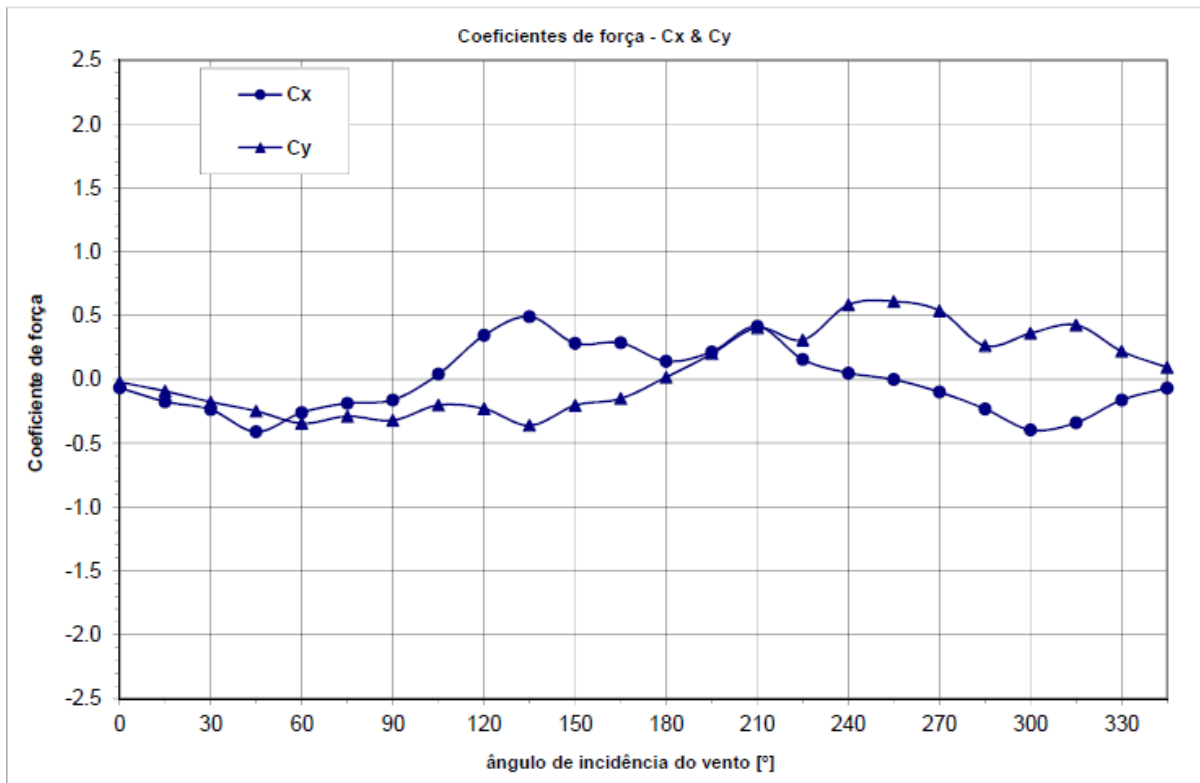
Para o edifício E01 (A), o coeficiente de força em x apresenta valor máximo absoluto de 0,49 para o ângulo de incidência do vento de 135° e o coeficiente de força em y apresenta valor máximo de 0,61 para o ângulo de incidência do vento de 255° . Destaca-se, que em todos os modelos analisados nesse estudo, as direções dos eixos x e y são fixas.

Figura 29 – Configurações do Edifício E01 (A)



Fonte: Acervo do LAC

Figura 30 – Resultados do Edifício E01 (A)



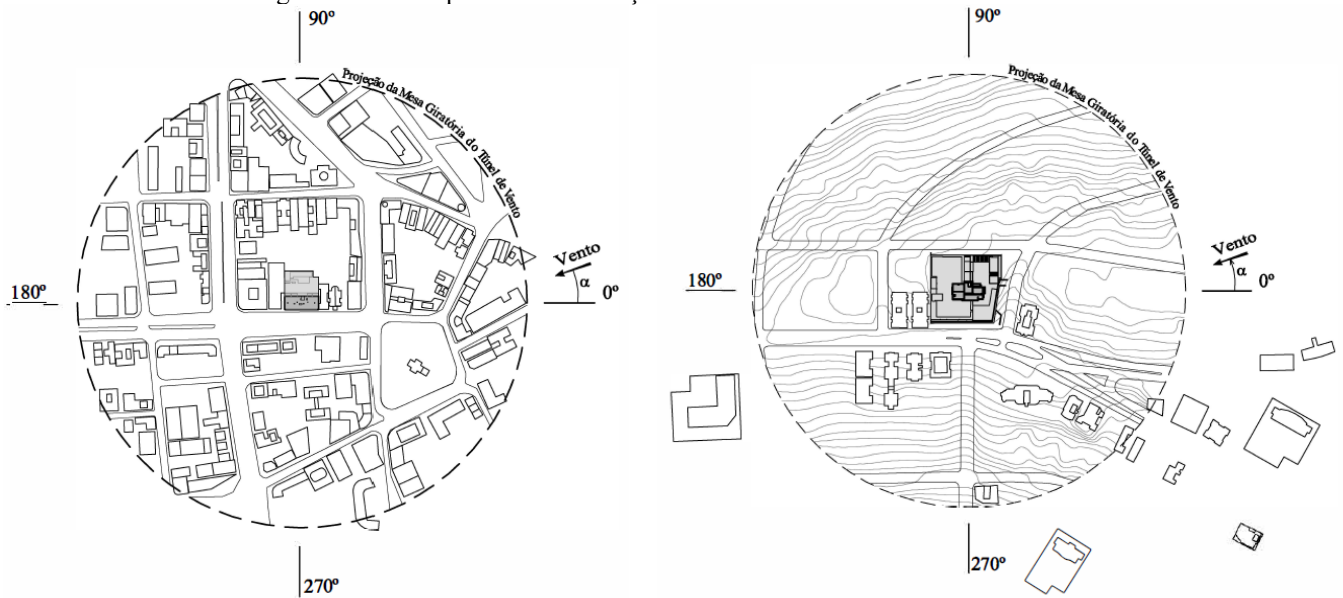
Fonte: Acervo do LAC

Em seguida, visando analisar a influência dos efeitos de interferência das edificações situadas na vizinhança, consideraram-se as diferentes densidades de vizinhança no entorno de cada um dos 50 edifícios analisados, classificando cada ensaio e sua configuração de vizinhança, conforme as representações das configurações dispostas no Anexo A, em diferentes classes de densidade de vizinhança: densidade alta ou densidade baixa.

Para a definição da classificação das densidades de vizinhança, levaram-se em consideração alguns parâmetros: (1) a quantidade de edifícios no entorno da edificação em estudo, muitas ou poucas edificações; (2) o posicionamento das edificações em relação ao edifício em análise, edificações em conjunto ou afastadas; (3) as dimensões transversais dessas edificações; (4) os expoentes p utilizados nos ensaios; (5) o ângulo de incidência dos valores máximos absolutos dos coeficientes, observados em cada ensaio, e as edificações presentes nessa direção.

Como exemplo, destacam-se duas configurações de vizinhança consideradas nas análises: o edifício E29 classificado como densidade alta e o edifício E14 classificado como densidade baixa, conforme os parâmetros adotados anteriormente seguindo as representações das configurações presentes na Figura 31, respectivamente.

Figura 31 – Exemplos da classificação dos edifícios em densidade alta ou baixa



Fonte: Acervo do LAC

Seguindo o procedimento, analisando cada configuração de vizinhança, parâmetros adotados e resultados, dividiram-se os ensaios listados anteriormente em 2 grupos, compreendendo 26 configurações classificadas como densidade alta e 24 configurações classificadas como densidade baixa, sendo elas:

- Densidade alta: E1 (A), E1 (B), E2, E5, E7, E8 (A), E8 (B), E12, E17, E19, E21 (B), E22 (A), E22 (B), E24 (A), E24 (B), E26 (A), E26 (B), E28, E29, E31, E33, E36, E39, E40, E41 e E42;
- Densidade baixa: E3, E4, E6, E9 (A), E9 (B), E10, E11, E13, E14, E15, E16, E18, E20, E21 (A), E23, E25, E27, E30, E32, E34, E35, E37, E38 (A) e E38 (B).

Aplicada a metodologia apresentada para os 50 edifícios do acervo do LAC, tem-se a Tabela 9 e Tabela 10, constando os coeficientes de força em x e y, respectivamente, e ainda, o ângulo de incidência do vento onde observou-se esse valor máximo absoluto desses resultados. As tabelas, a seguir, estão separadas em densidade alta e densidade baixa, conforme as classificações das densidades de vizinhança destacadas anteriormente.

Tabela 9 – Resultados $C_{x,cv}$ (Acervo do LAC), classificados conforme densidade

Densidade alta			Densidade baixa		
Edifício	$C_{x,cv}$ (Túnel)	Ângulo de incidência (α)	Edifício	$C_{x,cv}$ (Túnel)	Ângulo de incidência (α)
E7	0,45	45°	E13	0,56	0°
E8 (B)	0,47	150°	E3	0,69	30°
E1 (A)	0,49	135°	E23	0,70	345°
E24 (A)	0,67	135°	E18	0,72	150°/165°
E29	0,69	330°	E21 (A)	0,72	15°
E39	0,71	15°	E20	0,74	165°
E5	0,72	345°	E10	0,82	30°
E24 (B)	0,72	45°	E9 (B)	0,90	180°
E22 (A)	0,73	105°	E15	0,93	210°
E26 (B)	0,75	60°	E14	0,94	30°
E8 (A)	0,82	150°	E9 (A)	0,95	225°
E40	0,82	30°	E6	0,96	330°
E26 (A)	0,84	330°	E35	0,97	150°
E33	0,94	195°	E4	1,02	315°
E1 (B)	0,97	345°	E25	1,03	165°
E12	0,98	210°	E30	1,03	300°
E28	0,98	165°	E32	1,18	30°
E42	0,99	0°	E34	1,18	15°
E17	1,02	30°	E11	1,23	30°
E31	1,04	30°	E37	1,25	210°
E41	1,06	315°	E38 (A)	1,32	330°
E21 (B)	1,07	195°	E38 (B)	1,33	150°
E2	1,08	0°	E16	1,35	165°/180°/195°
E19	1,14	15°	E27	1,46	195°
E22 (B)	1,29	75°			
E36	1,33	150°			

Fonte: Acervo do LAC

Tabela 10 – Resultados $C_{y,cv}$ (Acervo do LAC), classificados conforme densidade

Densidade alta			Densidade baixa		
Edifício	$C_{y,cv}$ (Túnel)	Ângulo de incidência (α)	Edifício	$C_{y,cv}$ (Túnel)	Ângulo de incidência (α)
E5	0,42	240°	E6	0,78	120°
E8 (B)	0,42	225°	E3	0,88	255°
E28	0,49	225°/240°	E20	0,92	270°
E42	0,57	45°	E27	0,92	120°
E22 (B)	0,58	270°	E23	1,02	75°
E1 (A)	0,61	255°	E18	1,05	120°
E41	0,67	267°	E32	1,05	60°
E1 (B)	0,69	300°	E14	1,12	60°
E22 (A)	0,74	105°	E15	1,13	105°
E29	0,77	120°	E21 (A)	1,17	90°
E40	0,81	240°	E9 (A)	1,21	240°
E39	0,82	315°	E35	1,22	75°
E36	0,88	90°/105°/120°	E25	1,24	255°

E31	0,93	255°	E13	1,26	90°
E2	0,97	105°	E9 (B)	1,28	240°
E7	1,00	255°	E10	1,30	75°
E8 (A)	1,04	270°	E30	1,32	285°
E12	1,05	75°	E4	1,36	75°
E17	1,12	255°	E34	1,39	75°
E19	1,25	255°	E38 (A)	1,40	270°/285°
E26 (B)	1,29	75°	E38 (B)	1,44	270°
E21 (B)	1,34	255°	E16	1,48	90°
E24 (A)	1,43	105°	E11	1,50	90°
E26 (A)	1,53	75°	E37	1,59	255°
E33	1,59	270°			
E24 (B)	1,67	90°			

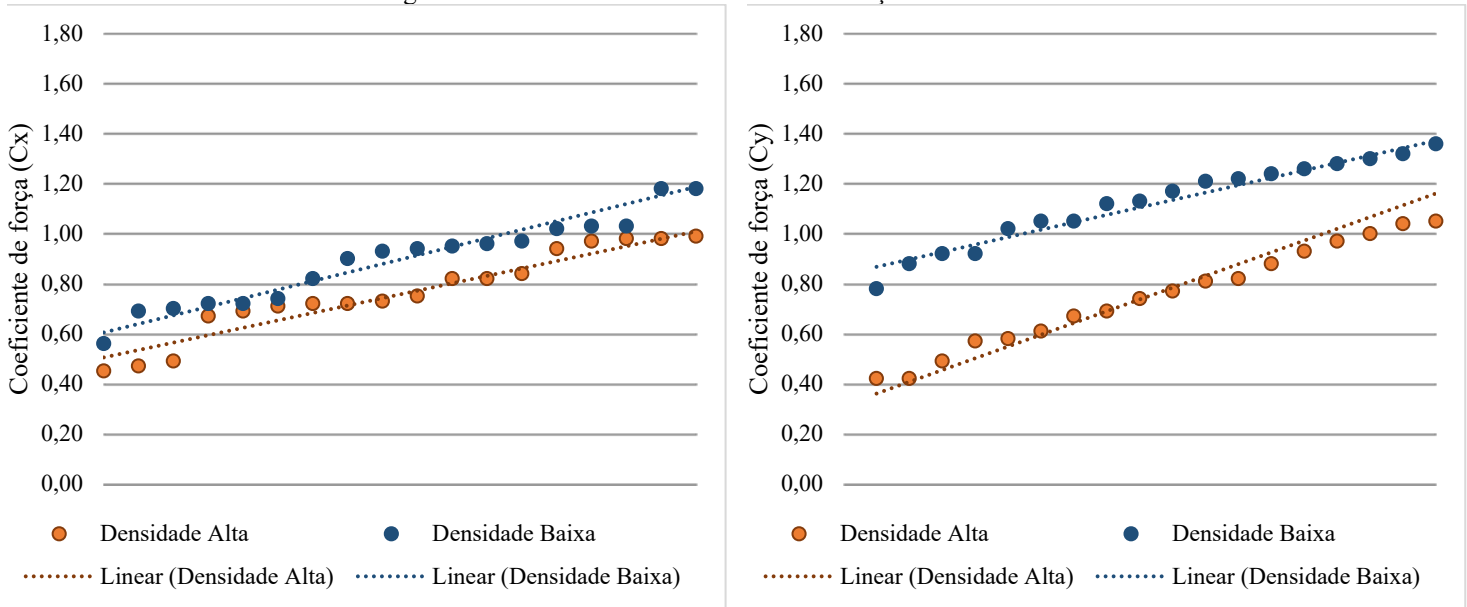
Fonte: Acervo do LAC

Através dos resultados obtidos, destaca-se que os coeficientes de força em ambas as direções apresentaram uma menor ação do vento nos edifícios em estudo para configurações classificadas como **densidade alta**. Em contrapartida, maiores coeficientes foram observados em configurações classificadas como **densidade baixa**.

Esses resultados seguem o disposto na literatura: (1) em regiões compostas por edificações altas (maior porte), quando afetadas pelo escoamento do vento, observam-se esteiras com vórtices desorganizados e redistribuição da energia, resultando em **menores coeficientes aerodinâmicos**; (2) em regiões compostas por edificações de pequeno porte e esparsas, quando afetadas pelo escoamento do vento, observam-se esteiras com vórtices bem organizados e alta energia, resultando em **maiores coeficientes aerodinâmicos** (KHANDURI *et al.*, 1998). Essas são características dos escoamentos de alta turbulência e baixa turbulência, respectivamente, comportando-se como um indicativo desses escoamentos.

A Figura 32 apresenta esses resultados em gráficos através das densidades de vizinhança e dos valores máximos absolutos dos coeficientes de força nas direções x e y, respectivamente, visando simplificar a visualização dessa tendência.

Figura 32 – Resultados dos coeficientes de força do Acervo do LAC



Fonte: Acervo do LAC

Analisando os gráficos, claramente se identifica a tendência dos resultados. As configurações de vizinhança classificadas como densidade alta apresentam valores máximos dos coeficientes de força em menor ordem em comparação com as configurações classificadas como densidade baixa, em ambas as direções x e y. Para os coeficientes de força em x (C_x), a diferença nos resultados entre densidade alta e densidade baixa é menos acentuada. Em contrapartida, para os coeficientes de força em y (C_y), a diferença é bastante acentuada.

Destaca-se que os resultados apresentados que indicam essa tendência são referentes apenas a essas configurações analisadas nesse estudo, não se tratando de uma regra geral devido à complexidade dos fenômenos de interação, compostos por diversas variáveis que influenciam diretamente a determinação dos coeficientes. Assim, considerando os parâmetros seguidos nesse estudo prévio, como a quantidade e o posicionamento das edificações no entorno, as dimensões transversais da edificação e o ângulo de incidência do vento, tem-se possíveis critérios que podem ser futuramente adotados para a determinação desses coeficientes através da norma, relacionados às diferentes densidades de vizinhança.

Portanto, seguindo as preconizações da literatura e conforme esperado, tem-se que diferentes densidades de vizinhança interferem na organização dos vórtices desprendidos das edificações presentes no entorno, considerando que essas edificações se comportam de formas totalmente diferentes, causando distintos efeitos de interação e, em consequência, variados coeficientes de força em ambas as direções.

6 PROGRAMA EXPERIMENTAL

São muitos os fatores que levaram ao desenvolvimento de estudos mais precisos sobre a ação do vento, como novas formas e proporções arquitetônicas com características aerodinâmicas não usuais, a diminuição da densidade média das edificações, sistemas estruturais com amortecimento muito pequeno, tornando a estrutura mais sensível aos efeitos dinâmicos, e ainda, através do emprego de métodos de análise estrutural mais precisos por meio de procedimentos computacionais, necessitando um melhor conhecimento das forças atuantes nas estruturas (BLESSMANN, 2011).

Os ensaios em túnel de vento para aquisição dos dados experimentais deste trabalho seguiram um procedimento experimental padrão, executado nas análises realizadas no Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC) da UFRGS. O programa experimental adotado está descrito nos tópicos seguintes, onde são apresentadas as principais características do túnel de vento Prof^o. Joaquim Blessmann, os dados necessários para calibração do escoamento do vento, o método de medida de pressões para aquisição dos dados, o modelo aerodinâmico, as configurações das densidades de vizinhança e descrições gerais dos ensaios.

6.1 TÚNEL DE VENTO PROF^o. JOAQUIM BLESSMANN

A simulação da ação do vento natural em construções civis e outras estruturas é realizada com auxílio dos mais variados tipos de túneis de vento. Essas ferramentas possuem distintas configurações de escoamento: túneis de vento do tipo de circuito de retorno fechado, onde o ar recircula; túneis de vento do tipo de circuito de retorno aberto, onde o ar é absorvido na entrada e descartado na outra extremidade; e ainda, existem os túneis de vento hexagonais, onde o vento é escoado em variadas direções (LOREDO-SOUZA *et al.*, 2004).

A utilização de túneis como opção para simulação da ação do vento é uma alternativa, vista a numerosa quantidade de parâmetros que influenciam os efeitos de interferência nos carregamentos do vento, dificultando a possibilidade de normatização destes fatores e o cálculo analítico. Nos casos de projetos que estejam sujeitos a este tipo de interferência, procura-se na literatura, estudos de caso com as mesmas características. No entanto, existem situações onde os níveis de cargas são altos, o edifício possui altura elevada ou geometria não convencional e,

assim, faz-se necessária a realização de um ensaio em túnel de vento, simulando as condições reais da edificação, visando projetos com maior nível de segurança (KHANDURI *et al.*, 1998).

O túnel de vento de retorno fechado, bastante utilizado no estudo da ação do vento em edificações, tem como vantagem o menor consumo de energia, a área de trabalho próxima da pressão atmosférica e a retenção de partículas de erosão e outros sinalizadores. Como desvantagem, o maior custo inicial de construção e, operacionalmente, o escoamento aquece gradualmente (LOREDO-SOUZA, *et al.*, 2004).

Como referência de túnel de vento de retorno fechado, tem-se o túnel do Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC), localizado na cidade de Porto Alegre/RS, especificamente na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, conhecido como Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann, Figura 33. O túnel é pioneiro na América Latina, estando em operação desde 1977, projetado especificamente para ensaios estáticos e dinâmicos de modelos de construções civis, permitindo a simulação das principais características do vento natural.

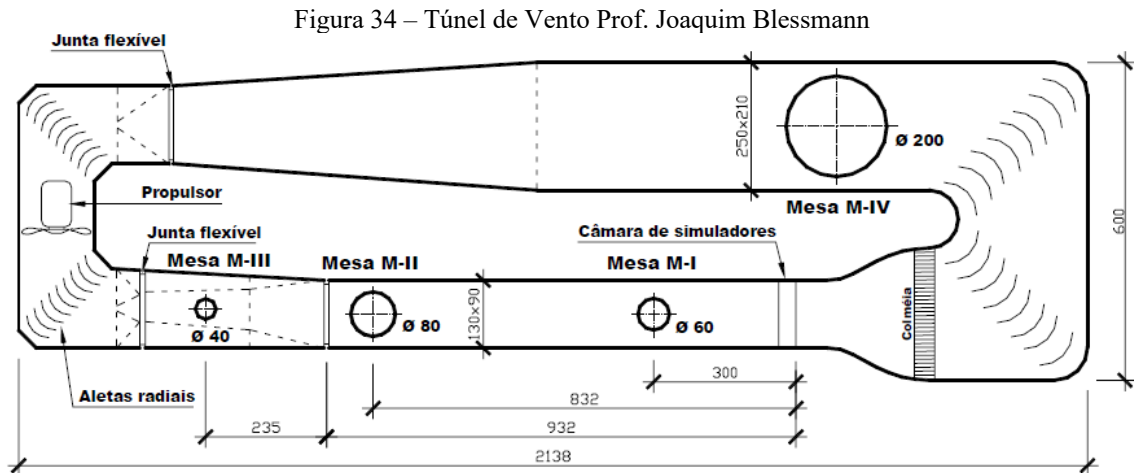
Figura 33 – Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann



Fonte: Araújo *et al.* (2012)

O túnel tem relação “comprimento/altura” da câmara principal superior a 10 e dimensões 1,30m x 0,90m x 9,32m (largura x altura x comprimento), sendo que a velocidade do escoamento de ar nesta câmara, com vento uniforme e sem modelos, é de 42 m/s ou aproximadamente 150 km/h (LOREDO-SOUZA *et al.*, 2009; NÚÑEZ *et al.*, 2012; VIEIRA *et al.*, 2018).

O túnel de vento dispõe atualmente de quatro mesas de ensaios, denominadas M-I, M-II, M-III e M-IV, conforme mostrado na Figura 34, que são posicionadas no interior do túnel em pontos estratégicos de acordo com suas aplicações específicas, descritas na Tabela 11. O túnel do LAC é equipado com motor de 100 HP de potência, produzindo velocidades para escoamento do vento de 42 m/s para as mesas M-I e M-II, 28 m/s para a mesa M-III e 9 m/s para a mesa M-IV (BLESSMANN, 1982; BLESSMANN, 2011).



Fonte: Loredou-Souza *et al.* (2004)

Tabela 11 – Mesas do Túnel de Vento Prof^o. Joaquim Blessmann

MESA	APLICAÇÕES ESPECÍFICAS
Mesa M-I	<p>Ensaaios do tipo aeronáutico no piso do túnel, com camada limite de pequena espessura devido a sua localização nos primeiros metros do escoamento e escoamento de ar de baixa turbulência.</p> <p>Pesquisas básicas de formas geométricas simples em modelos bi ou tridimensionais.</p> <p>Ensaaios para a construção civil com geradores de turbulência colocados na câmara de simuladores.</p>
Mesa M-II	<p>Ensaaios de tipo aeronáutico na altura do eixo do túnel.</p> <p>Ensaaios para a construção civil, com blocos simuladores de rugosidade colocados no piso e/ou geradores de turbulência na câmara de simuladores e/ou em outras seções, podendo ainda ter jatos transversais.</p> <p>Ensaaios de fenômenos de instabilidade aerodinâmica com modelos bidimensionais colocados horizontalmente.</p> <p>Aferição de equipamentos como anemômetros e tubos de Pitot-Prandtl.</p>
Mesa M-III	<p>Mesa de grande rigidez. As frequências naturais, segundo os três eixos ortogonais usuais, estão acima de 500 Hz.</p>

	Estudos dinâmicos em estruturas de grande alteamento, tais como chaminés, pilares de viadutos, torres de televisão, de microondas e mastros.
Mesa M-IV	Posicionada na seção de retorno do túnel. Ensaio de dissipação de poluentes, fumaça e de gases industriais, influência de topografia sobre os ventos, efeitos de interação fluido-estrutura, modelos de pontes, etc.

Fonte: Blessmann (2011)

Núñez *et al.* (2012) destacam a importância da utilização de túneis de vento como ferramenta de projeto, através da possibilidade de otimização na etapa de planejamento da performance aerodinâmica de uma ampla gama de produtos. No Túnel de Vento Prof^o. Joaquim Blessmann são realizadas diversas pesquisas nas áreas de simulação de ventos naturais e efeitos estáticos e dinâmicos do vento. Os autores apresentam diversos ensaios realizados no laboratório, como: edificações variadas, relacionadas a indisponibilidade de coeficientes aerodinâmicos quando a forma da edificação não é convencional ou devido às condições de topografia e/ou vizinhança; torres de telecomunicações e linhas de transmissão; viadutos e pontes, relacionadas ao comportamento aerodinâmico do tabuleiro dessas estruturas; coberturas, tanto de galpões quanto de estádios de futebol, como a nova cobertura do Estádio Beira-Rio; e estudos diversos, ação do vento em pedestres, erosão eólica, dispersão de poluentes, operação de helipontos, etc.

As normas e códigos da ação do vento em edificações, normalmente foram desenvolvidas com base em ensaios em túneis de vento com edifícios isolados em diferentes ambientes e condições de vento. Os dados obtidos nesses ensaios cobrem as respostas para a maioria dos edifícios altos, podendo ser utilizados para projetos de edifícios altos isolados com formas uniformes e regulares. No entanto, ao considerar os efeitos causados pela vizinhança, a utilização desses dados pode não ser adequada, sendo necessária a simulação em determinados túneis de vento com a implantação de técnicas e instrumentações que simulem tais configurações e demais características (KHANDURI *et al.*, 1998; THEPMONGKORN *et al.*, 2002).

Blessmann (1982) desenvolveu técnicas para simulação mais realista da estrutura da camada limite atmosférica no túnel de vento TV-2 do LAC, para uma correta simulação das características dos ventos naturais em laboratório. Foram empregados vários dispositivos para gerar fluxos simulados de cisalhamento atmosférico, montados na extremidade a barlavento da seção principal de trabalho, elementos de rugosidade no piso, conjunto de jatos cruzados, grades

de malhas retangulares ou quadradas e outros elementos, que permitiam o desenvolvimento de camadas de cisalhamento espessas a uma distância relativamente curta. Para o processamento dos dados com maior velocidade e precisão, desenvolveu-se um programa computacional para o cálculo dos coeficientes.

O método ativo é utilizado para simular as características do vento natural empregado em túneis com relação comprimento:largura a partir de cinco e consiste na simulação do perfil de vento natural através da utilização de uma técnica puramente aerodinâmica, por meio de jatos de ar injetados a partir do piso ou das paredes do túnel, perpendicularmente, paralelamente ou obliquamente à corrente de ar gerada no túnel (BLESSMANN, 2011).

O método passivo, conhecido como método de rugosidade, barreira e dispositivo de mistura, é utilizado para a realização de ensaios em modelos reduzidos, onde é necessário reproduzir o vento natural que tem como característica ser turbulento e ter sua velocidade variando com a altura. São inseridos dispositivos artificiais em determinado trecho do comprimento do piso do túnel, materiais de rugosidade adequada para simular as características do vento natural. Estando posicionados a barlavento dos modelos ensaiados, em geral no início da câmara de ensaio, como telas curvas ou planas de largura variável, grelhas de malha variável ou ainda triângulos de diversas dimensões e proporções, cheios ou vazados (BLESSMANN, 2011).

A finalidade dos dispositivos inseridos, gerando rugosidade no túnel de vento, é o mesmo que em uma camada com crescimento natural: representar a rugosidade da superfície terrestre em torno do modelo da edificação analisada, visto que o comprimento por si só da câmara de ensaio do túnel pode não ser suficiente para simular as características do vento natural na escala do modelo. A rugosidade é a componente mais importante, pois estabelece os três parâmetros da lei logarítmica z_0 , u^* , e z_d (LOREDO-SOUZA *et al.*, 2004).

Blessmann (2011) apresenta técnicas de simulação de uma ou mais características do vento natural, empregando obstáculos, como a utilização de barreiras e dispositivos de mistura posicionados a barlavento do modelo a ser ensaiado, como destacado na Tabela 12, que apresenta o tipo de simulação e os obstáculos empregados. Simulações mais precisas das características do vento podem ser obtidas pela combinação de um ou mais dos obstáculos descritos, com blocos disseminados ao longo da câmara de ensaio. A Figura 35 apresenta alguns desses dispositivos artificiais utilizados, inseridos no interior do túnel de vento.

Tabela 12 – Tipo de simulação e obstáculo empregado

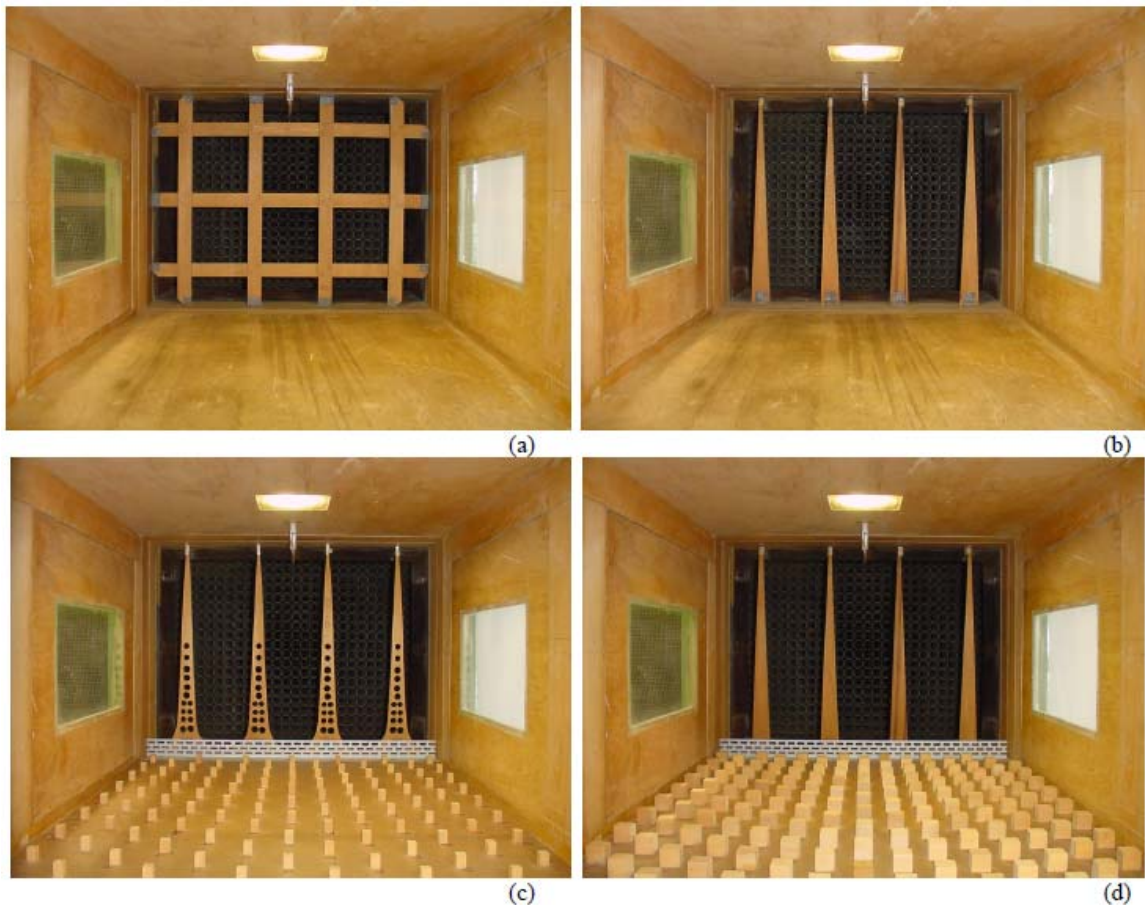
TIPO DE SIMULAÇÃO	OBSTÁCULOS EMPREGADOS
Para simulações de perfil de velocidades médias e turbulência fina	<ul style="list-style-type: none"> • Telas curvas ou telas planas de malha de espaçamento variável; • Grelhas de barras horizontais de seção retangular ou circular, variando o espaçamento e/ou espessura; • Grelha única de malha variável ou diversas grelhas superpostas; • Barras finas metálicas de seção circular, variando o diâmetro e/ou espaçamento; • Triângulos de diversos dimensões e proporções, cheios ou vasados, de lados retos ou curvos.
Para simulações de turbulência superposta a uma corrente de ar aproximadamente uniforme	<ul style="list-style-type: none"> • Grelha de malha quadrada ou retangular, construídas de barras de seção retangular; • Tela uniforme.

Fonte: Blessmann (2011)

Nos ensaios realizados no Túnel de Vento Prof^o. Joaquim Blessmann são usualmente utilizados elementos de rugosidade, agulhas e placas perfuradas na simulação da parte mais baixa da camada limite atmosférica e, em alguns casos, um grupo de jatos transversais em conjunto com um ou mais dos dispositivos citados anteriormente. Assim, já foram simulados no túnel ventos com perfis de velocidade média com expoente ‘p’ da lei potencial variando de 0,11 a 0,36 (LOREDO-SOUZA *et al.*, 2004). Na Figura 35 são apresentados os dispositivos utilizados para simulação de diferentes expoentes da lei potencial, inseridos no túnel de vento.

Ambas as técnicas descritas podem ser empregadas em conjunto em túneis de vento. Diversos estudos indicam que um ou diversos jatos de ar, com bocal de saída circular ou retangular, lançando os jatos paralelamente, perpendicularmente ou obliquamente à corrente de ar longitudinal, a partir do piso ou das paredes do túnel, têm sido usados, em geral, conjuntamente com obstáculos sólidos, visto que uma turbulência adequada é conseguida com a utilização desses obstáculos sólidos (LOREDO-SOUZA *et al.*, 2004).

Figura 35 – Dispositivos de geração das diferentes camadas limites do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann.
 (a) grelha; (b) $p = 0,11$; (c) $p = 0,23$; (d) $p = 0,34$



Fonte: Loredou-Souza *et al.* (2004)

Modelos reduzidos de estruturas, geralmente civis, são construídos para a realização de ensaios em túneis de vento, mantendo principalmente sua homogeneidade dimensional. Esses modelos são instrumentados com tomadas de pressão, posicionadas em posições predefinidas e perfeitamente niveladas e normais à superfície da parede externa do modelo para a captação dos dados. De acordo com Núñez *et al.* (2012), são diferentes os tipos de modelos adotados:

- Quando constatado que o edifício a ser estudado apresenta características dinâmicas, como alta esbeltez e flexibilidade, o modelo a ser utilizado será do tipo aeroelástico, sendo neste tipo de modelagem reproduzidas a rigidez, a massa, as frequências naturais e o amortecimento do sistema estrutural real;
- Quando o edifício a ser estudado apresenta características que permitem considerá-lo como não suscetível aos efeitos dinâmicos do vento, o modelo utilizado será do tipo estático, devendo ser rígido e reproduzir, o mais fielmente possível, a geometria externa do edifício, bem como a riqueza de detalhes.

6.2 AQUISIÇÃO DE DADOS (MÉTODO DE MEDIDAS DE PRESSÕES)

Para a aquisição dos dados nos ensaios, adotou-se o método de medidas de pressões nas simulações realizadas no túnel de vento Prof^o. Joaquim Blessmann. Através da medição de três variáveis para o cálculo da velocidade média do vento: a diferença de pressão estática (Δpa), a temperatura (T) e a pressão atmosférica (P_{atm}). Tais medições, equipamentos, procedimentos e conhecimentos necessários do método são descritos a seguir (TREIN, 2005; GRALA, 2020):

- O registro da velocidade média do vento no túnel é feito de maneira indireta, monitorado através da diferença entre as medidas diferenciais de pressões estáticas (Δpa), medida entre dois anéis piezométricos instalados na entrada da seção de trabalho, situados nos extremos do convergente da entrada da câmara principal. A leitura destes dados é feita utilizando um micromanômetro do tipo ManoAir 500, que é conectado aos anéis piezométricos, e pode ser acompanhada de medidas feitas por multimanômetros a álcool ou transdutores elétricos de pressão. A temperatura interna (T) do túnel de vento também é medida por este equipamento;
- Para cada perfil de velocidade média dos ventos simulados no túnel, é determinado um coeficiente k_o , fator de calibração do túnel de vento, que varia com a altura no interior do túnel de vento e com o tipo de perfil, vinculando a pressão dinâmica q , no eixo do túnel, e a pressão estática de referência, Δpa . Desta forma, é possível calcular a pressão dinâmica e a velocidade do escoamento do vento em qualquer ponto da seção transversal, devidamente mapeada, pela simples leitura da pressão de referência;
- O LAC/UFRGS conta com curvas de calibração predeterminadas com o valor desse coeficiente para diversas alturas e perfis de velocidade média do vento, obtidas através do levantamento de diferentes perfis de vento e estudo entre a relação de pressões do anel piezométrico e a pressão dinâmica em uma certa altura do piso do túnel. Sendo assim, para obter a pressão dinâmica, deve-se selecionar, conforme cada estudo, um k_o referente à altura do topo do modelo utilizado;
- A pressão atmosférica (P_{atm}), para o cálculo da massa específica do ar (ρ_{ar}), é medida por um barômetro digital;
- Assim torna-se viável calcular a pressão dinâmica do vento e a velocidade média do escoamento do vento, em qualquer ponto do escoamento do vento no túnel. Esta relação é dada pelas seguintes equações:

$$q = k_0 \Delta p_a \quad \bar{V} = \sqrt{\frac{2q}{\rho_{ar}}}$$

Sendo:

q – pressão dinâmica ao longe (mmH₂O);

k_0 – fator de calibração do túnel de vento, coeficiente que relaciona ambas as pressões (adm);

Δp_a – diferença de pressão estática entre os anéis piezométricos (mmH₂O);

\bar{V} – velocidade média do escoamento do vento no topo do modelo (m/s);

ρ_{ar} – massa específica do ar = $0,0474 \frac{P_{atm}}{T} \left(\frac{kgf \cdot s^2}{m^2} \right)$;

P_{atm} – pressão atmosférica (mmHg);

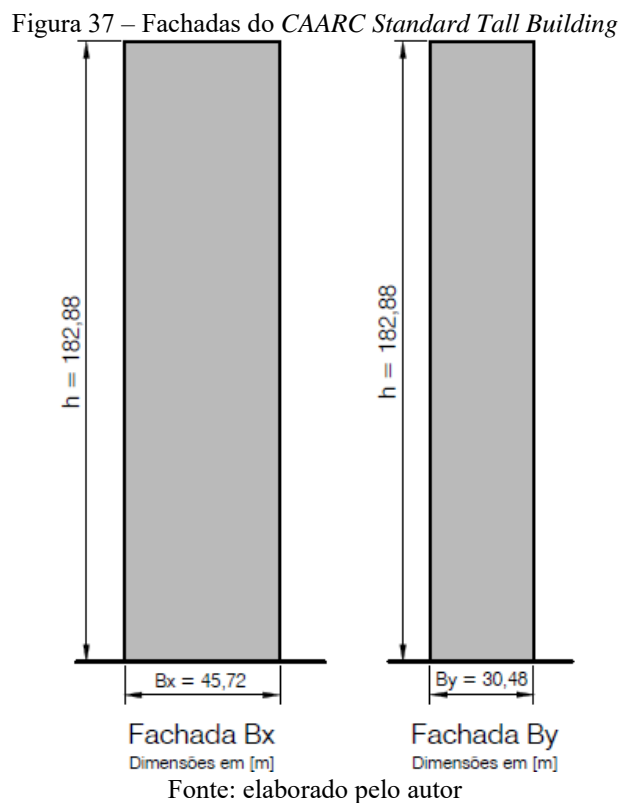
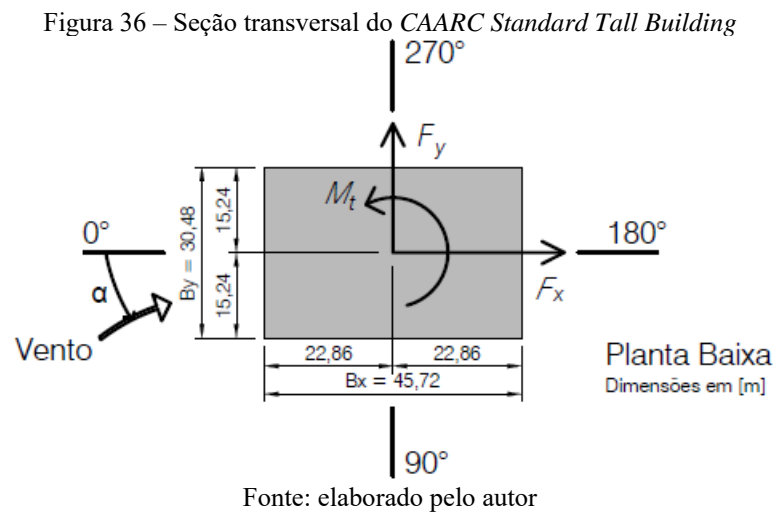
T – temperatura (K).

