

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

**Guilherme Martins Siqueira**

**ESTUDO DA TORÇÃO DEVIDA AO VENTO EM EDIFÍCIOS  
ALTOS: COMPARAÇÃO ENTRE TÚNEL DE VENTO E  
NBR 6123/1988**

Porto Alegre  
novembro 2009

**GUILHERME MARTINS SIQUEIRA**

**ESTUDO DA TORÇÃO DEVIDA AO VENTO EM EDIFÍCIOS  
ALTOS: COMPARAÇÃO ENTRE TÚNEL DE VENTO E  
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  
novembro 2009

**GUILHERME MARTINS SIQUEIRA**

**ESTUDO DA TORÇÃO DEVIDA AO VENTO EM EDIFÍCIOS  
ALTOS: COMPARAÇÃO ENTRE TÚNEL DE VENTO E  
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, novembro de 2009

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

**Profa. Carin Maria Schmitt**  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA**

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

**Prof. Marcelo Maia Rocha**  
Dr. techn. pela Universitaet Innsbruck, Áustria

**Dr. Mário Gustavo Klaus Oliveira**  
Dr. pela UFRGS

Dedico este trabalho a meus pais, Rubens e Gleice, e à  
minha noiva, Raquel, que sempre me apoiaram e  
especialmente durante o período do meu Curso de  
Graduação estiveram ao meu lado.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Prof. Acir Mércio Loredo-Souza, orientador deste trabalho, pela aprendizagem que me proporcionou, pelo incentivo que me deu durante o Curso de Graduação, por acreditar no meu sucesso e pela orientação recebida durante a execução deste trabalho.

Agradeço a todos os funcionários e colaboradores do LAC, com os quais tive a oportunidade de conviver, pelo auxílio durante cada projeto, pelo apoio e pelo crescimento intelectual que me proporcionaram.

Agradeço à minha família pela educação que me deu, por ter investido desde cedo na minha formação acadêmica e por todo apoio e incentivo que recebi durante o Curso de Graduação.

Eu sou o caminho, e a verdade, e a vida. Ninguém vem ao  
Pai senão por mim.

*Jesus Cristo*

## RESUMO

SIQUEIRA, G. M. **Estudo da Torção Devida ao Vento em Edifícios Altos:** comparação entre túnel de vento e NBR 6.123/1988. 2009. 70 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

O vento é um dos principais carregamentos que devem ser considerados em edifícios altos. Os esforços causados pela ação do vento devem ser considerados durante o dimensionamento da estrutura da edificação para se obter melhorias no seu desempenho e mais segurança no projeto. De um modo geral, as forças devidas ao vento em edificações são obtidas a partir de coeficientes aerodinâmicos contidos em Normas, manuais ou relatórios de pesquisas, que se referem a construções de formas simplificadas e estudadas isoladamente. Entretanto, as obras de Engenharia têm formas arquitetônicas distintas, que nem sempre se aproximam das formas simplificadas previamente estudadas. Além disso, os edifícios altos são construídos, geralmente, em grandes centros urbanos, onde a presença de edificações situadas nas proximidades pode influenciar o campo aerodinâmico e, portanto, aumentar as sucções, forças e momentos de flexão e de torção. Este trabalho procura verificar a adequação dos momentos de torção calculados pela NBR 6123/1988 através da sua comparação com os resultados obtidos em ensaios em túnel de vento para algumas edificações atualmente em construção no Brasil. Os resultados demonstram que, no que se refere à torção, a indicação para edificações isoladas da NBR 6123/1988 fornece valores mais baixos do que os valores obtidos nos ensaios para determinados ângulos de incidência do vento, significando que para diversos casos pode estar contra a segurança. Conclui-se que a Norma brasileira deve ser revisada e seus valores ajustados para contemplar a um maior número de casos.

Palavras-chave: momento de torção; edifícios altos; túnel de vento; NBR 6123/1988.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: representação esquemática do delineamento da pesquisa .....	16
Figura 2: vista em planta do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann .....	21
Figura 3: fotografia do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann .....	21
Figura 4: perfil de velocidades médias do vento .....	22
Figura 5: dispositivos de geração de diferentes camadas limites do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann .....	26
Figura 6: perfis de velocidade média para o eixo vertical de duas seções do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann .....	26
Figura 7: desenho ilustrativo das excentricidades $e_a$ e $e_b$ .....	29
Figura 8: coeficiente de arrasto para edificações paralelepípedicas em vento de baixa turbulência .....	31
Figura 9: coeficiente de arrasto para edificações paralelepípedicas em vento de alta turbulência .....	31
Figura 10: isopleta de velocidade básica $V_0$ (m/s) .....	33
Figura 11: exemplo de um registro da série temporal das pressões devidas ao vento .....	35
Figura 12: perspectiva artística do edifício Cristal Tower .....	37
Figura 13: modelo reduzido no interior do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann, edifício Cristal Tower .....	38
Figura 14: centro de torção e dimensões principais do edifício Cristal Tower .....	38
Figura 15: perspectiva artística do edifício Atlanta .....	39
Figura 16: modelo reduzido no interior do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann, edifício Atlanta .....	39
Figura 17: centro de torção e dimensões principais do edifício Atlanta .....	39
Figura 18: perspectiva artística da Torre Comendador Araújo .....	40
Figura 19: modelo reduzido no interior do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann, Torre Comendador Araújo .....	40
Figura 20: centro de torção e dimensões principais do edifício Comendador Araújo .....	41
Figura 21: perspectiva artística do edifício Prosperitas .....	41
Figura 22: modelo reduzido no interior do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann, edifício Prosperitas .....	42
Figura 23: centro de torção e dimensões principais do edifício Prosperitas .....	42
Figura 24: perspectiva artística do edifício Leopoldo Green .....	43
Figura 25: modelo reduzido no interior do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann, edifício Leopoldo Green .....	43
Figura 26: centro de torção e dimensões principais do edifício Leopoldo Green .....	43
Figura 27: perspectiva artística do edifício CENU Torre IV .....	44



Figura 28: modelo reduzido no interior do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann, edifício CENU Torre IV .....	44
Figura 29: centro de torção e dimensões principais do edifício CENU Torre IV .....	45
Figura 30: perspectiva artística do edifício Ocean Palace .....	45
Figura 31: modelo reduzido no interior do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann, edifício Ocean Palace .....	46
Figura 32: centro de torção e dimensões principais do edifício Ocean Palace .....	46
Figura 33: perspectiva artística do edifício Unique Residence .....	47
Figura 34: modelo reduzido no interior do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann, edifício Unique Residence .....	47
Figura 35: centro de torção e dimensões principais do edifício Unique Residence .....	47
Figura 36: perspectiva artística do edifício Issa Hazbum .....	48
Figura 37: modelo reduzido no interior do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann, edifício Issa Hazbum .....	48
Figura 38: centro de torção e dimensões principais do edifício Issa Hazbum .....	49
Figura 39: perspectiva artística do edifício Barra Tower .....	49
Figura 40: modelo reduzido no interior do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann, edifício Barra Tower .....	50
Figura 41: centro de torção e dimensões principais do edifício Barra Tower ...	50
Figura 42: momentos de torção, por ângulo de incidência do vento, atuantes sobre o edifício Cristal Tower .....	52
Figura 43: momentos de torção, por ângulo de incidência do vento, atuantes sobre o edifício Atlanta .....	53
Figura 44: momentos de torção, por ângulo de incidência do vento, atuantes sobre o edifício Comendador Araújo, com vizinhança .....	54
Figura 45: momentos de torção, por ângulo de incidência do vento, atuantes sobre o edifício Comendador Araújo, sem vizinhança .....	55
Figura 46: momentos de torção, por ângulo de incidência do vento, atuantes sobre o edifício Prosperitas .....	56
Figura 47: momentos de torção, por ângulo de incidência do vento, atuantes sobre o edifício Leopoldo Green .....	57
Figura 48: momentos de torção, por ângulo de incidência do vento, atuantes sobre o edifício CENU Torre IV .....	58
Figura 49: momentos de torção, por ângulo de incidência do vento, atuantes sobre o edifício Ocean Palace, com vizinhança .....	59
Figura 50: momentos de torção, por ângulo de incidência do vento, atuantes sobre o edifício Ocean Palace, sem vizinhança .....	60
Figura 51: momentos de torção, por ângulo de incidência do vento, atuantes sobre o edifício Unique Residence, com vizinhança .....	61

Figura 52: momentos de torção, por ângulo de incidência do vento, atuantes sobre o edifício Unique Residence, sem vizinhança .....	62
Figura 53: momentos de torção, por ângulo de incidência do vento, atuantes sobre o edifício Issa Hazbum .....	63
Figura 54: momentos de torção, por ângulo de incidência do vento, atuantes sobre o edifício Barra Tower, com sacadas abertas .....	64
Figura 55: momentos de torção, por ângulo de incidência do vento, atuantes sobre o edifício Barra Tower .....	65

