

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Emerson Franco de Menezes

**EFEITOS AERODINÂMICOS DE VIZINHANÇA DEVIDO À
AÇÃO DO VENTO EM EDIFÍCIOS ALTOS: ANÁLISE A
PARTIR DO FATOR DE VIZINHANÇA**

Avaliador:
Defesa: dia __/__/2017 às _____ horas
Local: UFRGS / Engenharia Nova Oswaldo Aranha, 99, sala 304
Anotações com sugestões para qualificar o trabalho são bem- vindas. O aluno fará as correções e lhe passará a versão final do trabalho, se for de seu interesse.

Porto Alegre

Julho 2017

EMERSON FRANCO DE MENEZES

**EFEITOS AERODINÂMICOS DE VIZINHANÇA DEVIDO À
AÇÃO DO VENTO EM EDIFÍCIOS ALTOS:
ANÁLISE A PARTIR DO FATOR DE VIZINHANÇA**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Acir Mércio Loredou-Souza

Porto Alegre

Julho 2017

EMERSON FRANCO DE MENEZES

**EFEITOS AERODINÂMICOS DE VIZINHANÇA DEVIDO À
AÇÃO DO VENTO EM EDIFÍCIOS ALTOS:
ANÁLISE A PARTIR DO FATOR DE VIZINHANÇA**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, julho de 2017

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

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Gustavo Javier Zani Nuñez
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dr. Mario Gustavo Klaus Oliveira
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a minha mãe Ilza, a minha madrinha “Tete” (*in memoriam*) e a minha esposa Elen pelo apoio e incentivo dedicado ao longo do curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Acir Mércio Loredo-Souza, orientador deste trabalho e diretor do LAC, pela confiança em mim investida, pela oportunidade de mostrar serviço e pelos conhecimentos compartilhados durante o período de trabalho.

Agradeço à toda equipe técnica, do LAC que tive convívio durante o curso de graduação, especialmente ao “Prof” Paulo Francisco Bueno, pela amizade e pelas experiências compartilhadas.

Agradeço à minha família por sempre confiarem no meu sucesso e pelo apoio e palavras de esperança nos momentos difíceis.

Nossas virtudes e nossas falhas são inseparáveis,
como a força e a matéria. Quando elas se separam,
o homem não é mais nada.

Nikola Tesla

RESUMO

Menezes, E. F. **Efeitos aerodinâmicos de vizinhança devido à ação do vento em edifícios altos: análise a partir do fator de vizinhança.** 2017. 92 f. Trabalho de diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

O presente trabalho visa analisar as interações entre vento e estrutura, devidos as interferências causadas pelas edificações próximas. A determinação mais precisa possível das forças que o vento exerce nas estruturas, para que se atenda a segurança necessária sem que haja desperdícios de materiais é muito importante para o cálculo estrutural de obras civis. A aleatoriedade dos fatores envolvidos para a determinação destas forças é a principal dificuldade reportada em diversos estudos relacionados ao assunto. Um dos fatores que interferem nas forças causadas pelo vento são os obstáculos existentes no entorno das estruturas em análise. A vizinhança, como são chamados estes obstáculos, pode influenciar tanto de forma positiva quanto negativa, aumentando ou diminuindo os carregamentos sobre a estrutura. Este trabalho analisa cinco empreendimentos com cenários de vizinhança distintos e avalia os fatores de vizinhança calculados de maneira experimental comparando-os com os valores encontrados a partir do método indicado na NBR 6123/88. Os resultados obtidos evidenciam a importância da análise dos efeitos de vizinhança sobre uma estrutura, visto que ela altera significativamente as forças devidas ao vento em uma edificação.

Palavras-chave: NBR 6123. Efeitos de vizinhança. Fator de vizinhança.
Ação do vento em edifícios altos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama das etapas do trabalho	15
Figura 2 – Perfil de velocidade média do vento	18
Figura 3 – Características dos perfis verticais de velocidades médias do vento de acordo com o terreno.....	19
Figura 4 – Efeito Venturi	23
Figura 5 – Deflexão do vento na direção vertical	24
Figura 6 – Características da esteira	24
Figura 7 – Regime de escoamento de corpo isolado	25
Figura 8 – Regime de escoamento deslizante	26
Figura 9 – Regime de escoamento de interferência de esteira	26
Figura 10 – Convenção de sinais de sucção e sobrepressão	27
Figura 11 – Mapa de isopletras da velocidade básica V_0	32
Figura 12 – Túnel de vento prof. Joaquim Blessmann	33
Figura 13 – Dispositivos de geração das diferentes camadas limites do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann	35
Figura 14 – Perfil de velocidades médias	35
Figura 15 – Referência para aplicação das forças ortogonais F_x e F_y e dimensões de referência Edifício A.....	39
Figura 16 – Representação da fachada frontal e altura de referência Edifício A	40
Figura 17 – Modelo reduzido Edifício A no túnel de vento	41
Figura 18 – Referência de ângulos de incidência do vento e mapa de vizinhança	42
Figura 19 – Referência para aplicação das forças ortogonais F_x e F_y e dimensões de referência Edifício B	43
Figura 20 – Representação da fachada frontal e altura de referência Edifício B	44
Figura 21 – Edifício B no túnel de vento	44
Figura 22 – Referência de ângulos de incidência do vento e mapa de vizinhança Edifício B	45
Figura 23 – Referência para aplicação das forças ortogonais F_x e F_y e dimensões de referência Edifício C	46
Figura 24 – Representação da fachada frontal e altura de referência Edifício C	47
Figura 25 – Edifício C situado no túnel de vento	48
Figura 26 – Referência de ângulos de incidência do vento e mapa de vizinhança Edifício C	48
Figura 27 – Referência para aplicação das forças ortogonais F_x e F_y e dimensões de referência Edifício D	49

Figura 28 – Representação da fachada frontal e altura de referência Edifício D	50
Figura 29 – Edifício D situado interior do túnel de vento	51
Figura 30 – Referência de ângulos de incidência do vento e mapa de vizinhança Edifício D	51
Figura 31 – Referência de ângulos de incidência do vento, mapa de vizinhança e localização torre 1 Edifício E	52
Figura 32 – Referência para aplicação das forças ortogonais F_x e F_y e dimensões de referência Edifício E	53
Figura 33 – Representação da fachada frontal e altura de referência Edifício E	54
Figura 34 – Modelo do Edifício E no interior do túnel de vento	54
Figura 35 – Valores de C_x Edifício A	56
Figura 36 – Valores de C_y Edifício A	57
Figura 37 – FV x ângulo de incidência do vento Edifício A	59
Figura 38 – Valores de C_x Edifício B	60
Figura 39 – Valores de C_y Edifício B	61
Figura 40 – FV x ângulo de incidência do vento Edifício B	63
Figura 41 – Valores de C_x Edifício C	64
Figura 42 – Valores de C_y Edifício C	65
Figura 43 – FV x ângulo de incidência do vento Edifício C	67
Figura 44 – Valores de C_x Edifício D	68
Figura 45 – Valores de C_y Edifício D	69
Figura 46 – FV x ângulo de incidência do vento Edifício D	71
Figura 47 – Valores de C_x Edifício E	72
Figura 48 – Valores de C_y Edifício E	73
Figura 49 – FV x ângulo de incidência do vento Edifício E	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores representativos de C_x e C_y , ângulos de ocorrência e fator de vizinhança Edifício A	58
Tabela 2: Parâmetros para cálculo do FV a partir da NBR 6123 Edifício A	58
Tabela 3 – Valores representativos de C_x e C_y , ângulos de ocorrência e fator de vizinhança Edifício B	62
Tabela 4: Parâmetros para cálculo do FV a partir da NBR 6123 Edifício B	63
Tabela 5: Valores representativos de C_x e C_y , ângulos de ocorrência e fator de vizinhança Edifício C	66
Tabela 6: Parâmetros para cálculo do FV a partir da NBR 6123 Edifício C	66
Tabela 7: Valores representativos de C_x e C_y , ângulos de ocorrência e fator de vizinhança Edifício D	70
Tabela 8: Parâmetros para cálculo do FV a partir da NBR 6123 Edifício D	70
Tabela 9: Valores representativos de C_x e C_y , ângulos de ocorrência e fator de vizinhança Edifício E	74
Tabela 10: Parâmetros para cálculo do FV a partir da NBR 6123 Edifício E torre 1	74
Tabela 11: Valores de C_x Edifício A	80
Tabela 12: Valores de C_y Edifício A	81
Tabela 13: Valores de C_x Edifício B	82
Tabela 14: Valores de C_y Edifício B	83
Tabela 15: Valores de C_x Edifício C	84
Tabela 16: Valores de C_y Edifício C	85
Tabela 17: Valores de C_x Edifício D	86
Tabela 18: Valores de C_y Edifício D	87
Tabela 19: Valores de C_x Edifício E	88
Tabela 20: Valores de C_y Edifício E	89

LISTA DE SÍMBOLOS

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

z_{ref} – altura de referência (m)

z – altura (m)

p – expoente que representa o tipo de terreno (adm)

k – constante de Von Kàrmàn (aproximadamente 0,4)

z_0 – rugosidade aerodinâmica ou altura média da rugosidade do terreno (adm)

FV – fator de efeito de vizinhança (adm)

F – força global exercida pelo vento (N)

q – pressão dinâmica (N/m²)

A – área de referência (m²)

c_f – coeficiente de força (adm)

c_a – coeficiente de arrasto (adm)

V_k – velocidade característica do vento (m/s)

V_0 – velocidade básica do vento (m/s)

S_1 – fator topográfico (adm)

S_2 – fator que considera o terreno, a velocidade do vento e as dimensões da edificação (adm)

S_3 – fator estatístico (adm)

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

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

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

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

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

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

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

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

T = intervalo de tempo de amostragem (s)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	14
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	14
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	14
2.2.1 Objetivo principal	14
2.2.1 Objetivo secundário	14
2.3 DELIMITAÇÕES	14
2.4 LIMITAÇÕES	15
2.5 DELINEAMENTO	15
3 CARACTERÍSTICAS DO VENTO	17
3.1 CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA	17
3.2 TURBULÊNCIA	18
3.3 VELOCIDADE MÉDIA DO VENTO	19
3.4 SIMULAÇÃO DO VENTO NATURAL	21
3.5 EFEITOS DE VIZINHANÇA	22
3.5.1 Efeito Venturi	23
3.5.2 Deflexão do vento na direção vertical	23
3.5.3 Turbulência da esteira	24
3.6 COEFICIENTES DE PRESSÃO	26
3.7 FATOR DE VIZINHANÇA	27
3.8 FORÇAS DEVIDAS AO VENTO	29
4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	33
4.1 TÚNEL DE VENTO PROF. JOAQUIM BLESSMANN	33
4.2 CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ARRASTO A PARTIR DE MEDIÇÕES REALIZADAS EM TÚNEL DE VENTO	36
5 EDIFÍCIOS ESTUDADOS	39
5.1 EDIFÍCIO A	39
5.2 EDIFÍCIO B	42
5.3 EDIFÍCIO C	46
5.4 EDIFÍCIO D	49
5.5 EDIFÍCIO E	52

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS	55
6.1 EDIFÍCIO A	55
6.2 EDIFÍCIO B	59
6.3 EDIFÍCIO C	64
6.4 EDIFÍCIO D	67
6.5 EDIFÍCIO E	71
7 CONCLUSÃO	76
REFERÊNCIAS	77
ANEXO A	79

1 INTRODUÇÃO

Para se dimensionar corretamente a estrutura de uma edificação, muitos fatores devem ser considerados, entre os quais a ação do vento. Responsável por inúmeros sinistros nos mais diversos tipos de prédios, a força que o vento exerce sobre a estrutura não é de simples mensuração. Definir diretrizes para auxiliar engenheiros projetistas a definir as forças devidas ao vento na estrutura é o objetivo principal da NBR 6123/1988.

O vento é um fenômeno da natureza que se comporta de forma aleatória, motivo pelo qual é fonte de pesquisa de muitos especialistas. Um parâmetro fundamental que interfere na força que o vento irá exercer sobre uma edificação são os obstáculos que o vento terá que transpor até atingir a estrutura estudada. Esses obstáculos existentes no entorno da estrutura são denominados vizinhança, que conforme sua disposição pode tanto proteger a edificação da ação do vento quanto gerar uma ação desfavorável, por exemplo, por aceleração do vento. Devido à importância destes efeitos, a NBR 6123/1988 tem em seu escopo um anexo específico para as questões de efeitos de vizinhança.

A verticalização dos meios urbanos brasileiros, com a crescente demanda por edifícios altos, somados a exigência do mercado por obras mais racionais, exige dos profissionais envolvidos em um projeto de obras civis, eficiência plena nos quesitos conforto, segurança e economia. Estes quesitos são diretamente influenciados pela carga de vento a ser considerada na estrutura, visto que, quanto maior a precisão na definição destas cargas, mais otimizada será a estrutura.

Com o contexto apresentado, este trabalho visa analisar os efeitos de vizinhança de cinco estruturas que foram submetidas a ensaios experimentais em túnel de vento. Para isso, como ferramenta de pesquisa, foi usado o túnel de vento prof^o Joaquin Blessmann, pertencente ao Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC) – UFRGS. Uma descrição detalhada deste equipamento encontra-se nos capítulos subsequentes. Através de ensaios realizados no túnel de vento, é possível se estudar de forma adequada, as interferências que ocorrem entre vento e estrutura. Estes ensaios são a fonte primária de pesquisa deste trabalho.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

A seguir encontram-se descritas as diretrizes para o desenvolvimento do trabalho.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: analisar como agem as interferências geradas pela vizinhança em uma determinada estrutura.

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa foram divididos em principal e secundário e são descritos abaixo.

2.2.1 Objetivo principal

Estudar de que forma as forças devidas ao vento sobre uma edificação são influenciadas pela sua vizinhança.

2.2.2 Objetivo secundário

Contribuir para o banco de estudos do LAC de forma a se somar às demais pesquisas sobre o tema e contribuir para uma atualização da NBR 6123 mais abrangente e que permita um fácil entendimento ao usuário.

2.3 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se a analisar a influência dos efeitos de vizinhança frente à ação do vento em diferentes estruturas, determinadas a partir de ensaios realizados em túnel de vento. Diferentes seções transversais de 5 edifícios foram ensaiadas e utilizadas para o cálculo do fator de vizinhança, indicado pela NBR 6123.

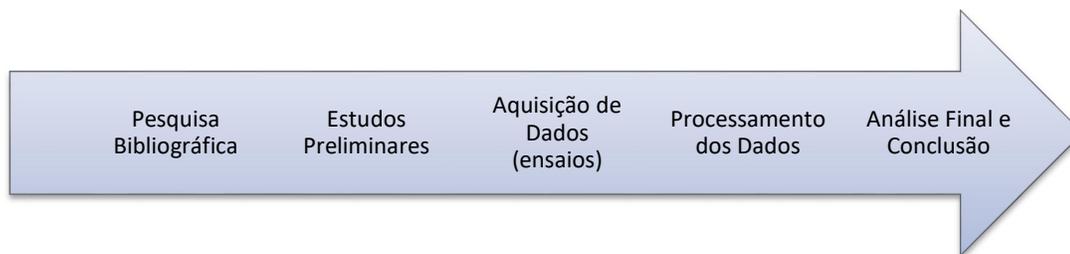
2.4 LIMITAÇÕES

Este trabalho limita-se aos efeitos estáticos causado pelo vento nas estruturas, não sendo considerados os efeitos dinâmicos.

2.5 DELINEAMENTO

De modo a facilitar a organização e realização do trabalho, ele foi dividido nas etapas demonstradas no diagrama apresentado na figura 1.

Figura 1 – Diagrama das etapas do trabalho



(fonte: elaborado pelo autor)

Etapa continua no desenvolvimento do trabalho, a pesquisa bibliográfica é de suma importância para o sucesso deste estudo, por proporcionar agregação de conhecimento. Uma pesquisa bibliográfica bem executada é o passo inicial para que qualquer ideia seja realizada de modo a atender suas expectativas. Na pesquisa bibliográfica foram consultados 3 livros, 1 artigo, 2 dissertações e demais materiais conforme a demanda de cada etapa. Todo material consultado está descrito nas referências bibliográficas.

A segunda etapa, dos estudos preliminares, teve por objetivo definir as configurações para as aquisições de dados. Nesta etapa que foi proposta a quantidade de modelos e tipos de arranjos de vizinhança usados nos ensaios em túnel de vento. O plano de se estudar diferentes formatos de edifícios em distintas configurações, isolado e com vizinhança, submetidos a ação do vento foi elaborado para que os modelos de edifícios escolhidos atendessem aos objetivos do trabalho.

Na fase de aquisição de dados, terceira na linha cronológica do trabalho, foram analisados e filtrados os dados existentes de projetos de consultoria realizados no LAC. Os ensaios foram realizados com a participação do autor deste trabalho, com auxílio da equipe técnica do LAC e conforme recomendações do professor orientador.

Posteriormente aos ensaios, na etapa de processamento dos dados, se fez o refino das amostras obtidas nos testes realizados. Cada ensaio gerou algumas centenas de dados brutos, os quais foram manipulados através de rotinas de softwares utilizadas pelo laboratório, visando facilitar sua compreensão e manipulação. Após o processamento dos dados, os resultados finais dos testes foram obtidos.

Concluídos os ensaios e o processamento de dados, os estágios seguintes foram: a análise final e conclusões. Após o processamento dos resultados, as influências dos efeitos de vizinhança nas forças que o vento exerce sobre as estruturas foram quantificadas e interpretadas. Gráficos e tabelas foram os principais métodos aplicados para análise e apresentação dos resultados.

3 CARACTERÍSTICAS DO VENTO

Este capítulo define as principais características do vento, padrões de escoamento do vento ao redor das estruturas e efeitos de vizinhança.

De acordo com Blessmann (1995, p. 9), uma definição a origem dos ventos é:

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

3.1 CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA

A camada limite atmosférica de zonas densamente urbanizadas é caracterizada pela presença de obstáculos artificiais ocasionando em um regime de escoamento do vento turbulento. A camada limite turbulenta é a região mais importante da CLA do ponto de vista da aplicação aerodinâmica à engenharia civil, pois é na região turbulenta da CLA que está abrangida grande parte das estruturas construídas (BLESSMANN, 2011).

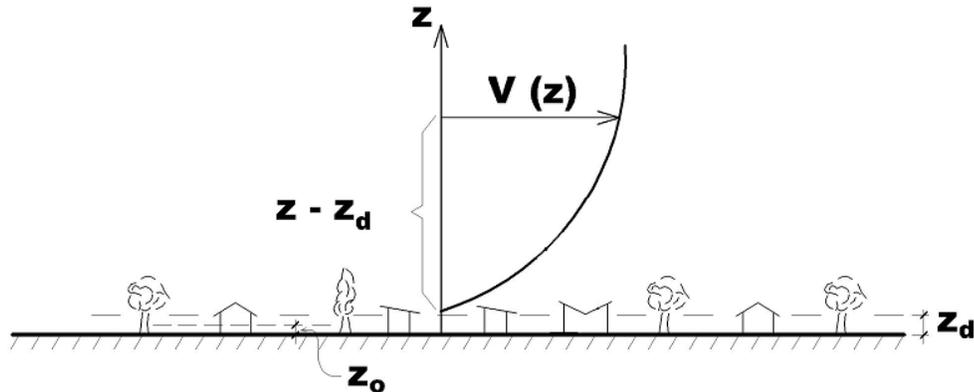
Loredou-Souza et al. (2004, p. 137) define:

A camada limite atmosférica (CLA) é a região da troposfera diretamente afetada pela presença da superfície da Terra e responde a forçantes superficiais com escalas de tempo em torno de uma hora ou menos. Os forçantes incluem arrasto, evaporação e evapotranspiração, transferência de calor, emissão de poluentes e modificações do escoamento induzidas pela topografia. A espessura da CLA corresponde à chamada altura gradiente (z_g). Para ventos fortes, um valor típico de z_g é 2500 m, dependendo da rugosidade do terreno e do fetch, que é a distância a barlavento que o vento tem para “correr” sobre o terreno.

