

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

Edson Luis Nicolait Fernandes

**EFEITOS DE VIZINHANÇA NA AÇÃO DO VENTO:
PROPOSTA DE REVISÃO DO ANEXO G DA NBR 6123/1988**

Porto Alegre
janeiro 2013

EDSON LUIS NICOLAIT FERNANDES

**EFEITOS DE VIZINHANÇA NA AÇÃO DO VENTO:
PROPOSTA DE REVISÃO DO ANEXO G DA NBR 6123/1988**

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
janeiro 2013

EDSON LUIS NICOLAIT FERNANDES

**EFEITOS DE VIZINHANÇA NA AÇÃO DO VENTO:
PROPOSTA DE REVISÃO DO ANEXO G DA NBR 6123/1988**

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, 11 janeiro de 2013

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

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Gustavo Javier Zani Núñez
(Universidade Federal do Rio Grande do Sul)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Mário Gustavo Klaus Oliveira
(Vento-S Consultoria em Engenharia do Vento)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Acir Mércio Loredo-Souza
(Universidade Federal do Rio Grande do Sul)
Ph.D pela University of Western Ontario, Canadá

Dedico este trabalho a meus pais, Oliveira (*in memoriam*)
e Irene, e também ao meu irmão Carlos, por
compartilharem comigo toda a minha existência.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Acir por dar-me a oportunidade de aprender um pouco mais sobre a Engenharia do Vento e por orientar a condução deste trabalho.

Agradeço a Prof. Carin por possibilitar a realização deste trabalho.

Agradeço a todos os colegas que compartilharam os grandes momentos, por vezes difíceis, da realização deste trabalho.

Agradeço aos Engenheiros Maria Cristina e Guilherme, do Laboratório de Aerodinâmica das Construções, por disponibilizarem os relatórios técnicos necessários para a realização deste trabalho.

Agradeço ao povo do meu Estado e do meu País pela oportunidade que eu tive de graduar-me aqui, na Escola de Engenharia, e por darem credibilidade a todas as pessoas que fazem parte desta Universidade.

O sofrimento é o intervalo entre duas felicidades.

Vinicius de Moraes

RESUMO

O presente trabalho trata dos efeitos de vizinhança devidos a ação do vento em edifícios. Esses efeitos são abordados no anexo G da NBR 6123/1988 e despertam cada vez mais o interesse dos projetistas, visto que a intensificação da construção de edificações cada vez mais elevadas e a, também, crescente utilização de materiais construtivos com baixo peso específico, tornam estes fenômenos mais perceptíveis e danosos. Um melhor entendimento e a adequada previsão dos efeitos de vizinhança, somente acontecem nos ensaios em túneis de vento de camada limite atmosférica. Todavia, estes estudos demandam tempo e, na maioria das vezes, recursos financeiros não previstos nos orçamentos dos projetos das edificações. Geralmente os textos normativos consideram os efeitos de vizinhança através da aplicação de coeficientes que visam majorar os esforços determinados nestas edificações, tratadas, inicialmente, como isoladas. A NBR 6123/1988, em seu anexo G, apresenta este coeficiente de majoração, chamado de fator de vizinhança (FV), válido somente para edificações com forma geométrica paralelepipedica. Este trabalho aborda a apresentação de fatores de vizinhança para outras geometrias de edificações, visando tornar o anexo G da NBR 6123/1988 mais abrangente. Para isso utilizou-se de dados, obtidos em relatórios técnicos de projetos de edifícios ensaiados no Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), e cálculos analíticos efetuados a partir da aplicação dos preceitos da Norma.

Palavras-chave: Anexo G da NBR 6123. Efeitos de Vizinhança. Ação do Vento. Geometria Paralelepipedica. Revisão da NBR 6123.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática do delineamento da pesquisa	19
Figura 2 – Túnel de Vento Professor Joaquim Blessmann	23
Figura 3 – Planta baixa do Túnel de Vento Professor Joaquim Blessmann	24
Figura 4 – Mapa das isopletas da velocidade básica do vento no Brasil	33
Figura 5 – Fator topográfico S_1	36
Figura 6 – Coeficientes de arrasto, C_a , para edificações paralelepípedicas em vento de alta turbulência	42
Figura 7 – Coeficientes de arrasto, C_a , para edificações paralelepípedicas em vento de baixa turbulência	43
Figura 8 – Esquema ilustrativo das excentricidades	44
Figura 9 – Perspectiva artística do edifício Carlos Steinen	48
Figura 10 – Modelo reduzido do edifício Carlos Steinen no interior do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann	49
Figura 11 – Referência para aplicação de forças e momentos fletores para o edifício Carlos Steinen	49
Figura 12 – Perspectiva artística do edifício Liège	50
Figura 13 – Modelo reduzido do edifício Liège no interior do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann	51
Figura 14 – Referência para aplicação de forças e momentos fletores para o edifício Liège	51
Figura 15 – Perspectiva artística do edifício Home Stay	52
Figura 16 – Modelo reduzido do edifício Home Stay no interior do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann	53
Figura 17 – Referência para aplicação de forças e momentos fletores para o edifício Home Stay	53
Figura 18 – Perspectiva artística do edifício Office Barra Sul	54
Figura 19 – Modelo reduzido do edifício Office Barra Sul no interior do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann	55
Figura 20 – Referência para aplicação de forças e momentos fletores para o edifício Office Barra Sul	55
Figura 21 – Modelo reduzido do edifício Cron My Way no interior do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann	56
Figura 22 – Referência para aplicação de forças e momentos fletores para o edifício Cron My Way	57
Figura 23 – Modelo reduzido do edifício Graça no interior do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann	58

Figura 24 – Referência para aplicação de forças e momentos fletores para o edifício Graça	58
Figura 25 – Modelo reduzido do edifício Resort Residence no interior do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann	59
Figura 26 – Referência para aplicação de forças e momentos fletores para o edifício Resort Residence	60
Figura 27 – Projeção em planta baixa do edifício Carlos Steinen e dimensões do retângulo para o cálculo através da Norma	62
Figura 28 – Referência do ângulo de incidência do vento para o edifício Carlos Steinen	63
Figura 29 – Esforço cortante na direção X para o edifício Carlos Steinen	64
Figura 30 – Esforço cortante na direção Y para o edifício Carlos Steinen	64
Figura 31 – Momento fletor na direção X para o edifício Carlos Steinen	65
Figura 32 – Momento fletor na direção Y para o edifício Carlos Steinen	65
Figura 33 – Projeção em planta baixa do edifício Liège e dimensões do retângulo para o cálculo através da Norma	67
Figura 34 – Referência do ângulo de incidência do vento para o edifício Liège	68
Figura 35 – Esforço cortante na direção X para o edifício Liège	69
Figura 36 – Esforço cortante na direção Y para o edifício Liège	69
Figura 37 – Momento fletor na direção X para o edifício Liège.....	70
Figura 38 – Momento fletor na direção Y para o edifício Liège	70
Figura 39 – Projeção em planta baixa do edifício Home Stay e dimensões do retângulo para o cálculo através da Norma	72
Figura 40 – Referência do ângulo de incidência do vento para o edifício Home Stay	73
Figura 41 – Esforço cortante na direção X para o edifício Home Stay	74
Figura 42 – Esforço cortante na direção Y para o edifício Home Stay	74
Figura 43 – Momento fletor na direção X para o edifício Home Stay	75
Figura 44 – Momento fletor na direção Y para o edifício Home Stay	75
Figura 45 – Projeção em planta baixa do edifício Office Barra Sul e dimensões do retângulo para o cálculo através da Norma	77
Figura 46 – Referência do ângulo de incidência do vento para o edifício Office Barra Sul	78
Figura 47 – Esforço cortante na direção X para o edifício Office Barra Sul	79
Figura 48 – Esforço cortante na direção Y para o edifício Office Barra Sul	79
Figura 49 – Momento fletor na direção X para o edifício Office Barra Sul	80
Figura 50 – Momento fletor na direção Y para o edifício Office Barra Sul	80
Figura 51 – Projeção em planta baixa do edifício Cron My Way e dimensões do retângulo para o cálculo através da Norma	82
Figura 52 – Referência do ângulo de incidência do vento para o edifício Cron My Way	83

Figura 53 – Esforço cortante na direção X para o edifício Cron My Way	84
Figura 54 – Esforço cortante na direção Y para o edifício Cron My Way	84
Figura 55 – Momento fletor na direção X para o edifício Cron My Way	85
Figura 56 – Momento fletor na direção Y para o edifício Cron My Way	85
Figura 57 – Projeção em planta baixa do edifício Graça e dimensões do retângulo para o cálculo através da Norma	87
Figura 58 – Referência do ângulo de incidência do vento para o edifício Graça	88
Figura 59 – Esforço cortante na direção X para o edifício Graça	89
Figura 60 – Esforço cortante na direção Y para o edifício Graça	89
Figura 61 – Momento fletor na direção X para o edifício Graça	90
Figura 62 – Momento fletor na direção Y para o edifício Graça	90
Figura 63 – Projeção em planta baixa do edifício Resort Residence e dimensões do retângulo para o cálculo através da Norma	92
Figura 64 – Referência do ângulo de incidência do vento para o edifício Resort Residence	93
Figura 65 – Esforço cortante na direção X para o edifício Resort Residence	94
Figura 66 – Esforço cortante na direção Y para o edifício Resort Residence	94
Figura 67 – Momento fletor na direção X para o edifício Resort Residence	95
Figura 68 – Momento fletor na direção Y para o edifício Resort Residence	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros meteorológicos	39
Tabela 2 – Valores mínimos do fator estatístico S_3	40
Tabela 3 – Informações do edifício Carlos Steinen para o cálculo analítico através da Norma	61
Tabela 4 – Solicitações e fatores de vizinhança para o edifício Carlos Steinen	66
Tabela 5 – Informações do edifício Liège para o cálculo analítico através da Norma	66
Tabela 6 – Solicitações e fatores de vizinhança para o edifício Liège	71
Tabela 7 – Informações do edifício Home Stay para o cálculo analítico através da Norma	71
Tabela 8 – Solicitações e fatores de vizinhança para o edifício Home Stay	76
Tabela 9 – Informações do edifício Office Barra Sul para o cálculo analítico através da Norma	76
Tabela 10 – Solicitações e fatores de vizinhança para o edifício Office Barra Sul	81
Tabela 11 – Informações do edifício Cron My Way para o cálculo analítico através da Norma	81
Tabela 12 – Solicitações e fatores de vizinhança para o edifício Cron My Way	86
Tabela 13 – Informações do edifício Graça para o cálculo analítico através da Norma ..	86
Tabela 14 – Solicitações e fatores de vizinhança para o edifício Graça	91
Tabela 15 – Informações do edifício Resort Residence para o cálculo analítico através da Norma	91
Tabela 16 – Solicitações e fatores de vizinhança para o edifício Resort Residence	96

LISTA DE SÍMBOLOS

a – maior dimensão em planta de uma edificação (m)

A – área de referência para o cálculo dos coeficientes de força (m^2)

A_e – área frontal efetiva: área da projeção ortogonal da edificação sobre um plano perpendicular à direção do vento (m^2)

atm – pressão atmosférica no nível de referência (1013 mba)

b – menor dimensão em planta de uma edificação (m)

C_a – coeficiente de arrasto

C_f – coeficiente de força

d – diferença de nível entre a base e o topo do talude ou morro (m)

e_a – excentricidade na direção da dimensão a (m)

e_b – excentricidade na direção da dimensão b (m)

F – força em uma superfície plana de área A , perpendicular à respectiva superfície (N)

F_a – força de arrasto: componente da força devida ao vento na direção do vento (N)

F_g – força global do vento: resultante de todas as forças exercidas pelo vento sobre uma edificação ou parte da mesma (N)

F_r – fator de rajada

F_x – componente da força na direção do eixo coordenado X (N)

F_y – componente da força na direção do eixo coordenado Y (N)

h – altura de uma edificação (m)

m – vida útil da edificação (anos)

p – expoente da lei potencial de variação de S_2

P_m – probabilidade de uma certa velocidade do vento ser excedida pelo menos uma vez em um período de m anos

q – pressão dinâmica do vento (N/m^2)

S_1 – fator topográfico

S_2 – fator que considera a influência rugosidade do terreno, das dimensões da edificação ou parte da edificação em estudo, e de sua altura sobre o terreno

S_3 – fator baseado em conceitos probabilísticos

t – intervalo de tempo (s)

V_0 – velocidade básica do vento (m/s)

V_k – velocidade característica do vento (m/s)

X – coordenada cartesiana

Y – coordenada cartesiana

z – cota acima do terreno (m)

z_g – altura gradiente (m)

z_r – altura de referência (10 m)

A – área (m^2)

y^* – distância adimensional da parede

κ – constante de Karman (aproximadamente 0,4).

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	17
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	17
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	17
2.2.1 Objetivo principal	17
2.2.2 Objetivos secundários	17
2.3 PRESSUPOSTO	18
2.4 DELIMITAÇÕES	18
2.5 LIMITAÇÕES	18
2.6 DELINEAMENTO	18
3 SIMULAÇÃO DO VENTO NATURAL	20
3.1 ORIGENS DA SIMULAÇÃO DO VENTO NATURAL	20
3.2 TÚNEL DE VENTO PROFESSOR JOAQUIM BLESSMANN	22
3.3 CONDIÇÕES DE SEMELHANÇA	24
3.4 RECOMPOSIÇÃO DAS FORÇAS NOS ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO	25
4 AÇÕES DO VENTO EM EDIFICAÇÕES	28
4.1 INFLUÊNCIA DAS PROPORÇÕES	28
4.2 REGIMES DE ESCOAMENTO	30
4.3 INFLUÊNCIA DOS EFEITOS DE VIZINHANÇA	31
4.4 PROCEDIMENTO RECOMENDADO PELA NBR 6123/1988	32
4.4.1 Velocidade básica do vento	32
4.4.2 Velocidade característica do vento	34
4.4.3 Fator topográfico (S_1)	35
4.4.4 Fator de rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno (S_2)	37
4.4.5 Fator estatístico (S_3)	39
4.4.6 Pressão dinâmica	40
4.4.7 Coeficientes de força	40
4.4.8 Momento torçor	43
4.4.9 Efeitos de vizinhança	45
5 EDIFÍCIOS ESTUDADOS	48
5.1 CARLOS STEINEN	48
5.2 LIÈGE	50

5.3 HOME STAY	52
5.4 OFFICE BARRA SUL	54
5.5 CRON MY WAY	56
5.6 GRAÇA	57
5.7 RESORT RESIDENCE	59
6 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	61
6.1 CARLOS STEINEN	61
6.2 LIÈGE	66
6.3 HOME STAY	71
6.4 OFFICE BARRA SUL	76
6.5 CRON MY WAY	81
6.6 GRAÇA	86
6.7 RESORT RESIDENCE	91
7 CONCLUSÕES	97
REFERÊNCIAS	99

1 INTRODUÇÃO

A aerodinâmica é, relativamente, uma ciência nova. As primeiras pesquisas relacionadas com o comportamento dos sólidos imersos em um fluxo de ar remontam ao início dos experimentos com aviões e dirigíveis. Esses estudos utilizavam túneis de vento em que o escoamento do ar era o mais suave possível (não turbulento), procurando, dessa forma, simular as características reais do voo.

Por outro lado, logo após a I Guerra Mundial, com a ascensão dos Estados Unidos da América como grande potência econômica, cidades como Detroit e Nova York aventuraram-se no desafio de erguerem edifícios de grande altura, logo batizados de arranha céus. Os projetistas e usuários dessas edificações logo perceberam os efeitos, às vezes desastrosos, da ação do vento. Iniciaram-se então, os primeiros estudos para previsão das cargas do vento nessas estruturas. Esses estudos eram conduzidos em túneis de vento aeronáuticos e só mais tarde, com o avanço da aerodinâmica e a contribuição de vários pesquisadores, constatou-se que as simulações nesse tipo de túnel de vento conduziam a resultados bastante discrepantes dos dados reais. A partir daí, túneis de vento que simulavam a camada limite atmosférica passaram a ser adotados e a concordância com os resultados reais tornou-se adequada.

No Brasil, na falta de registro de sismos de grande intensidade, o vento é o esforço horizontal mais importante que atua nas edificações. Até alguns anos atrás o carregamento do vento despertava o interesse de poucos pesquisadores, visto que na prática as obras não eram significativamente perturbadas pelos seus efeitos. Mas a súbita expansão da demanda por habitações e por espaços comerciais pressionou arquitetos e projetistas a procurarem modelos de edificações que fossem visualmente agradáveis e funcionalmente eficientes. Edifícios arrojados e esbeltos preencheram o horizonte das grandes cidades, induzindo efeitos estáticos e dinâmicos muito significativos que não são adequadamente previstos nos textos normativos.

A relevância do tema cresce na mesma proporção que as edificações se distanciam da forma paralelepípedica, a vizinhança aumenta e os materiais empregados nos processos construtivos tornam-se mais leves. Estes fatores, aliados ao desconhecimento ou a negligência de muitos

projetistas, podem causar sérios problemas de segurança e, outros tantos, de ordem econômica.

Este trabalho dedica-se ao estudo dos efeitos de vizinhança em edificações com forma geométrica diferente da paralelepípedica. O estudo é baseado em dados de relatórios técnicos de edifícios ensaiados em túnel de vento e na aplicação dos preceitos da NBR 6123/1988 nesses edifícios.

O conteúdo deste trabalho está estruturado na forma de sete capítulos. No capítulo 2 são apresentadas as diretrizes da pesquisa, na qual são detalhados os objetivos do trabalho, o pressuposto, as delimitações, as limitações e o delineamento do trabalho. O capítulo 3 faz uma regressão histórica da técnica empregada na simulação do vento natural, apresenta o túnel de vento Professor Joaquim Blessmann e aborda a semelhança de modelos e a recomposição das forças no túnel de vento. No capítulo 4 são detalhadas as ações do vento nas edificações e a metodologia empregada pela NBR 6123/1988 para a previsão dessas ações. No capítulo 5 são apresentadas as características principais dos edifícios selecionados para este estudo. O capítulo 6 é composto pela análise comparativa entre os resultados obtidos dos ensaios em túnel de vento e os determinados através da aplicação dos preceitos da Norma. No capítulo 7 é finalizado o trabalho com a apresentação das conclusões.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: tendo em vista as limitações do anexo G da NBR 6123/1988, qual proposta pode ser apresentada para torná-lo mais abrangente?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundários e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do trabalho é a apresentação dos valores referentes aos fatores de vizinhança, devidos aos efeitos do vento em edificações com formas geométricas diferentes da paralelepípedica, que possam ser incorporadas ao texto da Norma.

2.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários do trabalho são:

- a) a comparação das solicitações de esforço cortante e momento fletor, obtidos através dos ensaios em túnel de vento de edificações não paralelepípedicas, com estas determinadas pela aplicação dos preceitos da Norma;
- b) a proposição de uma nova configuração para a expressão da fórmula principal de trabalho da NBR 6123/1988, com a incorporação do fator de vizinhança.

2.3 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que os valores dos esforços, obtidos nos ensaios em túnel de vento, são os mais próximos dos reais.

2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se ao estudo de edifícios, em escala reduzida, ensaiados num mesmo túnel de vento.

2.5 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) os ensaios já haviam sido realizados para outras finalidades, apenas os resultados foram disponibilizados para este estudo;
- b) as ações dinâmicas do vento não são consideradas;
- c) são estudados apenas os esforços devidos a força de arrasto do vento.

2.6 DELINEAMENTO

O trabalho é realizado através das etapas apresentadas a seguir que estão representadas na figura 1 e são descritas nos próximos itens:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) seleção dos edifícios estudados;
- c) análise dos dados experimentais dos edifícios ensaiados;
- d) aplicação dos preceitos da Norma aos edifícios em estudo;
- e) comparação entre os resultados dos ensaios e os obtidos pela aplicação dos preceitos da Norma;
- f) conclusões.

A pesquisa bibliográfica foi direcionada:

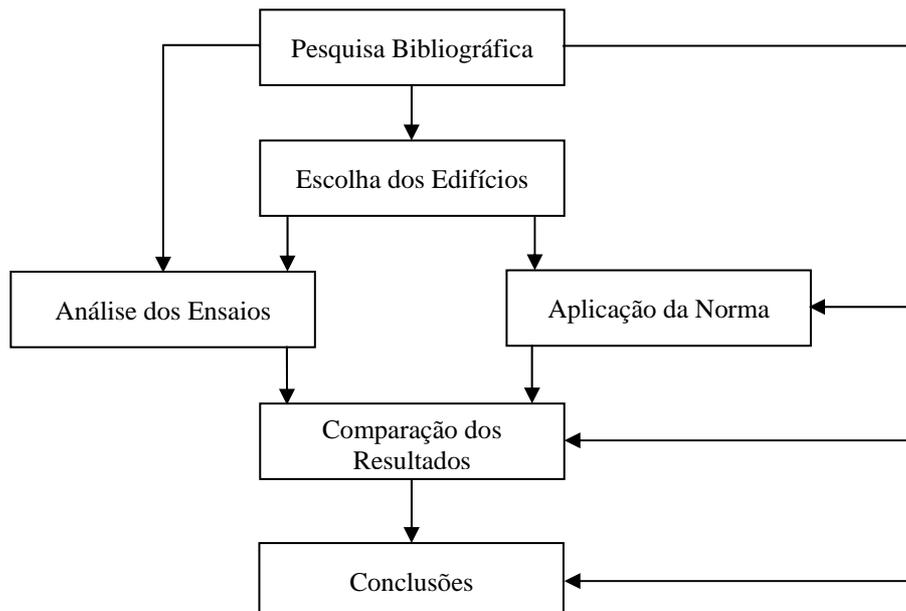
- a) à correta simulação das características do perfil de velocidades do vento em túnel de vento;

- b) ao tratamento dado pela NBR 6123/1988 em relação às forças de arrasto em edificações e a consideração dos efeitos de vizinhança;
- c) à técnica experimental.

Após o estabelecimento das linhas gerais do trabalho, foram escolhidos os edifícios analisados neste estudo. Salienta-se que os projetos destes edifícios destinaram-se a serem efetivamente construídos e habitados, não sendo objetos de pesquisa acadêmica. A escolha destas edificações foi feita através da consulta aos relatórios técnicos emitidos pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). A partir da escolha dos edifícios, os dados experimentais dos ensaios e as informações técnicas relativas a localização do empreendimento, geometria do edifício e tipificação de uso foram usadas, principalmente, para executar a marcha de cálculo para a obtenção dos esforços devidos a ação estática do vento nestes edifícios. Todo esse procedimento seguiu a metodologia indicada na NBR 6123/1988.

Os dados experimentais dos ensaios foram selecionados e organizados na forma de tabelas e gráficos para que posteriormente fossem comparados com os resultados obtidos através da aplicação dos preceitos da Norma. Esse processo facilitou a determinação dos fatores de vizinhança dos edifícios e a sua comparação com os obtidos através da NBR 6123/1988.

Figura 1 – Representação esquemática do delineamento da pesquisa



(fonte: elaborado pelo autor)

3 SIMULAÇÃO DO VENTO NATURAL

Simular o vento natural é reproduzir as principais características do escoamento do vento no ambiente onde serão construídas as obras civis. Essa reprodução, necessariamente, terá de ocorrer em uma escala menor que a real e as variáveis envolvidas na simulação, facilmente controláveis. Todavia, o processo que envolve a simulação, depende da técnica e do conhecimento acumulados pelos profissionais que se dedicam a essa atividade. Blessmann (2009, p. 101), pioneiro na técnica de simulação do vento natural no Brasil, salienta que a melhor maneira de comprovar a importância da simulação correta das principais características do vento natural, seria através da comparação das medidas efetuadas em uma edificação real e em seu modelo colocado em túnel de vento. Dos estudos comparativos feitos por diversos autores, pode-se concluir que não é possível definir uma regra geral ou um parâmetro numérico que permita passar de resultados de ensaios em escoamento de ar, uniforme e suave, para as ações correspondentes ao vento natural.

No item a seguir é feita uma descrição histórica sobre as origens da técnica de simulação do vento natural. Para complementar o capítulo são apresentados o túnel de vento Professor Joaquim Blessmann, os princípios básicos para as condições de semelhança e a recomposição das forças nos ensaios em túnel de vento.

3.1 ORIGENS DA SIMULAÇÃO DO VENTO NATURAL

No final do século XIX, pesquisadores de diversas nacionalidades interessaram-se por determinar os esforços impostos pelo vento nas edificações. Blessmann (1990, p. 110) relata que Kernot e Mann, na Universidade de Melbourne, Austrália, pesquisaram o comportamento do vento em diversos sólidos, de seções distintas, em um pequeno túnel de vento com o fluxo de ar gerado por um ventilador. Irminger, engenheiro de uma companhia de gás de Copenhague, Dinamarca, estudou uma série de pequenos corpos prismáticos. Ele aproveitava-se da depressão provocada pela passagem dos gases em uma chaminé para fazer circular o ar no interior de sua pequena câmara de ensaios. Eiffel, o célebre engenheiro Francês, abandonava seus modelos presos a um cabo, do alto da torre que leva seu nome, até que estes chegassem à velocidade uniforme, calculando então, a força de arrasto no modelo.

Com o advento dos aviões, os túneis aerodinâmicos começaram a ser utilizados sistematicamente para o estudo do comportamento das aeronaves. Novos e sofisticados túneis de vento foram criados para atender a demanda crescente que o novo meio de transporte exigia. A atmosfera, no interior destes dispositivos, deveria ser a mais calma possível (livre de turbulência) para simular a realidade do voo. As primeiras normas sobre a ação do vento nas edificações foram obtidas através de ensaios, em modelos de construções, neste tipo de dispositivo (BLESSMANN, 1990, p. 110-111).

O avanço das pesquisas relacionadas com o comportamento das edificações ao vento e as medidas das pressões obtidas em edificações reais, chamaram a atenção dos pesquisadores para as discrepâncias em torno dos resultados. Blessmann (1990, p. 111) conclui que “Estes estudos mostraram a importância da simulação correta, e na escala de modelos, da camada limite atmosférica.”.

De acordo com Blessmann (1990, p. 112-113), na segunda metade do século XX algumas técnicas foram desenvolvidas para a simulação do vento natural. Jensen e Frank sugeriram o cobrimento de uma grande extensão do piso do túnel de vento com um material de rugosidade adequada. Com este procedimento, simulava-se a principal fonte de turbulência da atmosfera a baixas altitudes. Estes estudos estimularam Davenport a construir um túnel de vento de camada limite na University of Western Ontario, London, Canadá, no ano de 1965.

Com o grande impulso dado por Davenport na simulação do vento natural, outras técnicas foram incorporadas no desenvolvimento dos túneis de vento. Blessmann (1990, p. 113) cita algumas destas técnicas que consistem, basicamente, na inserção de obstáculos a barlavento do modelo, no início da câmara de ensaios:

- a) telas curvas ou telas planas de malha variável: perfil de velocidades médias e turbulência fina;
- b) grelhas de barras telas horizontais de seção 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 seção retangular: turbulência superposta a uma corrente de ar aproximadamente uniforme;
- d) grelha única de malha variável ou diversas grelhas superpostas: perfil de velocidades médias e turbulência;
- e) tela uniforme: turbulência fina superposta a uma corrente de ar uniforme;

- f) barras finas metálicas de seção circular, variando o diâmetro e/ou o espaçamento: perfil de velocidades médias e turbulência fina;
- g) triângulos de diversas dimensões e proporções, cheios ou vazados, de lados retos ou curvos: perfil de velocidades médias e turbulência.

Todos estes processos utilizam corpos sólidos para reproduzir uma ou mais características do vento natural e, portanto, causam uma obstrução ao escoamento do ar com uma conseqüente diminuição da velocidade média obtida no túnel de vento. Em certos casos, como a inserção de grelhas de malha quadrada de elevado índice de área exposta, reduções de até 80% são observadas (BLESSMANN, 1990, p. 113).

Técnicas mais recentes utilizam meios puramente aerodinâmicos para reproduzirem o escoamento do vento natural. Segundo Blessmann (1990, p. 114), o objetivo é alcançado lançando-se jatos de ar perpendiculares ao escoamento gerado no túnel de vento. Esta técnica permite um maior controle das características do vento, sem que haja uma diminuição da velocidade média da corrente de ar.

3.2 TÚNEL DE VENTO PROFESSOR JOAQUIM BLESSMANN

No Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) está em operação o Túnel de Vento Professor Joaquim Blessmann (figura 2), nome dado em homenagem ao seu idealizador. Este túnel de vento foi o primeiro dispositivo do gênero na América do Sul e, por aproximadamente 25 anos, o único capaz de simular corretamente as características do vento natural. A Norma Brasileira de Ventos em Edificações (NBR 6123/1988) incorporou os resultados dos estudos desenvolvidos neste laboratório.

Atualmente, o Túnel de Vento Professor Joaquim Blessmann é requisitado por empresas e instituições interessadas em otimizar o comportamento das estruturas com relação às ações do vento. Sua relação comprimento/altura é igual a 10,3 e conta com 4 mesas giratórias nas quais são fixados os modelos. A figura 3 mostra uma vista em planta baixa do túnel de vento em que se pode visualizar a posição destas mesas. A função delas é descrita por Blessmann (1990, p. 114-115) a seguir:

- 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.