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>2 MÉTODO DE PESQUISA</b> .....	14
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA .....	14
2.2 OBJETIVOS .....	14
<b>2.2.1 Objetivo Principal</b> .....	14
<b>2.2.2 Objetivos Secundários</b> .....	14
2.3 PRESSUPOSTO .....	15
2.4 PREMISSAS .....	15
2.5 DELIMITAÇÕES .....	15
2.6 LIMITAÇÕES .....	15
2.7 DELINEAMENTO .....	16
<b>2.7.1 Pesquisa Bibliográfica</b> .....	17
<b>2.7.2 Escolha dos Edifícios</b> .....	17
<b>2.7.3 Aplicação da Norma</b> .....	17
<b>2.7.4 Análise Experimental</b> .....	17
<b>2.7.5 Comparação dos Resultados</b> .....	18
<b>2.7.6 Análise Final e Conclusões</b> .....	18
<b>3 SIMULAÇÃO DO VENTO NATURAL</b> .....	19
3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	19
3.2 TÚNEL DE VENTO PROF. JOAQUIM BLESSMANN .....	20
3.3 PERFIL DE VELOCIDADES MÉDIAS DO VENTO .....	22
<b>3.3.1 Perfil de velocidade média em lei de Potência</b> .....	23
<b>3.3.2 Perfil de velocidade média em lei Logarítmica</b> .....	24
3.4 SIMULAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DO VENTO NATURAL .....	24
<b>4 MOMENTO DE TORÇÃO</b> .....	27
4.1 CÁLCULO DO MOMENTO DE TORÇÃO PELA NBR 6123/1988 .....	27
<b>4.1.1 Excentricidade</b> .....	27
4.1.1.1 Edificações sem efeitos de vizinhança .....	28
4.1.1.2 Edificações com efeitos de vizinhança .....	28
<b>4.1.2 Forças devidas ao vento</b> .....	29
4.1.2.1 Coeficiente de Arrasto .....	30
4.1.2.2 Pressão Dinâmica .....	32
<b>4.1.3 Efeitos de Vizinhança</b> .....	34

4.2 CÁLCULO DO MOMENTO DE TORÇÃO A PARTIR DO TÚNEL DE VENTO.	35
<b>5 CARACTERÍSTICAS DOS EDIFÍCIOS</b>	37
5.1 CRISTAL TOWER	37
5.2 ATLANTA	38
5.3 COMENDADOR ARAÚJO	40
5.4 PROSPERITAS	41
5.5 LEOPOLDO GREEN	42
5.6 CENU TORRE IV	44
5.7 OCEAN PALACE	45
5.8 UNIQUE RESIDENCE	46
5.9 ISSA HAZBUM	48
5.10 BARRA TOWER	49
<b>6 ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	51
6.1 RESULTADOS POR EDIFÍCIO	51
6.1.1 Cristal Tower	51
6.1.2 Atlanta	53
6.1.3 Comendador Araújo	54
6.1.4 Prosperitas	56
6.1.5 Leopoldo Green	57
6.1.6 CENU Torre IV	58
6.1.7 Ocean Palace	59
6.1.8 Unique Residence	61
6.1.9 Issa Hazbum	63
6.1.10 Barra Tower	64
6.2 ANÁLISE GERAL	66
<b>7 CONCLUSÕES</b>	69
REFERÊNCIAS	70



## 1 INTRODUÇÃO

O vento, durante seu deslocamento, encontra diversas formas de obstáculos na superfície terrestre, e, de acordo com a sua velocidade, são produzidas forças sobre as faces deste determinado obstáculo. Estes obstáculos podem ser barreiras naturais formadas pela topografia de uma região ou barreiras construídas pelo homem, como é o caso das construções civis feitas acima da superfície terrestre, tais como edifícios, torres, pontes, monumentos, etc.

As forças causadas pelo vento sobre uma edificação geram solicitações sobre a sua estrutura, a qual pode ser comprometida caso não tenha sido projetada para absorver estes esforços. Torna-se, então, necessário considerar os esforços causados pela ação do vento durante o projeto estrutural das edificações para que sejam construídas edificações mais seguras.

Para se considerar a ação do vento durante o projeto de um edifício, é necessário um conhecimento mais específico sobre a interação vento estrutura. Os carregamentos causados pela ação do vento dependem dos seguintes parâmetros:

- a) forma arquitetônica da edificação;
- b) assimetria estrutural;
- c) ângulo de incidência do vento;
- d) efeitos de interferência causados pela vizinhança.

A NBR 6123 apresenta um método para a determinação das forças devidas ao vento em edificações, mas se restringe a formas arquitetônicas simplificadas e considera apenas dois ângulos de incidência do vento. Segundo esta Norma, para edificações de formas, dimensões ou localização fora do comum ela não deve ser usada, podendo ser substituída por um estudo específico em túnel de vento (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 1).

Segundo Carpeggiani (2004, p. 1), ao se considerar apenas ventos com incidência perpendicular às faces da edificação e aproximar sua forma arquitetônica a um prisma de base retangular, faz-se com que os esforços de torção sejam subestimados devido à simetria das

cargas geradas pelo vento nestas condições. Entretanto, os carregamentos causados pelo vento em edifícios não são simétricos, e esta assimetria resulta em momentos de torção atuantes sobre a estrutura do prédio, sendo que a maneira mais correta de determiná-los na fase de projeto é através do estudo em modelo reduzido em túnel de vento.

Este trabalho procura verificar a adequação dos momentos de torção indicados pela NBR 6123/1988 através da comparação entre os resultados obtidos por essa Norma e os resultados obtidos em ensaios em túnel de vento para algumas das formas arquitetônicas atualmente em construção na Engenharia brasileira.

No capítulo 2 será apresentado o método de pesquisa, onde estão descritos os objetivos deste trabalho e os fatores que englobam a pesquisa. O capítulo 3 trata da simulação do vento natural em túnel de vento, mostrando as técnicas utilizadas para a correta simulação em escala reduzida. O capítulo 4 apresenta o método de cálculo do momento de torção indicado pela NBR 6123/1988 relacionando os parâmetros físicos envolvidos no efeito de torção. No capítulo 5 é descrito o processo de cálculo do momento de torção a partir dos resultados dos ensaios em túnel de vento. O capítulo 6 descreve o método utilizado para escolha dos edifícios, mostra suas principais características, imagens de perspectiva artística e fotos do modelo de cada prédio no túnel de vento. No capítulo 7 são apresentados os resultados dos momentos de torção calculados a partir do método da NBR 6123/1988 e a partir dos coeficientes aerodinâmicos obtidos em túnel de vento de forma gráfica, possibilitando a comparação entre os resultados. O capítulo 8 encerra o trabalho com as conclusões finais.

## **2 MÉTODO DE PESQUISA**

### **2.1 QUESTÃO DE PESQUISA**

A questão de pesquisa é: o procedimento para o cálculo dos momentos de torção em edifícios altos, indicado pela NBR 6123/1988, define momentos de torção adequados às distintas configurações arquitetônicas atualmente em construção no Brasil?

### **2.2 OBJETIVOS**

#### **2.2.1 Objetivo Principal**

O objetivo principal da pesquisa é a verificação da adequação dos momentos de torção calculados pela NBR 6123/1988 às distintas configurações arquitetônicas de edifícios altos que estão em construção no Brasil.

#### **2.2.2 Objetivos Secundários**

Os objetivos secundários são:

- a) definição dos momentos de torção dos prédios em estudo;
- b) verificação dos ângulos de incidência do vento em que os resultados do túnel de vento ultrapassam os valores calculados pela NBR 6123/1988.



## 2.3 PRESSUPOSTO

Os carregamentos devidos à ação do vento obtidos em ensaios em túnel de vento representam com maior fidelidade o que ocorre na realidade.

## 2.4 PREMISSAS

É premissa desse trabalho que os carregamentos devidos ao vento nas estruturas de edifícios altos são muito relevantes.

## 2.5 DELIMITAÇÕES

A pesquisa delimita-se ao estudo de edifícios altos, acima de 80 m de altura, construídos no Brasil atualmente, quanto aos momentos de torção devidos ao vento.

## 2.6 LIMITAÇÕES

São limitações deste trabalho:

- a) a consideração da ação estática do vento sobre os edifícios estudados, sem a consideração dos efeitos dinâmicos;
- b) a utilização de resultados de um único túnel de vento no estudo, limitando o número de edifícios estudados e suas respectivas formas arquitetônicas;
- c) nenhum ensaio foi realizado especificamente para este trabalho, tendo-se utilizado os resultados de ensaios já realizados com outras finalidades.

## 2.7 DELINEAMENTO

O delineamento do trabalho abrange as seguintes etapas:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) escolha das edificações a serem estudadas;
- c) aplicação da NBR 6123/1988;
- d) análise experimental;
- e) comparação dos resultados;
- f) análise final e conclusões.

Essas etapas são detalhadas nos próximos itens. Uma representação esquemática do delineamento é apresentada na figura 1.

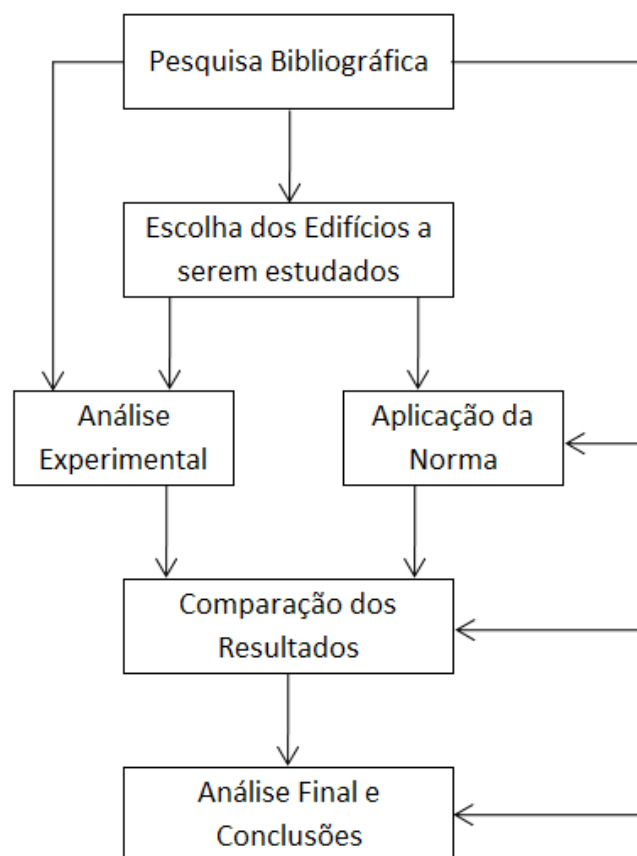


Figura 1: representação esquemática do delineamento da pesquisa

### **2.7.1 Pesquisa Bibliográfica**

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 quanto ao momento de torção em edifícios altos;
- c) à revisão da metodologia dos cálculos utilizados nos experimentos;
- d) à técnica experimental;
- e) aos resultados obtidos para cada edifício.