Segundo Blessmann (1995, p. 14) denomina-se camada limite atmosférica a região “na qual a velocidade 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 (chamada rugosidade superficial) e da variação da temperatura na direção vertical”.

A figura 2 apresenta, de forma esquemática, a variação da velocidade média do vento de acordo com a altura na CLA, gerada pelos obstáculos presentes no terreno.

Figura 2 – Perfil de velocidade média do vento



(fonte: adaptado Loredou-Souza et al., 2004)

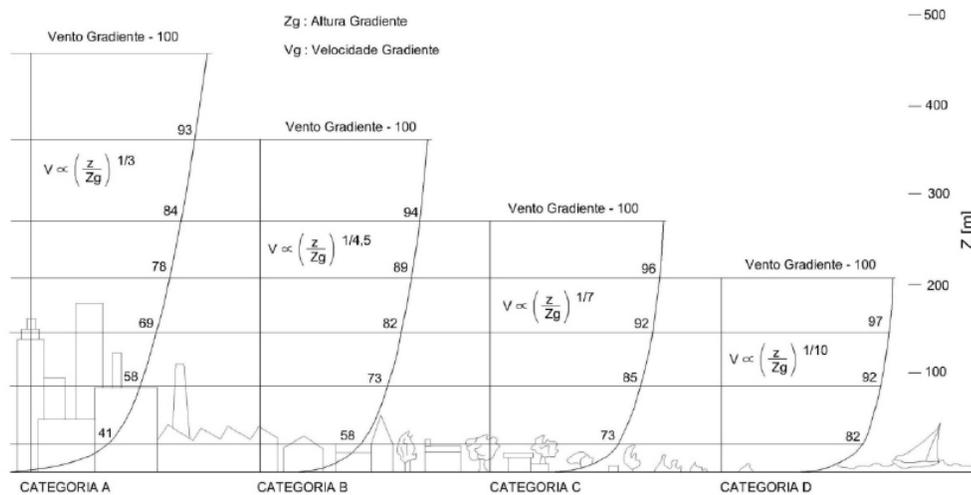
3.2 TURBULÊNCIA

Conhecer a velocidade média do vento e as flutuações em torno dessa média se faz muito conveniente para a engenharia estrutural. Estas flutuações se originam tanto na agitação (turbulência) do escoamento médio causada pela rugosidade natural ou artificial da superfície terrestre como nos processos de convecção causados por gradientes térmicos. Designam-se rajadas às flutuações instantâneas em torno da média. Consequência em sua grande parte da agitação mecânica do ar, estas flutuações geram a formação de um grande número de turbilhões ou redemoinhos. As dimensões dos turbilhões podem ir desde a ordem de milímetros até a escala de grandeza da camada limite atmosférica. A interação entre as estruturas e os turbilhões está relacionada ao tamanho destes redemoinhos. Turbilhões da ordem de grandeza da estrutura ou maiores, de modo que a envolva por completo, acarretam em forças de baixa frequência, que pode estar em fase, ao menos aproximadamente, ao longo de toda a estrutura. Por conseguinte, turbilhões de menores proporções geram violentas rajadas que agem local e desordenadamente (BLESSMANN, 1995).

3.3 VELOCIDADE MÉDIA DO VENTO

O perfil de velocidade média do vento é diretamente afetado pelo tipo de terreno (rugosidade superficial) ao qual o vento precisa transpor, conforme mostrado na figura 3.

Figura 3 – Características dos perfis verticais de velocidades médias do vento de acordo com o terreno (rugosidade superficial – categorias)



(fonte: Vanin, 2011, p. 19)

Para calcular o perfil vertical de velocidade média do vento, duas leis de variação de velocidade com a altura são utilizadas na área de engenharia do vento (Loredo-Souza et al., 2004, p. 139).

De acordo com a lei de Potência, o perfil vertical de velocidade média pode ser calculado pela seguinte fórmula (Loredo-Souza et al., 2004, p. 139):

$$\frac{\bar{V}(z)}{\bar{V}(z_{ref})} = \left(\frac{z - z_d}{z_{ref}} \right)^p \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

$\bar{V}(z)$ = velocidade média na altura z (m/s);

$\bar{V}(z_{ref})$ = velocidade média de referência na altura de referência z_{ref} (m/s);

z_{ref} = altura de referência (m);

z = altura de interesse (m);

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

p = expoente que representa o tipo de terreno (adm).

Embora amplamente utilizada, essa lei de variação apresenta alguns pontos negativos em sua aplicação. Em primeiro lugar é que, por ser válida para qualquer valor de $(z - z_d)$ positivo ou nulo, a equação não reconhece o topo da camada limite atmosférica e a velocidade aumenta indefinidamente. Em segundo lugar, mesmo que, tendo uma boa representação do perfil de velocidades médias, o modelo não possui uma justificativa teórica, o que acarreta, muitas vezes, na atribuição de características não-realísticas ao modelo (Loredo-Souza et al., 2004, p. 139).

Contrariando a lei de potência, a lei logarítmica apresenta um bom ajuste nas camadas rente ao solo e menos eficiente na região superior da CLA (Loredo-Souza et al., 2004, p. 139). A lei logarítmica é expressa pela equação:

$$\frac{\bar{V}(z)}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{z - z_d}{z_0} \right) \quad (\text{equação 2})$$

Onde:

$\bar{V}(z)$ = velocidade média na altura z (m/s);

u_* = velocidade de corte (m/s);

k = constante de Von Kàrmàn, geralmente adotado 0,4 (adm);

z = altura de interesse (m);

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

z_0 = rugosidade aerodinâmica ou altura média da rugosidade do terreno (m).

3.4 SIMULAÇÃO DO VENTO NATURAL

Segundo Davenport e Isyumov (1967 apud Carpeggiani 2004) a correta simulação, em túnel de vento, das principais características do vento natural é pressuposto essencial para aplicações em engenharia civil, sendo que, caso a simulação seja inadequada, os resultados obtidos podem não descrever a realidade.

De modo a se determinar os efeitos que a turbulência gera em modelos ensaiados em tuneis de vento, muitas pesquisas relacionadas ao assunto foram desenvolvidas nos últimos anos com a verificação de que certas formas e proporções apresentam sensibilidade à determinadas características da turbulência, especialmente a intensidade (região entre a velocidade instantânea e a velocidade média), e a macro escala (relativa às dimensões dos turbilhões). A partir de então, se faz necessário reproduzir suas características no túnel de vento (BLESSMANN, 2011).

Gauld e Saykes (1978 apud Blessmann, 2011, p. 110) completa que “os resultados mostraram quão importante a turbulência é e como ela pode influenciar pressões e recolamento do fluxo descolado. Eles confirmam a necessidade de testar modelos arquitetônicos em uma camada limite atmosférica similar à que será encontrada ao vento natural”.

Para simular a estrutura do vento natural em escala apropriada, pode-se cobrir um comprimento considerável do piso do túnel de vento com um material de rugosidade adequada com o objetivo de que, sirva como fonte principal de reprodução de turbulência atmosférica a baixa altitude, em ventos em condições de estabilidade neutra (JENSEN E FRANK, 1963 apud BLESSMANN, 2011). Outro método de simulação das características da camada limite atmosférica é a inserção de obstáculos, geralmente no início da câmara de ensaios a barlavento do modelo, Blessmann (2011, p. 111) cita algum destes elementos:

- a) telas curvas ou telas planas de malha variável: perfil de velocidades médias e turbulência fina;
- b) grelhas de barras horizontais de secção retangular ou circular, variando o espaçamento e/ou a espessura: perfil de velocidades médias e turbulência média;
- c) grelhas de malha quadrada ou retangular, constituídas de barras de secção retangular: turbulência superposta a uma corrente de ar aproximadamente uniforme;

- d) grelha única de malha variável ou diversas grelhas superpostas: perfil de velocidade média e turbulência;
- e) tela uniforme: turbulência fina superposta a uma corrente de ar uniforme;
- f) barras finas metálicas de secção circular, variando o diâmetro e/ou o espaçamento: perfil de velocidade média e turbulência fina;
- g) triângulos de diversas dimensões e proporções, cheios ou vasados, de lados retos ou curvos: perfil de velocidade média e turbulência.

Ainda de acordo com Blessmann (2011, p. 101) uma combinação adequada dos dispositivos citados com cubos distribuídos ao longo do piso do túnel de vento a barlavento do modelo, geram melhores reproduções das características do vento.

3.5 EFEITOS DE VIZINHANÇA

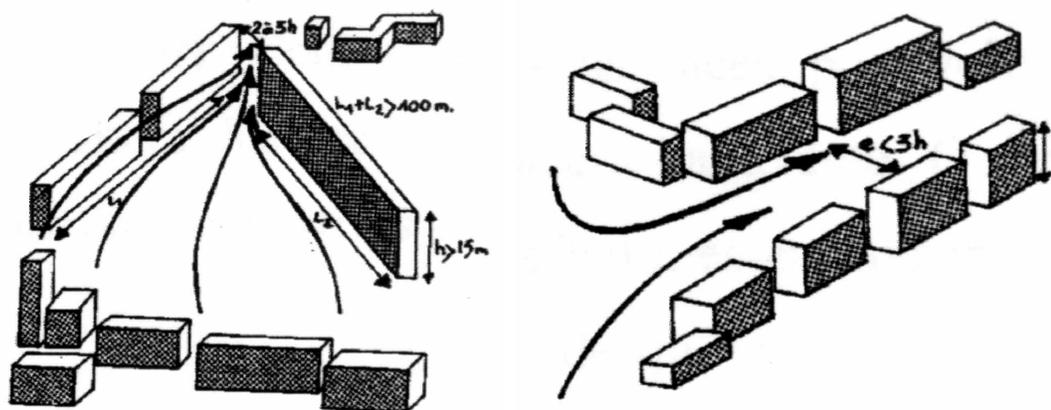
Os coeficientes aerodinâmicos variam muito com as condições de interação entre construções vizinhas. Um obstáculo colocado nas proximidades da construção em estudo pode afetar grandemente o campo aerodinâmico, causando majorações nas pressões, forças e, principalmente, nos momentos torçores (BLESSMANN E RIERA, 1985 apud CARPEGGIANI, 2004, p. 5).

Ainda em seu trabalho, Carpeggiani (2004, p.5) explica que as forças devidas à ação do vento nas edificações são, usualmente, obtidas a partir de coeficientes aerodinâmicos contidos em normas, manuais ou relatórios de pesquisa. Estes coeficientes referem-se a construções isoladas, todavia, obstáculos situados nas proximidades do edifício em estudo podem causar efeitos ponderáveis de interação, modificando sucções, forças e momentos torçores. Devido às inúmeras situações que podem ocorrer, não é possível fornecer, para efeitos normativos, uma indicação que abranja todos os casos. No entanto, a presença de edificações vizinhas pode causar alterações das forças do vento de três modos diferentes, como evidencia a norma brasileira. São eles: o efeito Venturi, a deflexão do vento da direção vertical e pela turbulência da esteira.

3.5.1 Efeito Venturi

Em virtude de suas dimensões, forma e orientação, edificações vizinhas podem causar um afunilamento do vento e, por consequência ocasionando com que o ar flua com mais velocidade, conforme exemplificado na figura 4. Este efeito aparece principalmente em edificações muito próximas, caso em que já foram observados coeficientes de pressão negativos (sucções) excedendo, em módulo, o valor 2,0. Estas pontas de sucção verificaram-se nas paredes confrontantes das duas edificações, próximo à aresta de barlavento (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988 e CARPEGGIANI, 2004).

Figura 4 – Efeito Venturi

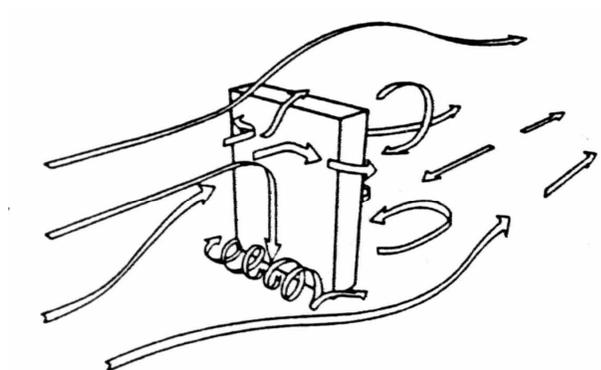


(fonte: Cook, 1990 apud Carpeggiani, 2004, p. 5)

3.5.2 Deflexão do vento na direção vertical

Edificações altas defletem para baixo parte do vento que incide em sua fachada de barlavento (figura 5), aumentando a velocidade em zonas próximas ao solo. Edificações mais baixas, situadas nestas zonas, poderão ter as cargas do vento aumentadas por este efeito, com os coeficientes de forma médios atingindo valores entre -1,5 e -2,0 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988 e CARPEGGIANI, 2004).

Figura 5 – Deflexão do vento na direção vertical

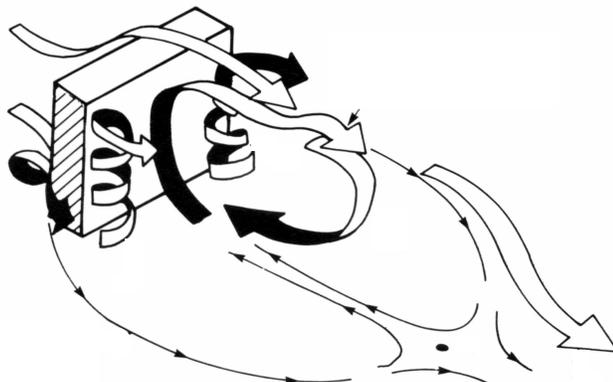


(fonte: Cook, 1990 apud Carpeggiani, 2004, p. 6)

3.5.3 Turbulência da esteira

Por causar efeitos dinâmicos (“efeitos de galope”) significativos e alterações nas pressões, particularmente importantes em edificações com coberturas e painéis de vedação feitos com material leve, a turbulência causada pela esteira de uma edificação a barlavento, perturba sensivelmente uma estrutura localizada a sota-vento (figura 6) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988 e CARPEGGIANI, 2004).

Figura 6 – Características da esteira

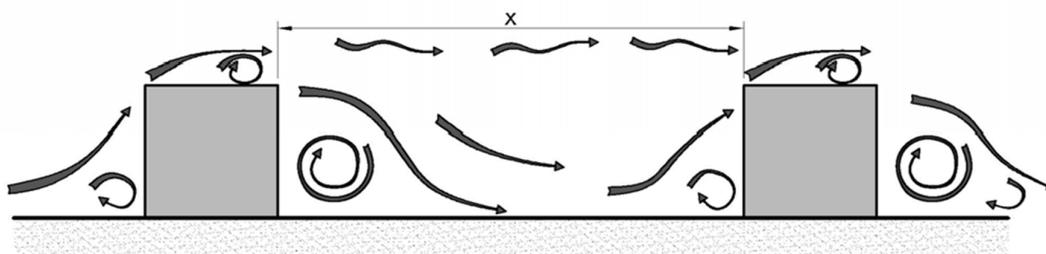


(fonte: Cook, 1990 apud Carpeggiani, 2004, p. 6)

Conforme Cook (1990 apud Carpeggiani 2004, p. 7) três são os regimes de escoamento que podem ser definidos para edificações alinhadas na direção do vento: regime de escoamento de corpo isolado; regime de escoamento deslizante; e regime de escoamento de interferência de esteira, ilustrados nas figuras 7, 8 9, respectivamente:

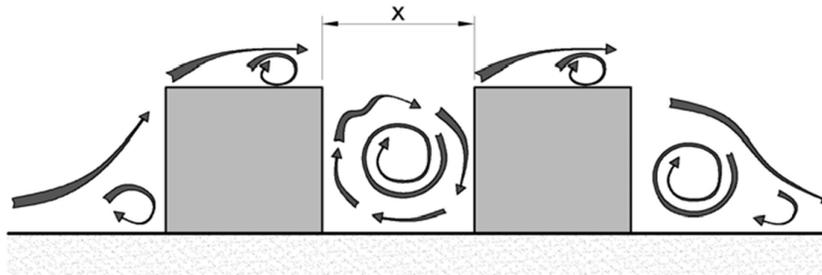
- a) No regime de escoamento de corpo isolado, os edifícios estão suficientemente afastados de tal forma que cada um atua isoladamente. Um vórtice de pé de fachada forma-se em torno de cada edifício individualmente e o escoamento posterior à esteira recola ao solo, antes de atingir o próximo edifício. Neste caso, a distância de separação, x , é maior do que a soma dos comprimentos de separação a barlavento e de recolamento a sota-vento. O efeito de proteção neste caso é menor e as forças em cada edifício individualmente são similares aos valores correspondentes ao edifício isolado.
- b) No regime de escoamento deslizante, os edifícios são suficientemente próximos de tal forma que um vórtice estável pode se formar no espaço entre eles. O escoamento parece saltar ou deslizar por sobre o topo dos edifícios. O efeito de proteção é grande e as forças nos edifícios situados a sota-vento, individualmente, são muito pequenas, pois este edifício encontra-se mergulhado na esteira do primeiro.
- c) O regime de escoamento de interferência de esteira, 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.

Figura 7 – Regime de escoamento de corpo isolado



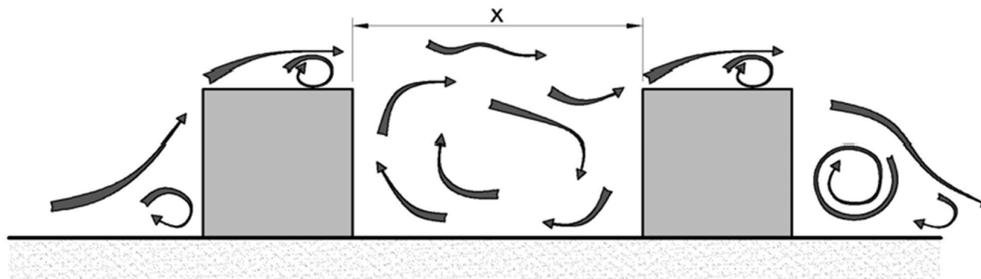
(fonte: Carpeggiani, 2004, p. 7)

Figura 8 – Regime de escoamento deslizante



(fonte: Carpeggiani, 2004, p. 8)

Figura 9 – Regime de escoamento de interferência de esteira



(fonte: Carpeggiani, 2004, p. 8)

3.6 COEFICIENTES DE PRESSÃO

Conforme a NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p.4), “[...] a força do vento depende da diferença de pressão nas faces opostas da parte da edificação em estudo [...]”, por isso existe um coeficiente de pressão na superfície externa e um coeficiente para a superfície interna. Logo, a pressão efetiva é definida por:

$$\Delta p = (c_{pe} - c_{pi})q \quad (\text{equação 3})$$

Onde:

Δp = pressão efetiva (N/m²);

c_{pe} = coeficiente de pressão externa (adm);

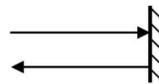
c_{pi} = coeficiente de pressão interna (adm);

q = pressão dinâmica (N/m²).

De acordo com a NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p.4), “valores positivos dos coeficientes de pressão externa ou interna correspondem a sobrepressões, e valores negativos correspondem a sucções”, conforme mostrado na figura 10:

Figura 10 – Convenção de sinais de sucção e sobrepressão

- coeficientes positivos: sobrepressão (+)
- coeficientes negativos: sucção (-)



(fonte: Loredo-Souza, 2011)

3.7 FATOR DE VIZINHANÇA

Em seu Anexo G, a NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p.58), define as diretrizes para a determinação do fator de vizinhança FV , que pode majorar em até 30% os coeficientes aerodinâmicos.

$$FV = \frac{C \text{ na edificação com vizinhança}}{C \text{ na edificação isolada}} \quad (\text{equação 4})$$

Onde:

FV = fator de efeito de vizinhança (adm);

C = coeficiente aerodinâmico em estudo (C_e , c_{pe} médio, C_a) (adm).

A NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p.58), faz uma indicação aproximada da alteração que os coeficientes aerodinâmicos podem sofrer devido ao efeito de vizinhança. Para isso a Associação Brasileira de Normas Técnicas (1988, p. 58) define os seguintes parâmetros:

s = 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 1×1 e 4×1).

d^* = a menor das duas dimensões:

- lado menor b ;

- semidiagonal $\frac{1}{2}\sqrt{a^2 + b^2}$

A NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p.58), divide o efeito de vizinhança em duas regiões da edificação, que são as paredes confrontantes, paralelas ao sentido de escoamento do vento e a cobertura. Para o primeiro caso de paredes confrontantes ela apresenta as seguintes condições:

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

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

Para ações na cobertura os valores são:

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

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

Em ambos os casos, para valores intermediários de s/d^* , o fator FV deve ser interpolado linearmente.

3.8 FORÇAS DEVIDAS AO VENTO

A NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 5) define a força global atuante na edificação devido a ação do vento pela equação:

$$F = c_f \times q \times A \quad (\text{equação 5})$$

Onde:

F = força global exercida pelo vento (N);

c_f = coeficiente de força, especificado em cada caso (adm);

q = pressão dinâmica (N/m²);

A = área de referência, especificada em cada caso (m²).

A força atuante na direção do vento é definida como força de arrasto, determinada pela equação 6.

$$F_a = c_a \times q \times A_e \quad (\text{equação 6})$$

Onde:

F_a = força de arrasto (N);

c_a = coeficiente de arrasto (adm);

q = pressão dinâmica (N/m²);

A = 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 pode ser obtido através de ábacos presentes na NBR 6123, que os define em edificações paralelepípedicas e os separa em ventos de baixa e alta turbulência.

Através da equação 7, pode-se calcular a pressão dinâmica q .

$$q = 0,613 \times V_k^2 \quad (\text{equação 7})$$

Onde:

V_k = velocidade característica do vento (m/s).

A velocidade característica do vento V_k é definida por:

$$V_k = V_0 \times S_1 \times S_2 \times S_3 \quad (\text{equação 8})$$

Onde:

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

S_1 = fator topográfico (adm);

S_2 = fator que considera o terreno, a velocidade do vento e as dimensões da edificação (adm);

S_3 = fator estatístico (adm).

A NBR 6123/1988 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 5) define que “A velocidade básica do vento, V_0 , é a velocidade de uma rajada de 3 segundos, excedida em média uma vez em 50 anos, a 10 metros acima do terreno, em campo aberto e plano”. Para determinação da velocidade básica, NBR 6123 também apresenta um mapa de isopletras, mostrado na figura 11, que abrange todo território brasileiro.

Para cálculo do fator S_2 , a NBR 6123/1988 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 8) classifica a rugosidade do terreno em 5 categorias distintas:

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.

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. 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.

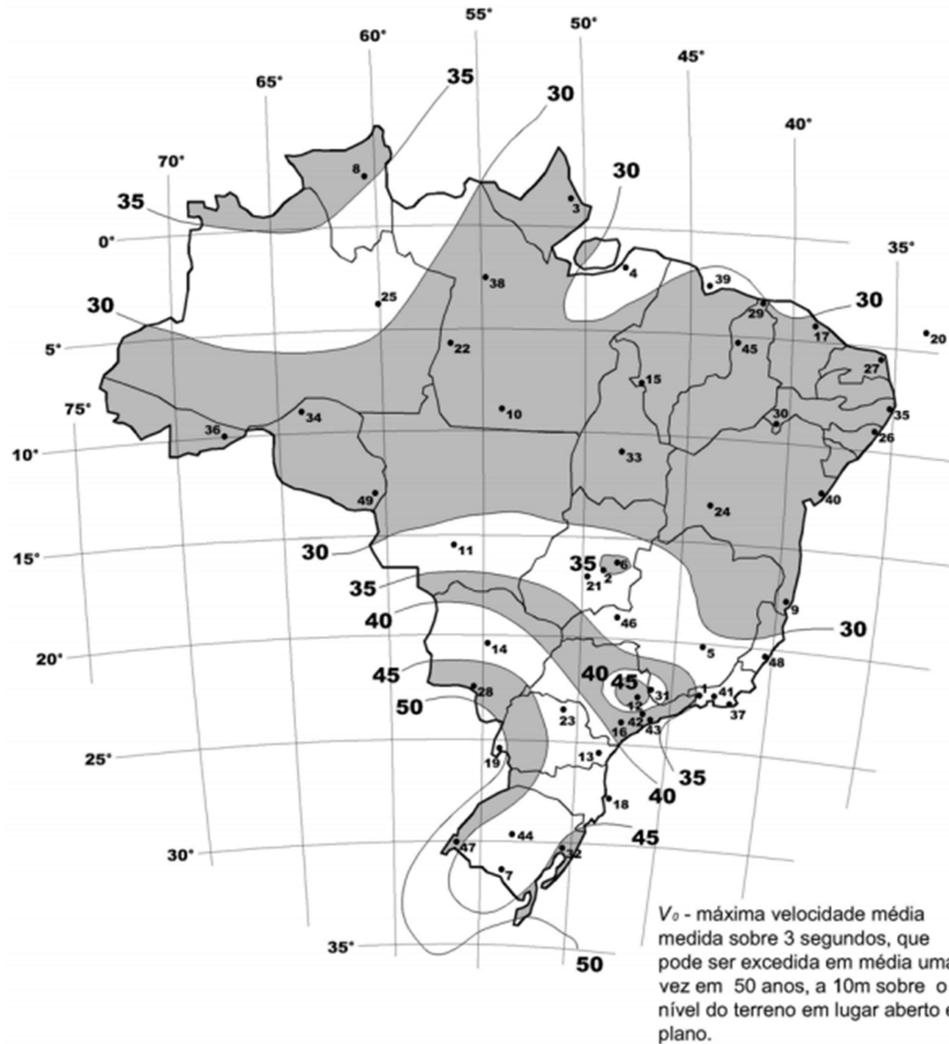
Categoria IV: Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada. Exemplos:

- 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. Exemplos:

- florestas com árvores altas, de copas isoladas;
- centros de grandes cidades;
- complexos industriais bem desenvolvidos.

Os fatores S_1 , S_2 e S_3 são determinados a partir de tabelas ou fórmulas que se encontram na NBR 6123.

Figura 11 – Mapa de isopletas da velocidade básica V_0 

(fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1988, p. 6)

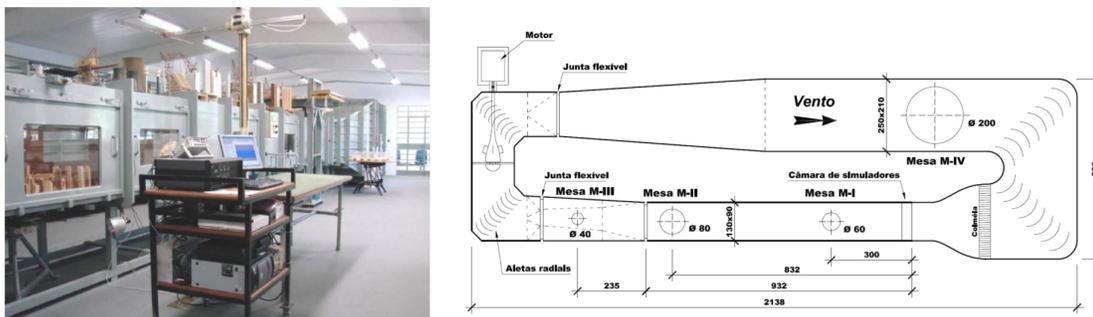
4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo será explicado o uso do túnel de vento da UFRGS como ferramenta de pesquisa e o memorial para cálculo dos parâmetros necessários para a correta utilização do equipamento.

4.1 TÚNEL DE VENTO PROF. JOAQUIM BLESSMANN

Em operação desde 1972, o túnel de vento prof. Joaquim Blessmann da Universidade Federal do Rio Grande do Sul permite desenvolver estudos de efeitos estáticos e dinâmicos sobre construções civis em geral, além da determinação de características de ventos simulados e outras pesquisas (BLESSMANN, 2011, p. 112). Mostrado na figura 12, trata-se de um túnel de vento de circuito fechado com relação comprimento / altura na câmara principal de ensaio superior a 10, e dimensões de 1,30m x 0,90m x 9,32m (largura x altura x comprimento). A velocidade do vento nesta câmara, com perfil de vento uniforme e suave ultrapassa 45m/s. As hélices do ventilador são acionadas por um motor elétrico de 100HP com giro de aproximadamente 1800rpm e controlado por um inversor de frequência, que permite o ajuste de qualquer velocidade do fluxo de ar que se faça necessária.

Figura 12 – Túnel de vento prof. Joaquim Blessmann



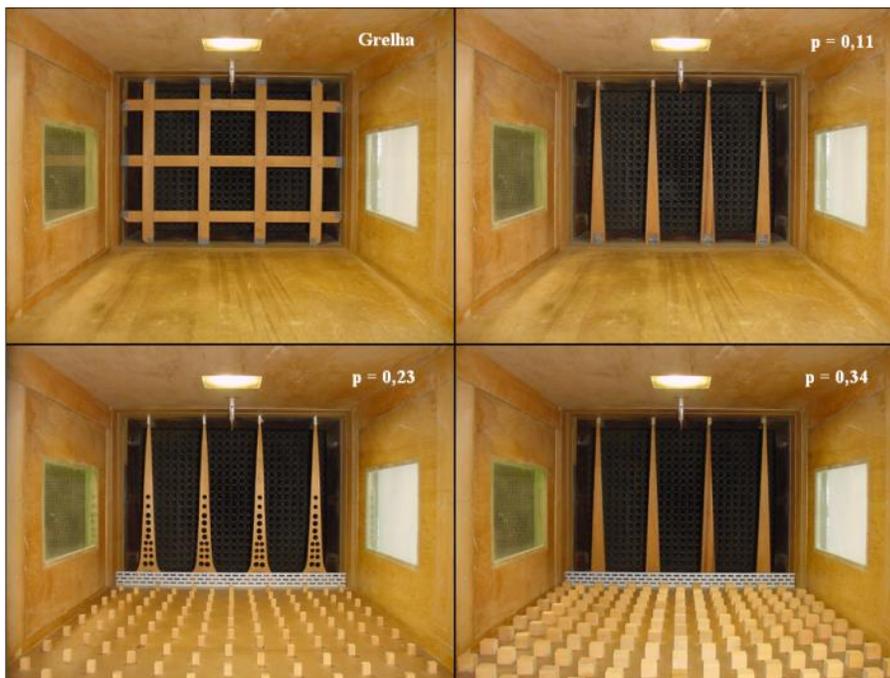
(fonte: adaptado Loredou-Souza., 2014)

Atualmente, o túnel de vento possui 4 mesas giratórias de ensaio cada uma com uma aplicação específica descrita por Blessmann (2011, p. 112 e 113):

- a) mesa M-I: os ensaios do tipo aeronáutico são feitos no piso do túnel com uma camada limite de pequena espessura e fluxo de ar de baixa turbulência. Em ensaios para a construção civil o fluxo turbulento é produzido com a inserção de geradores de turbulência posicionados na câmara de simuladores;
- b) mesa M-II: os ensaios do tipo aeronáutico são efetuados no eixo do túnel. Nos ensaios para a construção civil a turbulência é gerada por blocos colocados no piso, por geradores de turbulência na câmara de simuladores e (ou) por jatos transversais;
- c) mesa M-III: mesa de rigidez elevada posicionada no primeiro divergente do túnel. Esta mesa é dedicada a ensaios de ações dinâmicas em estruturas de grande alteamento;
- d) mesa M-IV: mesa situada no retorno do túnel. Utilizada em ensaios de dissipação de gases e atmosferas com contaminantes particulados, pontes, efeitos de interação, etc.

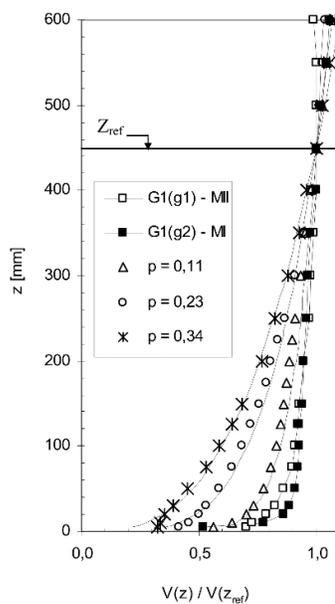
Para representação de um determinado perfil de vento, um conjunto de dispositivos é distribuído ao longo do piso e no início da câmara de ensaio como mostrado na figura 13, indicando os dispositivos requeridos para geração de quatro diferentes perfis de vento. A figura 14 mostra os perfis de velocidade média reproduzidos no túnel de vento, correspondentes a lei potencial com expoentes $p = 0,11, 0,23$ e $0,34$ (equação 1), além do perfil gerado por uma grelha nas mesas I e II (Loredou-Souza et al., 2004, p. 150).

Figura 13 – Dispositivos de geração das diferentes camadas limites do túnel de vento
Prof. Joaquim Blessmann



(fonte: Loredo-Souza et al., 2004, p. 150)

Figura 14 – Perfil de velocidades médias



(fonte: Loredo-Souza et al., 2004, p. 150)

4.2 CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ARRASTO A PARTIR DE MEDIÇÕES EM TÚNEL DE VENTO

Nas medições feitas nos ensaios são usados transdutores elétricos de pressão que enviam para o computador uma serie temporal de pressão medida em mmH₂O. Durante o tempo de aquisição que é de 16 segundos, os transdutores registram 8192 amostras para cada tomada de pressão. A partir dessas medidas, é possível calcular os coeficientes de pressão média (\bar{c}_p), rms (\tilde{c}_p), máximo (\hat{c}_p) e mínimo (\check{c}_p), através das equações a seguir:

$$\bar{c}_p = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt}{q} \quad (\text{equação 9})$$

$$\tilde{c}_p = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (p(t) - \bar{p})^2 dt}}{q} \quad (\text{equação 10})$$

$$\hat{c}_p = \frac{p_{max}}{q} \quad (\text{equação 11})$$

$$\check{c}_p = \frac{p_{min}}{q} \quad (\text{equação 12})$$

Onde:

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

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

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

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

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

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

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

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

t = tempo (s);

T = intervalo de tempo de amostragem (s);

q = pressão dinâmica de referência (N/m²).

$$q = \frac{1}{2} \rho \bar{V}^2 \quad (\text{equação 13})$$

Onde:

\bar{V} = velocidade média de referência (m/s);

ρ = massa específica do ar (kg/m³).

Carpeggiani (2004, p. 22) define a equação 14 como método para se calcular o coeficiente de forma externo C a partir do \bar{c}_p .

$$C = \frac{1}{A} \int_A \bar{c}_p dA \quad (\text{equação 14})$$

Onde:

C = coeficiente de forma externo (adm);

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

A = área da superfície (m^2).

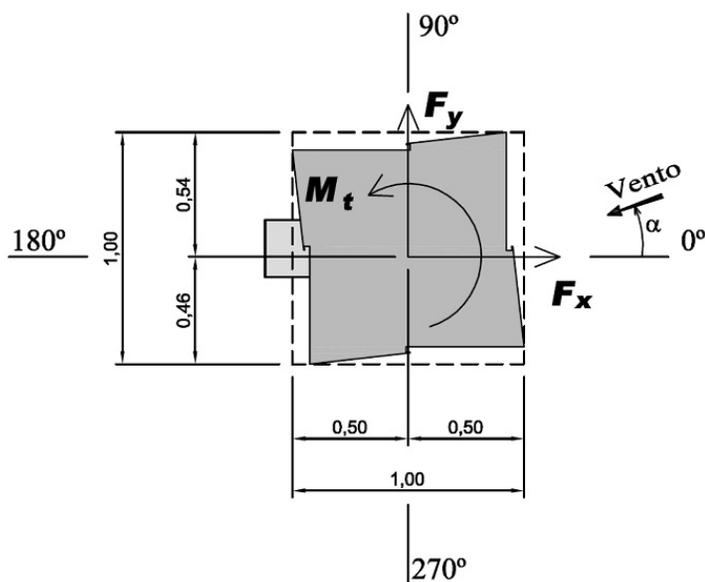
5 EDIFÍCIOS ESTUDADOS

Os edifícios escolhidos para a realização deste trabalho serão apresentados a seguir. Foram selecionados projetos com ensaios realizados nas configurações isoladas e com vizinhança, esta última caracteriza o entorno em que o prédio está inserido.

5.1 EDIFÍCIO A

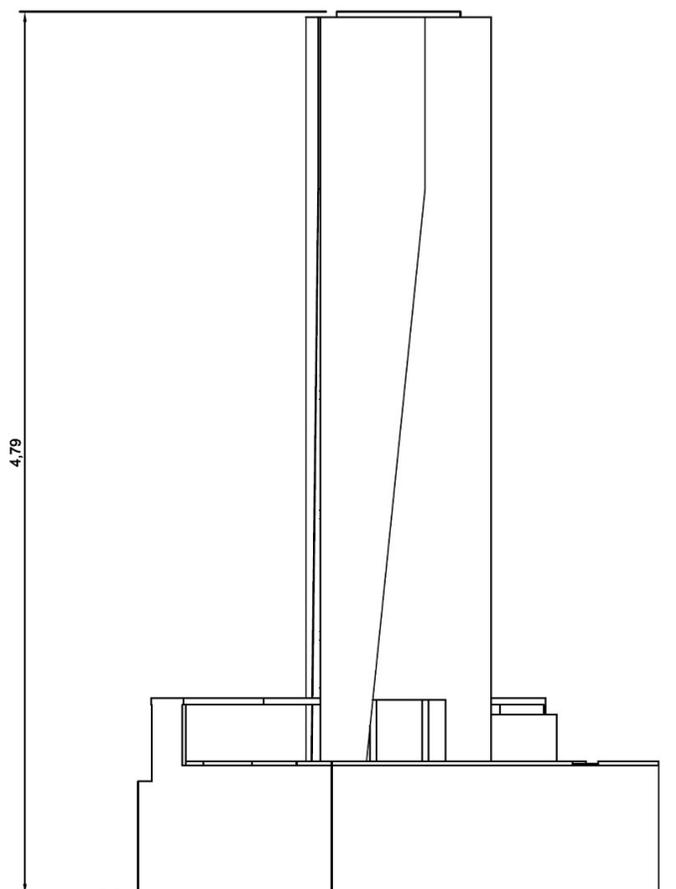
O edifício A é um empreendimento residencial no estado de Minas Gerais. A figura 15 apresenta a seção transversal do Edifício A, suas dimensões (relativas) de referência utilizadas para os cálculos das recomposições das forças, a referência dos eixos para aplicação das forças ortogonais F_x e F_y . A figura 16 apresenta a fachada frontal Edifício A.

Figura 15 – Referência para aplicação das forças ortogonais F_x e F_y e dimensões de referência Edifício A (dimensões relativas)



(fonte: Loredo-Souza, 2011)

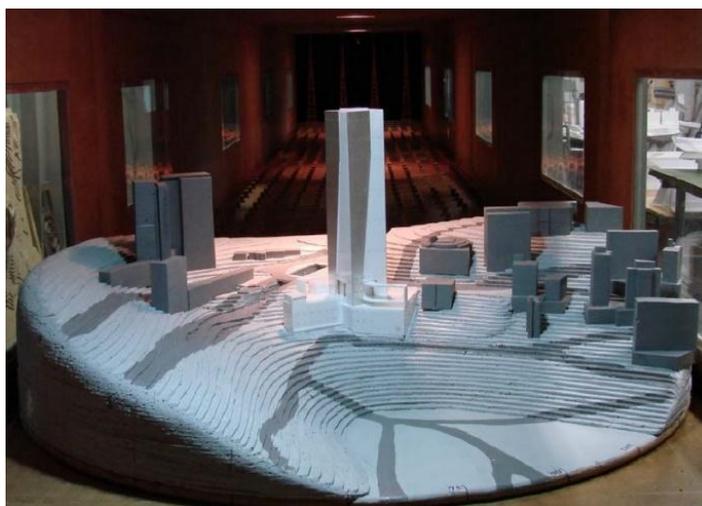
Figura 16 – Representação da fachada frontal e altura de referência
Edifício A (dimensões em relativas)



(fonte: Loredo-Souza, 2011)

O Edifício A está inserido em uma região de média densidade, com vizinhos próximos que chegam a metade de sua altura e topografia muito acentuada. A figura 17 apresenta o modelo reduzido do Edifício A e sua vizinhança dentro do túnel de vento.