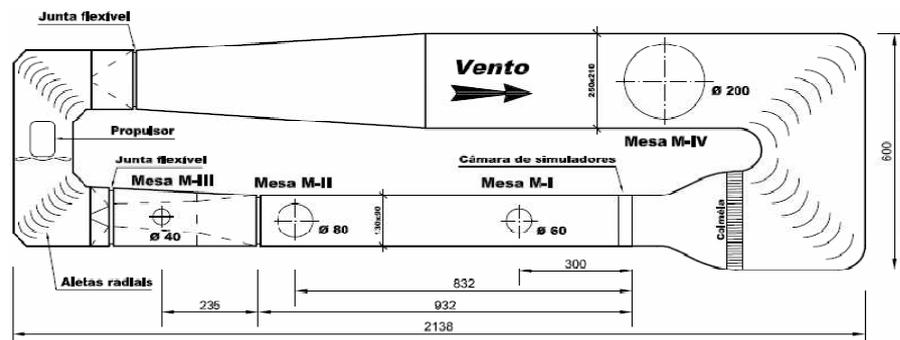
Ainda, de acordo com Blessmann (1990, p. 115), “As três primeiras mesas tem a parte superior destacável, podendo-se usar um disco de aço, em todas as três, ou de madeira, nas duas primeiras. Todas as três permitem ensaios dinâmicos, quando for empregado disco de aço como mesa.”.

Figura 2 – Túnel de Vento Professor Joaquim Blessmann



(fonte: UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, [2012])

Figura 3 – Planta baixa do Túnel de Vento Professor Joaquim Blessmann



(fonte: BLESSMANN, 1990, p. 115)

3.3 CONDIÇÕES DE SEMELHANÇA

As leis que regem as condições de semelhança foram estabelecidas no século XIX e serviram de base para o estudo dos protótipos reais, em todos os campos da Engenharia, através dos modelos em escala. O objetivo deste processo é simular corretamente o comportamento do protótipo, em escala real, com o modelo, em escala reduzida.

De acordo com Blessmann (1990, p. 62), para obter-se as condições de semelhança é necessário que se tenha semelhança cinemática, geométrica e dinâmica. Satisfeitas estas três condições, pode-se concluir, com segurança, que o comportamento do modelo reflete o comportamento do protótipo.

Segundo Blessmann (1990, p. 62), a semelhança geométrica é fisicamente obtida quando “[...] formas semelhantes [são] dispostas com a mesma orientação em relação aos dois escoamentos. A semelhança de formas inclui também a semelhança de detalhes e de rugosidades das superfícies dos dois sólidos.”. Desta primeira lei de semelhança conclui-se que a razão entre quaisquer dimensões equivalentes entre o protótipo e o modelo deve ser constante. Em linguagem matemática: $l_1/l_2 = \text{constante}$.

A semelhança cinemática é fisicamente obtida, de acordo com Blessmann (1990, p. 62), “[...] como uma semelhança geométrica dos escoamentos. A distribuição de velocidades médias e as características da turbulência devem ser análogas nos dois escoamentos.”. Matematicamente tem-se que a razão entre todos os pares de pontos é constante, ou seja: $u_1/u_2 = \text{constante}$.

Para obter-se fisicamente a semelhança dinâmica, Blessmann (1990, p. 62) afirma que ela pode ser vista “Como uma semelhança geométrica das forças. As forças idênticas (forças de pressão, de viscosidade, de inércia, etc.) em dois pontos correspondentes nos dois escoamentos são paralelas e guardam uma proporção constante.”. Matematicamente tem-se que são constantes os módulos das forças em todos os pares de pontos correspondentes nos dois escoamentos, ou seja: $F_1/F_2 = \text{constante}$.

3.4 RECOMPOSIÇÃO DAS FORÇAS NOS ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO

Nos ensaios em túnel de vento, o processo usual para obtenção das forças atuantes nos modelos em estudo, consiste em determinar os coeficientes aerodinâmicos na superfície dos mesmos. No túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann esses coeficientes são obtidos através de séries temporais de pressão. Para esta finalidade são utilizados transdutores elétricos de pressão, conectados a tubos dispostos convenientemente sobre a superfície do modelo, que registram centenas de leituras para cada intervalo de tempo predeterminado. A partir da integração destas séries obtém-se o coeficiente de pressão média através da fórmula 1 (trabalho não publicado)¹:

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

Onde:

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

T = intervalo de tempo de amostragem (s);

$p(t)$ = pressão instantânea, na superfície da edificação, medida em relação à pressão estática de referência (Pa);

t = tempo (s);

q = pressão dinâmica (Pa).

¹ Informações obtidas do relatório Ação Estática do Vento sobre o edifício Carlos Steinen, São Paulo/SP. Relatório elaborado em 2011 pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob responsabilidade do Prof. Acir Mércio Loredo-Souza e sua equipe.

Segundo Blessmann (1990, p. 50), o coeficiente de forma externo aplicável a uma superfície plana de área A é definido pela fórmula 2:

$$C_e = \frac{F_e}{qA} \quad (\text{fórmula 2})$$

Onde

C_e = coeficiente de forma externo;

F_e = resultante das pressões externas sobre a superfície plana (força perpendicular a esta superfície) (N);

A = área da superfície plana (m^2);

q = pressão dinâmica (Pa).

O coeficiente de forma interno é definido de forma análoga ao que foi exposto para o coeficiente de forma externo e o coeficiente de forma pode ser determinado através da fórmula 3:

$$C = C_e - C_i \quad (\text{fórmula 3})$$

Onde:

C = coeficiente de forma;

C_e = coeficiente de forma externo;

C_i = coeficiente de forma interno.

Ainda, de acordo com Blessmann (1990, p. 58), as forças nas direções dos eixos principais podem ser obtidas através dos respectivos coeficientes de força (fórmulas 4 e 5):

$$F_x = C_x q A_x \quad (\text{fórmula 4})$$

$$F_y = C_y q A_y \quad (\text{fórmula 5})$$

Onde:

F_x = força na direção X (N);

F_y = força na direção Y (N);

C_x = coeficiente de força na direção X;

C_y = coeficiente de força na direção Y;

q = pressão dinâmica (Pa);

A_x = área da seção de referência no eixo X (m²);

A_y = área da seção de referência no eixo Y (m²).

4 AÇÕES DO VENTO EM EDIFICAÇÕES

As ações do vento em edificações são divididas em dois tipos: as estáticas e as dinâmicas. Este procedimento é uma simplificação bem tolerada na Engenharia Estrutural, visto que, tal procedimento, permite uma aproximação razoável para a estimativa das cargas impostas pelo vento às edificações de uso corrente.

Segundo Blessmann (1989, p. 15), “As cargas devidas ao vento são, na realidade, dinâmicas, pois as pressões exercidas sobre uma edificação variam tanto pelas flutuações da velocidade do vento, como pelos vórtices e pelas alterações nas linhas de corrente, causadas pela própria edificação.”. Resumindo: as ações estáticas são devidas a energia do vento contida em torno da sua velocidade média. As ações dinâmicas são dependentes da energia cinética contida nas flutuações e de como esta energia se distribui pelas diversas frequências (BLESSMANN, 1995, p. 101).

Nos itens a seguir, são abordados a influência das proporções, os regimes de escoamento, a influência dos efeitos de vizinhança e o procedimento adotado pela NBR 6123/1988. Os três primeiros ajudam o leitor a compreender o fenômeno da interação do vento com as edificações e, o último, aborda a aplicação da Norma no cálculo dos carregamentos devidos a ação estática do vento.

4.1 INFLUÊNCIA DAS PROPORÇÕES

Segundo Blessmann (1990, p. 102-103):

A maioria dos ensaios feitos até a poucos anos com modelos de edificações civis eram bidimensionais. Também as normas de diversos países, que neles se basearam, não levavam em conta a influência da terceira dimensão do modelo e da obliquidade do vento incidente.

Os valores dos coeficientes de pressão e de força mudam quando passamos do caso bi para o tridimensional. E neste último, variam com a relação entre as dimensões.

Ainda, de acordo com Blessmann (1990, p. 103-104), ao estudar-se a influência das proporções das edificações, é necessário referir-se a alguns conceitos ligados ao vento. São eles:

- a) vento: incide normal ou aproximadamente normal a uma fachada;
- b) seção transversal: fachada perpendicular à direção do vento ou uma seção a ela paralela e de maior área;
- c) seção longitudinal: fachada paralela à direção do vento ou uma seção a ela paralela e de maior área;
- d) largura: dimensão perpendicular à direção do vento;
- e) profundidade: dimensão paralela à direção do vento;
- f) altura: dimensão vertical.

As edificações de forma paralelepípedica podem ser classificadas de acordo com suas proporções em: alteadas, alargadas e profundas. Nas edificações alteadas, a altura é a dimensão preponderante em relação à largura e a profundidade. Em edificações com esta característica, o escoamento do vento pelo topo influi tanto menos no esforço global quanto mais alteada for a edificação. A zona da esteira apresenta uma agitação muito pronunciada e com uma perda de energia apreciável. Esses fenômenos se traduzem por grandes esforços sobre a edificação. Nas edificações muito alteadas os esforços e pressões são praticamente iguais aos de uma edificação longa (BLESSMANN, 1990, p. 104).

De acordo com Blessmann (1990, p. 104-105), quando a largura é a dimensão preponderante, classifica-se a edificação como alargada. Se este tipo de edificação for construída afastada do terreno ou de outra base plana, seu comportamento é similar ao de uma edificação alteada. No caso mais geral, no qual a construção é assente ou muito próxima do terreno, o próprio terreno dificulta ou impede a formação dos turbilhões alternados em ambos os lados do plano médio. Quanto mais alargada for a construção, menor é a influência do fluxo que passa pelos extremos. A esteira é caracterizada por um grande turbilhão estacionário e outros menores com pequena agitação.

Ainda, segundo Blessmann (1990, p. 105-106), edificações profundas caracterizam-se por apresentar a profundidade como dimensão preponderante sobre as demais. O comportamento do vento ao incidir perpendicularmente à fachada menor é semelhante ao das edificações alteadas. Porém, a influência do fluxo que passa pelo topo é muito maior do que no caso das edificações alteadas, diminuindo o ímpeto do movimento da esteira. Quanto mais profunda for uma edificação, maior é a tendência da ocorrência do recolamento do fluxo nas faces laterais. Este recolamento (facilitado por ventos de maior turbulência) provoca uma diminuição da esteira e, conseqüentemente, das sucções a sotavento do escoamento.

Edificações com profundidade muito acentuada têm a formação de dois turbilhões estacionários na esteira.

4.2 REGIMES DE ESCOAMENTO

Em edificações alinhadas à direção do vento Cook² (1990 apud CARPEGGIANI, 2004, p. 7) admite três regimes de escoamento:

- a) de corpo isolado;
- b) deslizante;
- c) de interferência de esteira.

Quando os edifícios estão suficientemente afastados pode-se dizer que o comportamento ao vento é similar ao comportamento isolado, livre de qualquer vizinhança. Há uma distância suficiente entre eles para que haja a formação da esteira, no primeiro edifício a barlavento, e o recolamento junto ao solo a sotavento do escoamento. Existe a formação de vórtices no pé das fachadas de ambos os edifícios. Dá-se a esse regime o nome de regime de escoamento de corpo isolado (COOK³, 1990 apud CARPEGGIANI, 2004, p. 7).

Ainda, segundo Cook⁴ (1990 apud CARPEGGIANI, 2004, p. 7), diminuindo-se a distância que separa os edifícios, criam-se as condições para a formação de um vórtice estável entre eles. Fica, então, caracterizado um regime de escoamento deslizante. A visualização deste efeito, nos ensaios em túnel de vento, permite concluir que o escoamento literalmente salta ou desliza sobre o topo dos edifícios. Medidas efetuadas no edifício situado a sotavento do primeiro indicam um efeito de proteção deste, caracterizado por uma diminuição notável das forças atuantes.

O regime denominado de escoamento de interferência da esteira representa um estágio intermediário aos anteriores. Não há espaço para a formação da esteira, mas a separação é

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

³ op. cit.

⁴ op. cit.

suficientemente grande para impedir a formação de um vórtice estável (COOK⁵, 1990 apud CARPEGIANI, 2004, p. 7).

4.3 INFLUÊNCIA DOS EFEITOS DE VIZINHANÇA

Geralmente, os esforços devidos ao vento em edificações são determinados analiticamente através da aplicação de coeficientes de força obtidos de textos normativos ou relatórios de pesquisa. Estes coeficientes referem-se, invariavelmente, a edificações isoladas e paralelepípedicas. Todavia, a presença de edificações próximas pode alterar completamente o campo aerodinâmico que envolve esta edificação, amplificando as forças, os momentos fletores e torçores e as sucções. A NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 58, grifo do autor), em seu anexo G, afirma que essas edificações podem causar aumento dos esforços do vento de três modos diferentes:

- a) por efeito Venturi: edificações vizinhas podem, por suas dimensões, forma e orientação, causar um **afunilamento** do vento, acelerando o fluxo de ar, com conseqüente alteração nas pressões. Este efeito aparece principalmente em edificações muito próximas, [...];
- b) por deflexão do vento na direção vertical: edificações altas defletem para baixo parte do vento que incide em sua fachada de barlavento, aumentando a velocidade em zonas próximas ao solo;
- c) pela turbulência da esteira: uma edificação situada a sotavento de outra pode ser afetada sensivelmente pela turbulência gerada na esteira da edificação de barlavento, podendo causar efeitos dinâmicos (**efeitos de golpe**) consideráveis e alterações nas pressões.

A comissão que implementou a NBR 6123/1988 incorporou os estudos de vizinhança desenvolvidos no Laboratório da Aerodinâmica das Construções (LAC). Sobre o assunto, Blessmann (1989, p. 34, grifo do autor) explica:

O Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC) do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) desenvolveu um extenso e sistemático estudo de efeitos de vizinhança em dois edifícios prismáticos de seção quadrada, com altura igual a seis vezes a aresta da base. Na primeira etapa foram estudados, em corrente de ar uniforme e de baixa turbulência (vento **uniforme e suave**), os efeitos do vento em 15 posições relativas de vizinhança, sendo medidas as pressões estáticas médias em mais de 67 mil pontos. A segunda etapa inclui a mesma série de casos de vizinhança com simulação das principais características do vento natural (vento **deslizante e turbulento**), com

⁵ COOK, N. J. **The designer's guide to wind loading of building structures** – Part. 2: Static Structures. London, UK: Building Research Establishment, 1990.

um expoente do perfil vertical de velocidades médias $p = 0,34$. A intensidade de turbulência variou de cerca de 30 % (próximo à base dos modelos) a cerca de 10% (no topo dos mesmos).

Devido à impossibilidade de normatizar todas as possibilidades de vizinhança, a NBR 6123/1988 recomenda que para casos mais específicos sejam adotados ensaios em túnel de vento. Esses ensaios devem simular as características do vento natural e a interferência que as edificações no entorno causam na edificação em estudo.

4.4 PROCEDIMENTO RECOMENDADO PELA NBR 6123/1988

De uma forma geral, os textos normativos surgem da necessidade de padronizar e facilitar o trabalho dos técnicos das diversas áreas profissionais que fazem uso das normas. A NBR 6123/1988 é o texto técnico de referência para a determinação das solicitações originárias do carregamento horizontal mais atuante nas obras civis no Brasil: o vento. Caso não existissem publicações deste tipo, os projetistas teriam que recorrer a métodos muito mais trabalhosos e onerosos, como os ensaios em túnel de vento, para poderem determinar estas solicitações. Nos próximos itens são apresentados os procedimentos da NBR 6123/1988 para a determinação das ações estáticas do vento nas edificações.

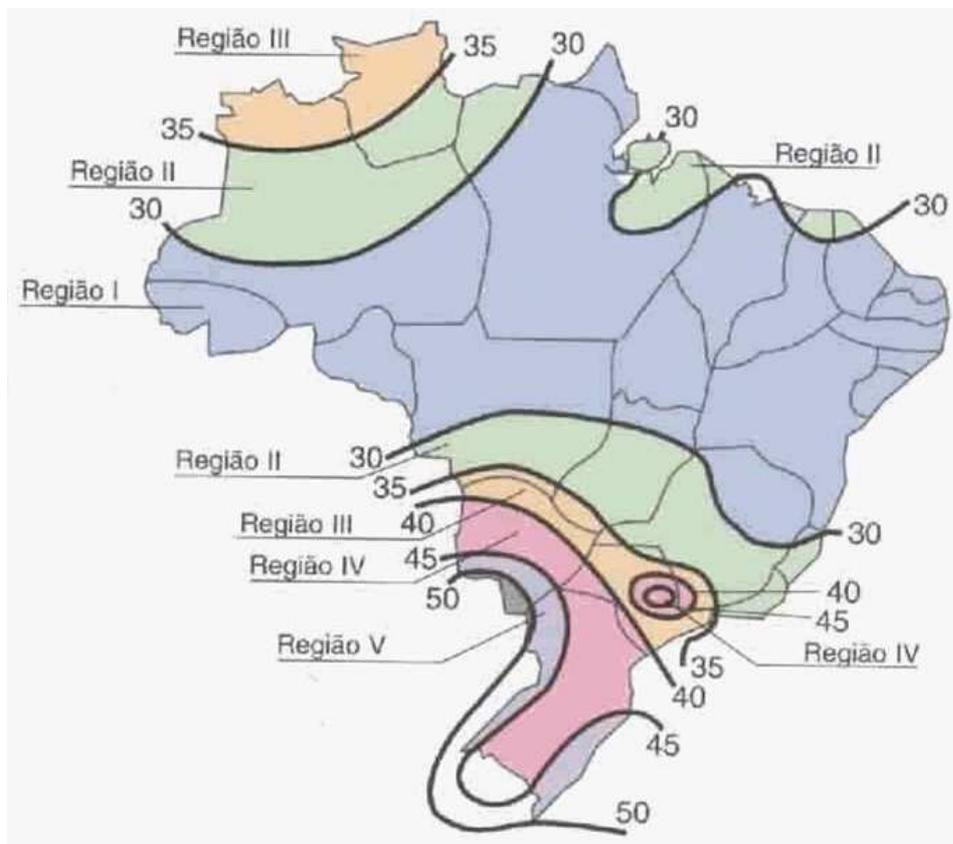
4.4.1 Velocidade básica do vento

O primeiro questionamento que surge ao projetista estrutural ao estimar as ações do vento é: a qual velocidade máxima de vento estará submetida a edificação durante a sua vida útil de projeto? A determinação desta velocidade é cheia de incertezas devido a grande aleatoriedade dos fenômenos meteorológicos que originam o vento e as limitações técnicas dos dispositivos que a medem (BLESSMANN, 1988, p. 12). As dificuldades aumentam na medida em que edificações de dimensões diferentes têm comportamentos distintos em relação ao mesmo vento. Edificações de dimensões maiores quando submetidas à ação de rajadas de curta duração, são muito pouco influenciadas por estas. Todavia, a mesma rajada ao envolver uma edificação pequena poderá impor a esta danos bastante significativos. Sabe-se que quanto maior for a velocidade da rajada, menor será a sua duração e, portanto, menor será a sua influência em edificações maiores.

O comportamento da velocidade do vento também muda com a altura e a rugosidade do terreno. Próximo à superfície terrestre, a rugosidade do terreno produz uma força retardadora que tende a anular a velocidade do vento. Na medida em que o vento se afasta da superfície do terreno, a sua velocidade aumenta até estabilizar-se na velocidade gradiente. Este perfil de velocidades vai desde zero, próximo à superfície, até a velocidade gradiente e é chamada de camada limite atmosférica.

A velocidade básica do vento, para efeitos estáticos, é definida pela NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 5) como “A velocidade de uma rajada de 3 s, excedida em média uma vez em 50 anos, a 10 m acima do terreno, em campo aberto e plano.”. Essa velocidade pode ser obtida graficamente através do mapa das isopletras da velocidade básica do vento no Brasil, com intervalos de 5 m/s, disponível na Norma e reproduzido na figura 4.

Figura 4 – Mapa das isopletras da velocidade básica do vento no Brasil



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 6)

De acordo com Blessmann (1988, p. 31), as entidades ligadas ao estudo das ações do vento na Engenharia Estrutural divergem a respeito do intervalo de tempo a considerar na determinação da velocidade básica (definida como uma velocidade de referência). Sobre a escolha da velocidade básica em rajadas de três segundos pela NBR 6123/1988, Blessmann (1988, p. 32) também explica:

[...] no Brasil, os dados mais confiáveis, para uma cobertura razoável de todo o território nacional, são os do Serviço de Proteção ao Voo do Ministério de Aeronáutica, com 49 estações, todas elas localizadas em aeroportos. As leituras das velocidades médias estimadas sobre 30 segundos (na teoria, sobre um minuto) são feitas de hora em hora, com vários regimes de funcionamento (14, 18, ou 24 horas por dia, conforme a importância do aeroporto). São também anotados valores excepcionais de rajadas de três segundos, a qualquer tempo, durante o período de funcionamento da estação.

As condições de leitura e registro tornam mais conveniente adotar como referência, no Brasil, o intervalo de tempo de três segundos. A passagem das leituras médias sobre 30 segundos para 3 segundos foi feita multiplicando as velocidades médias sobre 30 segundos por 1,15 [...].

4.4.2 Velocidade característica do vento

A velocidade característica do vento é obtida através da aplicação de coeficientes de correção à velocidade básica. A NBR 6123/1988 indica três coeficientes que representam respectivamente:

- a) o fator topográfico (S_1);
- b) a rugosidade do terreno, as dimensões da edificação e altura sobre o terreno (S_2);
- c) o fator estatístico (S_3).

Estes coeficientes devem ser multiplicados pela velocidade básica do vento, V_0 (adequada ao local onde a estrutura será construída), para obter-se a velocidade característica do vento, V_k , conforme a fórmula 6:

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 \quad (\text{fórmula 6})$$

Onde:

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

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

S_1 = fator topográfico;

S_2 = fator de rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno;

S_3 = fator estatístico.

4.4.3 Fator topográfico (S_1)

De acordo com a NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 5), o fator topográfico considera as variações do relevo, basicamente, minorando as velocidades quando as edificações se encontram em vales e, majorando, quando as edificações se encontram em morros e taludes.

Para terrenos planos ou fracamente acidentados, a Norma (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 5) preconiza $S_1 = 1,0$. Em taludes e morros alongados, em que se admite que o fluxo de ar possa ser bidimensional, $S_1 = 1,0$. Em relevos que ficam caracterizados como os da figura 5, o ponto A, em morros ou taludes, $S_1 = 1,0$. Em taludes, o ponto C, $S_1 = 1,0$. Para o ponto B, tanto em morros quanto em taludes, S_1 é variável em função da altura: quando $\theta \leq 3^\circ$, $S_1 = 1,0$; quando $6^\circ \leq \theta \leq 17^\circ$, S_1 é dado pela fórmula 7, devendo ser, obrigatoriamente, maior do que 1,0; quando $\theta \geq 45^\circ$, S_1 é dado pela fórmula 8, devendo ser, obrigatoriamente, maior do que 1,0. Os ângulos compreendidos entre: $3^\circ < \theta < 6^\circ$ e $17^\circ < \theta < 45^\circ$ devem ser interpolados linearmente.

Nas regiões entre A e B e entre B e C, o fator S_1 é obtido mediante interpolação linear. Em vales profundos, protegidos de ventos de qualquer direção, $S_1 = 0,9$ (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 5).

Assim, tem-se que:

$$S_1(z) = 1,0 + \left(2,5 - \frac{z}{d}\right) \tan(\theta - 3^\circ) \quad (\text{fórmula 7})$$

$$S_1(z) = 1,0 + \left(2,5 - \frac{z}{d}\right) 0,31 \quad (\text{fórmula 8})$$

Onde:

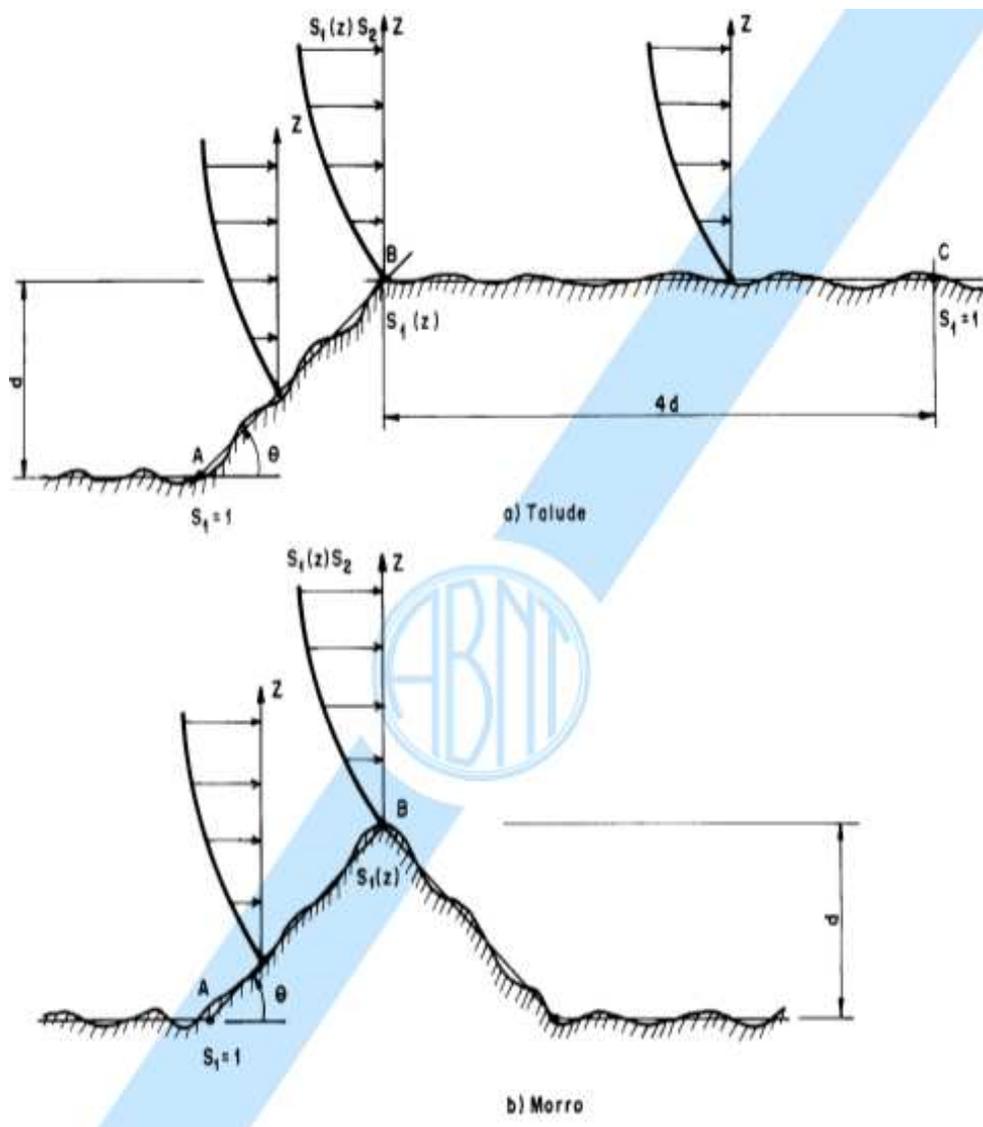
S_1 = fator topográfico;

z = altura medida a partir da superfície do terreno no ponto considerado (m);

d = diferença de nível entre a base e o topo do talude ou morro (m);

θ = inclinação média do talude ou encosta do morro ($^\circ$).

Figura 5 – Fator topográfico S1



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 7)

4.4.4 Fator de rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno (S_2)

A NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 8) 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 partes da edificação em consideração. A rugosidade do terreno aumenta na medida em que os obstáculos tornam-se mais numerosos e de dimensões maiores. A consequência é uma tendência da velocidade do vento diminuir, considerada a mesma altura, porém, a turbulência aumenta, induzindo uma região de influência da rugosidade bem maior que as dimensões da própria edificação, caracterizando uma elevação da camada limite atmosférica.

Uma edificação de menores dimensões, ou elementos menores de edificações de maior porte, é bastante afetada por rajadas de curta duração. Entretanto, é necessária uma rajada de maior duração para que os seus efeitos possam ficar plenamente desenvolvidos em uma edificação de maior porte.

De acordo com a Norma (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 8), pode-se classificar a rugosidade em cinco categorias:

- a) categoria I: superfícies planas com extensões superiores a 5 km, medida na direção e sentido do vento incidente;
- b) 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 a 1,0 m;
- c) 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 3,0 m;
- d) 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 10 m;
- e) 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 25 m.

Segundo a NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 9), as classes de edificação foram escolhidas de acordo com o intervalo de tempo usado para o cálculo da velocidade média do vento. São elas:

- a) classe A (3 s): 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 m;
- b) classe B (5 s): toda edificação ou parte de edificação para qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja entre 20 e 50 m;
- c) classe C (10 s): toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50 m.

O fator S_2 usado no cálculo da velocidade do vento em uma altura z acima do nível geral do terreno é obtido pela fórmula 9:

$$S_2 = b F_r \left(\frac{z}{10} \right)^p \quad (\text{fórmula 9})$$

Onde:

S_2 = fator de rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno;

b = parâmetro;

F_r = fator de rajada;

z = altura acima do nível geral do terreno (m);

p = parâmetro.

A Norma (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 9) observa que o fator de rajada, F_r , é sempre o correspondente a categoria II. Ressalta também, que a fórmula 9 é aplicável até a altura z_g , que define o contorno superior da camada limite atmosférica. Os parâmetros b , F_r e p , para as cinco categorias de rugosidade que permitem determinar o fator S_2 são apresentados na tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros meteorológicos

Categoria	Z _g (m)	Parâmetro	Classes		
			A	B	C
I	250	b	1,1	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
		p	0,085	0,09	0,10
III	350	b	0,94	0,94	0,93
		p	0,10	0,105	0,115
IV	420	b	0,86	0,85	0,84
		p	0,12	0,125	0,135
V	500	b	0,74	0,73	0,71
		p	0,15	0,16	0,175

(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 9)

4.4.5 Fator estatístico (S₃)

O fator estatístico reflete a expectativa de durabilidade da edificação e o grau de segurança exigido da mesma. O nível de probabilidade (0,63) e a vida útil (50 anos) adotados são considerados adequados para edificações de uso corrente tais como moradias, hotéis, escritórios, etc. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 10). Para os objetivos deste trabalho, seguindo a recomendação da tabela 2, o fator S₃ é igual a 1,0.