### **2.7.2 Escolha dos Edifícios**

Nesta etapa foram escolhidos os edifícios analisados neste estudo, dentre os previamente estudados no túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann, visando representar diferentes formas arquitetônicas.

### **2.7.3 Aplicação da Norma**

Nesta etapa foram realizados os cálculos dos momentos de torção de acordo com a metodologia apresentada pela NBR 6123/1988.

### **2.7.4 Análise Experimental**

A análise experimental foi feita através de pesquisa documental aos relatórios técnicos elaborados pelo LAC/UFRGS sobre cada edifício estudado, através dos quais se obtém os valores dos momentos de torção medidos em túnel de vento para cada prédio. Os experimentos não foram feitos exclusivamente para este trabalho, de modo que foram utilizados os resultados de ensaios previamente realizados com outras finalidades.

### **2.7.5 Comparação dos Resultados**

Nesta etapa foi realizada a comparação dos resultados dos momentos de torção obtidos pela aplicação da Norma e pelos ensaios em túnel de vento.

### **2.7.6 Análise Final e Conclusões**

Através da análise final dos resultados será verificada a adequação do procedimento para o cálculo dos momentos de torção, em edifícios altos, indicado pela NBR 6123/1988.

## 3 SIMULAÇÃO DO VENTO NATURAL

### 3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Segundo Blessmann (1990, p. 111), nos primeiros ensaios realizados em modelos reduzidos de construções civis foram utilizados túneis aerodinâmicos, com uma relação comprimento/altura da câmara de ensaios em torno de dois, que reproduzem uma atmosfera calma, sem turbulência. Entretanto, em alguns casos, os resultados obtidos não condiziam com os reais. Desta forma, para a aplicação de túneis de vento em construções civis é necessária a correta simulação da camada limite atmosférica para que se obtenham resultados mais próximos da realidade.

A necessidade de um estudo em túnel de vento para edifícios pode ser associada a fatores que os tornam sensíveis à ação do vento, tais como os citados por Blessmann (1990, p. 112):

- a) novas formas arquitetônicas que possuem características aerodinâmicas diferentes das usuais;
- b) a diminuição da densidade média das edificações, por utilizarem materiais de construção mais leves, o que torna os efeitos de vento proporcionalmente mais importantes;
- c) determinados sistemas estruturais, associados à baixa densidade da edificação, podem tornar a estrutura mais sensível aos efeitos dinâmicos, por apresentarem um amortecimento muito pequeno;
- d) ao se buscar o aumento da precisão, atualmente propiciada pelos cálculos feitos por programas computacionais durante a análise estrutural, torna-se necessário um conhecimento maior das forças atuantes sobre a estrutura.

Estes fatores estão cada vez mais presentes nos projetos de construção civil, tornando necessário o estudo em túnel de vento quando se deseja otimizar o projeto estrutural de um determinado edifício. Este estudo específico torna o projeto mais econômico, ao evitar o super dimensionamento da estrutura, e mais seguro, ao gerar um conhecimento mais preciso sobre o

carregamento do vento, considerando situações que não são consideradas quando se aplica o método indicado pela NBR 6123/1988.

### 3.2 TÚNEL DE VENTO PROF. JOAQUIM BLESSMANN

O túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann (TV-2), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, foi projetado com o objetivo de simular ensaios aplicados à construção civil. Conforme Blessmann (1990, p. 114), túneis de vento construídos com a finalidade de representar mais fielmente as características do vento natural para aplicações à construção civil têm uma relação comprimento/altura da câmara de ensaios a partir de oito. Ainda segundo Blessmann (1990, p. 114), com uma relação comprimento/altura da câmara de ensaios de 10,3, o túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann é capaz de desenvolver satisfatoriamente estudos de efeitos estáticos e dinâmicos. O TV-2 possui quatro mesas de ensaios, cada uma com suas aplicações específicas. As mesas de ensaios e algumas de suas aplicações são citadas abaixo:

- a) mesa M-I – devido a sua localização no início da câmara de ensaios, possui fluxo de ar de baixa turbulência e camada limite de pequena espessura. É própria para ensaios de tipo aeronáutico no piso do túnel e pesquisa em formas geométricas simples em modelos bi ou tridimensionais;
- b) mesa M-II – utilizada para ensaios de obras civis, com o uso de diferentes configurações de blocos no piso associados aos geradores de turbulência na câmara de simuladores, permite a simulação da camada limite atmosférica. Também permite ensaios aeronáuticos no eixo do túnel e possibilita a aferição de anemômetros e tubos de Pitot-Prandtl;
- c) mesa M-III – esta mesa foi construída com o objetivo específico de simular efeitos dinâmicos em estruturas altas, como por exemplo: chaminés, pilares de viadutos, torres de televisão e mastros;
- d) mesa M-IV – tem como principal característica a sua localização no retorno do túnel, onde a seção transversal é de 240 x 210 cm. É utilizada em ensaios de dissipação de poluentes, na análise da influência da topografia sobre os ventos, modelos de pontes, simulação de chuvas, etc.

A figura 2 mostra uma vista em planta, atualizada, do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann com a localização das mesas de ensaios citadas anteriormente, o escoamento se dá no sentido horário. Sua fotografia atualizada é mostrada na figura 3.

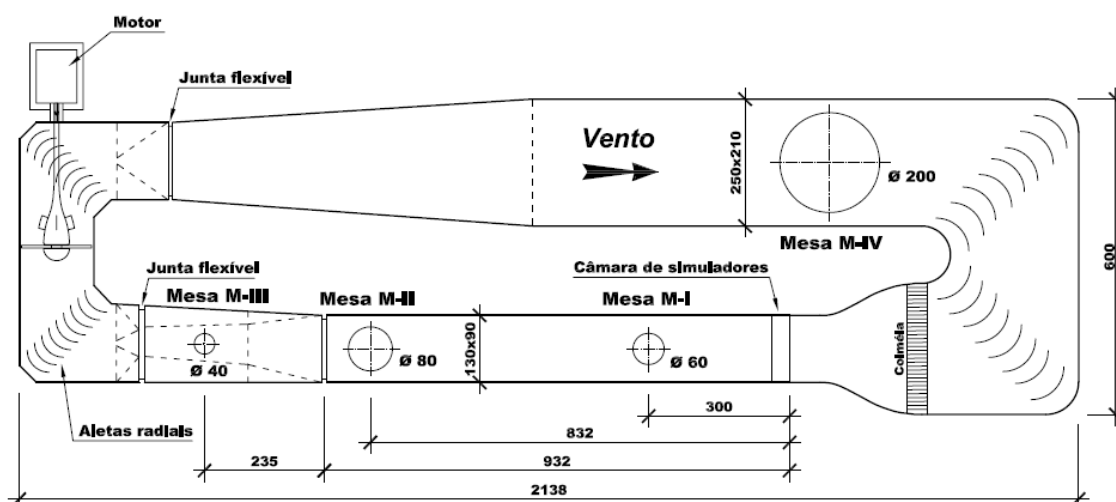


Figura 2: vista em planta do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann (Loredo-Souza, 2007a)



Figura 3: fotografia do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann (Loredo-Souza, 2007a)

Os edifícios utilizados neste trabalho foram ensaiados na mesa M-II, pois, devido a sua localização no túnel, permite a simulação da camada limite atmosférica ao se utilizar dispositivos de rugosidade ao longo do piso do túnel a barlavento do modelo associados aos geradores de turbulência na câmara de simuladores, situada no início da câmara de ensaios.

### 3.3 PERFIL DE VELOCIDADES MÉDIAS DO VENTO

Segundo Loredou-Souza et al. (2004, p. 137), à região da troposfera diretamente afetada pela presença da superfície da Terra é dado o nome de camada limite atmosférica. O topo da camada limite atmosférica é denominado altura gradiente. Na camada limite atmosférica a variação da velocidade do ar em função da altura define o perfil de velocidades médias do vento, conforme representação da figura 4.