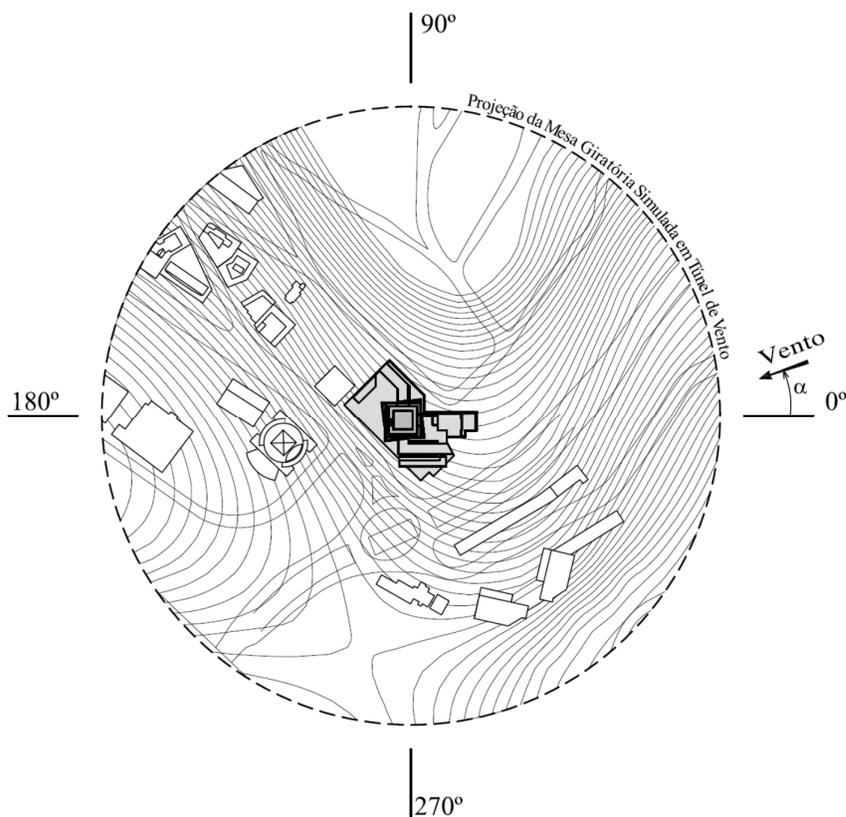
Figura 17 – Modelo reduzido Edifício A no túnel de vento.



(fonte: Loredo-Souza, 2011)

O modelo reduzido do Edifício A foi confeccionado em escala 1/400 e instrumentado com 382 tomadas de pressão distribuídas ao longo do modelo. O ângulo de incidência do vento foi variado a cada 15° , para isto é utilizada nos ensaios uma mesa giratória com o modelo estudado posicionado em seu centro. A figura 18 apresenta a projeção da mesa giratória, a referência de ângulos usadas nos ensaios e o mapa da vizinhança do Edifício A.

Figura 18 – Referência de ângulos de incidência do vento e mapa de vizinhança.

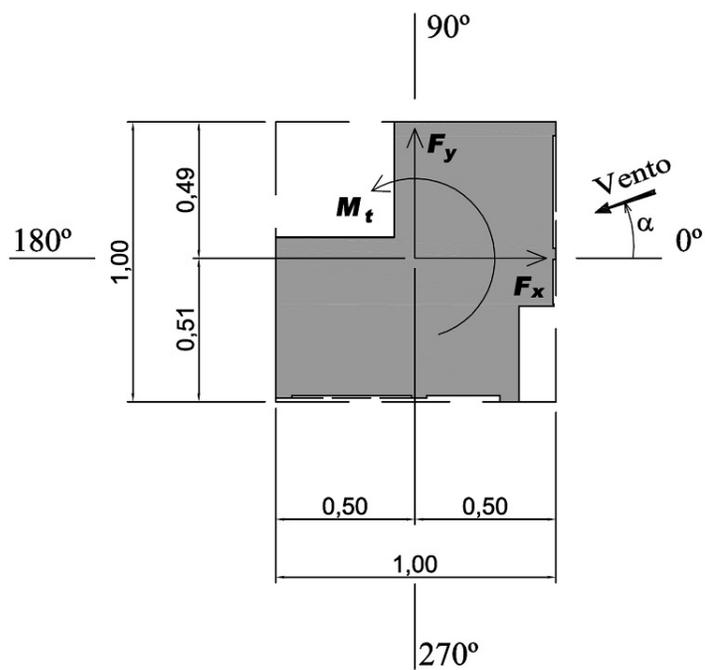


(fonte: Loredo-Souza, 2011)

5.2 EDIFÍCIO B

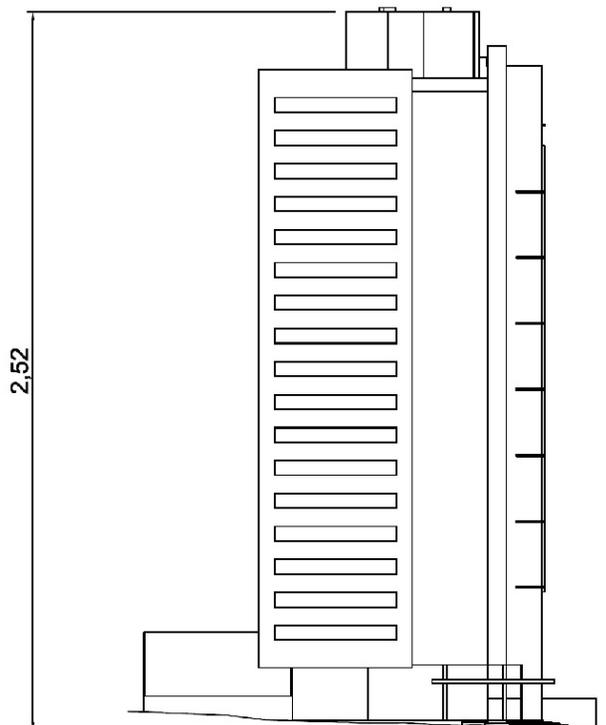
O edifício B está localizado no estado do Paraná e é constituído por uma torre. A figura 19 apresenta a seção transversal do edifício B, suas medidas de referência e a referência dos eixos usados para aplicação das forças F_x e F_y . A fachada frontal do prédio e a indicação da altura de referência são vistos na figura 20.

Figura 19 – Referência para aplicação das forças ortogonais F_x e F_y e dimensões de referência Edifício B (dimensões relativas)



(fonte: Loredou-Souza, 2014)

Figura 20 – Representação da fachada frontal e altura de referência Edifício B (dimensões relativas)



(fonte: Loredo-Souza, 2014)

O modelo reduzido do projeto posicionado no interior do túnel de vento é apresentado na figura 21.

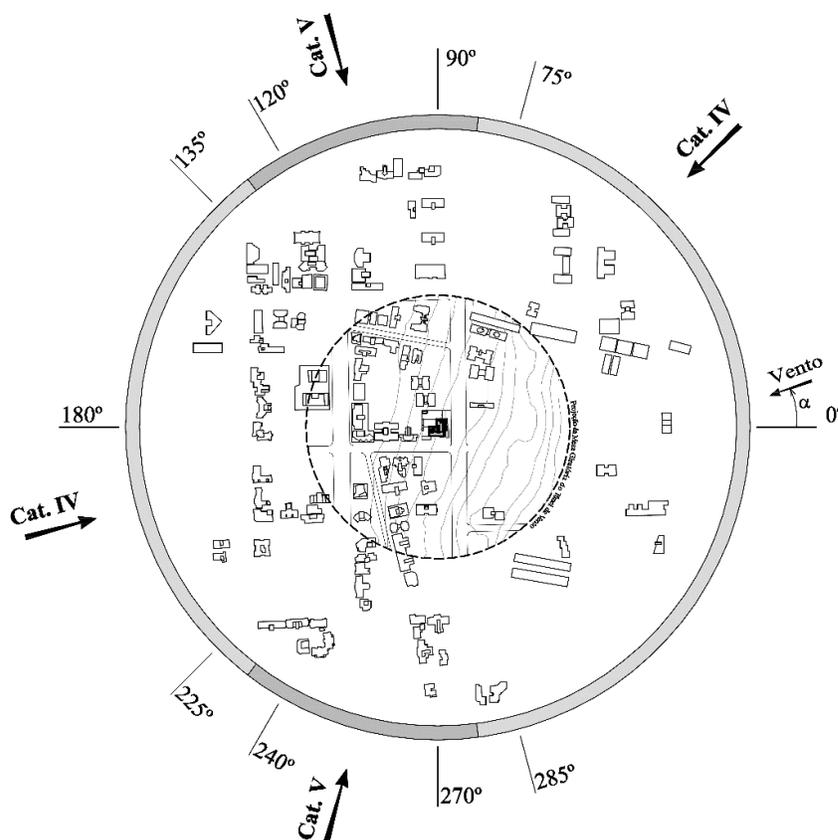
Figura 21 – Edifício B no túnel de vento



(fonte: Loredo-Souza, 2014)

Confeccionado em escala 1/300, o modelo reduzido do Edifício B conta com 316 tomadas de pressão. Foram ensaiados 24 ângulos de incidência de vento a cada 15°. Inserido em uma zona de transição entre média e alta densidade, onde são encontrados prédios com a mesma média de altura do edifício estudado. A figura 22 apresenta a projeção da mesa giratória, com o edifício do Edifício B localizado em seu centro, a mesa auxiliar, referência de ângulos e mapa de vizinhança.

Figura 22 – Referência de ângulos de incidência do vento e mapa de vizinhança Edifício B

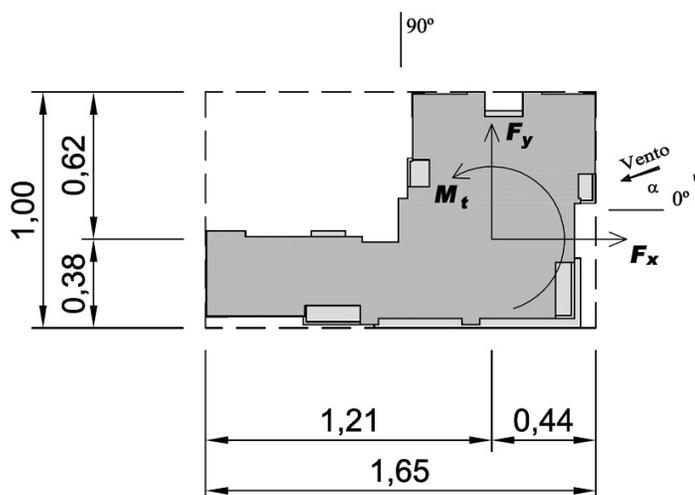


(fonte: Loredo-Souza, 2014)

5.3 EDIFÍCIO C

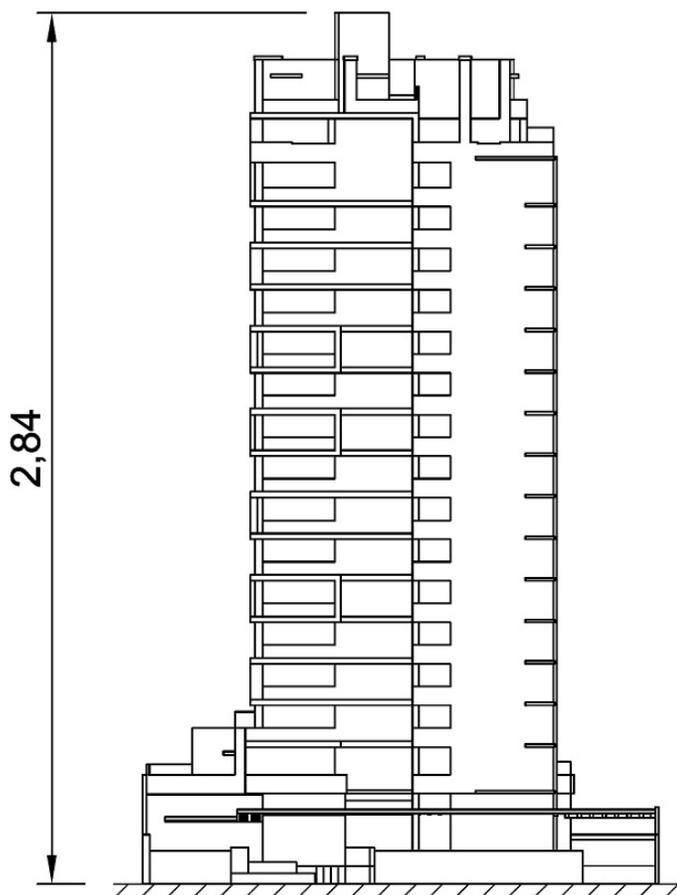
Localizado no estado do Paraná, o Edifício C conta com uma torre residencial de 18 pavimentos. Possui altura relativa é 2,85 vezes maior que a medida do menor lado em planta e dimensões de referência são na proporção de 1:1,65, conforme mostrado na figura 23 e 24.

Figura 23 – Referência para aplicação das forças ortogonais F_x e F_y e dimensões de referência Edifício C (dimensões relativas)



(fonte: Loredo-Souza, 2013(b))

Figura 24 – Representação da fachada frontal e altura de referência Edifício C (dimensões relativas)



(fonte: Loredou-Souza, 2013(b))

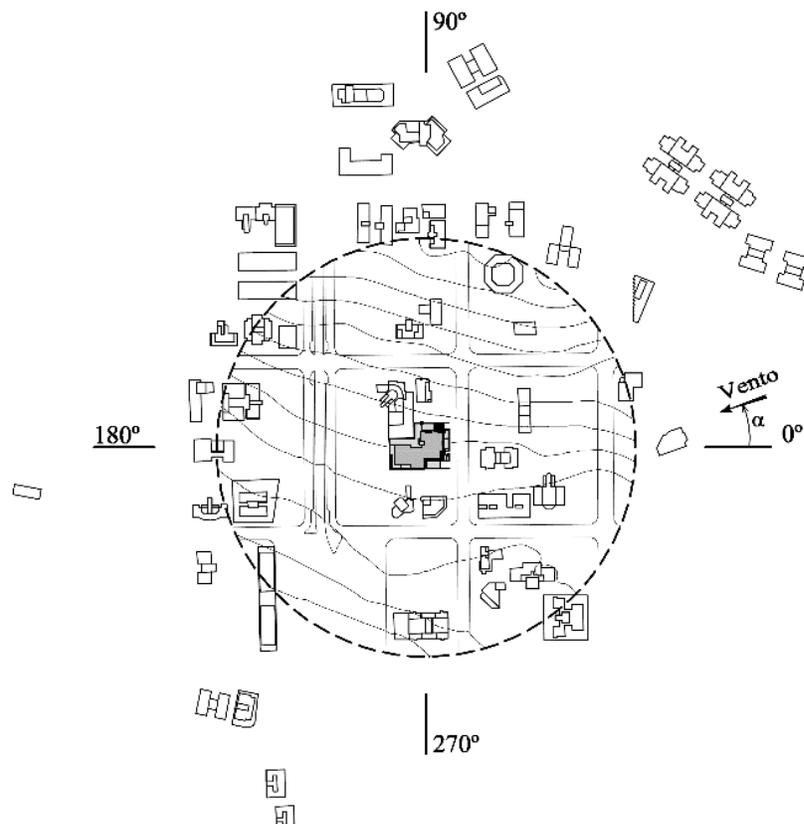
O modelo reduzido foi elaborado na escala 1/250 e instrumentado com 338 tomadas de pressão dispostas ao longo prédio. As pressões foram medidas para 24 ângulos de incidência do vento. Inserido em uma vizinhança de média/alta densidade, o Edifício C possui vizinhos que ultrapassam sua altura. O modelo reduzido do projeto localizado dentro do túnel de vento e a projeção da mesa giratória com os ângulos e mapa de vizinhança são mostrados, respectivamente, nas figuras 25 e 26.

Figura 25 – Edifício C situado no túnel de vento



(fonte: Loredo-Souza, 2013(b))

Figura 26 – Referência de ângulos de incidência do vento e mapa de vizinhança Edifício C

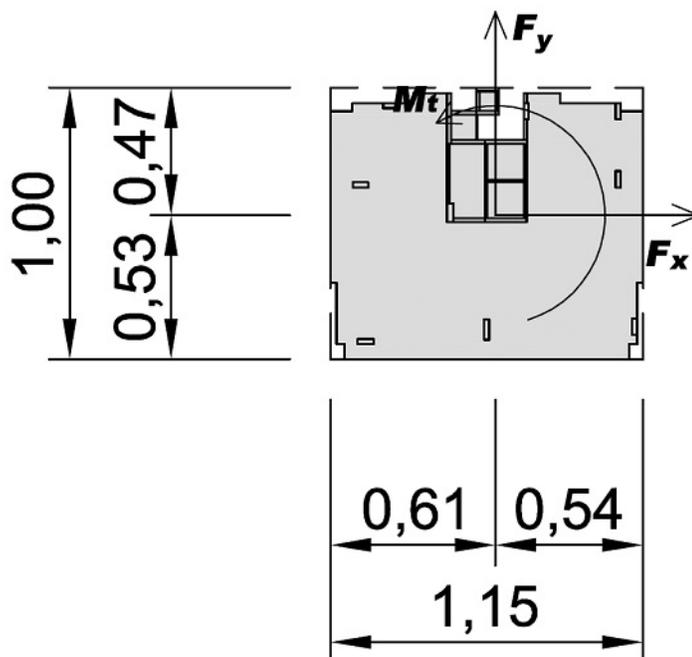


(fonte: Loredo-Souza, 2013(b))

5.4 EDIFÍCIO D

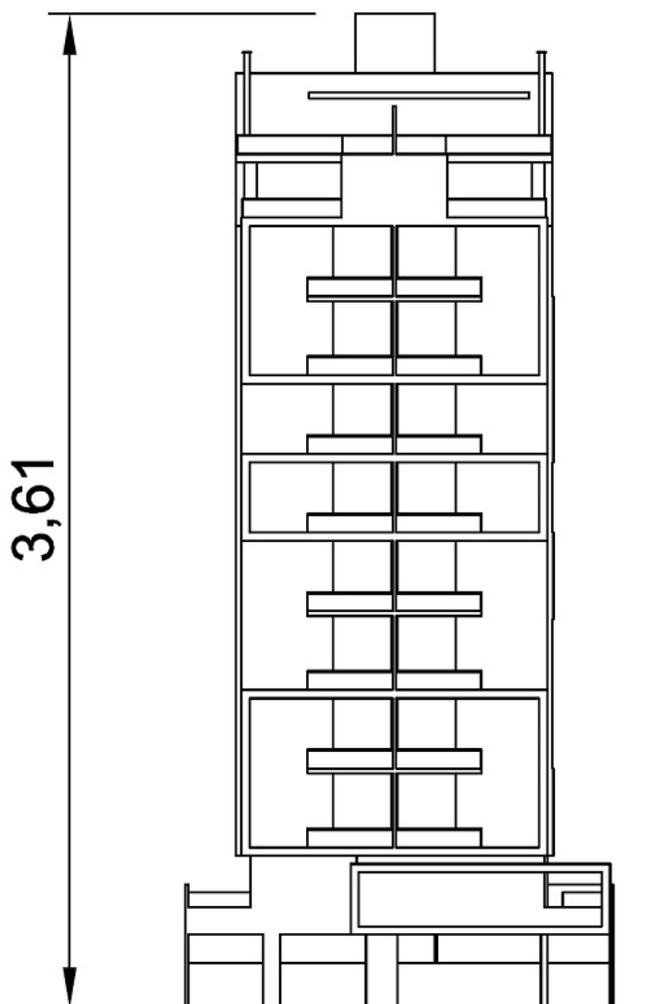
O Edifício D dimensões de referência na proporção de 1:1,15, como mostrado nas figuras 27 e 28. Edificado no estado do Paraná, o empreendimento é constituído por uma torre residencial de 10 andares.