Tabela 2 – Valores mínimos do fator estatístico S₃

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: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 10)

4.4.6 Pressão dinâmica

A pressão dinâmica é função da velocidade característica, sendo obtida através da fórmula 10. A relação é válida para as condições normais de pressão (1 atm = 1013 mba) e de temperatura (15 °C) (BLESSMANN, 1990, p. 46):

$$q = 0,613 V_k^2 \quad (\text{fórmula 10})$$

Onde:

q = pressão dinâmica (Pa);

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

4.4.7 Coeficientes de força

A resultante das forças do vento em uma edificação é denominada força global (F_g). Da decomposição da força global origina-se uma componente vertical, denominada força de sustentação (F_s) e, outra horizontal, denominada força de arrasto (F_a). A força de arrasto pode ser determinada através da fórmula 11 (BLESSMANN, 1990, p. 57):

$$F_a = C_a q A_e \quad (\text{fórmula 11})$$

Onde:

F_a = força de arrasto (N);

C_a = coeficiente de arrasto;

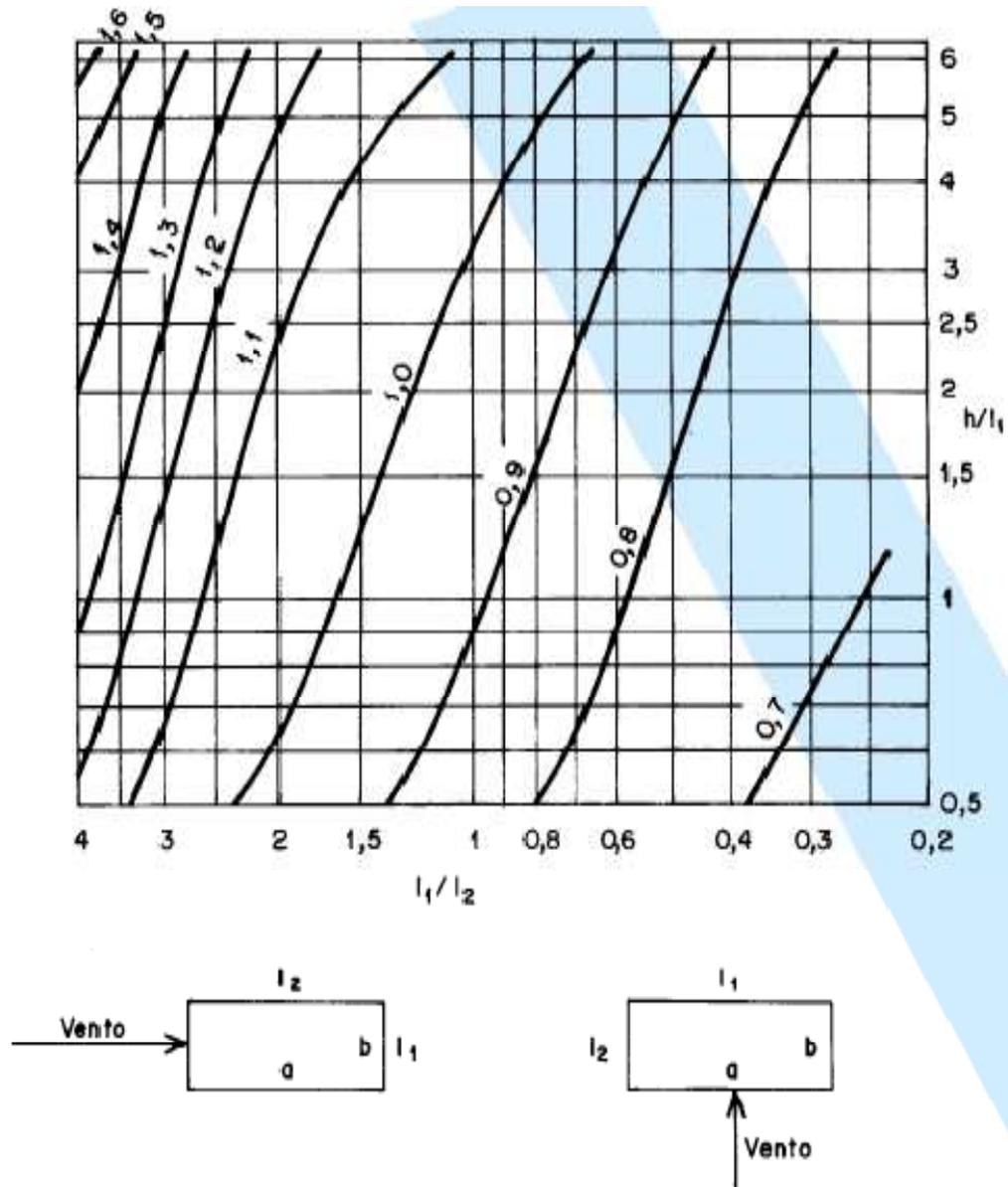
q = pressão dinâmica (Pa);

A_e = área da projeção ortogonal da edificação, estrutura ou elemento estrutural sobre um plano perpendicular à direção do vento (m^2)

A NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 19) apresenta coeficientes de arrasto para duas situações bastante distintas, mas faz ressalvas quanto a sua aplicação. Indica que somente são aplicáveis a corpos de seção constante ou fracamente variável.

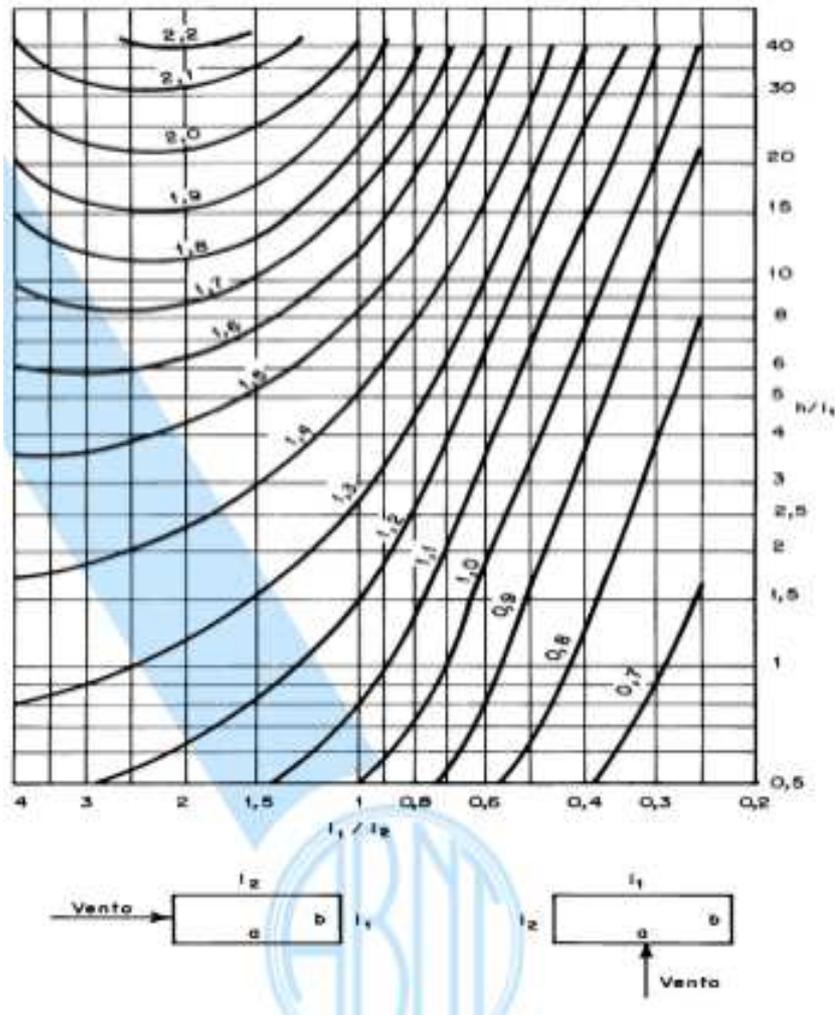
Em certas situações em que a edificação está imersa em vento de alta turbulência, ambiente comum nas grandes cidades, recomenda-se a utilização do gráfico da figura 6. Para ventos com escoamento suave ou moderadamente suave, típicos de relevos planos e com poucos obstáculos, deve-se utilizar o gráfico da figura 7 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 21). Para os edifícios estudados neste trabalho os coeficientes de arrasto foram determinados utilizando-se o gráfico da figura 7.

Figura 6 – Coeficientes de arrasto, C_a , para edificações paralelepípedicas em vento de alta turbulência



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 24)

Figura 7 – Coeficientes de arrasto, C_a , para edificações paralelepípedicas em vento de baixa turbulência



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 20)

4.4.8 Momento torçor

Todos os prédios de formatos prismáticos convencionais, exceção feita às seções circulares, estão sujeitos aos efeitos da torção aerodinâmica. O efeito é mais notável sempre que a incidência do vento for oblíqua ao eixo de simetria. Blessmann (1989, p. 15) afirma que:

[...] ensaios realizados em túneis de vento têm mostrado que mesmo em um edifício prismático de planta retangular (inclusive de seção quadrada) e, com eixo de torção coincidindo com o eixo geométrico e da estrutura, aparecem esforços de torção consideráveis. Isto acontece para certas incidências oblíquas do vento médio. Porém, mesmo com o vento médio incidindo perpendicularmente a uma das fachadas, aparecem esforços de torção, devidos à turbulência do vento, que faz com que um dado instante a distribuições de pressões seja assimétrica.

Em uma edificação paralelepédica submetida à ação do vento, sempre que a resultante das forças não coincidir com o seu eixo de torção aparecerá um momento torçor. A distância da reta suporte (da resultante das forças) ao eixo de torção é denominada excentricidade. O momento torçor pode ser calculado através da fórmula 12:

$$M_t = F_r e \quad (\text{fórmula 12})$$

Onde:

M_t = momento torçor (N.m);

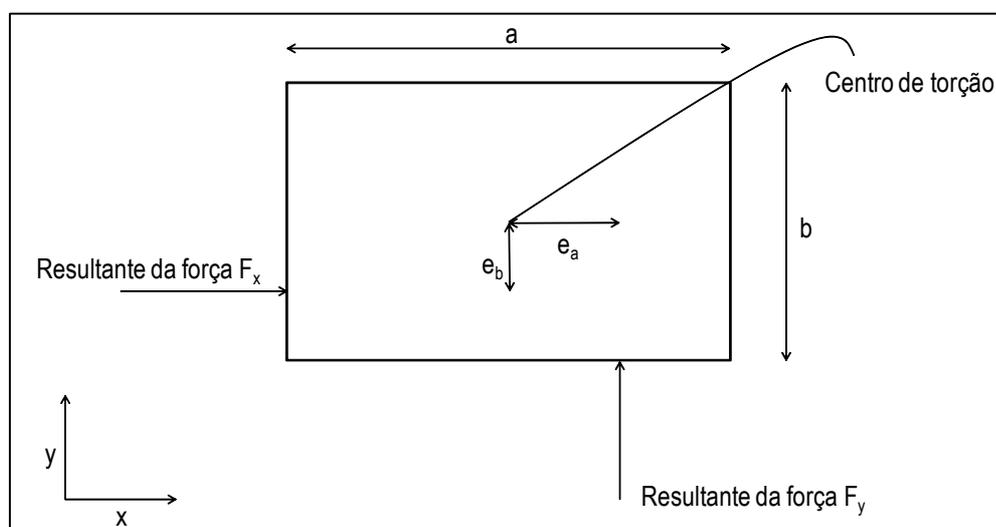
F_r = força resultante (N);

e = excentricidade (m).

A figura 8 mostra um esquema das excentricidades, e_a e e_b , para uma edificação de forma paralelepédica. Estas excentricidades foram tomadas em relação às dimensões principais (a e b) e aos eixos coordenados (X e Y).

A NBR 6123 prevê o aparecimento dos esforços de torção e indica excentricidades para as edificações com a forma paralelepédica (fórmulas 13 e 14). É admitido, para efeito de cálculo, que a resultante das forças de arrasto aja perpendicularmente às fachadas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 21).

Figura 8 – Esquema ilustrativo das excentricidades



(fonte: elaborado pelo autor)

Para excentricidades geradas por incidência de vento oblíquo, aplica-se a fórmula 13:

$$e_a = 0,075 a \quad e_b = 0,075 b \quad (\text{fórmula 13})$$

Onde:

e = excentricidade medida na direção do lado maior (m);

a = lado maior (m);

e_b = excentricidade medida na direção do lado menor (m);

b = lado menor (m).

Para excentricidades oriundas de efeitos de vizinhança, aplica-se a fórmula 14:

$$e_a = 0,15 a \quad e_b = 0,15 b \quad (\text{fórmula 14})$$

Onde:

e_a = excentricidade medida na direção do lado maior (m);

a = lado maior (m);

e_b = excentricidade medida na direção do lado menor (m);

b = lado menor (m).

Segundo a NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 21):

Os efeitos de vizinhança serão considerados somente até a altura do topo da ou das edificações situadas nas proximidades, dentro de um círculo de diâmetro igual à altura da edificação em estudo, ou igual a seis vezes o lado menor da edificação, b , adotando-se o menor destes dois valores.

4.4.9 Efeitos de vizinhança

Os coeficientes aerodinâmicos podem variar em uma ampla faixa de valores para diferentes condições de vizinhança. Estas variações podem ser benéficas ou nocivas. Mesmo para uma mesma condição de vizinhança é possível que se tenha: uma situação de proteção, com o

vento soprando de uma determinada direção, outra nociva, quando da inversão do mesmo vento.

A Norma (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 58) indica uma majoração de até 30% nos esforços calculados para a mesma edificação isolada. No anexo G estão listados três modos diferentes de manifestação dos efeitos de vizinhança, são eles: efeito Venturi, por deflexão do vento na direção vertical e pela turbulência da esteira. Porém, alerta para a impossibilidade de indicar valores numéricos que atendam a todas as possibilidades de vizinhança.

O texto do anexo G apresenta o parâmetro s/d^* para avaliar a necessidade da aplicação do fator de efeito de vizinhança, FV , aos esforços calculados para a edificação isolada. Para $s/d^* \leq 1,0$ as seguintes forças são majoradas em 30% ($FV = 1,3$): forças de arrasto, forças em paredes, forças em vedações e suas fixações e forças em fachadas confrontantes. Valores de s/d^* entre 1,0 e 3,0 são interpolados linearmente, com FV variando de 1,3 a 1,0. Para valores de $s/d^* \leq 0,5$ são majoradas as forças na cobertura em 30% ($FV = 1,3$). Para s/d^* entre 0,5 e 3,0 o coeficiente de majoração, FV , é interpolado linearmente entre 1,3 e 1,0. Se $s/d^* \geq 3,0$ não há majoração nos esforços, admite-se, portanto, que não há influência da vizinhança (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 58, grifo nosso).

A NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 58, grifo nosso) recomenda a seguinte marcha de cálculo para a determinação do parâmetro s/d^* :

- a) identificam-se as paredes confrontantes das duas edificações em estudo. Sendo \mathbf{axb} as dimensões em planta das edificações (\mathbf{axb} entre 1x1 e 4x1). A distância que as separa é denominada \mathbf{s} ;
- b) o fator $\mathbf{d^*}$ é o menor dos dois valores: a dimensão \mathbf{b} , a semi-diagonal $\frac{1}{2} \sqrt{\mathbf{a}^2 + \mathbf{b}^2}$.

Segundo a NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 58, grifo nosso), o fator de vizinhança é definido pela fórmula 15:

$$FV = \frac{C \text{ na edificação com vizinhança}}{C \text{ na edificação isolada}} \quad (\text{fórmula 15})$$

Onde:

FV = fator de vizinhança;

C = coeficiente aerodinâmico em estudo (coeficiente de pressão, coeficiente de forma ou coeficiente de arrasto).

5 EDIFÍCIOS ESTUDADOS

Neste capítulo são apresentados os edifícios que foram selecionados para o desenvolvimento deste estudo. Os critérios mais relevantes na escolha foram a configuração da vizinhança, a forma geométrica do edifício e a disponibilidade dos relatórios técnicos pelo LAC. Os ensaios foram realizados entre os anos de 2011 e 2012 por solicitação das empresas construtoras e/ou por seus projetistas, com o intuito de otimizar o projeto destas edificações frente à ação do vento.

5.1 CARLOS STEINEN

O edifício Carlos Steinen é um empreendimento a ser construído na cidade de São Paulo/SP. Sua altura total é de 95,55 m e sua projeção em planta baixa pode ser inscrita em um retângulo de dimensões máximas de 39,58 x 21,14 m. A figura 9 mostra a perspectiva artística do edifício no local onde este será construído (trabalho não publicado)⁶.

Figura 9 – Perspectiva artística do edifício Carlos Steinen



(fonte: trabalho não publicado)⁷

⁶ Informações obtidas do relatório Ação Estática do Vento sobre o edifício Carlos Steinen, São Paulo/SP. Relatório elaborado em 2011 pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob responsabilidade do Prof. Acir Mércio Loredo-Souza e sua equipe.

⁷ idem

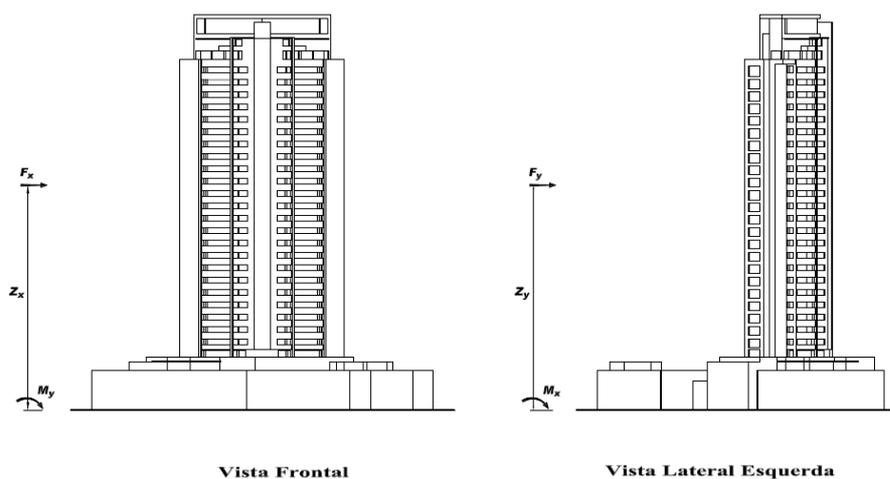
Na figura 10 pode-se visualizar o modelo reduzido do edifício no interior da câmara de ensaios do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann. A seguir, na figura 11, pode-se observar a vista da fachada frontal e a vista da fachada lateral esquerda com a referência para a aplicação das forças e dos momentos fletores.

Figura 10 – Modelo reduzido do edifício Carlos Steinen no interior do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann



(fonte: trabalho não publicado)⁸

Figura 11 – Referência para aplicação de forças e momentos fletores para o edifício Carlos Steinen



(fonte: trabalho não publicado)⁹

⁸ Informações obtidas do relatório Ação Estática do Vento sobre o edifício Carlos Steinen, São Paulo/SP. Relatório elaborado em 2011 pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob responsabilidade do Prof. Acir Mércio Loredo-Souza e sua equipe.

⁹ idem

5.2 LIÈGE

O edifício Liège é um empreendimento a ser construído na cidade de João Pessoa/PB. Sua altura é de 170,50 m e sua projeção em planta baixa pode ser inscrita em um retângulo de dimensões máximas de 43,40 x 17,95 m. A figura 12 mostra a perspectiva artística do edifício no local onde este será construído (trabalho não publicado)¹⁰.

Figura 12 – Perspectiva artística do edifício Liège



(fonte: trabalho não publicado)¹¹

Na figura 13 pode-se visualizar o modelo reduzido do edifício no interior da câmara de ensaios do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann. A seguir, na figura 14, pode-se observar a vista da fachada frontal e a vista da fachada lateral direita com a referência para a aplicação das forças e dos momentos fletores.

¹⁰ Informações obtidas do relatório Ação Estática do Vento sobre o edifício Liège, João Pessoa/PB. Relatório elaborado em 2012 pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob responsabilidade do Prof. Acir Mércio Loredo-Souza e sua equipe.

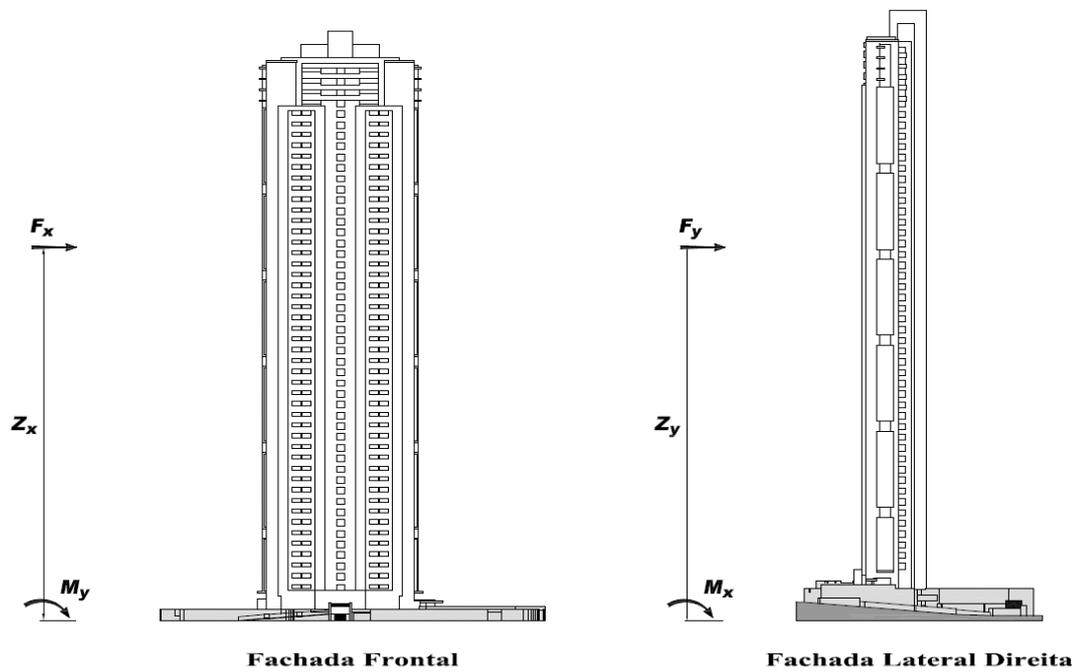
¹¹ idem

Figura 13 – Modelo reduzido do edifício Liège no interior do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann



(fonte: trabalho não publicado)¹²

Figura 14 – Referência para aplicação de forças e momentos fletores para o edifício Liège



(fonte: trabalho não publicado)¹³

¹² Informações obtidas do relatório Ação Estática do Vento sobre o edifício Liège, João Pessoa/PB. Relatório elaborado em 2012 pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob responsabilidade do Prof. Acir Mércio Loredou-Souza e sua equipe.

¹³ idem

5.3 HOME STAY

O edifício Home Stay é um empreendimento a ser construído na cidade de Porto Alegre/RS. Possui altura total de 80,92 m e sua projeção em planta baixa pode ser inscrita em um retângulo de dimensões máximas de 62,58 x 25,96 m. A figura 15 mostra a perspectiva artística do edifício no local onde este será construído (trabalho não publicado)¹⁴.

Figura 15 – Perspectiva artística do edifício Home Stay



(fonte: trabalho não publicado)¹⁵

Na figura 16 pode-se visualizar o modelo reduzido do edifício no interior da câmara de ensaios do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann. A seguir, na figura 17, pode-se observar a vista da fachada frontal e a vista da fachada lateral esquerda com a referência para a aplicação das forças e dos momentos fletores.

¹⁴ Informações obtidas do relatório Ação Estática do Vento sobre o edifício Home Stay, Porto Alegre/RS. Relatório elaborado em 2011 pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob responsabilidade do Prof. Acir Mércio Loredo-Souza e sua equipe.

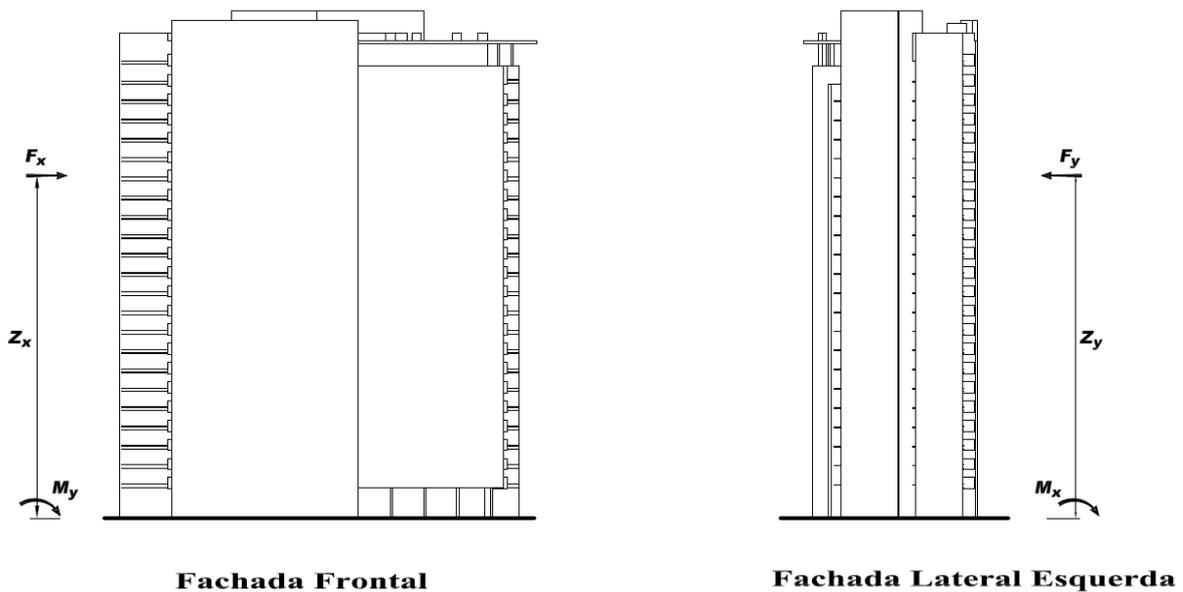
¹⁵ idem

Figura 16 – Modelo reduzido do edifício Home Stay no interior do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann



(fonte: trabalho não publicado)¹⁶

Figura 17 – Referência para aplicação de forças e momentos fletores para o edifício Home Stay



(fonte: trabalho não publicado)¹⁷

¹⁶ Informações obtidas do relatório Ação Estática do Vento sobre o edifício Home Stay, Porto Alegre/RS. Relatório elaborado em 2011 pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob responsabilidade do Prof. Acir Mércio Loredo-Souza e sua equipe.

¹⁷ idem

5.4 OFFICE BARRA SUL

O edifício Office Barra Sul é um empreendimento a ser construído na cidade de Porto Alegre/RS. Possui altura total de 82,26 m e sua projeção em planta baixa pode ser inscrita em um retângulo de dimensões máximas de 38,75 x 27,40 m. A figura 18 mostra a perspectiva artística do edifício no local onde este será construído (trabalho não publicado)¹⁸.

Figura 18 – Perspectiva artística do edifício Office Barra Sul



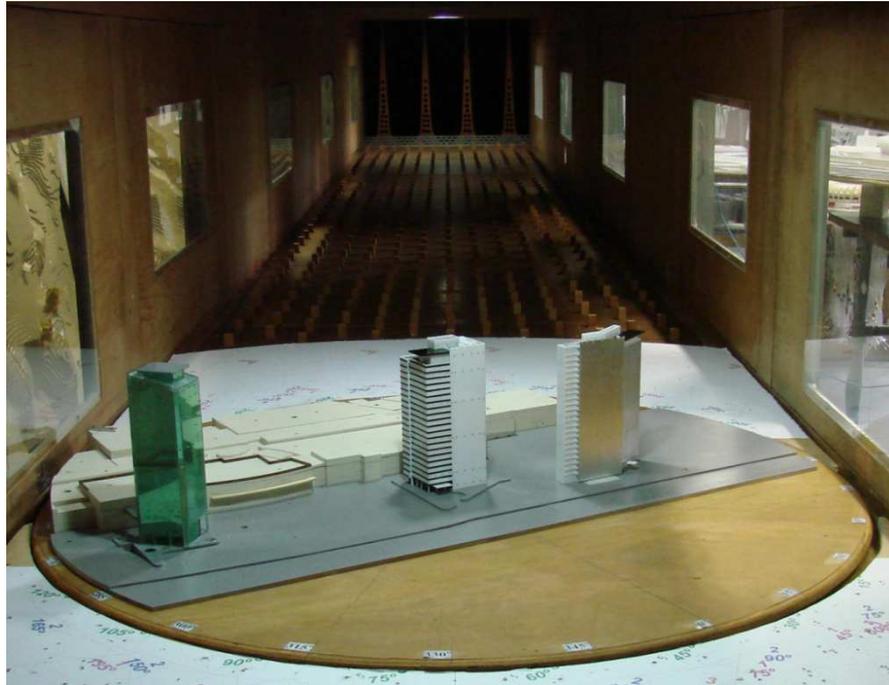
(fonte: trabalho não publicado)¹⁹

Na figura 19 pode-se visualizar o modelo reduzido do edifício no interior da câmara de ensaios do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann. A seguir, na figura 20, pode-se observar a vista da fachada frontal e a vista da fachada lateral direita com a referência para a aplicação das forças e dos momentos fletores.