- O modelo reduzido, instrumentado com a instalação de diversas tomadas de pressão estrategicamente fixadas nas fachadas do edifício em estudo, tem as leituras realizadas simultaneamente por um equipamento de aquisição de pressões, marca *Scanivalve*, com 6 módulos e 64 canais por módulo, coletando amostras de 16 segundos com taxa de aquisição máxima de até 512 Hz, totalizando 8192 dados por tomada;
- Os dados adquiridos pelo equipamento são processados em rotinas computacionais desenvolvidas no próprio LAC, onde são calculados os coeficientes de pressão. Os valores dos coeficientes de pressão médio, medidos nos ensaios isolados e com vizinhança, são utilizados como base para o cálculo dos parâmetros necessários para os estudos, relacionados à distribuição das pressões nas fachadas do modelo reduzido.

6.3 APRESENTAÇÃO DO MODELO AERODINÂMICO

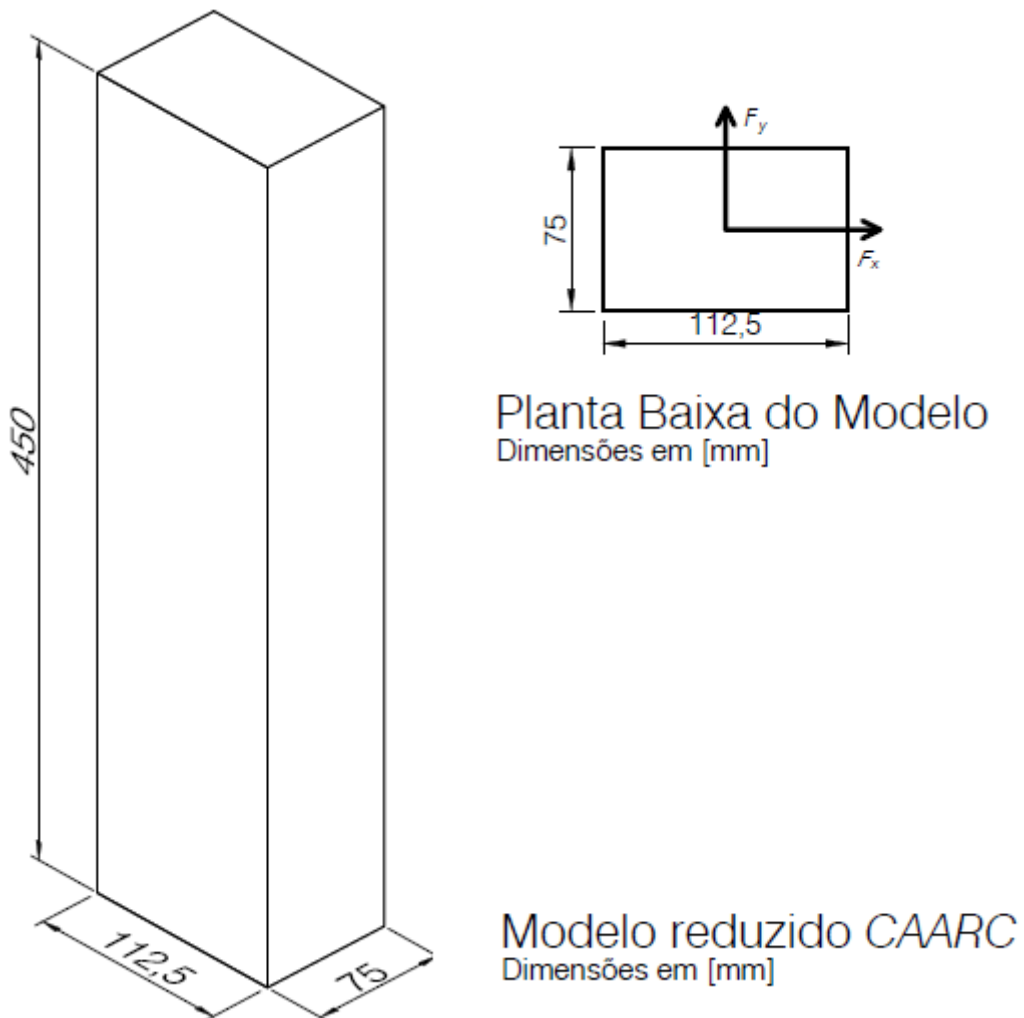
O avanço das tecnologias de construção e o desenvolvimento de estudos dos edifícios altos são parte do processo de verticalização das cidades, influenciado por questões socioeconômicas, arquitetônicas e relativas aos impactos do crescimento urbano em diversas cidades. A determinação experimental das características do escoamento em torno de uma edificação imersa em um escoamento de vento se faz necessária sempre que um estudo teórico não é capaz de fornecer resultados confiáveis ou quando não há informações disponíveis na literatura. Esses estudos podem ser realizados com o emprego de modelos reduzidos, implicando a determinação das condições que devem ser satisfeitas para que o escoamento em torno de corpos geometricamente semelhantes seja também semelhante (CARPEGIANI, 2004).

O *CAARC Standard Tall Building* é um edifício alto idealizado em 1969 pela *Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council (CAARC)*, planejado como um modelo simples de edifício, utilizado como padrão para comparação entre técnicas e ensaios experimentais em túneis de vento de camada limite, calibração desses equipamentos, resultando em maior confiabilidade nos dados obtidos através desses ensaios e sendo requisitado para ensaios dinâmicos e de medidas de pressões nas fachadas. O *CAARC* é um edifício prismático com seção transversal retangular, com medidas, em escala real, de 30,48 m x 45,72 m x 182,88 m, conforme indicado na Figura 36 e na Figura 37, que apresentam sua seção transversal, dimensões de referência, referências dos eixos para aplicação das forças ortogonais e fachadas.



Nesse trabalho, empregou-se um modelo aerodinâmico rígido, em escala reduzida, do *CAARC Standard Tall Building*. O modelo reduzido rígido foi confeccionado em acrílico na escala 1/406,4 e instrumentado com 280 tomadas de pressão, distribuídas ao longo da fachada do modelo em 10 diferentes cotas com 7 tomadas por cota, em cada face, distribuídas de modo a permitir um levantamento representativo das pressões em toda a edificação. As dimensões do modelo reduzido são 75,00 mm x 112,50 mm x 450,00 mm (Figura 38), com relações dimensionais de 1 / 1,5 / 6. A Tabela 13 apresenta um resumo das principais características desse modelo, considerando a , a maior dimensão em planta e b , a menor, e as relações entre largura (a/b) e altura (h/b).

Figura 38 – Dimensões do modelo reduzido do CAARC



Fonte: elaborado pelo autor

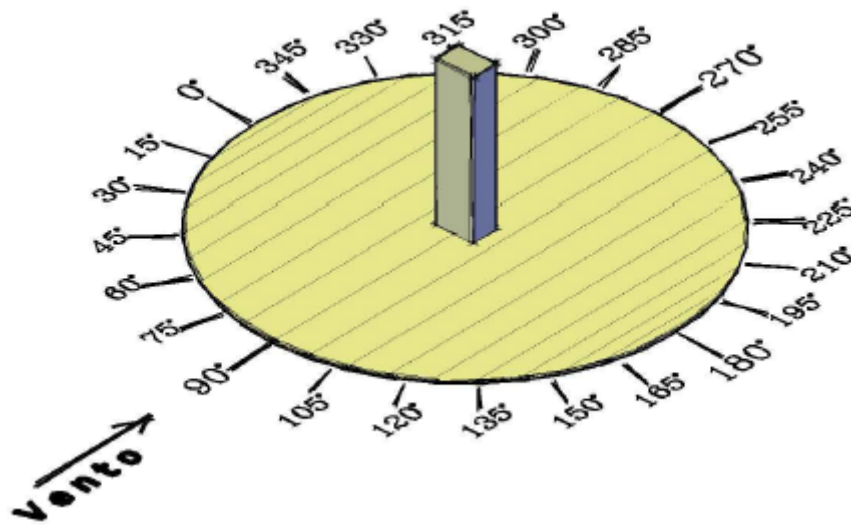
Tabela 13 – Principais características do modelo reduzido do CAARC

h (mm)	a (mm)	b (mm)	a/b	h/b	Escala do modelo	Número de tomadas	Número de registros
450,00	112,50	75,00	1,50	6,00	1:406,4	280	8192

Fonte: elaborado pelo autor

Deve-se utilizar nos ensaios uma mesa giratória com o modelo em estudo posicionado em seu centro, conforme a Figura 39, que tem a perspectiva da mesa giratória a ser inserida no túnel de vento Prof^o. Joaquim Blessmann, a referência dos ângulos de incidência do vento e a representação do posicionamento do modelo reduzido do *CAARC Standard Tall Building*, considerando a situação da edificação isolada, sem a presença de vizinhança.

Figura 39 – Referência dos ângulos de incidência do vento na configuração isolada



Fonte: elaborado pelo autor

6.4 CONFIGURAÇÕES DE VIZINHANÇA

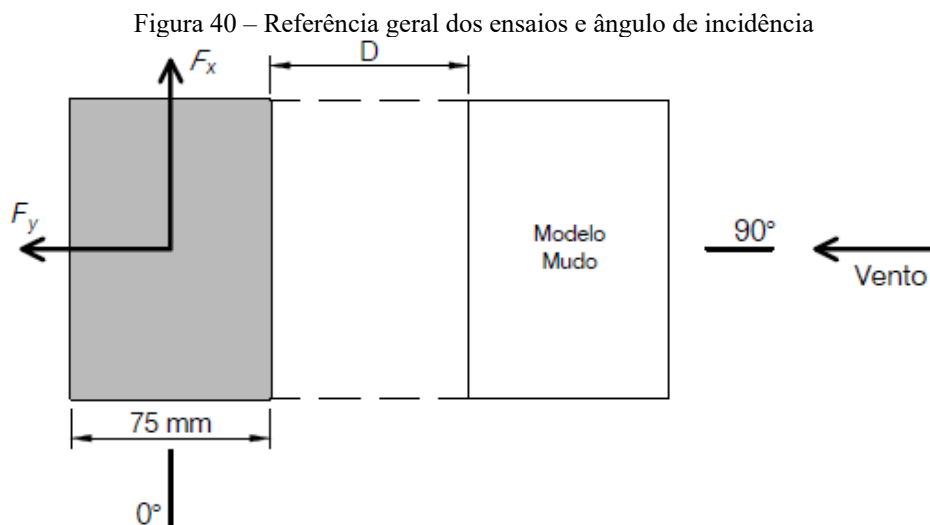
De acordo com Loredou-Souza *et al.* (2004), deve-se considerar na elaboração da configuração dos ensaios, arranjos aleatórios ou regulares dos elementos de rugosidade utilizados nos métodos de simulação, que produzam características corretas do escoamento do vento. Além disso, também deve-se considerar que certas condições em localidades específicas são mais fortemente influenciadas pelo terreno ao seu entorno do que pelo terreno mais afastado a barlavento, como em áreas urbanas, que podem ser diretamente afetadas pelas edificações vizinhas. Nesse sentido, torna-se necessário alternar de uma simulação genérica para uma representação detalhada do entorno da edificação, usualmente chamada de “modelos de vizinhança”, através da elaboração de modelos detalhados da vizinhança, considerando a representação das edificações presentes na área de entorno do edifício em estudo.

Nesse sentido, considerando o propósito desse trabalho de realizar uma análise da relação entre diferentes densidades de vizinhança, influenciando na determinação dos parâmetros destacados, tem-se o emprego de modelos mudos no entorno do modelo aerodinâmico. As configurações e

posicionamentos desses modelos mudos, foram inspiradas nas bibliografias estudadas, que indicam que a adição de outros modelos pode gerar interferências significativas no modelo em estudo. Embora optando por configurações compostas pela inserção de outros modelos mudos e outros espaçamentos entre os modelos.

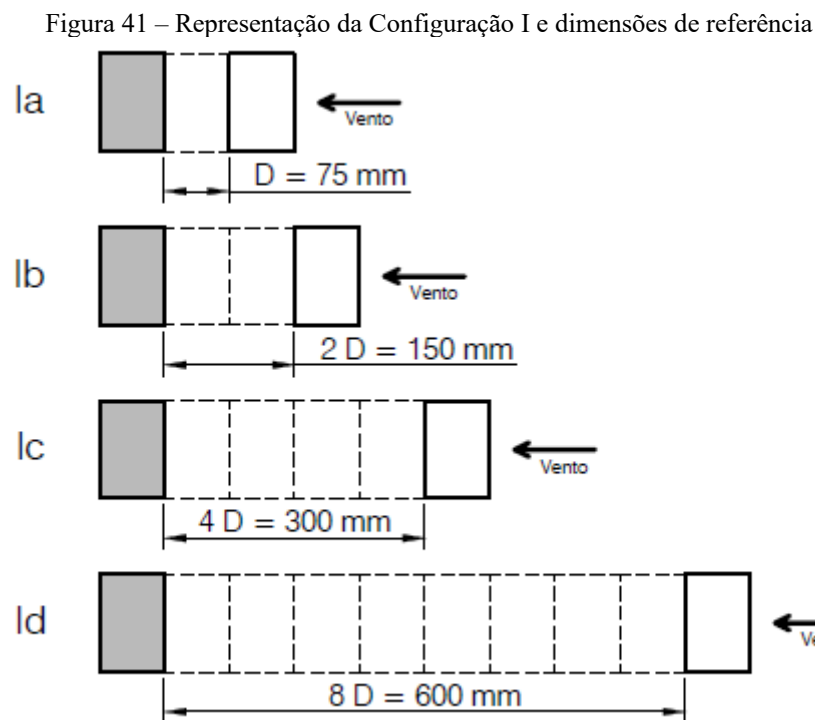
As densidades de vizinhança são representadas através de 3 (três) diferentes configurações de ensaio, com 4 (quatro) posições relativas entre os modelos para cada configuração, totalizando 12 (doze) configurações de vizinhança. Os modelos mudos seguem a configuração prismática com seção transversal retangular do modelo aerodinâmico reduzido do CAARC, com dimensões de 75,00 mm x 112,50 mm x 450,00 mm. As posições relativas entre os modelos foram denominadas com o parâmetro D , que é a dimensão do menor lado da seção transversal do CAARC, portanto $D = 75,00$ mm. A Figura 40 apresenta a referência geral dos ensaios e o ângulo de incidência do vento, através dos modelos mudos sendo posicionados alinhados a barlavento, na direção de incidência do vento a 90° . Assim sendo, as configurações de vizinhança empregadas nesse estudo são as seguintes:

- Configuração I: 2 (duas) edificações, sendo 1 (um) modelo instrumentado e 1 (um) modelo mudo (Figura 41), com espaçamentos D , $2D$, $4D$ e $8D$;
- Configuração II: 3 (três) edificações, sendo 1 (um) modelo instrumentado e 2 (dois) modelos mudos (Figura 43), com espaçamentos D , $2D$, $4D$ e $8D$;
- Configuração III: 4 (quatro) edificações, sendo 1 (um) modelo instrumentado e 3 (três) modelos mudos (Figura 45), com espaçamentos D , $2D$, $4D$ e $8D$.



6.4.1 Configuração I

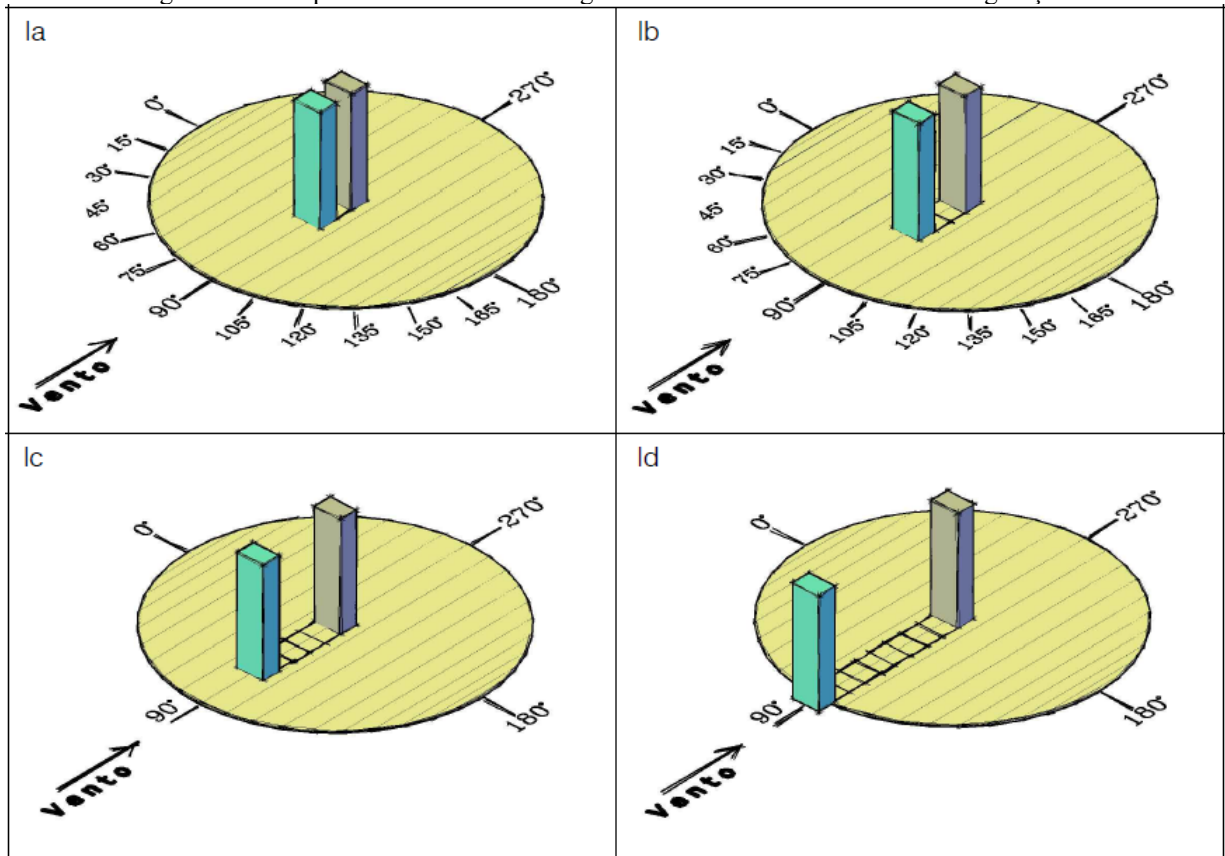
A Configuração I é composta por 2 (duas) edificações, sendo 1 (um) modelo instrumentado (CAARC) e 1 (um) modelo mudo, com 4 (quatro) posições relativas entre os modelos, alinhados ao longo do eixo y a barlavento do modelo principal, na direção de incidência do vento a 90° . As posições estão relacionadas com a dimensão do menor lado da seção transversal do CAARC (75,00 mm) e são as seguintes: $D = 75,00$ mm, $2D = 150,00$ mm, $4D = 300,00$ mm e $8D = 600,00$ mm. Na Figura 41 tem-se a projeção em planta baixa com a representação de todas as posições relativas entre os modelos, adotadas na Configuração I.



Fonte: elaborado pelo autor

Todas as configurações de vizinhança, Ia, Ib, Ic e Id, foram ensaiadas com vento incidindo apenas perpendicularmente a maior fachada do CAARC, na direção de incidência do vento a 90° . No entanto, para a análise dos efeitos de vizinhança, através do fator de vizinhança, as configurações Ia e Ib foram ensaiadas girando a mesa de ensaios de 0 a 270° , com medidas a cada 15° de incidência do vento. Na Figura 42, tem-se a representação das perspectivas dos modelos e a referência dos ângulos de incidência do vento.

Figura 42 – Perspectivas dos ensaios e ângulos de incidência do vento na Configuração I



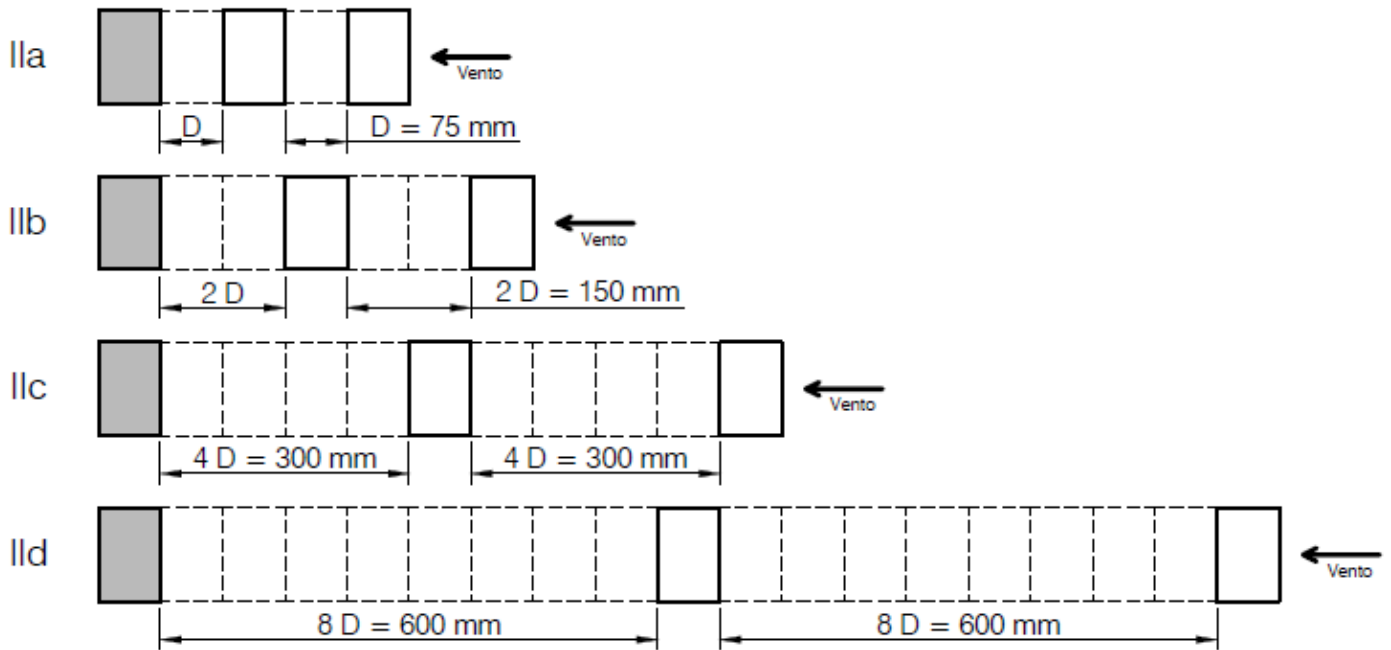
Fonte: elaborado pelo autor

6.4.2 Configuração II

A Configuração II é composta por 3 (três) edificações, sendo 1 (um) modelo instrumentado (CAARC) e 2 (dois) modelos mudos, com 4 (quatro) posições relativas entre os modelos, alinhados ao longo do eixo y a barlavento do modelo principal, na direção de incidência do vento a 90° . As posições estão relacionadas com a dimensão do menor lado da seção transversal do CAARC (75,00 mm) e são as seguintes: $D = 75,00$ mm, $2D = 150,00$ mm, $4D = 300,00$ mm e $8D = 600,00$ mm. Na Figura 43, tem-se a projeção em planta baixa com a representação de todas as posições relativas entre os modelos, adotadas na Configuração II.

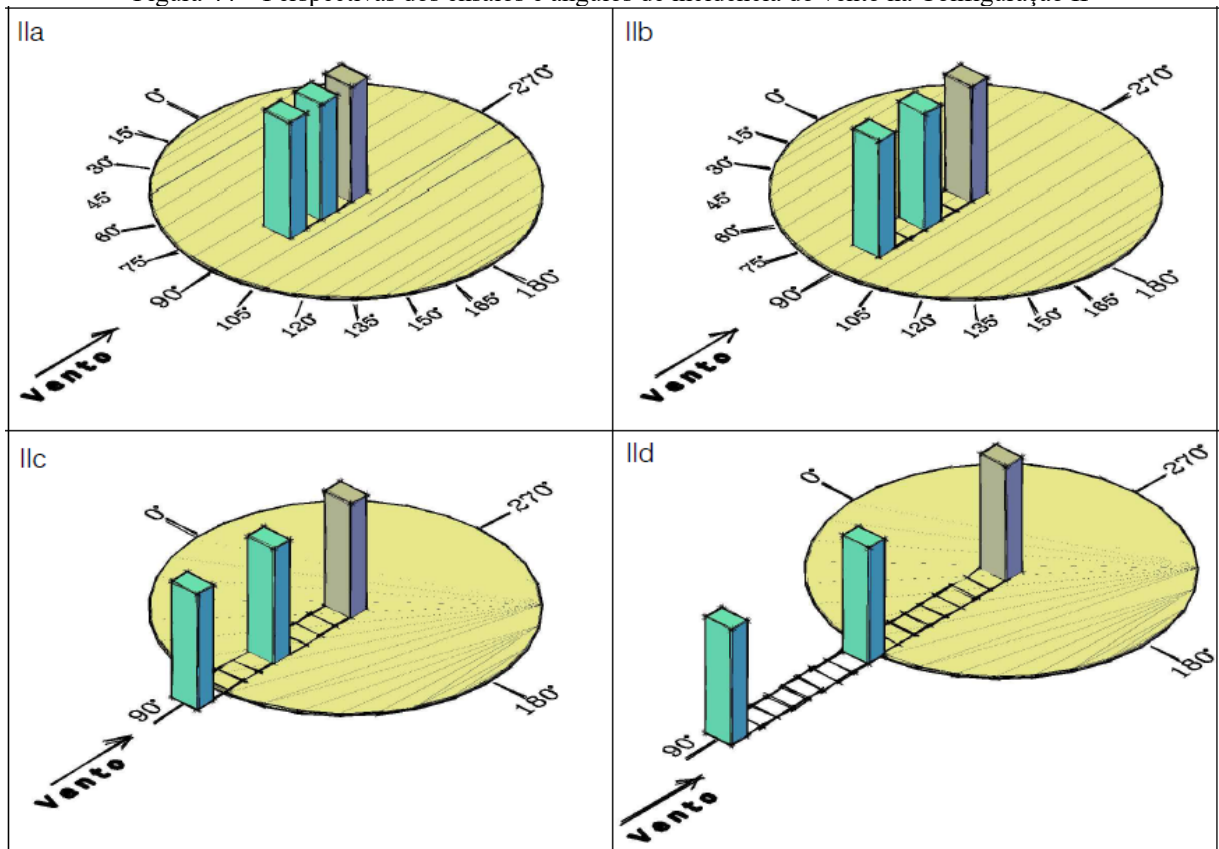
Todas as configurações de vizinhança, Ila, I Ib, I Ic e I Id, foram ensaiadas com vento incidindo apenas perpendicularmente a maior fachada do CAARC, na direção de incidência do vento a 90° . No entanto, para a análise dos efeitos de vizinhança, através do fator de vizinhança, as configurações I Ia e I Ib foram ensaiadas girando a mesa de ensaios de 0 a 270° , com medidas a cada 15° de incidência do vento. Na Figura 44 tem-se a representação das perspectivas dos modelos e a referência dos ângulos de incidência do vento.

Figura 43 – Representação da Configuração II e dimensões de referência



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 44 – Perspectivas dos ensaios e ângulos de incidência do vento na Configuração II

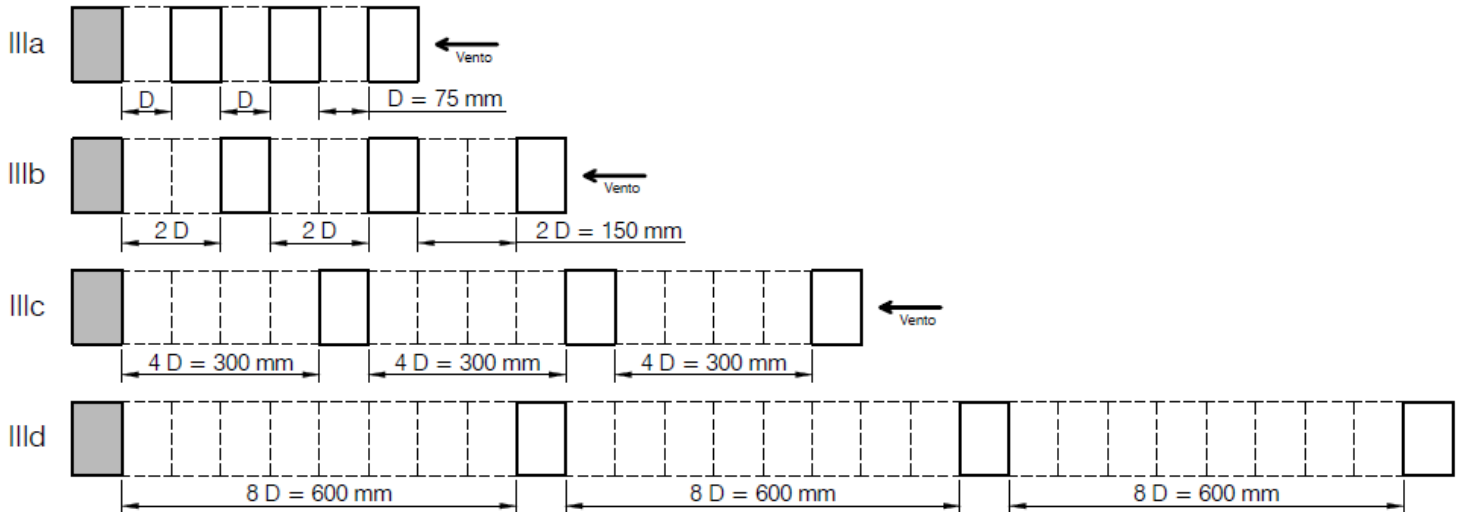


Fonte: elaborado pelo autor

6.4.3 Configuração III

A Configuração III é composta por 4 (quatro) edificações, sendo 1 (um) modelo instrumentado (CAARC) e 3 (três) modelos mudos, com 4 (quatro) posições relativas entre os modelos, alinhados ao longo do eixo y a barlavento do modelo principal, na direção de incidência do vento a 90° . As posições estão relacionadas com a dimensão do menor lado da seção transversal do CAARC (75,00 mm) e são as seguintes: $D = 75,00$ mm, $2D = 150,00$ mm, $4D = 300,00$ mm e $8D = 600,00$ mm. Na Figura 45, tem-se a projeção em planta baixa com a representação de todas as posições relativas entre os modelos, adotadas na Configuração III.

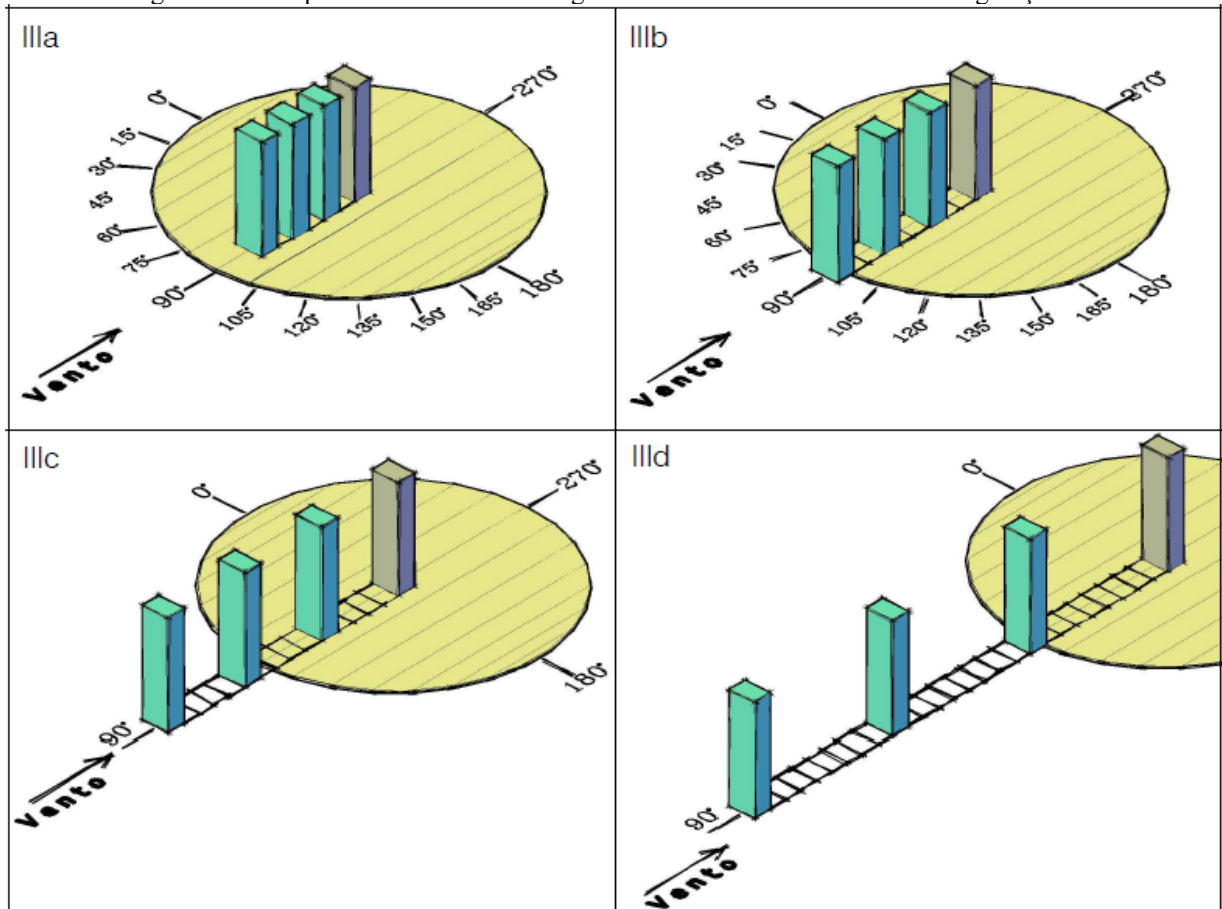
Figura 45 – Representação da Configuração III e dimensões de referência



Fonte: elaborado pelo autor

Todas as configurações de vizinhança, IIIa, IIIb, IIIc e IIIId, foram ensaiadas com vento incidindo apenas perpendicularmente a maior fachada do CAARC, na direção de incidência do vento a 90° . No entanto, para a análise dos efeitos de vizinhança, através do fator de vizinhança, as configurações IIIa e IIIb foram ensaiadas girando a mesa de ensaios de 0 a 270° , com medidas a cada 15° de incidência do vento. Na Figura 46 tem-se a representação das perspectivas dos modelos e a referência dos ângulos de incidência do vento.

Figura 46 – Perspectivas dos ensaios e ângulos de incidência do vento na Configuração III



Fonte: elaborado pelo autor

6.5 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

Para a correta análise das estruturas em túnel de vento que envolve uma forte interação entre o modelo e o escoamento, visando obter coerência dos resultados com a realidade, deve-se adotar além da reprodução do vento natural e suas características, um modelo reduzido em escala que seja o mais próximo possível da realidade, principalmente nos pontos primordiais para análise. Deve-se atentar para as limitações impostas pelo túnel, como dimensões da câmara de ensaio e gama de velocidades, para que possa ser determinada a escala geométrica utilizada no modelo reduzido. Uma modelagem correta implica que os parâmetros adimensionais de semelhança sejam exatamente os mesmos na estrutura real e no modelo utilizado (NÚÑEZ *et al.*, 2012).

Para o estudo, utilizou-se o modelo aerodinâmico reduzido do *CAARC Standard Tall Building* (Figura 47), sendo adotado o modelo rígido devido a suas características e ao tipo de aquisição de dados necessária, confeccionado em acrílico e instrumentado com tomadas de pressão que realizam medidas instantâneas de pressões devidas a ação do vento, adequadamente distribuídas

pelas faces externas do modelo. Os modelos mudos, não instrumentados, são elaborados em chapas de madeira compensada, servindo apenas como barreira de interferência à passagem do escoamento, conforme cada densidade de vizinhança.

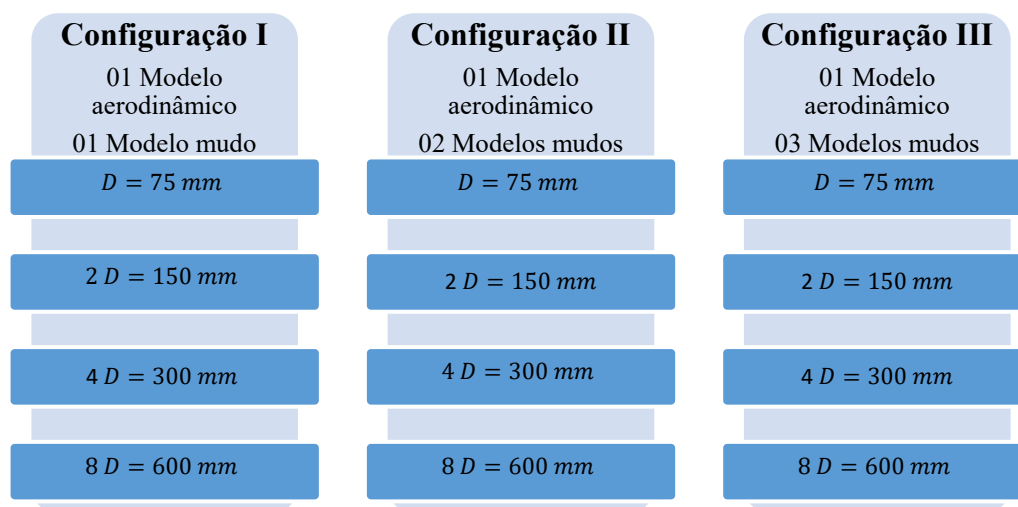
Figura 47 – Modelo reduzido do CAARC no interior do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann



Fonte: elaborado pelo autor

Os ensaios no túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann no LAC foram realizados com o modelo aerodinâmico do CAARC, primeiramente em situação isolada, em seguida com as configurações de vizinhança, de acordo com as posições relativas adotadas entre os modelos, conforme indicado no fluxograma (Figura 48). Proporcionando dados que foram transformados em coeficientes de pressão sem a interferência da topografia, rugosidade do terreno e edificações vizinhas, e dados que registraram a influência das edificações na vizinhança no escoamento do vento. Para esse estudo, visando obter dados apenas com a interferência das edificações situadas a barlavento, o modelo em estudo foi inserido em região de topografia suave, com a finalidade de minimizar a influência do relevo na aquisição dos coeficientes.

Figura 48 – Fluxograma dos ensaios



Fonte: elaborado pelo autor

A distribuição das tomadas no modelo aerodinâmico possibilita a determinação das pressões no modelo, sendo essas pressões instantâneas, medidas para todas as configurações de vizinhança com vento incidindo apenas perpendicularmente a maior fachada do CAARC na direção de incidência do vento a 90° . E ainda, para a análise dos efeitos de vizinhança com diferentes incidências do vento, através do fator de vizinhança, as configurações Ia, Ib, IIa, IIb, IIIa e IIIb, foram medidas em 19 ângulos de incidência do vento, girando a mesa de ensaios de 0 a 270° , com medidas a cada 15° de incidência do vento. Para isto, tem-se a utilização de uma mesa giratória com o modelo em análise posicionado em seu centro, sendo os modelos mudos, representantes das densidades de vizinhança, posicionados a barlavento desse modelo na direção de incidência do vento a 90° . Na Figura 49 tem-se a representação de uma configuração de ensaio com os modelos reduzidos das edificações localizados no interior do túnel de vento.

Figura 49 – Representação de uma configuração de ensaio inserida no túnel de vento



Fonte: elaborado pelo autor

Para as simulações do escoamento do vento são necessárias conforme apresentado, a preparação de instrumentações, a elaboração dos modelos reduzidos e a mesa giratória para disposição dos modelos. Além disso, é necessária a preparação das ferramentas para a medição das velocidades e reprodução das características desse escoamento no interior do túnel. Os ensaios foram realizados na mesa M-II do Túnel de Vento Prof^o. Joaquim Blessmann, juntamente com a implantação de técnicas de simulação das características do vento natural através do emprego dos métodos passivos, conhecidos genericamente como método de rugosidade, barreira e dispositivo de mistura, conforme dispositivos apresentados na Figura 50. Para correta simulação e aquisição dos dados, não apenas as edificações devem ser corretamente modeladas, mas também as configurações necessárias para simulação do escoamento do vento.

Figura 50 – Dispositivos no interior do túnel para simulação do perfil com expoente $p = 0,23$



Fonte: elaborado pelo autor

A Tabela 14 apresenta as características e informações necessárias para os ensaios e cálculos, como o expoente p da lei potencial do perfil de velocidades médias do vento, simulado para caracterizar o escoamento do vento, a classe e categoria segundo a NBR6123:1988, o coeficiente k_o , fator de calibração do túnel de vento, a velocidade básica do vento (V_0) e a pressão dinâmica de projeto (q_k), entre outros parâmetros necessários.

Tabela 14 – Características e informações necessárias

p	Classe	Categoria	k_o	V_0 (m/s)	S_2	V_k (m/s)	q_k (N/m ²)
0,23	C	III e IV	1,185	42,0	1,209	50,78	1580,65

Fonte: elaborado pelo autor

6.6 CÁLCULO DOS COEFICIENTES

A NBR6123:1988 apresenta metodologias para a determinação das forças devidas a ação do vento nas edificações. Mas elas não se aplicam a edificações de formas, dimensões ou localizações fora do comum, casos em que o procedimento se torna um tanto quanto complexo e trabalhoso. Nesse sentido, devem ser adotados estudos especiais, como procedimentos experimentais para simulação do escoamento e determinação dos coeficientes aerodinâmicos, através da utilização de técnicas e instrumentações em laboratórios especializados no estudo da ação do vento, necessário nos casos em que um estudo teórico não for capaz de fornecer resultados confiáveis ou quando não houver dados disponíveis na literatura.