Figura 27 – Referência para aplicação das forças ortogonais F_x e F_y e dimensões de referência Edifício D (dimensões relativas)



(fonte: Loredou-Souza, 2013(a))

Figura 28 – Representação da fachada frontal e altura de referência
Edifício D (dimensões relativas)



(fonte: Loredou-Souza, 2013(a))

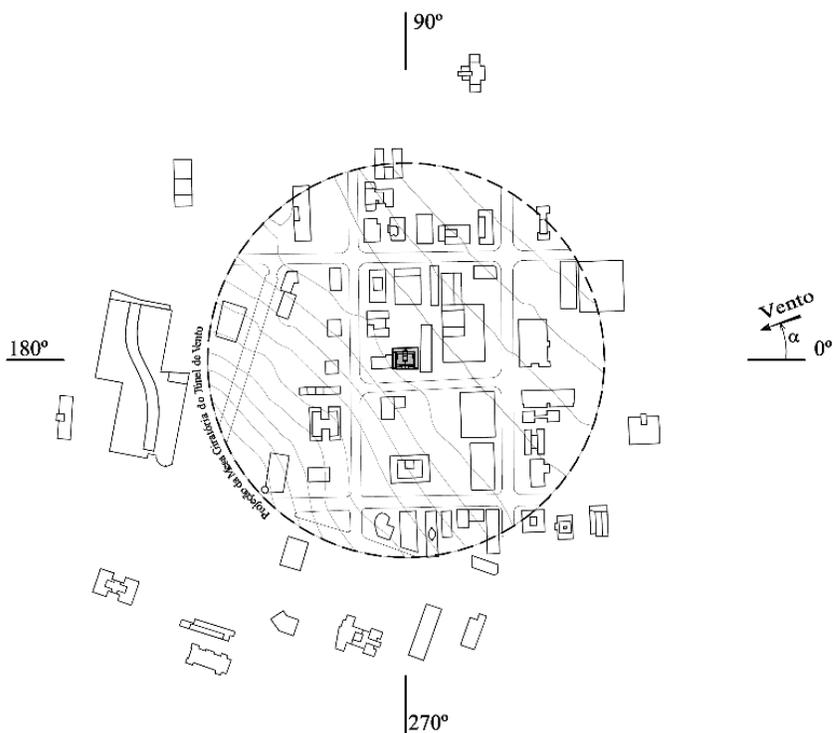
O modelo reduzido do Edifício D foi elaborado na escala 1/250 e totaliza 243 tomadas de pressão distribuídas pelas suas fachadas. Suas medições foram feitas para 24 ângulos de incidência do vento que variou a cada 15°. A vizinhança do projeto constitui uma zona densa, com grande parte dos vizinhos superando a altura do edifício em estudo. A figura 29 apresenta o modelo reduzido junto com sua vizinhança, localizado no interior do túnel de vento. A referência de ângulos utilizadas nos ensaios bem como seu mapa de vizinhança e projeção da mesa giratória com o modelo posicionado no centro são mostrados na figura 34.

Figura 29 – Edifício D situado interior do túnel de vento



(fonte: Loredo-Souza, 2013(a))

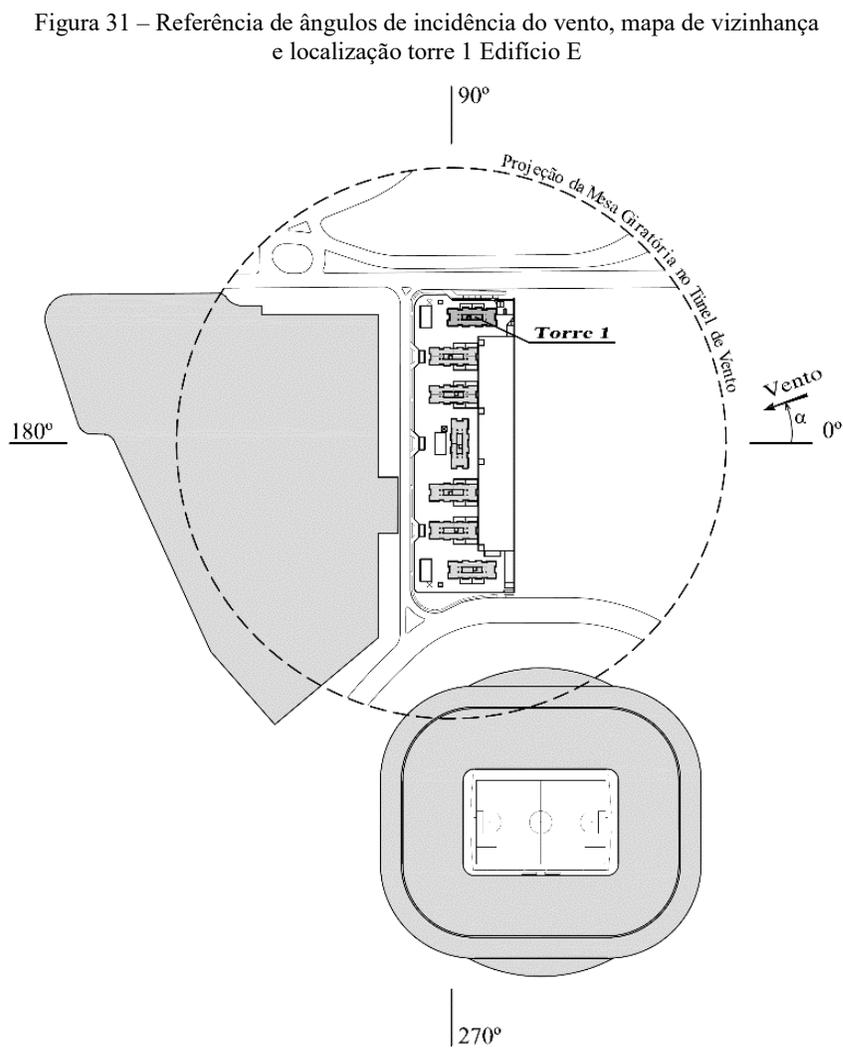
Figura 30 – Referência de ângulos de incidência do vento e mapa de vizinhança Edifício D



(fonte: Loredo-Souza, 2013(a))

5.5 EDIFÍCIO E

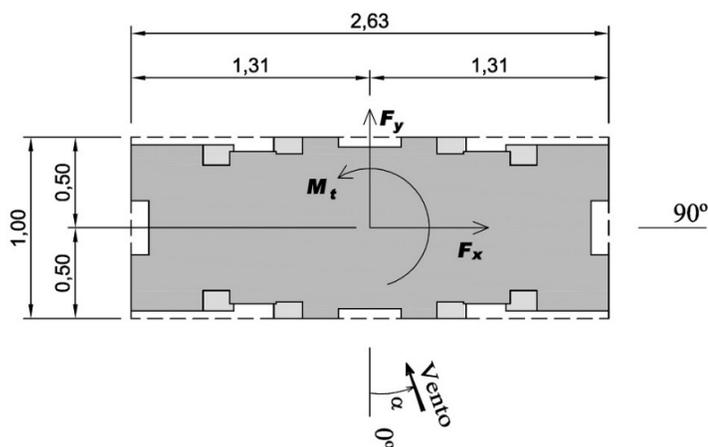
O Edifício E, construído no estado do Rio Grande do Sul e é constituído por sete torres residenciais, no entanto, neste trabalho foi estudado os efeitos aerodinâmicos atuantes na torre 1, a localização do condomínio e referência de ângulos utilizadas nos ensaios encontram-se na figura 31.



(fonte: Loredo-Souza, 2012)

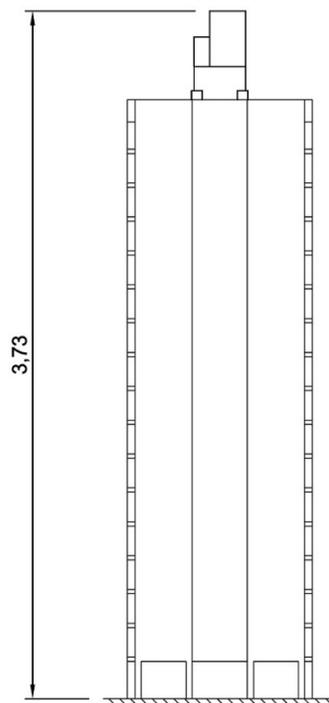
A torre 1 do Edifício E conta com 18 pavimentos, suas dimensões de referência são proporcionalmente 1:2,59, como apresentado nas figuras 32 e 33. O modelo reduzido do projeto foi executado na escala 1/350 e contempla 228 tomadas de pressão alojadas em suas fachadas.

Figura 32 – Referência para aplicação das forças ortogonais F_x e F_y e dimensões de referência Edifício E (dimensões relativas)



(fonte: Loredo-Souza, 2012)

Figura 33 – Representação da fachada frontal e altura de referência
Edifício E (dimensões relativas)



(fonte: Loredo-Souza, 2012)

A figura 34 apresenta o modelo do Edifício E localizado no interior do túnel de vento.

Figura 34 – Modelo do Edifício E no interior do túnel de vento



(fonte: Loredo-Souza, 2012)

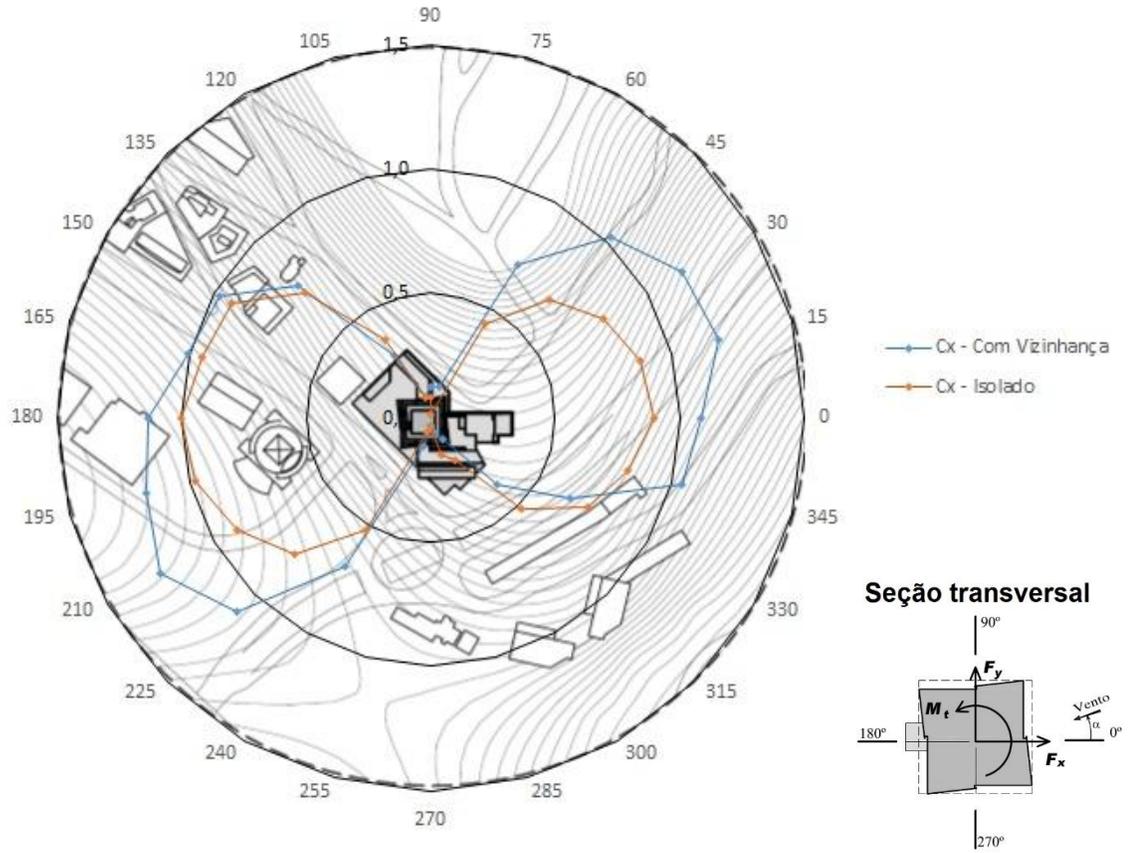
6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados no túnel de vento Prof^o Joaquim Blessmann de cada projeto fonte de estudo deste trabalho. Estes resultados serão apresentados separadamente por empreendimento estudado. Os resultados serão apresentados de forma gráfica. Tabelas com os valores dos coeficientes de força globais são apresentadas no anexo A.

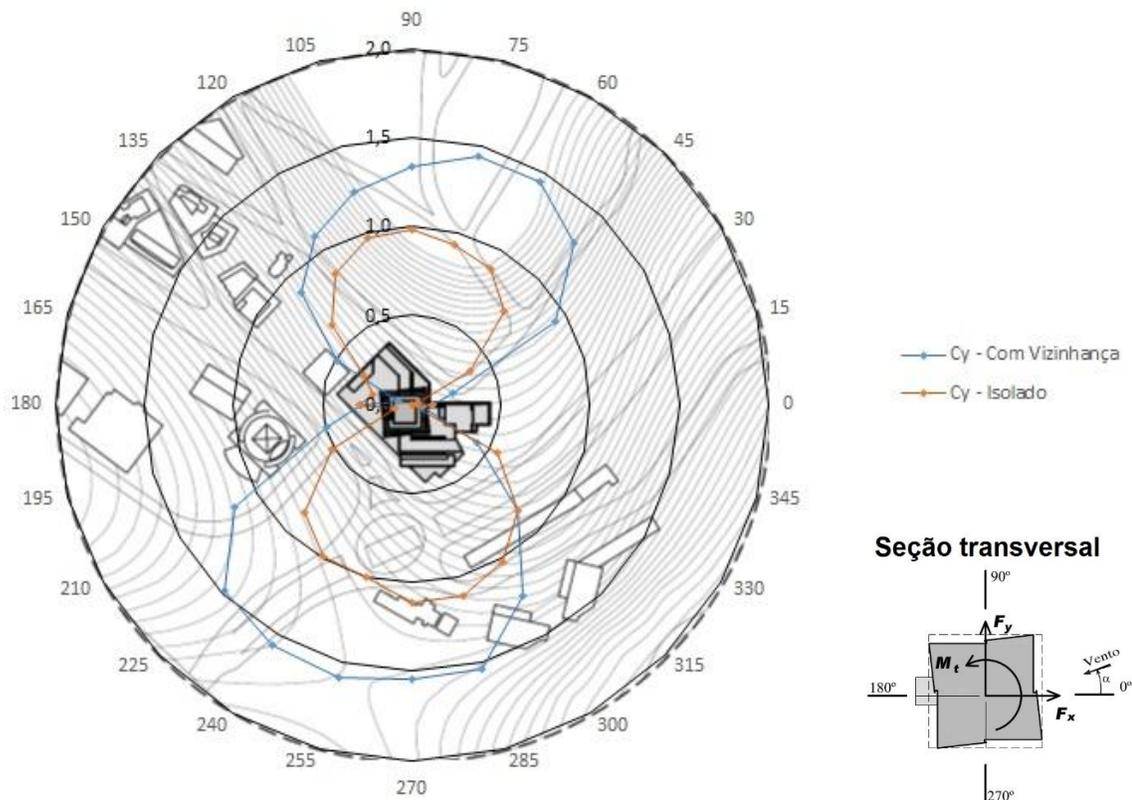
6.1 EDIFÍCIO A

As condições de rugosidade do terreno em torno ao Edifício A compreendem as categorias III e IV segundo a NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 8). Desta maneira, foi utilizado nas duas configurações ensaiadas, um vento com perfil potencial de velocidades médias de expoente p igual a 0,23.

A partir dos ensaios foram obtidos os coeficientes de força em duas direções C_x e C_y para as configurações com vizinhança e isolado. Os resultados obtidos nos ensaios são apresentados na figura 35 e 36, respectivamente. Os valores estão representados em módulo, de forma a simplificar sua visualização.

Figura 35 – Valores de C_x Edifício A

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 36 – Valores de C_y Edifício A

(fonte: elaborado pelo autor)

Valores representativos pelo ensaio foram admitidos a partir do maior registro dos coeficientes de força globais para cada direção estudada, na configuração com vizinhança.

As figuras 35 e 36 mostram que em ambas as direções analisadas, os coeficientes de força globais sofreram acréscimo em virtude da influência da vizinhança no empreendimento.

Para coeficientes C_x , o maior valor, para a configuração com vizinhança, foi observado no ângulo de incidência do vento de 210°, que registrou $C_x = 1,25$. No ensaio realizado para a configuração do modelo isolado, o valor adquirido para C_x foi de 0,90, no mesmo ângulo de incidência de 210°. Utilizando estes valores de C_x como representativos pelo ensaio (em função do eixo “x”), o fator de vizinhança, sendo a relação entre o coeficiente do ensaio com vizinhança pelo coeficiente do ensaio isolado. Foi calculado o $FV_x = 1,4$.

Na direção y, no ângulo 255° foi observado o maior valor de C_y , igual a 1,59 com vizinhança, e igual a 1,00 no ensaio isolado, resultando em um fator de vizinhança da ordem de 1,7. A tabela 1 apresenta os valores representativos pelo ensaio, os ângulos em que ocorrem e o fator de vizinhança calculado.

Tabela 1 – Valores representativos de C_x e C_y , ângulos de ocorrência e fator de vizinhança Edifício A

	Coeficientes		ângulo de ocorrência	FV
	Com Vizinhança	Isolado		
C_x	1,25	0,90	210°	1,4
C_y	1,48	0,85	255°	1,7

(fonte: elaborado pelo autor)

A partir do método de cálculo indicado pela NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p.58), foi possível calcular o fator de vizinhança teórico, apresentado na tabela 2. Desta forma, é possível verificar que para o caso do Edifício A o valor calculado pela norma não satisfaz a condição obtida experimentalmente.

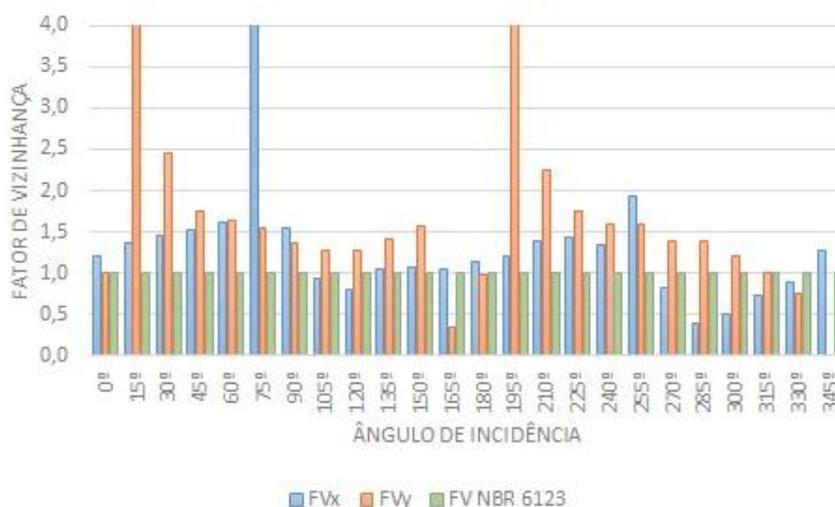
Tabela 2 – Parâmetros para cálculo do FV a partir da NBR 6123 Edifício A

a =	35,82 m
b =	35,82 m
semidiagonal	25,33 m
s =	132,00 m
d* =	25,33 m
s/d* =	5,212
FV =	1,0

(fonte: elaborado pelo autor)

Os fatores de vizinhança calculados para cada direção em análise e cada ângulo de incidência do vento são mostrados na figura 37. Valores muito elevado do FV não podem ser considerados por apresentarem coeficientes na configuração isolado muito próximos a zero no ângulo em análise, desta forma, não são representativos para o estudo.