¹⁸ Informações obtidas do relatório Ação Estática do Vento sobre o edifício Office Barra Sul, Porto Alegre/RS. Relatório elaborado em 2011 pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob responsabilidade do Prof. Acir Mércio Loredo-Souza e sua equipe.

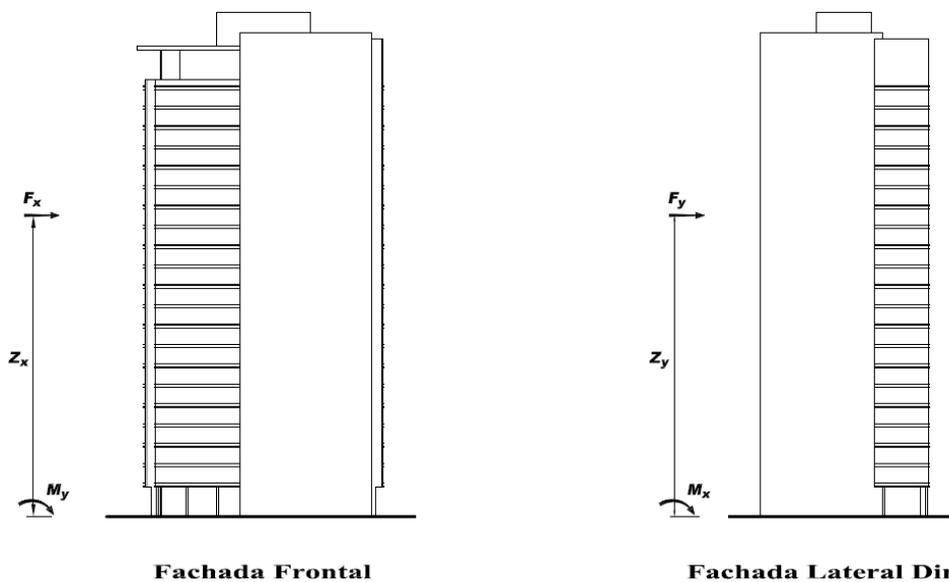
¹⁹ idem

Figura 19 – Modelo reduzido do edifício Office Barra Sul no interior do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann



(fonte: trabalho não publicado)²⁰

Figura 20 – Referência para aplicação de forças e momentos fletores para o edifício Office Barra Sul



(fonte: trabalho não publicado)²¹

²⁰ Informações obtidas do relatório Ação Estática do Vento sobre o edifício Office Barra Sul, Porto Alegre/RS. Relatório elaborado em 2011 pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob responsabilidade do Prof. Acir Mércio Loredo-Souza e sua equipe.

²¹ idem

5.5 CRON MY WAY

O edifício Cron My Way é um empreendimento a ser construído na cidade de Curitiba/PR. Possui altura total de 45,65 m e sua projeção em planta baixa pode ser inscrita em um retângulo de dimensões máximas de 25,80 x 24,30 m. Na figura 21 pode-se visualizar o modelo reduzido do edifício no interior da câmara de ensaios do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann. A seguir, na figura 22, pode-se observar a vista da fachada posterior e a vista da fachada lateral direita com a referência para a aplicação das forças e dos momentos fletores (trabalho não publicado)²².

Figura 21 – Modelo reduzido do edifício Cron My Way no interior do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann

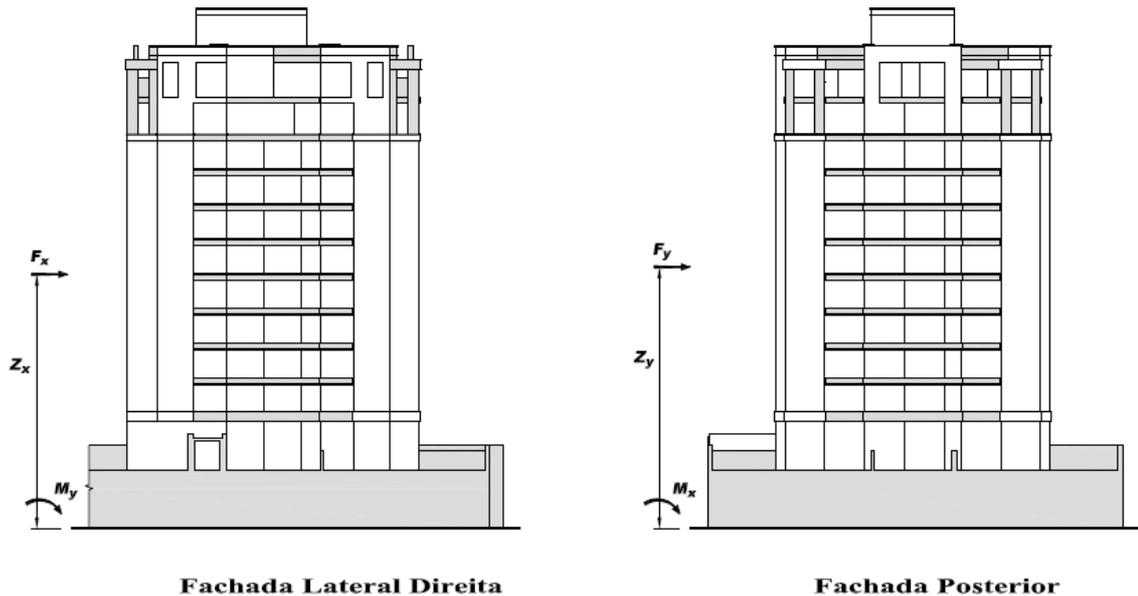


(fonte: trabalho não publicado)²³

²² Informações obtidas do relatório Ação Estática do Vento sobre o edifício Cron My Way, Curitiba/PR. Relatório elaborado em 2012 pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob responsabilidade do Prof. Acir Mércio Loredo-Souza e sua equipe.

²³ idem

Figura 22 – Referência para aplicação de forças e momentos fletores para o edifício Cron My Way



(fonte: trabalho não publicado)²⁴

5.6 GRAÇA

O edifício Graça é um empreendimento a ser construído na cidade de Salvador/BA. Possui altura total de 112,71 m e sua projeção em planta baixa pode ser inscrita em um retângulo de dimensões máximas de 22,02 x 14,55 m. Na figura 23 pode-se visualizar o modelo reduzido do edifício no interior da câmara de ensaios do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann. A seguir, na figura 24, pode-se observar a vista da fachada frontal e a vista da fachada lateral direita com a referência para a aplicação das forças e dos momentos fletores (trabalho não publicado)²⁵.

²⁴ Informações obtidas do relatório Ação Estática do Vento sobre o edifício Cron My Way, Curitiba/PR. Relatório elaborado em 2012 pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob responsabilidade do Prof. Acir Mércio Loredo-Souza e sua equipe.

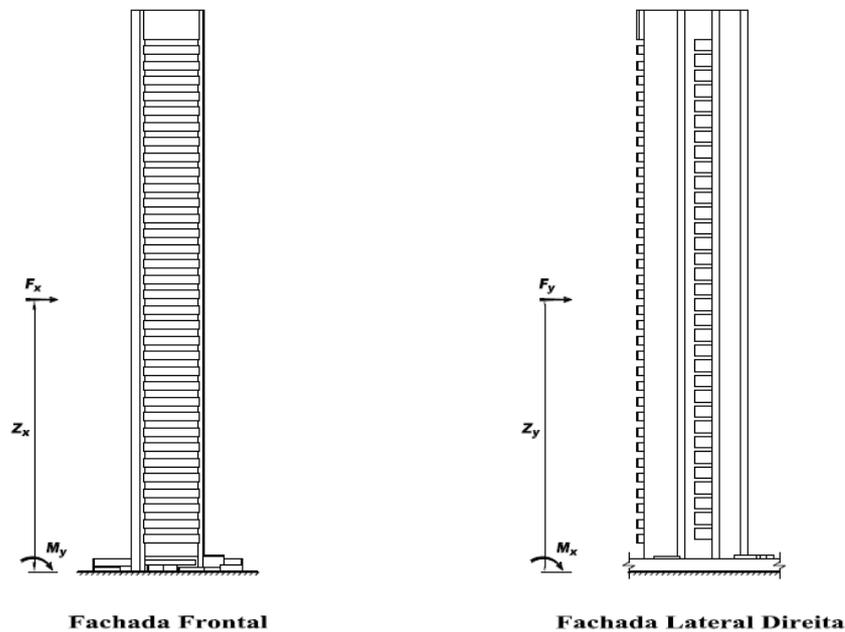
²⁵ Informações obtidas do relatório Ação Estática do Vento sobre o edifício Graça, Salvador/BA. Relatório elaborado em 2012 pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob responsabilidade do Prof. Acir Mércio Loredo-Souza e sua equipe.

Figura 23 – Modelo reduzido do edifício Graça no interior do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann



(fonte: trabalho não publicado)²⁶

Figura 24 – Referência para aplicação de forças e momentos fletores para o edifício Graça



(fonte: trabalho não publicado)²⁷

²⁶ Informações obtidas do relatório Ação Estática do Vento sobre o edifício Graça, Salvador/BA. Relatório elaborado em 2012 pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob responsabilidade do Prof. Acir Mércio Loredo-Souza e sua equipe.

²⁷ idem

5.7 RESORT RESIDENCE

O edifício Resort Residence é um empreendimento a ser construído na cidade de Caxias do Sul/RS. Possui altura total de 82,00 m e sua projeção em planta baixa pode ser inscrita em um retângulo de dimensões máximas de 22,40 x 20,85 m. Na figura 25 pode-se visualizar o modelo reduzido do edifício no interior da câmara de ensaios do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann. A seguir, na figura 26, pode-se observar a vista da fachada frontal e a vista da fachada lateral direita com a referência para a aplicação das forças e dos momentos fletores (trabalho não publicado)²⁸.

Figura 25 – Modelo reduzido do edifício Resort Residence no interior do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann

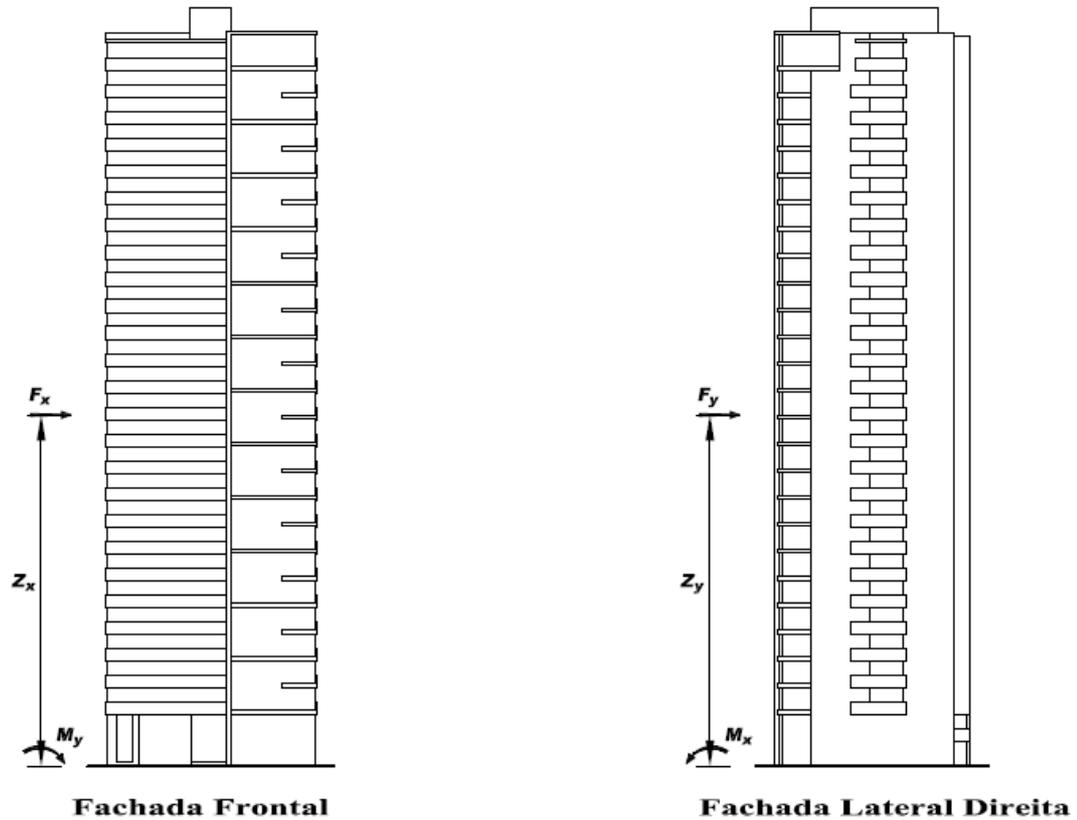


(fonte: trabalho não publicado)²⁹

²⁸ Informações obtidas do relatório Ação Estática do Vento sobre o edifício Resort Residence, Caxias do Sul/RS. Relatório elaborado em 2012 pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob responsabilidade do Prof. Acir Mércio Loredo-Souza e sua equipe.

²⁹ idem

Figura 26 – Referência para aplicação de forças e momentos fletores para o edifício Resort Residence



(fonte: trabalho não publicado)³⁰

³⁰ Informações obtidas do relatório Ação Estática do Vento sobre o edifício Resort Residence, Caxias do Sul/RS. Relatório elaborado em 2012 pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob responsabilidade do Prof. Acir Mércio Loredo-Souza e sua equipe.

6 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados comparativos das solicitações de esforço cortante e momento fletor na base dos edifícios estudados, solicitações estas, devidas à ação estática do vento. Os dados experimentais, obtidos dos relatórios técnicos emitidos pelo LAC, são comparados com os resultados dos cálculos analíticos efetuados seguindo os preceitos da NBR 6123/1988. Os dados experimentais foram tomados para cada 15° de incidência do vento e consideraram as edificações com a vizinhança completa. Os resultados determinados através da Norma foram calculados para as duas principais incidências do vento (0 e 90°) e consideraram a edificação isolada, ou seja, livre dos efeitos de vizinhança. Tal procedimento permitiu determinar o fator de vizinhança (FV) do edifício em estudo, comparando o resultado real no túnel de vento com a aproximação feita pela Norma para o cálculo dos esforços devidos a ação do vento de edificações não paralelepípedicas. Para os edifícios com altura superior a 80m houve redução do fator S_2 , conforme a prescrição do anexo A da Norma.

6.1 CARLOS STEINEN

O edifício Carlos Steinen, de acordo com a classificação de rugosidade da NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 8 - 9), enquadra-se na categoria V. A seguir, na tabela 3, são fornecidas as informações utilizadas no cálculo analítico recomendado pela Norma.

Tabela 3 – Informações do edifício Carlos Steinen para o cálculo analítico através da Norma

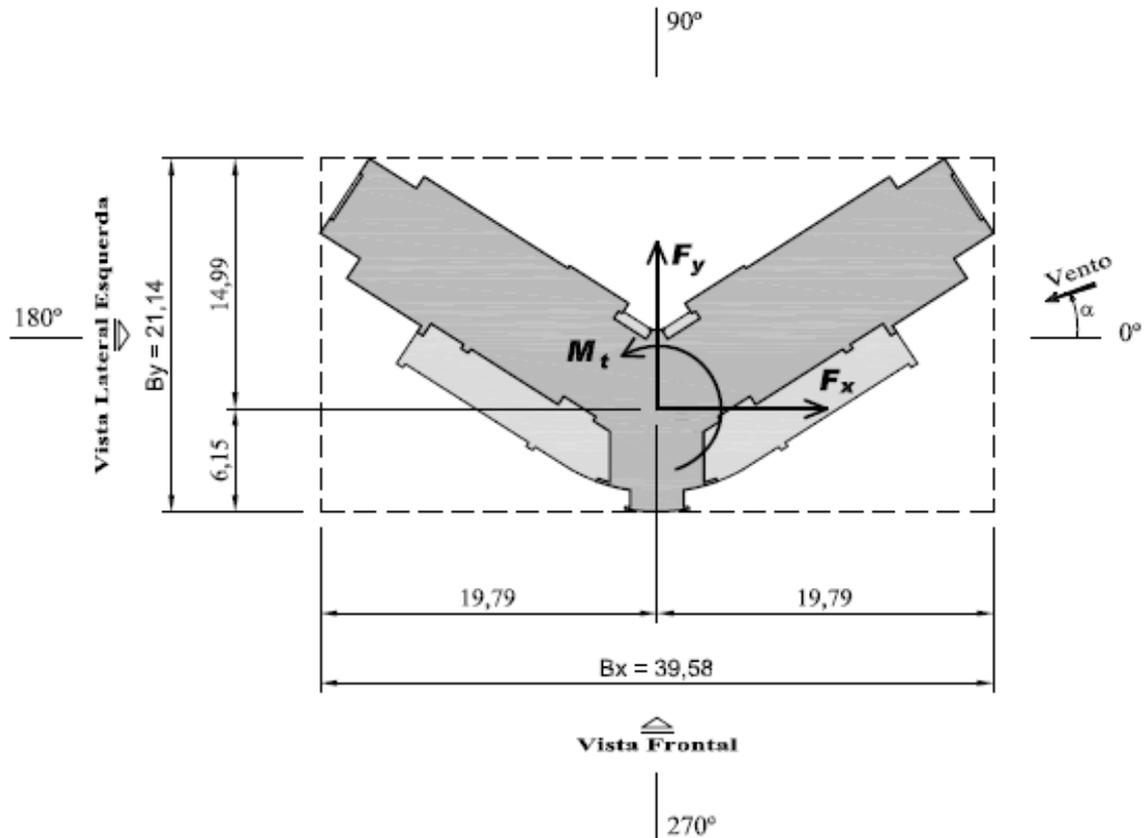
Categoria	Classe	V₀	S₁	S₂	h (m)	a/b	b/a	h/a	h/b
V	C	38 m/s	1,0	0,57 – 1,0	95,55	1,87	0,53	2,42	0,41

(fonte: elaborada pelo autor)

Para o estudo em túnel de vento deste edifício foi construído um modelo em escala 1:300, no qual a semelhança geométrica, cinemática e dinâmica foi respeitada. A figura 27 mostra a

projeção em planta baixa do edifício, semelhante ao formato de um bumerangue, inscrita no retângulo utilizado no cálculo analítico aproximado recomendado pela Norma. Logo após, na figura 28, pode-se visualizar a referência do ângulo de incidência do vento utilizada no ensaio em túnel de vento (trabalho não publicado)³¹.

Figura 27 – Projeção em planta baixa do edifício Carlos Steinen e dimensões do retângulo para o cálculo através da Norma

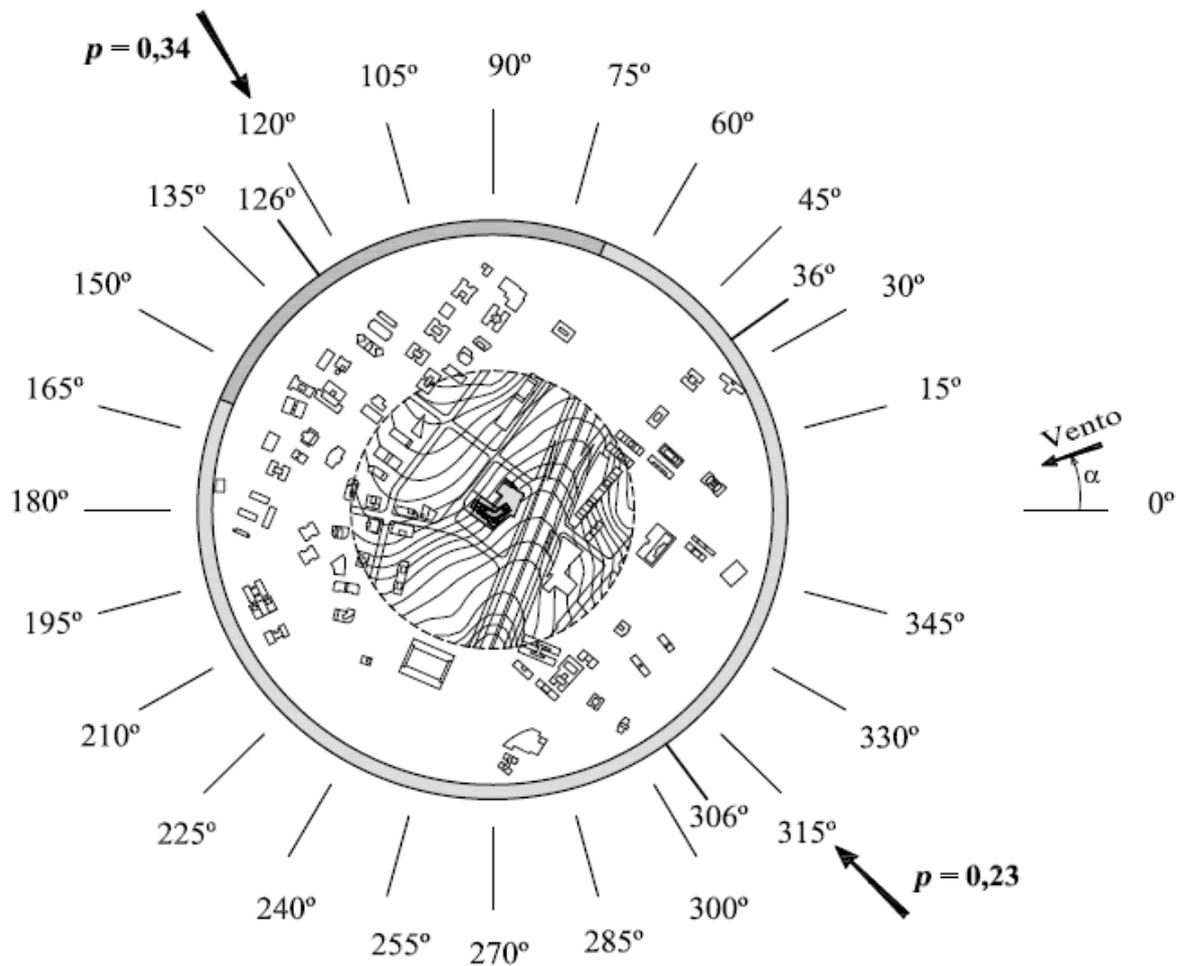


(fonte: trabalho não publicado)³²

³¹ Informações obtidas do relatório Ação Estática do Vento sobre o edifício Carlos Steinen, São Paulo/SP. Relatório elaborado em 2011 pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob responsabilidade do Prof. Acir Mércio Loredo-Souza e sua equipe.

³² idem

Figura 28 – Referência do ângulo de incidência do vento para o edifício Carlos Steinen

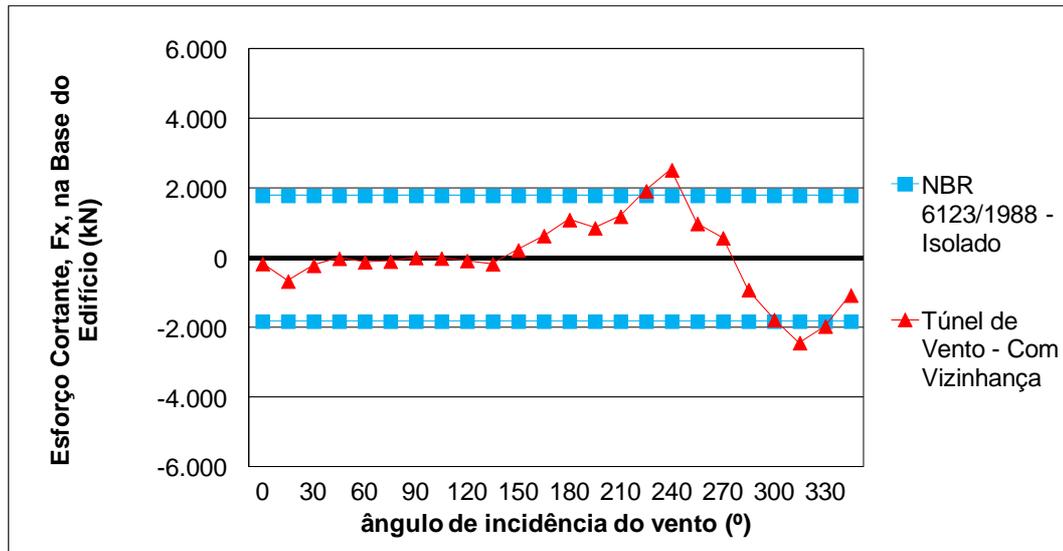


(fonte: trabalho não publicado)³³

Nos gráficos das figuras 29 e 30 são comparadas as solicitações de esforço cortante nas direções X e Y. Para a resultante na direção X percebe-se que o valor calculado através da Norma foi superado para a incidência do vento de 240 e 315°, com a solicitação máxima em 240°. Já na direção Y o valor da Norma foi superado entre as incidências de 45 e 60°, com a solicitação máxima em 45°.

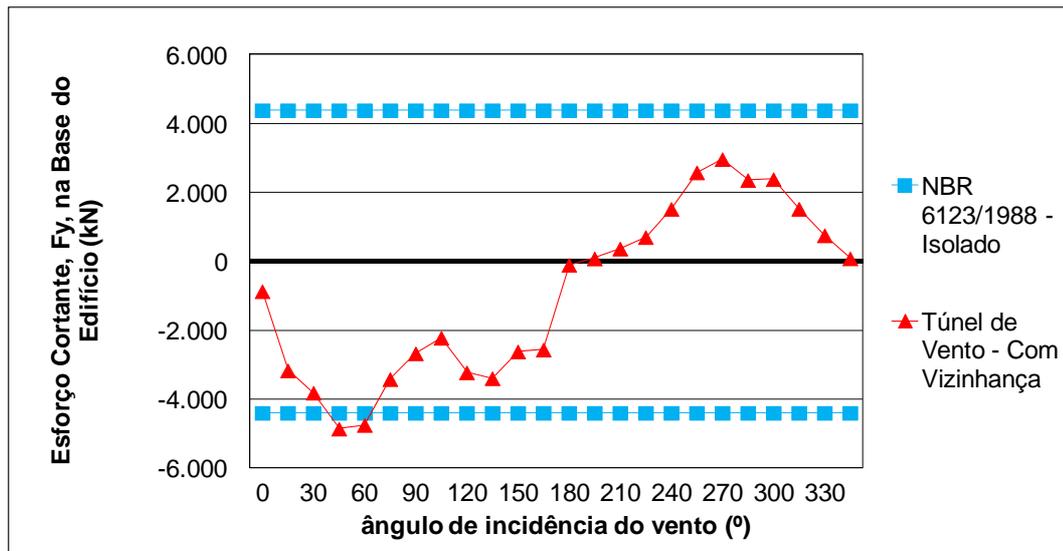
³³ Informações obtidas do relatório Ação Estática do Vento sobre o edifício Carlos Steinen, São Paulo/SP. Relatório elaborado em 2011 pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob responsabilidade do Prof. Acir Mércio Loredo-Souza e sua equipe.

Figura 29 – Esforço cortante na direção X para o edifício Carlos Steinen



(fonte: elaborado pelo autor)

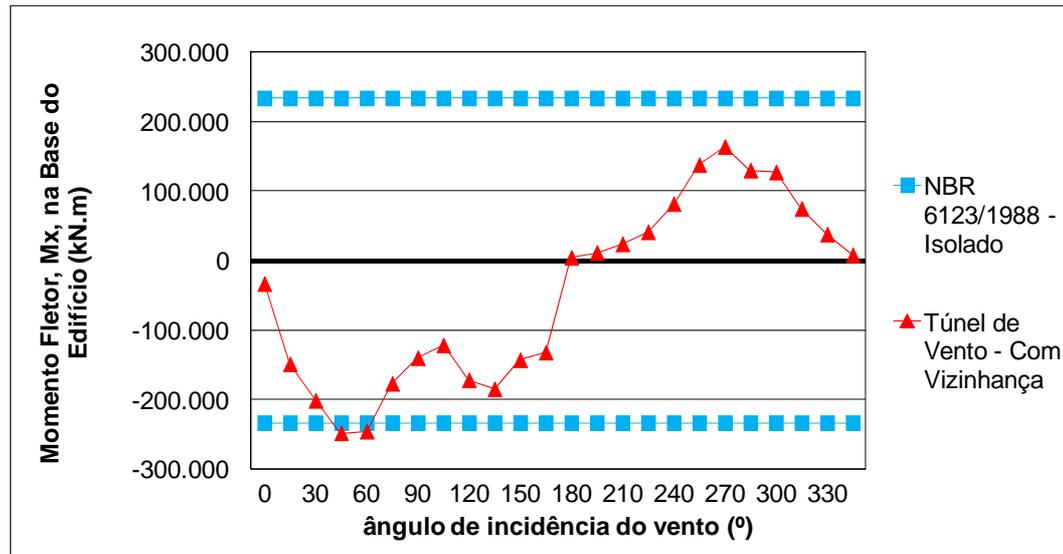
Figura 30 – Esforço cortante na direção Y para o edifício Carlos Steinen



(fonte: elaborado pelo autor)

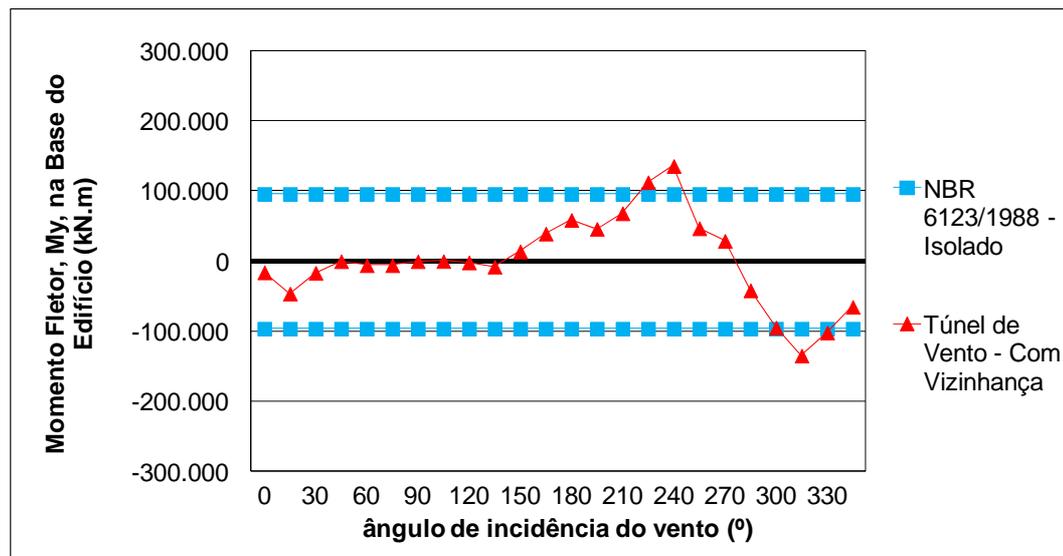
As figuras 31 e 32 apresentam os gráficos comparativos das solicitações de momento fletor nas direções X e Y. Observa-se que para a resultante na direção X o valor calculado através da Norma foi superado para as incidências do vento entre 45 e 60°, com a solicitação máxima para a incidência de 45°. Já na direção Y o valor da Norma foi superado para as incidências entre 225 e 240° e entre 315 e 330°, com a solicitação máxima em 240°.