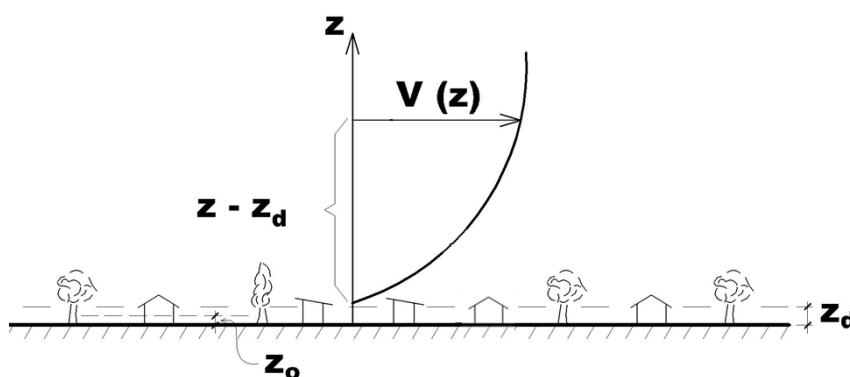


Figura 4: perfil de velocidades médias do vento  
(adaptado de Loredou-Souza et al., 2004)

Conforme representado na figura 4,  $z_d$  corresponde a uma fina subcamada da camada limite atmosférica localizada junto à superfície terrestre. O vento tende a se deslocar por cima desta subcamada, onde forma-se uma região de estagnação. A subcamada de altura  $z_d$  pode ser desprezada quando a rugosidade superficial for pequena, como, por exemplo, em campo aberto ou sobre o mar. O parâmetro  $z_o$  é denominado rugosidade aerodinâmica e caracteriza a rugosidade local do terreno, este parâmetro define a interseção do perfil de velocidades médias com o plano de deslocamento zero.

Ainda segundo Loredou-Souza et al. (2004, p. 139), os perfis de velocidade média mais utilizados na área de Engenharia de Vento são: o perfil em lei de Potência e o perfil Logarítmico.



### 3.3.1 Perfil de velocidade média em lei de Potência

O perfil em lei de Potência é dado pela seguinte fórmula (Loredo-Souza et al., 2004):

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

Onde:

$\bar{V}(z)$  = velocidade do vento à altura desejada (m/s);

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

$z$  = altura desejada (m);

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

$z_{ref}$  = altura de referência (m);

$p$  = expoente que representa o tipo de terreno.

A lei Potencial não tem uma justificativa teórica, trata-se de uma equação empírica que descreve bem a camada limite atmosférica. É muito utilizada por representar bem o perfil médio de velocidades, apesar de não representar bem a região muito próxima da superfície. O expoente  $p$  representa o tipo de terreno e, no túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann, varia de 0,11 (para superfícies lisas de grandes dimensões, tais como mares, lagos e pântanos sem vegetação) a 0,34 (para centros urbanos com um grande número de prédios altos). Segundo Loredo-Souza et al. (2004, p. 151), o expoente  $p = 0,23$  da lei Potencial (fórmula 1) corresponde a rugosidades de terrenos entre as categorias III e IV da NBR 6123/1988. Neste trabalho foram utilizados os expoentes  $p = 0,11, 0,23$  e  $0,34$  da lei Potencial de acordo com a rugosidade do terreno correspondente a cada ângulo de incidência do vento para cada caso específico estudado.

### 3.3.2 Perfil de velocidade média em lei Logarítmica

O perfil em lei Logarítmica é dado pela seguinte fórmula (Loredo-Souza et al., 2004):

$$\frac{\bar{V}(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{z - z_d}{z_o} \right) \quad (\text{fórmula 2})$$

Onde:

$\bar{V}(z)$  = velocidade do vento à altura desejada (m/s);

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

$\kappa$  = constante de von Kàrmàn;

$z$  = altura desejada (m);

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

$z_o$  = rugosidade aerodinâmica (m).

A lei Logarítmica apresenta um bom ajuste na camada próxima ao solo, mas não representa bem a região superior da camada limite atmosférica. A lei Logarítmica é bem detalhada no trabalho de Loredo-Souza et al. (2004, p. 139). Por representar bem a camada limite atmosférica, neste trabalho foi utilizada a lei Potencial para representar o perfil de velocidades médias do vento.

## 3.4 SIMULAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DO VENTO NATURAL

Segundo Jensen e Frank (1965 apud Blessmam, 1990) uma escala apropriada da estrutura do vento pode ser obtida com a utilização de dispositivos de rugosidade adequada sobre o piso do túnel de vento ao longo de um comprimento considerável. Este dispositivo retarda a velocidade do vento junto ao piso e corresponde a principal fonte de turbulência no escoamento a baixa altitude. Também podem ser utilizados obstáculos a barlavento do modelo, com os quais é possível simular as características do vento natural. Estes artifícios simulam a camada limite atmosférica em escala, bem como os diferentes tipos de turbulência

associados a este vento simulado. Blessmann (1990, p. 113) menciona alguns destes obstáculos que são colocados geralmente no início da câmara de ensaios:

- a) o uso de telas curvas ou planas de malha variável, assim como o uso de barras finas metálicas de seção circular de diâmetro e/ou espaçamento variável, produz o perfil de velocidades médias e uma turbulência fina;
- b) o uso de grelhas de barras horizontais de seção retangular ou circular, variando o espaçamento e/ou a espessura produz o perfil de velocidades médias e uma turbulência média;
- c) o uso de grelhas de malha quadrada ou retangular, constituídas de barras de seção retangular, produz turbulência superposta a uma corrente de ar aproximadamente uniforme;
- d) o uso de grelha única de malha variável ou diversas grelhas superpostas produz o perfil de velocidades médias e turbulência;
- e) o uso de uma tela uniforme produz uma turbulência fina superposta a uma corrente de ar uniforme;
- f) o uso de triângulos de diversas dimensões e proporções, cheios ou vazados, de lados retos ou curvos produz o perfil de velocidades médias e turbulência.

Segundo Blessmann (1990, p. 114), uma outra possibilidade de reprodução da estrutura do vento natural é através de jatos de ar lançados, a partir do piso do túnel, perpendicularmente ao escoamento do vento no túnel. Cada túnel de vento possui suas configurações, previamente estudadas, de dispositivos necessários para simular determinados perfis de velocidades médias. Loredou-Souza et al. (2004, p. 150) mostra as configurações de ensaio utilizadas, no túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann, para simular os perfis de velocidades médias referentes aos expoentes  $p = 0,11$ ,  $0,23$  e  $0,34$  da lei Potencial (fórmula 1) e uma configuração com o uso de grelha conforme ilustração da figura 5.

Loredou-Souza et al. (2004, p. 151) também apresenta um gráfico, mostrado na figura 6, com os perfis de velocidades médias correspondentes aos expoentes  $0,11$ ,  $0,23$  e  $0,34$  da lei Potencial (fórmula 1) além do perfil de velocidades correspondente à grelha, mostrada na figura 5, posicionada nas mesas de ensaios M-I e M-II.

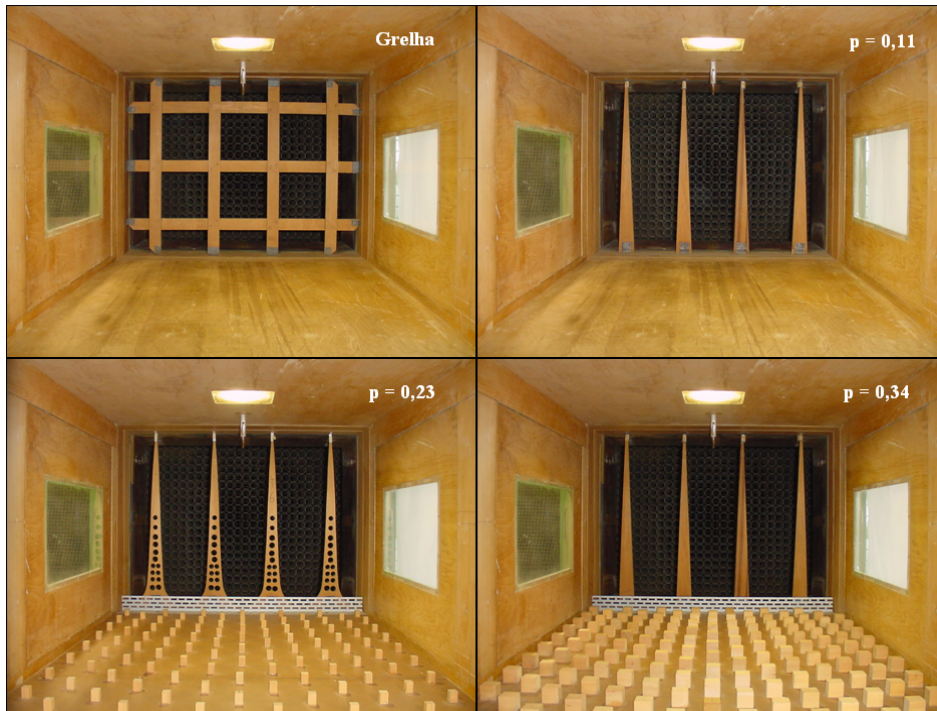


Figura 5: dispositivos de geração de diferentes camadas limites do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann (adaptado de Loredo-Souza et al., 2004 p. 150)

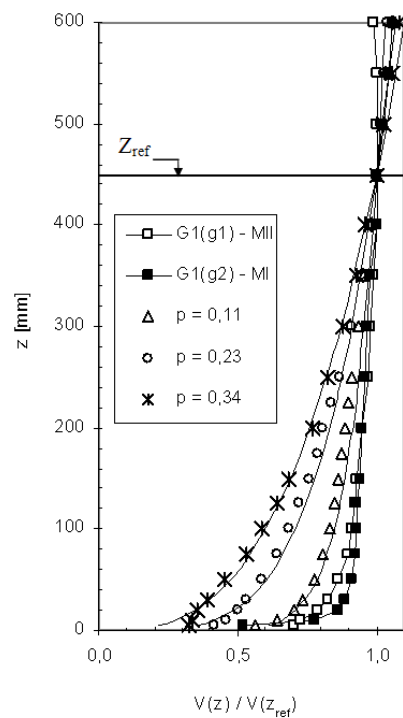


Figura 6: perfis de velocidade média para o eixo vertical de duas seções do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann (adaptado de Loredo-Souza et al., 2004 p. 151)

## 4 MOMENTO DE TORÇÃO

O momento de torção é originado pela existência de uma excentricidade entre o centro de torção do edifício e o ponto de aplicação da força resultante causada pela ação do vento sobre a edificação. O momento de torção é dado pela fórmula 3:

$$M_t = F_r \times e \quad (\text{fórmula 3})$$

Onde:

$M_t$  = momento de torção (Nm);

$F_r$  = força resultante (N);

$e$  = excentricidade (m).