Figura 37 – FV x ângulo de incidência do vento Edifício A



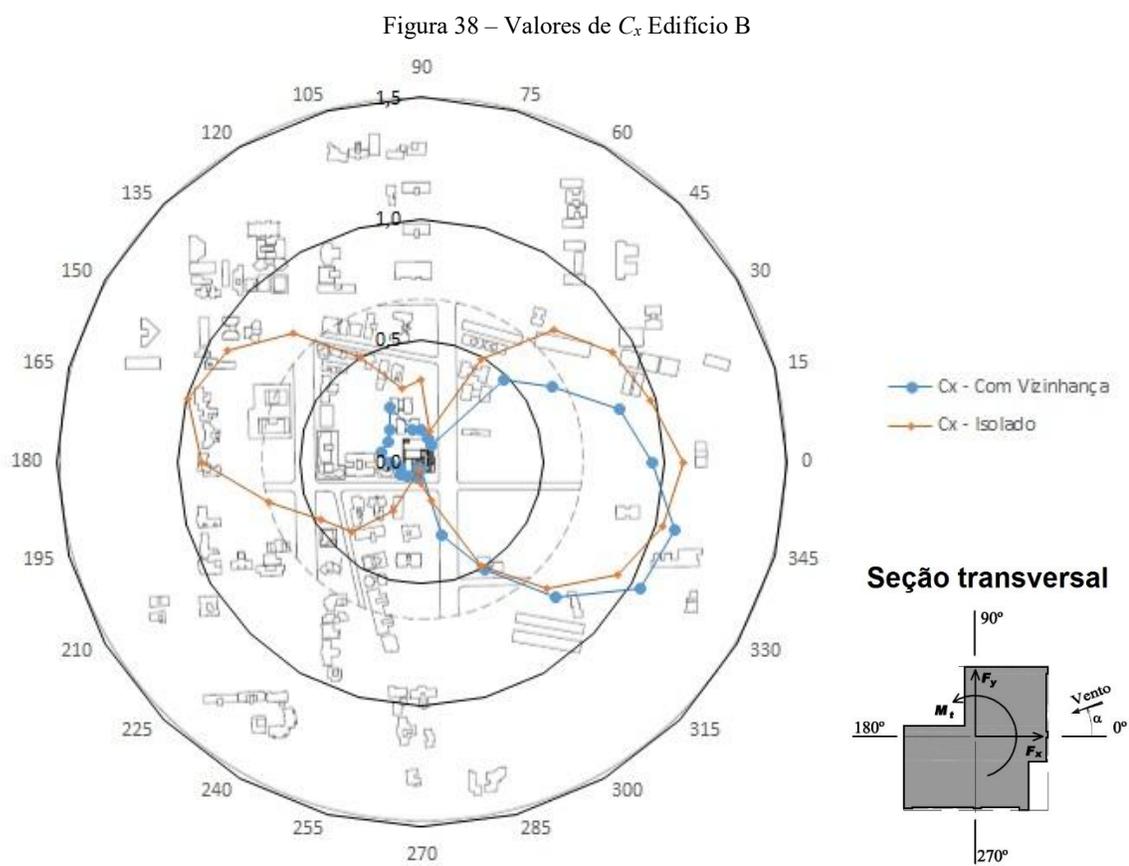
(fonte: elaborado pelo autor)

Em grande parte dos ângulos de incidência do vento ensaiados o FV é maior que 1, demonstrando que a vizinhança do Edifício A influi de forma negativa na interação entre vento e estrutura, ocasionando um aumento considerável das cargas atuantes no prédio.

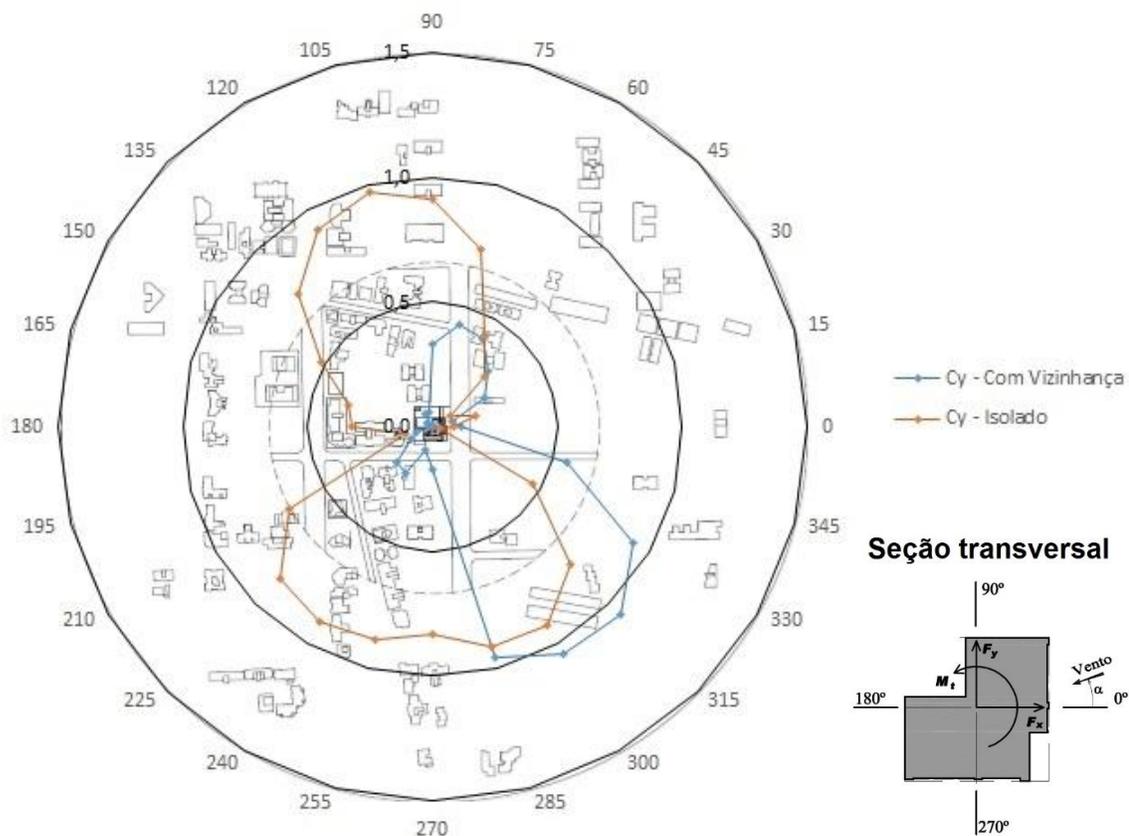
6.2 EDIFÍCIO B

O Edifício B está situado em um terreno cuja rugosidade corresponde as categorias de vento III, IV e V (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988), dependendo do ângulo de incidência do vento. Portanto, na configuração de ensaio com vizinhança, nos ângulos de incidência do vento de 90° a 120° e 240° a 270° foi simulado um vento com perfil potencial de velocidades médias de expoente p igual a 0,34, que corresponde a categoria V e para os demais ângulos foi empregado vento com expoente p igual a 0,23 que representa as categorias III e IV. Nos ensaios realizados para a configuração do modelo isolado, foi utilizado um perfil de vento com expoente p igual a 0,23, para todos os ângulos de incidência do vento simulados.

Nas figuras 38 e 39, são mostrados os valores obtidos nos ensaios para os coeficientes de força globais C_x e C_y , respectivamente.



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 39 – Valores de C_y Edifício B

(fonte: elaborado pelo autor)

Por apresentar uma disposição ordenada de edifícios vizinhos entre os ângulos 90° a 270° , o Edifício B registrou valores distintos entre as configurações ensaiadas para os coeficientes de força globais. Como pode ser observado na figura 38, os coeficientes C_x apresentaram valores semelhantes entre os ângulos 0 a 90° e 270 a 345° , região esta que apresenta edifícios vizinhos com altura inferior ao prédio em estudo e em baixa quantidade. Ainda para este intervalo de ângulos, o maior valor de C_x registrado na configuração com vizinhança foi no ângulo 345° e igual a 1,08. Na configuração de ensaio com o modelo isolado, em 345° , o valor verificado para C_x foi de 1,02. Desta forma, o Fator de vizinhança calculado para estes valores representativos, é 1,1, indicando que a vizinhança gerou um aumento das cargas nesta situação.

Por outro lado, no intervalo entre 105° a 255° , no qual a densidade de vizinhos é elevada e com altura média igual ao Edifício B, notou-se que os valores de C_x no arranjo ensaiado com

vizinhança foram predominantemente inferiores ao ensaio isolado, assinalando que, neste caso, a vizinhança protege o modelo. O maior valor de C_x registrado para a configuração com vizinhança foi igual a 0,26. Confrontando com 0,50, que foi o valor obtido no ensaio isolado, gera um FV igual a 0,5.

Análise semelhante pode ser feita, com base nos resultados observados na figura 39, todavia, a faixa de ângulos onde a vizinhança atuou de forma negativa no modelo foi apenas entre os ângulos 285° até 345°, para os demais ângulos estudados, a vizinhança atuou “protegendo” o prédio. O FV calculado foi de 0,6, para o ângulo de incidência de 75° que registrou um C_y de 0,42 no ensaio com vizinhança e 0,74 no ensaio isolado.

A tabela 3 apresenta os maiores valores dos coeficientes de força globais registrados para cada coeficiente na configuração com vizinhança, os ângulos de incidência em que ocorrem e os fatores de vizinhança associados.

Tabela 3 – Valores representativos de C_x e C_y , ângulos de ocorrência e fator de vizinhança Edifício B

	Coeficientes		ângulo de ocorrência	FV
	Com Vizinhança	Isolado		
C_x	0,26	0,50	210°	0,5
	-1,08	-1,02	345°	1,1
C_y	-0,42	-0,74	75°	0,6
	1,06	0,78	315°	1,4

(fonte: elaborado pelo autor)

O fator de vizinhança teórico calculado a partir da NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p.58) é apresentado na tabela 4, junto com seus parâmetros. O valor de 1,3 calculado para o FV indica que para o Edifício B o processo da norma se aplica de forma satisfatória.

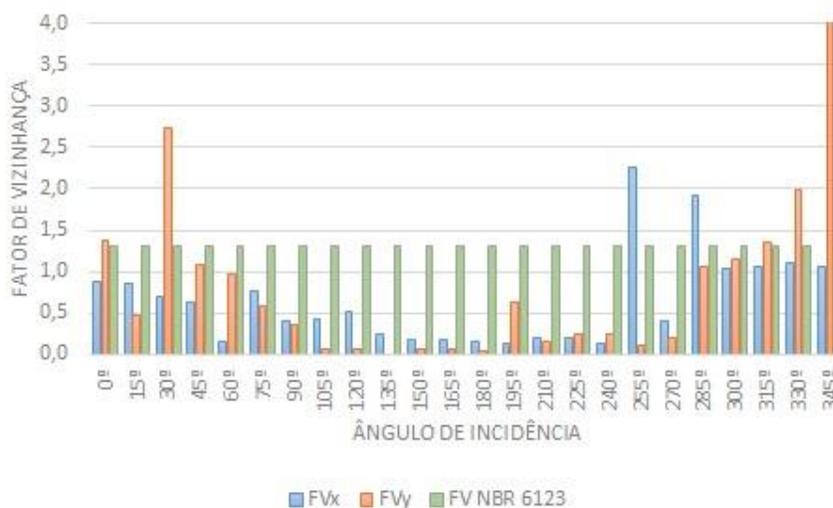
Tabela 4 – Parâmetros para cálculo do FV a partir da NBR 6123
Edifício B

a=	26,49 m
b=	26,46 m
semidiagonal	18,72 m
s=	18,00 m
d*=	18,72 m
s/d=	0,962
FV=	1,3

(fonte: elaborado pelo autor)

Os valores calculados de FV para cada ângulo analisado são apresentados na figura 44, onde verificou-se que os valores de FV prevalecem menores que 1, indicando que para o Edifício B a vizinhança age de forma favorável, diminuindo os carregamentos causados pela ação do vento.

Figura 40 – FV x ângulo de incidência do vento Edifício B



(fonte: elaborado pelo autor)

6.3 EDIFÍCIO C

Por estar localizado em um terreno com características rugosidade que pode ser classificado entre as categorias III e IV segundo a NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 8), nos ensaios realizados no modelo Edifício C, o vento simulado possuía um perfil potencial de velocidades médias de expoente p igual a 0,23.

A figura 41 apresenta os coeficientes de força globais C_x , do edifício C. Os coeficientes em com relação à direção $y - C_y$, são mostrados na figura 42.

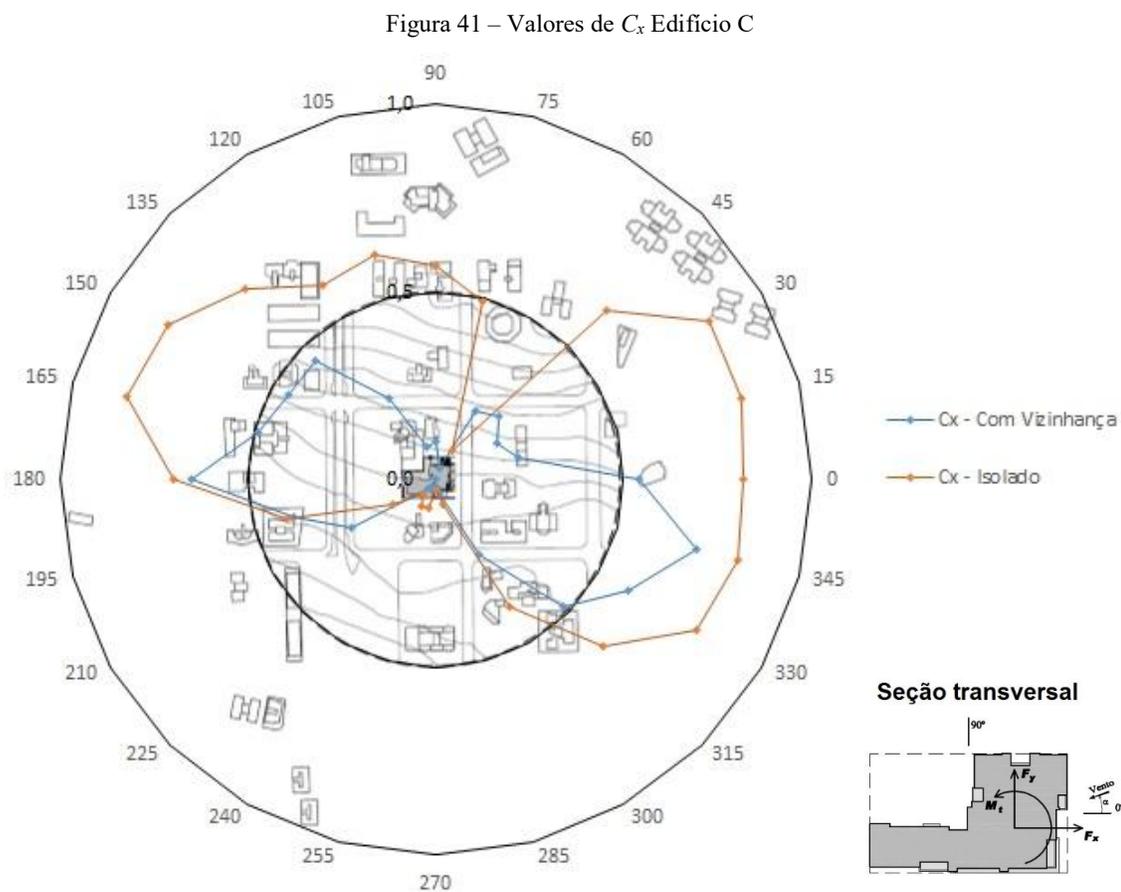
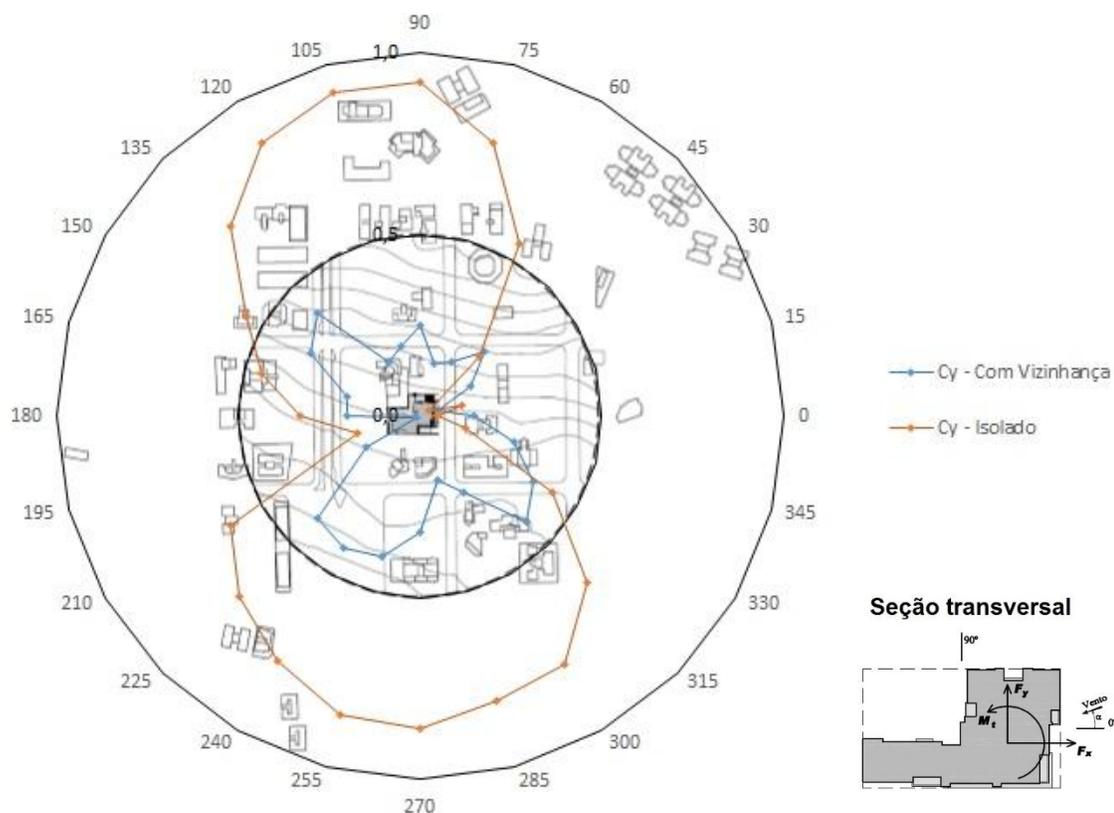


Figura 42 – Valores de C_y Edifício C

(fonte: elaborado pelo autor)

O Edifício C possui vizinhos distribuídos em todas as direções com alturas médias muito próximas à altura do modelo. Desta forma, os coeficientes de força globais para os eixos “x” e “y”, C_x e C_y respectivamente, apresentam na configuração ensaiada com vizinhança valores inferiores se comparados aos obtidos no ensaio com modelo isolado, como pode ser observado nas figuras 41 e 42.

Os valores representativos e para cada eixo, o ângulo em que ocorrem e o fator de vizinhança calculado encontram-se na tabela 5. A tabela 6 apresenta o cálculo do fator de vizinhança a partir da NBR 6123/88.