Figura 31 – Momento fletor na direção X para o edifício Carlos Steinen



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 32 – Momento fletor na direção Y para o edifício Carlos Steinen



(fonte: elaborado pelo autor)

De acordo com a análise dos resultados obtidos para o edifício Carlos Steinen, conclui-se que a aplicação do FV máximo sugerido pela Norma não seria suficiente para majorar as solicitações de esforço cortante e momento fletor. Para ambas as solicitações o FV obtido nos ensaios em túnel de vento superaram o FV máximo previsto pela Norma. O maior FV observado foi para a solicitação de esforço cortante na direção X e momento fletor na direção Y: 1,41. A tabela 4 mostra um comparativo entre os valores máximos das solicitações de esforço cortante e momento fletor, obtidos no túnel de vento com a presença da vizinhança, e

os valores previstos pela Norma para a edificação isolada. Entre parênteses e destacado está o valor máximo do fator de vizinhança determinado para cada solicitação.

Tabela 4 – Solicitações e fatores de vizinhança para o edifício Carlos Steinen

Origem da Informação	Solicitações na Base	
	Esforço Cortante	Momento Fletor
Túnel de Vento – Eixo X (FV)	2.541 kN (1,41)	248.441 kN (1,06)
NBR 6123/1988 – Eixo X	1.805 kN	233.600 kN
Túnel de Vento – Eixo Y (FV)	4.847 kN (1,10)	135.790 kN (1,41)
NBR 6123/1988 – Eixo Y	4.390 kN	96.000 kN

(fonte: elaborada pelo autor)

6.2 LIÈGE

O edifício Liège, de acordo com a classificação de rugosidade da NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 8-9), enquadra-se na categoria III. A seguir, na tabela 5, são fornecidas as informações utilizadas no cálculo analítico recomendado pela Norma.

Tabela 5 – Informações do edifício Liège para o cálculo analítico através da Norma

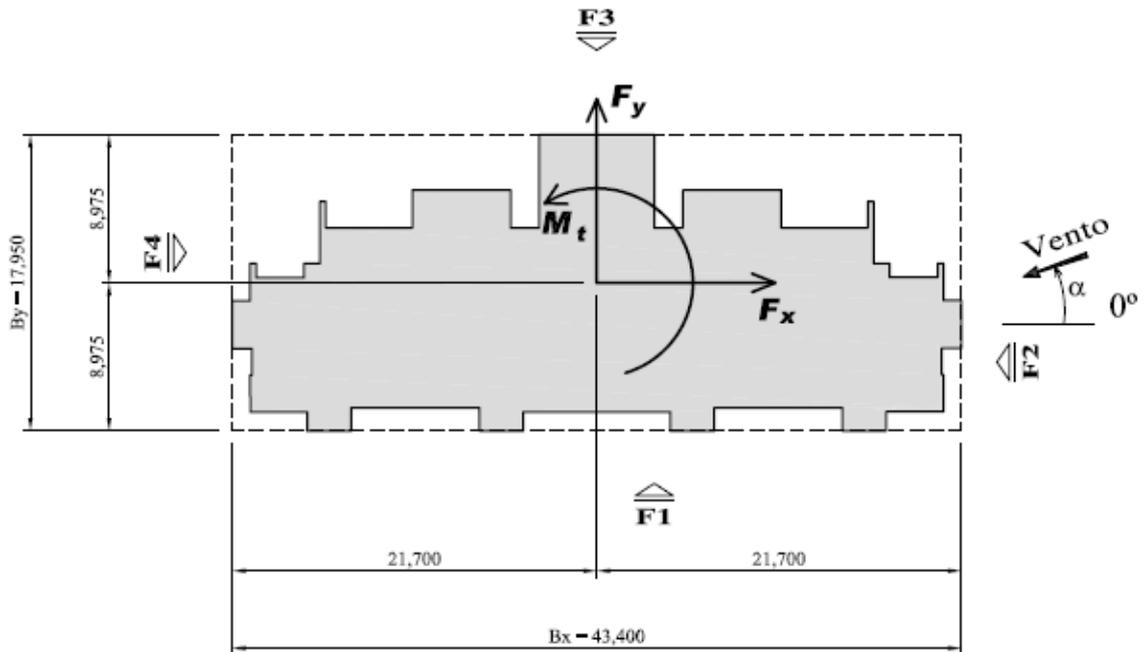
Categoria	Classe	V_0	S_1	S_2	h (m)	a/b	b/a	h/a	h/b
III	C	30 m/s	1,0	0,66 – 1,16	170,50	2,42	0,41	3,93	9,50

(fonte: elaborada pelo autor)

Para o estudo em túnel de vento deste edifício foi construído um modelo em escala 1:400, no qual a semelhança geométrica, cinemática e dinâmica foi respeitada. A figura 33 mostra a projeção em planta baixa do edifício, semelhante à forma triangular com várias reentrâncias, inscrita no retângulo utilizado no cálculo analítico aproximado recomendado pela Norma.

Logo após, na figura 34, pode-se visualizar a referência do ângulo de incidência do vento utilizada no ensaio em túnel de vento (trabalho não publicado)³⁴.

Figura 33 – Projeção em planta baixa do edifício Liège e dimensões do retângulo para o cálculo através da Norma

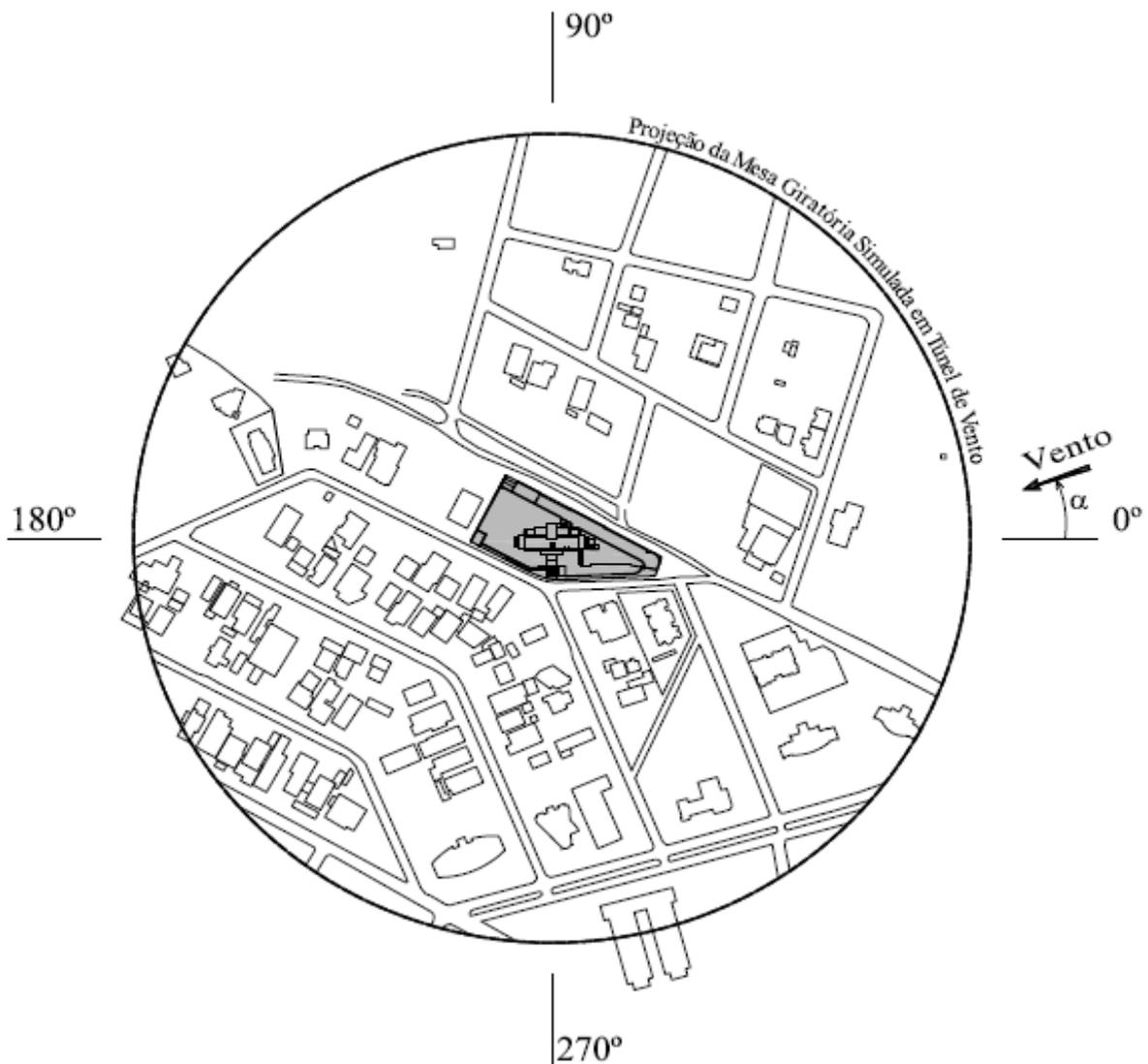


(fonte: trabalho não publicado)³⁵

³⁴ Informações obtidas do relatório Ação Estática do Vento sobre o edifício Liège, João Pessoa/PB. Relatório elaborado em 2012 pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob responsabilidade do Prof. Acir Mércio Loredo-Souza e sua equipe.

³⁵ idem

Figura 34 – Referência do ângulo de incidência do vento para o edifício Liège

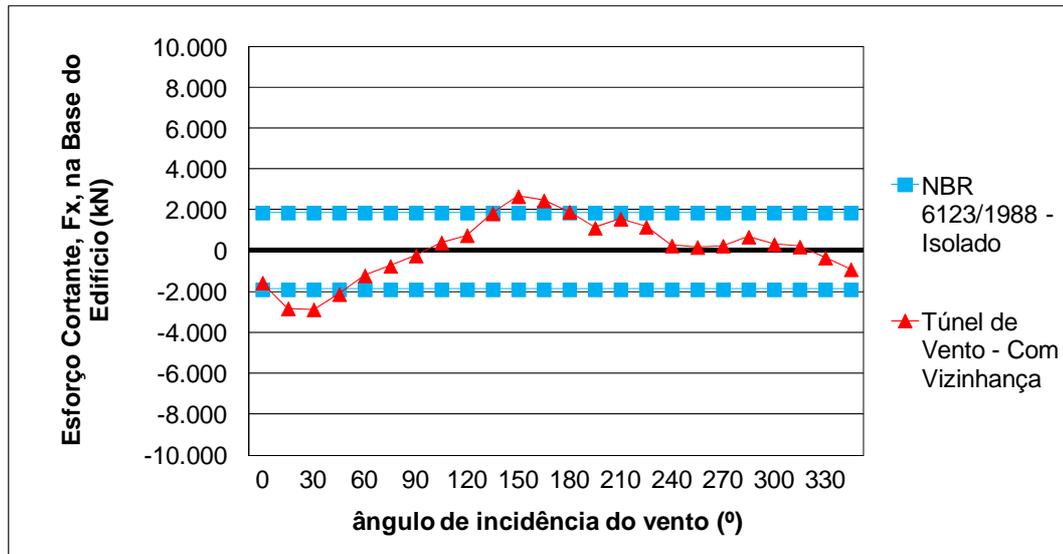


(fonte: trabalho não publicado)³⁶

Nos gráficos a seguir, das figuras 35 e 36, são comparadas as solicitações do esforço cortante nas direções X e Y. Para a resultante na direção X percebe-se que o valor calculado através da Norma foi superado para as incidências do vento entre 15 e 45° e entre 150 e 165°. A solicitação atingiu o valor máximo para a incidência do vento a 30°. Já na direção Y o valor da Norma foi superado entre as incidências de 60 e 105° e entre 225 e 255°, com a solicitação máxima para a incidência do vento a 90°.

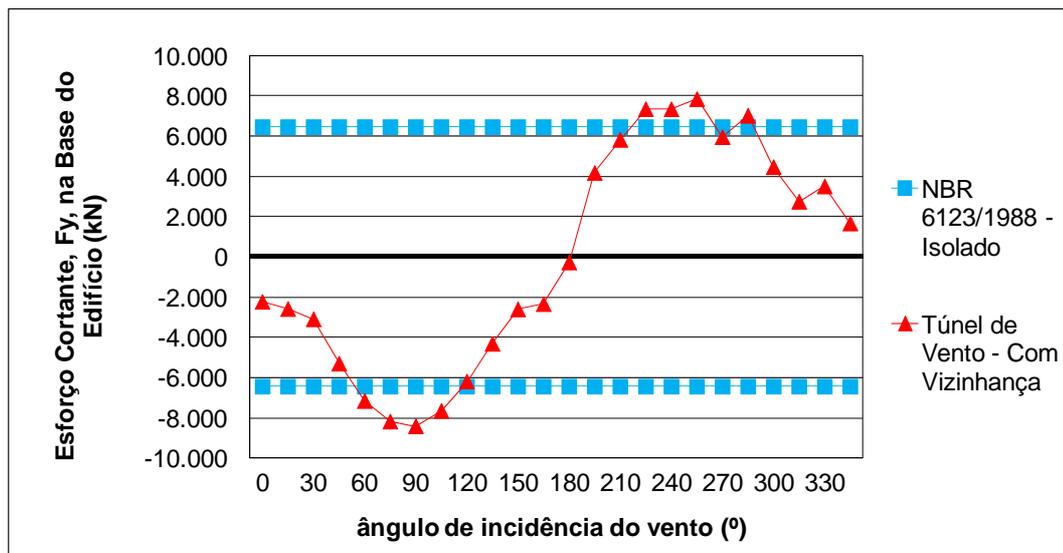
³⁶ Informações obtidas do relatório Ação Estática do Vento sobre o edifício Liège, João Pessoa/PB. Relatório elaborado em 2012 pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob responsabilidade do Prof. Acir Mércio Loredo-Souza e sua equipe.

Figura 35 – Esforço cortante na direção X para o edifício Liège



(fonte: elaborado pelo autor)

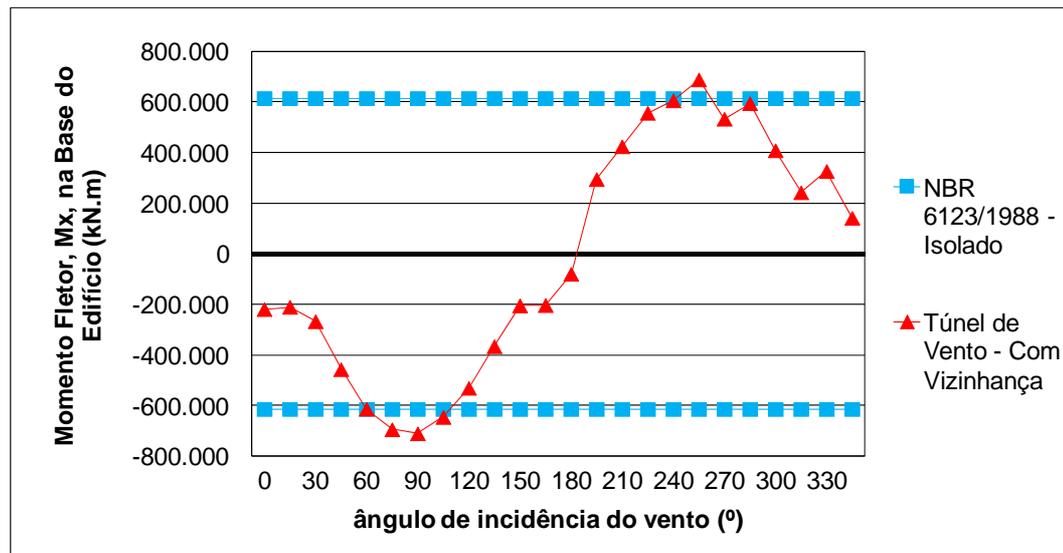
Figura 36 – Esforço cortante na direção Y para o edifício Liège



(fonte: elaborado pelo autor)

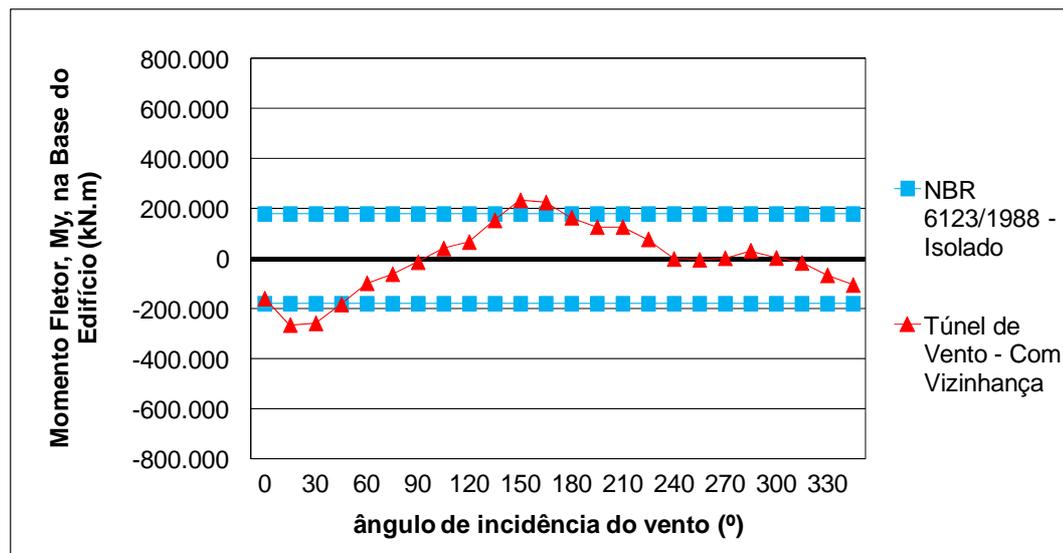
As figuras 37 e 38 apresentam os gráficos comparativos das solicitações de momento fletor nas direções X e Y. Observa-se que para a resultante na direção X o valor calculado através da Norma foi superado para a incidência do vento entre 60 e 105° e para a incidência de 255°. A solicitação alcançou o valor máximo para a o vento incidido a 90°. Já na direção Y o valor da Norma foi superado entre as incidências de 15 e 45° e entre 150 e 165°. A solicitação atingiu o valor máximo para o ângulo de 15°.

Figura 37 – Momento fletor na direção X para o edifício Liège



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 38 – Momento fletor na direção Y para o edifício Liège



(fonte: elaborado pelo autor)

De acordo com a análise dos resultados obtidos para o edifício Liège, conclui-se que a aplicação do FV máximo sugerido pela Norma não seria suficiente para majorar as solicitações de esforço cortante e momento fletor. O maior FV observado foi para a solicitação de esforço cortante na direção X, atingindo 1,52. Para a solicitação de momento fletor o máximo FV apurado foi na direção Y, alcançando 1,48. A tabela 6 mostra um comparativo entre os valores máximos das solicitações de esforço cortante e momento fletor, obtidos no túnel de vento com a presença da vizinhança, e os valores previstos pela Norma

para a edificação isolada. Entre parênteses e destacado está o valor máximo do fator de vizinhança determinado para cada solicitação.

Tabela 6 – Solicitações e fatores de vizinhança para o edifício Liège

Origem da Informação	Solicitações na Base	
	Esforço Cortante	Momento Fletor
Túnel de Vento – Eixo X (FV)	2.859 kN (1,52)	710.831 kN (1,16)
NBR 6123/1988 – Eixo X	1.879 kN	614.800 kN
Túnel de Vento – Eixo Y (FV)	8.413 kN (1,31)	264.760 kN (1,48)
NBR 6123/1988 – Eixo Y	6.445 kN	179.200 kN

(fonte: elaborada pelo autor)

6.3 HOME STAY

O edifício Home Stay, de acordo com a classificação de rugosidade da NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 8-9), enquadra-se nas categorias I, III e IV. A seguir, na tabela 7, são fornecidas as informações utilizadas no cálculo analítico recomendado pela Norma.

Tabela 7 – Informações do edifício Home Stay para o cálculo analítico através da Norma

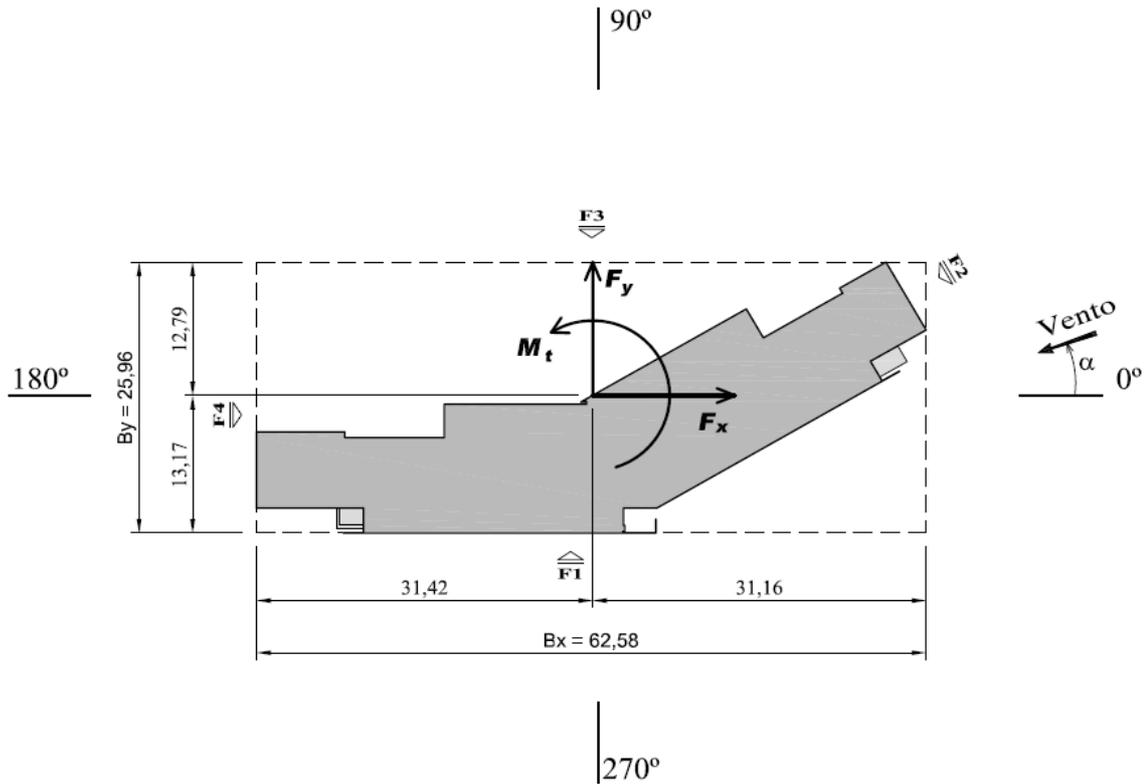
Categoria	Classe	V_0	S_1	S_2	h (m)	a/b	b/a	h/a	h/b
I - III - IV	C	46 m/s	1,0	0,71 – 1,07	80,92	2,41	0,41	1,29	3,12

(fonte: elaborada pelo autor)

Para o estudo em túnel de vento deste edifício foi construído um modelo em escala 1:350, no qual a semelhança geométrica, cinemática e dinâmica foi respeitada. A figura 39 mostra a projeção em planta baixa do edifício, semelhante a um bumerangue, inscrita no retângulo utilizado no cálculo analítico aproximado recomendado pela Norma. Logo após, na figura 40,

pode-se visualizar a referência do ângulo de incidência do vento utilizada no ensaio em túnel de vento (trabalho não publicado)³⁷.

Figura 39 – Projeção em planta baixa do edifício Home Stay e dimensões do retângulo para o cálculo através da Norma

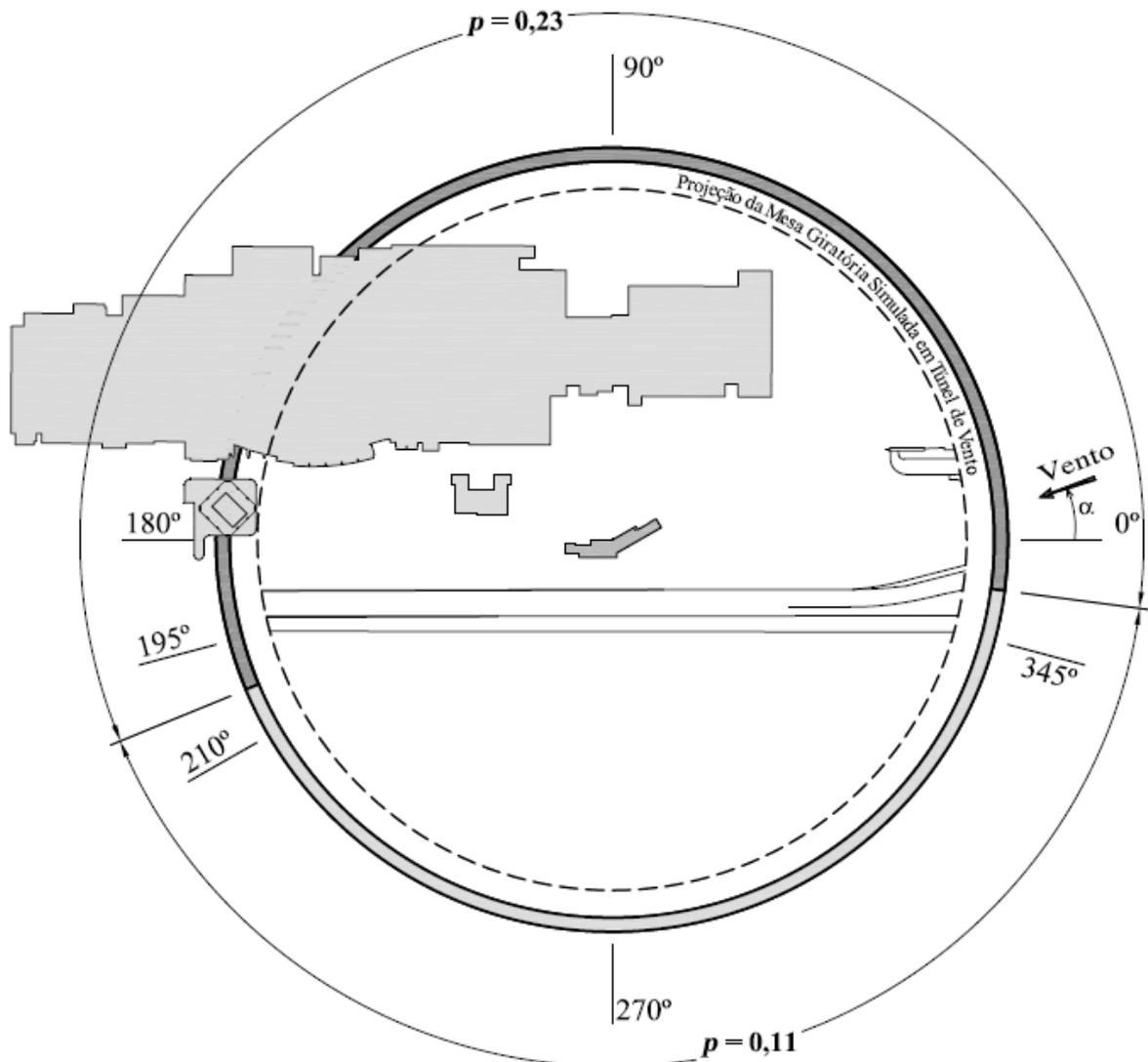


(fonte: trabalho não publicado)³⁸

³⁷ Informações obtidas do relatório Ação Estática do Vento sobre o edifício Home Stay, Porto Alegre/RS. Relatório elaborado em 2011 pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob responsabilidade do Prof. Acir Mércio Loredo-Souza e sua equipe.