Os coeficientes aerodinâmicos na superfície das estruturas são obtidos através de séries temporais de pressão por meio das medições nos ensaios, onde são utilizados transdutores elétricos de pressão conectados a tubos dispostos convenientemente sobre a superfície do modelo que registram centenas de leituras para cada tomada de pressão com um intervalo de tempo de aquisição predeterminado, enviando para um computador essa série temporal de pressão medida em mmH₂O (BLESSMANN, 1982; LOREDO-SOUZA *et al.*, 2012).

A partir da integração desses registros das séries temporais das pressões devidas ao vento é possível encontrar o coeficiente de pressão média (\bar{c}_p), o coeficiente de pressão rms (\check{c}_p), o coeficiente de pressão máximo (\hat{c}_p) e o coeficiente de pressão mínimo (\check{c}_p):

$$\bar{c}_p = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt}{q}$$

Sendo:

\bar{c}_p – coeficiente de pressão média (adm);

T – intervalo de tempo de amostragem (s);

$p(t)$ – pressão instantânea, na superfície da edificação, medida em relação à pressão estática de referência (N/m²);

t – tempo (s);

q – pressão dinâmica de referência: $q = \frac{1}{2} \rho \bar{V}^2$ (N/m²);

ρ – massa específica do ar (kg/m³);

\bar{V} – velocidade média de referência (m/s).

$$\tilde{c}_p = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (p(t) - \bar{p})^2 dt}}{q}$$

Sendo:

\tilde{c}_p – coeficiente de pressão rms (adm);

\bar{p} – valor médio de $p(t)$ para o período de amostragem T (N/m²).

$$\hat{c}_p = \frac{p_{max}}{q}$$

Sendo:

\hat{c}_p – coeficiente de pressão máximo (adm);

p_{max} – valor máximo de $p(t)$ para o período de amostragem T (N/m²).

$$\check{c}_p = \frac{p_{min}}{q}$$

Sendo:

\check{c}_p – coeficiente de pressão mínimo (adm);

p_{min} – valor mínimo de $p(t)$ para o período de amostragem T (N/m²).

Considerando que as pressões de pico medidas nos ensaios não atuem simultaneamente sobre toda a estrutura do modelo, as pressões médias podem ser integradas para fornecerem valores médios das forças cortantes e momentos fletores atuantes na edificação. Assim sendo, estes valores podem ser usados em conjunto com fatores de rajada, tais como os da NBR6123:1988, para fornecerem as cargas totais equivalentes atuantes na edificação (CARPEGGIANI, 2004).

Portanto, através dos coeficientes de pressão média encontrados, conforme apresentado anteriormente, tem-se a determinação dos coeficientes de forma externos (C), aplicáveis a uma superfície plana de área A , definidos através da seguinte equação:

$$C = \frac{F}{qA}$$

Sendo:

C – coeficiente de forma externo (adm);

q – pressão dinâmica de referência, no topo da edificação (N/m²);

A – área de uma superfície plana (m²);

F – resultante das pressões externas sobre a superfície plana (uma força perpendicular a esta superfície) (N), definida por:

$$F = \int_A \bar{p} dA \rightarrow F = \int_A \bar{c}_p q dA$$

Sendo assim, substituindo a equação de F na equação anterior do coeficiente de forma externo, tem-se a seguinte expressão para a obtenção do coeficiente de forma externo (C), a partir do coeficiente de pressão média (\bar{c}_p), através de integração numérica:

$$C = \frac{1}{A} \int_A \bar{c}_p dA$$

De acordo com Vieira *et al.* (2018), os coeficientes de força na direção dos eixos x e y são dados pelo resultado da razão entre a soma vetorial das forças atuantes na área de influência de cada tomada de pressão e o produto da pressão dinâmica pela área total de incidência do vento, conforme apresentado abaixo. Por fim, tem-se que as forças globais de arrasto são obtidas a partir desses coeficientes de força, definidos em relação aos eixos x e y:

$$C_x = \frac{F_x}{q B_y H} \quad C_y = \frac{F_y}{q B_x H}$$

Sendo:

C_x e C_y – coeficientes de força globais nas direções x e y (adm);

F_x e F_y – forças totais, na base da edificação, devida a incidência do vento na direção x e y (N);

q – pressão dinâmica de referência, no topo da edificação (N/m²);

B_x e B_y – dimensões nominais da seção transversal da edificação (m);

H – altura de referência (m).

Para a recomposição das forças globais, os coeficientes de força definidos anteriormente devem ser multiplicados por suas correspondentes áreas projetadas de referência, ou seja, $A_x = B_y H$ e $A_y = B_x H$, e pela pressão dinâmica a uma altura equivalente ao topo da edificação real (LOREDO-SOUZA *et al.*, 2006).

Através desses coeficientes de força na direção dos eixos x e y, tem-se o cálculo do coeficiente máximo de força horizontal, utilizado para a determinação dos fatores de vizinhança (FV) nesse estudo, conforme as seguintes equações, respectivamente:

$$C = \sqrt{C_x^2 + C_y^2} \quad FV = \frac{C_{m\acute{a}x,cv}}{C_{m\acute{a}x,iso}}$$

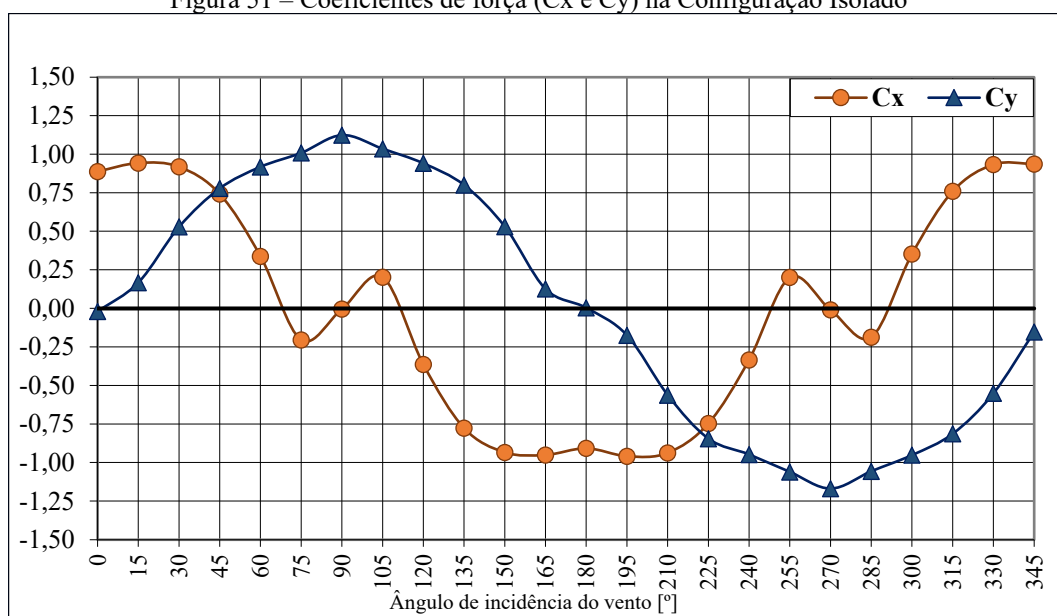
7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados desse estudo correspondem a uma análise da influência de diferentes densidades de vizinhança na caracterização dos efeitos de interferência em um modelo aerodinâmico, diferenciadas pela adição e o aumento do espaçamento entre os modelos interferentes. Para tal, realizou-se o cálculo dos coeficientes de pressão média (\bar{c}_p) através da integração dos registros das séries temporais das pressões para cada configuração ensaiada no túnel. Em seguida, foram encontrados os esforços cortantes na base do edifício para cada configuração, determinado através do somatório das forças em x e y de cada tomada instalada na superfície do modelo, considerando os senos e cossenos diretores dos vetores normais junto às tomadas de pressão. Por fim, para cada ângulo de incidência calculou-se os coeficientes de força em termos das respostas transversais e longitudinais médias, conforme as configurações de ensaio realizadas, isolado ($C_{x,iso}$ e $C_{y,iso}$) e com vizinhança ($C_{x,cv}$ e $C_{y,cv}$), determinados a partir dos esforços cortantes totais na base.

Inicialmente, são tratados os coeficientes de arrasto (Ca) para cada configuração de ensaio, determinados através do valor do coeficiente de força na direção longitudinal do escoamento, que é a componente da força global na direção do vento (C_y) nesse estudo. Esses coeficientes foram selecionados apenas para a incidência do vento a 90° em todas as configurações. Com isso, tem-se a relação de interação entre os parâmetros adotados na caracterização dos efeitos de interferência e na análise da variação do coeficiente de arrasto, com os modelos interferentes sendo posicionados ao longo do túnel a barlavento do modelo aerodinâmico.

Conjuntamente, foram realizadas análises dos efeitos de interferência das edificações inseridas no entorno, causados por essas diferentes densidades de vizinhança, através das configurações de ensaio com medidas das pressões em 19 ângulos de incidências do vento, girando a mesa de ensaios de 0 a 270° com medições a cada 15° . Assim, possibilita-se a determinação dos fatores de vizinhança (FV) para cada uma das configurações, obtidos pela divisão dos coeficientes de força das configurações com vizinhança pelos coeficientes de força da configuração isolada.

Na Figura 51, tem-se os resultados obtidos para a configuração isolada, apresentando a variação dos coeficientes de força (C_x e C_y) em função do ângulo de incidência do vento, com a medição das pressões realizada de 0 a 345° . Esses resultados serão utilizados em todo o estudo, possibilitando a análise da influência da vizinhança no modelo aerodinâmico.

Figura 51 – Coeficientes de força (C_x e C_y) na Configuração Isolado

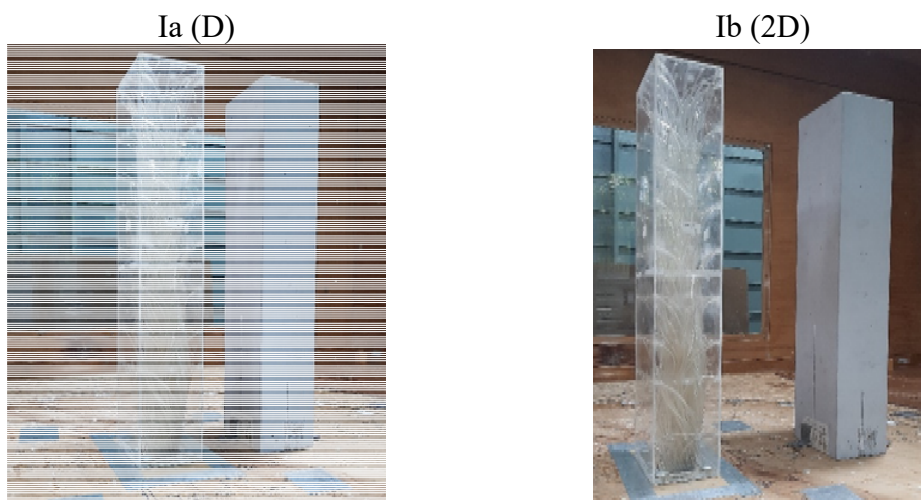
Fonte: elaborado pelo autor

A seguir, os resultados desse estudo são apresentados conforme cada configuração de ensaio.

7.1 CONFIGURAÇÃO I

A Configuração I é composta por 2 (duas) edificações, sendo 1 (um) modelo instrumentado (CAARC) e 1 (um) modelo mudo, com 4 (quatro) posições relativas entre os modelos, alinhados ao longo do eixo do túnel na direção de incidência do vento a 90° em $D = 75,00$ mm, $2D = 150,00$ mm, $4D = 300,00$ mm e $8D = 600,00$ mm. Na Figura 52 tem-se a representação de todas as posições relativas entre os modelos na Configuração I, inseridas no interior do túnel de vento.

Figura 52 – Modelos posicionados no interior do túnel de vento (Configuração I)

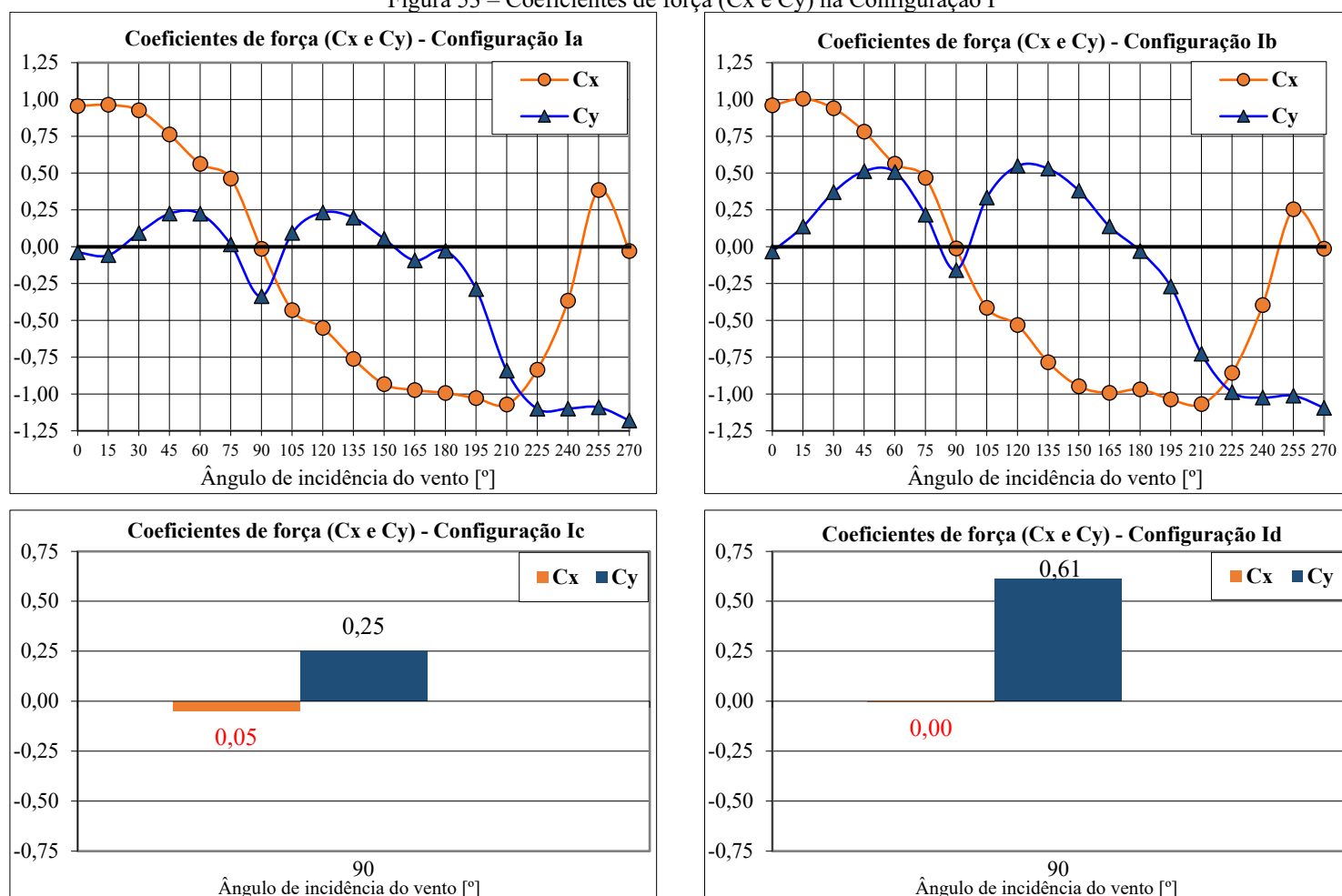




Fonte: elaborado pelo autor

Na Figura 53, tem-se os resultados obtidos para a Configuração I, configurações Ia, Ib, Ic e Id, apresentando a variação dos coeficientes de força (C_x e C_y) em função do ângulo de incidência do vento. Nas configurações Ia e Ib, as medições das pressões foram realizadas de 0 a 270°, nas demais configurações, Ic e Id, apenas com vento incidindo perpendicularmente a maior fachada do CAARC na direção de incidência do vento a 90°, conforme apresentado anteriormente.

Figura 53 – Coeficientes de força (C_x e C_y) na Configuração I



Fonte: elaborado pelo autor

Observando os gráficos da Figura 53, considerando as definições presentes na literatura para determinação dos coeficientes de arrasto (Ca), tem-se a Tabela 15, compreendendo a seleção dos coeficientes para cada configuração indicada na Configuração I. Inicialmente, é possível observar a expressiva redução e inversão nos valores dos coeficientes, causando um efeito de proteção: o Ca para o modelo isolado passa de 1,12 para -0,34 com a adição de uma edificação interferente com espaçamento $D = 75,00$ mm.

Em seguida, observa-se que conforme a única edificação interferente, posicionada a barlavento, é afastada da edificação em estudo ao longo do eixo do túnel, ocorre o aumento dos coeficientes, possivelmente relacionado com a formação mais definida da esteira com vórtices mais organizados e maior energia, resultando no aumento gradativo dos coeficientes e na majoração das ações do vento, trafegando entre os regimes de escoamento do efeito de interferência denominado turbulência da esteira.

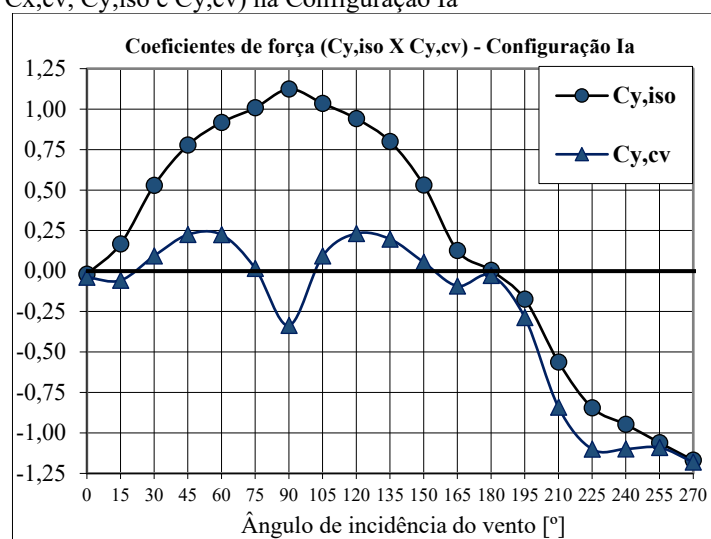
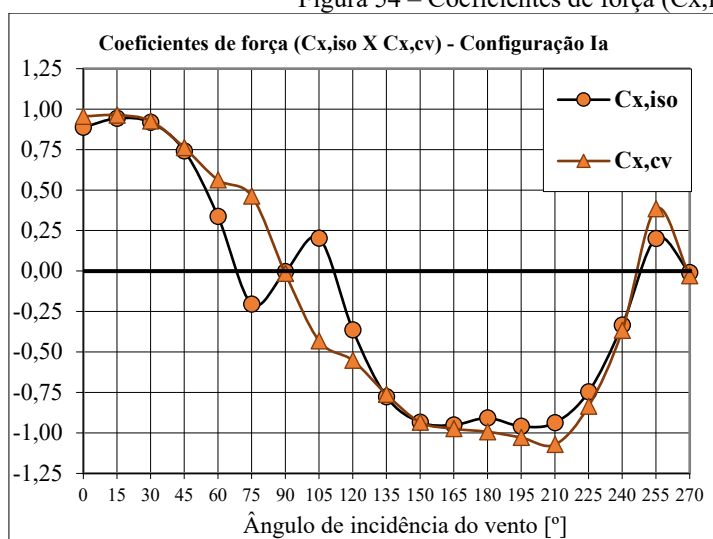
Tabela 15 – Resultados do Ca (Configuração I)

Configuração	Isolado	Ia (D)	Ib (2D)	Ic (4D)	Id (8D)
Ca	1,12	-0,34	-0,16	0,25	0,61

Fonte: elaborado pelo autor

Na Figura 54, tem-se os resultados obtidos para a Configuração Ia, apresentando a comparação da variação dos coeficientes de força em x e y, na configuração isolada e com a presença da vizinhança, $C_{x,iso}$ e $C_{x,cv}$, $C_{y,iso}$ e $C_{y,cv}$, em função do ângulo de incidência de 0 a 270°.

Figura 54 – Coeficientes de força ($C_{x,iso}$ e $C_{x,cv}$, $C_{y,iso}$ e $C_{y,cv}$) na Configuração Ia



Fonte: elaborado pelo autor

Os coeficientes de força no eixo x encontram-se próximos para ambas as configurações, ocorrendo uma alteração mais significativa entre os ângulos de 60° a 120°, com inversão de

valores nos ângulos de 75° e 105°, atenuando um indicativo de ocorrência de um fenômeno dinâmico descrito no “Critério de Den Hartog”, quando uma estrutura sem amortecimento é submetida a uma excitação harmônica senoidal (DEN HARTOG, 1947; PACHECO HUACHO, 2014). Os resultados para o eixo x, na Configuração Ia, mostram pouca influência da única edificação presente na vizinhança, os maiores valores observados para $C_{x,iso}$ (-0,96) e para $C_{x,cv}$ (-1,07) ocorreram para ângulos de incidência próximos, 195° e 210°, respectivamente.

Os coeficientes de força no eixo y, ao contrário, apresentaram uma redução acentuada na maioria dos ângulos de incidência analisados, destacando a expressiva mudança entre os ângulos de 15° a 165°, com uma grande inversão de valores no ângulo de 90°, caracterizando um intenso efeito de proteção nessas incidências do vento. Os maiores valores de $C_{y,iso}$ (1,12 e -1,17) ocorreram nos ângulos de 90° e 270°, respectivamente. No entanto, para $C_{y,cv}$, ocorreram nos ângulos entre 225° e 270°, variando entre -1,10 a -1,18.

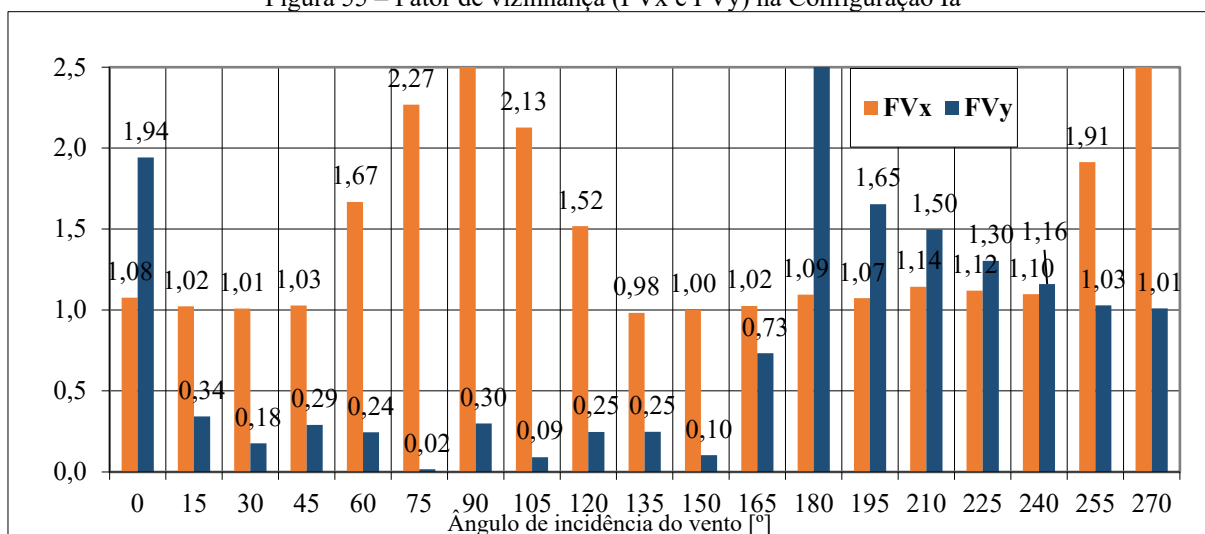
A Tabela 16 apresenta a relação desses resultados dos coeficientes de força presentes nos gráficos e os esforços cortantes na base, em relação aos eixos x e y, para a Configuração Ia. Assim, possibilita-se comparar a variação dos valores para ambas configurações, isolada e com vizinhança. Além disso, apresentam-se os fatores de vizinhança calculados para ambos os eixos, FV_x e FV_y , que podem ser visualizados no gráfico da Figura 55.

Tabela 16 – Coeficientes de força (C_x e C_y) e fator de vizinhança (FV_x e FV_y) na Configuração Ia

Ângulo	$C_{x,iso}$	$F_{x,iso}$ (tf)	$C_{y,iso}$	$F_{y,iso}$ (tf)	$C_{x,cv}$	$F_{x,cv}$ (tf)	$C_{y,cv}$	$F_{y,cv}$ (tf)	FV_x	FV_y
0°	0,89	797,87	-0,02	-26,49	0,96	858,39	-0,04	-51,44	1,08	1,94
15°	0,94	847,27	0,17	225,70	0,96	865,85	-0,06	-77,14	1,02	0,34
30°	0,92	825,39	0,53	713,33	0,93	832,77	0,09	125,82	1,01	0,18
45°	0,74	666,83	0,78	1048,87	0,76	684,82	0,23	303,73	1,03	0,29
60°	0,34	303,38	0,92	1236,95	0,56	505,71	0,22	302,24	1,67	0,24
75°	-0,20	-183,39	1,01	1359,33	0,46	416,04	0,02	21,13	2,27	0,02
90°	0,00	-3,22	1,12	1515,13	-0,01	-13,13	-0,34	-453,00	4,08	0,30
105°	0,20	182,20	1,04	1395,38	-0,43	-387,52	0,09	126,13	2,13	0,09
120°	-0,36	-326,59	0,94	1268,46	-0,55	-495,58	0,23	312,66	1,52	0,25
135°	-0,78	-697,64	0,80	1078,49	-0,76	-684,84	0,20	266,20	0,98	0,25
150°	-0,93	-838,87	0,53	715,32	-0,93	-838,76	0,05	73,29	1,00	0,10
165°	-0,95	-853,98	0,13	170,45	-0,97	-874,74	-0,09	-124,84	1,02	0,73
180°	-0,91	-815,39	0,00	5,21	-0,99	-892,26	-0,03	-36,68	1,09	7,04
195°	-0,96	-861,49	-0,17	-234,63	-1,03	-923,90	-0,29	-387,93	1,07	1,65
210°	-0,94	-842,07	-0,56	-757,61	-1,07	-962,76	-0,84	-1134,04	1,14	1,50
225°	-0,75	-670,14	-0,84	-1138,13	-0,84	-750,26	-1,10	-1483,19	1,12	1,30
240°	-0,33	-299,95	-0,95	-1276,62	-0,37	-329,14	-1,10	-1481,00	1,10	1,16
255°	0,20	180,70	-1,06	-1429,19	0,38	345,67	-1,09	-1469,05	1,91	1,03
270°	-0,01	-8,61	-1,17	-1575,11	-0,03	-26,74	-1,18	-1590,93	3,11	1,01

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 55 – Fator de vizinhança (FVx e FVy) na Configuração Ia



Fonte: elaborado pelo autor

O gráfico dos fatores de vizinhança com relação aos eixos x e y, apresentado na Figura 55, permite observar a influência da única edificação presente na vizinhança no modelo em estudo, possibilitando elaborar a Tabela 17, contendo a relação dos ângulos de incidência com majoração ou redução nas ações do vento. Caso o valor seja maior que 1, configura-se a majoração da força do vento na edificação pelas edificações vizinhas, caso seja menor que 1, ocorre a redução desses efeitos de interferência causados pela edificação no entorno.

Tabela 17 – Resultados (FVx e FVy) na Configuração Ia

Ângulo		FVx	FVy
0°	Ortogonal	Majoração de 8%	Majoração de 94%
15°	Oblíquo	Majoração de 2%	Redução de 66%
30°	Oblíquo	Majoração de 1%	Redução de 82%
45°	Oblíquo	Majoração de 3%	Redução de 71%
60°	Oblíquo	Majoração de 67%	Redução de 76%
75°	Oblíquo	Majoração de 127%	Redução de 98%
90°	Ortogonal	-	Redução de 70%
105°	Oblíquo	Majoração de 113%	Redução de 91%
120°	Oblíquo	Majoração de 52%	Redução de 75%
135°	Oblíquo	Redução de 2%	Redução de 75%
150°	Oblíquo	Manutenção	Redução de 90%
165°	Oblíquo	Majoração de 2%	Redução de 27%
180°	Ortogonal	Majoração de 9%	-
195°	Oblíquo	Majoração de 7%	Majoração de 65%
210°	Oblíquo	Majoração de 14%	Majoração de 50%
225°	Oblíquo	Majoração de 12%	Majoração de 30%
240°	Oblíquo	Majoração de 10%	Majoração de 16%
255°	Oblíquo	Majoração de 91%	Majoração de 3%
270°	Ortogonal	-	Majoração de 1%

Fonte: elaborado pelo autor

Assim, através dos resultados dos fatores de vizinhança com relação aos eixos x e y para a Configuração Ia, pode-se elaborar a Tabela 18, representando os resultados obtidos em túnel de vento através da porcentagem de ocorrência. Destaca-se que devido a valores dos coeficientes de força muito pequenos para o numerador e o denominador, alguns fatores são descartados por apresentarem um fator de vizinhança muito alto, casos dos ângulos de incidência 90° e 270° em x e 180° em y. Com relação aos resultados tem-se que a maioria das forças no eixo x foram majoradas, correspondendo a 88,2% das ações. Em contrapartida no eixo y, houve uma maior redução das ações, embora mais balanceado, correspondendo a 61,1%.

Tabela 18 – Resultados (FVx e FVy) em porcentagem na Configuração Ia

FV	Resultados			Redução (FV < 1)	Majoração (FV > 1)		
	Totais	Válidos	Descartados				
FV_x	19	17	2	2	11,8%	15	88,2%
FV_y		18	1	11	61,1%	7	38,9%

Fonte: elaborado pelo autor

Na sequência, através dos coeficientes de força em x e y, tem-se a determinação dos coeficientes de força horizontais para cada ângulo de incidência e configuração, isolada e com vizinhança. Possibilitando determinar os fatores de vizinhança (FV) para a Configuração Ia, conforme representado na Tabela 19 e na Figura 56. Assim, é possível a comparação dos valores encontrados com as preconizações da NBR6123:1988 em seu Anexo G, que indicam valores de FV variando de 1,0 a 1,3. Destaca-se novamente que esses valores indicados pela norma são referentes a estudos com uma ou duas edificações na vizinhança, ponto importante nesse estudo.

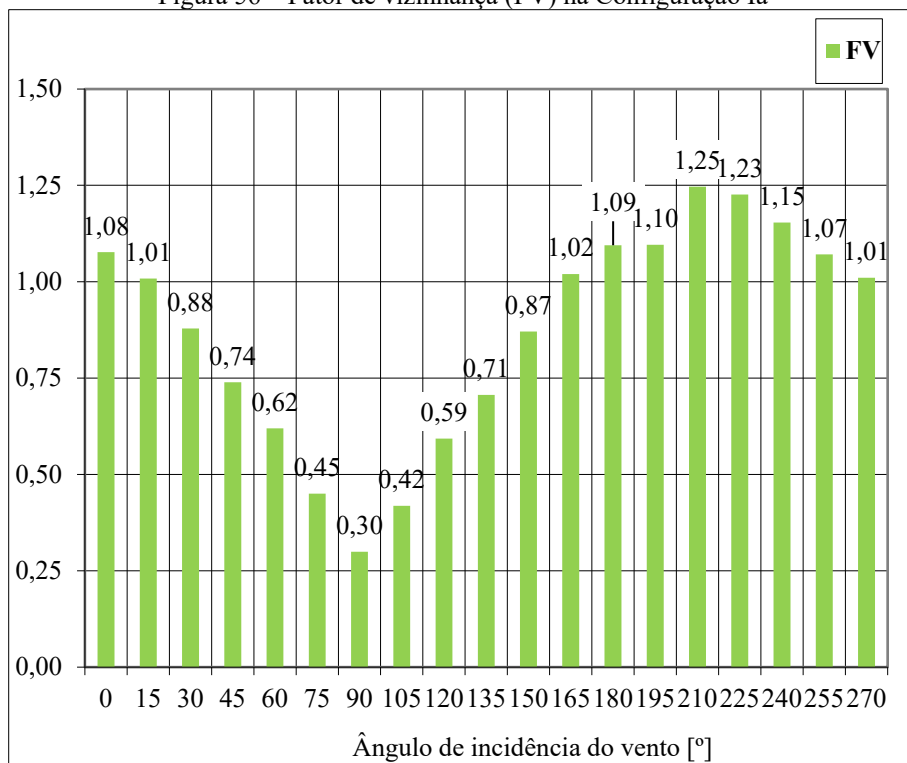
Analisando os fatores de vizinhança (FV) para a Configuração Ia, tem-se a Tabela 20, representando os resultados obtidos em túnel de vento através da porcentagem de ocorrência. Os resultados foram divididos entre aqueles que estão abaixo do limite inferior de 1,0 da norma brasileira, aqueles que estão de acordo com os limites e aqueles que ultrapassaram o limite superior de 1,3. Com relação aos resultados, tem-se que a maioria dos fatores estão entre os limites preconizados pela norma, correspondendo a 52,6% dos valores. No entanto, muitos valores ficaram abaixo do limite inferior, indicando um efeito de proteção nas ações, 47,4%, e ainda, nenhum fator ultrapassou o limite superior, atendendo às indicações da norma.

Tabela 19 – Resultados (FV) na Configuração Ia

Ângulo	C _{iso}	C _{cv}	FV
0°	0,89	0,96	1,08
15°	0,96	0,97	1,01
30°	1,06	0,93	0,88
45°	1,08	0,79	0,74
60°	0,98	0,61	0,62
75°	1,03	0,46	0,45
90°	1,12	0,34	0,30
105°	1,06	0,44	0,42
120°	1,01	0,60	0,59
135°	1,12	0,79	0,71
150°	1,07	0,94	0,87
165°	0,96	0,98	1,02
180°	0,91	0,99	1,09
195°	0,97	1,07	1,10
210°	1,09	1,36	1,25
225°	1,13	1,38	1,23
240°	1,00	1,16	1,15
255°	1,08	1,16	1,07
270°	1,17	1,18	1,01

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 56 – Fator de vizinhança (FV) na Configuração Ia



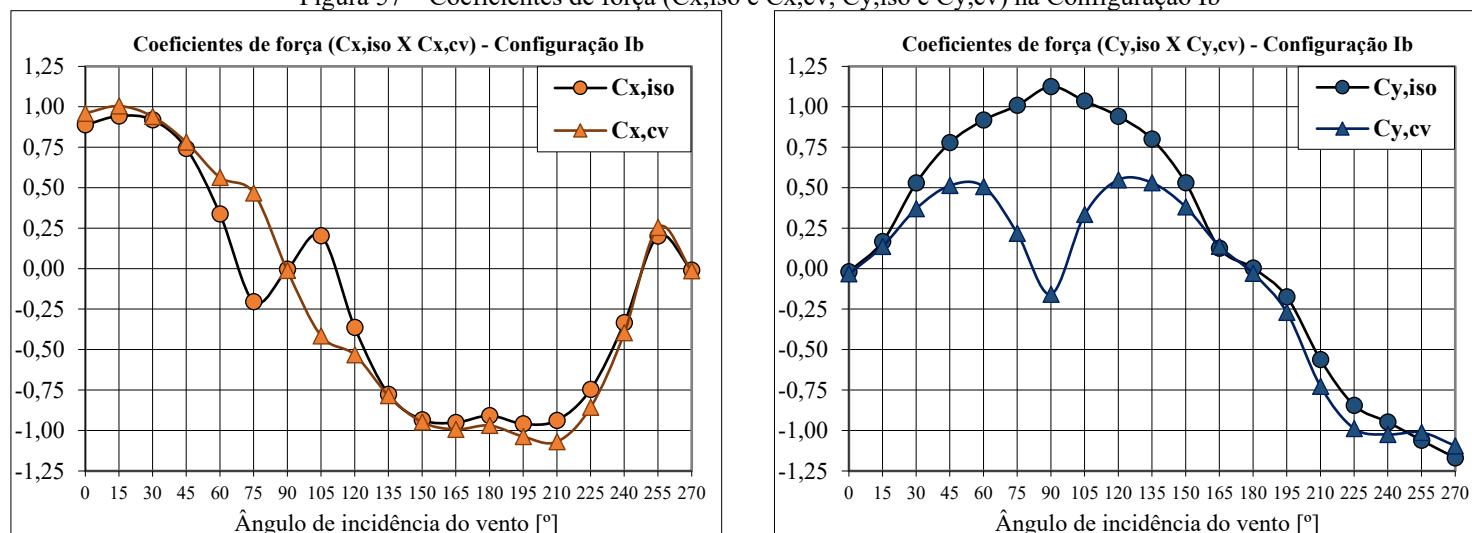
Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 20 – Resultados (FV) em porcentagem na Configuração Ia

FV	Resultados válidos	FV < 1		1 ≤ FV ≤ 1,3		FV > 1,3	
		19	9	47,4%	10	52,6%	0

Fonte: elaborado pelo autor

Na Figura 57, tem-se os resultados obtidos para a Configuração Ib, apresentando a comparação da variação dos coeficientes de força em x e y, na configuração isolada e com a presença da vizinhança, $C_{x,iso}$ e $C_{x,cv}$, $C_{y,iso}$ e $C_{y,cv}$, em função do ângulo de incidência de 0 a 270°.

Figura 57 – Coeficientes de força ($C_{x,iso}$ e $C_{x,cv}$, $C_{y,iso}$ e $C_{y,cv}$) na Configuração Ib

Fonte: elaborado pelo autor

Os coeficientes de força no eixo x encontram-se próximos para ambas configurações novamente, ocorrendo uma alteração mais significativa nos ângulos de 75° a 105° com inversão de valores, atenuando novamente o indicativo de ocorrência do fenômeno dinâmico descrito no “Critério de Den Hartog”. Os resultados para o eixo x, na Configuração Ib, continuam mostrando pouca influência da única edificação presente na vizinhança. Nessa configuração mais afastada em relação ao posicionamento na Configuração Ia, os maiores valores observados ocorreram nos mesmos ângulos de incidência e na mesma ordem da configuração anterior, 195° e 210°, para $C_{x,iso}$ (-0,96) e $C_{x,cv}$ (-1,07), respectivamente, com pequenas variações nos demais valores.

Os coeficientes de força no eixo y na Configuração Ib também apresentaram uma redução acentuada na maioria dos ângulos de incidência analisados, em menor intensidade comparada com a Configuração Ia, destacando a expressiva mudança entre os ângulos de 30° a 150°, causado pelo maior afastamento da edificação interferente. Segue-se com uma grande inversão de valores no ângulo de 90°, caracterizando um efeito de proteção nessas incidências do vento. Os maiores valores de $C_{y,iso}$ (1,12 e -1,17) ocorreram nos ângulos de 90° e 270°, respectivamente, e para $C_{y,cv}$ na Configuração Ib, em menor intensidade comparado a Configuração Ia, variando entre -1,01 a -1,09, entre os ângulos de 240° a 270°.

A Tabela 21 apresenta a relação desses resultados dos coeficientes de força presentes nos gráficos e os esforços cortantes na base, em relação aos eixos x e y, para a Configuração Ib. Assim, é possível comparar a variação dos valores para ambas configurações, isolada e com vizinhança. Além disso, apresentam-se os fatores de vizinhança calculados para ambos os eixos, FV_x e FV_y , que podem ser visualizados no gráfico da Figura 58.