Para se obter o momento de torção é necessária a determinação da força resultante, que age sobre uma determinada direção, e da sua excentricidade em relação ao centro de torção do edifício.

### 4.1 CÁLCULO DO MOMENTO DE TORÇÃO PELA NBR 6123/1988

#### 4.1.1 Excentricidade

A NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988) apresenta valores de excentricidade para o cálculo do momento de torção em função dos efeitos de vizinhança.

#### 4.1.1.1 Edificações sem efeitos de vizinhança

Para edificações sem efeitos de vizinhança são obtidas excentricidades através da fórmula 4 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988):

$$e_a = 0,075 \times a \quad \text{e} \quad e_b = 0,075 \times b \quad (\text{fórmula 4})$$

Onde:

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

$a$  = maior dimensão em planta (m);

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

$b$  = menor dimensão em planta (m).

#### 4.1.1.2 Edificações com efeitos de vizinhança

Para edificações com efeitos de vizinhança são obtidas excentricidades através da fórmula 5 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988):

$$e_a = 0,15 \times a \quad \text{e} \quad e_b = 0,15 \times b \quad (\text{fórmula 5})$$

Onde:

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

$a$  = maior dimensão em planta (m);

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

$b$  = menor dimensão em planta (m).

A figura 7 apresenta uma ilustração das excentricidades  $|e_a|$  e  $|e_b|$ , em relação a um par de eixos de coordenadas  $x$  e  $y$  arbitrado, com a finalidade de exemplificar a posição destas excentricidades em relação às dimensões principais  $|a|$  e  $|b|$ .

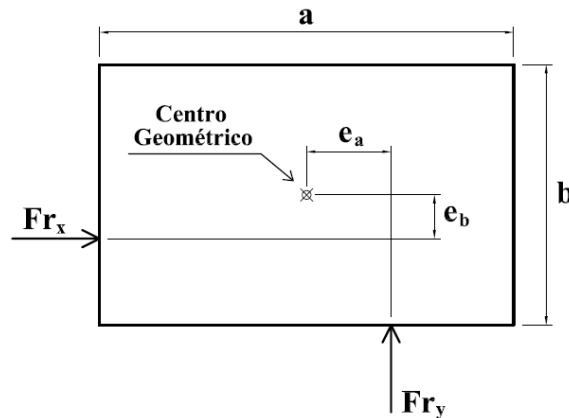


Figura 7: desenho ilustrativo das excentricidades  $e_a$  e  $e_b$

#### 4.1.2 Forças devidas ao vento

Segundo a NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 5), a força global do vento sobre uma edificação, ou parte da edificação,  $|F_g|$  é obtida pela soma vetorial das forças do vento atuantes sobre o prédio. Uma componente qualquer da força global pode ser obtida pela fórmula 6:

$$F = C_f \times q \times A \quad (\text{fórmula 6})$$

Onde:

$F$  = força exercida pela ação do vento (N);

$C_f$  = coeficiente de força, especificado em cada caso;

$q$  = pressão dinâmica (Pa);

$A$  = área de referência, especificada em cada caso (m<sup>2</sup>).

À componente da força global atuante na direção do vento é dado o nome de força de arrasto  $|F_a|$ , e pode ser obtida pela fórmula 7 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988):

$$F_a = C_a \times q \times A_e \quad (\text{fórmula 7})$$

Onde:

$F_a$  = força de arrasto (N);

$C_a$  = coeficiente de arrasto;

$q$  = pressão dinâmica (Pa);

$A_e$  = área frontal efetiva: área da projeção ortogonal da edificação, estrutura ou elemento estrutural sobre um plano perpendicular à direção do vento (m<sup>2</sup>).

A NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988) apresenta um método específico para a obtenção do coeficiente de arrasto e da pressão dinâmica. Estes métodos são apresentados a seguir. A área frontal efetiva, também necessária para o cálculo da força de arrasto, depende da geometria da edificação em estudo.

#### 4.1.2.1 Coeficiente de Arrasto

Os coeficientes de arrasto apresentados pela NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 19) se referem a edificações com seção transversal constante ou com pouca variação com formato paralelepípedo. Os seus valores são apresentados em função das dimensões em planta e da altura da edificação para ventos de baixa ou alta turbulência, conforme mostram as figuras 8 e 9.



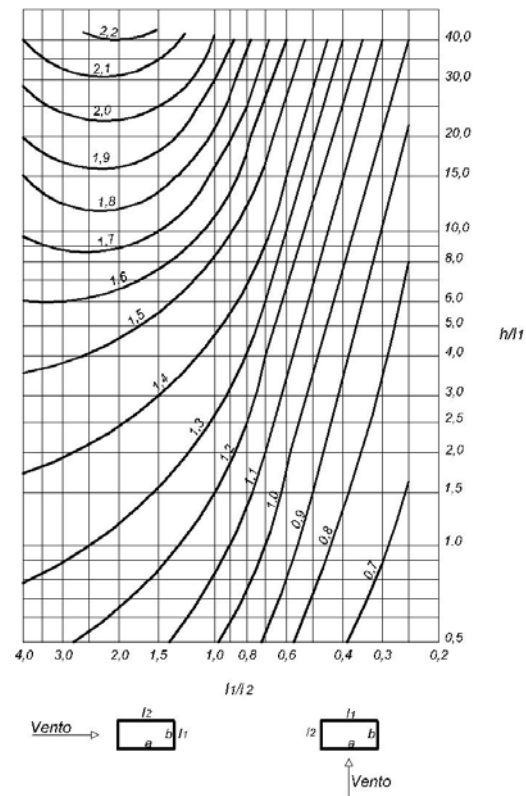


Figura 8: coeficiente de arrasto para edificações paralelepédicas em vento de baixa turbulência (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 20)

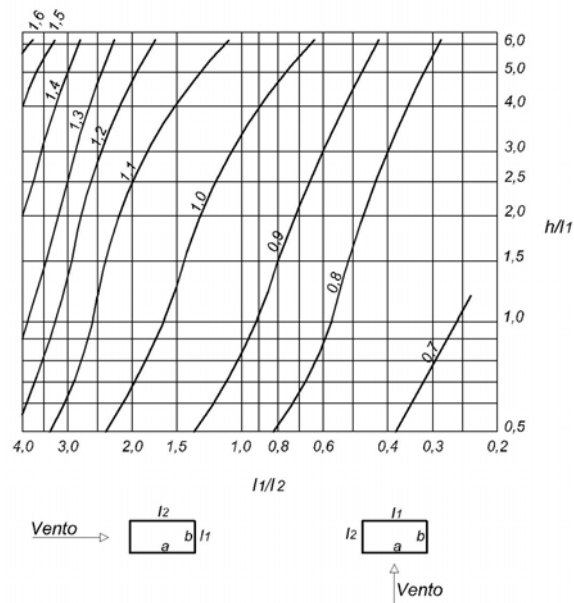


Figura 9: coeficiente de arrasto para edificações paralelepédicas em vento de alta turbulência (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 24)

#### 4.1.2.2 Pressão Dinâmica

Segundo a NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 4), a pressão dinâmica  $|q|$  pode ser obtida através da fórmula 8:

$$q = 0,613 \times V_k^2 \quad (\text{fórmula 8})$$

Onde:

$q$  = pressão dinâmica (Pa);

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

A velocidade característica do vento  $|V_k|$  é obtida através da fórmula 9 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988):

$$V_k = V_0 \times S_1 \times S_2 \times S_3 \quad (\text{fórmula 9})$$

Onde:

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

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

$S_1$  = fator topográfico;

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

$S_3$  = fator estatístico.

A velocidade básica do vento  $|V_0|$  é a velocidade obtida em uma rajada de três segundos, medida a 10 m acima do terreno de um campo aberto e plano, com período de retorno de 50 anos. Seu valor pode ser obtido pelo gráfico das isopletras da velocidade básica no Brasil apresentado pela NBR 6123/1988 conforme mostra a figura 10. Deve ser escolhido um valor de  $V_0$  adequado ao local onde a estrutura será construída.