Tabela 5 – Valores representativos de C_x e C_y , ângulos de ocorrência e fator de vizinhança Edifício C

	Coeficientes		ângulo de ocorrência	FV
	Com Vizinhança	Isolado		
C_x	-0,72	-0,83	345°	0,87
C_y	0,42	0,78	240°	0,54

(fonte: elaborado pelo autor)

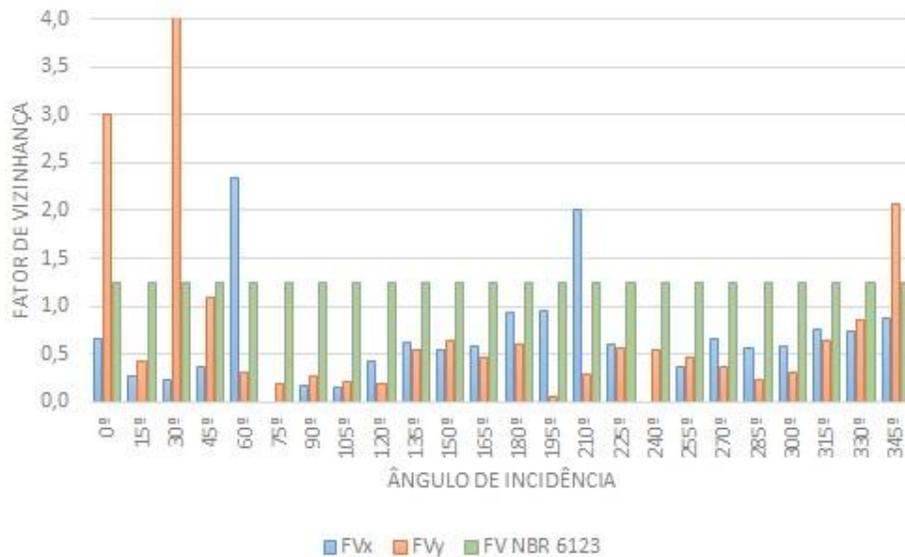
Tabela 6 – Parâmetros para cálculo do FV a partir da NBR 6123 Edifício C

a=	34,73 m
b=	21 m
semidiagonal	20,29 m
s=	28,00 m
d*=	20,30 m
s/d=	1,379
FV=	1,2

(fonte: elaborado pelo autor)

Conforme a tabela 5 especifica, em ambos os casos de C_x e C_y , o fator de vizinhança calculado apresenta valores menores que 1,2 apresentados pela norma, confirmando que para o caso do Edifício C, a vizinhança exerce uma influência de proteção do modelo, diminuindo as forças atuantes no prédio devido a interação vento-estrutura. Na maior parte do restante dos ângulos de incidência do vento ensaiados no modelo do Edifício C, o FV resulta em valores menores que 1, como pode ser observado na figura 43.

Figura 43 – FV x ângulo de incidência do vento Edifício C

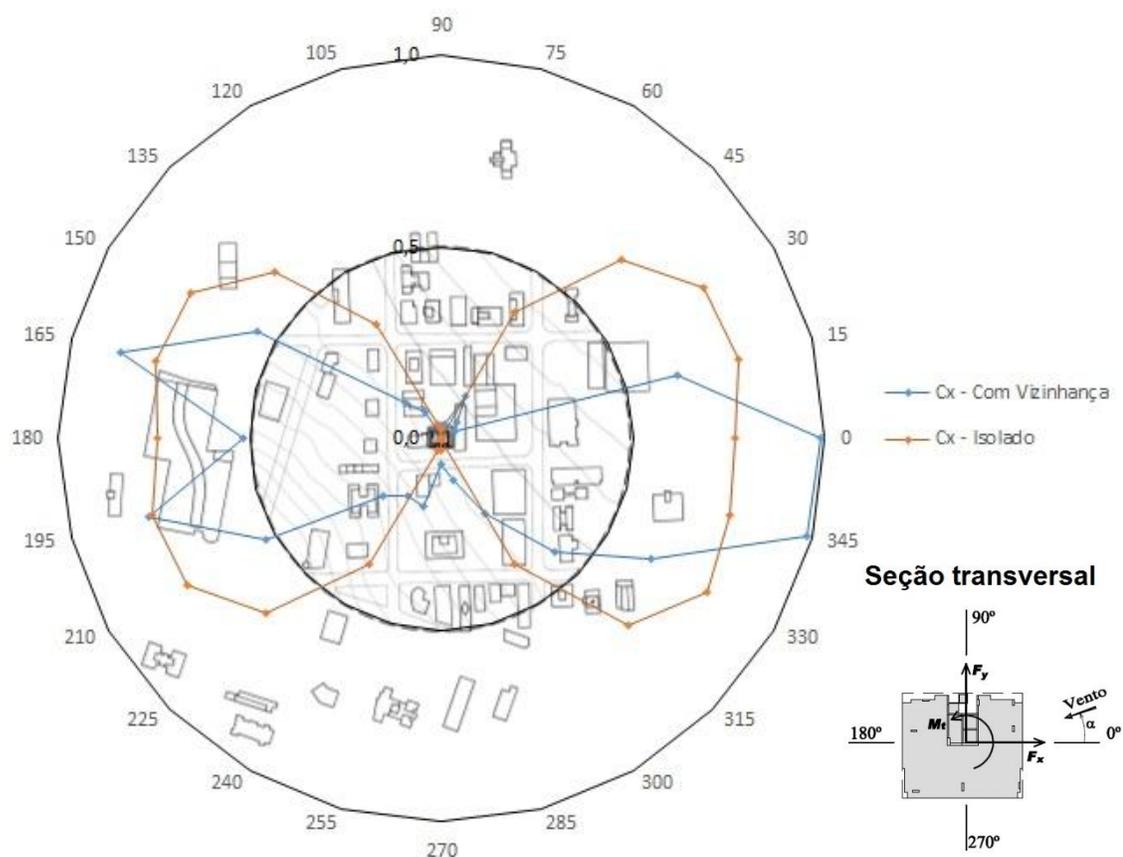


(fonte: elaborado pelo autor)

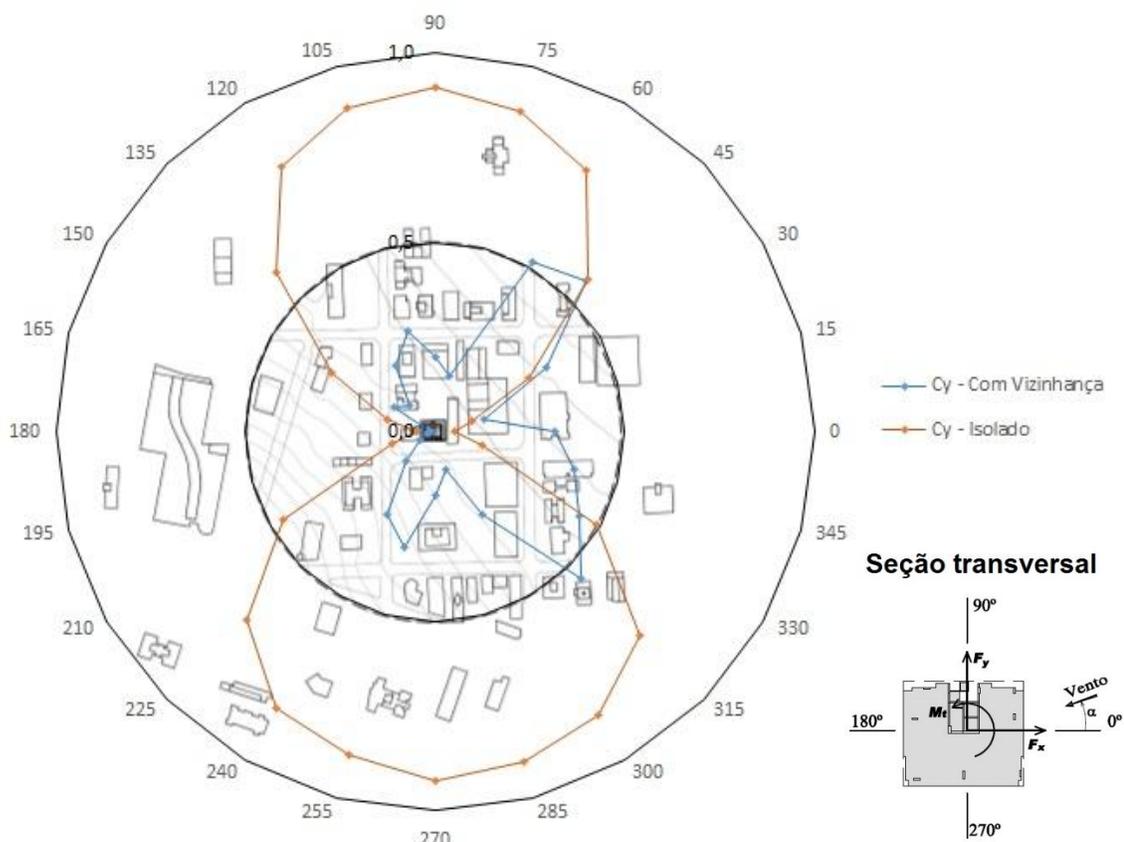
6.4 EDIFÍCIO D

As condições de rugosidade do terreno em torno ao Edifício D compreendem as categorias III e IV segundo a NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 8), desta maneira, foi utilizado nas duas configurações ensaiadas, um vento com perfil potencial de velocidades médias de expoente p igual a 0,23.

As figuras 44 e 45, apresentam os valores obtidos nos ensaios para os coeficientes de força globais C_x e C_y , respectivamente.

Figura 44 – Valores de C_x Edifício D

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 45 – Valores de C_y Edifício D

A partir da figura 44, é possível verificar que os maiores valores para os coeficientes de força globais C_x dão-se nos ângulos de incidência do vento de 0° , 165° , 195° e 345° , pela provável ocorrência de efeito Venturi nestes ângulos. Apesar de que, no restante dos ângulos analisados, os valores dos coeficientes C_x no ensaio da configuração com vizinhança sejam menores que no ensaio do edifício isolado, não é possível afirmar que a vizinhança proteja a edificação.

Em contrapartida, o fator de vizinhança, quando analisado os coeficientes na direção y, resulta em um $FV=1,0$ para o ângulo de incidência de 45° , como pode ser visto na figura 45. Foi observado o maior valor de C_y no ensaio com a presença das edificações vizinhas ocorrendo o mesmo com o modelo isolado ambos iguais a $0,57$.

Na tabela 7 são apresentados os maiores valores registrados dos coeficientes C_x e C_y , os ângulos de incidência do vento em que ocorrem e os fatores de vizinhança associados.

Tabela 7 – Valores representativos de C_x e C_y , ângulos de ocorrência e fator de vizinhança Edifício D

	Coeficientes		ângulo de ocorrência	FV
	Com Vizinhança	Isolado		
C_x	-0,99	-0,77	0°	1,3
C_y	-0,57	-0,57	45°	1,0

(fonte: elaborado pelo autor)

A tabela 8 apresenta o cálculo do fator de vizinhança teórico, a partir da NRB 6123/88. Nota-se que o valor teórico é inferior ao experimental, indicando que este método não se aplica para o caso do Edifício D.

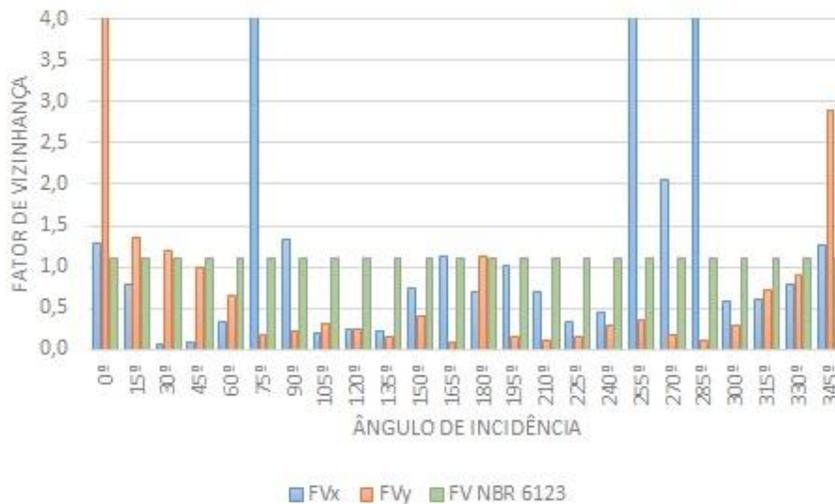
Tabela 8 – Parâmetros para cálculo do FV a partir da NBR 6123 Edifício D

a=	34,73 m
b=	21 m
semidiagonal	20,29 m
s=	28,00 m
d*=	20,30 m
s/d=	1,379
FV=	1,2

(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 46 apresenta os valores do fator de vizinhança calculados para cada ângulo testado.

Figura 46 – FV x ângulo de incidência do vento Edifício D

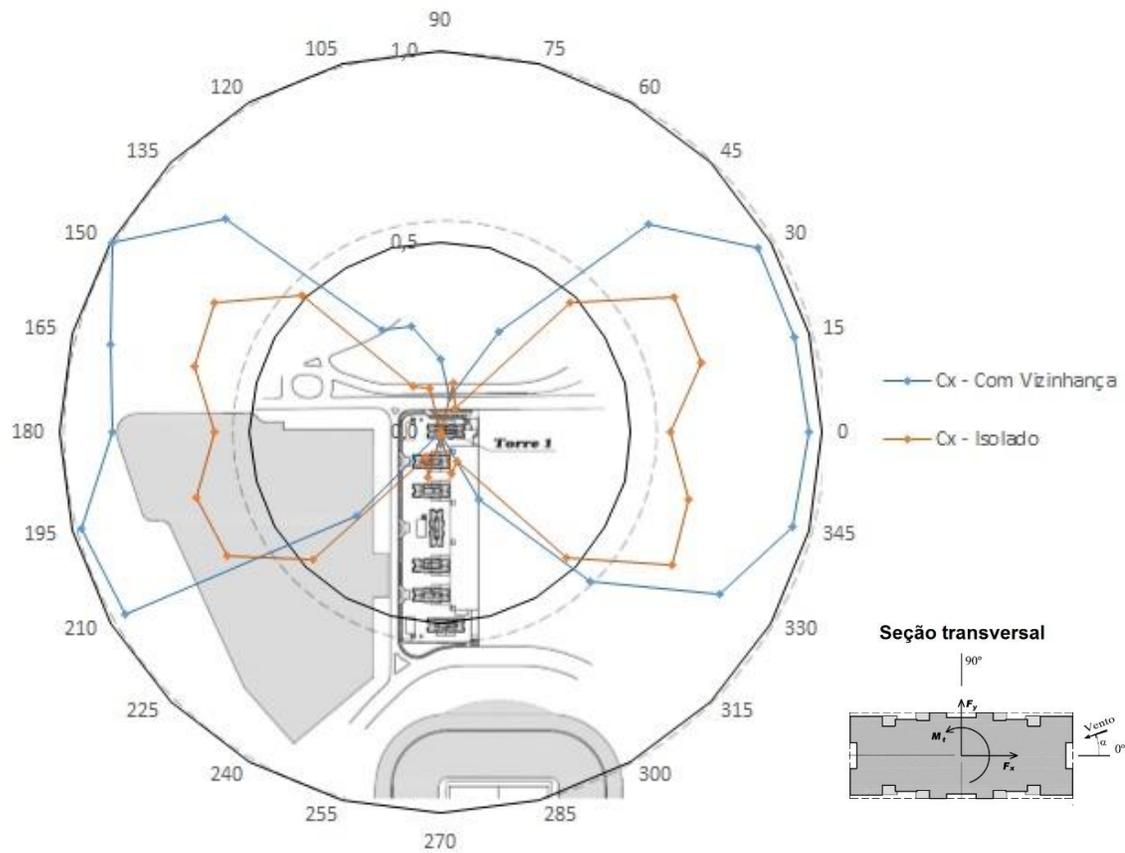


(fonte: elaborado pelo autor)

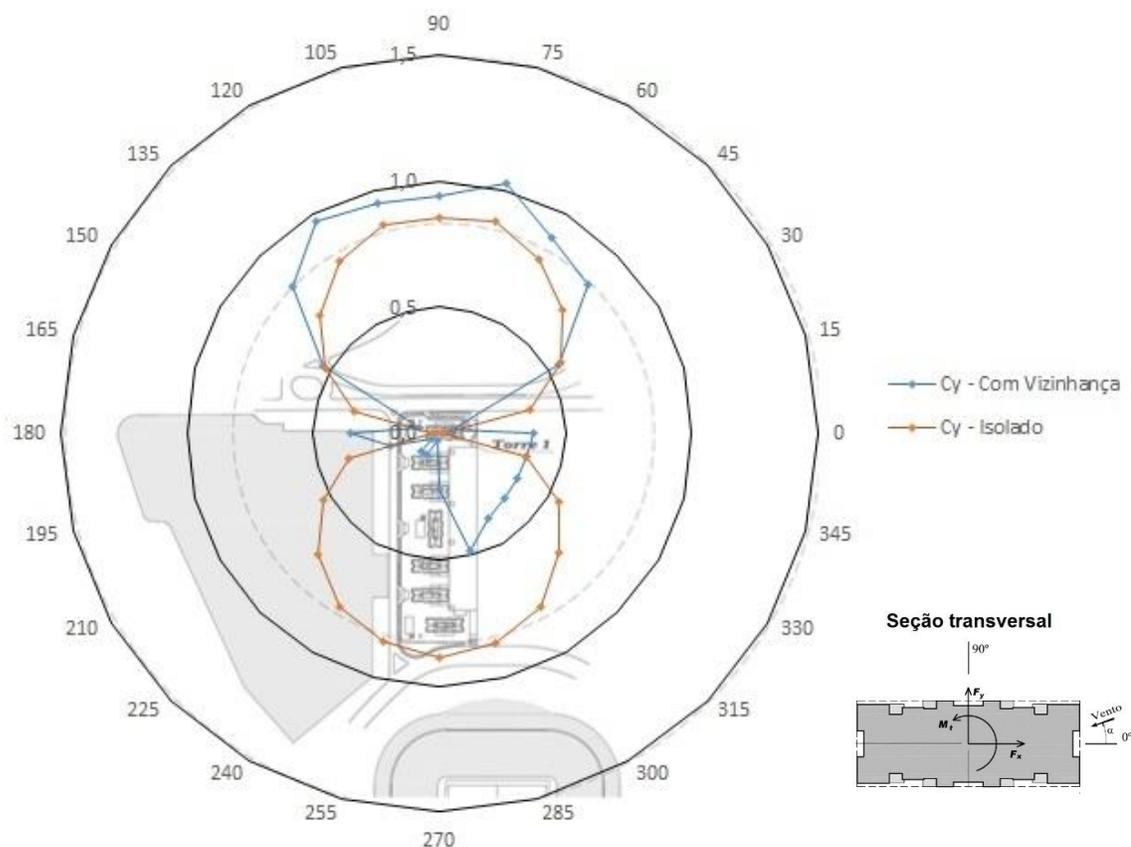
6.5 EDIFÍCIO E

O Edifício E está situado em um terreno cujas condições de rugosidade correspondem as categorias III e IV descritas na NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 8). Por conseguinte, nos ensaios das duas configurações realizadas, foi utilizado um vento com perfil potencial de velocidades médias de expoente p igual a 0,23.

As figuras 47 e 48 apresentam os coeficientes de força globais para as direções x [C_x] e y [C_y], respectivamente, da torre 1 do Edifício E.

Figura 47 – Valores de C_x Edifício E

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 48 – Valores de C_y Edifício E

(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 47 mostra que a distribuição dos valores de C_x , como poderia ser previsto, devido à ausência de vizinhança significativa nos ângulos adjacentes ao eixo “x”, esta distribuição apresenta uma condição de simetria, tanto para o ensaio com vizinhança quanto para o isolado.

Assim sendo, nos ensaios com a presença das edificações vizinhas, os valores dos coeficientes de força globais C_x , são em torno de 50% maiores do que os medidos no ensaio isolado, considerando os ângulos de 330° a 45° e 135° a 210°.

A figura 48 apresenta, entre os ângulos 0 a 180°, cuja distribuição dos valores de C_y similar entre as duas configurações de ensaios estudadas. Para o intervalo de ângulos citado, o maior valor de C_y foi observado a 75° de incidência do vento resultando em um FV na ordem de 1,2.