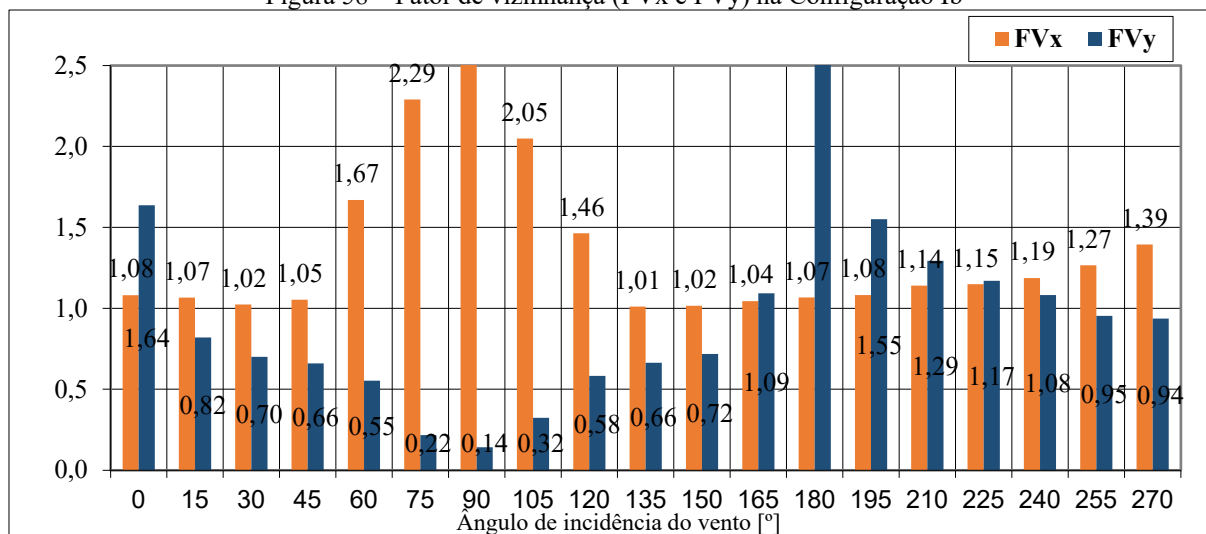
Tabela 21 – Coeficientes de força (C_x e C_y) e fator de vizinhança (FV_x e FV_y) na Configuração Ib

Ângulo	$C_{x,iso}$	$F_{x,iso}$ (tf)	$C_{y,iso}$	$F_{y,iso}$ (tf)	$C_{x,cv}$	$F_{x,cv}$ (tf)	$C_{y,cv}$	$F_{y,cv}$ (tf)	FV_x	FV_y
0°	0,89	797,87	-0,02	-26,49	0,96	862,53	-0,03	-43,34	1,08	1,64
15°	0,94	847,27	0,17	225,70	1,00	902,84	0,14	185,02	1,07	0,82
30°	0,92	825,39	0,53	713,33	0,94	844,83	0,37	499,49	1,02	0,70
45°	0,74	666,83	0,78	1048,87	0,78	702,19	0,51	692,13	1,05	0,66
60°	0,34	303,38	0,92	1236,95	0,56	506,26	0,51	683,17	1,67	0,55
75°	-0,20	-183,39	1,01	1359,33	0,47	419,94	0,22	293,83	2,29	0,22
90°	0,00	-3,22	1,12	1515,13	-0,01	-10,44	-0,16	-213,70	3,24	0,14
105°	0,20	182,20	1,04	1395,38	-0,42	-373,34	0,33	450,61	2,05	0,32
120°	-0,36	-326,59	0,94	1268,46	-0,53	-478,03	0,55	739,35	1,46	0,58
135°	-0,78	-697,64	0,80	1078,49	-0,78	-704,79	0,53	715,08	1,01	0,66
150°	-0,93	-838,87	0,53	715,32	-0,95	-851,72	0,38	513,42	1,02	0,72
165°	-0,95	-853,98	0,13	170,45	-0,99	-891,88	0,14	186,28	1,04	1,09

180°	-0,91	-815,39	0,00	5,21	-0,97	-870,11	-0,03	-39,43	1,07	7,57
195°	-0,96	-861,49	-0,17	-234,63	-1,04	-931,70	-0,27	-363,71	1,08	1,55
210°	-0,94	-842,07	-0,56	-757,61	-1,07	-960,39	-0,73	-979,63	1,14	1,29
225°	-0,75	-670,14	-0,84	-1138,13	-0,86	-769,73	-0,99	-1331,15	1,15	1,17
240°	-0,33	-299,95	-0,95	-1276,62	-0,40	-355,88	-1,02	-1380,57	1,19	1,08
255°	0,20	180,70	-1,06	-1429,19	0,25	228,78	-1,01	-1363,02	1,27	0,95
270°	-0,01	-8,61	-1,17	-1575,11	-0,01	-12,00	-1,09	-1475,09	1,39	0,94

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 58 – Fator de vizinhança (FVx e FVy) na Configuração Ib



Fonte: elaborado pelo autor

O gráfico dos fatores de vizinhança com relação aos eixos x e y, apresentado na Figura 58, permite observar a influência da única edificação mais afastada, presente na vizinhança, no modelo em estudo, possibilitando elaborar a Tabela 22, contendo a relação dos ângulos de incidência com majoração ou redução nas ações do vento. Caso o valor seja maior que 1, configura-se a majoração da força do vento na edificação pelas edificações vizinhas, caso seja menor que 1, ocorre a redução desses efeitos de interferência causados pela edificação no entorno.

Tabela 22 – Resultados (FVx e FVy) na Configuração Ib

Ângulo		FVx	FVy
0°	Ortogonal	Majoração de 8%	Majoração de 64%
15°	Oblíquo	Majoração de 7%	Redução de 18%
30°	Oblíquo	Majoração de 2%	Redução de 30%
45°	Oblíquo	Majoração de 5%	Redução de 34%
60°	Oblíquo	Majoração de 67%	Redução de 45%
75°	Oblíquo	Majoração de 129%	Redução de 78%
90°	Ortogonal	-	Redução de 86%
105°	Oblíquo	Majoração de 105%	Redução de 68%
120°	Oblíquo	Majoração de 46%	Redução de 42%
135°	Oblíquo	Majoração de 1%	Redução de 34%

150°	Oblíquo	Majoração de 2%	Redução de 28%
165°	Oblíquo	Majoração de 4%	Majoração de 9%
180°	Ortogonal	Majoração de 7%	-
195°	Oblíquo	Majoração de 8%	Majoração de 55%
210°	Oblíquo	Majoração de 14%	Majoração de 29%
225°	Oblíquo	Majoração de 15%	Majoração de 17%
240°	Oblíquo	Majoração de 19%	Majoração de 8%
255°	Oblíquo	Majoração de 27%	Redução de 5%
270°	Ortogonal	Majoração de 39%	Redução de 6%

Fonte: elaborado pelo autor

Assim, através dos resultados dos fatores de vizinhança com relação aos eixos x e y para a Configuração Ib, pode-se elaborar a Tabela 23, representando os resultados obtidos em túnel de vento através da porcentagem de ocorrência. Destaca-se que devido a valores dos coeficientes de força muito pequenos para o numerador e o denominador, alguns fatores são descartados por apresentarem um fator de vizinhança muito alto, casos dos ângulos de 90° em x e 180° em y. Com relação aos resultados, tem-se que todas as forças no eixo x foram majoradas, correspondendo a 100% das ações. Em contrapartida, no eixo y, houve uma maior redução das ações, correspondendo a 66,7%.

Tabela 23 – Resultados (FVx e FVy) em porcentagem na Configuração Ib

FV	Resultados			Redução (FV < 1)	Majoração (FV > 1)		
	Totais	Válidos	Descartados				
FV_x	19	18	1	0	0%	18	100%
FV_y		18	1	12	66,7%	6	33,3%

Fonte: elaborado pelo autor

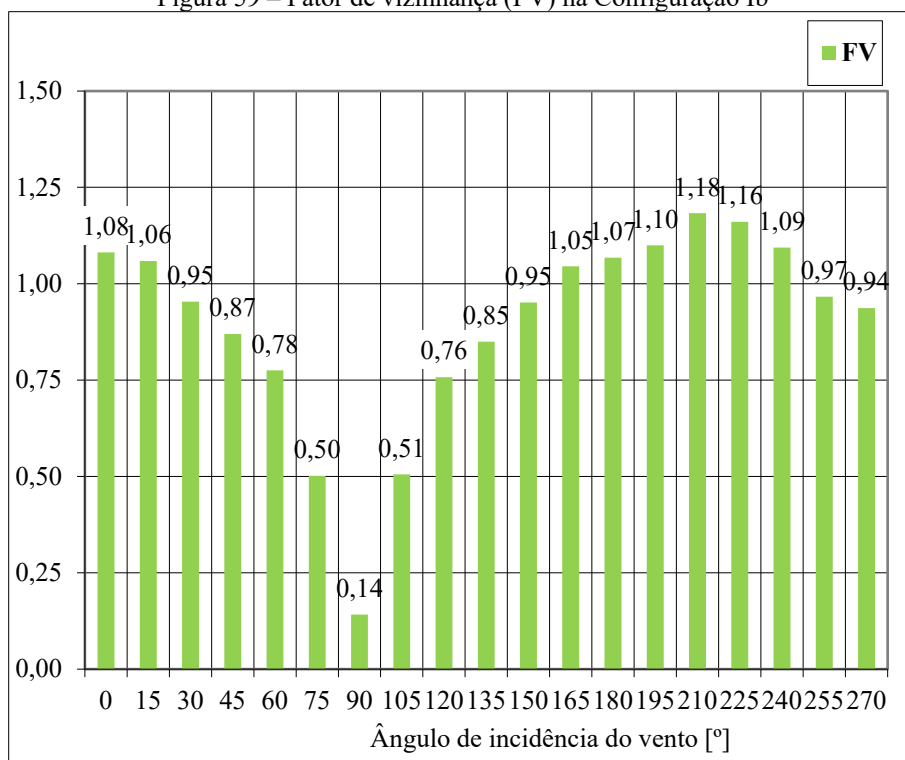
Na sequência, através dos coeficientes de força em x e y, tem-se a determinação dos coeficientes de força horizontais para cada ângulo de incidência e configuração, isolada e com vizinhança. Assim, é possível determinar os fatores de vizinhança (FV) para a Configuração Ib, conforme representado na Tabela 24 e na Figura 59. Permitindo a comparação dos valores encontrados com as preconizações da NBR6123:1988 em seu Anexo G, que indicam valores de FV variando de 1,0 a 1,3. Destaca-se novamente que esses valores indicados pela norma são referentes a estudos com uma ou duas edificações na vizinhança, ponto importante nesse estudo.

Tabela 24 – Resultados (FV) na Configuração Ib

Ângulo	C,iso	C,cv	FV
0°	0,89	0,96	1,08
15°	0,96	1,01	1,06
30°	1,06	1,01	0,95
45°	1,08	0,94	0,87
60°	0,98	0,76	0,78
75°	1,03	0,52	0,50
90°	1,12	0,16	0,14
105°	1,06	0,53	0,51
120°	1,01	0,76	0,76
135°	1,12	0,95	0,85
150°	1,07	1,02	0,95
165°	0,96	1,00	1,05
180°	0,91	0,97	1,07
195°	0,97	1,07	1,10
210°	1,09	1,29	1,18
225°	1,13	1,31	1,16
240°	1,00	1,10	1,09
255°	1,08	1,04	0,97
270°	1,17	1,09	0,94

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 59 – Fator de vizinhança (FV) na Configuração Ib



Fonte: elaborado pelo autor

Analisando os fatores de vizinhança (FV) para a Configuração Ib, tem-se a Tabela 25, representando os resultados obtidos em túnel de vento através da porcentagem de ocorrência. Os resultados foram divididos entre aqueles que estão abaixo do limite inferior de 1,0 da norma brasileira, aqueles que estão de acordo com os limites e aqueles que ultrapassaram o limite superior de 1,3. Com relação aos resultados, ao contrário da Configuração Ia, tem-se que a maioria dos fatores estão abaixo do limite inferior, correspondendo a 57,9% dos valores, indicando um efeito de proteção nas ações. Os demais resultados ficaram entre os limites preconizados pela norma, correspondendo a 42,1%, sendo que novamente, nenhum fator ultrapassou o limite superior, atendendo às indicações da norma.

Tabela 25 – Resultados (FV) em porcentagem na Configuração Ib

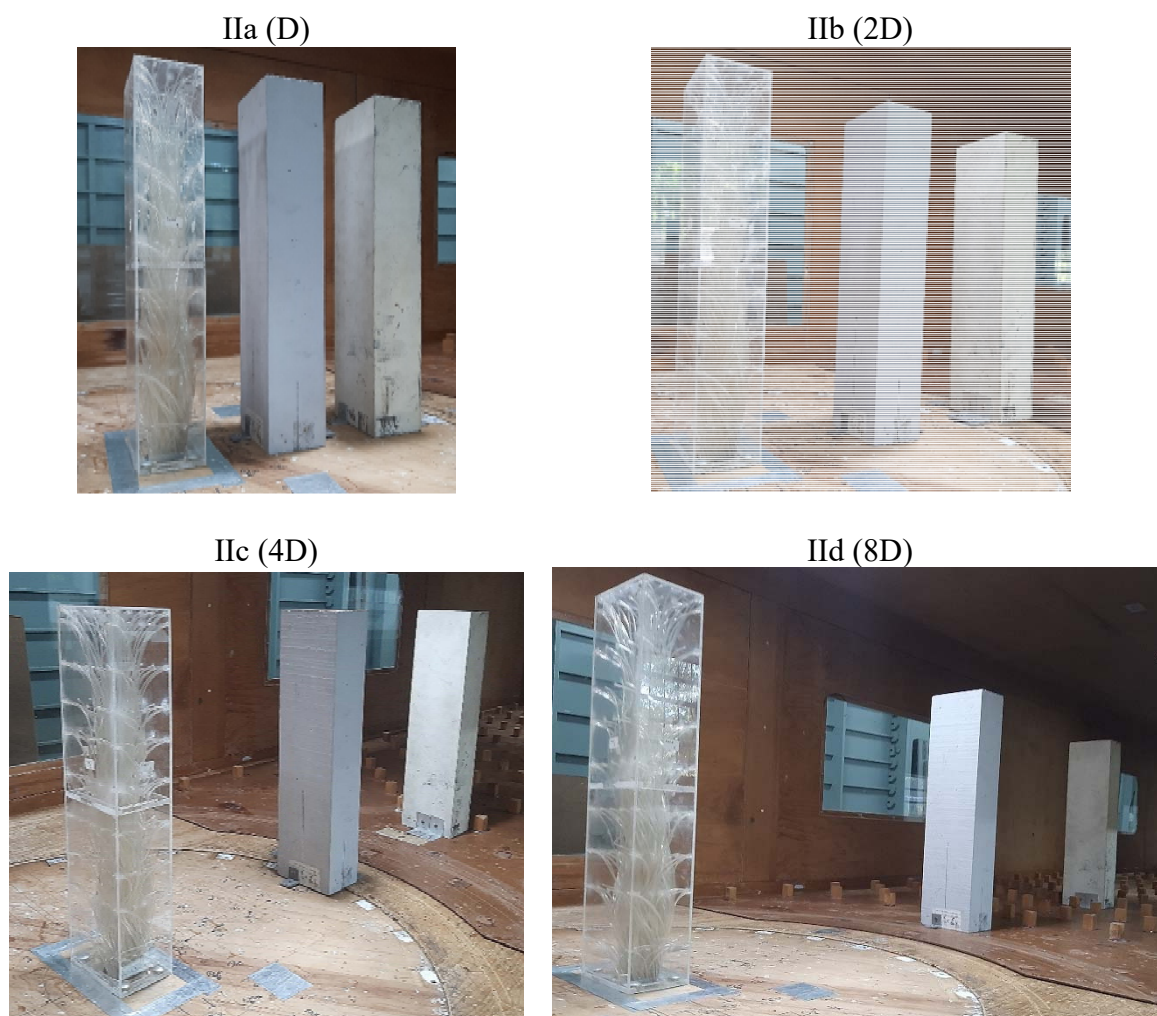
FV	Resultados válidos			
	FV < 1	1 ≤ FV ≤ 1,3	FV > 1,3	
	19	8	0	
	57,9%	42,1%	0%	0%

Fonte: elaborado pelo autor

7.2 CONFIGURAÇÃO II

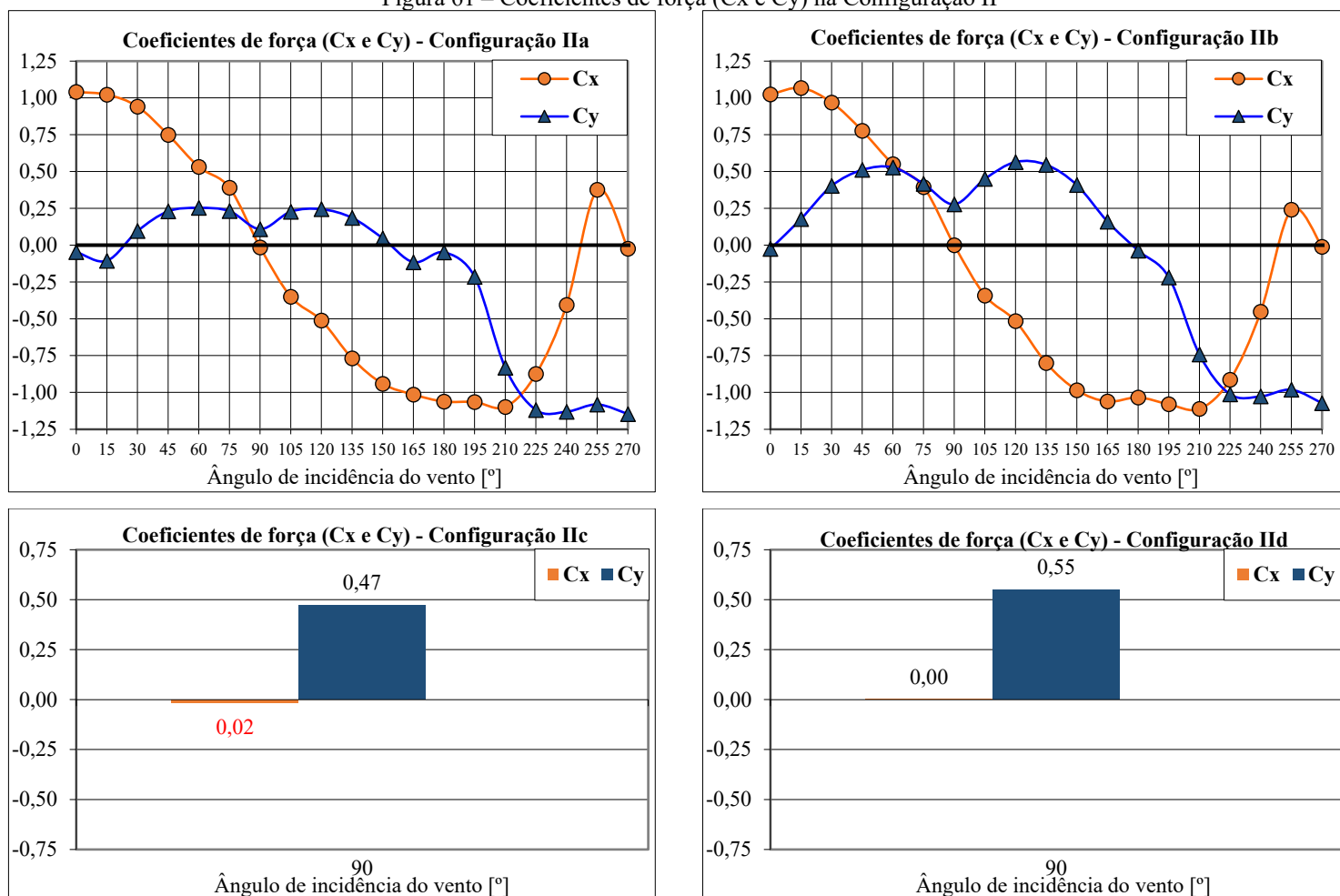
A Configuração II é composta por 3 (três) edificações, sendo 1 (um) modelo instrumentado (CAARC) e 2 (dois) modelos mudos, com 4 (quatro) posições relativas entre os modelos, alinhados ao longo do eixo do túnel na direção de incidência do vento a 90° , em $D = 75,00$ mm, $2D = 150,00$ mm, $4D = 300,00$ mm e $8D = 600,00$ mm. Na Figura 60, tem-se a representação de todas as posições relativas entre os modelos na Configuração II, inseridas no túnel.

Figura 60 – Modelos posicionados no interior do túnel de vento (Configuração II)



Fonte: elaborado pelo autor

Na Figura 61, tem-se os resultados obtidos para a Configuração II, configurações IIa, IIb, IIc e IId, apresentando a variação dos coeficientes de força (C_x e C_y) em função do ângulo de incidência do vento. Nas configurações IIa e IIb, as medições das pressões foram realizadas de 0 a 270° , nas demais configurações, IIc e IId, apenas com vento incidindo perpendicularmente a maior fachada do CAARC na direção de incidência do vento a 90° , conforme apresentado anteriormente.

Figura 61 – Coeficientes de força (C_x e C_y) na Configuração II

Fonte: elaborado pelo autor

Observando os gráficos da Figura 61, considerando as definições presentes na literatura para determinação dos coeficientes de arrasto (C_a), tem-se a Tabela 26, compreendendo a seleção dos coeficientes para cada configuração indicada na Configuração II. Inicialmente, é possível observar a expressiva redução nos valores dos coeficientes, causando um efeito de proteção. Embora sem inversão dos valores como na Configuração I. O C_a passou de 1,12 no modelo isolado para 0,11 na Configuração IIa, com a adição de duas edificações interferentes.

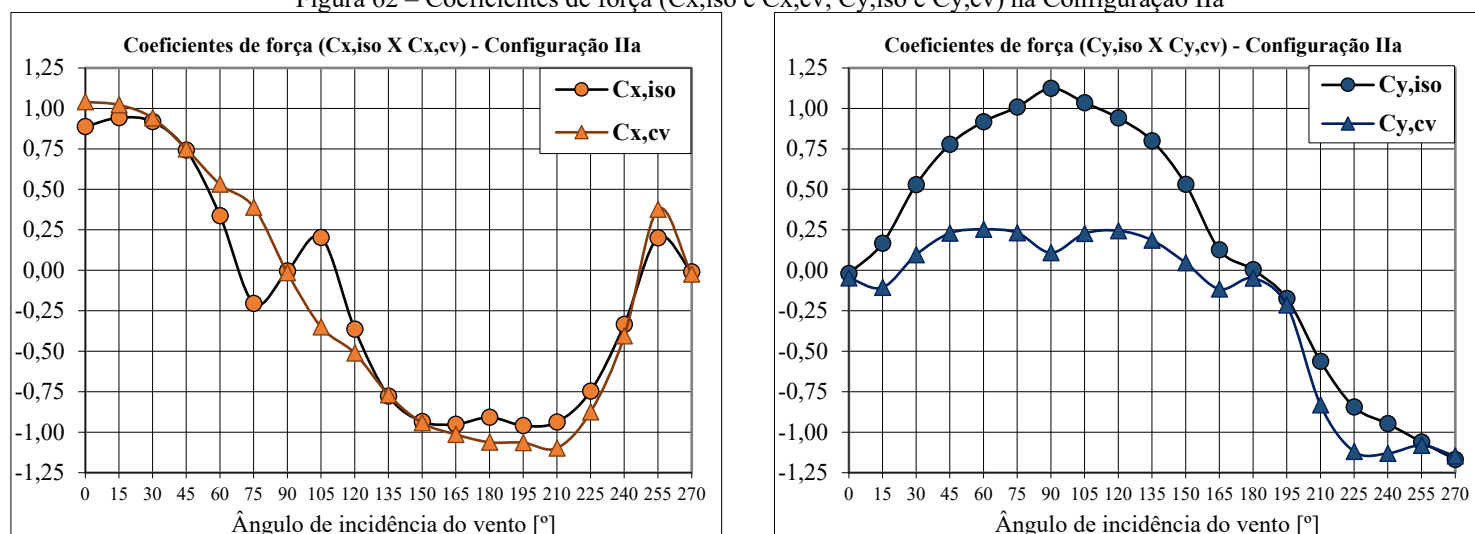
Em seguida, observa-se que conforme as duas edificações interferentes são afastadas da edificação em estudo ao longo do eixo do túnel, ocorre o aumento dos coeficientes como na configuração anterior, provavelmente relacionado com a formação mais definida da esteira, com vórtices mais organizados e maior energia, resultando no aumento gradativo dos coeficientes e na majoração das ações do vento, o que caracteriza os regimes de escoamento do efeito de interferência denominado turbulência da esteira. No entanto, observa-se uma menor intensidade dos efeitos nessa configuração mais afastada, devido ao aumento do número de edificações interferentes.

Tabela 26 – Resultados do Ca (Configuração II)

Configuração	Isolado	IIa (D)	IIb (2D)	IIc (4D)	IId (8D)
Ca	1,12	0,11	0,28	0,47	0,55

Fonte: elaborado pelo autor

Na Figura 62, tem-se os resultados obtidos para a Configuração IIa, apresentando a comparação da variação dos coeficientes de força em x e y, na configuração isolada e com a presença da vizinhança, $C_{x,iso}$ e $C_{x,cv}$, $C_{y,iso}$ e $C_{y,cv}$, em função do ângulo de incidência de 0 a 270°.

Figura 62 – Coeficientes de força ($C_{x,iso}$ e $C_{x,cv}$, $C_{y,iso}$ e $C_{y,cv}$) na Configuração IIa

Fonte: elaborado pelo autor

Os coeficientes de força no eixo x seguem próximos para ambas configurações, ocorrendo uma alteração mais significativa nos ângulos de 75° e 105° com inversão de valores, atenuando novamente o indicativo de ocorrência do fenômeno dinâmico descrito no “Critério de Den Hartog”. Os resultados para o eixo x, na Configuração IIa, mostraram maior influência das duas edificações presentes na vizinhança em comparação com a Configuração Ia. O maior valor observado para $C_{x,iso}$ é igual a -0,96, em 195°, e para $C_{x,cv}$ varia de -1,06 a -1,10 nos ângulos de 180° a 210°.

Os coeficientes de força no eixo y na Configuração IIa também apresentaram uma redução acentuada na maioria dos ângulos de incidência analisados, em uma intensidade bem menor comparada com a Configuração Ia e maior que a Configuração Ib. Destaque novamente para a expressiva mudança entre os ângulos de 15° a 165°, com uma redução expressiva no coeficiente do ângulo de 90°, caracterizando um intenso efeito de proteção nessas incidências do vento. Os maiores valores de $C_{y,iso}$ (1,12 e -1,17) ocorreram nos ângulos de 90° e 270°, respectivamente. No entanto, para $C_{y,cv}$, ocorreram entre os ângulos de 225° e 270°, variando entre -1,08 a -1,15.

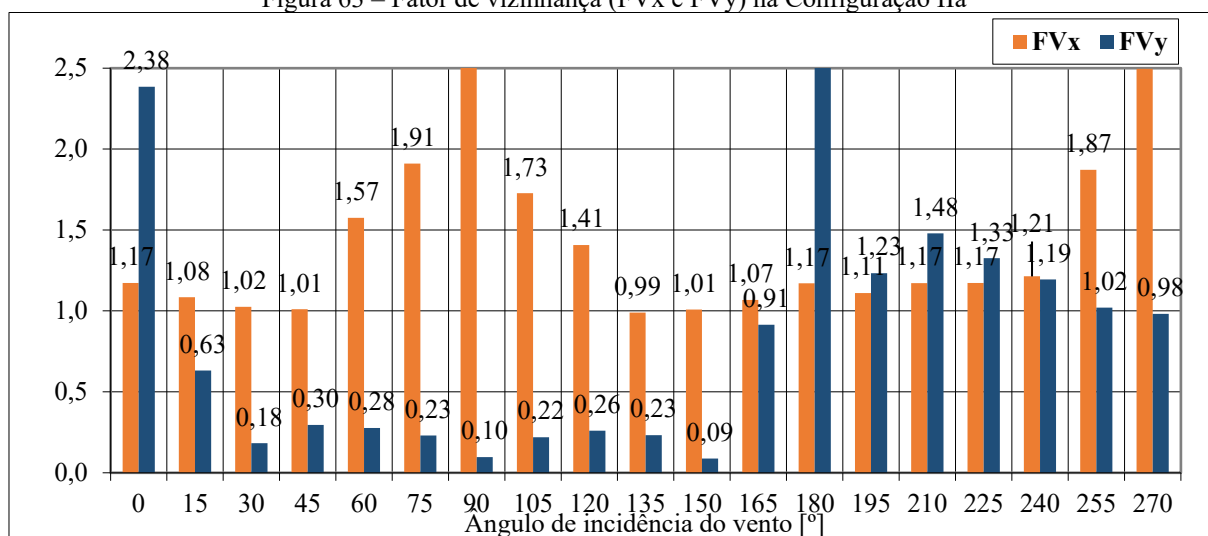
A Tabela 27 apresenta a relação de resultados dos coeficientes de força presentes nos gráficos e os esforços cortantes na base, em relação aos eixos x e y, para a Configuração IIa. Possibilitando comparar a variação dos valores para ambas configurações, isolada e com vizinhança. Além disso, apresentam-se os fatores de vizinhança calculados para ambos os eixos, FVx e FVy, que podem ser visualizados no gráfico da Figura 63.

Tabela 27 – Coeficientes de força (Cx e Cy) e fator de vizinhança (FVx e FVy) na Configuração IIa

Ângulo	Cx,iso	Fx,iso (tf)	Cy,iso	Fy,iso (tf)	Cx,cv	Fx,cv (tf)	Cy,cv	Fy,cv (tf)	FVx	FVy
0°	0,89	797,87	-0,02	-26,49	1,04	935,34	-0,05	-63,17	1,17	2,38
15°	0,94	847,27	0,17	225,70	1,02	918,34	-0,11	-142,45	1,08	0,63
30°	0,92	825,39	0,53	713,33	0,94	845,89	0,10	130,05	1,02	0,18
45°	0,74	666,83	0,78	1048,87	0,75	673,32	0,23	309,58	1,01	0,30
60°	0,34	303,38	0,92	1236,95	0,53	477,67	0,25	341,59	1,57	0,28
75°	-0,20	-183,39	1,01	1359,33	0,39	350,32	0,23	312,29	1,91	0,23
90°	0,00	-3,22	1,12	1515,13	-0,01	-13,21	0,11	146,70	4,10	0,10
105°	0,20	182,20	1,04	1395,38	-0,35	-314,61	0,23	306,41	1,73	0,22
120°	-0,36	-326,59	0,94	1268,46	-0,51	-459,29	0,24	329,73	1,41	0,26
135°	-0,78	-697,64	0,80	1078,49	-0,77	-690,57	0,19	250,35	0,99	0,23
150°	-0,93	-838,87	0,53	715,32	-0,94	-846,06	0,05	62,71	1,01	0,09
165°	-0,95	-853,98	0,13	170,45	-1,01	-911,23	-0,12	-155,89	1,07	0,91
180°	-0,91	-815,39	0,00	5,21	-1,06	-953,93	-0,05	-65,42	1,17	12,56
195°	-0,96	-861,49	-0,17	-234,63	-1,06	-956,49	-0,21	-289,30	1,11	1,23
210°	-0,94	-842,07	-0,56	-757,61	-1,10	-986,64	-0,83	-1120,62	1,17	1,48
225°	-0,75	-670,14	-0,84	-1138,13	-0,87	-785,60	-1,12	-1508,40	1,17	1,33
240°	-0,33	-299,95	-0,95	-1276,62	-0,41	-364,03	-1,13	-1523,91	1,21	1,19
255°	0,20	180,70	-1,06	-1429,19	0,38	338,16	-1,08	-1457,32	1,87	1,02
270°	-0,01	-8,61	-1,17	-1575,11	-0,02	-21,47	-1,15	-1545,84	2,49	0,98

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 63 – Fator de vizinhança (FVx e FVy) na Configuração IIa



Fonte: elaborado pelo autor

O gráfico dos fatores de vizinhança com relação aos eixos x e y, apresentado na Figura 63, permite observar a influência das duas edificações presentes na vizinhança no modelo em

estudo, possibilitando elaborar a Tabela 28, contendo a relação dos ângulos de incidência com majoração ou redução nas ações do vento. Caso o valor seja maior que 1, configura-se a majoração da força do vento na edificação pelas edificações vizinhas, caso seja menor que 1, ocorre a redução desses efeitos de interferência causados pela edificação no entorno.

Tabela 28 – Resultados (FV_x e FV_y) na Configuração IIa

Ângulo		FV _x	FV _y
0°	Ortogonal	Majoração de 17%	Majoração de 138%
15°	Oblíquo	Majoração de 8%	Redução de 37%
30°	Oblíquo	Majoração de 2%	Redução de 82%
45°	Oblíquo	Majoração de 1%	Redução de 70%
60°	Oblíquo	Majoração de 57%	Redução de 72%
75°	Oblíquo	Majoração de 91%	Redução de 77%
90°	Ortogonal	-	Redução de 90%
105°	Oblíquo	Majoração de 73%	Redução de 78%
120°	Oblíquo	Majoração de 41%	Redução de 74%
135°	Oblíquo	Redução de 1%	Redução de 77%
150°	Oblíquo	Majoração de 1%	Redução de 91%
165°	Oblíquo	Majoração de 7%	Redução de 9%
180°	Ortogonal	Majoração de 17%	-
195°	Oblíquo	Majoração de 11%	Majoração de 23%
210°	Oblíquo	Majoração de 17%	Majoração de 48%
225°	Oblíquo	Majoração de 17%	Majoração de 33%
240°	Oblíquo	Majoração de 21%	Majoração de 19%
255°	Oblíquo	Majoração de 87%	Majoração de 2%
270°	Ortogonal	-	Redução de 2%

Fonte: elaborado pelo autor

Assim, através dos resultados dos fatores de vizinhança com relação aos eixos x e y para a Configuração IIa, pode-se elaborar a Tabela 29, representando os resultados obtidos em túnel de vento através da porcentagem de ocorrência. Destaca-se que devido a valores dos coeficientes de força muito pequenos para o numerador e o denominador, alguns fatores são descartados por apresentarem um fator de vizinhança muito alto, casos dos ângulos de incidência 90° e 270° em x e 180° em y. Com relação aos resultados, tem-se que a grande maioria das forças no eixo x foram majoradas, correspondendo a 94,1% das ações, enquanto que no eixo y houve uma maior redução das ações, correspondendo a 66,7%.

Tabela 29 – Resultados (FV_x e FV_y) em porcentagem na Configuração IIa

FV	Resultados			Redução (FV < 1)	Majoração (FV > 1)
	Totais	Válidos	Descartados		
FV _x	19	17	2	1 5,9%	16 94,1%
FV _y		18	1	12 66,7%	6 33,3%

Fonte: elaborado pelo autor

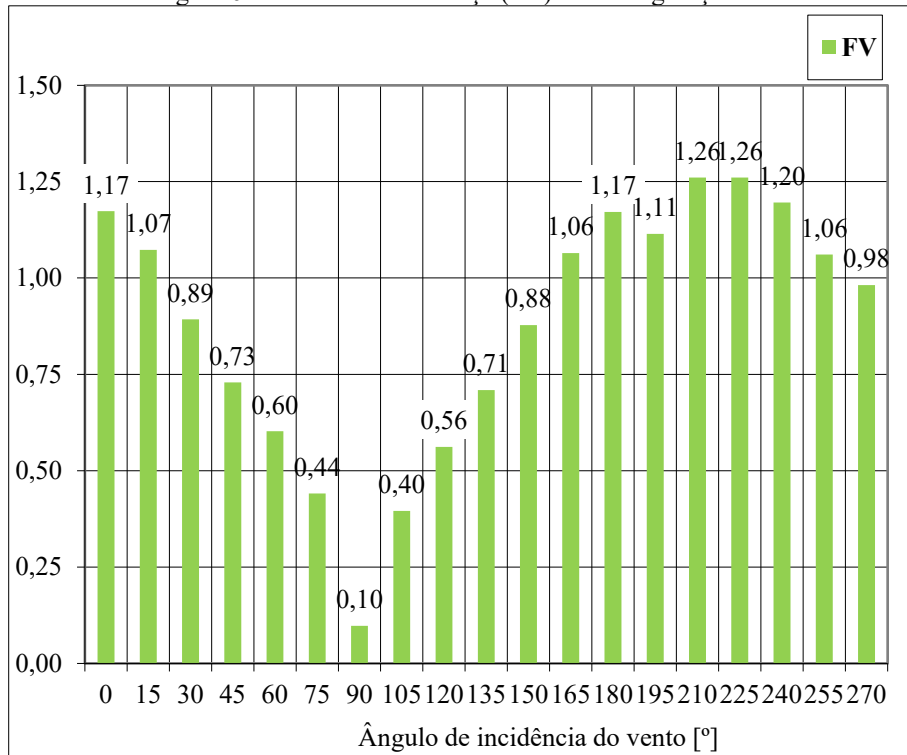
Na sequência, através dos coeficientes de força em x e y, tem-se a determinação dos coeficientes de força horizontais em cada ângulo de incidência e cada configuração, isolada e com vizinhança. Possibilitando determinar os fatores de vizinhança (FV) para a Configuração IIa, conforme representado na Tabela 30 e na Figura 64. Permitindo a comparação dos valores encontrados com as preconizações da NBR6123:1988 em seu Anexo G, que indicam valores de FV variando de 1,0 a 1,3.

Tabela 30 – Resultados (FV) na Configuração IIa

Ângulo	C,iso	C,cv	FV
0°	0,89	1,04	1,17
15°	0,96	1,03	1,07
30°	1,06	0,95	0,89
45°	1,08	0,78	0,73
60°	0,98	0,59	0,60
75°	1,03	0,45	0,44
90°	1,12	0,11	0,10
105°	1,06	0,42	0,40
120°	1,01	0,57	0,56
135°	1,12	0,79	0,71
150°	1,07	0,94	0,88
165°	0,96	1,02	1,06
180°	0,91	1,06	1,17
195°	0,97	1,09	1,11
210°	1,09	1,38	1,26
225°	1,13	1,42	1,26
240°	1,00	1,20	1,20
255°	1,08	1,14	1,06
270°	1,17	1,15	0,98

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 64 – Fator de vizinhança (FV) na Configuração IIa



Fonte: elaborado pelo autor

Analisando os fatores de vizinhança (FV) para a Configuração IIa, tem-se a Tabela 31, representando os resultados obtidos em túnel de vento através da porcentagem de ocorrência. Os resultados foram divididos entre aqueles que estão abaixo do limite inferior de 1,0 da norma brasileira, aqueles que estão de acordo com os limites e aqueles que ultrapassaram o limite superior de 1,3. Com relação aos resultados, tem-se que a maioria dos fatores estão abaixo do limite inferior, correspondendo a 52,6% dos valores, indicando um efeito de proteção nas ações. Os demais resultados ficaram entre os limites preconizados pela norma, correspondendo a 47,4%, sendo que, novamente, nenhum fator ultrapassou o limite superior.

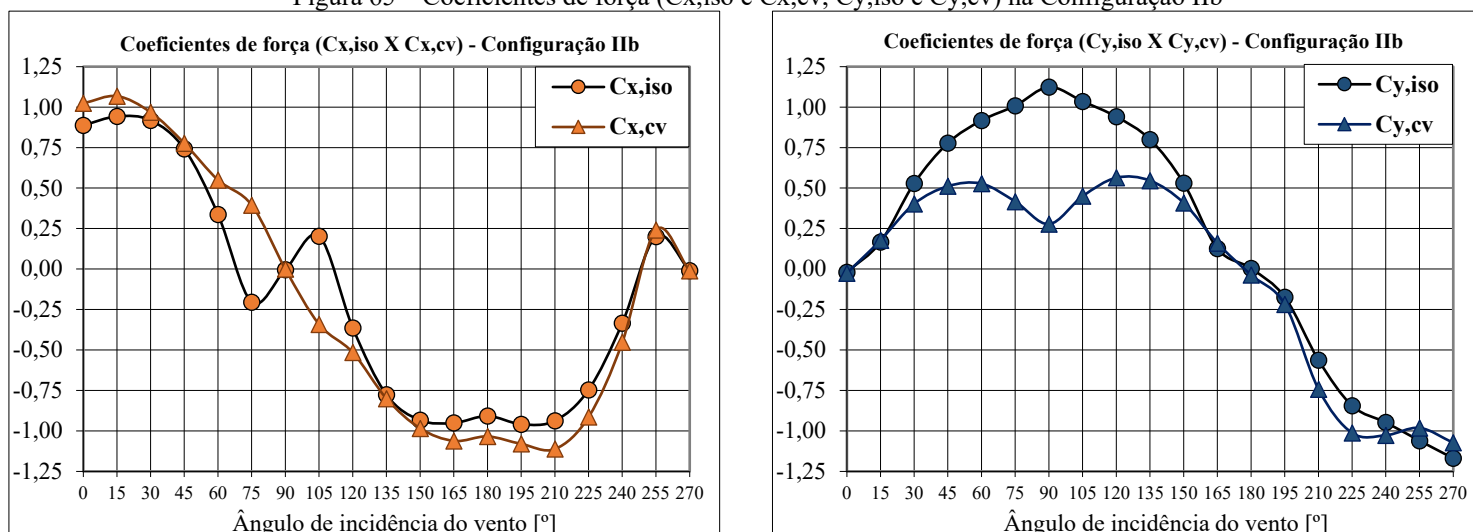
Tabela 31 – Resultados (FV) em porcentagem na Configuração IIa

FV	Resultados válidos		
	FV < 1	1 ≤ FV ≤ 1,3	FV > 1,3
	19	9	0
	52,6%	47,4%	0%

Fonte: elaborado pelo autor

Na Figura 65, tem-se os resultados obtidos para a Configuração IIb, apresentando a comparação da variação dos coeficientes de força em x e y, na configuração isolada e com a presença da vizinhança, $C_{x,iso}$ e $C_{x,cv}$, $C_{y,iso}$ e $C_{y,cv}$, em função do ângulo de incidência de 0 a 270°.

Figura 65 – Coeficientes de força ($C_{x,iso}$ e $C_{x,cv}$, $C_{y,iso}$ e $C_{y,cv}$) na Configuração IIb



Fonte: elaborado pelo autor

Os coeficientes de força no eixo x encontram-se novamente próximos para ambas configurações, ocorrendo uma alteração mais significativa nos ângulos de 75° a 105°, em menor ordem quando comparada com as configurações anteriores. Segue-se com a inversão de valores e atenuação do indicativo de ocorrência do fenômeno dinâmico descrito no “Critério de Den Hartog”. Os resultados para o eixo x, na Configuração IIb, continuam apresentando pouca influência das duas edificações presentes na vizinhança. Nessa configuração mais afastada em relação ao posicionamento na Configuração IIa, os maiores valores observados ocorreram nos mesmos ângulos de incidência e em uma ordem próxima da configuração anterior, 195° e 210°, para $C_{x,iso}$ (-0,96) e $C_{x,cv}$ (-1,11), respectivamente, com pequena variação nos demais valores.

Os coeficientes de força no eixo y, na Configuração IIb, apresentaram uma redução menos acentuada comparada as configurações anteriores, destacando agora a mudança entre os ângulos de 30° a 135°, causado pelo maior afastamento das edificações interferentes. Seguindo com uma redução no valor no ângulo de 90°, caracterizando um efeito de proteção nessas incidências do vento. Os maiores valores de $C_{y,iso}$ (1,12 e -1,17) ocorreram nos ângulos de 90° e 270°, respectivamente, e para $C_{y,cv}$ na Configuração IIb, em menor intensidade comparado à Configuração IIa, variando entre -1,03 a -1,07, nos ângulos de 240° e 270°, respectivamente.