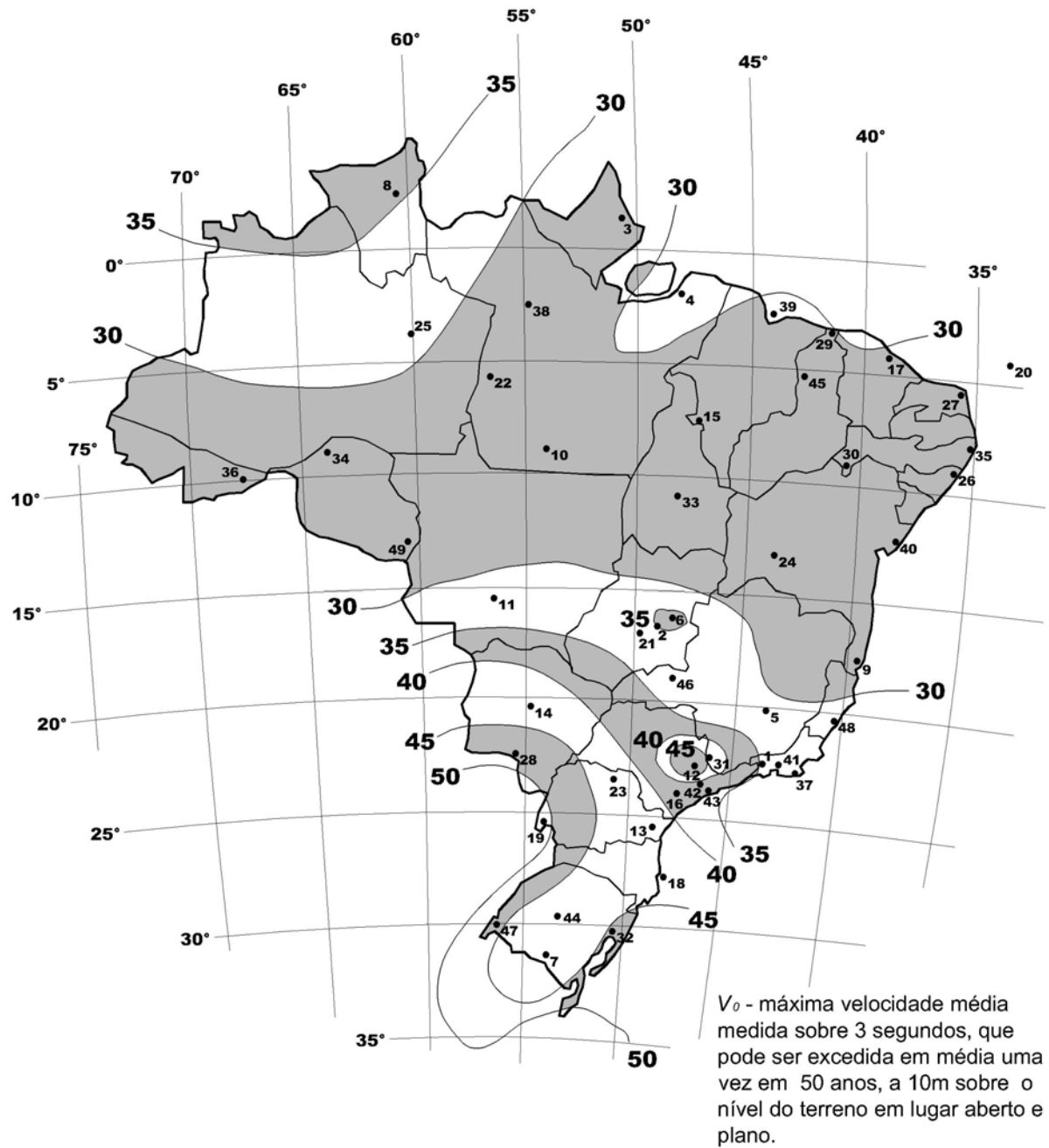


Figura 10: isopleta de velocidade básica  $V_0$  (m/s)  
(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 8)

Os fatores  $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$  são obtidos através de formulações ou tabelas específicas mostradas nos itens 5.2, 5.3 e 5.4 da NBR 6123/1988 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988), respectivamente, as quais foram consultadas para os cálculos das velocidades básicas do vento utilizadas neste trabalho.

### 4.1.3 Efeitos de vizinhança

Segundo o Anexo G da NBR 6123/1988 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988 p.70), em alguns casos deve ser considerada a influência causada no escoamento do vento pelas edificações próximas à edificação em estudo. As configurações de vizinhança podem causar o aumento das forças do vento de três modos:

- a) efeito venturi: afunilamento do vento em determinados locais que causam o aumento da velocidade do vento;
- b) deflexão do vento na direção vertical: em edificações altas parte do escoamento incidente sobre sua fachada de barlavento é defletido para baixo aumentando a velocidade do vento nas zonas próximas ao solo;
- c) turbulência da esteira: em edificações a sotavento de outra a turbulência gerada na esteira da edificação a barlavento pode causar efeitos dinâmicos (“efeitos de golpe”) consideráveis e alterações nas pressões.

O Anexo G da NBR 6123/1988 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988 p.70) apresenta uma indicação aproximada dos aumentos que podem ocorrer nos coeficientes aerodinâmicos devidos às configurações de vizinhança. O efeito de vizinhança deve ser considerado no cálculo das forças devidas ao vento indicado pela NBR 6123/1988.

## 4.2 CÁLCULO DO MOMENTO DE TORÇÃO A PARTIR DO TÚNEL DE VENTO

O valor do momento de torção pode ser obtido através da fórmula 3, sendo a força resultante  $|F_r|$  o somatório vetorial de todas as forças atuantes na superfície externa do modelo ensaiado em túnel de vento e a excentricidade  $|e|$  a distância entre o ponto de aplicação de  $|F_r|$  e o centro de torção predeterminado. Estas forças ao longo da edificação são obtidas através dos coeficientes aerodinâmicos medidos durante os ensaios.

Nos ensaios estáticos sobre edifícios realizados no túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann são obtidos registros das séries temporais das pressões devidas ao vento para cada tomada de pressão do modelo reduzido. Através de transdutores elétricos de pressão são adquiridos 8192 registros de pressão, em cada tomada de pressão do modelo, num intervalo de tempo de 16 s. Com estes registros de pressões se obtém a série temporal de pressões devidas ao vento conforme mostra a figura 11.

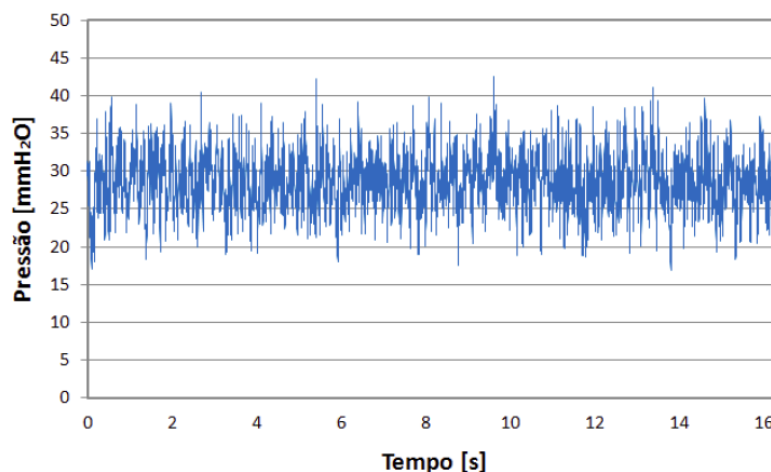


Figura 11: exemplo de um registro da série temporal das pressões devidas ao vento, obtido a partir de transdutores elétricos de pressão no túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann (Loredou-Souza, 2007a)

Conforme Carpeggiani (2004 p. 20), a partir dos registros das séries temporais das pressões devidas ao vento é possível calcular coeficientes aerodinâmicos, tais como:

- a) de pressão média;
- b) de pressão máximo;
- c) de pressão mínimo;
- d) de pressão rms.

Neste trabalho foi utilizado apenas o coeficiente de pressão média, que é calculado através da fórmula 10.

$$\bar{c}_p = \frac{\frac{1}{T} \times \int_0^T p(t) dt}{q} \quad (\text{fórmula 10})$$

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).

Este trabalho obedece a seguinte convenção de sinais:

- a) sobrepessão: coeficientes de pressão positivos (agem empurrando a estrutura);
- b) sucção: coeficientes de pressão negativos (exercem sucção sobre a estrutura).

## 5 CARACTERÍSTICAS DOS EDIFÍCIOS

Os edifícios estudados neste trabalho foram escolhidos dentre os disponíveis no Laboratório de Aerodinâmica das Construções, da UFRGS, segundo os seguintes critérios:

- a) edifícios com mais de 80 m de altura;
- b) edifícios que serão construídos no Brasil;
- c) edifícios cujo estudo em túnel de vento foi realizado entre 2007 e 2009.

Dentre os edifícios que atenderam aos critérios de escolha descritos acima foram escolhidos para este estudo prédios de formas variadas, para abranger a um maior número de casos. Os prédios selecionados são apresentados a seguir.

### 5.1 CRISTAL TOWER

Segundo Loredou-Souza (2008g, p. 1), o edifício Cristal Tower é um empreendimento da Multiplan Empreendimentos Imobiliários S.A. a ser construído em Porto Alegre/RS. O modelo reduzido foi construído em escala 1/350 e instrumentado com um total de 222 tomadas de pressão distribuídas ao longo do edifício. As pressões foram medidas a cada 15° de incidência do vento. A figura 12 mostra a sua perspectiva artística, o seu modelo reduzido é mostrado na figura 13.



Figura 12: perspectiva artística do edifício Cristal Tower (Loredou-Souza, 2008g)



Figura 13: modelo reduzido no interior do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann, edifício Cristal Tower (Loredou-Souza, 2008g)

O edifício Cristal Tower possui 26 andares em seus 86,16 m de altura. A referência do ângulo de incidência do vento, o seu centro de torção e as suas dimensões em planta para aplicação da Norma são mostrados na figura 14.