³⁸ idem

Figura 40 – Referência do ângulo de incidência do vento para o edifício Home Stay

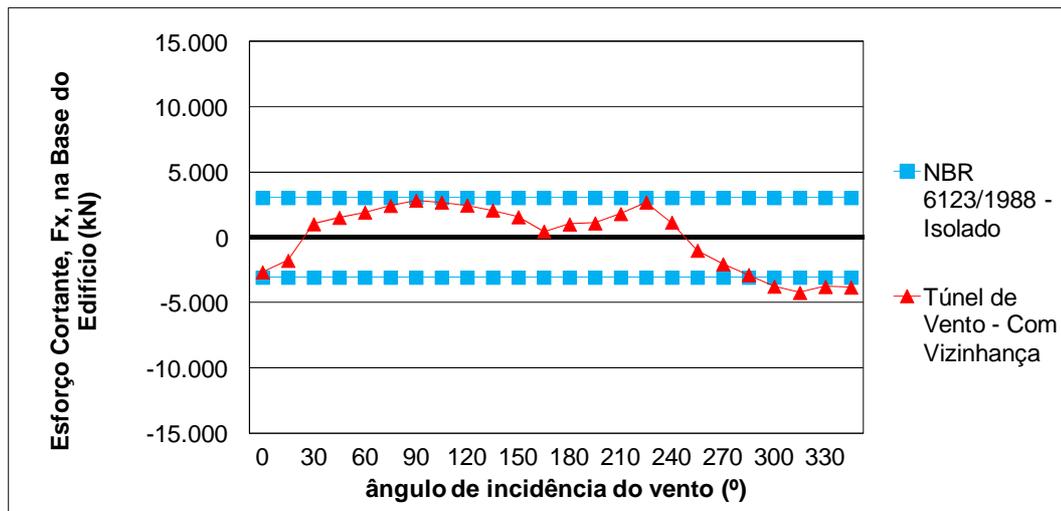


(fonte: trabalho não publicado)³⁹

Nos gráficos das figuras 41 e 42 são comparadas as solicitações do esforço cortante nas direções X e Y. Para a resultante na direção X percebe-se que o valor calculado através da Norma foi superado para a incidência do vento entre 300 e 345°, onde a solicitação alcançou o valor máximo para o vento incidido a 315°. Já na direção Y o valor da Norma foi superado entre as incidências de 255 e 300°, com a solicitação máxima a 285°.

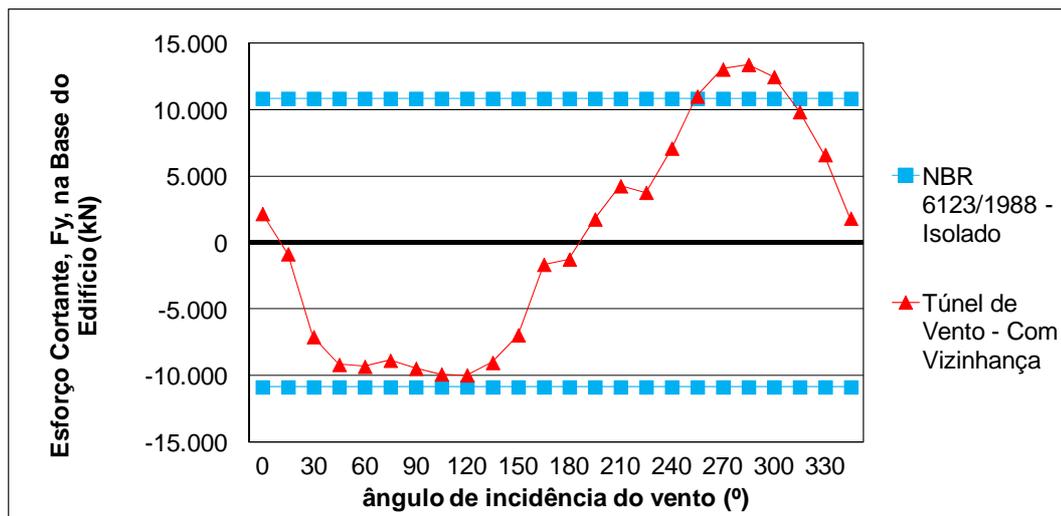
³⁹ Informações obtidas do relatório Ação Estática do Vento sobre o edifício Home Stay, Porto Alegre/RS. Relatório elaborado em 2011 pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob responsabilidade do Prof. Acir Mércio Loredou-Souza e sua equipe.

Figura 41 – Esforço cortante na direção X para o edifício Home Stay



(fonte: elaborado pelo autor)

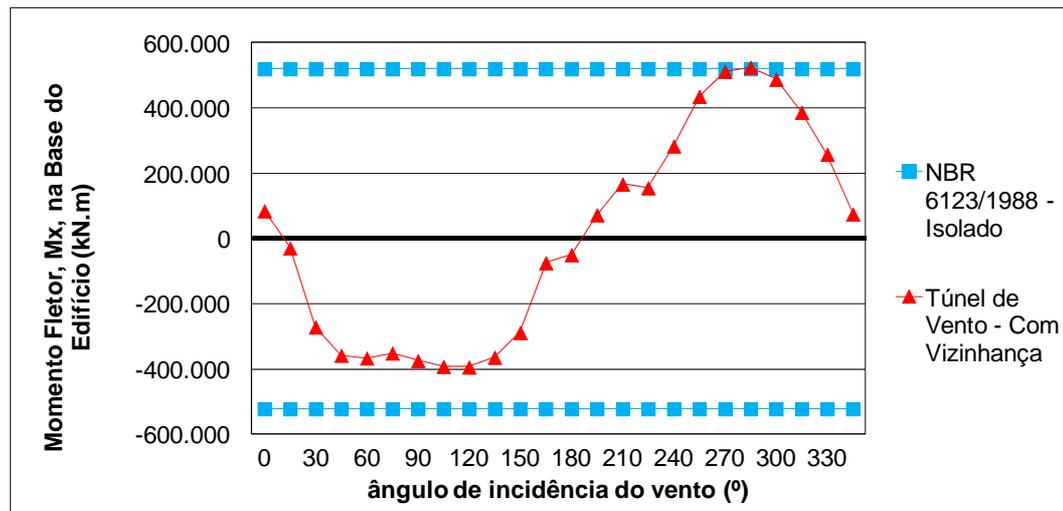
Figura 42 – Esforço cortante na direção Y para o edifício Home Stay



(fonte: elaborado pelo autor)

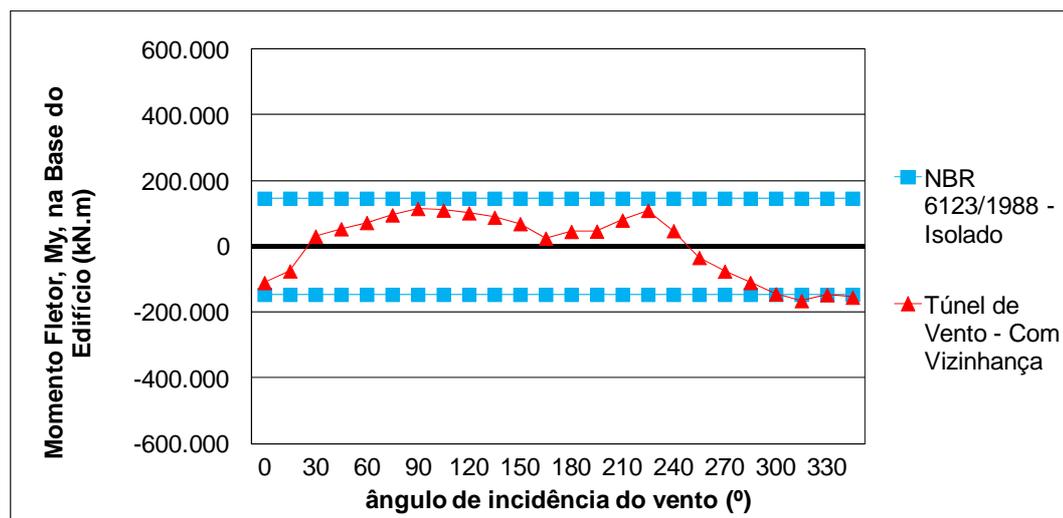
As figuras 43 e 44 apresentam os gráficos comparativos das solicitações de momento fletor nas direções X e Y. Observa-se que para a resultante na direção X o valor calculado através da Norma não foi superado, mas foi praticamente igualado para a incidência do vento a 285°. Já na direção Y o valor da Norma foi superado entre as incidências de 315 e 345°, onde a solicitação alcançou o valor máximo em 315°.

Figura 43 – Momento fletor na direção X para o edifício Home Stay



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 44 – Momento fletor na direção Y para o edifício Home Stay



(fonte: elaborado pelo autor)

De acordo com a análise dos resultados obtidos para o edifício Home Stay, conclui-se que a aplicação do FV sugerido pela Norma não seria suficiente para majorar a solicitação de esforço cortante na direção X. O maior FV observado para a solicitação atingiu 1,38. A tabela 8 mostra um comparativo entre os valores máximos das solicitações de esforço cortante e momento fletor, obtidos no túnel de vento com a presença da vizinhança, e os valores determinados através da Norma para a edificação isolada. Entre parênteses e destacado, o valor máximo do fator de vizinhança determinado para cada solicitação.

Tabela 8 – Solicitações e fatores de vizinhança para o edifício Home Stay

Origem da Informação	Solicitações na Base	
	Esforço Cortante	Momento Fletor
Túnel de Vento – Eixo X (FV)	4.215 kN (1,38)	525.157 kN (1,01)
NBR 6123/1988 – Eixo X	3.049 kN	520.900 kN
Túnel de Vento – Eixo Y (FV)	13.414 kN (1,23)	165.205 kN (1,13)
NBR 6123/1988 – Eixo Y	10.862 kN	146.200 kN

(fonte: elaborada pelo autor)

6.3 OFFICE BARRA SUL

O edifício Office Barra Sul, de acordo com a classificação de rugosidade da NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 8-9), enquadra-se nas categorias I, III e IV. A seguir, na tabela 9, são fornecidas as informações utilizadas no cálculo analítico recomendado pela Norma.

Tabela 9 – Informações do edifício Office Barra Sul para o cálculo analítico através da Norma

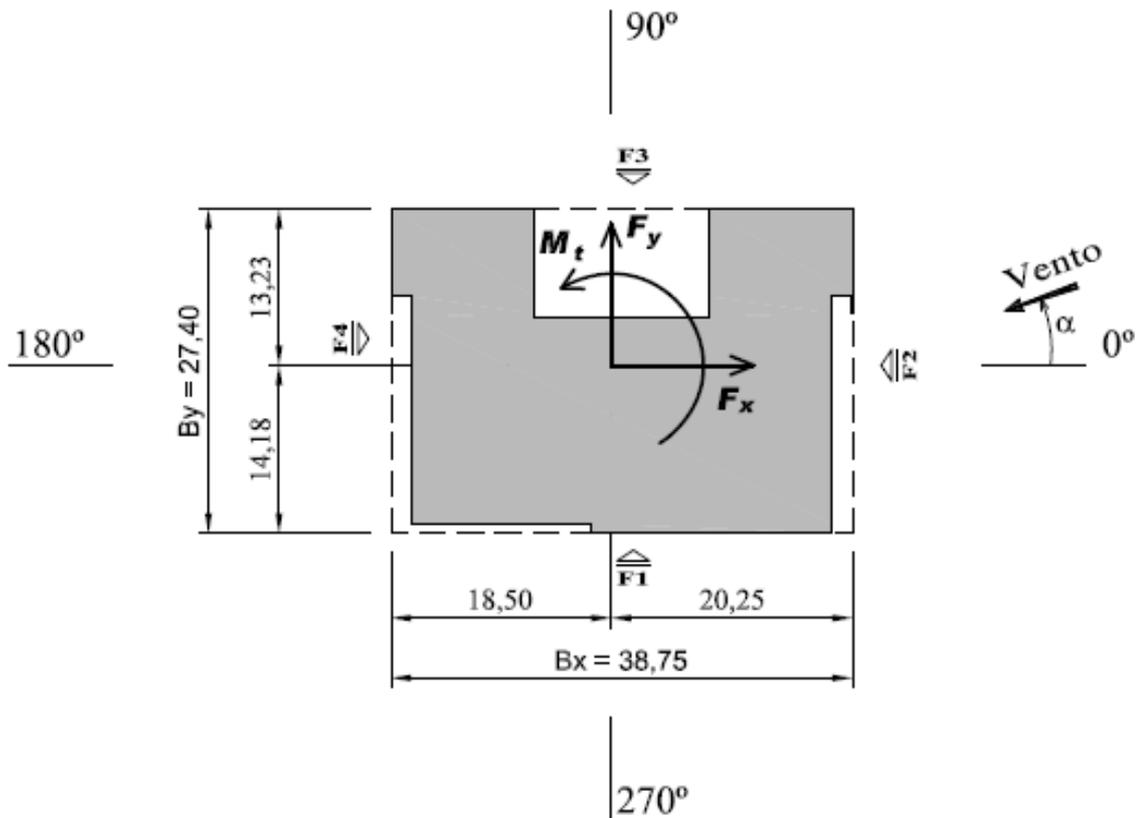
Categoria	Classe	V_0	S_1	S_2	h (m)	a/b	b/a	h/a	h/b
I - III – IV	C	46 m/s	1,0	0,74 – 1,07	82,26	1,41	0,71	2,12	3,0

(fonte: elaborada pelo autor)

Para o estudo em túnel de vento deste edifício foi construído um modelo em escala 1:350, no qual a semelhança geométrica, cinemática e dinâmica foi respeitada. A figura 45 mostra a projeção em planta baixa do edifício, semelhante ao formato da letra U, inscrita no retângulo utilizado no cálculo analítico aproximado recomendado pela Norma. Logo após, na figura 46, pode-se visualizar a referência do ângulo de incidência do vento utilizada no ensaio em túnel de vento (trabalho não publicado)⁴⁰.

⁴⁰ Informações obtidas do relatório Ação Estática do Vento sobre o edifício Office Barra Sul, Porto Alegre/RS. Relatório elaborado em 2011 pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob responsabilidade do Prof. Acir Mércio Loredou-Souza e sua equipe.

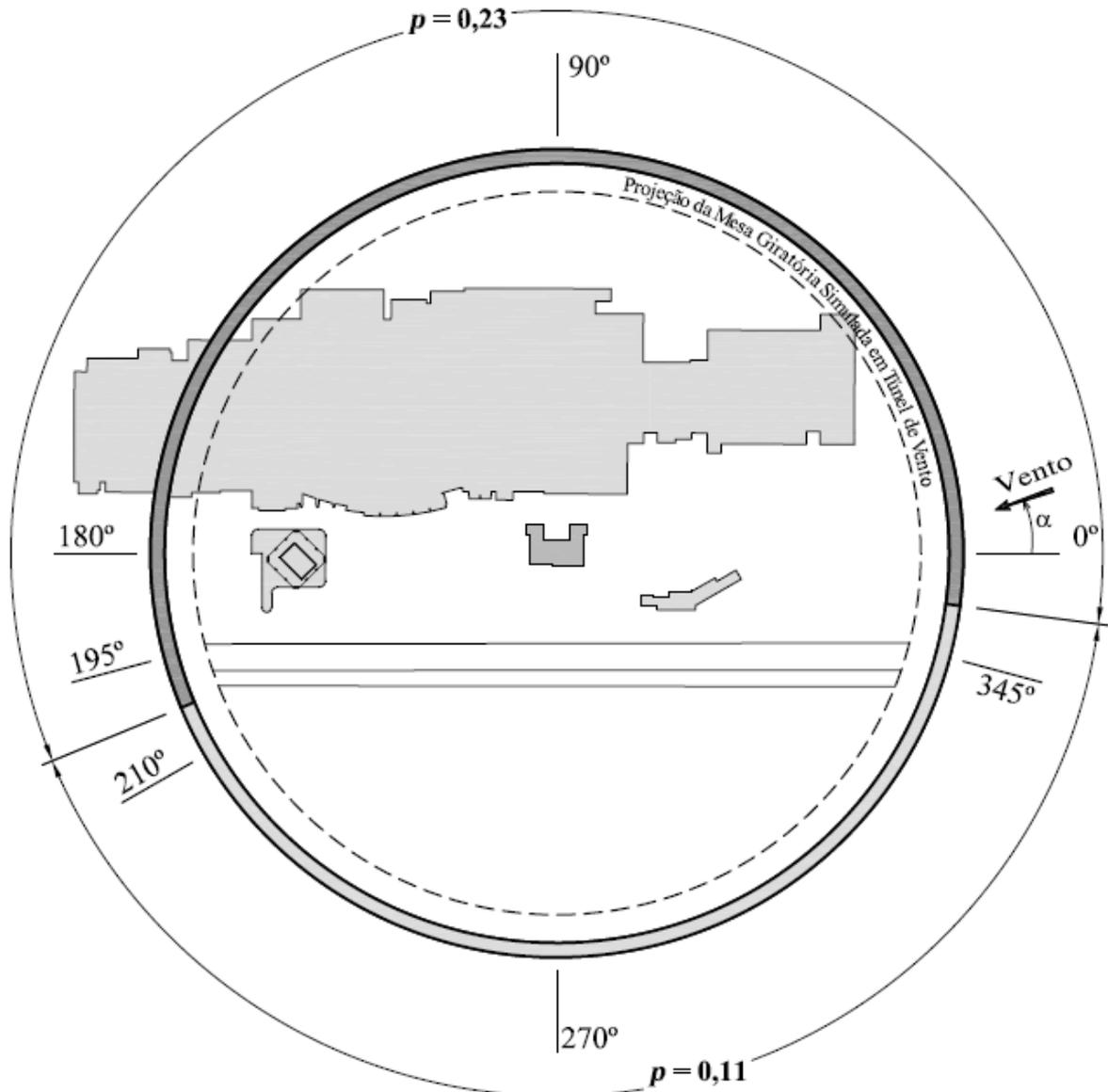
Figura 45 – Projeção em planta baixa do edifício Office Barra Sul e dimensões do retângulo para o cálculo através da Norma



(fonte: trabalho não publicado)⁴¹

⁴¹ Informações obtidas do relatório Ação Estática do Vento sobre o edifício Office Barra Sul, Porto Alegre/RS. Relatório elaborado em 2011 pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob responsabilidade do Prof. Acir Mércio Loredo-Souza e sua equipe.

Figura 46 – Referência do ângulo de incidência do vento para o edifício Office Barra Sul



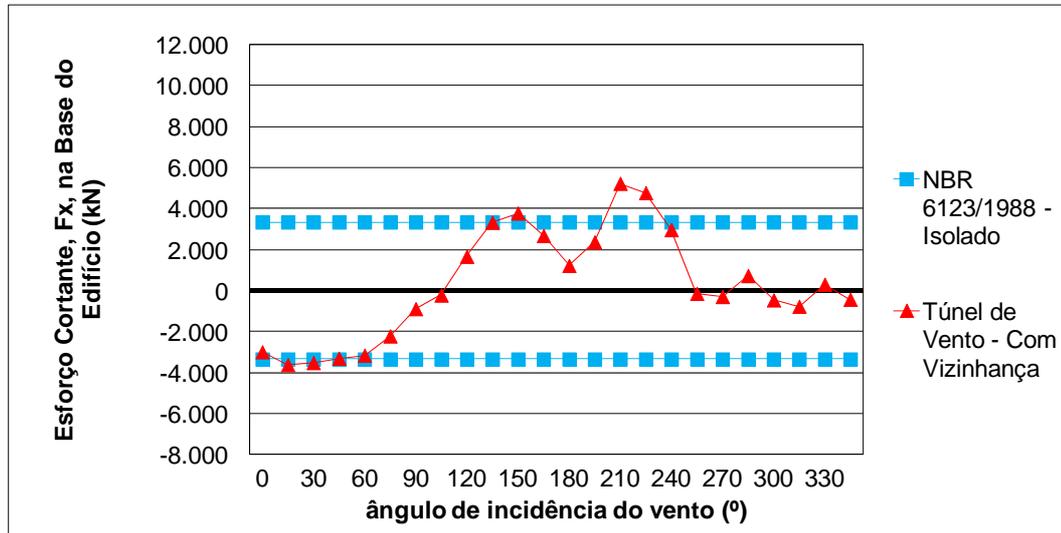
(fonte: trabalho não publicado)⁴²

Nos gráficos das figuras 47 e 48 são comparadas as solicitações do esforço cortante nas direções X e Y. Para a resultante na direção X percebe-se que o valor calculado através da Norma foi superado para a incidência do vento entre 15° e 30° , igualada quando o vento incidiu a 135° e novamente superada para as incidências compreendidas entre 210° e 225° . A solicitação atingiu o valor máximo para a incidência em 210° . Já na direção Y o valor da

⁴² Informações obtidas do relatório Ação Estática do Vento sobre o edifício Office Barra Sul, Porto Alegre/RS. Relatório elaborado em 2011 pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob responsabilidade do Prof. Acir Mércio Loredo-Souza e sua equipe.

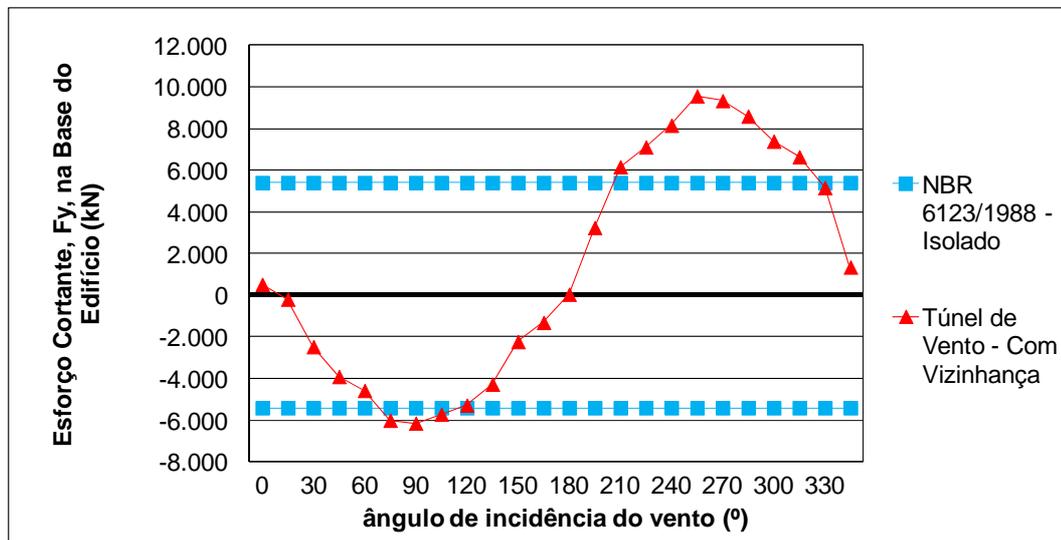
Norma foi superado entre as incidências de 75 e 105° e entre 210 e 315°, com a solicitação máxima em 255°.

Figura 47 – Esforço cortante na direção X para o edifício Office Barra Sul



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 48 – Esforço cortante na direção Y para o edifício Office Barra Sul

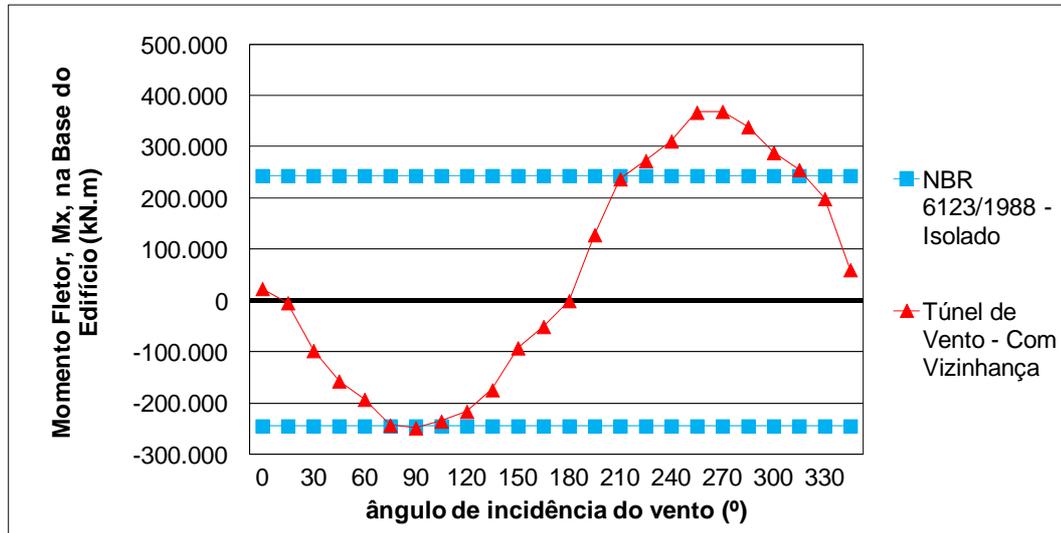


(fonte: elaborado pelo autor)

As figuras 49 e 50 apresentam os gráficos comparativos das solicitações de momento fletor nas direções X e Y. Observa-se que para a resultante na direção X o valor calculado através da Norma foi superado quando o vento incidiu entre 75 e 90° e entre 225 e 315°. A solicitação atingiu o valor máximo para a incidência do vento a 270°. Já na direção Y o valor da Norma é

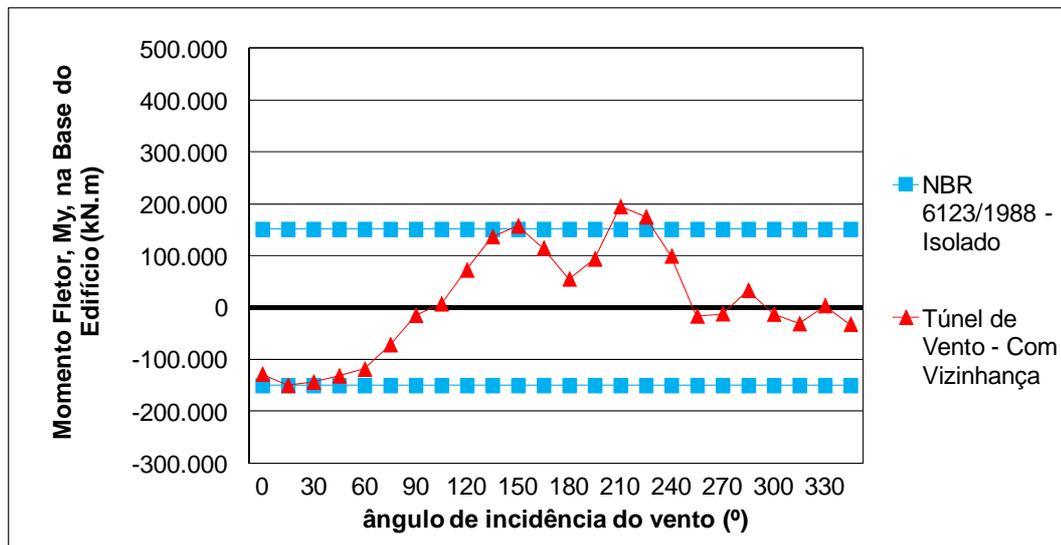
superado para as incidências em 15 e 150° e entre 210 e 225°, com a solicitação máxima em 210°.

Figura 49 – Momento fletor na direção X para o edifício Office Barra Sul



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 50 – Momento fletor na direção Y para o edifício Office Barra Sul



(fonte: elaborado pelo autor)

De acordo com a análise dos resultados obtidos para o edifício Office Barra Sul, conclui-se que a aplicação do FV máximo sugerido pela Norma não seria suficiente para majorar as solicitações de esforço cortante e momento fletor. Para ambas as solicitações os valores do FV obtidos nos ensaios em túnel de vento superaram o FV máximo previsto pela Norma. O maior FV observado foi para a solicitação de esforço cortante na direção Y atingindo 1,77.

A tabela 10 mostra um comparativo entre os valores máximos das solicitações de esforço cortante e momento fletor, obtidos no túnel de vento com a presença da vizinhança, e os valores previstos pela Norma para a edificação isolada. Entre parênteses e destacado o valor máximo do fator de vizinhança determinado para cada solicitação.

Tabela 10 – Solicitações e fatores de vizinhança para o edifício Office Barra Sul

Origem da Informação	Solicitações na Base	
	Esforço Cortante	Momento Fletor
Túnel de Vento – Eixo X (FV)	5.229 kN (1,57)	369.410 kN (1,53)
NBR 6123/1988 – Eixo X	3.338 kN	244.200 kN
Túnel de Vento – Eixo Y (FV)	9.556 kN (1,77)	194.558 kN (1,31)
NBR 6123/1988 – Eixo Y	5.407 kN	150.700 kN

(fonte: elaborada pelo autor)

6.5 CRON MY WAY

O edifício Cron My Way, de acordo com a classificação de rugosidade da NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 8-9), enquadra-se entre a categoria III e IV. A seguir, na tabela 11, são fornecidas as informações utilizadas no cálculo analítico recomendado pela Norma.