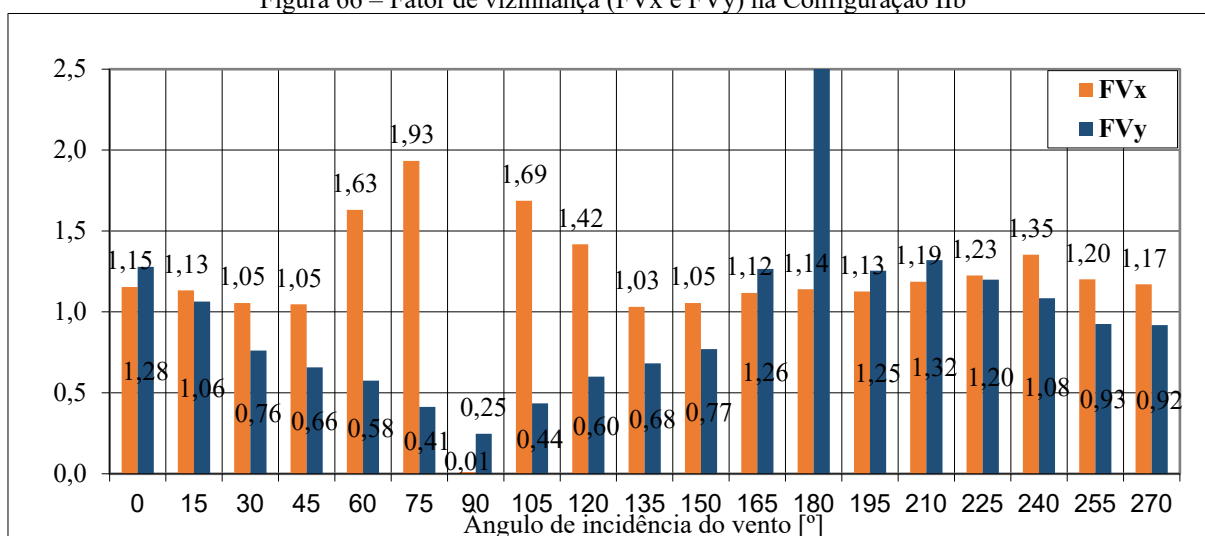
A Tabela 32 apresenta a relação de resultados dos coeficientes de força presentes nos gráficos e os esforços cortantes na base, em relação aos eixos x e y, para a Configuração IIb. Possibilitando comparar a variação dos valores para ambas configurações, isolada e com vizinhança. Além disso, apresenta os fatores de vizinhança calculados para ambos os eixos, FVx e FVy, que podem ser visualizados no gráfico da Figura 66.

Tabela 32 – Coeficientes de força (Cx e Cy) e fator de vizinhança (FVx e FVy) na Configuração IIb

Ângulo	Cx,iso	Fx,iso (tf)	Cy,iso	Fy,iso (tf)	Cx,cv	Fx,cv (tf)	Cy,cv	Fy,cv (tf)	FVx	FVy
0°	0,89	797,87	-0,02	-26,49	1,02	920,18	-0,03	-33,85	1,15	1,28
15°	0,94	847,27	0,17	225,70	1,07	959,41	0,18	239,99	1,13	1,06
30°	0,92	825,39	0,53	713,33	0,97	870,44	0,40	542,83	1,05	0,76
45°	0,74	666,83	0,78	1048,87	0,78	697,87	0,51	689,69	1,05	0,66
60°	0,34	303,38	0,92	1236,95	0,55	494,39	0,53	711,38	1,63	0,58
75°	-0,20	-183,39	1,01	1359,33	0,39	354,50	0,42	561,63	1,93	0,41
90°	0,00	-3,22	1,12	1515,13	0,00	0,03	0,28	374,07	0,01	0,25
105°	0,20	182,20	1,04	1395,38	-0,34	-307,26	0,45	607,07	1,69	0,44
120°	-0,36	-326,59	0,94	1268,46	-0,52	-462,82	0,56	760,74	1,42	0,60
135°	-0,78	-697,64	0,80	1078,49	-0,80	-719,00	0,55	735,82	1,03	0,68
150°	-0,93	-838,87	0,53	715,32	-0,98	-884,51	0,41	550,72	1,05	0,77
165°	-0,95	-853,98	0,13	170,45	-1,06	-953,69	0,16	215,60	1,12	1,26
180°	-0,91	-815,39	0,00	5,21	-1,03	-929,02	-0,04	-48,94	1,14	9,39
195°	-0,96	-861,49	-0,17	-234,63	-1,08	-970,23	-0,22	-294,30	1,13	1,25
210°	-0,94	-842,07	-0,56	-757,61	-1,11	-998,77	-0,74	-1000,00	1,19	1,32
225°	-0,75	-670,14	-0,84	-1138,13	-0,91	-820,95	-1,01	-1364,49	1,23	1,20
240°	-0,33	-299,95	-0,95	-1276,62	-0,45	-405,98	-1,03	-1383,77	1,35	1,08
255°	0,20	180,70	-1,06	-1429,19	0,24	216,97	-0,98	-1322,65	1,20	0,93
270°	-0,01	-8,61	-1,17	-1575,11	-0,01	-10,07	-1,07	-1446,11	1,17	0,92

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 66 – Fator de vizinhança (FVx e FVy) na Configuração IIb



Fonte: elaborado pelo autor

O gráfico dos fatores de vizinhança com relação aos eixos x e y, apresentado na Figura 66, permite observar a influência das duas edificações mais afastadas, presentes na vizinhança, no modelo em estudo, possibilitando elaborar a Tabela 33, contendo a relação dos ângulos de incidência com majoração ou redução nas ações do vento. Caso o valor seja maior que 1, configura-se a majoração da força do vento na edificação pelas edificações vizinhas, caso seja menor que 1, ocorre a redução desses efeitos de interferência.

Tabela 33 – Resultados (FVx e FVy) na Configuração IIb

Ângulo		FVx	FVy
0°	Ortogonal	Majoração de 15%	Majoração de 28%
15°	Oblíquo	Majoração de 13%	Majoração de 6%
30°	Oblíquo	Majoração de 5%	Redução de 24%
45°	Oblíquo	Majoração de 5%	Redução de 34%
60°	Oblíquo	Majoração de 63%	Redução de 42%
75°	Oblíquo	Majoração de 93%	Redução de 59%
90°	Ortogonal	Redução de 99%	Redução de 75%
105°	Oblíquo	Majoração de 69%	Redução de 56%
120°	Oblíquo	Majoração de 42%	Redução de 40%
135°	Oblíquo	Majoração de 3%	Redução de 32%
150°	Oblíquo	Majoração de 5%	Redução de 23%
165°	Oblíquo	Majoração de 12%	Majoração de 26%
180°	Ortogonal	Majoração de 14%	-
195°	Oblíquo	Majoração de 13%	Majoração de 25%
210°	Oblíquo	Majoração de 19%	Majoração de 32%
225°	Oblíquo	Majoração de 23%	Majoração de 20%
240°	Oblíquo	Majoração de 35%	Majoração de 8%
255°	Oblíquo	Majoração de 20%	Redução de 7%
270°	Ortogonal	Majoração de 17%	Redução de 8%

Fonte: elaborado pelo autor

Assim, através dos resultados dos fatores de vizinhança com relação aos eixos x e y para a Configuração IIb, pode-se elaborar a Tabela 34, representando os resultados obtidos em túnel de vento através da porcentagem de ocorrência. Destaca-se que devido a valores dos coeficientes de força muito pequenos para o numerador e o denominador, alguns fatores são descartados por apresentarem um fator de vizinhança muito alto, observado apenas para 180° em y nessa configuração. Com relação aos resultados, tem-se que a grande maioria das forças no eixo x foram majoradas, correspondendo a 94,7% das ações. Em contrapartida, no eixo y, houve uma maior redução das ações, correspondendo a 61,1%.

Tabela 34 – Resultados (FVx e FVy) em porcentagem na Configuração IIb

FV	Resultados			Redução (FV < 1)	Majoração (FV > 1)		
	Totais	Válidos	Descartados				
FVx	19	19	0	1	5,3%	18	94,7%
FVy		18	1	11	61,1%	7	38,9%

Fonte: elaborado pelo autor

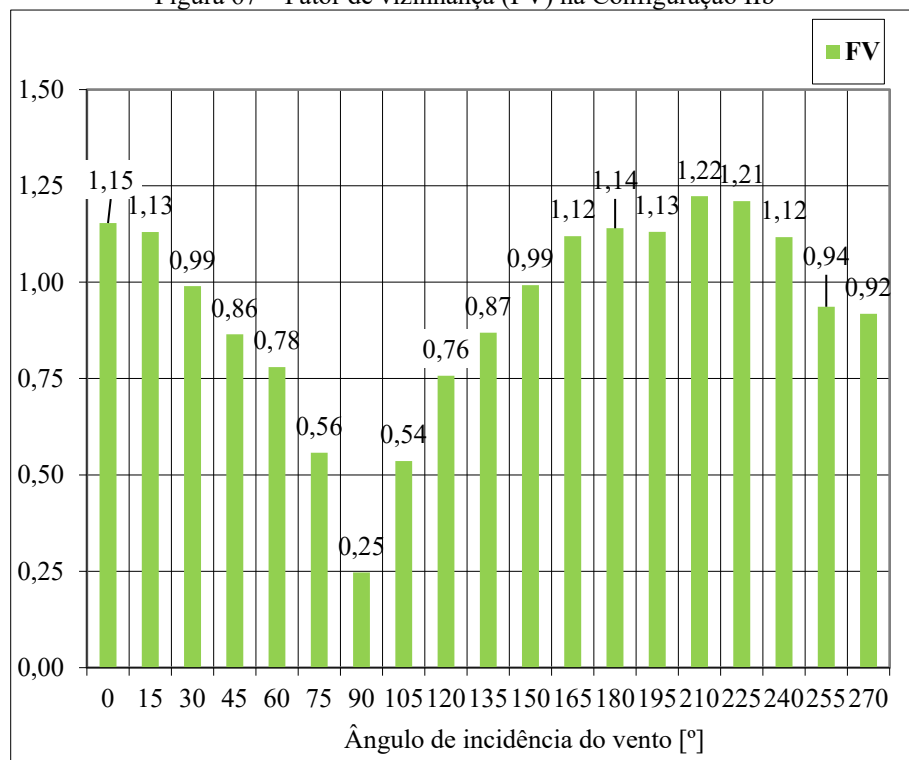
Na sequência, através dos coeficientes de força em x e y, tem-se a determinação dos coeficientes de força horizontais em cada ângulo de incidência e configuração, isolada e com vizinhança. Possibilitando determinar os fatores de vizinhança (FV) para a Configuração IIb, conforme representado na Tabela 35 e Figura 67. Assim, permite-se a comparação dos valores encontrados com as preconizações da NBR6123:1988 em seu Anexo G, que indicam valores de FV variando de 1,0 a 1,3. Destaca-se novamente que esses valores indicados pela norma são referentes a estudos com uma ou duas edificações na vizinhança, ponto importante nesse estudo.

Tabela 35 – Resultados (FV) na Configuração IIb

Ângulo	C,iso	C,cv	FV
0°	0,89	1,02	1,15
15°	0,96	1,08	1,13
30°	1,06	1,05	0,99
45°	1,08	0,93	0,86
60°	0,98	0,76	0,78
75°	1,03	0,57	0,56
90°	1,12	0,28	0,25
105°	1,06	0,57	0,54
120°	1,01	0,76	0,76
135°	1,12	0,97	0,87
150°	1,07	1,07	0,99
165°	0,96	1,07	1,12
180°	0,91	1,03	1,14
195°	0,97	1,10	1,13
210°	1,09	1,34	1,22
225°	1,13	1,36	1,21
240°	1,00	1,12	1,12
255°	1,08	1,01	0,94
270°	1,17	1,07	0,92

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 67 – Fator de vizinhança (FV) na Configuração IIb



Fonte: elaborado pelo autor

Analisando os fatores de vizinhança (FV) para a Configuração IIb, tem-se a Tabela 36, representando os resultados obtidos em túnel de vento através da porcentagem de ocorrência. Os resultados foram divididos entre aqueles que estão abaixo do limite inferior de 1,0 da norma brasileira, aqueles que estão de acordo com os limites e aqueles que ultrapassaram o limite superior de 1,3. Com relação aos resultados, conforme ocorrido na Configuração IIa, tem-se que a maioria dos fatores estão abaixo do limite inferior, correspondendo a 57,9% dos valores, indicando um efeito de proteção nas ações. Os demais resultados ficaram entre os limites preconizados pela norma, correspondendo a 42,1%, sendo que novamente, nenhum fator ultrapassou o limite superior, atendendo às indicações da norma.

Tabela 36 – Resultados (FV) em porcentagem na Configuração IIb

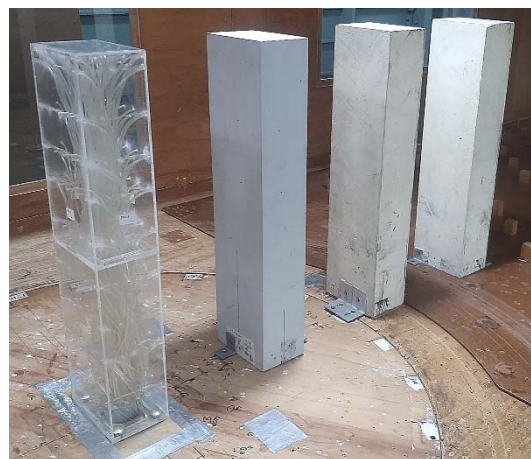
FV	Resultados válidos		FV < 1		1 ≤ FV ≤ 1,3		FV > 1,3	
		19	11	57,9%	8	42,1%	0	0%

Fonte: elaborado pelo autor

7.3 CONFIGURAÇÃO III

A Configuração III é composta por 4 (quatro) edificações, sendo 1 (um) modelo instrumentado (CAARC) e 3 (três) modelos mudos, com 4 (quatro) posições relativas entre os modelos, alinhados ao longo do túnel na direção de incidência do vento a 90° em $D = 75,00$ mm, $2D = 150,00$ mm, $4D = 300,00$ mm e $8D = 600,00$ mm. Na Figura 68, tem-se a representação de todas as posições relativas entre os modelos na Configuração III, inseridas no interior do túnel.

Figura 68 – Modelos posicionados no interior do túnel de vento (Configuração III)
IIIa (D) IIIb (2D)



IIIc (4D)



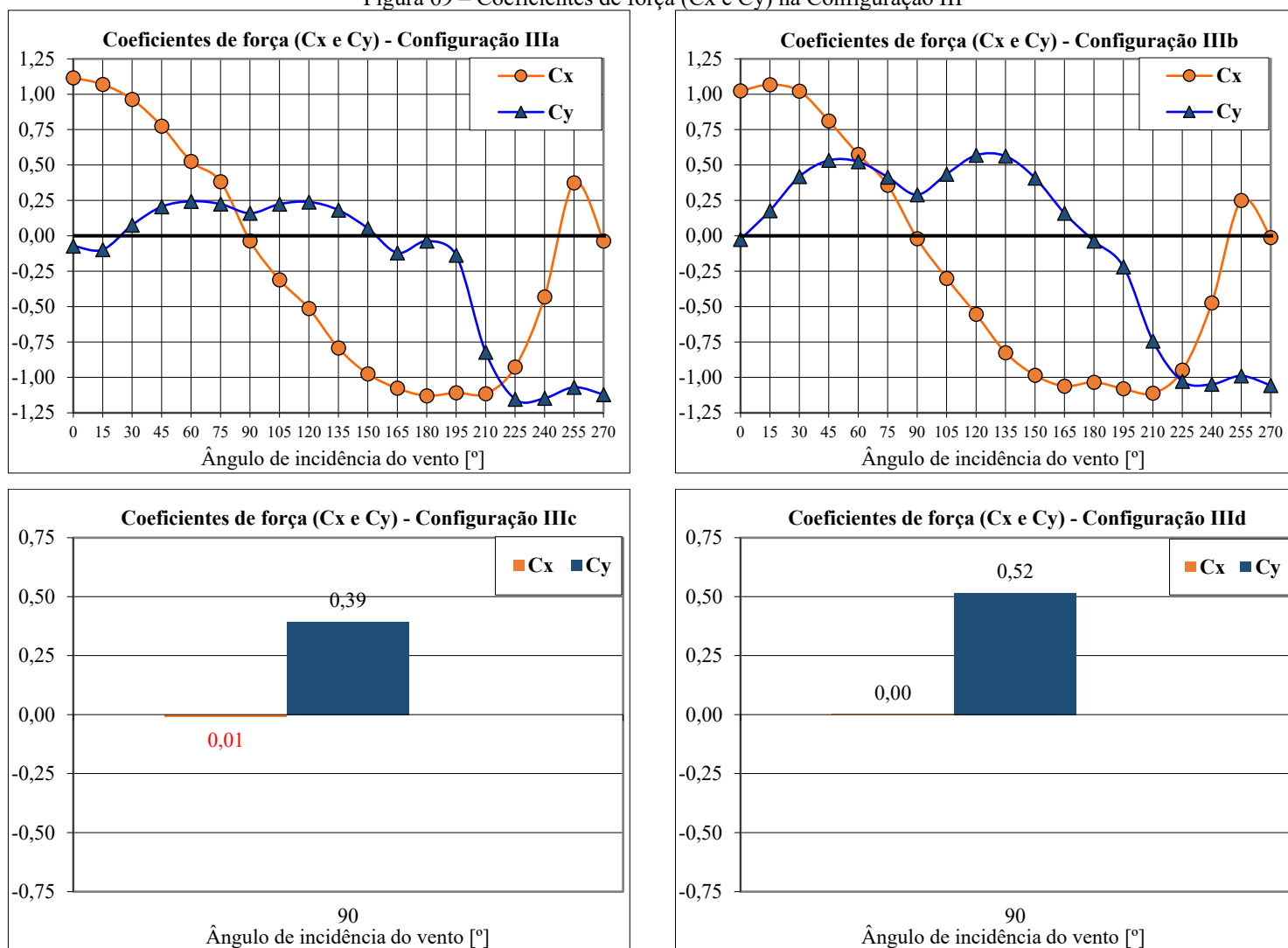
IIIId (8D)



Fonte: elaborado pelo autor

Na Figura 69, tem-se os resultados obtidos para a Configuração III, configurações IIIa, IIIb, IIIc e IIIId, apresentando a variação dos coeficientes de força (C_x e C_y) em função do ângulo de incidência do vento. Nas configurações IIIa e IIIb, as medições das pressões foram realizadas de 0 a 270°, e nas demais configurações, IIIc e IIIId, apenas com vento incidindo perpendicularmente a maior fachada do CAARC na direção de incidência do vento a 90°, conforme apresentado anteriormente.

Figura 69 – Coeficientes de força (C_x e C_y) na Configuração III



Fonte: elaborado pelo autor

Observando os gráficos da Figura 69, considerando as definições presentes na literatura para determinação dos coeficientes de arrasto (C_a), tem-se a Tabela 37, compreendendo a seleção dos coeficientes para cada configuração indicada na Configuração III. Inicialmente, observa-se novamente uma expressiva redução nos valores dos coeficientes, causando um efeito de proteção. Embora sem inversão dos valores, como na Configuração I, e causando uma menor

proteção em comparação com a Configuração II. O C_a passou de 1,12 com o modelo isolado para 0,16 na Configuração IIIa, sendo 0,11 na Configuração IIa, conforme a adição das três edificações interferentes mais próximas do modelo em estudo.

Em seguida, observa-se que à medida que as três edificações interferentes são afastadas da edificação em estudo ao longo do túnel, ocorre o aumento dos coeficientes, conforme ocorreu nas configurações anteriores. Relacionado com a formação mais definida da esteira com vórtices mais organizados e maior energia, resultando no aumento gradativo dos coeficientes e na majoração das ações do vento, alternando entre os regimes de escoamento do efeito de interferência denominado turbulência da esteira. No entanto, novamente observa-se uma menor intensidade, comparada aos resultados com os afastamentos na Configuração II, seguindo o aumento do afastamento nas edificações interferentes na Configuração III, devido ao maior número de edificações no entorno.

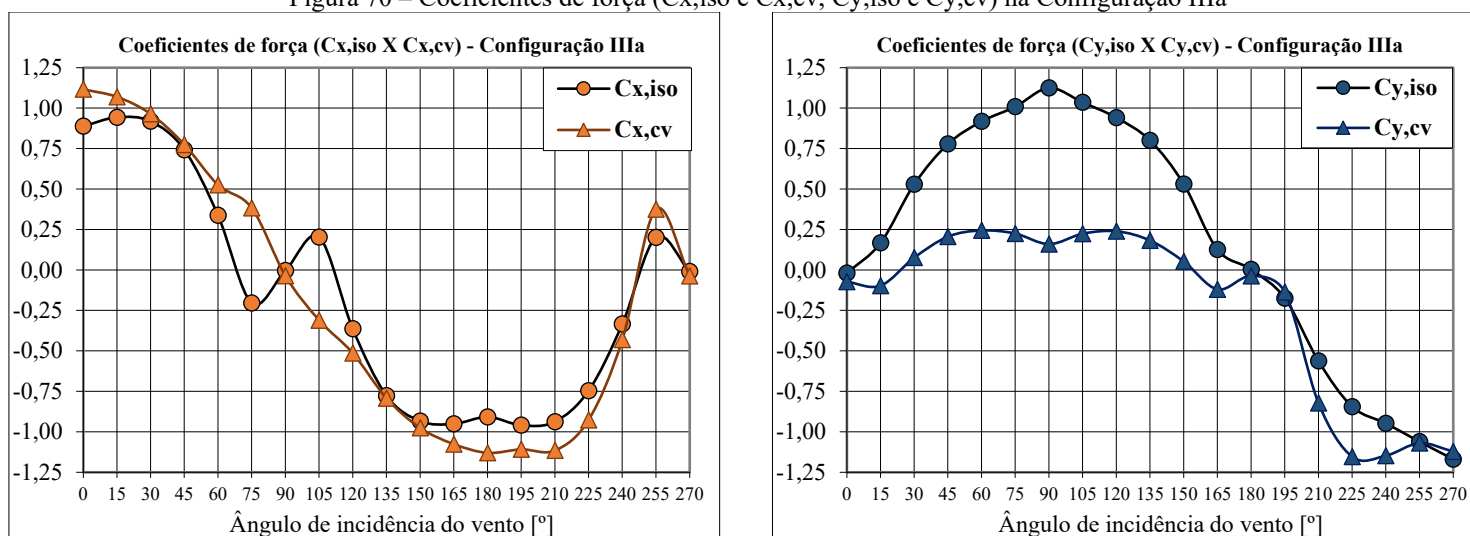
Tabela 37 – Resultados do C_a (Configuração III)

Configuração	Isolado	IIIa (D)	IIIb (2D)	IIIc (4D)	IIId (8D)
C_a	1,12	0,16	0,29	0,39	0,52

Fonte: elaborado pelo autor

Na Figura 70, tem-se os resultados obtidos para a Configuração IIIa, apresentando a comparação da variação dos coeficientes de força em x e y, na configuração isolada e com vizinhança, $C_{x,iso}$ e $C_{x,cv}$, $C_{y,iso}$ e $C_{y,cv}$, em função do ângulo de incidência de 0 a 270°.

Figura 70 – Coeficientes de força ($C_{x,iso}$ e $C_{x,cv}$, $C_{y,iso}$ e $C_{y,cv}$) na Configuração IIIa



Fonte: elaborado pelo autor

Os coeficientes de força no eixo x seguem parcialmente próximos para ambas configurações, ocorrendo uma alteração mais significativa nos ângulos de 75° e 105°, seguindo com a inversão

de valores e a atenuação do indicativo de ocorrência do fenômeno dinâmico descrito no “Critério de Den Hartog”. Os resultados para o eixo x, na Configuração IIIa, mostraram maior influência à medida que as três edificações presentes na vizinhança foram inseridas quando comparado aos valores obtidos nas Configurações Ia e IIa. Os maiores valores observados para $C_{x,iso}$ (-0,96) no ângulo de 195° e para $C_{x,cv}$ variando de -1,11 nos ângulos de 195° e 210° a -1,13 em 180°, e ainda 1,12 no ângulo de 0°.

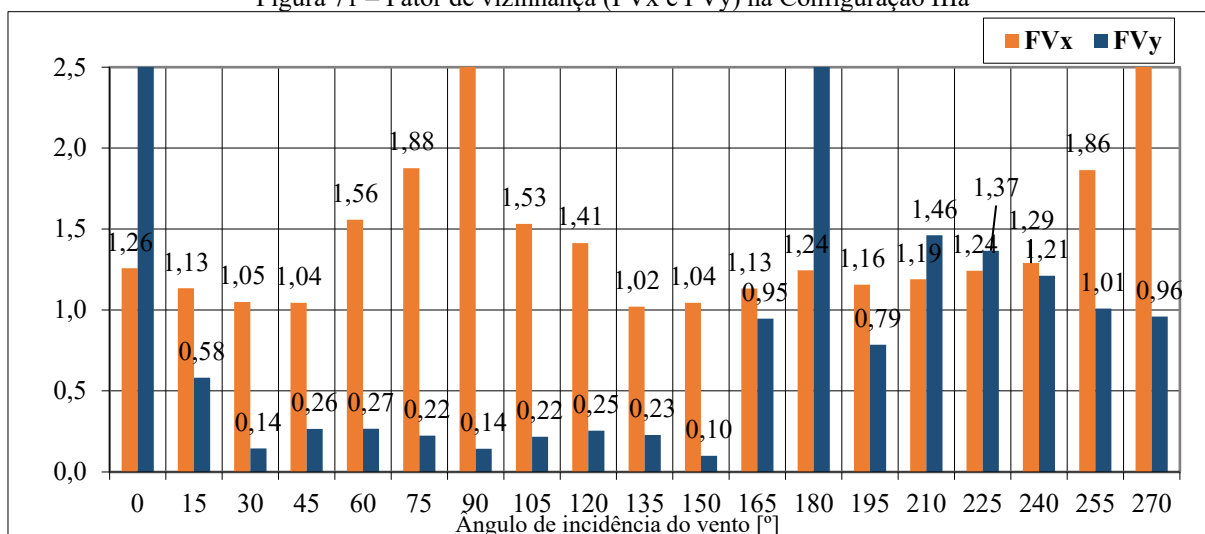
Os coeficientes de força no eixo y, na Configuração IIIa, também apresentaram uma redução acentuada para a maioria dos ângulos de incidência analisados, com a mesma intensidade observada na Configuração IIa. Destaque novamente para a expressiva mudança entre os ângulos de 15° a 165°, seguindo a redução expressiva no coeficiente do ângulo de 90°, caracterizando um intenso efeito de proteção nessas incidências do vento. Os maiores valores de $C_{y,iso}$ ocorreram nos ângulos de 90° e 270°, 1,12 e -1,17, respectivamente. No entanto, para $C_{y,cv}$, eles ocorreram nos ângulos de 225° e 240°, iguais a -1,15.

A Tabela 38 apresenta a relação de resultados dos coeficientes de força presentes nos gráficos e os esforços cortantes na base, em relação aos eixos x e y, na Configuração IIIa. Possibilitando comparar a variação dos valores para ambas configurações, isolada e com vizinhança. Além disso, apresentam-se os fatores de vizinhança calculados, FVx e FVy, Figura 71.

Tabela 38 – Coeficientes de força (C_x e C_y) e fator de vizinhança (FVx e FVy) na Configuração IIIa

Ângulo	$C_{x,iso}$	$F_{x,iso}$ (tf)	$C_{y,iso}$	$F_{y,iso}$ (tf)	$C_{x,cv}$	$F_{x,cv}$ (tf)	$C_{y,cv}$	$F_{y,cv}$ (tf)	FVx	FVy
0°	0,89	797,87	-0,02	-26,49	1,12	1003,19	-0,07	-97,46	1,26	3,68
15°	0,94	847,27	0,17	225,70	1,07	960,74	-0,10	-131,13	1,13	0,58
30°	0,92	825,39	0,53	713,33	0,96	866,14	0,08	102,94	1,05	0,14
45°	0,74	666,83	0,78	1048,87	0,78	696,43	0,21	277,52	1,04	0,26
60°	0,34	303,38	0,92	1236,95	0,53	472,31	0,24	329,21	1,56	0,27
75°	-0,20	-183,39	1,01	1359,33	0,38	344,03	0,23	303,41	1,88	0,22
90°	0,00	-3,22	1,12	1515,13	-0,04	-32,22	0,16	215,37	10,00	0,14
105°	0,20	182,20	1,04	1395,38	-0,31	-278,96	0,22	302,24	1,53	0,22
120°	-0,36	-326,59	0,94	1268,46	-0,51	-461,31	0,24	322,88	1,41	0,25
135°	-0,78	-697,64	0,80	1078,49	-0,79	-711,86	0,18	245,28	1,02	0,23
150°	-0,93	-838,87	0,53	715,32	-0,98	-876,26	0,05	71,15	1,04	0,10
165°	-0,95	-853,98	0,13	170,45	-1,08	-966,55	-0,12	-161,27	1,13	0,95
180°	-0,91	-815,39	0,00	5,21	-1,13	-1014,90	-0,04	-49,30	1,24	9,46
195°	-0,96	-861,49	-0,17	-234,63	-1,11	-995,48	-0,14	-184,23	1,16	0,79
210°	-0,94	-842,07	-0,56	-757,61	-1,11	-1001,63	-0,82	-1107,48	1,19	1,46
225°	-0,75	-670,14	-0,84	-1138,13	-0,93	-832,48	-1,15	-1554,41	1,24	1,37
240°	-0,33	-299,95	-0,95	-1276,62	-0,43	-386,95	-1,15	-1545,76	1,29	1,21
255°	0,20	180,70	-1,06	-1429,19	0,37	336,88	-1,07	-1441,01	1,86	1,01
270°	-0,01	-8,61	-1,17	-1575,11	-0,04	-32,97	-1,12	-1511,20	3,83	0,96

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 71 – Fator de vizinhança (FV_x e FV_y) na Configuração IIIa

Fonte: elaborado pelo autor

O gráfico dos fatores de vizinhança com relação aos eixos x e y, apresentado na Figura 71, permite observar a influência das três edificações presentes na vizinhança no modelo em estudo, possibilitando elaborar a Tabela 39, contendo a relação dos ângulos de incidência com majoração ou redução nas ações do vento. Caso o valor seja maior que 1, configura-se a majoração da força do vento na edificação pelas edificações vizinhas, caso seja menor que 1, ocorre a redução desses efeitos de interferência causados pela edificação no entorno.

Tabela 39 – Resultados (FV_x e FV_y) na Configuração IIIa

Ângulo		FV _x	FV _y
0°	Ortogonal	Majoração de 26%	-
15°	Oblíquo	Majoração de 13%	Redução de 42%
30°	Oblíquo	Majoração de 5%	Redução de 86%
45°	Oblíquo	Majoração de 4%	Redução de 74%
60°	Oblíquo	Majoração de 56%	Redução de 73%
75°	Oblíquo	Majoração de 88%	Redução de 78%
90°	Ortogonal	-	Redução de 86%
105°	Oblíquo	Majoração de 53%	Redução de 78%
120°	Oblíquo	Majoração de 41%	Redução de 75%
135°	Oblíquo	Majoração de 2%	Redução de 77%
150°	Oblíquo	Majoração de 4%	Redução de 90%
165°	Oblíquo	Majoração de 13%	Redução de 5%
180°	Ortogonal	Majoração de 24%	-
195°	Oblíquo	Majoração de 16%	Redução de 21%
210°	Oblíquo	Majoração de 19%	Majoração de 46%
225°	Oblíquo	Majoração de 24%	Majoração de 37%
240°	Oblíquo	Majoração de 29%	Majoração de 21%
255°	Oblíquo	Majoração de 86%	Majoração de 1%
270°	Ortogonal	-	Redução de 4%

Fonte: elaborado pelo autor

Assim, através dos resultados dos fatores de vizinhança com relação aos eixos x e y para a Configuração IIIa, pode-se elaborar a Tabela 40, representando os resultados obtidos em túnel de vento através da porcentagem de ocorrência. Destaca-se que devido a valores dos coeficientes de força muito pequenos para o numerador e o denominador, alguns fatores são descartados por apresentarem um fator de vizinhança muito alto, casos dos ângulos de incidência 90° e 270° em x e 0° e 180° em y. Com relação aos resultados, tem-se que todas as forças no eixo x foram majoradas, correspondendo a 100% das ações, e no eixo y, tem-se uma redução para a grande maioria das ações, correspondendo a 76,5%.

Tabela 40 – Resultados (FVx e FVy) em porcentagem na Configuração IIIa

FV	Resultados			Redução (FV < 1)	Majoração (FV > 1)		
	Totais	Válidos	Descartados				
FV_x	19	17	2	0	0%	17	100%
FV_y		17	2	13	76,5%	4	23,5%

Fonte: elaborado pelo autor

Na sequência, através dos coeficientes de força em x e y, tem-se a determinação dos coeficientes de força horizontais em cada ângulo de incidência e configuração, isolada e com vizinhança. Possibilitando determinar os fatores de vizinhança (FV) para a Configuração IIIa, conforme apresentado na Tabela 41 e na Figura 72. Assim, permite-se a comparação dos valores encontrados com as preconizações da NBR6123:1988 em seu Anexo G, que indicam valores de FV variando de 1,0 a 1,3. Destaca-se novamente que esses valores indicados pela norma são referentes a estudos com uma ou duas edificações na vizinhança, ponto importante nesse estudo.

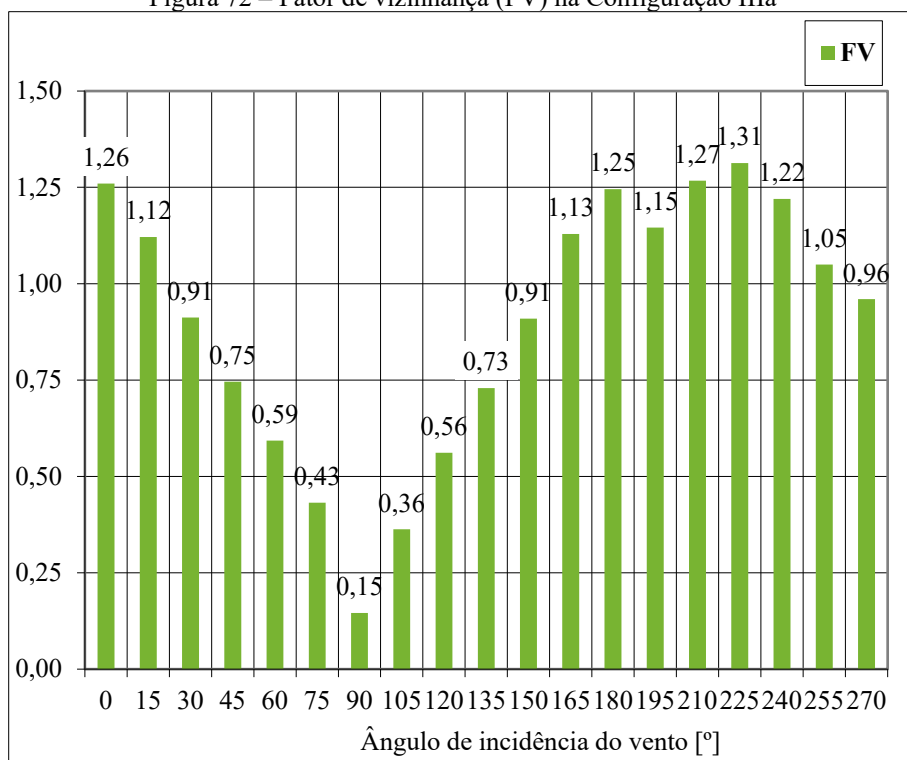
Analisando os fatores de vizinhança (FV) para a Configuração IIIa, tem-se a Tabela 42, representando os resultados obtidos em túnel de vento através da porcentagem de ocorrência. Os resultados foram divididos entre aqueles que estão abaixo do limite inferior de 1,0 da norma brasileira, aqueles que estão de acordo com os limites e aqueles que ultrapassaram o limite superior de 1,3. Com relação aos resultados, tem-se que a maioria dos fatores estão abaixo do limite inferior, correspondendo a 52,6% dos valores, indicando um efeito de proteção nas ações. Os resultados entre os limites preconizados pela norma correspondem a 47,4%. Pela primeira vez, tem-se um valor ultrapassando o limite superior, correspondendo a 5,3% dos resultados.

Tabela 41 – Resultados (FV) na Configuração IIIa

Ângulo	C _{iso}	C _{cv}	FV
0°	0,89	1,12	1,26
15°	0,96	1,07	1,12
30°	1,06	0,97	0,91
45°	1,08	0,80	0,75
60°	0,98	0,58	0,59
75°	1,03	0,44	0,43
90°	1,12	0,16	0,15
105°	1,06	0,38	0,36
120°	1,01	0,57	0,56
135°	1,12	0,81	0,73
150°	1,07	0,98	0,91
165°	0,96	1,08	1,13
180°	0,91	1,13	1,25
195°	0,97	1,12	1,15
210°	1,09	1,39	1,27
225°	1,13	1,48	1,31
240°	1,00	1,23	1,22
255°	1,08	1,13	1,05
270°	1,17	1,12	0,96

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 72 – Fator de vizinhança (FV) na Configuração IIIa



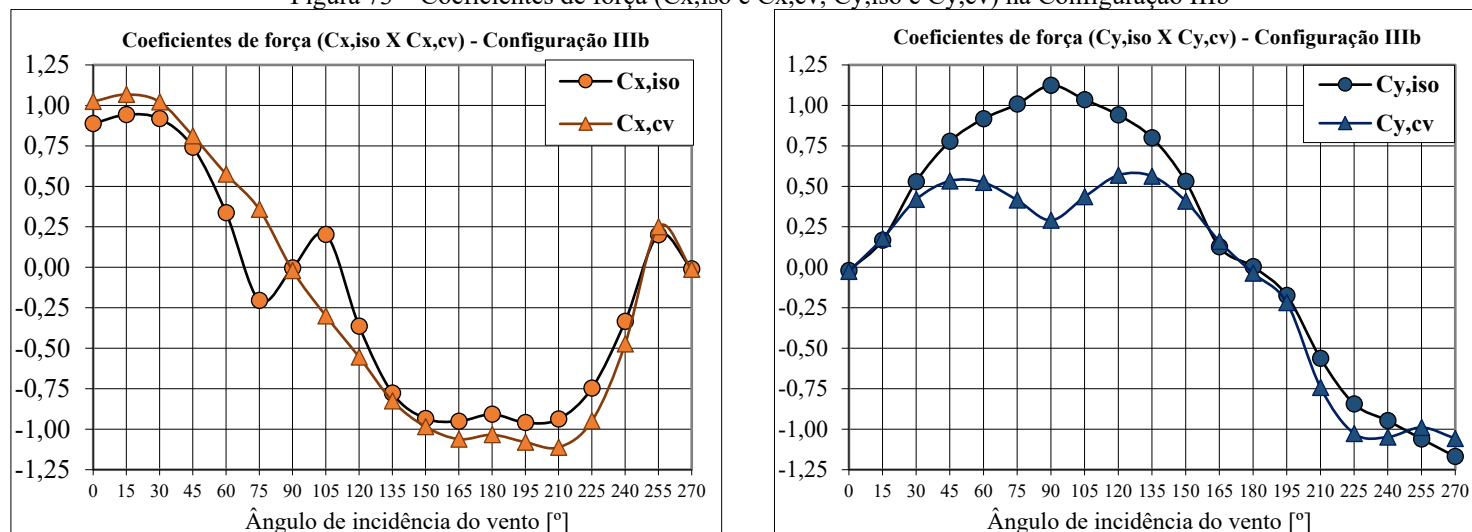
Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 42 – Resultados (FV) em porcentagem na Configuração IIIa

FV	Resultados válidos			
	FV < 1	1 ≤ FV ≤ 1,3	FV > 1,3	
	19	10	1	
		52,6%	42,1%	5,3%

Fonte: elaborado pelo autor

Na Figura 73, tem-se os resultados obtidos para a Configuração IIIb, apresentando a comparação da variação dos coeficientes de força em x e y, na configuração isolada e com vizinhança, $C_{x,iso}$ e $C_{x,cv}$, $C_{y,iso}$ e $C_{y,cv}$, em função do ângulo de incidência de 0 a 270°.

Figura 73 – Coeficientes de força ($C_{x,iso}$ e $C_{x,cv}$, $C_{y,iso}$ e $C_{y,cv}$) na Configuração IIIb

Fonte: elaborado pelo autor

Os coeficientes de força no eixo x encontram-se novamente próximos para ambas configurações, conforme ocorrido em todas as configurações apresentadas, com uma alteração mais significativa nos ângulos de 75° e 105°, seguindo com a inversão de valores e a atenuação do indicativo de ocorrência do fenômeno dinâmico descrito no “Critério de Den Hartog”. Os resultados para o eixo x, na Configuração IIIb, apresentam a influência das três edificações presentes na vizinhança. Nessa configuração, com as edificações mais afastadas em relação ao posicionamento na Configuração IIIa, os maiores valores ocorreram nos mesmos ângulos de incidência e na mesma ordem da configuração anterior, 195° e 210°, para $C_{x,iso}$ (-0,96) e $C_{x,cv}$ (-1,11), respectivamente, com pequena variação nos demais valores.