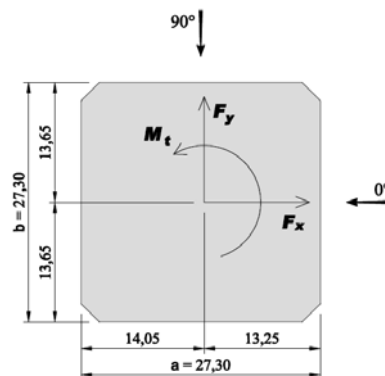


Figura 14: centro de torção e dimensões principais do edifício Cristal Tower (adaptado de Loredou-Souza, 2008g)

## 5.2 ATLANTA

Segundo Loredou-Souza (2007c, p. 1), o edifício Atlanta é um empreendimento da Odebrecht S.A. a ser construído em Alphaville, Barueri/SP. O modelo reduzido foi construído em escala 1/400 e instrumentado com um total de 315 tomadas de pressão distribuídas ao longo do edifício. As pressões foram medidas a cada 15° de incidência do vento. A figura 15 mostra a sua perspectiva artística, o seu modelo reduzido é mostrado na figura 16.





Figura 15: perspectiva artística do edifício Atlanta (Loredo-Souza, 2007c)



Figura 16: modelo reduzido no interior do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann, edifício Atlanta (Loredo-Souza, 2007c)

O edifício Atlanta possui 31 andares em seus 129,20 m de altura. A referência do ângulo de incidência do vento, o seu centro de torção e as suas dimensões em planta para aplicação da Norma são mostrados na figura 17.

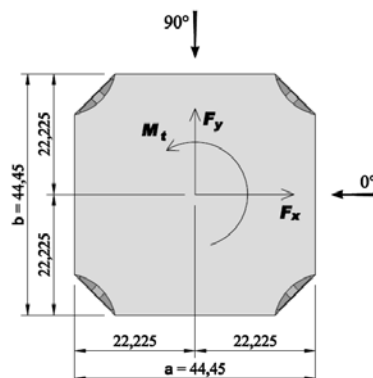


Figura 17: centro de torção e dimensões principais do edifício Atlanta (adaptado de Loredo-Souza, 2007c)

### 5.3 COMENDADOR ARAÚJO

Segundo Loredo-Souza (2008b, p. 1), a torre Comendador Araújo é um empreendimento da Rossi Residencial S.A. a ser construído em Curitiba/PR. O modelo reduzido foi construído em escala 1/400 e instrumentado com um total de 303 tomadas de pressão distribuídas ao longo do edifício. As pressões foram medidas a cada 15° de incidência do vento. A figura 18 mostra a sua perspectiva artística, o seu modelo reduzido é mostrado na figura 19.



Figura 18: perspectiva artística da Torre Comendador Araújo (Loredo-Souza e Rocha, 2008b)



Figura 19: modelo reduzido no interior do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann, Torre Comendador Araújo (Loredo-Souza e Rocha, 2008b)

A torre Comendador Araújo possui 46 andares em seus 152,08 m de altura. A referência do ângulo de incidência do vento, o seu centro de torção e as suas dimensões em planta para aplicação da Norma são mostrados na figura 20.

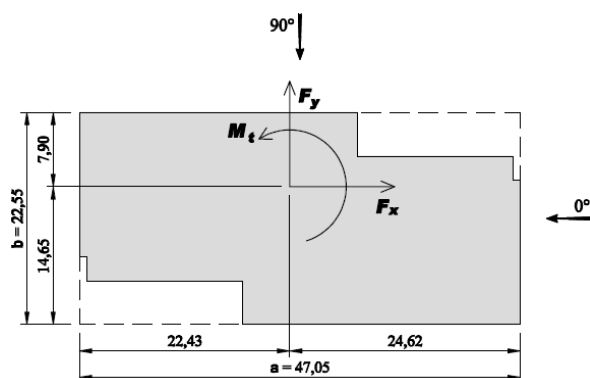


Figura 20: centro de torção e dimensões principais do edifício Comendador Araújo (adaptado de Loredo-Souza e Rocha, 2008b)

## 5.4 PROSPERITAS

Segundo Loredo-Souza (2007b, p. 1), o edifício Prosperitas é um empreendimento da Rec Berrini S.A. a ser construído em São Paulo/SP. O modelo reduzido foi construído em escala 1/400 e instrumentado com um total de 268 tomadas de pressão distribuídas ao longo do edifício. As pressões foram medidas a cada  $10^\circ$  de incidência do vento. A figura 21 mostra a sua perspectiva artística, o seu modelo reduzido é mostrado na figura 22.



Figura 21: perspectiva artística do edifício Prosperitas (Loredo-Souza e Rocha, 2007b)



Figura 22: modelo reduzido no interior do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann, edifício Prosperitas (Loredou-Souza e Rocha, 2007b)

O edifício Prosperitas possui 35 andares em seus 146,72 m de altura. A referência do ângulo de incidência do vento, o seu centro de torção e as suas dimensões em planta para aplicação da Norma são mostrados na figura 23.

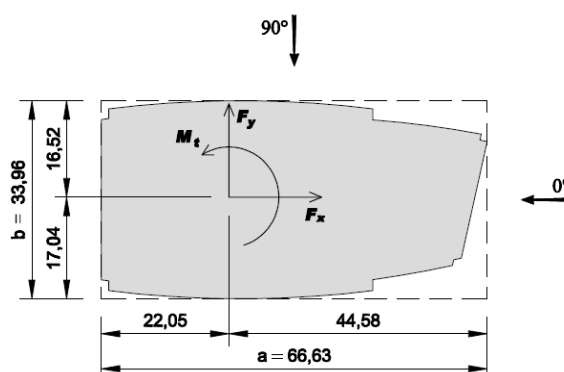


Figura 23: centro de torção e dimensões principais do edifício Prosperitas (adaptado de Loredou-Souza e Rocha, 2007b)

## 5.5 LEOPOLDO GREEN

Segundo Loredou-Souza (2008f, p. 1), o edifício Leopoldo Green é um empreendimento da YUNY Incorporadora a ser construído em São Paulo/SP. O modelo reduzido foi construído em escala 1/400 e instrumentado com um total de 296 tomadas de pressão distribuídas ao longo do edifício. As pressões foram medidas a cada 15° de incidência do vento. A figura 24 mostra a sua perspectiva artística, o seu modelo reduzido é mostrado na figura 25.



Figura 24: perspectiva artística do edifício Leopoldo Green (Loredou-Souza, 2008f)



Figura 25: modelo reduzido no interior do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann, edifício Leopoldo Green (Loredou-Souza, 2008f)

O edifício Leopoldo Green possui 26 andares em seus 118,00 m de altura. A referência do ângulo de incidência do vento, o seu centro de torção e as suas dimensões em planta para aplicação da Norma são mostrados na figura 26.

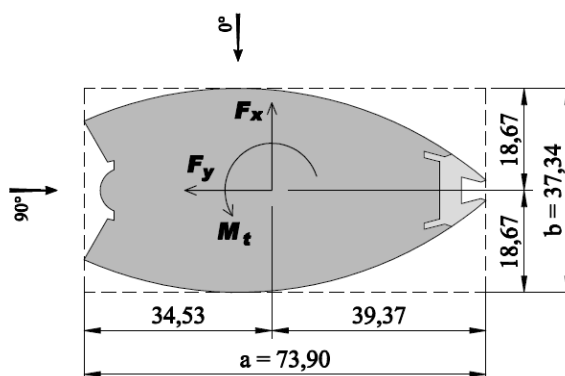


Figura 26: centro de torção e dimensões principais do edifício Leopoldo Green (adaptado de Loredou-Souza, 2008f)

## 5.6 CENU TORRE IV

Segundo Loredou-Souza (2008a, p. 1), o edifício CENU Torre IV é um empreendimento da Tishiman Speyer a ser construído em São Paulo/SP. O modelo reduzido foi construído em escala 1/400 e instrumentado com um total de 404 tomadas de pressão distribuídas ao longo do edifício. As pressões foram medidas a cada 15° de incidência do vento. A figura 27 mostra a sua perspectiva artística, o seu modelo reduzido é mostrado na figura 28.



Figura 27: perspectiva artística do edifício CENU Torre IV (Loredou-Souza, 2008a)



Figura 28: modelo reduzido no interior do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann, edifício CENU Torre IV (Loredou-Souza, 2008a)

O edifício CENU Torre IV possui 27 andares em seus 124,00 m de altura. A referência do ângulo de incidência do vento, o seu centro de torção e as suas dimensões em planta para aplicação da Norma são mostrados na figura 29.

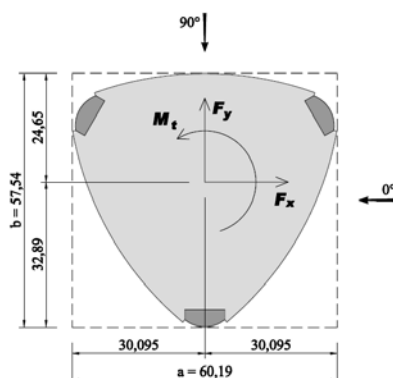


Figura 29: centro de torção e dimensões principais do edifício CENU Torre IV (adaptado de Loredo-Souza, 2008a)

## 5.7 OCEAN PALACE

Segundo Loredo-Souza (2008c, p. 1), o edifício Ocean Palace é um empreendimento da FG Procave Empreendimentos Ltda. a ser construído em Balneário Camboriú/SC. O modelo reduzido foi construído em escala 1/250 e instrumentado com um total de 314 tomadas de pressão distribuídas ao longo do edifício. As pressões foram medidas a cada 15° de incidência do vento. A figura 30 mostra a sua perspectiva artística, o seu modelo reduzido é mostrado na figura 31.