Para o intervalo entre 195 a 345°, no qual a vizinhança influencia de forma significativa na interação vento-estrutura, minimizando os valores de C_y no ensaio em que ela se faz presente, encontrou-se um fator de vizinhança igual a 0,6.

A tabela 9 apresenta os valores representativos pelo ensaio, os ângulos em que ocorrem e o fator de vizinhança calculado.

Tabela 9 – Valores representativos de C_x e C_y , ângulos de ocorrência e fator de vizinhança Edifício E

	Coeficientes		ângulo de ocorrência	FV
	Com Vizinhança	Isolado		
C_x	0,99	0,68	150°	1,5
C_y	-1,02	-0,87	75°	1,2
	0,48	0,86	285°	0,6

(fonte: elaborado pelo autor)

A tabela 10 apresenta o fator de vizinhança teórico calculado a partir da NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p.58).

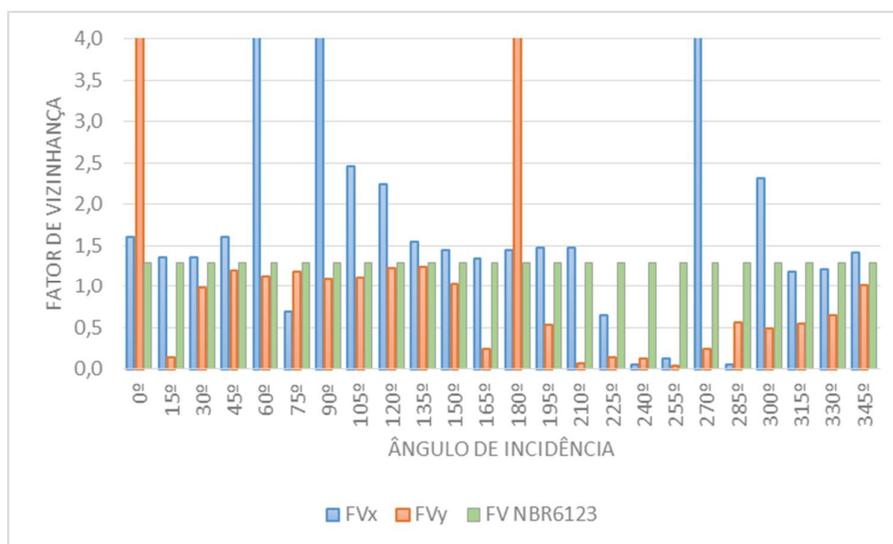
Tabela 10 – Parâmetros para cálculo do FV a partir da NBR 6123 Edifício E

a=	39,65 m
b=	15,3 m
semidiagonal	21,25 m
s=	17,25 m
d*=	21,25 m
s/d=	0,812
FV=	1,3

(fonte: elaborado pelo autor)

Nos ângulos de incidência do vento em que a vizinhança interfere de maneira significativa nos valores dos coeficientes de força globais, ela protege a construção, diminuindo tais coeficientes. Todavia, analisando os ensaios de maneira geral, as edificações vizinhas ao Edifício E, causam sobre ela uma interferência negativa, aumentando as forças causadas pela ação do vento na construção, como pode ser verificado na figura 49, que apresenta os valores calculados de FV para cada ângulo analisado.

Figura 49 – FV x ângulo de incidência do vento Edifício E



(fonte: elaborado pelo autor)

7 CONCLUSÃO

Os resultados apresentados neste trabalho mostram a grande variabilidade da interferência que a vizinhança exerce nos edifícios analisados frente à ação do vento.

Empreendimentos com vizinhos dispersos como o Edifício A, tendem a sofrer acréscimos em seus coeficientes de força globais, fato esse que possivelmente também sofre influência da topografia acentuada que o empreendimento está sujeito. Nota-se ainda, que os fatores de vizinhança do edifício A calculado a partir da NBR 6123/88, foram inferiores aos valores obtidos experimentalmente, na ordem de 40% e 70% para as direções x e y respectivamente.

Casos como: o Edifício B e o Edifício E, que possuem uma concentração de vizinhança localizada em uma única direção ou quadrante, apresentam redução dos coeficientes apenas na direção em que o vento é bloqueado por estes vizinhos. Nota-se também, que para gerar o efeito de proteção, a altura média das edificações deve ser próxima à altura do prédio em estudo. Em ambos os casos, o fator de vizinhança experimental e teórico (NBR 6123/88) registrou valores próximos entre si, indicando que o método da norma é adequado para ambos os casos.

Por outro lado, edifícios com vizinhos dispostos em todas as direções, Edifícios C e D, produziram resultados distintos. No caso do Edifício C, a vizinhança proporcionou uma redução do carregamento estático devido ao vento, diminuindo seus coeficientes de força. O mesmo não pode ser observado para o edifício D, para o qual foi observado um acréscimo localizado dos coeficientes de força em apenas 4 ângulos de incidência do vento analisados, nos demais a vizinhança proporcionou um efeito de proteção à construção.

A grande aleatoriedade associada a influência da vizinhança em edifícios altos se mostra muito presente neste trabalho, fato este que dificulta sua determinação de maneira teórica. Portanto, fica evidente a necessidade de uma contínua atualização tanto da metodologia indicada na NBR 6123, quanto do aumento da base de dados. Estas atualizações têm o intuito de abranger uma quantidade mais representativa de configurações construtivas.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. NBR-6123 – **Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro. 88p. 1988.

BLESSMANN, J. **O vento na engenharia estrutural**. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 1995.

_____. **Aerodinâmica das construções**. 3. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2011.

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

COOK, N. J. **The designer's guide to wind loading of building structures**. Part 2: Static Structures. (Building Research Establishment). London, UK, 1990.

DAVENPORT, A. G.; ISYUMOV, N. **The Application of The Boundary Layer Wind Tunnel to the Prediction of Wind Loading**. In: Proceedings of the International Research Seminar: Wind Effects on Buildings and Structures. Ottawa, Canada. September 11-15. Vol. 1. pp. 201-230. 1967.

Jensen, M. & Franck, N., **Model scale tests in turbulent wind**. Copenhagen, The Danish Press, Part 1. 1963.

LOREDO-SOUZA, A. M.; SCHETTINI, E. B. C.; PALUCH, M. J. Simulação da Camada Limite Atmosférica em Túnel de Vento. **Turbulência**, Sérgio V. Möler e Jorge H. Silvestrini Editores, vol. 4, 2004 – p. 137-163.

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. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 51., 2009, Porto Alegre. **Anais...** Curitiba: IBRACON, 2009.

CARPEGGANI, E. A. **Determinação dos efeitos estáticos de torção em edifícios altos devido à ação do vento**. 2004. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

VANIN, D. D. **Resposta dinâmica de edifícios altos frente à ação do vento: comparação de técnicas experimentais em túnel de vento**. 2011. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LOREDO-SOUZA, A. M. **Ação Estática do Vento sobre o Edifício Concórdia Nova Lima, MG**. Porto Alegre: LAC/UFRGS, nov, 2011. Relatório Técnico.

LOREDO-SOUZA, A. M. **Ação Estática do Vento sobre a Torre 1 do Empreendimento OAS Liberdade Porto Alegre, RS**. Porto Alegre: LAC/UFRGS, nov, 2012. Relatório Técnico.

LOREDO-SOUZA, A. M. Ação Estática do Vento sobre o Empreendimento Cron - Ilha de Manhattan Curitiba, PR. Porto Alegre: LAC/UFRGS, mar, 2013(a). Relatório Técnico.

LOREDO-SOUZA, A. M. Ação Estática do Vento sobre o Empreendimento CRON / NEOLAR Edifício ARES Curitiba, PR. Porto Alegre: LAC/UFRGS, mar, 2013(b). Relatório Técnico.

LOREDO-SOUZA, A. M. Ação Estática do Vento sobre o Empreendimento Cron – Hesa 100 Hotel Adagio Curitiba, PR. Porto Alegre: LAC/UFRGS, dev, 2014. Relatório Técnico.

ANEXO A – Coeficientes de forças globais

Neste anexo serão apresentadas as tabelas com os valores dos coeficientes de força globais para cada projeto estudado.

A.1 EDIFÍCIO A

Tabela 11 – Valores de C_x Edifício A

Ângulo de incidência do vento	Coeficientes de força globais C_x		Fator de Vizinhança
	Com Vizinhança	Isolado	
0°	-1,08	-0,90	1,2
15°	-1,20	-0,87	1,4
30°	-1,17	-0,80	1,5
45°	-1,02	-0,67	1,5
60°	-0,71	-0,44	1,6
75°	-0,13	-0,01	15,5
90°	0,12	0,08	1,5
105°	-0,08	-0,09	0,9
120°	0,29	0,36	0,8
135°	0,75	0,71	1,1
150°	0,98	0,92	1,1
165°	1,01	0,95	1,1
180°	1,14	1,00	1,1
195°	1,18	0,98	1,2
210°	1,25	0,90	1,4
225°	1,10	0,77	1,4
240°	0,69	0,52	1,3
255°	0,12	0,06	1,9
270°	-0,03	-0,04	0,8
285°	0,06	0,16	0,4
300°	-0,10	-0,19	0,5
315°	-0,38	-0,52	0,7
330°	-0,64	-0,73	0,9
345°	-1,04	-0,82	1,3

(fonte: adaptado Loredo-Souza, 2011)

Tabela 12 – Valores de C_y Edifício A

Ângulo de incidência do vento	Coeficientes de força globais C_y		Fator de Vizinhança
	Com Vizinhança	Isolado	
0°	-0,11	-0,11	1,0
15°	-0,24	0,03	-8,7
30°	-0,93	-0,38	2,5
45°	-1,28	-0,73	1,8
60°	-1,44	-0,88	1,6
75°	-1,44	-0,93	1,6
90°	-1,34	-0,98	1,4
105°	-1,24	-0,97	1,3
120°	-1,08	-0,85	1,3
135°	-0,88	-0,63	1,4
150°	-0,49	-0,31	1,6
165°	0,08	0,22	0,3
180°	0,29	0,29	1,0
195°	0,50	0,10	4,9
210°	1,15	0,51	2,2
225°	1,48	0,85	1,7
240°	1,57	0,99	1,6
255°	1,59	1,00	1,6
270°	1,55	1,11	1,4
285°	1,53	1,11	1,4
300°	1,24	1,02	1,2
315°	0,84	0,84	1,0
330°	0,42	0,55	0,8
345°	-0,06	0,00	53,0

(fonte: adaptado Loredo-Souza, 2011)

A.2 EDIFÍCIO B

Tabela 13 – Valores de C_x Edifício B

Ângulo de incidência do vento	Coeficientes de força globais C_x		Fator de Vizinhança
	Com Vizinhança	Isolado	
0°	-0,95	-1,08	0,9
15°	-0,84	-0,98	0,9
30°	-0,62	-0,90	0,7
45°	-0,48	-0,77	0,6
60°	-0,08	-0,49	0,2
75°	0,10	0,13	0,8
90°	0,13	0,34	0,4
105°	0,14	0,31	0,4
120°	0,26	0,50	0,5
135°	0,19	0,75	0,3
150°	0,16	0,92	0,2
165°	0,17	1,00	0,2
180°	0,13	0,90	0,1
195°	-0,09	0,65	-0,1
210°	-0,10	0,48	-0,2
225°	-0,08	0,41	-0,2
240°	-0,03	0,23	-0,1
255°	0,07	0,03	2,3
270°	0,03	0,09	0,4
285°	-0,31	-0,16	1,9
300°	-0,51	-0,50	1,0
315°	-0,78	-0,73	1,1
330°	-1,04	-0,93	1,1
345°	-1,08	-1,02	1,1

(fonte: adaptado Loredo-Souza, 2014)

Tabela 14 – Valores de C_y Edifício B

Ângulo de incidência do vento	Coeficientes de força globais C_y		Fator de Vizinhança
	Com Vizinhança	Isolado	
0°	0,11	0,08	1,4
15°	-0,08	0,18	-0,5
30°	-0,24	-0,09	2,7
45°	-0,31	-0,29	1,1
60°	-0,40	-0,42	1,0
75°	-0,42	-0,74	0,6
90°	-0,33	-0,91	0,4
105°	-0,06	-0,97	0,1
120°	-0,05	-0,92	0,1
135°	0,00	-0,76	0,0
150°	-0,03	-0,52	0,1
165°	-0,02	-0,35	0,1
180°	-0,01	-0,32	0,0
195°	0,07	0,11	0,6
210°	0,10	0,66	0,2
225°	0,20	0,86	0,2
240°	0,22	0,90	0,2
255°	0,10	0,88	0,1
270°	0,17	0,84	0,2
285°	0,96	0,91	1,1
300°	1,05	0,92	1,1
315°	1,06	0,78	1,4
330°	0,93	0,46	2,0
345°	0,56	0,03	16,5

(fonte: adaptado Loredo-Souza, 2014)

A.3 EDIFÍCIO C

Tabela 15 – Valores de C_x Edifício C

Ângulo de incidência do vento	Coeficientes de força globais C_x		Fator de Vizinhança
	Com Vizinhança	Isolado	
0°	-0,54	-0,82	0,7
15°	-0,23	-0,84	0,3
30°	-0,19	-0,84	0,2
45°	-0,24	-0,64	0,4
60°	-0,21	-0,09	2,3
75°	-0,03	0,49	-0,1
90°	0,10	0,57	0,2
105°	0,09	0,62	0,1
120°	0,25	0,60	0,4
135°	0,45	0,72	0,6
150°	0,45	0,82	0,5
165°	0,49	0,85	0,6
180°	0,65	0,70	0,9
195°	0,39	0,41	1,0
210°	0,26	0,13	2,0
225°	-0,03	0,05	-0,6
240°	0,00	-0,08	0,0
255°	0,03	-0,08	-0,4
270°	-0,02	-0,03	0,7
285°	-0,04	-0,07	0,6
300°	-0,23	-0,39	0,6
315°	-0,48	-0,63	0,8
330°	-0,59	-0,80	0,7
345°	-0,72	-0,83	0,9

(fonte: adaptado Loredo-Souza, 2013(b))

Tabela 16 – Valores de C_y Edifício C

Ângulo de incidência do vento	Coeficientes de força globais C_y		Fator de Vizinhança
	Com Vizinhança	Isolado	
0°	0,15	0,05	3,0
15°	-0,05	0,12	-0,4
30°	-0,16	-0,03	5,3
45°	-0,25	-0,23	1,1
60°	-0,17	-0,55	0,3
75°	-0,15	-0,78	0,2
90°	-0,25	-0,92	0,3
105°	-0,20	-0,92	0,2
120°	-0,17	-0,87	0,2
135°	-0,40	-0,74	0,5
150°	-0,35	-0,55	0,6
165°	-0,21	-0,45	0,5
180°	-0,20	-0,33	0,6
195°	0,01	0,18	0,1
210°	0,17	0,60	0,3
225°	0,40	0,70	0,6
240°	0,42	0,78	0,5
255°	0,40	0,85	0,5
270°	0,32	0,86	0,4
285°	0,18	0,81	0,2
300°	0,24	0,79	0,3
315°	0,41	0,65	0,6
330°	0,36	0,42	0,9
345°	0,27	0,13	2,1

(fonte: adaptado Loredo-Souza, 2013(b))

A.4 EDIFÍCIO D

Tabela 17 – Valores de C_x Edifício D

Ângulo de incidência do vento	Coeficientes de força globais C_x		Fator de Vizinhança
	Com Vizinhança	Isolado	
0°	-0,99	-0,77	1,3
15°	-0,64	-0,80	0,8
30°	-0,04	-0,79	0,1
45°	0,06	-0,66	-0,1
60°	0,13	-0,38	-0,3
75°	-0,04	0,00	15,2
90°	-0,03	-0,03	1,3
105°	-0,01	-0,04	0,2
120°	-0,08	0,34	-0,2
135°	-0,13	0,62	-0,2
150°	0,56	0,76	0,7
165°	0,86	0,77	1,1
180°	0,52	0,74	0,7
195°	0,79	0,78	1,0
210°	0,53	0,77	0,7
225°	0,21	0,65	0,3
240°	0,17	0,38	0,5
255°	0,19	-0,03	-6,1
270°	0,07	-0,03	-2,1
285°	-0,11	0,00	70,3
300°	-0,22	-0,38	0,6
315°	-0,42	-0,69	0,6
330°	-0,63	-0,80	0,8
345°	-0,98	-0,78	1,3

(fonte: adaptado Loredo-Souza, 2013(a))

Tabela 18 – Valores de C_y Edifício D

Ângulo de incidência do vento	Coeficientes de força globais C_y		Fator de Vizinhança
	Com Vizinhança	Isolado	
0°	0,32	-0,05	-6,1
15°	0,14	-0,10	-1,3
30°	-0,34	-0,28	1,2
45°	-0,57	-0,57	1,0
60°	-0,52	-0,80	0,6
75°	-0,15	-0,87	0,2
90°	-0,20	-0,91	0,2
105°	-0,27	-0,89	0,3
120°	-0,20	-0,81	0,3
135°	-0,10	-0,59	0,2
150°	-0,13	-0,31	0,4
165°	-0,01	-0,13	0,1
180°	-0,06	-0,05	1,1
195°	0,02	0,12	0,2
210°	0,05	0,46	0,1
225°	0,11	0,70	0,2
240°	0,25	0,84	0,3
255°	0,32	0,88	0,4
270°	0,17	0,92	0,2
285°	0,10	0,90	0,1
300°	0,25	0,87	0,3
315°	0,55	0,76	0,7
330°	0,44	0,49	0,9
345°	0,38	0,13	2,9

(fonte: adaptado Loredou-Souza, 2013(a))

A.5 EDIFÍCIO E

Tabela 19 – Valores de C_x Edifício E

Ângulo de incidência do vento	Coeficientes de força globais C_x		Fator de Vizinhança
	Com Vizinhança	Isolado	
0°	-0,96	-0,60	1,6
15°	-0,96	-0,71	1,4
30°	-0,96	-0,70	1,4
45°	-0,77	-0,48	1,6
60°	-0,30	-0,07	4,1
75°	0,09	0,13	0,7
90°	-0,19	0,00	280,8
105°	-0,29	-0,12	2,5
120°	0,31	0,14	2,2
135°	0,80	0,51	1,6
150°	0,99	0,68	1,5
165°	0,90	0,67	1,3
180°	0,86	0,59	1,5
195°	0,98	0,66	1,5
210°	0,96	0,65	1,5
225°	0,31	0,47	0,7
240°	0,00	0,08	-0,1
255°	-0,02	-0,12	0,1
270°	0,03	-0,01	-4,8
285°	0,01	0,12	0,1
300°	-0,20	-0,09	2,3
315°	-0,56	-0,47	1,2
330°	-0,85	-0,70	1,2
345°	-0,96	-0,68	1,4

(fonte: adaptado Loredo-Souza, 2012)

Tabela 20 – Valores de C_y Edifício E

Ângulo de incidência do vento	Coeficientes de força globais C_y		Fator de Vizinhança
	Com Vizinhança	Isolado	
0°	0,37	-0,01	-30,4
15°	-0,05	-0,37	0,1
30°	-0,55	-0,56	1,0
45°	-0,83	-0,69	1,2
60°	-0,89	-0,79	1,1
75°	-1,02	-0,87	1,2
90°	-0,94	-0,85	1,1
105°	-0,95	-0,85	1,1
120°	-0,97	-0,79	1,2
135°	-0,82	-0,67	1,2
150°	-0,53	-0,52	1,0
165°	-0,08	-0,35	0,2
180°	0,35	0,03	12,9
195°	0,20	0,37	0,5
210°	-0,03	0,53	-0,1
225°	-0,10	0,68	-0,1
240°	-0,10	0,79	-0,1
255°	-0,03	0,86	0,0
270°	0,22	0,89	0,2
285°	0,48	0,86	0,6
300°	0,39	0,80	0,5
315°	0,37	0,67	0,5
330°	0,36	0,55	0,7
345°	0,36	0,36	1,0

(fonte: adaptado Loredo-Souza, 2012)