Os coeficientes de força no eixo y, na Configuração IIIb, apresentaram uma redução menos acentuada comparada às configurações anteriores, destacando agora a mudança entre os ângulos de 45° a 135°, causado pelo maior afastamento das edificações interferentes. Segue-se com a redução do coeficiente no ângulo de 90°, caracterizando novamente um efeito de proteção nessas incidências do vento. Os maiores valores de $C_{y,iso}$ (1,12 e -1,17) ocorreram nos ângulos de 90° e 270°, respectivamente, e para $C_{y,cv}$ na Configuração IIIb, variando entre -1,03, -1,05 a -1,06, nos ângulos de 225°, 240° e 270°, respectivamente.

A Tabela 43 apresenta a relação de resultados dos coeficientes de força presentes nos gráficos e os esforços cortantes na base, em relação aos eixos x e y, para a Configuração IIIb. Possibilitando comparar a variação dos valores para ambas configurações, isolada e com vizinhança. Além disso, apresentam-se os fatores de vizinhança calculados para ambos os eixos, FV_x e FV_y , que podem ser visualizados no gráfico da Figura 74.

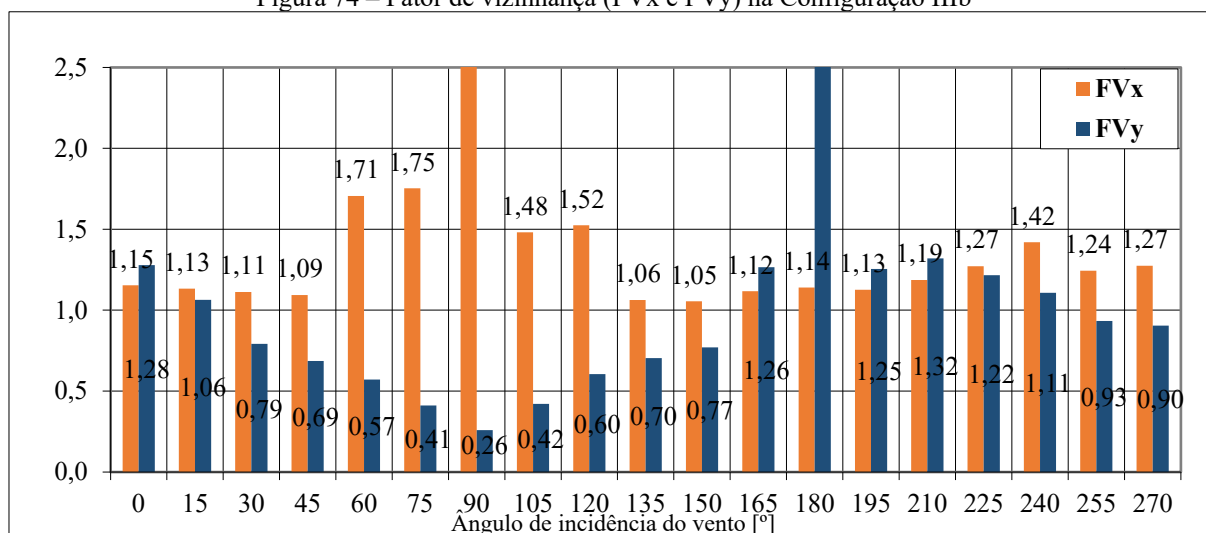
Tabela 43 – Coeficientes de força (C_x e C_y) e fator de vizinhança (FV_x e FV_y) na Configuração IIIb

Ângulo	$C_{x,iso}$	$F_{x,iso}$ (tf)	$C_{y,iso}$	$F_{y,iso}$ (tf)	$C_{x,cv}$	$F_{x,cv}$ (tf)	$C_{y,cv}$	$F_{y,cv}$ (tf)	FV_x	FV_y
0°	0,89	797,87	-0,02	-26,49	1,02	920,18	-0,03	-33,85	1,15	1,28
15°	0,94	847,27	0,17	225,70	1,07	959,41	0,18	239,99	1,13	1,06
30°	0,92	825,39	0,53	713,33	1,02	918,21	0,42	564,65	1,11	0,79
45°	0,74	666,83	0,78	1048,87	0,81	729,14	0,53	719,14	1,09	0,69
60°	0,34	303,38	0,92	1236,95	0,58	517,37	0,52	706,12	1,71	0,57
75°	-0,20	-183,39	1,01	1359,33	0,36	321,48	0,42	559,45	1,75	0,41
90°	0,00	-3,22	1,12	1515,13	-0,02	-18,15	0,29	391,61	5,64	0,26
105°	0,20	182,20	1,04	1395,38	-0,30	-269,81	0,44	587,83	1,48	0,42
120°	-0,36	-326,59	0,94	1268,46	-0,55	-497,69	0,57	766,91	1,52	0,60
135°	-0,78	-697,64	0,80	1078,49	-0,83	-741,42	0,56	759,14	1,06	0,70
150°	-0,93	-838,87	0,53	715,32	-0,98	-884,51	0,41	550,72	1,05	0,77
165°	-0,95	-853,98	0,13	170,45	-1,06	-953,69	0,16	215,60	1,12	1,26
180°	-0,91	-815,39	0,00	5,21	-1,03	-929,02	-0,04	-48,94	1,14	9,39

195°	-0,96	-861,49	-0,17	-234,63	-1,08	-970,23	-0,22	-294,30	1,13	1,25
210°	-0,94	-842,07	-0,56	-757,61	-1,11	-998,77	-0,74	-1000,00	1,19	1,32
225°	-0,75	-670,14	-0,84	-1138,13	-0,95	-852,16	-1,03	-1383,80	1,27	1,22
240°	-0,33	-299,95	-0,95	-1276,62	-0,47	-425,65	-1,05	-1412,80	1,42	1,11
255°	0,20	180,70	-1,06	-1429,19	0,25	224,68	-0,99	-1332,90	1,24	0,93
270°	-0,01	-8,61	-1,17	-1575,11	-0,01	-10,96	-1,06	-1424,97	1,27	0,90

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 74 – Fator de vizinhança (FVx e FVy) na Configuração IIIb



Fonte: elaborado pelo autor

O gráfico dos fatores de vizinhança com relação aos eixos x e y, apresentado na Figura 74, permite observar a influência das três edificações mais afastadas, presente na vizinhança, no modelo em estudo, possibilitando elaborar a Tabela 44, contendo a relação dos ângulos de incidência com majoração ou redução nas ações do vento. Caso o valor seja maior que 1, configura-se a majoração da força do vento, caso seja menor que 1, ocorre a redução desses efeitos de interferência.

Tabela 44 – Resultados (FVx e FVy) na Configuração IIIb

Ângulo		FVx	FVy
0°	Ortogonal	Majoração de 15%	Majoração de 28%
15°	Oblíquo	Majoração de 13%	Majoração de 6%
30°	Oblíquo	Majoração de 11%	Redução de 21%
45°	Oblíquo	Majoração de 9%	Redução de 31%
60°	Oblíquo	Majoração de 71%	Redução de 43%
75°	Oblíquo	Majoração de 75%	Redução de 59%
90°	Ortogonal	-	Redução de 74%
105°	Oblíquo	Majoração de 48%	Redução de 58%
120°	Oblíquo	Majoração de 52%	Redução de 40%
135°	Oblíquo	Majoração de 6%	Redução de 30%
150°	Oblíquo	Majoração de 5%	Redução de 23%
165°	Oblíquo	Majoração de 12%	Majoração de 26%

180°	Ortogonal	Majoração de 14%	-
195°	Oblíquo	Majoração de 13%	Majoração de 25%
210°	Oblíquo	Majoração de 19%	Majoração de 32%
225°	Oblíquo	Majoração de 27%	Majoração de 22%
240°	Oblíquo	Majoração de 42%	Majoração de 11%
255°	Oblíquo	Majoração de 24%	Redução de 7%
270°	Ortogonal	Majoração de 27%	Redução de 10%

Fonte: elaborado pelo autor

Assim, através dos resultados dos fatores de vizinhança com relação aos eixos x e y para a Configuração IIIb, pode-se elaborar a Tabela 45, representando os resultados obtidos em túnel de vento através da porcentagem de ocorrência. Destaca-se que devido a valores dos coeficientes de força muito pequenos para o numerador e o denominador, alguns fatores são descartados por apresentarem um fator de vizinhança muito alto, casos dos ângulos de incidência 90° em x e 180° em y. Com relação aos resultados, tem-se que todas as forças no eixo x foram majoradas, correspondendo a 100% das ações. Em contrapartida, no eixo y houve uma maior redução das ações, correspondendo a 61,1%.

Tabela 45 – Resultados (FVx e FVy) em porcentagem na Configuração IIIb

FV	Resultados			Redução (FV < 1)	Majoração (FV > 1)		
	Totais	Válidos	Descartados				
FV_x	19	18	1	0	0%	18	100%
FV_y		18	1	11	61,1%	7	38,9%

Fonte: elaborado pelo autor

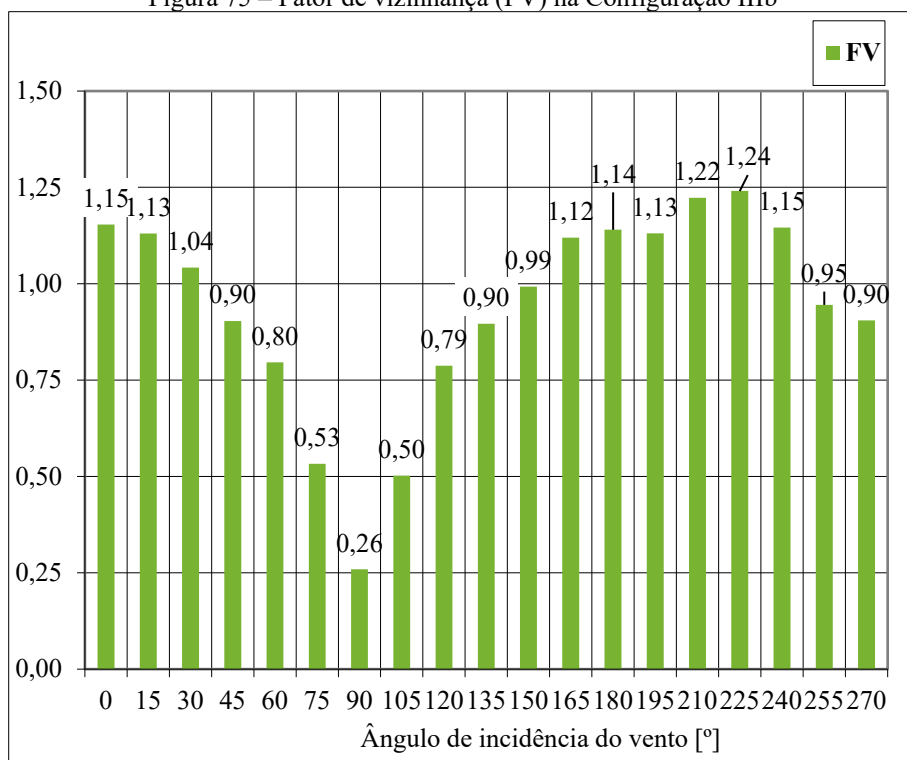
Na sequência, através dos coeficientes de força em x e y, tem-se a determinação dos coeficientes de força horizontais em cada ângulo de incidência e configuração, isolada e com vizinhança. Possibilitando determinar os fatores de vizinhança (FV) para a Configuração IIIb, conforme representado na Tabela 46 e na Figura 75. Permitindo a comparação dos valores encontrados com as preconizações da NBR6123:1988 em seu Anexo G, que indicam valores de FV variando de 1,0 a 1,3. Destaca-se novamente que esses valores indicados pela norma são referentes a estudos com uma ou duas edificações na vizinhança, ponto importante nesse estudo.

Tabela 46 – Resultados (FV) na Configuração IIIb

Ângulo	C,iso	C,cv	FV
0°	0,89	1,02	1,15
15°	0,96	1,08	1,13
30°	1,06	1,10	1,04
45°	1,08	0,97	0,90
60°	0,98	0,78	0,80
75°	1,03	0,55	0,53
90°	1,12	0,29	0,26
105°	1,06	0,53	0,50
120°	1,01	0,79	0,79
135°	1,12	1,00	0,90
150°	1,07	1,07	0,99
165°	0,96	1,07	1,12
180°	0,91	1,03	1,14
195°	0,97	1,10	1,13
210°	1,09	1,34	1,22
225°	1,13	1,40	1,24
240°	1,00	1,15	1,15
255°	1,08	1,02	0,95
270°	1,17	1,06	0,90

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 75 – Fator de vizinhança (FV) na Configuração IIIb



Fonte: elaborado pelo autor

Analisando os fatores de vizinhança (FV) para a Configuração IIIb, tem-se a Tabela 47, representando os resultados obtidos em túnel de vento através da porcentagem de ocorrência. Os resultados foram divididos entre aqueles que estão abaixo do limite inferior de 1,0 da norma brasileira, aqueles que estão de acordo com os limites e aqueles que ultrapassaram o limite superior de 1,3. Com relação aos resultados, tem-se que a maioria dos fatores estão abaixo do limite inferior, correspondendo a 52,6% dos valores, indicando um efeito de proteção nas ações. Os demais resultados ficaram entre os limites preconizados pela norma, correspondendo a 47,4%. Sendo que, novamente, nenhum fator ultrapassou o limite superior.

Tabela 47 – Resultados (FV) em porcentagem na Configuração IIIb

FV	Resultados válidos		
	FV < 1	1 ≤ FV ≤ 1,3	FV > 1,3
	19	10	0
	52,6%	47,4%	0%

Fonte: elaborado pelo autor

8 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho analisou a relação de diferentes configurações de densidades de vizinhança influenciando nos efeitos de interferência, causados pelas edificações inseridas no entorno de uma edificação em estudo.

Inicialmente, com base no extenso acervo de dados do LAC/UFRGS, foi possível observar como diversas edificações com diferentes seções transversais e alturas se comportavam inseridas em variadas configurações de vizinhança, classificadas em densidade alta e densidade baixa. Permitindo concluir uma tendência nos resultados: em regiões compostas por edificações de maior porte, classificadas nesse estudo como densidade alta, os vórtices são desorganizados e ocorre a redistribuição da energia, resultando em menores coeficientes aerodinâmicos; em contrapartida, em regiões compostas por edificações de pequeno porte e esparsas, classificadas nesse estudo como densidade baixa, as esteiras contam com vórtices bem organizados e alta energia, resultando em maiores coeficientes aerodinâmicos. Observa-se uma tendência nos resultados de acordo com as configurações analisadas, reforçando a necessidade de novos estudos para o estabelecimento dos critérios adotados, devido às edificações presentes nas vizinhanças se comportarem de formas totalmente diferentes, conforme as situações.

Em seguida, tem-se os resultados referentes aos ensaios realizados nesse estudo no LAC/UFRGS. O estudo da relação entre os coeficientes de arrasto, captados com vento incidindo apenas perpendicularmente a maior fachada do modelo (vento a 90°), apresentou resultados da relação de interação dos parâmetros adotados nesses ensaios e a variação do coeficiente de arrasto com os modelos interferentes sendo posicionados ao longo do túnel, em cada uma das configurações. Na Tabela 48, tem-se a junção dos resultados das Configurações I, II e III com seus respectivos espaçamentos a (D), b (2D), c (4D) e d (8D).

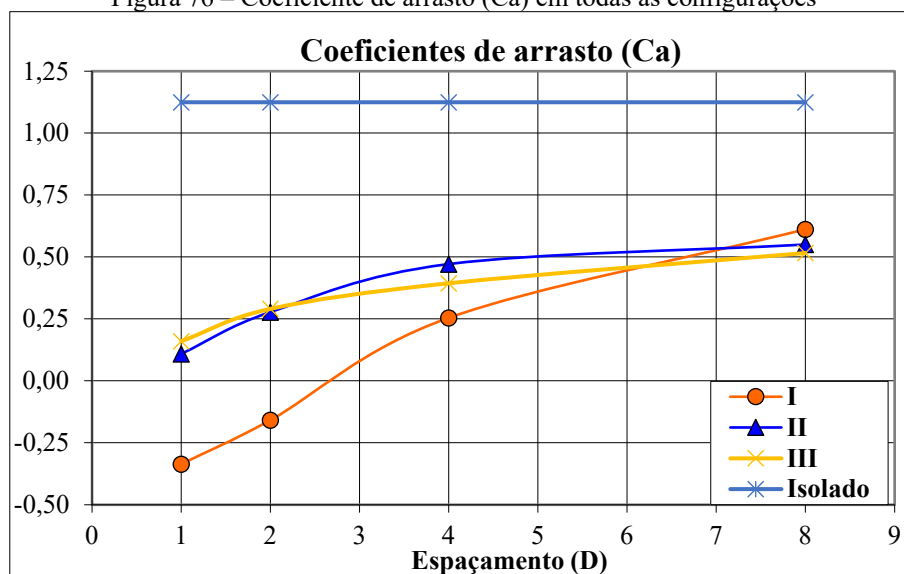
Tabela 48 – Resultado dos coeficientes de arrasto (C_a), configurações I, II e III

Configuração	Isolado	a (D)	b (2D)	c (4D)	d (8D)
I		-0,34	-0,16	0,25	0,61
II	1,12	0,11	0,28	0,47	0,55
III		0,16	0,29	0,39	0,52

Fonte: elaborado pelo autor

A Tabela 48 apresenta os coeficientes de arrasto determinados para todas as configurações indicadas nesse estudo. Através desses resultados tem-se algumas considerações:

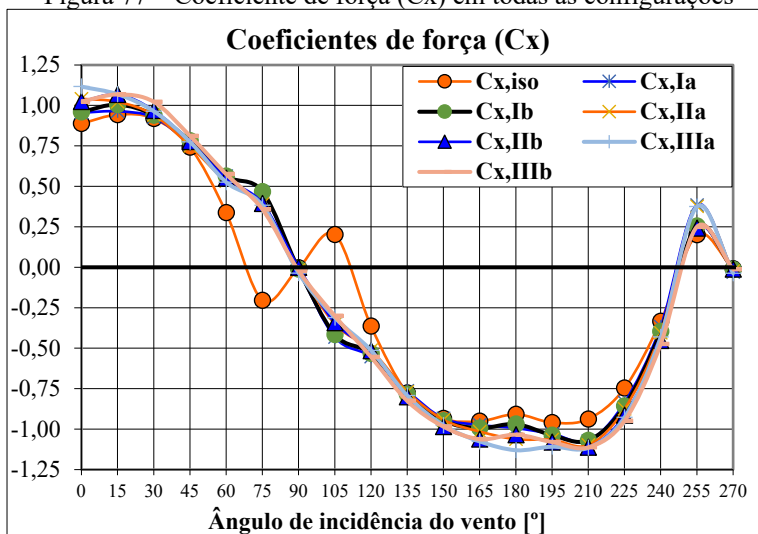
- Observou-se uma expressiva redução nos valores dos coeficientes com vizinhança em relação ao coeficiente para a edificação isolada, indicando um efeito de proteção em todas as configurações;
- No entanto, observou-se também que em todas as configurações com essa vizinhança posicionada a barlavento houve um aumento gradativo dos coeficientes à medida em que se aumentava o espaçamento entre os modelos interferentes, em D, 2D, 4D e 8D, como observa-se analisando os resultados na horizontal. Este fato está relacionado com a formação mais definida da esteira, com vórtices mais organizados e maior energia, resultando no aumento sucessivo desses coeficientes. Nesse ponto, identificam-se os regimes de escoamento do efeito de interferência denominado turbulência da esteira, iniciando no regime de escoamento deslizante, passando pelo regime de escoamento de interferência de esteira, até chegar no regime de escoamento de corpo isolado;
- Em contrapartida, também é possível observar que em conjunto com o aumento do espaçamento, quando se aumentava o número de edificações interferentes em cada configuração, Configuração I (uma edificação), Configuração II (duas edificações) e Configuração III (três edificações), o aumento dos coeficientes ocorria em menores proporções, como observa-se analisando os resultados na vertical. Esse aumento é observado até o afastamento 2D, a partir do qual tem-se uma inversão e são encontrados coeficientes menores, conforme o aumento do número de edificações em conjunto com o espaçamento. Este é observado entre as Configurações II e III com espaçamento 4D e, também, nas Configurações I, II e III com espaçamento 8D;
- Portanto, pode-se concluir com base apenas nesses ensaios iniciais, necessitando de mais estudos relacionados, que tanto a quantidade de edifícios interferentes quanto o espaçamento influenciam na determinação dos coeficientes de arrasto. A Figura 76 apresenta a evolução dos coeficientes de acordo com as configurações e espaçamentos. Destacam-se as configurações II e III, apresentando comportamentos bastante similares em todos os espaçamentos e, ainda, a tendência, a partir do espaçamento 4D entre os modelos, de constância e estagnação dos resultados nas configurações seguintes;
- Com base nesses resultados, acredita-se que para as simulações em túnel de vento, considerando a presença de edificações na vizinhança, devem ser considerados modelos interferentes situados até a Configuração Id (8D), raio de aproximadamente 600 mm, seguindo a tendência de estagnação dos resultados nessa região, mesmo com a adição de outros modelos interferentes, como nas Configurações IId e IIIId.

Figura 76 – Coeficiente de arrasto (C_a) em todas as configurações

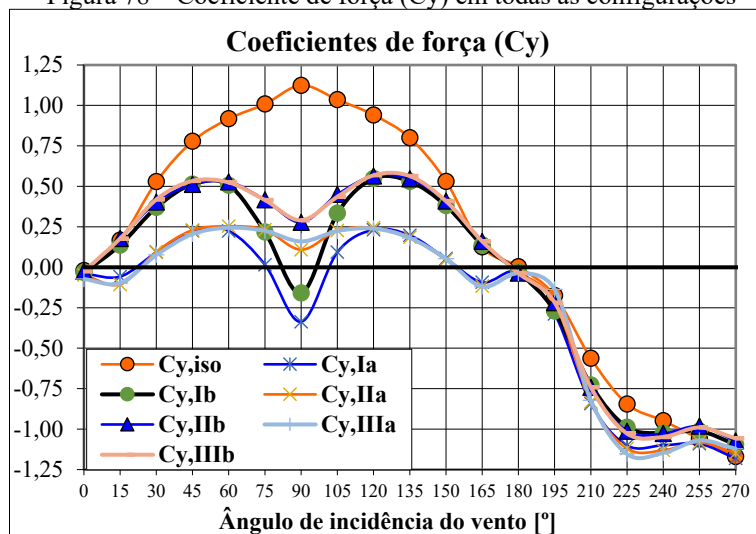
Fonte: elaborado pelo autor

Com relação às distâncias mínimas preconizadas no item 6.5.3 da NBR6123:1988, que prevê as condições exigíveis para que uma edificação seja considerada imersa em um escoamento de alta turbulência, através das edificações presentes na vizinhança e que se estendem na direção e sentido do vento incidente, acredita-se, com base apenas nos resultados obtidos nesse estudo, que a norma seja muito cautelosa ao indicar essas extensas distâncias.

Seguindo, tem-se os resultados referentes aos coeficientes de força em relação aos eixos x e y. A Figura 77 e a Figura 78 apresentam a sobreposição de todos os gráficos dos coeficientes de força nos eixos x e y, respectivamente, considerando todas as configurações ensaiadas em túnel de vento nessas condições: isolado, Ia, Ib, IIa, IIb, IIIa e IIIb.

Figura 77 – Coeficiente de força (C_x) em todas as configurações

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 78 – Coeficiente de força (C_y) em todas as configurações

Fonte: elaborado pelo autor

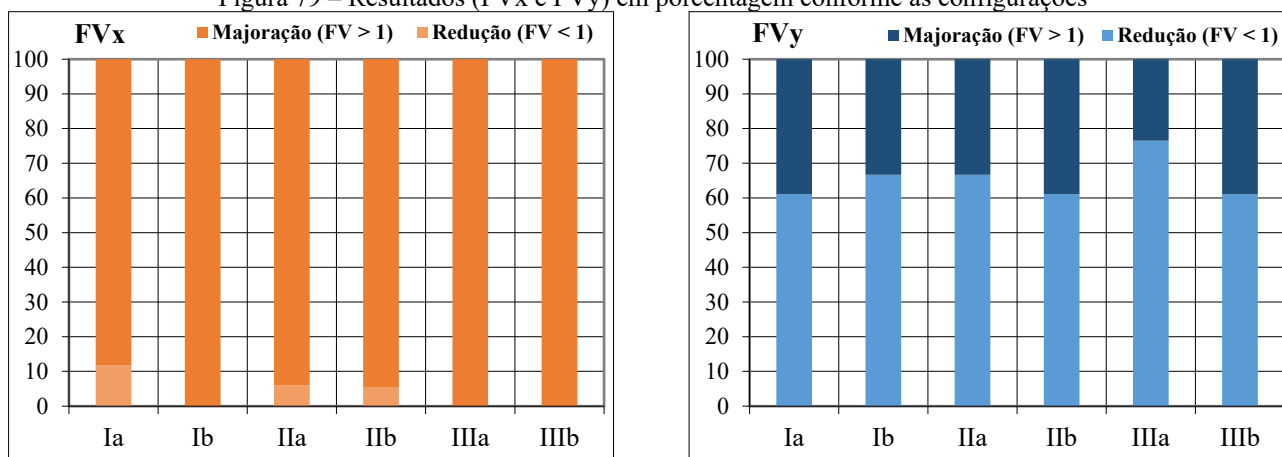
Os coeficientes de força no eixo x encontram-se similares em todas as configurações com vizinhança e em todos os ângulos de incidência do vento, apresentando pequenas variações nos coeficientes em torno dos ângulos de 165° a 195° e diferindo da configuração isolada principalmente nos ângulos de 75° e 105°, com uma inversão nos valores. Nesses ângulos, para a configuração isolada, destaca-se o indicativo de ocorrência do fenômeno dinâmico descrito no “Critério de Den Hartog”, quando uma estrutura sem amortecimento é submetida a excitação harmônica senoidal. No entanto, observa-se que a presença da vizinhança no entorno atuou de forma positiva, atenuando a ocorrência desse efeito.

Em contrapartida aos coeficientes de força no eixo x que não sofreram grandes interferências com o aumento e distanciamento das edificações no entorno, os coeficientes de força no eixo y apresentaram diferenças consideráveis conforme a inserção e a variação da quantidade e espaçamento das edificações. Uma redução acentuada nos coeficientes em todas as configurações foi observada entre os ângulos de 15° a 165°, destacando-se as reduções acentuadas nas ações do vento no ângulo de 90°, caracterizando um intenso efeito de proteção. Assim, comprova-se que a ação do vento em uma edificação varia bastante, dependendo diretamente do número e localização específica das edificações presentes na vizinhança.

Destaca-se que os maiores valores dos coeficientes de força nos eixos x e y foram observados para ângulos de incidência quando os modelos interferentes estavam a sotavento do modelo aerodinâmico, nas configurações com maior proximidade entre os modelos, provavelmente causados pela esteira formada pelo próprio modelo, originando efeitos mais significativos. Na configuração isolada, os maiores coeficientes foram -0,96 no eixo x, no ângulo de incidência à 195°, e -1,17 no eixo y, a 270°. Nas configurações com vizinhança, o maior coeficiente no eixo x foi observado na Configuração IIIa, -1,13, no ângulo de incidência a 180°. No eixo y, o maior valor foi notado na Configuração Ia, -1,18, ângulo de incidência do vento a 270°.

O estudo dos fatores de vizinhança nesse trabalho, em relação às direções x e y, seguiu as preconizações da literatura referentes a majoração e redução das ações do vento no modelo em estudo: valores acima de 1 representam o aumento dos carregamentos do vento e valores abaixo de 1 indicam uma redução nas ações do vento sobre a edificação. Ao longo da análise dos resultados foram destacadas as configurações e incidências do vento mais influentes no dimensionamento estrutural, apresentando casos tanto de majoração quanto de redução nos carregamentos. A Figura 79 apresenta as relações entre majoração e redução nos eixos x e y, respectivamente, comparando a mudança nesses fatores conforme cada configuração.

Figura 79 – Resultados (FVx e FVy) em porcentagem conforme as configurações



Fonte: elaborado pelo autor

Para os FVx observa-se a absoluta predominância das ações de majoração do vento em todas as configurações ensaiadas. A Configuração Ia, com apenas uma edificação e menor afastamento, apresentou maior porcentagem nas ações de redução, embora significativamente pequena, sendo seguida da diminuição dessa ação conforme a adição de outros modelos interferentes e maiores afastamentos. Ou seja, no eixo x, a presença da vizinhança tende a aumentar os carregamentos do vento, seguindo o aumento da densidade da vizinhança. Em contrapartida, para os FVy observa-se um balanceamento nas ações do vento com maior predominância das ações de redução, conforme a adição de novos modelos interferentes e maiores afastamentos, destacando-se o aumento nas ações de redução nos carregamentos.

A Tabela 49 apresenta os resultados totais obtidos em túnel de vento nesse estudo através da porcentagem de ocorrência para os fatores de vizinhança calculados para ambos os eixos, FVx e FVy, somando-se os resultados de todas as configurações ensaiadas. Destaca-se novamente que os resultados descartados estão relacionados a valores dos coeficientes de força muito pequenos para o numerador e o denominador, em consequência, resultando em fatores de vizinhança muito altos. De forma geral, tem-se que a grande maioria das forças no eixo x foram majoradas, correspondendo a 96,2% das ações, contra 3,8% das ações reduzidas. Em contrapartida, no eixo y, a maioria das ações foram reduzidas, correspondendo a 65,4%, contra 34,6% das ações majoradas, apresentando maior balanceamento entre as ações.

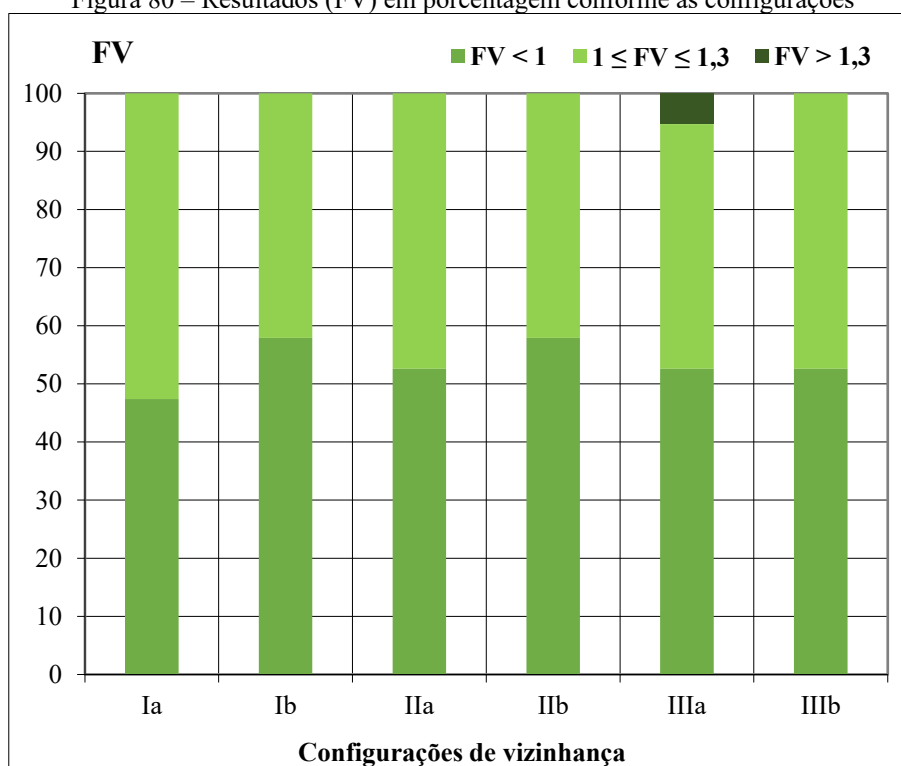
Tabela 49 – Resultados totais (FVx e FVy) em porcentagem

FV	Resultados			Redução (FV < 1)		Majoração (FV > 1)	
	Totais	Válidos	Descartados				
FVx	114	106	8	4	3,8%	102	96,2%
FVy		107	7	70	65,4%	37	34,6%

Fonte: elaborado pelo autor

Seguindo as análises dos fatores de vizinhança (*FV*), calculados através dos coeficientes de força horizontais para cada ângulo de incidência e cada configuração, é possível realizar uma análise comparativa entre os valores encontrados com as preconizações da NBR6123:1988, que indicam valores de *FV* variando de 1,0 a 1,3 em seu Anexo G. Novamente, tem-se as relações dos resultados na Figura 80, apresentando a mudança nesses fatores conforme cada configuração de vizinhança adotada, dividindo entre aqueles que estão abaixo do limite inferior de 1,0 da norma brasileira, aqueles que estão de acordo com os limites entre 1,0 e 1,3 e aqueles que ultrapassaram o limite superior de 1,3.

Figura 80 – Resultados (*FV*) em porcentagem conforme as configurações



Fonte: elaborado pelo autor

A Tabela 50 apresenta os resultados totais através da porcentagem de ocorrência para os fatores de vizinhança (*FV*), somando-se os resultados de todas as configurações ensaiadas. Conforme observado anteriormente, a maioria dos fatores estão abaixo do limite inferior, correspondendo a 53,5% dos valores, os resultados entre os limites preconizados pela norma são 45,6%, sendo que apenas 0,9% representam um valor ultrapassando o limite superior.

Tabela 50 – Resultados totais (*FV*) em porcentagem

FV	Resultados válidos	FV < 1		1 ≤ FV ≤ 1,3		FV > 1,3	
		114	61	53,5%	52	45,6%	1

Fonte: elaborado pelo autor

Analisando os resultados dos fatores de vizinhança (*FV*) obtidos em túnel de vento através da porcentagem de ocorrência conforme as configurações adotadas, tem-se que a maioria dos fatores estão abaixo do limite inferior, indicando um efeito de proteção nas ações, relacionado com a quantidade e proximidade das edificações interferentes. Observa-se que as configurações de vizinhança com menores afastamentos entre os modelos resultaram em maiores fatores de vizinhança, casos das configurações Ia, IIa e IIIa. A maioria desses resultados estão entre os limites da norma, sendo observada apenas uma configuração, Configuração IIIa, com um fator ultrapassando o limite superior de 1,3 da NBR6123:1988, embora consideravelmente dentro dos limites, visto o valor de 1,31 encontrado nessa configuração.

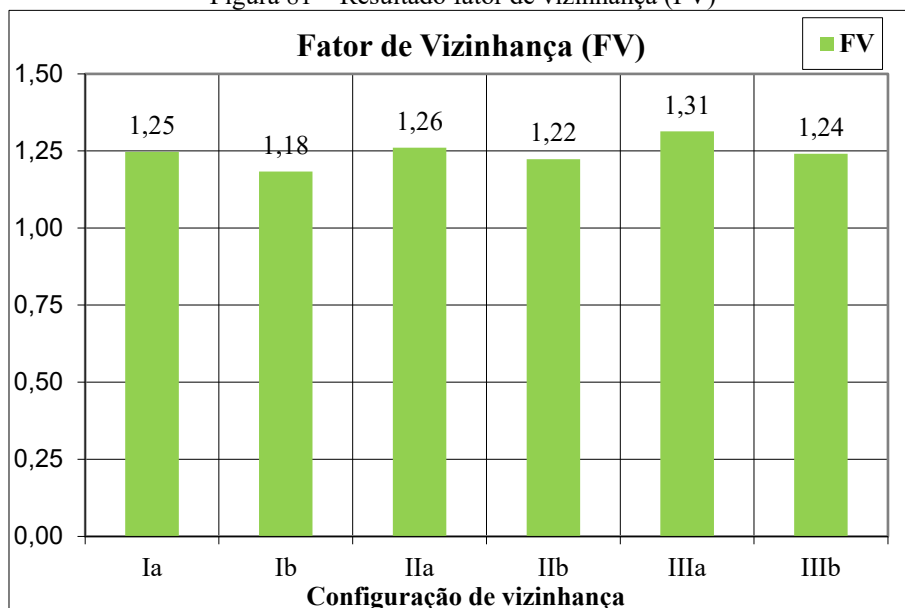
A Tabela 51 e a Figura 81 apresentam os maiores valores de *FV* encontrados em cada configuração de vizinhança, bem como o ângulo de incidência de ocorrência, representando todas as observações destacadas no parágrafo anterior.

Tabela 51 – Resultado fator de vizinhança (*FV*)

Configuração	a (D)	b (2D)
I	1,25	1,18
	(210°)	(210°)
II	1,26	1,22
	(225°)	(210°)
III	1,31	1,24
	(225°)	(225°)

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 81 – Resultado fator de vizinhança (*FV*)



Fonte: elaborado pelo autor

Portanto, considerando os estudos que resultaram nos parâmetros adotados na norma, compostos por uma ou duas edificações interferentes, a adição de outros modelos no entorno do modelo em estudo com diferentes espaçamentos influenciam os resultados para os fatores de vizinhança. No entanto, estes não alteram significativamente os valores, estando em conformidade com as preconizações do Anexo G da NBR6123:1988, mostrando que os valores de *FV* são dados principalmente em função da proximidade e do tamanho das edificações diretamente no entorno. Esses estudos indicam a evidente necessidade de novos trabalhos, visando adequar as recomendações da norma brasileira quanto a utilização desse parâmetro.

De uma forma geral, os resultados apresentados nesse estudo mostram a importância da realização de ensaios em túneis de vento em laboratórios especializados, conforme o estudo de edificações não convencionais, a complexidade da vizinhança no entorno e/ou impossibilidade de aplicação das preconizações das normas e códigos disponíveis. Ressalta-se a importância de se considerar os efeitos da ação do vento, principalmente levando em consideração os fenômenos de interferência da vizinhança causados pelas edificações no entorno.

Considerando a complexidade da natureza dos fenômenos de interação entre vento-estrutura, composto por diversas variáveis como o tamanho e formato das edificações, suas posições de interferência, tipos de escoamento e direções de incidência do vento, são indicadas para trabalhos futuros algumas melhorias e propostas de continuidade dos estudos desenvolvidos:

- Analisar outros ensaios do acervo do LAC com variadas configurações de vizinhança, possibilitando complementar os estudos referentes a diferentes densidades, dando continuidade ao entendimento da determinação dos coeficientes aerodinâmicos;
- Realizar os ensaios das configurações Ic, Id, IIc, IID, IIIc e IIId, ensaiados nesse estudo apenas com vento incidindo perpendicularmente a maior fachada do CAARC na direção de incidência do vento a 90°, girando a mesa 15° em torno dessa incidência, até quando as dimensões laterais do túnel permitir, possibilitando determinar e comparar os coeficientes de arrasto também para essas incidências próximas;
- Aumentar a quantidade de modelos interferentes ao longo do túnel, adotando também outros espaçamentos intermediários ou maiores, aos espaçamentos D, 2D, 4D e 8D, adotados nesse estudo;
- Realizar outros estudos com as mesmas configurações adotadas nesse estudo, mas com todos os modelos interferentes sendo deslocados também lateralmente, comparando a influência dessa vizinhança não alinhada nos carregamentos e fatores de vizinhança. E ainda, adotar modelos interferentes com altura menor que o modelo aerodinâmico, analisando a influência dessa configuração nos resultados;
- Seguir com os estudos referentes aos fatores de vizinhança, realizando trabalhos que representem diferentes situações de projeto com variadas configurações de vizinhança, fomentando o banco de dados referentes à ação do vento do LAC/UFRGS.

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR6123 – Forças devidas ao vento em edificações**. 66p. Edição 1988. Rio de Janeiro, 1988.
- 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**. 124p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2015.
- ARAÚJO, A. H. M.; GUERRA, E. O.; LIRA, A. F.; REZENDE, A. S. **Cobertura Mineirão – Solução integrada concreto-aço**. Congresso Latinoamericano da Construção Metálica – Construmetal 2012. São Paulo, 2012.
- BAILEY, A. VINCENT, N. D. G. *Wind pressure on building including effects of adjacent buildings. Paper 5367. Journal of the Institution of Civil Engineering*. London, 1943.
- BÊNIA, M. C. D. **Determinação dos efeitos de vizinhança na resposta dinâmica de edifícios altos sob a ação do vento**. 112p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013.
- BLESSMANN, J. **Um estudo qualitativo do fenômeno de interferência**. In: Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, 11, p. 585-600. São Paulo, 1966.
- BLESSMANN, J.; RIERA, J. D. **Interação em edifícios altos vizinhos submetidos à ação do vento**. Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, v. 1, p. A9-1 a A9-14. Chile, 1978.
- BLESSMANN, J.; RIERA, J. D. *Interaction effects in neighbouring tall buildings. Proceedings of the Fifth International Conference*, v.2, p. 367-381. Colorado, USA, 1980.
- BLESSMANN, J.; RIERA, J. D. *Wind excitation of neighbouring tall buildings. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, v. 18, p. 91-103. Amsterdam, 1985.
- BLESSMANN, J. *The boundary layer TV-2 wind tunnel of the UFRGS. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, v. 10, p. 231-248. Amsterdam, 1982.
- BLESSMANN, J. **Intervalo de tempo para cálculo da velocidade básica do vento**. 53p. 3ª ed. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1988.
- BLESSMANN, J. **Ação do vento em edifícios**. 81p. 2ª ed. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1989.
- BLESSMANN, J. *Neighbouring wind effects on two tall buildings. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, v. 41-44, p. 1041-1052. Amsterdam, 1992.
- BLESSMANN, J. **O vento na engenharia estrutural**. 166p. 1ª edição. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1995.
- BLESSMANN, J. **Introdução as ações dinâmicas do vento**. 282p. 2ª edição. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.
- BLESSMANN, J. **Aerodinâmica das construções**. 261p. 3ª edição. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.