Tabela 11 – Informações do edifício Cron My Way para o cálculo analítico através da Norma

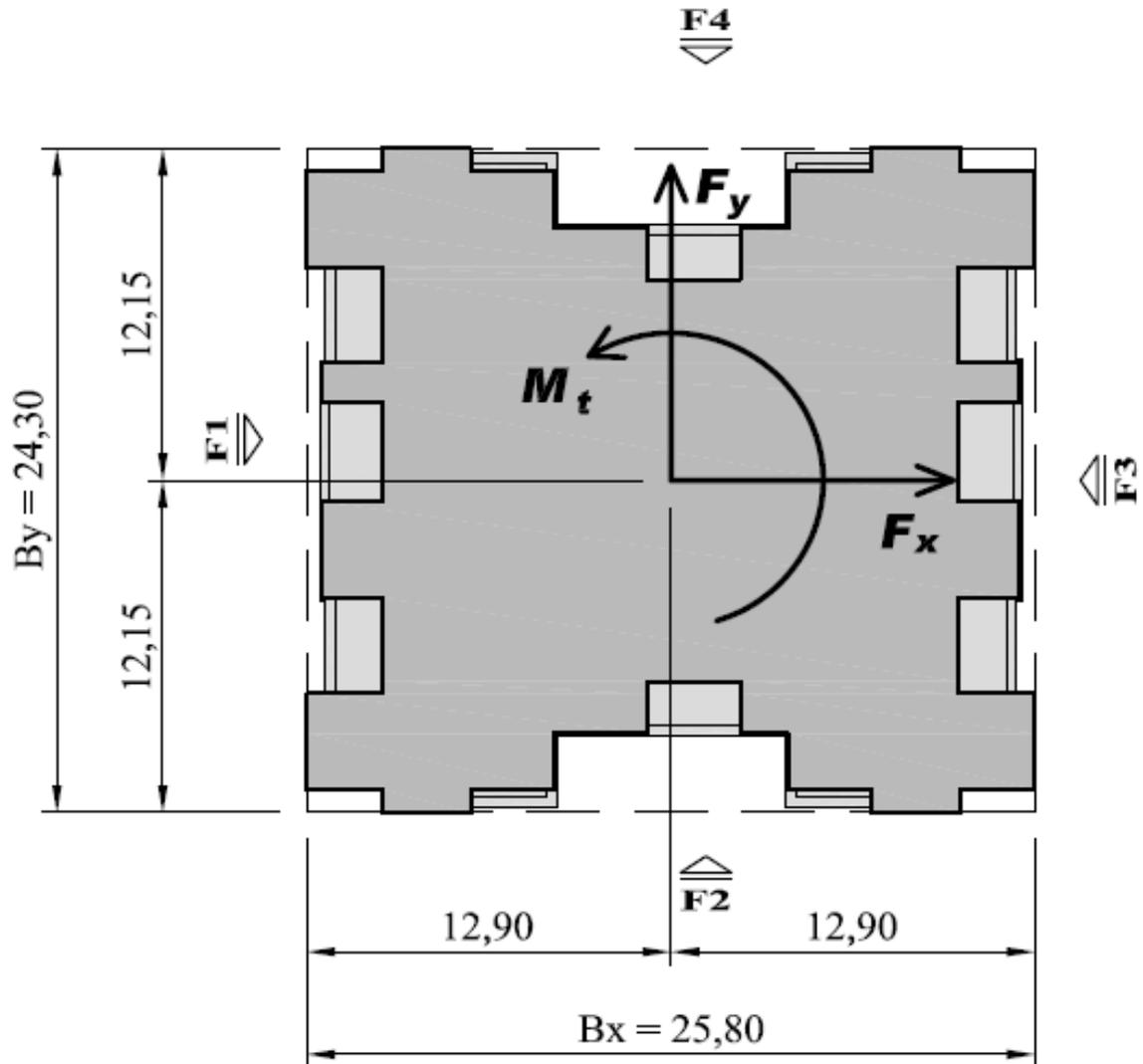
Categoria	Classe	V_0	S_1	S_2	h (m)	a/b	b/a	h/a	h/b
III - IV	C	42 m/s	1,0	0,52 – 1,0	45,65	1,06	0,94	1,58	1,68

(fonte: elaborada pelo autor)

Para o estudo em túnel de vento deste edifício foi construído um modelo em escala 1:300, no qual a semelhança geométrica, cinemática e dinâmica foi respeitada. A figura 51 mostra a projeção em planta baixa do edifício, semelhante ao formato da letra **H**, inscrita no retângulo utilizado no cálculo analítico aproximado recomendado pela Norma. Logo após, na figura 52,

pode-se visualizar a referência do ângulo de incidência do vento utilizada no ensaio em túnel de vento (trabalho não publicado)⁴³.

Figura 51 – Projeção em planta baixa do edifício Cron My Way e dimensões do retângulo para o cálculo através da Norma

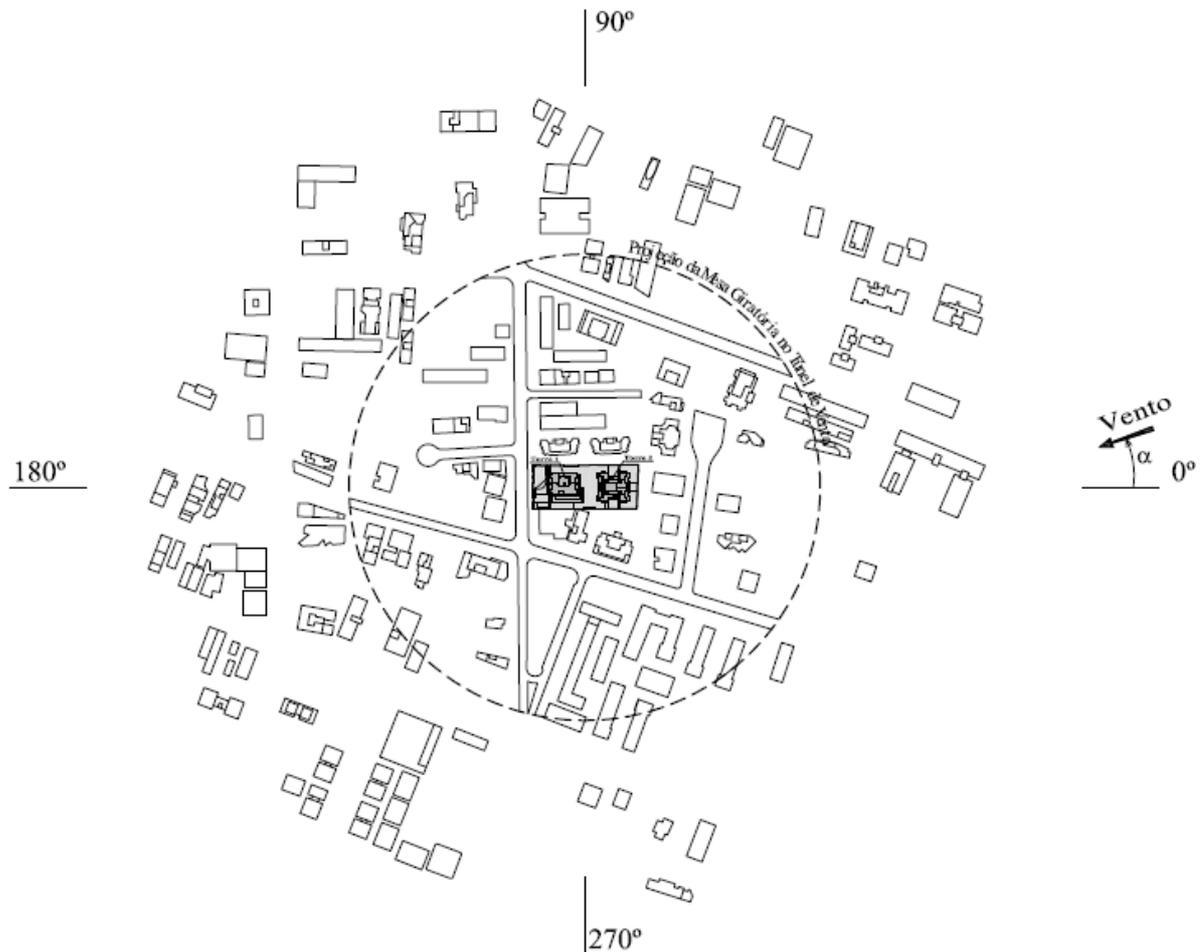


(fonte: trabalho não publicado)⁴⁴

⁴³ Informações obtidas do relatório Ação Estática do Vento sobre o edifício Cron My Way, Curitiba/PR. Relatório elaborado em 2011 pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob responsabilidade do Prof. Acir Mércio Loredo-Souza e sua equipe.

⁴⁴ idem

Figura 52 – Referência do ângulo de incidência do vento para o edifício Cron My Way

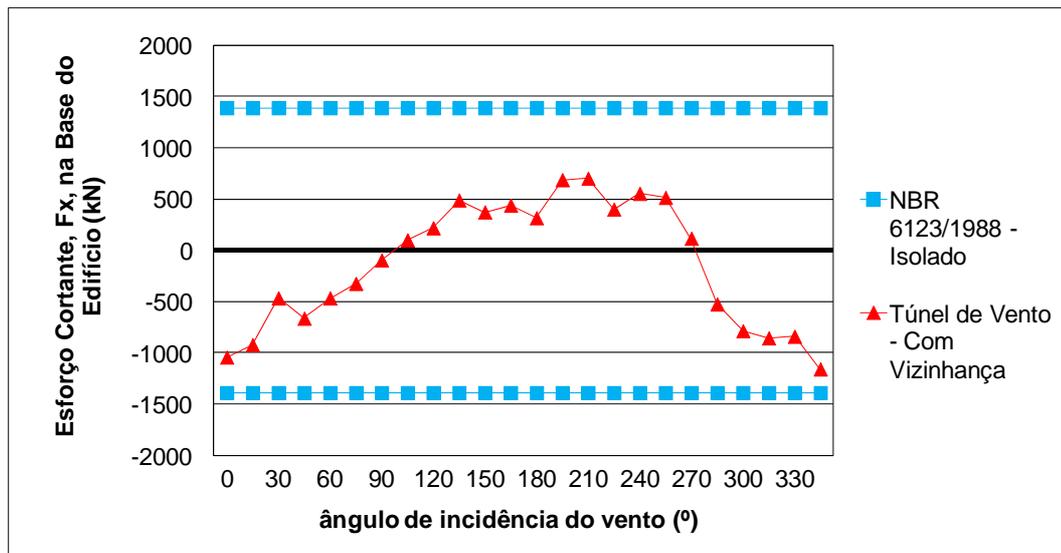


(fonte: trabalho não publicado)⁴⁵

Nos gráficos das figuras 53 e 54 são comparadas as solicitações do esforço cortante nas direções X e Y. Para a resultante na direção X percebe-se que o valor calculado através da Norma não foi igualado ou superado para a nenhuma incidência do vento. O mesmo vale para a direção Y, na qual o valor previsto pela Norma ficou muito acima dos valores obtidos no ensaio em túnel de vento.

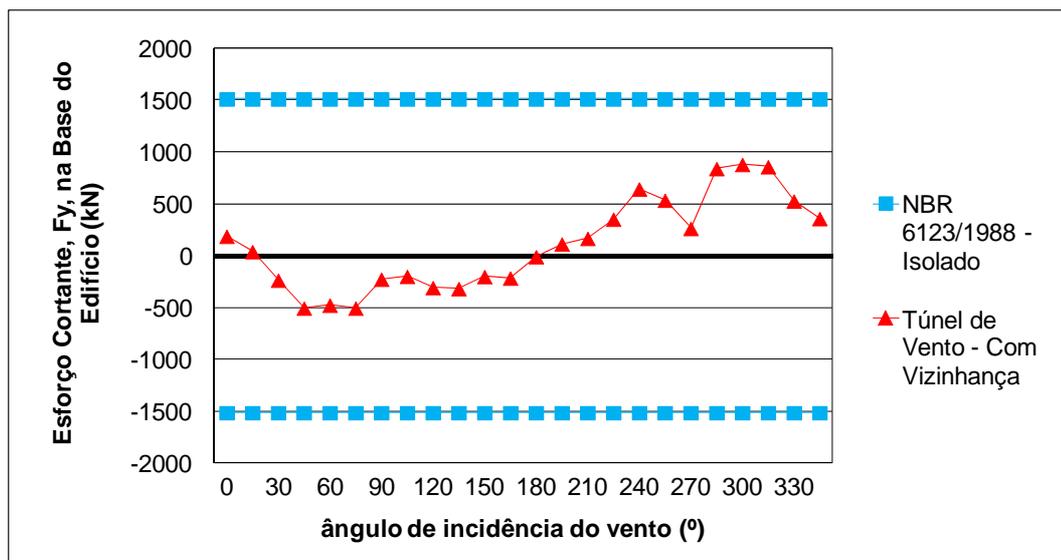
⁴⁵ Informações obtidas do relatório Ação Estática do Vento sobre o edifício Cron My Way, Curitiba/PR. Relatório elaborado em 2011 pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob responsabilidade do Prof. Acir Mércio Loredo-Souza e sua equipe.

Figura 53 – Esforço cortante na direção X para o edifício Cron My Way



(fonte: elaborado pelo autor)

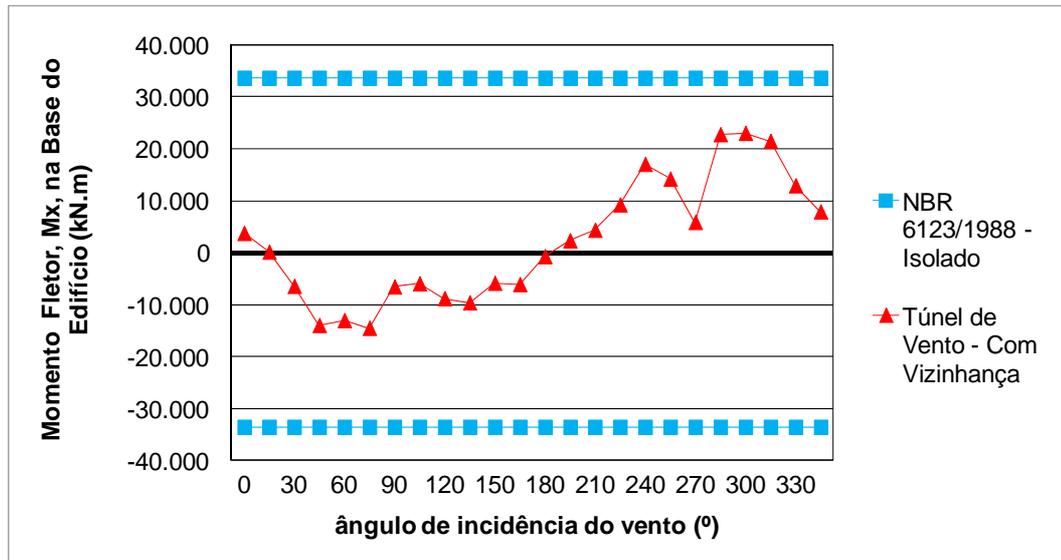
Figura 54 – Esforço cortante na direção Y para o edifício Cron My Way



(fonte: elaborado pelo autor)

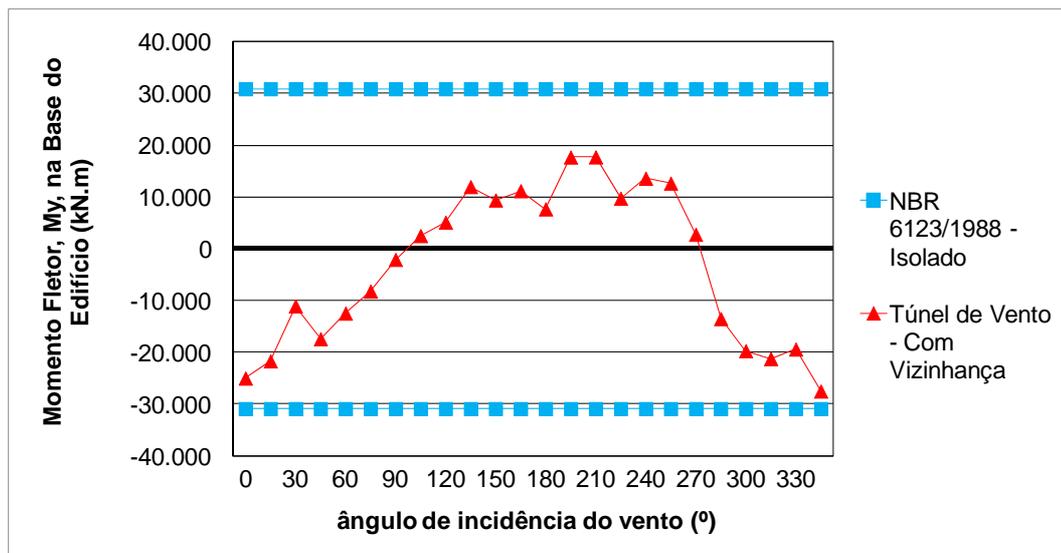
As figuras 55 e 56 apresentam os gráficos comparativos das solicitações de momento fletor nas direções X e Y. Observa-se que para a resultante tanto na direção X quanto na direção Y, de forma análoga aos que foram apurados para a solicitação de esforço cortante, os valores previstos pela Norma ficaram acima dos valores determinados pelos ensaios.

Figura 55 – Momento fletor na direção Y para o edifício Cron My Way



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 56 – Momento fletor na direção Y para o edifício Cron My Way



(fonte: elaborado pelo autor)

De acordo com a análise dos resultados obtidos para o edifício Cron My Way, conclui-se que não seria necessária a aplicação do fator de vizinhança para majorar as solicitações de esforço cortante e momento fletor. Ambas as solicitações obtidas nos ensaios em túnel de vento ficaram abaixo do previsto pela Norma para todas as incidências do vento. A tabela 12 mostra um comparativo entre os valores máximos das solicitações de esforço cortante e momento fletor, obtidos no túnel de vento com a presença da vizinhança, e os valores obtidos através da

Norma para a edificação isolada. Entre parênteses e destacado, o valor máximo do fator de vizinhança determinado para cada solicitação.

Tabela 12 – Solicitações e fatores de vizinhança para o edifício Cron My Way

Origem da Informação	Solicitações na Base	
	Esforço Cortante	Momento Fletor
Túnel de Vento – Eixo X (FV)	1.159 kN (0,83)	23.000 kN (0,68)
NBR 6123/1988 – Eixo X	1.389 kN	33.600 kN
Túnel de Vento – Eixo Y (FV)	879 kN (0,58)	27.530 kN (0,89)
NBR 6123/1988 – Eixo Y	1.512 kN	30.900 kN

(fonte: elaborada pelo autor)

6.6 GRAÇA

O edifício Graça, de acordo com a classificação de rugosidade da NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 8-9), enquadra-se entre a categoria III e IV. A seguir, na tabela 13, são fornecidas as informações utilizadas no cálculo analítico recomendado pela Norma.

Tabela 13 – Informações do edifício Graça para o cálculo analítico através da Norma

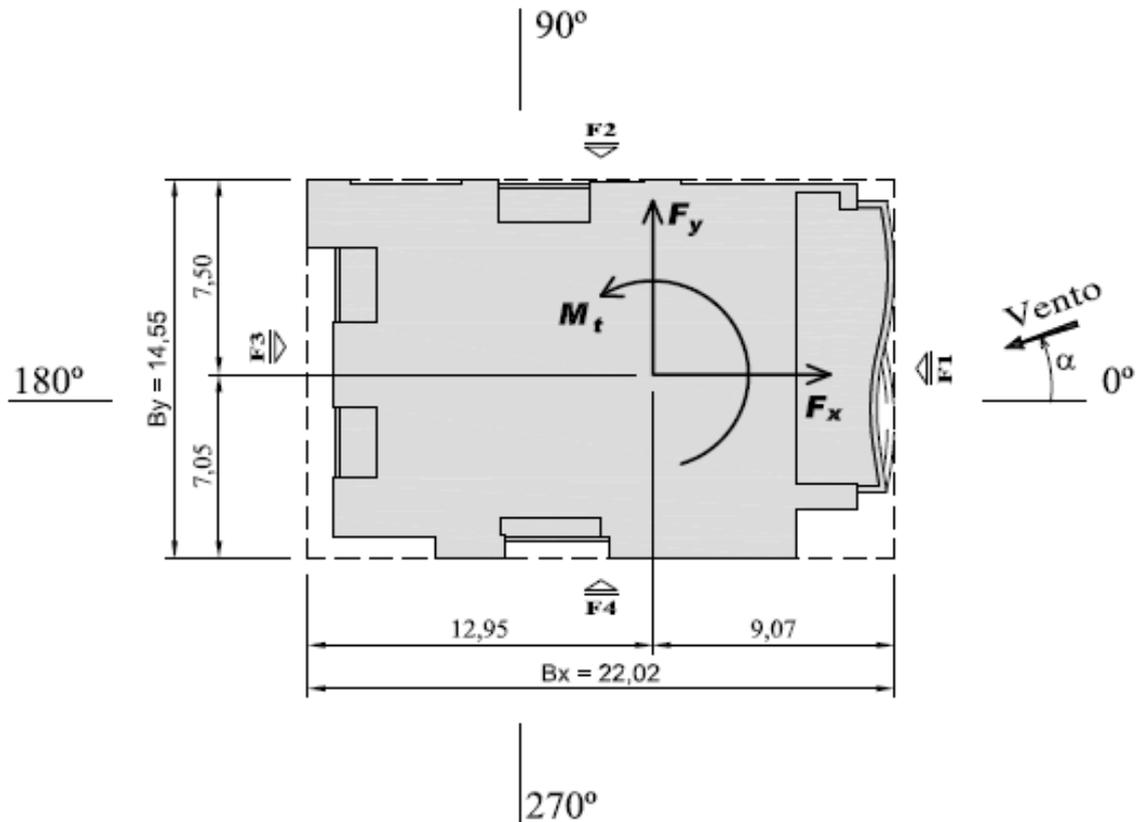
Categoria	Classe	V_0	S_1	S_2	h (m)	a/b	b/a	h/a	h/b
III - IV	C	30 m/s	1,0	0,73 – 1,14	112,71	1,51	0,66	5,12	7,75

(fonte: elaborada pelo autor)

Para o estudo em túnel de vento deste edifício foi construído um modelo em escala 1:250, no qual a semelhança geométrica, cinemática e dinâmica foi respeitada. A figura 57 mostra a projeção em planta baixa do edifício, inscrita no retângulo utilizado no cálculo analítico aproximado recomendado pela Norma. Logo após, na figura 58, pode-se visualizar a

referência do ângulo de incidência do vento utilizada no ensaio em túnel de vento (trabalho não publicado)⁴⁶.

Figura 57 – Projeção em planta baixa do edifício Graça e dimensões do retângulo para o cálculo através da Norma

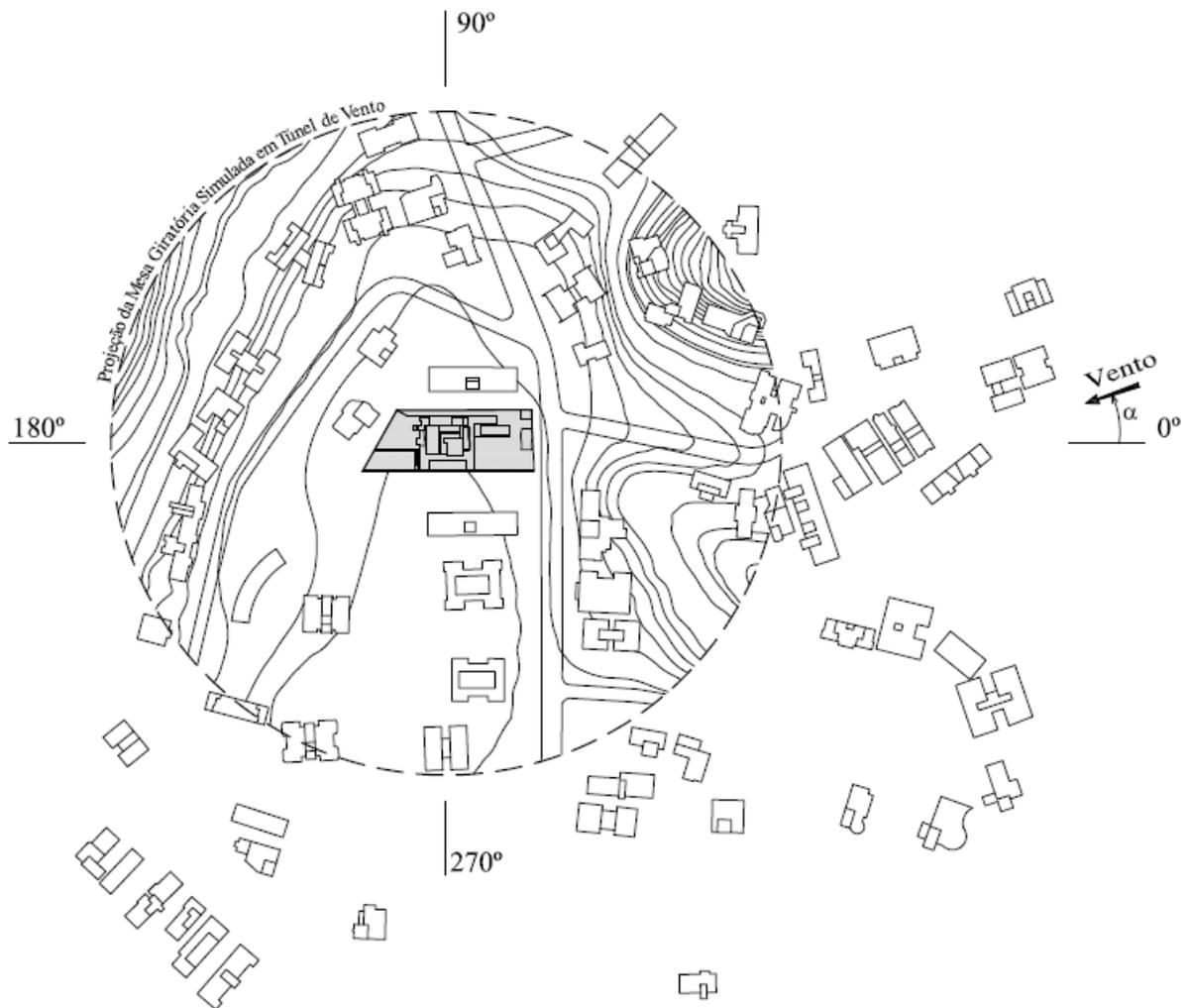


(fonte: trabalho não publicado)⁴⁷

⁴⁶ Informações obtidas do relatório Ação Estática do Vento sobre o edifício Graça, Salvador/BA. Relatório elaborado em 2012 pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob responsabilidade do Prof. Acir Mércio Loredo-Souza e sua equipe.

⁴⁷ idem

Figura 58 – Referência do ângulo de incidência do vento para o edifício Graça

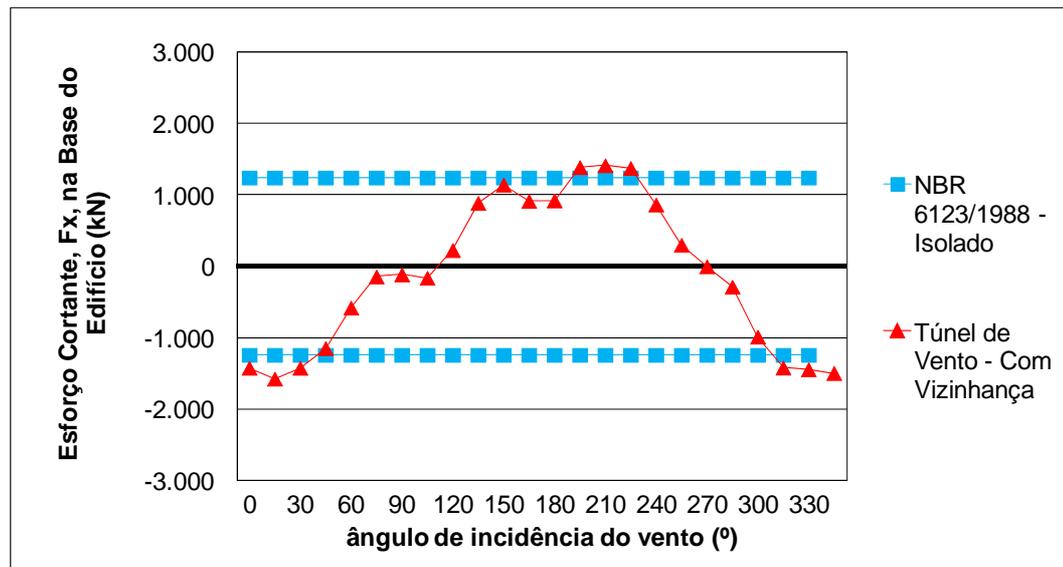


(fonte: trabalho não publicado)⁴⁸

Nos gráficos das figuras 59 e 60 são comparadas as solicitações de esforço cortante nas direções X e Y. Para a resultante na direção X percebe-se que o valor calculado através da Norma foi superado para duas faixas de incidências do vento, a primeira entre 315 e 30° e a segunda entre 195 e 225°. A solicitação atingiu o valor máximo para a incidência do vento a 15°. Já na direção Y o valor da Norma é superado somente para a incidência de 300°, com a solicitação alcançando o máximo para essa incidência do vento.

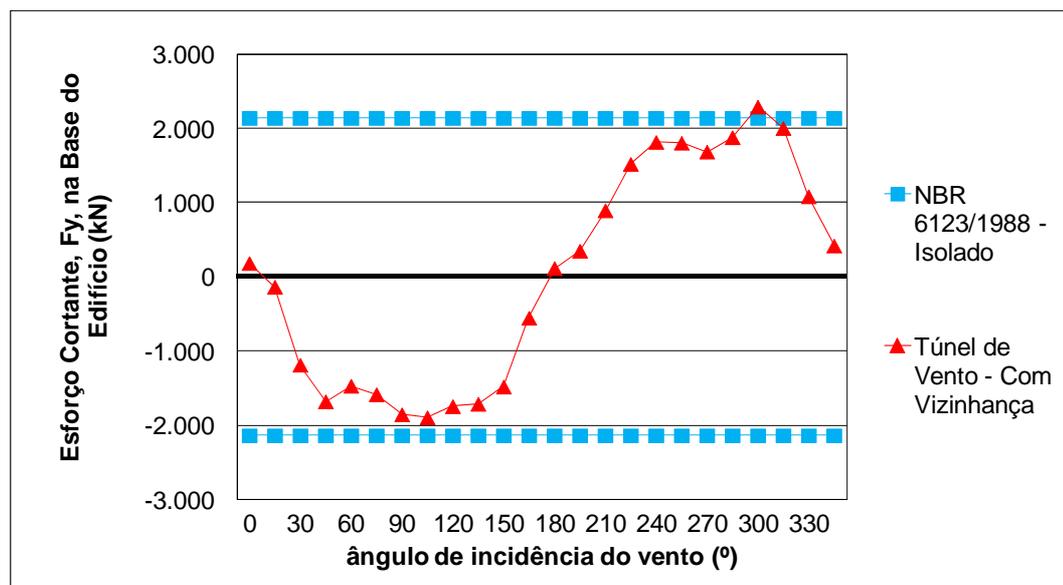
⁴⁸ Informações obtidas do relatório Ação Estática do Vento sobre o edifício Graça, Salvador/BA. Relatório elaborado em 2012 pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob responsabilidade do Prof. Acir Mércio Loredo-Souza e sua equipe.