CAMARINHA, R. M. M. **Acção e efeitos do vento em edifícios altos**. 179p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Instituto Superior Técnico. Lisboa, 2008.

CARINI, M. R. **Resposta dinâmica em torção de edifícios sob ação do vento**. 137p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2017.

CARPEGGIANI, E. A. **Determinação dos efeitos estáticos de torção em edifícios altos devidos à ação do vento**. 184p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.

CHÁVEZ, E. S. **Análise estrutural de edifício alto submetido às pressões flutuantes induzidas pela ação do vento**. 135p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2006.

CHO, K.; HONG, S.; HWANG, K. *Effects of neighbouring building on wind loads*. *Council on Tall Buildings and Urban Habitat Seoul Conference*, p. 516-523. Korea, 2004.

DAVENPORT, A. G. *The application of statistical concepts to the wind loading of structures*. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, v. 19, n. 4, p. 449-472. Ontario, 1961.

DEN HARTOG, J. P. *Mechanical Vibrations*. *Third Edition*. McGraw-Hill Book Company. New York, 1947.

FONTOURA, P. C. C. N. O. **Estudo experimental em túnel de vento dos efeitos de vizinhança em edifícios altos**. 255p. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília. Brasília, 2014.

GRALA, P. **Estudo das metodologias para o cálculo da resposta de estruturas cilíndrico circulares frente ao fenômeno de desprendimento de vórtices: proposta atualizada para a NBR-6123**. 153p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2016.

GRALA, P. **Resposta de Estruturas Paralelepípedicas Esbeltas Frente ao Fenômeno de Desprendimento de Vórtices: Proposta para a NBR-6123**. 226p. Tese (Doutorado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2020.

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

HOLMES, J. D. *Wind loading of structures*. 366p. 1ª Edition. Spon Press Taylor & Francis Group. London, 2001.

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 Eng. & Industrial Aerodynamics*, v. 104-106, p. 98-108. Amsterdam, 2012.

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

JÚNIOR, J. P. **Modelagem e simulação do campo de velocidades do vento em tormentas elétricas**. 146p. Tese (Doutorado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

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

KIM, W.; TAMURA, Y.; YOSHIDA, A.; YI, J. **Interference effects of na adjacent tal building with various sizes on local wind forces acting on a tal building**. *Advances in Structural Engineering*, v. 21(10), p. 1469-1481. Estados Unidos, 2018.

LEUTHEUSSER, H. J. **Static wind loading of grouped buildings**. In: *International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures*. 3, p. 211-219. Tokyo, 1971.

LOREDO-SOUZA, A. M.; SCHETTINI, E. B. C.; PALUCH, M. J. **5. Simulação da Camada Limite Atmosférica em Túnel de Vento**. In: IV Escola de Primavera de Transição e Turbulência, ABCM, v. 4, p. 137-163. Porto Alegre, 2004.

LOREDO-SOUZA, A. M.; CARPEGGIANI, E. A.; NÚÑEZ, G. J. Z.; RIPPEL, L. I.; PALUCH, M. J. **Estudo comparativo sobre a ação e efeitos do vento em edifícios altos de concreto armado**. Anais do VI Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto – SIMP0163, v. 6, p. 1226-1241. São Paulo, 2006.

LOREDO-SOUZA, A. M.; NÚÑEZ, G. J. Z.; OLIVEIRA, M. G. K.; SIQUEIRA, G. M.; BÊNIA, M. C. D. **Majorações e reduções nas cargas de vento em edifícios altos de concreto armado: influência de prédios vizinhos**. Anais do 51º Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON. Curitiba, 2009.

LOREDO-SOUZA, A. M.; ROCHA, M. M.; OLIVEIRA, M. G. K.; KLEIN, G. M. B.; BÊNIA, M. C. D.; SIQUEIRA, G. M.; SIMON, C. A.; SILVA, L. E. P. **Estudo em túnel de vento da cobertura do Estádio Beira-Rio, Porto Alegre**. Construmetal – Congresso Latinoamericano da Construção Metálica. São Paulo, 2010.

LOREDO-SOUZA, A. M.; ROCHA, M. M.; OLIVEIRA, M. G. K.; VANIN, D. D.; SIQUEIRA, G. M.; BÊNIA, M. C. D.; SOUZA, J. L. C.; MACHADO, A. C. **Influência da Forma Arquitetônica, Solução Estrutural e Localização Geográfica na Ação e Efeitos do Vento em Coberturas de Estádios de Futebol**. V Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas. Rio de Janeiro, 2012.

LOREDO-SOUZA, A. M. **Meteorological events causing extreme winds in Brazil**. *Wind and Structures*, v. 15, nº. 2. Korea, 2012.

MELO, L. P. C. **Influência de detalhes arquitetônicos e efeitos de vizinhança sobre a caracterização aerodinâmica de um edifício alto**. 157p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2020.

NÚÑEZ, G. J. Z.; LOREDO-SOUZA, A. M.; ROCHA, M. M. **Uso do túnel de vento como ferramenta de projeto no design aerodinâmico**. Design & Tecnologia 04. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2012.

PACHECO HUACHO, C. A. **Análise paramétrica de vibrações induzidas em pontes devido à cargas móveis.** 127p. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília. Brasília, 2014.

SCRUTON, C. NEWBERRY, C. W. *An estimation of wind loads for building and structural design.* 25:97-126. *Proceeding ICE.* 1963.

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

TANAKA, H.; TAMURA, Y.; OHTAKE, K.; NAKAI, M.; KIM, Y. C. *Experimental investigation of aerodynamic forces and wind pressures acting on tall buildings with various unconventional configurations.* *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, v. 107-108, p.179-191. Amsterdam, 2012.

TANIIKE, Y. *Turbulence effect on mutual interference of tall buildings.* *Journal of Engineering Mechanics*, v. 117, nº 3, p. 443-456. 1991.

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

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

TREIN, C. A. **Modelagem dinâmica equivalente de edifícios altos submetidos à ação do vento.** 176p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

VALLIS, M. B.; LOREDO-SOUZA, A. M.; WATRIN, L. C. *A review of Brazilian wind data.* *The 13th Americas Conference on Wind Engineering.* Gainesville, Florida, USA, 2017.

VANIN, D. D. **Resposta dinâmica de edifícios altos frente à ação do vento: comparação de técnicas experimentais em túnel de vento.** 122p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.

VIEIRA, G. S.; DE BRITO, J. L. V.; LOREDO-SOUZA, A. M. *Experimental study on the interference intensity produced by the presence of neighboring buildings in the wind action in a tall building.* *Ibracon Structures and Materials Journal*, v. 11, nº. 5, p. 1036-1052. São Paulo, 2018.

VOGADO, M. W. **Caracterização aerodinâmica de edifícios altos com planta em formato de “V” através de análise espectral.** 124p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2018.

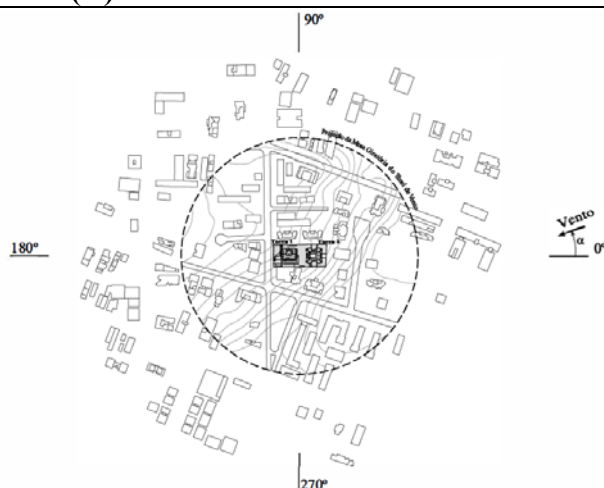
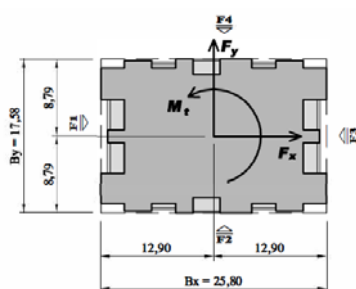
XIE, Z. N.; GU, M. *Mean interference effects among tall buildings.* *Engineering Structures*, v. 26, p. 1173-1183. Grã-Bretanha, 2004.

ANEXOS

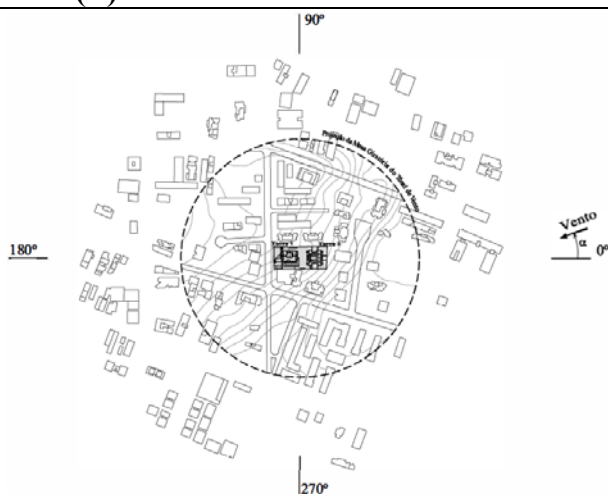
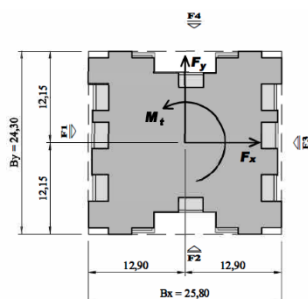
ANEXO A – Seções transversais e configurações de vizinhança dos edifícios do acervo do LAC

DENSIDADE ALTA

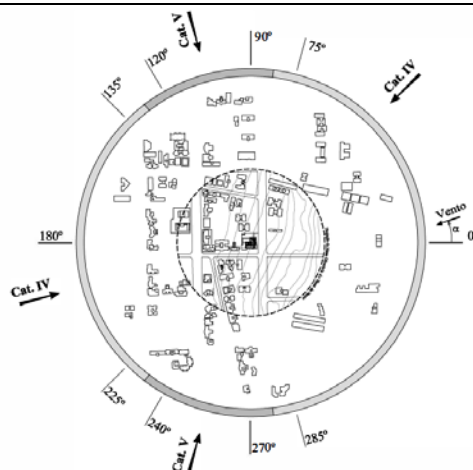
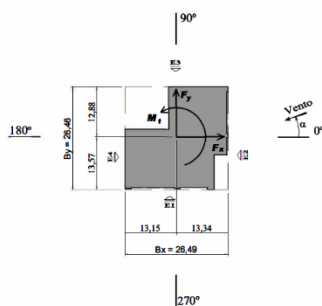
E1 (A)



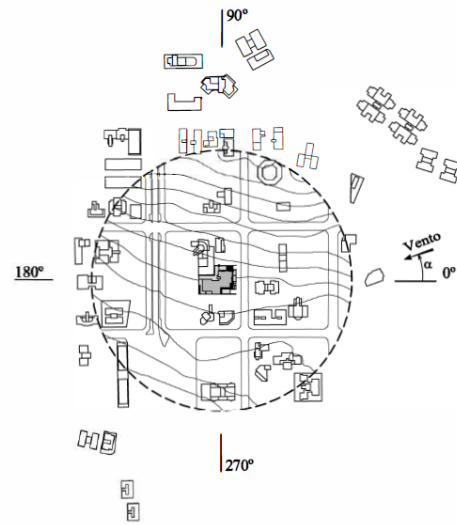
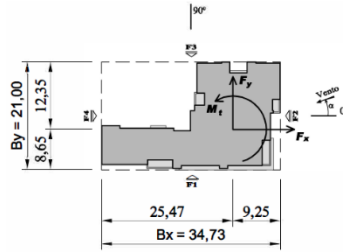
E1 (B)



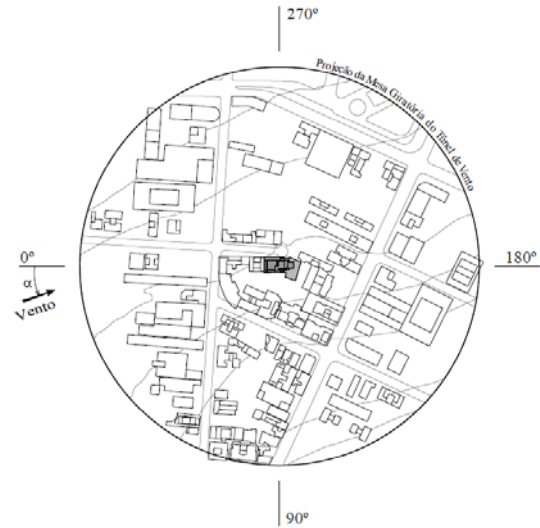
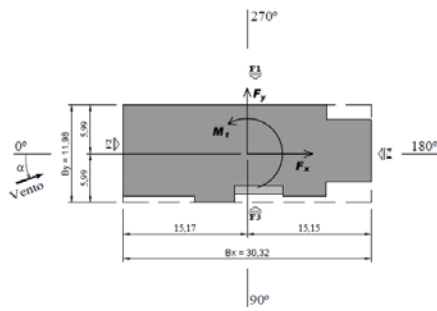
E2



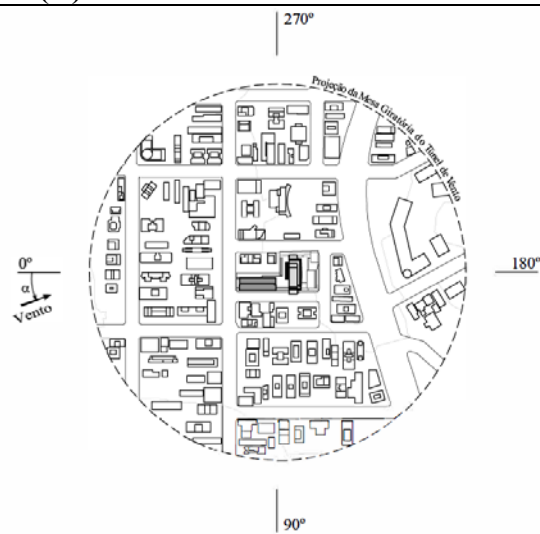
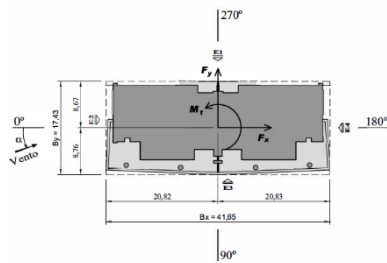
E5



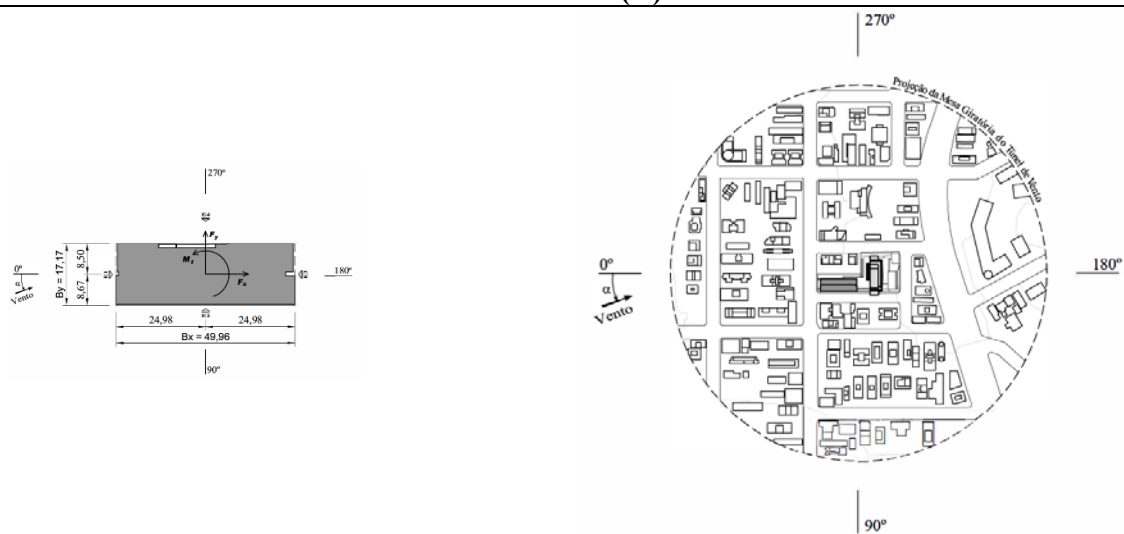
E7



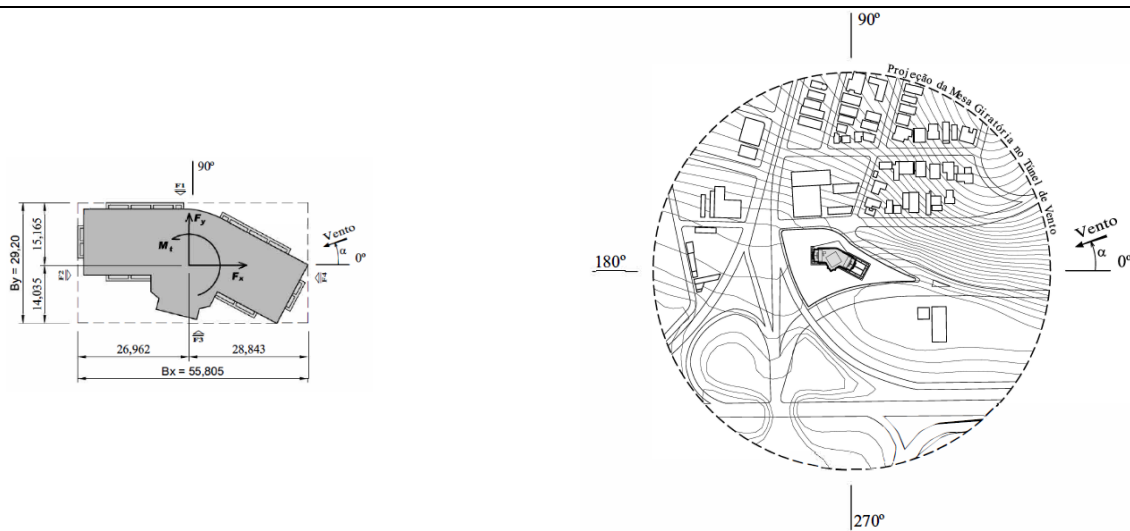
E8 (A)



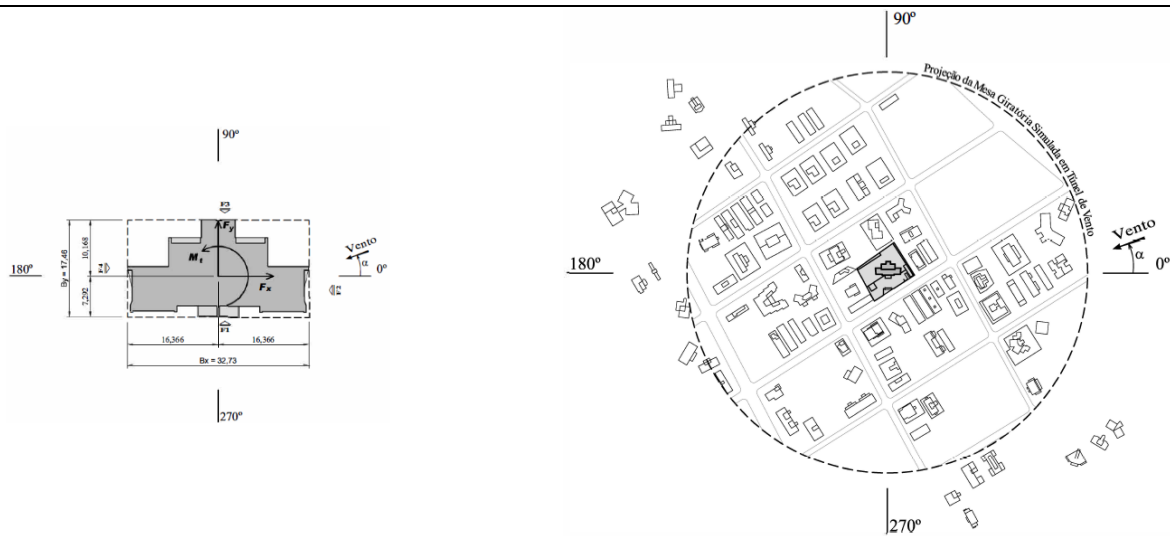
E8 (B)



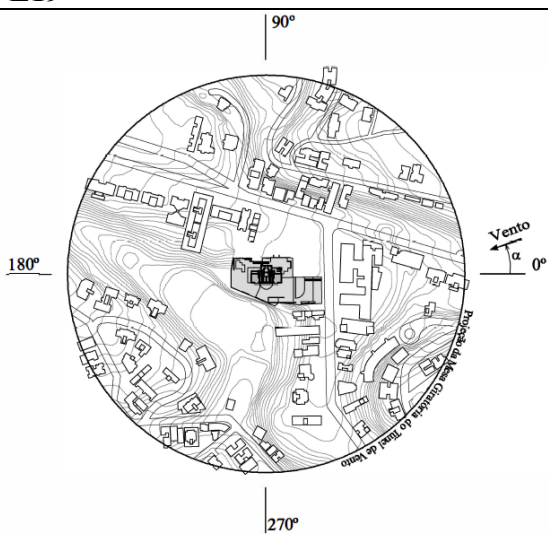
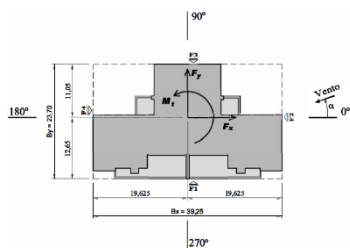
E12



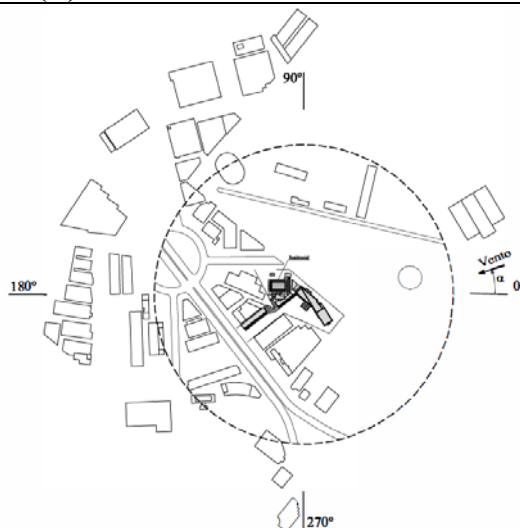
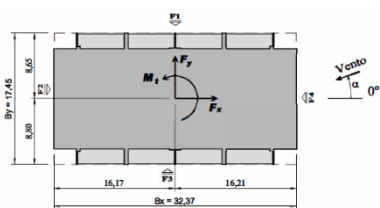
E17



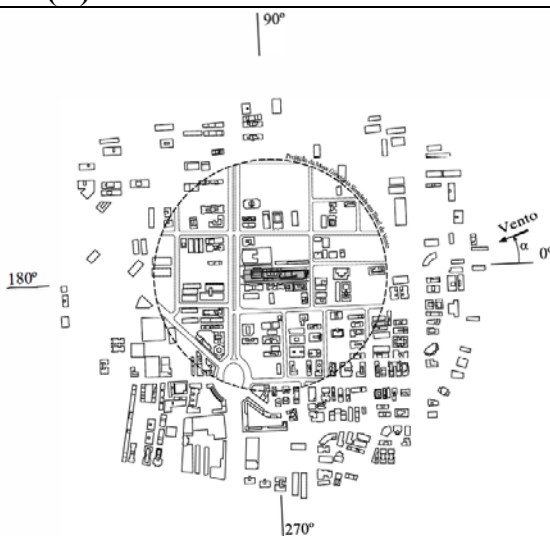
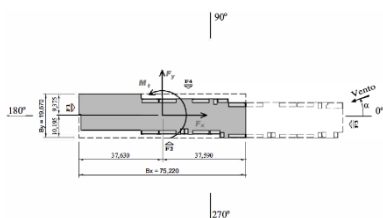
E19



E21 (B)



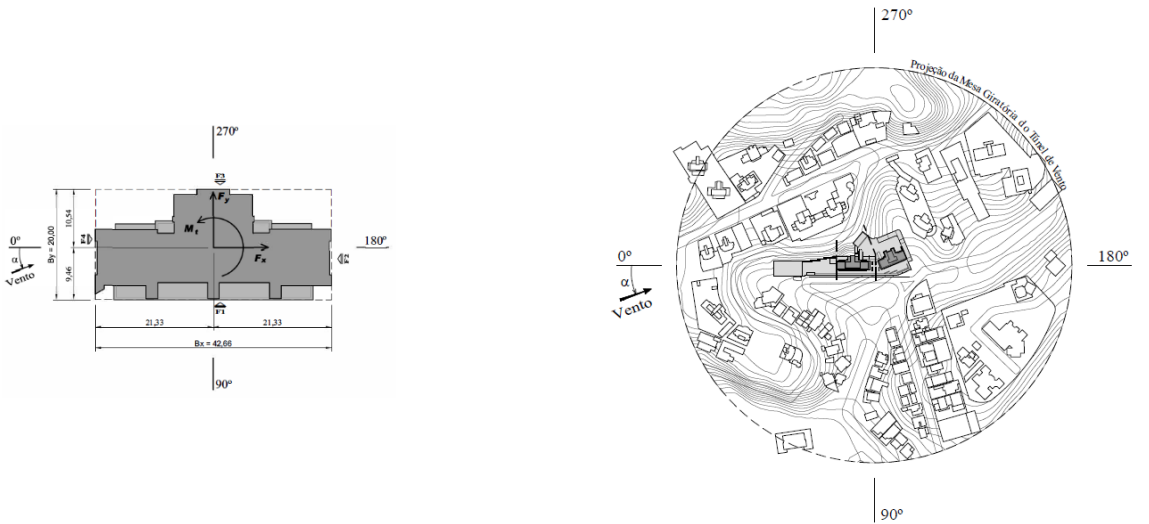
E22 (A)



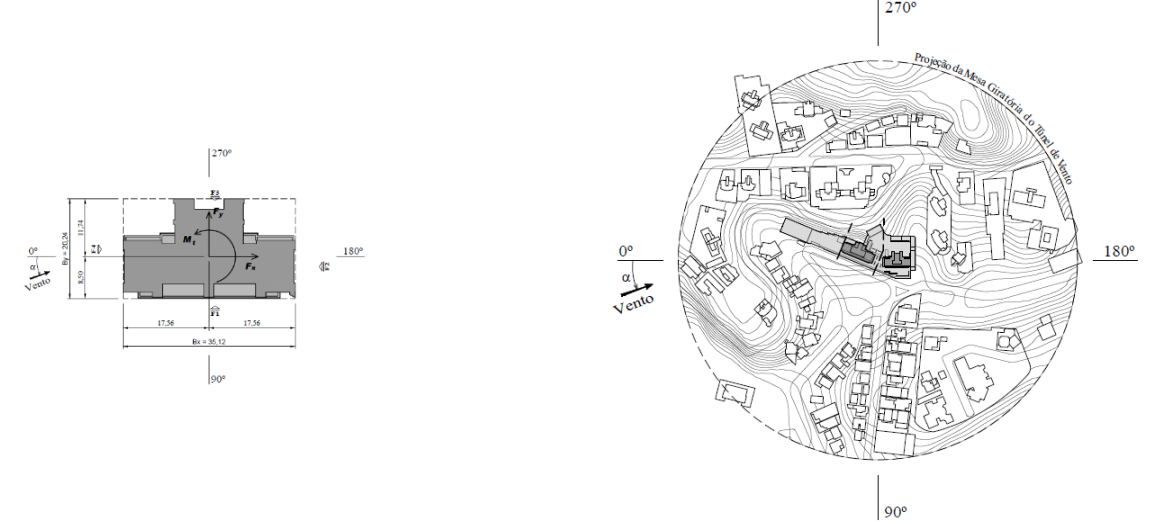
E22 (B)



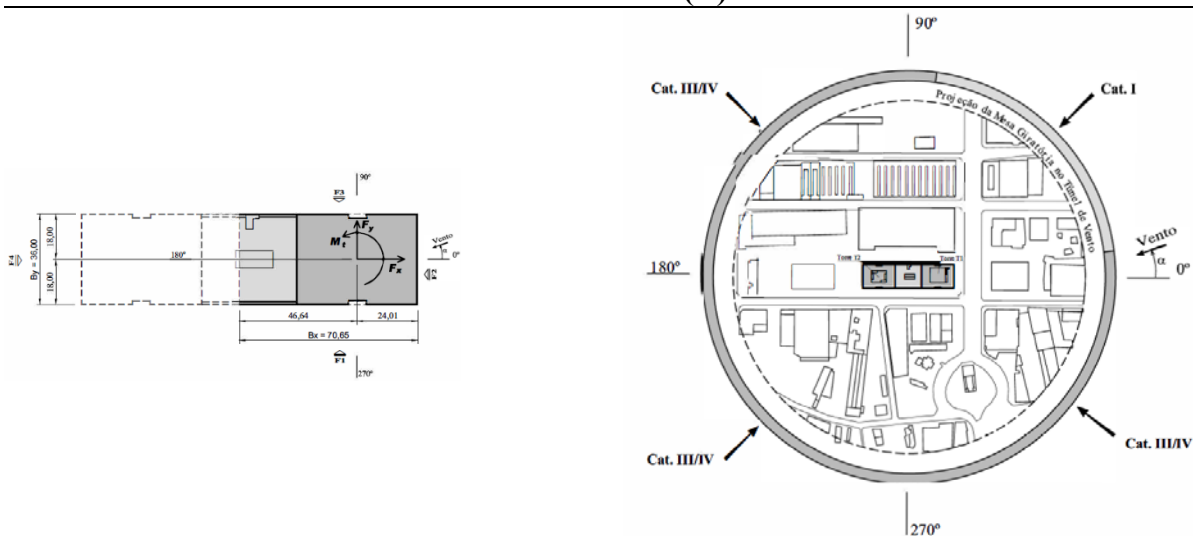
E24 (A)



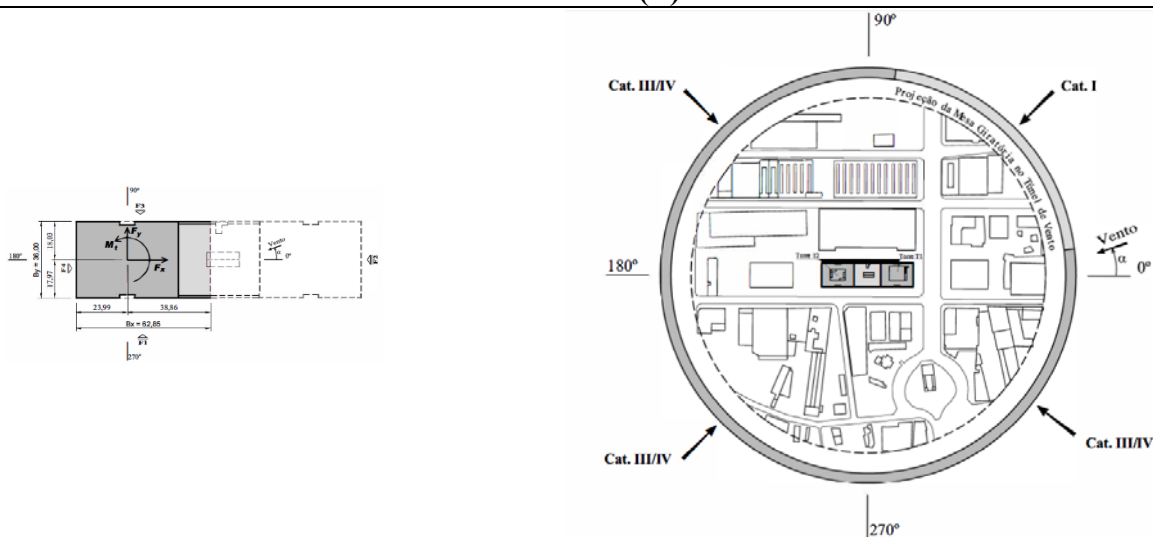
E24 (B)



E26 (A)



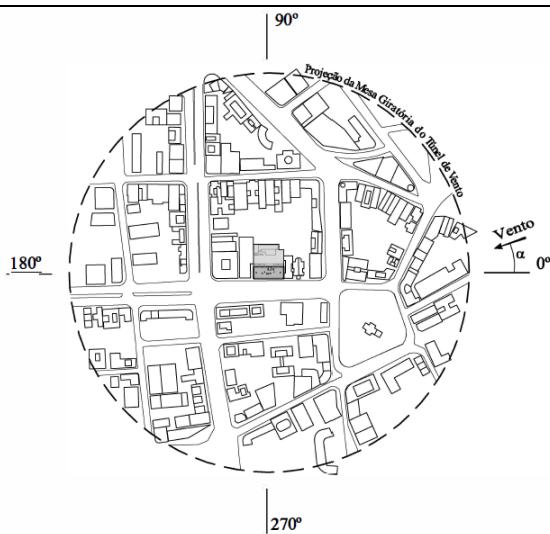
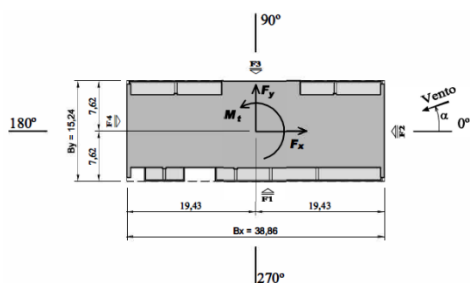
E26 (B)



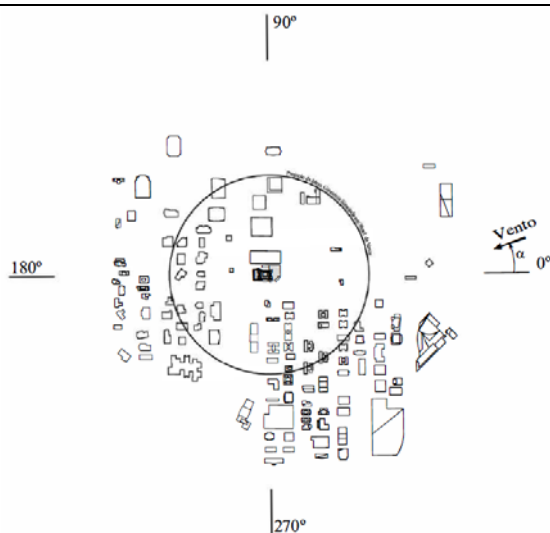
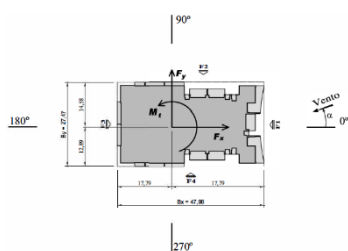
E28



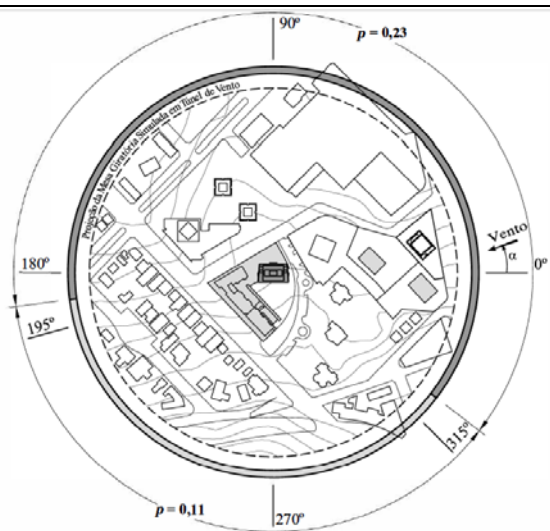
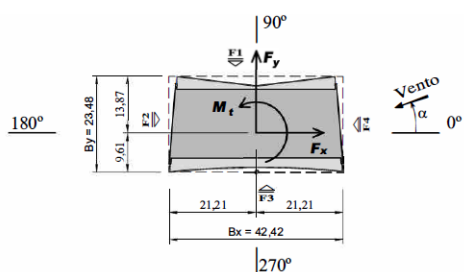
E29