Figura 59 – Esforço cortante na direção X para o edifício Graça



(fonte: elaborado pelo autor)

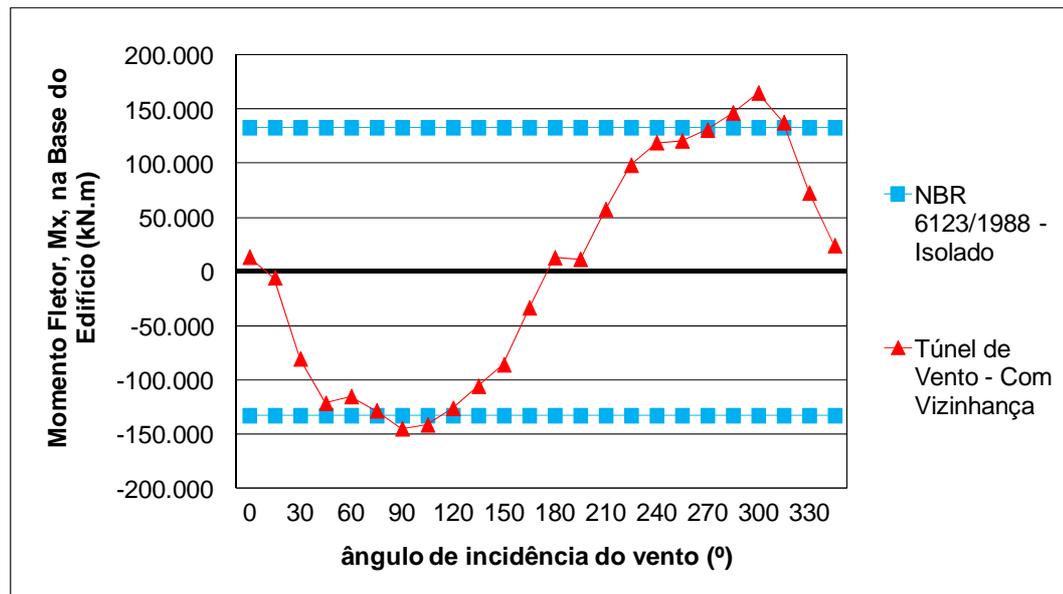
Figura 60 – Esforço cortante na direção Y para o edifício Graça



(fonte: elaborado pelo autor)

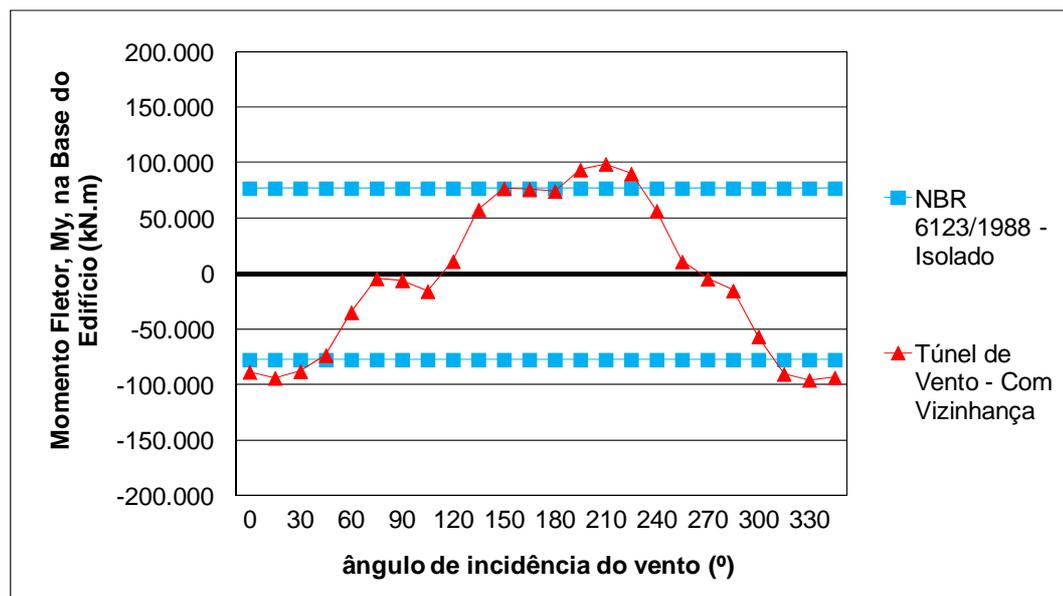
As figuras 61 e 62 apresentam os gráficos comparativos das solicitações de momento fletor nas direções X e Y. Observa-se que para a resultante na direção X o valor calculado através da Norma foi superado para a incidência do vento entre 90 e 105° e entre 285 e 315°, na qual a solicitação alcançou o máximo em 300°. Já na direção Y o valor da Norma foi superado entre as incidências de 315 e 30°, igualado em 150° e novamente superado entre as incidências de 195 e 225°, com a solicitação alcançado o máximo em 210°.

Figura 61 – Momento fletor na direção X para o edifício Graça



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 62 – Momento fletor na direção Y para o edifício Graça



(fonte: elaborado pelo autor)

De acordo com a análise dos resultados obtidos para o edifício Graça, conclui-se que a aplicação do fator de vizinhança máximo sugerido pela Norma seria suficiente para atender as solicitações de esforço cortante e momento fletor. Para ambas as solicitações o FV obtido nos ensaios em túnel de vento não superaram o FV máximo previsto pela Norma. A tabela 14 mostra um comparativo entre os valores máximos das solicitações de esforço cortante e momento fletor, obtidos no túnel de vento com a presença da vizinhança, e os valores

calculados através da Norma para a edificação isolada. Entre parênteses e destacado, o valor máximo do fator de vizinhança determinado para cada solicitação.

Tabela 14 – Solicitações e fatores de vizinhança para o edifício Graça

Origem da Informação	Solicitações na Base	
	Esforço Cortante	Momento Fletor
Túnel de Vento – Eixo X (FV)	1.577 kN (1,27)	164.345 kN (1,24)
NBR 6123/1988 – Eixo X	1.242 kN	132.900 kN
Túnel de Vento – Eixo Y (FV)	2.290 kN (1,07)	99.012 kN (1,28)
NBR 6123/1988 – Eixo Y	2.138 kN	77.200 kN

(fonte: elaborada pelo autor)

6.7 RESORT RESIDENCE

O edifício Resort Residence, de acordo com a classificação de rugosidade da NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 8-9), enquadra-se entre a categoria III e IV. A seguir, na tabela 15, são fornecidas as informações utilizadas no cálculo analítico recomendado pela Norma.

Tabela 15 – Informações do edifício Resort Residence para o cálculo analítico através da Norma

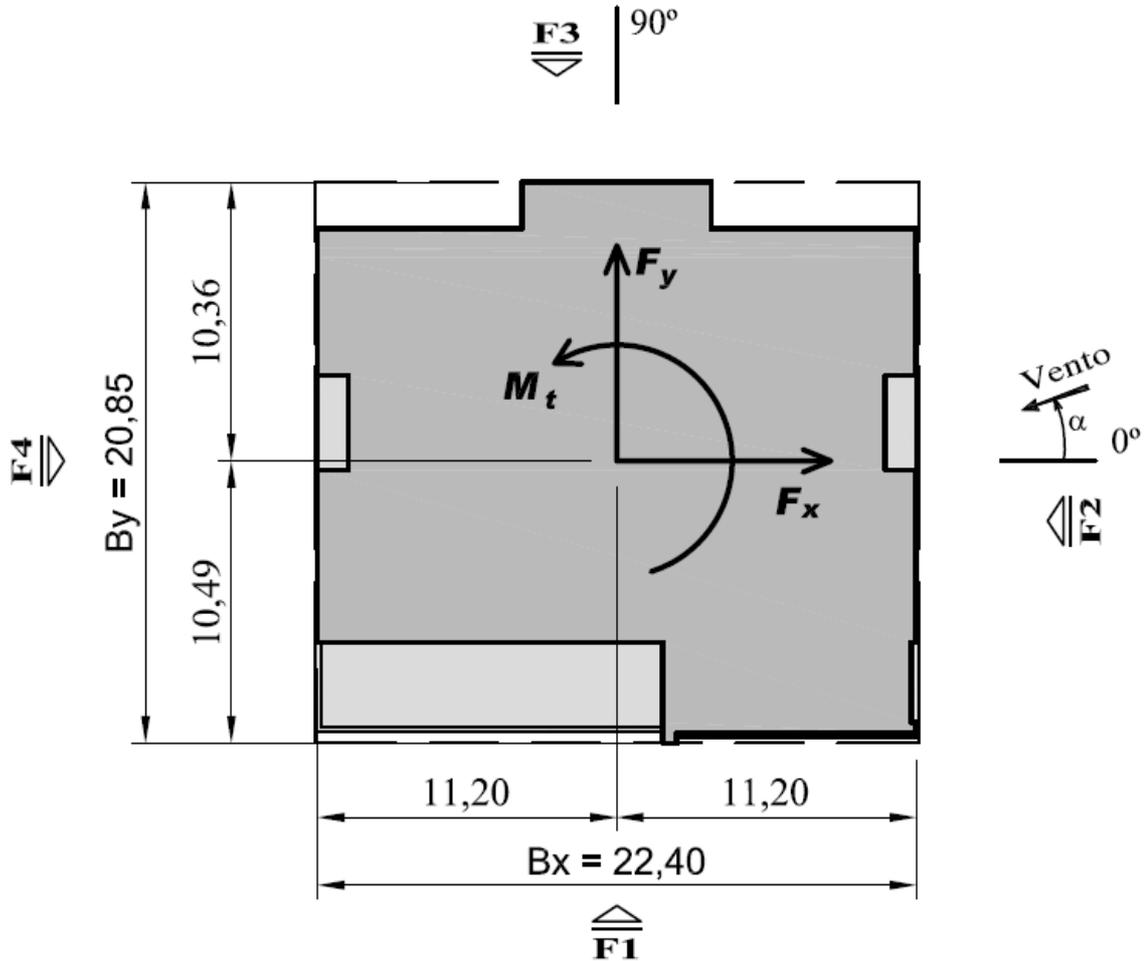
Categoria	Classe	V_0	S_1	S_2	h (m)	a/b	b/a	h/a	h/b
III - IV	C	45 m/s	1,13	0,72 – 1,09	82,00	1,07	0,93	3,66	3,93

(fonte: elaborada pelo autor)

Para o estudo em túnel de vento deste edifício foi construído um modelo em escala 1:350, no qual a semelhança geométrica, cinemática e dinâmica foi respeitada. A figura 63 mostra a projeção em planta baixa do edifício inscrita no retângulo utilizado no cálculo analítico aproximado recomendado pela Norma. Logo após, na figura 64, pode-se visualizar a

referência do ângulo de incidência do vento utilizada no ensaio em túnel de vento (trabalho não publicado)⁴⁹.

Figura 63 – Projeção em planta baixa do edifício Resort Residence e dimensões do retângulo para o cálculo através da Norma

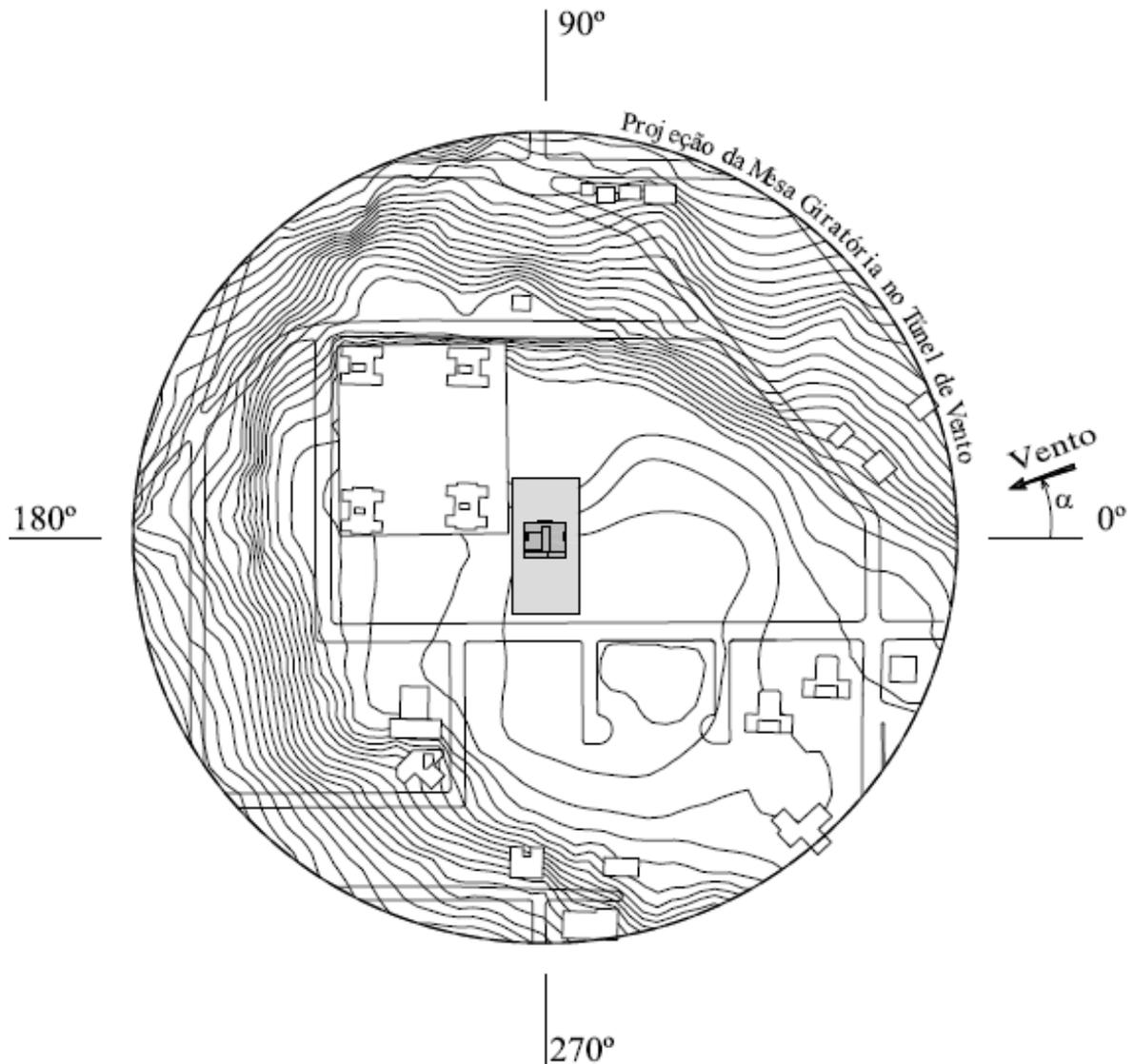


(fonte: trabalho não publicado)⁵⁰

⁴⁹ Informações obtidas do relatório Ação Estática do Vento sobre o edifício Resort Residence, Caxias do Sul/RS. Relatório elaborado em 2012 pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob responsabilidade do Prof. Acir Mércio Loredo-Souza e sua equipe.

⁵⁰ idem

Figura 64 – Referência do ângulo de incidência do vento para o edifício Resort Residence

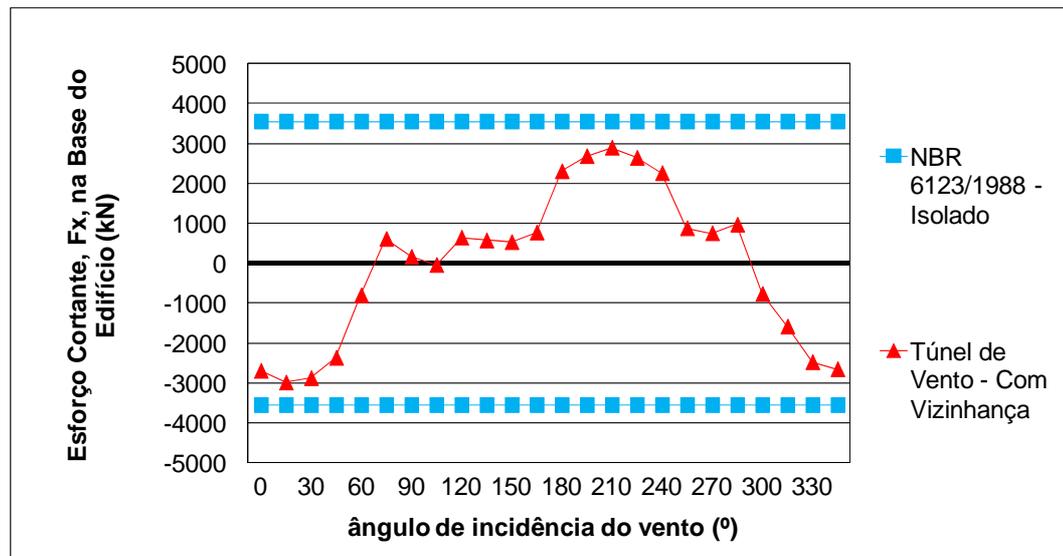


(fonte: trabalho não publicado)⁵¹

Nos gráficos das figuras 65 e 66 são comparadas as solicitações do esforço cortante nas direções X e Y. Para a resultante na direção X percebe-se que o valor calculado através da Norma não foi igualado ou superado para nenhuma incidência do vento. O mesmo ocorreu para a resultante na direção Y, na qual o valor previsto pela Norma foi sempre superior aos obtidos através dos ensaios.

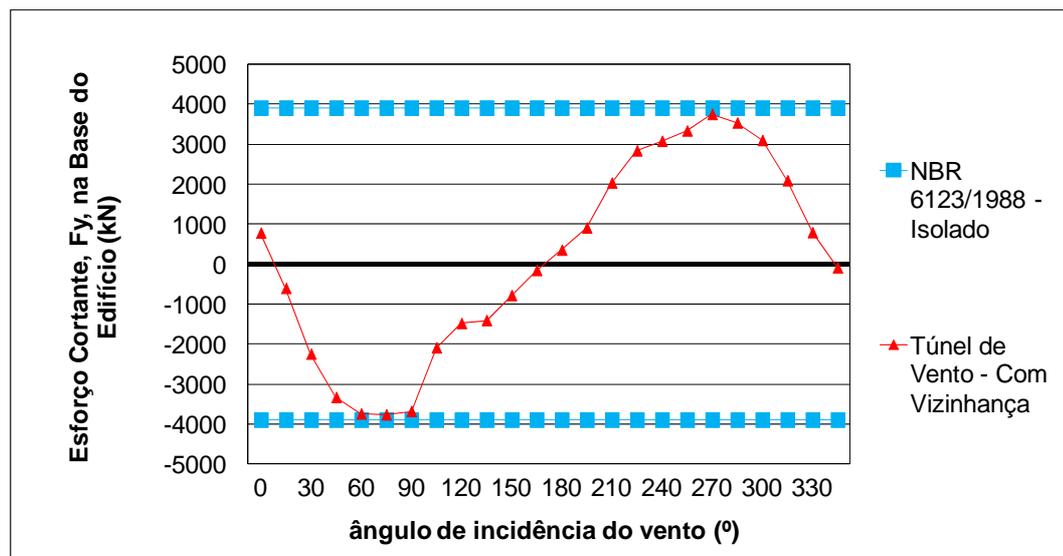
⁵¹ Informações obtidas do relatório Ação Estática do Vento sobre o edifício Resort Residence, Caxias do Sul/RS. Relatório elaborado em 2012 pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob responsabilidade do Prof. Acir Mércio Loredo-Souza e sua equipe.

Figura 65 – Esforço cortante na direção X para o edifício Resort Residence



(fonte: elaborado pelo autor)

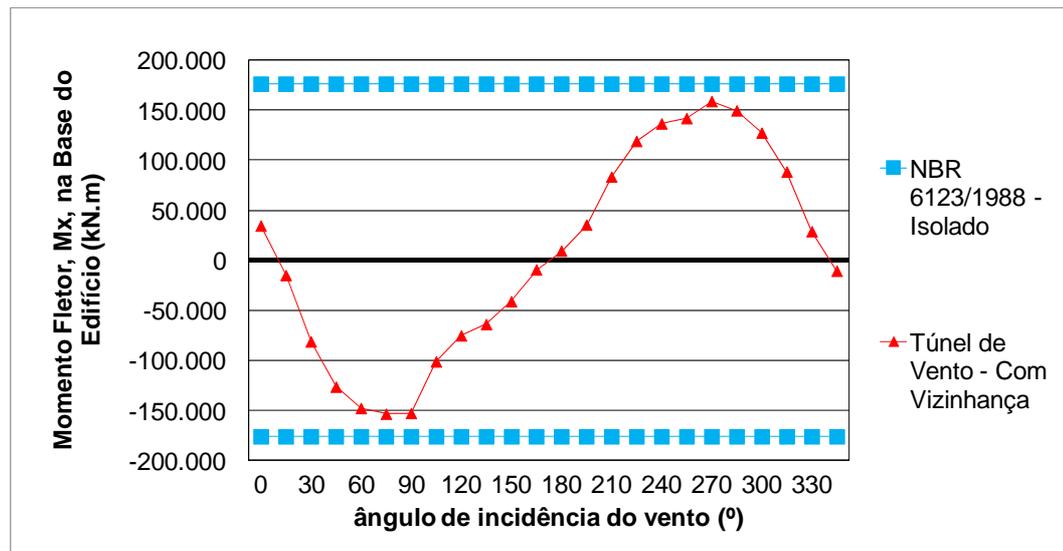
Figura 66 – Esforço cortante na direção Y para o edifício Resort Residence



(fonte: elaborado pelo autor)

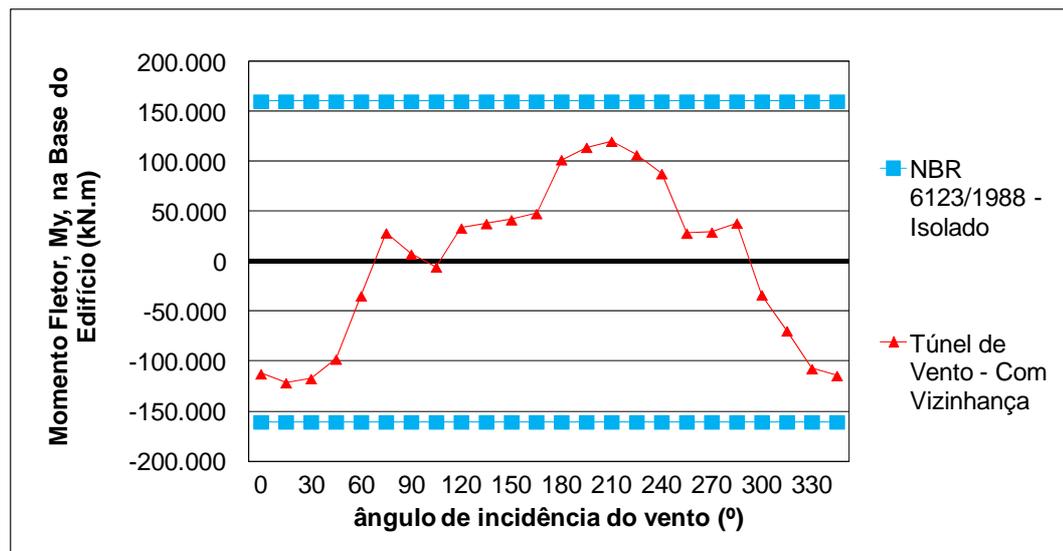
As figuras 67 e 68 apresentam os gráficos comparativos das solicitações de momento fletor nas direções X e Y. Observa-se que tanto para a resultante na direção X quanto para a direção Y, de forma análoga ao que foi observado para a solicitação de esforço cortante, os valores previstos pela Norma superaram os ensaios para todas as incidências do vento.

Figura 67 – Momento fletor na direção X para o edifício Resort Residence



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 68 – Momento fletor na direção Y para o edifício Resort Residence



(fonte: elaborado pelo autor)

De acordo com a análise dos resultados obtidos para o edifício Resort Residence, conclui-se que não seria necessária a aplicação do fator de vizinhança para majorar as solicitações de esforço cortante e momento fletor. Ambas as solicitações obtidas nos ensaios em túnel de vento ficaram abaixo do previsto pela Norma para todas as incidências do vento. A solicitação determinada a partir do estudo em túnel de vento que mais se aproximou da previsão da Norma foi o esforço cortante na direção Y: 4% inferior à Norma. De todas as edificações escolhidas para este estudo, esta é a que mais se aproxima do formato paralelepípedo. A

tabela 16 mostra um comparativo entre os valores máximos das solicitações de esforço cortante e momento fletor, obtidos no túnel de vento com a presença da vizinhança, e os valores calculados através da Norma para a edificação isolada. Entre parênteses e destacado o valor máximo do fator de vizinhança determinado para cada solicitação.

Tabela 16 – Solicitações e fatores de vizinhança para o edifício Resort Residence

Origem da Informação	Solicitações na Base	
	Esforço Cortante	Momento Fletor
Túnel de Vento – Eixo X (FV)	2.988 kN (0,84)	158.895 kN (0,90)
NBR 6123/1988 – Eixo X	3.553 kN	176.300 kN
Túnel de Vento – Eixo Y (FV)	3.749 kN (0,96)	121.395 kN (0,76)
NBR 6123/1988 – Eixo Y	3.902 kN	160.500 kN

(fonte: elaborada pelo autor)

7 CONCLUSÕES

A análise comparativa conduzida neste estudo indica que dos sete edifícios analisados, quatro apresentaram fatores de vizinhança superiores ao valor prescrito pela Norma. Para estes edifícios o FV mais desfavorável ficou próximo de 1,8. Porém, estes resultados devem ser observados com cautela, visto que a abrangência deste estudo é limitada a uma pequena amostra das configurações possíveis para a vizinhança das edificações.

Dois edifícios, por suas geometrias e pelos valores de FV, merecem atenção especial. Carlos Steinen e Home Stay são os edifícios com a forma geométrica mais distante da forma paralelepípedica. A concepção arquitetônica de ambos segue o mesmo princípio: dois prismas de seções transversais aproximadamente retangulares unidos por uma de suas extremidades, formando um ângulo interno obtuso. Os fatores de vizinhança mais desfavoráveis para estes edifícios também alcançaram valores semelhantes, ficaram em torno de 1,4.

A inclusão de fatores de vizinhança no anexo G da NBR 6123/1988 para edifícios com formas geométricas similares aos edifícios Carlos Steinen e Home Stay parece ser conveniente, visto que estas formas são bastante recorrentes na arquitetura contemporânea. Propõe-se então, outro estudo específico e sistemático em túnel de vento para viabilizar uma possível normatização dessas formas, pois análises comparativas como as descritas neste trabalho apontam tendências muito úteis do ponto de vista quantitativo, mas são deficientes para a sistematização requerida a um texto normativo.

Outro item importante relacionado ao anexo G da Norma refere-se à visualização do fator de vizinhança. Pela sua importância, o FV deveria constar como um coeficiente fixo nas expressões utilizadas pelos projetistas para determinar os esforços devidos ao vento. A alteração da redação da Norma minimizaria a incidência de erros devidos a negligência ou desconhecimento, pois obrigaria o projetista a indicar o FV nos cálculos. Neste trabalho é proposta a inclusão do fator de vizinhança na expressão **6.3.6** da NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NÓRMAS TÉCNICAS, 1988, p. 19, grifo nosso), visto ser esta a expressão utilizada para o cálculo das solicitações nos edifícios abordados por este estudo.

Redação atual (já apresentada neste trabalho como fórmula 11):

$$F_a = C_a q A_e \quad (\text{fórmula 11})$$

Redação proposta:

$$F_a = C_a q A_e \mathbf{FV} \quad (\text{fórmula 16})$$

Onde:

F_a = força de arrasto (N);

C_a = coeficiente de arrasto;

q = pressão dinâmica (Pa);

A_e = área da projeção ortogonal da edificação, estrutura ou elemento estrutural sobre um plano perpendicular à direção do vento (m^2);

\mathbf{FV} = fator de vizinhança (calculado de acordo com o disposto no Anexo G).

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.

BLESSMANN, J. **Intervalo de tempo para cálculo da velocidade básica do vento**. 3. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 1988.

_____. **Ação do vento em edifícios**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 1989.

_____. **Aerodinâmica das construções**. 2. ed. Porto Alegre: Sagra, 1990.

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

_____. **Ação do vento em telhados**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 2009.

CARPEGGIANI, E. A. **Determinação dos efeitos estáticos de torção em edifícios altos devidos à ação do vento**. 2004. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Laboratório de Aerodinâmica das Construções. **Túnel de Vento**. Porto Alegre, [2012]. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/lac/tunel.htm>>. Acesso em: 8 jun. 2012.