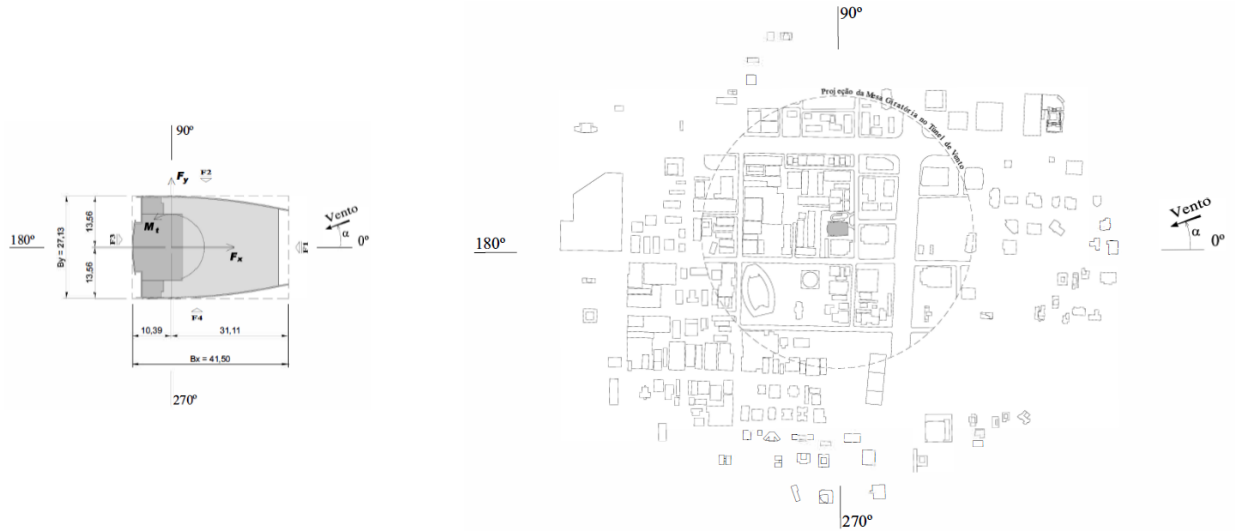
E31



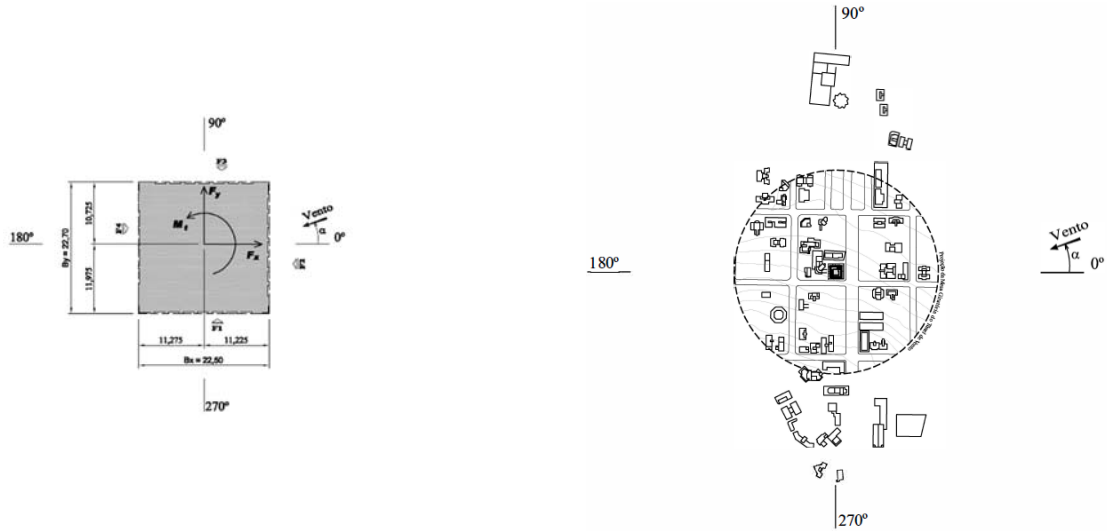
E33



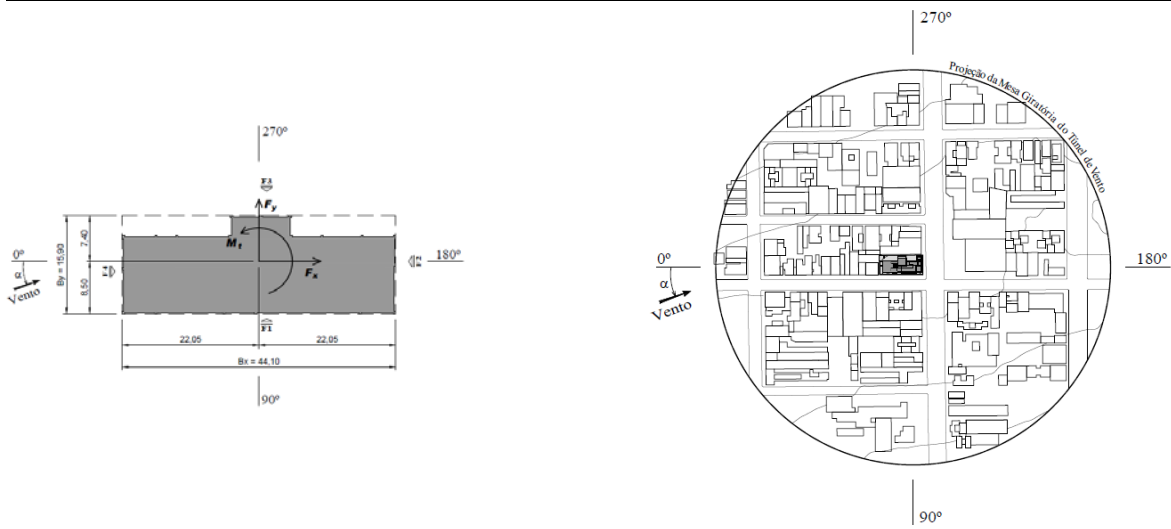
E36



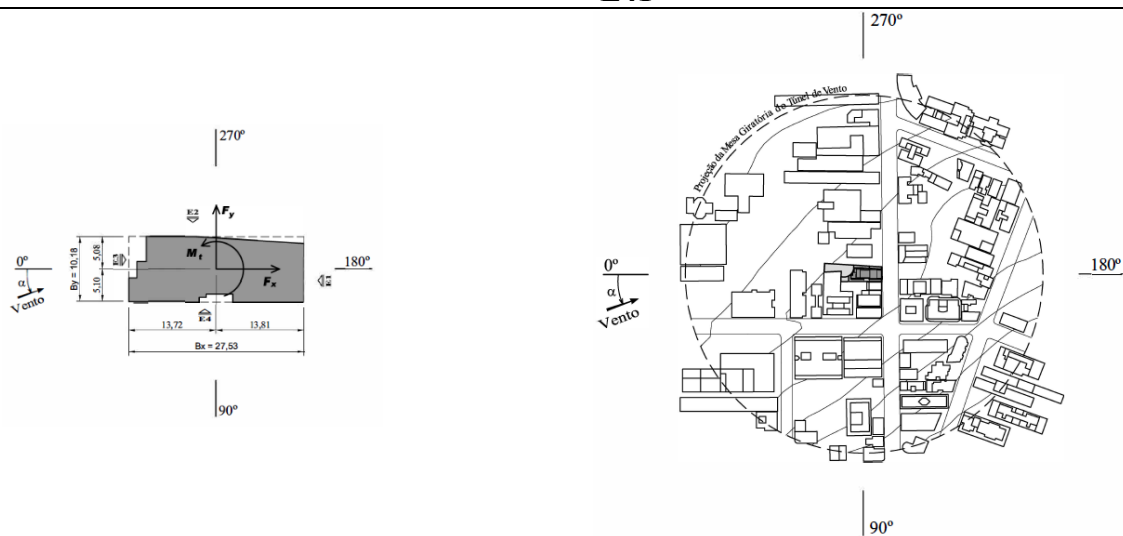
E39



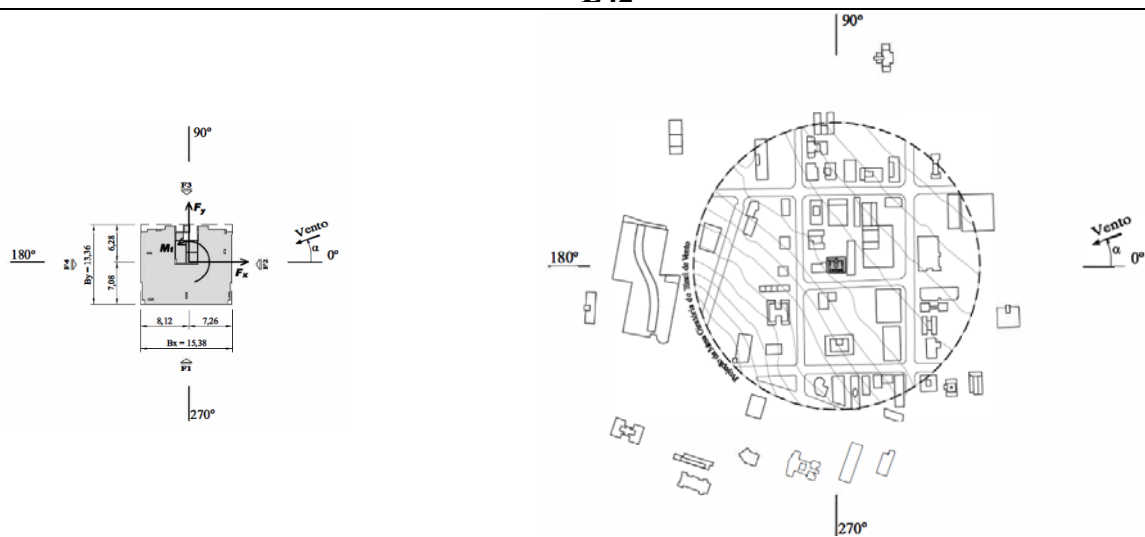
E40



E41

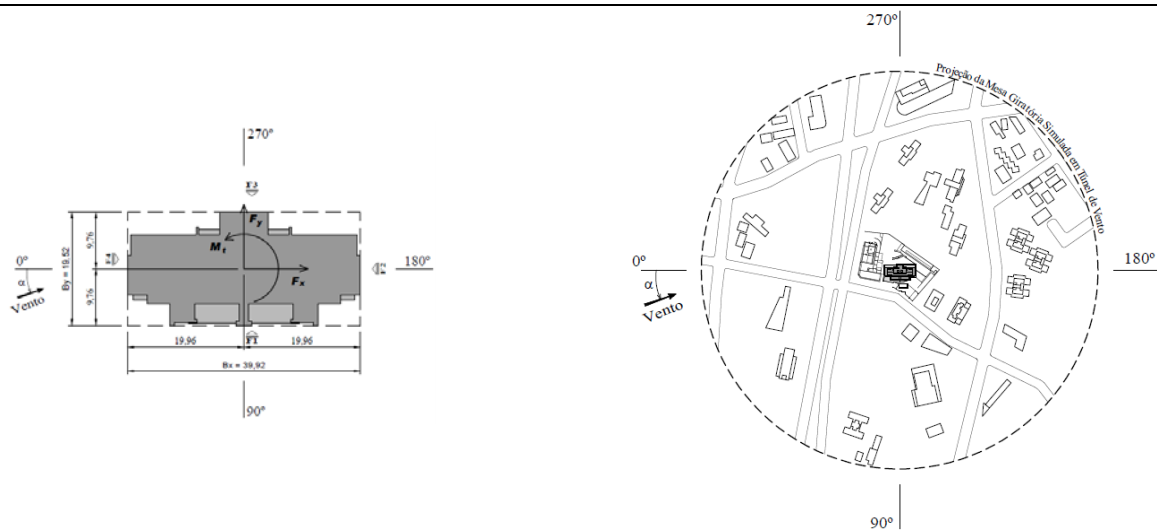


E42

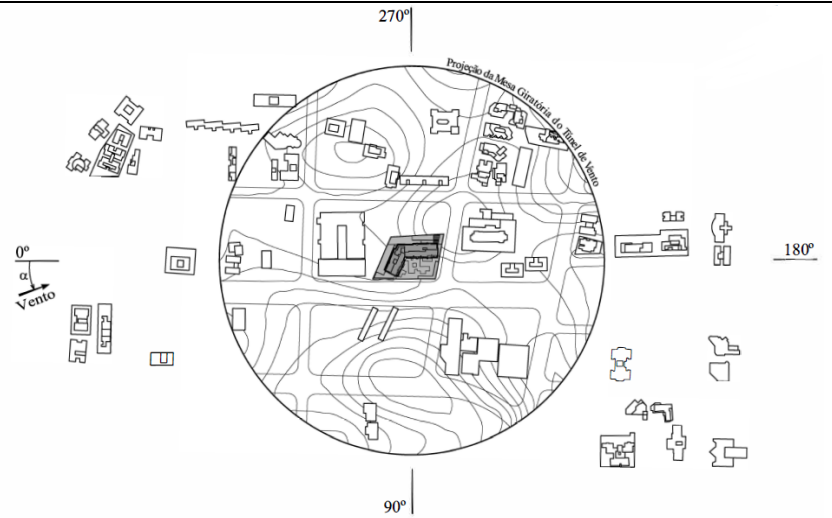
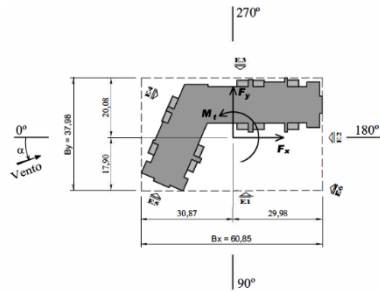


DENSIDADE BAIXA

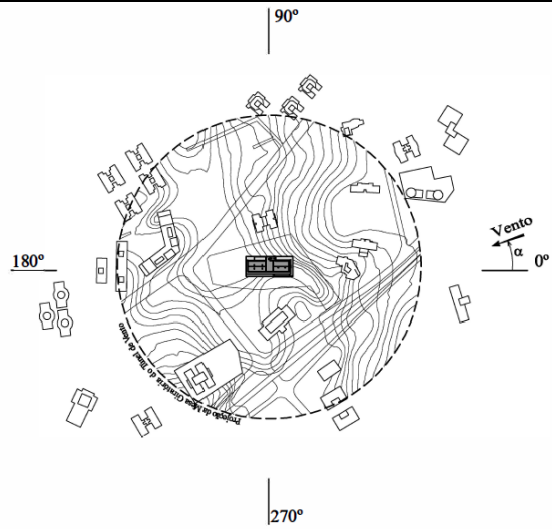
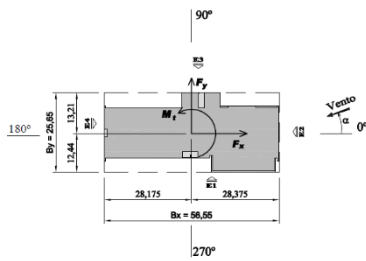
E3



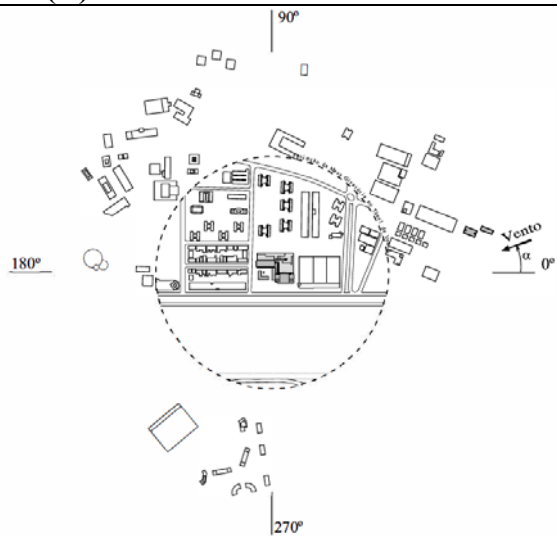
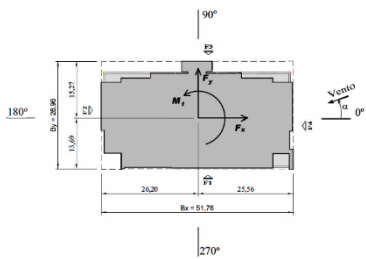
E4



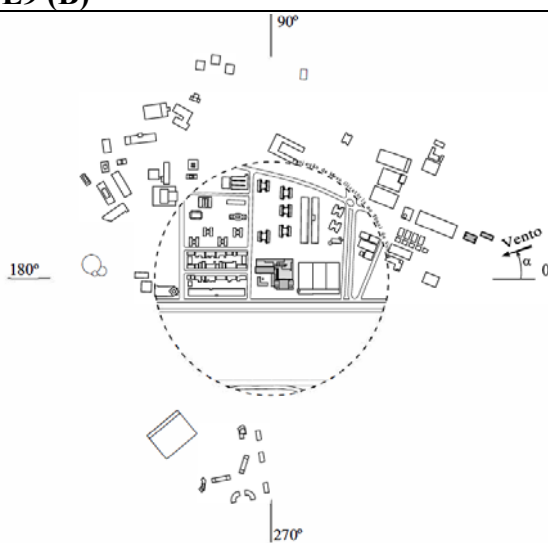
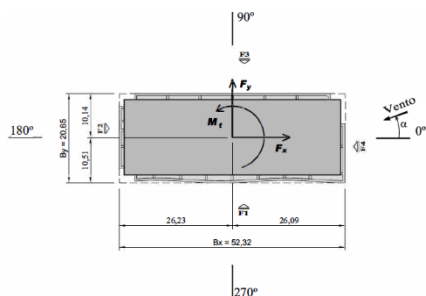
E6



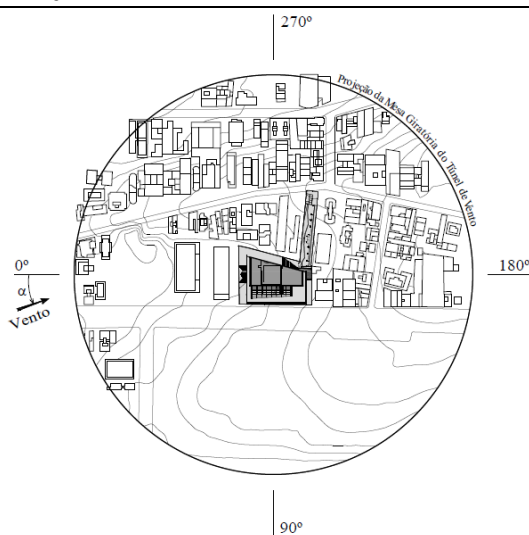
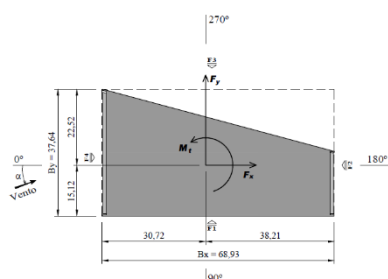
E9 (A)



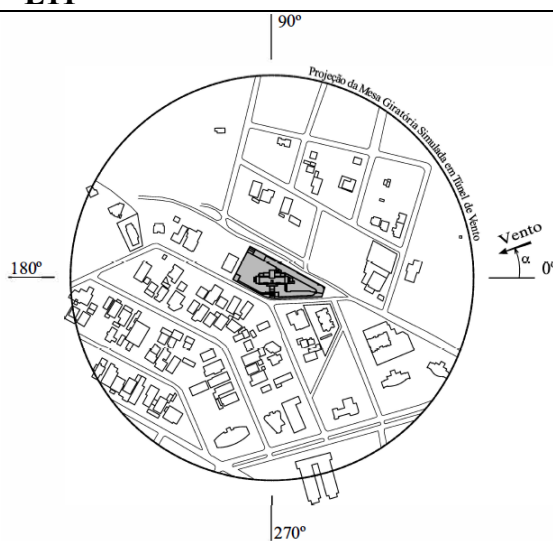
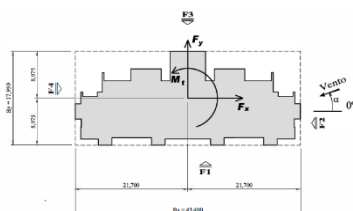
E9 (B)



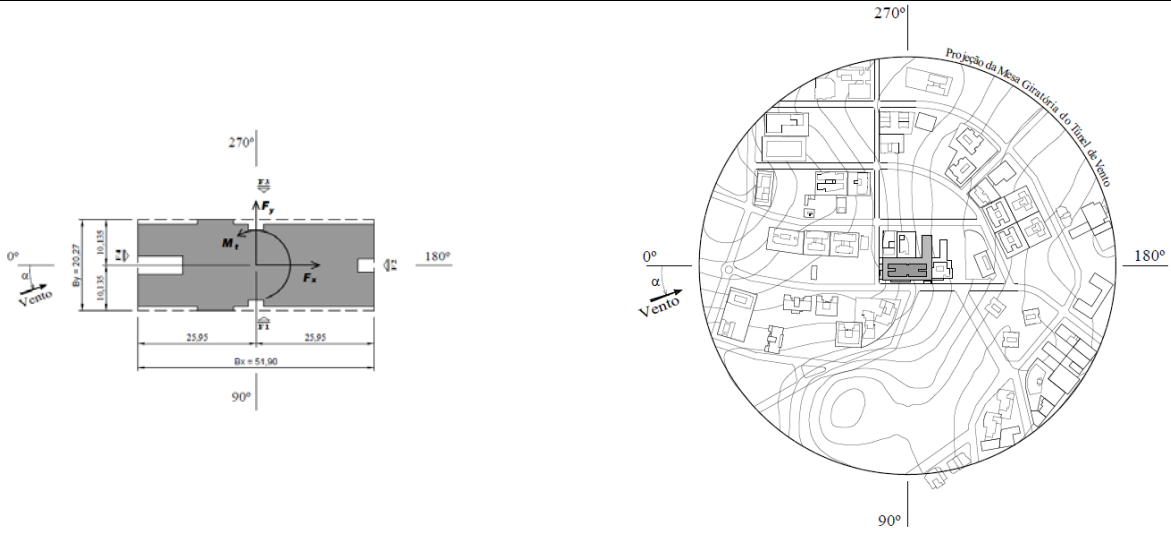
E10



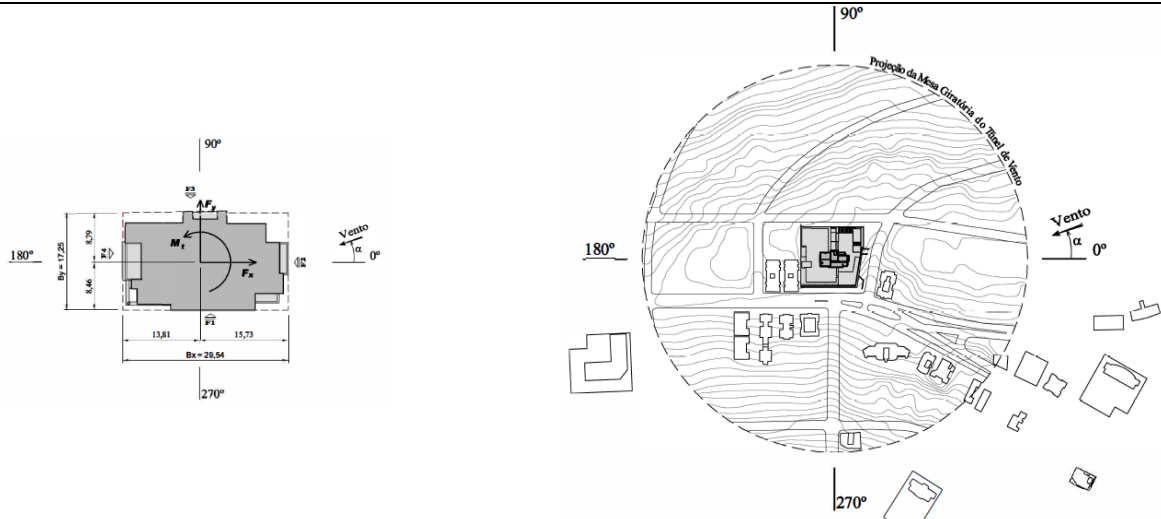
E11



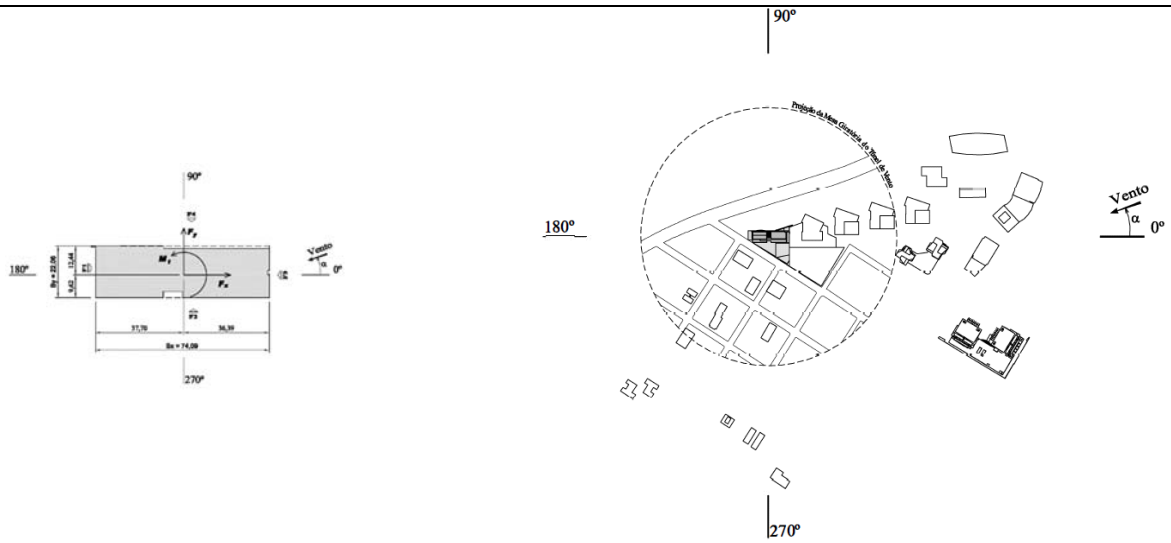
E13



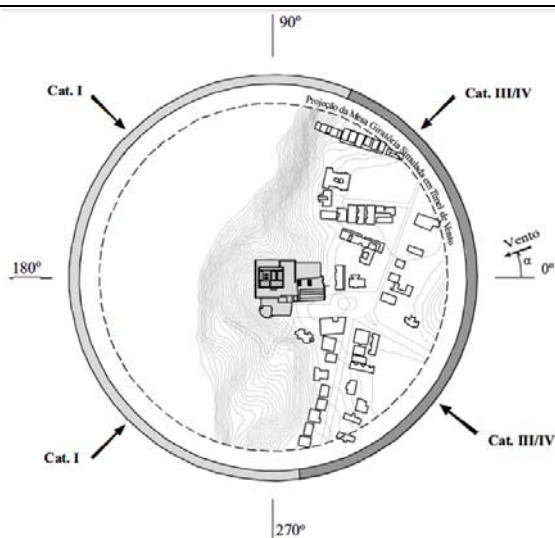
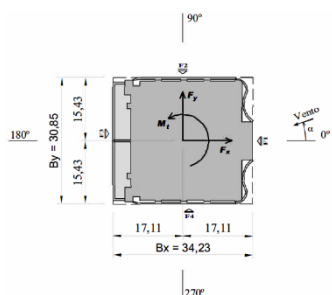
E14



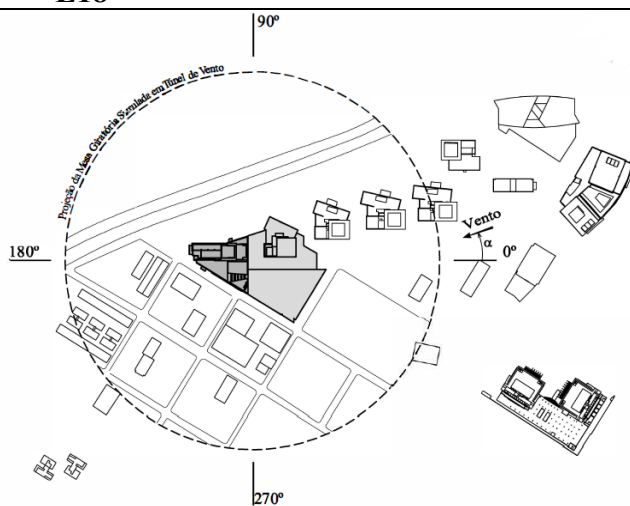
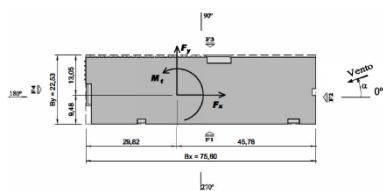
E15



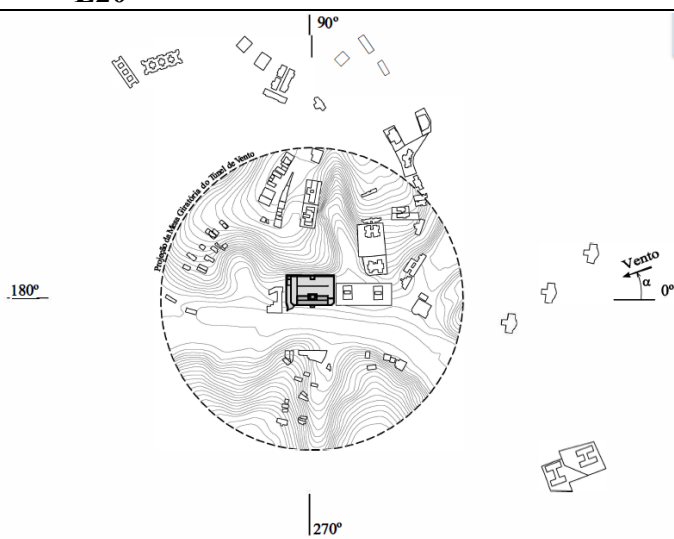
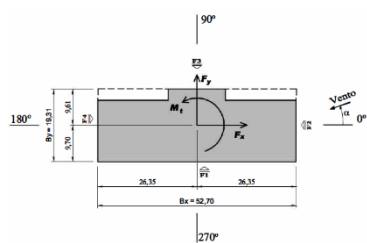
E16



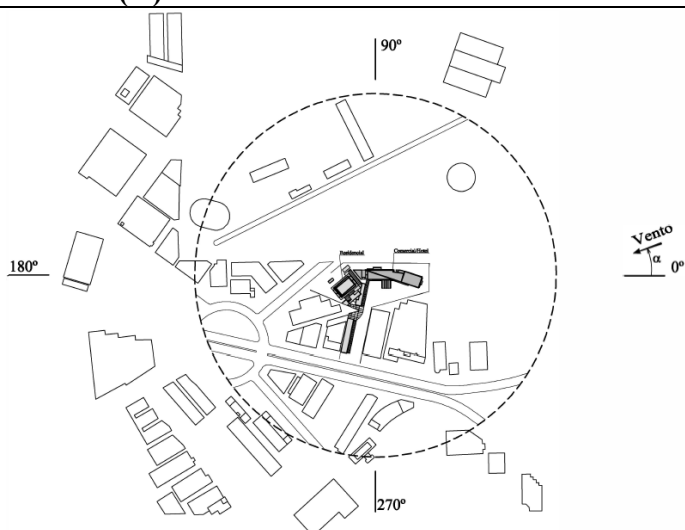
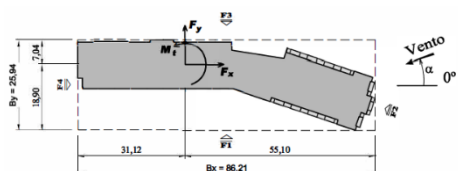
E18



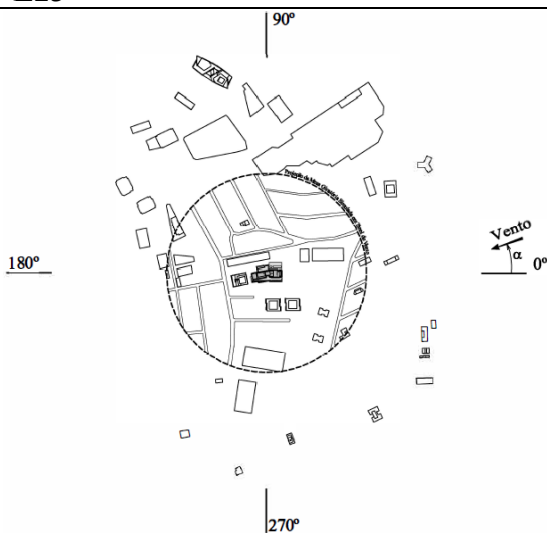
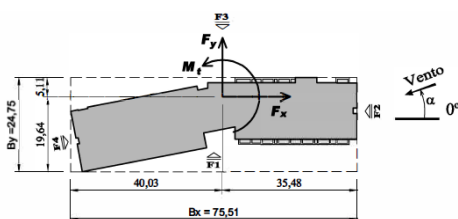
E20



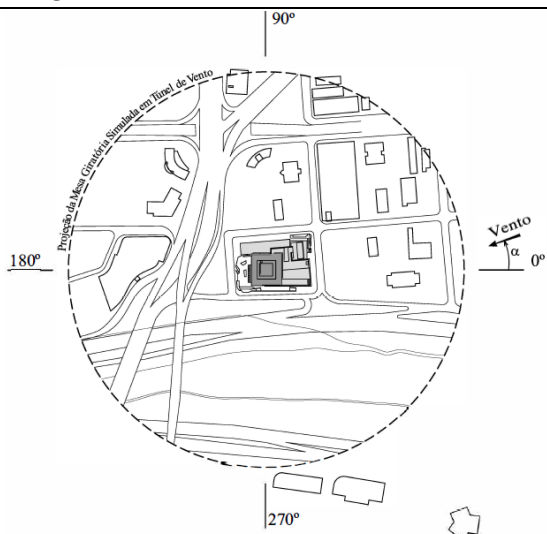
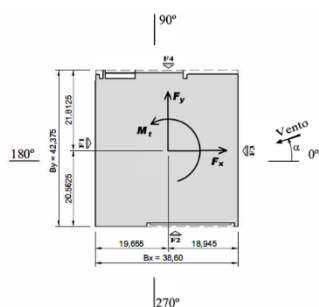
E21 (A)



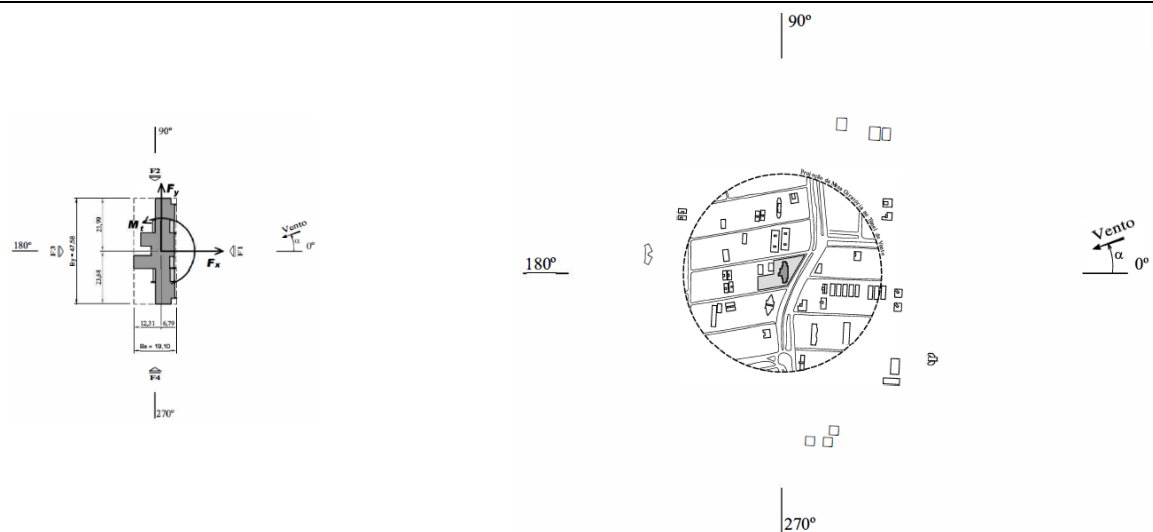
E23



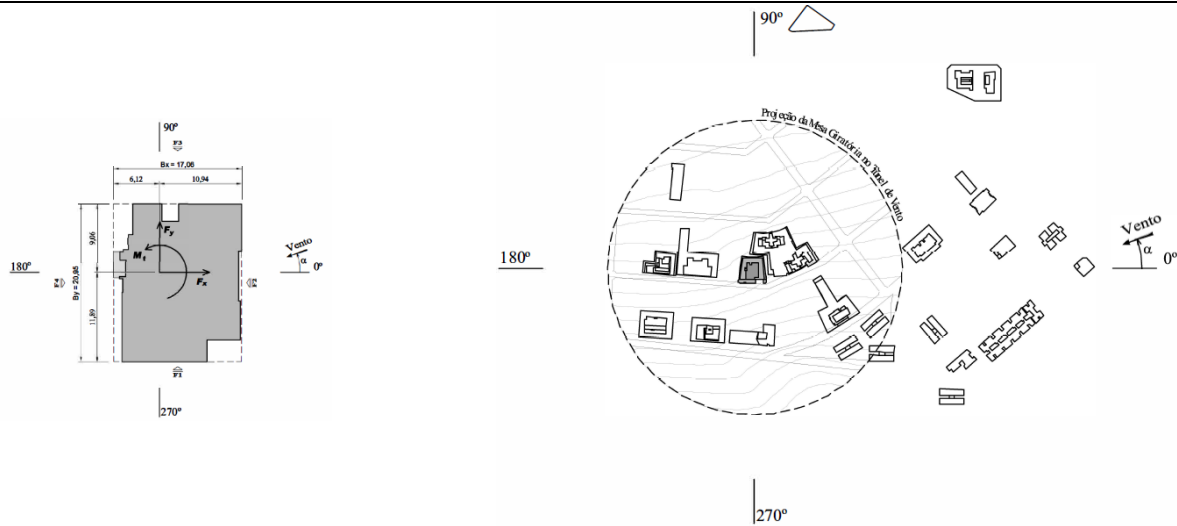
E25



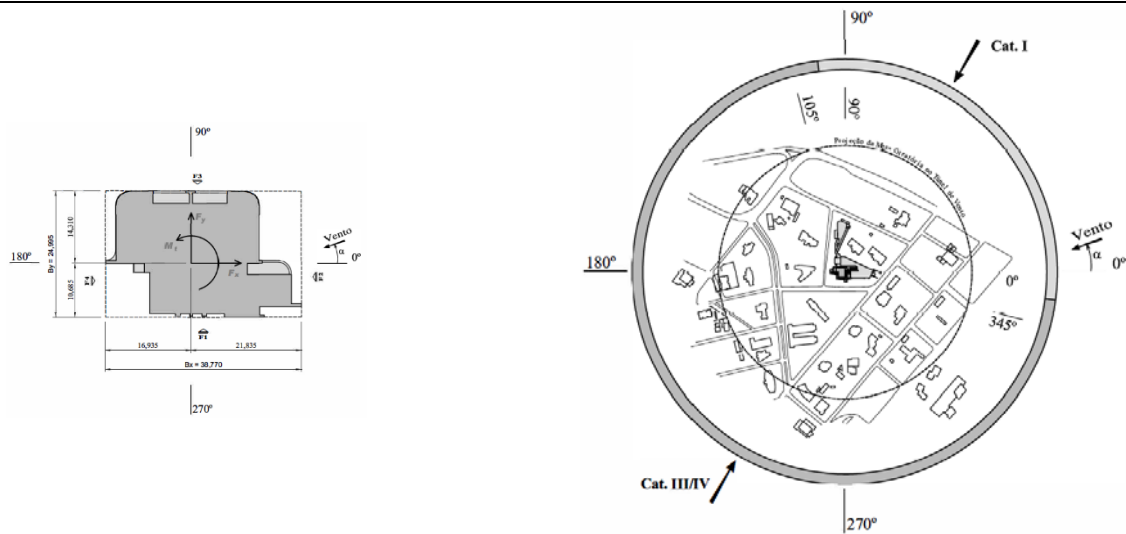
E27



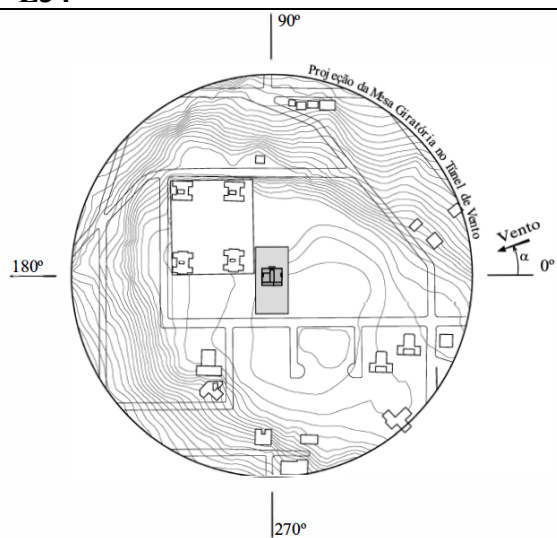
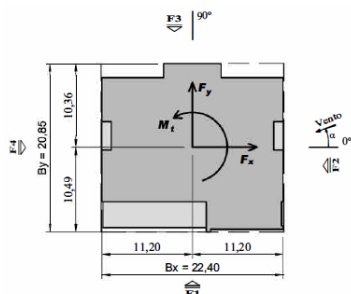
E30



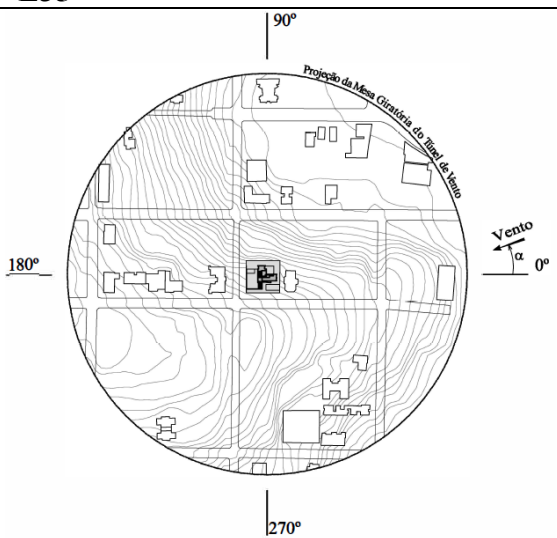
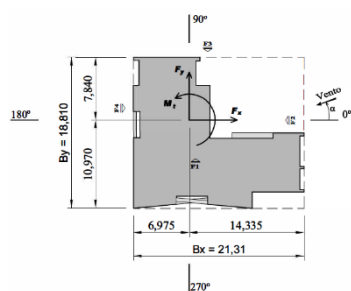
E32



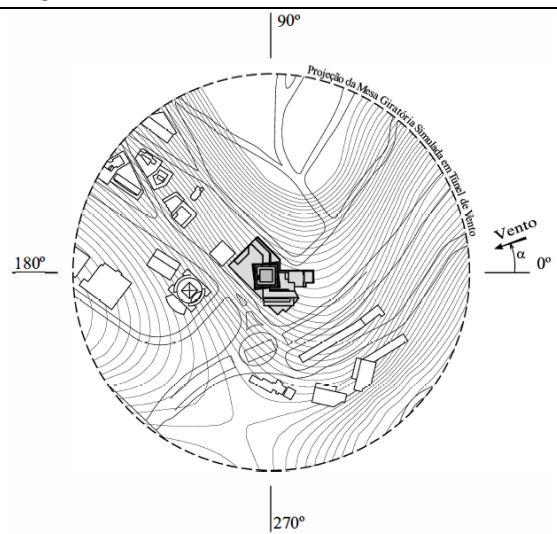
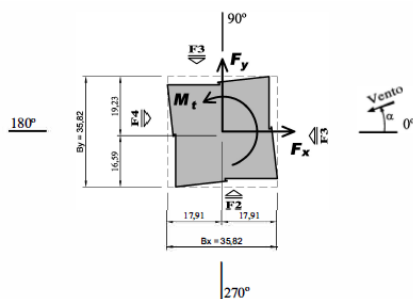
E34

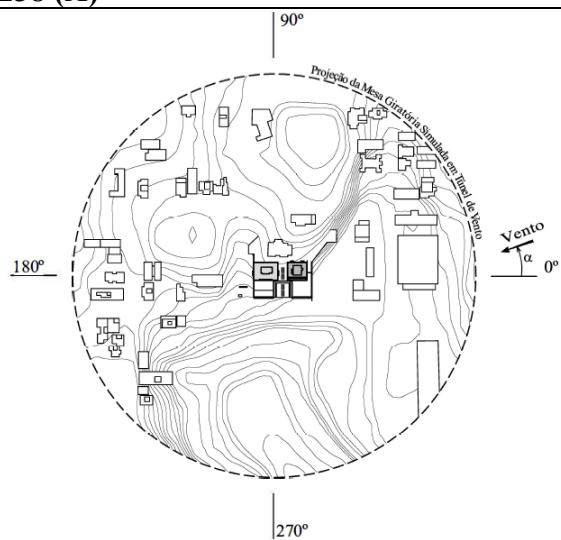
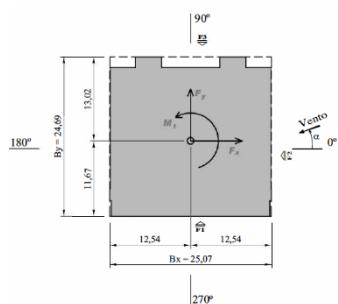
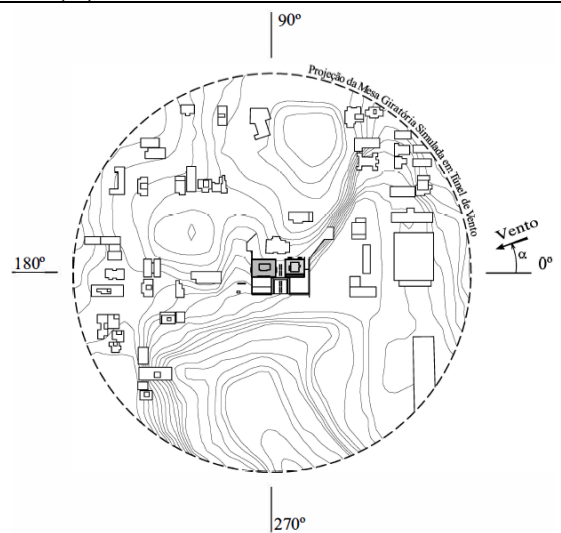
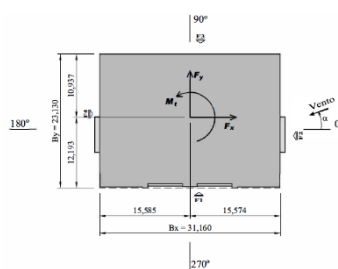


E35



E37



E38 (A)**E38 (B)**

Fonte: Acervo do LAC