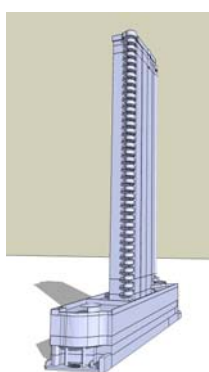


Figura 30: perspectiva artística do edifício Ocean Palace (Loredo-Souza, 2008c)



Figura 31: modelo reduzido no interior do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann, edifício Ocean Palace (Loredo-Souza, 2008c)

O edifício Ocean Palace possui 45 andares em seus 136,84 m de altura. A referência do ângulo de incidência do vento, o seu centro de torção e as suas dimensões em planta para aplicação da Norma são mostrados na figura 32.

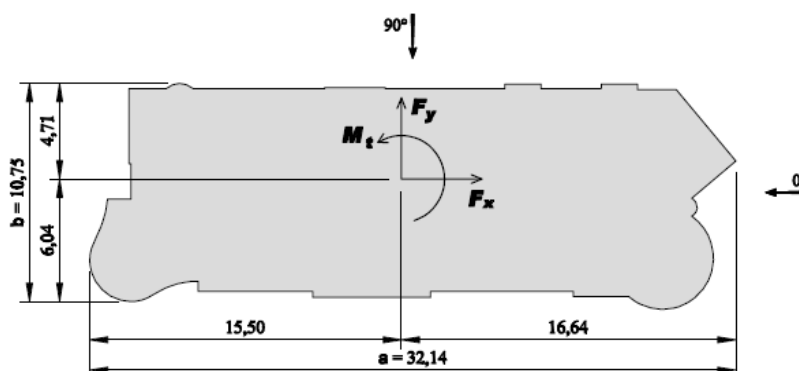


Figura 32: centro de torção e dimensões principais do edifício Ocean Palace (adaptado de Loredo-Souza, 2008c)

## 5.8 UNIQUE RESIDENCE

Segundo Loredo-Souza (2008d, p. 1), o edifício Unique Residence é um empreendimento da INPAR e Record Planejamento e Construção Ltda. a ser construído em Natal/RN. O modelo reduzido foi construído em escala 1/250 e instrumentado com um total de 295 tomadas de pressão distribuídas ao longo do edifício. As pressões foram medidas a cada 15° de incidência do vento. A figura 33 mostra a sua perspectiva artística, o seu modelo reduzido é mostrado na figura 34.





Figura 33: perspectiva artística do edifício Unique Residence (Loredo-Souza, 2008d)



Figura 34: modelo reduzido no interior do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann, edifício Unique Residence (Loredo-Souza, 2008d)

O edifício Unique Residence possui 38 andares em seus 111,96 m de altura. A referência do ângulo de incidência do vento, o seu centro de torção e as suas dimensões em planta para aplicação da Norma são mostrados na figura 35.

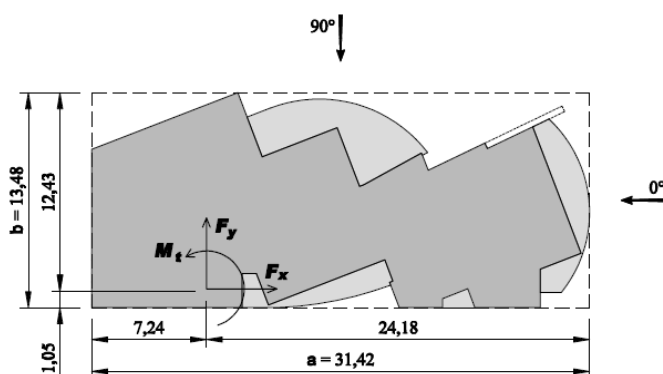


Figura 35: centro de torção e dimensões principais do edifício Unique Residence (Adaptado de Loredo-Souza, 2008d)

## 5.9 ISSA HAZBUM

Segundo Loredou-Souza (2008e, p. 1), o edifício Issa Hazbum é um empreendimento da Construtora Hazbum a ser construído em Natal/RN. O modelo reduzido foi construído em escala 1/400 e instrumentado com um total de 309 tomadas de pressão distribuídas ao longo do edifício. As pressões foram medidas a cada 15° de incidência do vento. A figura 36 mostra a sua perspectiva artística, o seu modelo reduzido é mostrado na figura 37.



Figura 36: perspectiva artística do edifício Issa Hazbum (Loredou-Souza, 2008e)



Figura 37: modelo reduzido no interior do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann, edifício Issa Hazbum (Loredou-Souza, 2008e)

O edifício Issa Hazbum possui 38 andares em seus 114,90 m de altura. A referência do ângulo de incidência do vento, o seu centro de torção e as suas dimensões em planta para aplicação da Norma são mostrados na figura 38.

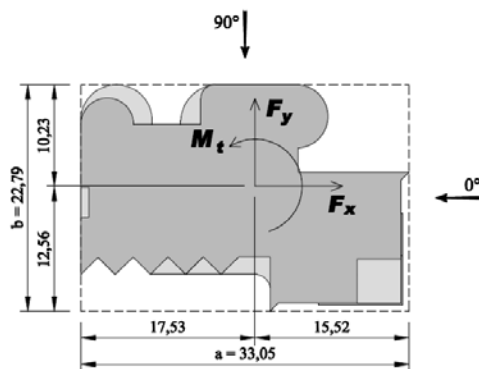


Figura 38: centro de torção e dimensões principais do edifício Issa Hazbum (adaptado de Loredou-Souza, 2008e)

## 5.10 BARRA TOWER

Segundo Loredou-Souza (2007a, p. 1), o edifício Barra Tower é um empreendimento da Planolar Construtora a ser construído em Balneário Camboriú/SC. O modelo reduzido foi construído em escala 1/250 e instrumentado com um total de 171 tomadas de pressão distribuídas ao longo do edifício. As pressões foram medidas a cada 15° de incidência do vento. A figura 39 mostra a sua perspectiva artística, o seu modelo reduzido é mostrado na figura 40.



Figura 39: perspectiva artística do edifício Barra Tower (Loredou-Souza, 2007a)



Figura 40: modelo reduzido no interior do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann, edifício Barra Tower (Loredo-Souza, 2007a)

O edifício Barra Tower possui 40 andares em seus 122,50 m de altura. A referência do ângulo de incidência do vento, o seu centro de torção e as suas dimensões em planta para aplicação da Norma são mostrados na figura 41.

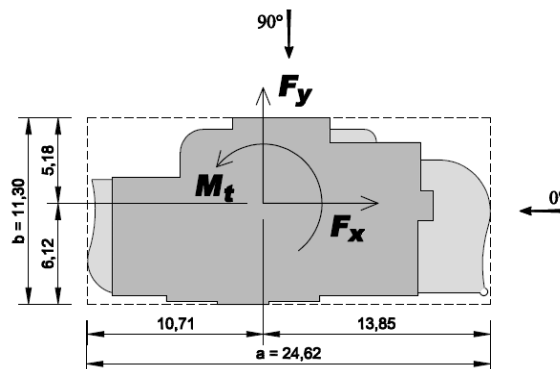


Figura 41: centro de torção e dimensões principais do edifício Barra Tower (Adaptado de Loredo-Souza, 2007a)

## 6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 6.1 RESULTADOS POR EDIFÍCIO

A partir das pressões medidas em túnel de vento foram calculados os momentos de torção de cada edifício. Estes resultados foram disponibilizados para este trabalho no LAC pelo Prof. Acir Mércio Loredo-Souza. Também foram calculados os valores dos momentos de torção segundo a NBR 6123/1988 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988) para cada prédio em estudo. Estes valores de momentos de torção calculados pela NBR 6123/1988 e pelo estudo em túnel de vento serão mostrados neste capítulo.

Nos cálculos feitos a partir da NBR 6123/1988 foram considerados intervalos de tempo de 10 s para o cálculo da velocidade média, o que corresponde à classe C da Norma. O valor do  $S_2$  foi calculado em intervalos de 5 em 5 metros ao longo da altura de cada edifício, os valores de  $S_1$  foram determinados segundo as características do terreno de cada edifício e o valor de  $S_3$  foi mantido igual a um para todos os edifícios. O fator de vizinhança também foi considerado nos cálculos pela Norma, o qual variou de 1,0 a 1,3 de acordo com a vizinhança de entorno de cada edifício e de acordo com a altura.

O valor do  $S_2$  foi calculado por pavimento nos cálculos feitos a partir dos coeficientes obtidos no túnel de vento.

#### 6.1.1 Cristal Tower

De acordo com a classificação da rugosidade do terreno apresentada pela NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 10) o edifício Cristal Tower se enquadra na categoria I para ventos incidentes entre os ângulos  $255^\circ$  e  $30^\circ$  e está entre a categoria III e a IV para os ângulos de incidência do vento entre  $45^\circ$  e  $240^\circ$ .

A figura 42 apresenta os momentos de torção, em MNm, calculados pela NBR 6123/1988 e pelo estudo em túnel de vento para o edifício Cristal Tower. Os momentos de torção foram calculados por ângulo de incidência do vento.

Os ensaios em túnel de vento foram realizados com a presença da vizinhança existente no local da construção do edifício. Contudo, como a vizinhança é composta de edificações baixas em relação ao edifício Cristal Tower, foram consideradas duas configurações no cálculo feito pela Norma: uma com vizinhança (CV) e outra sem vizinhança (SV). Estas configurações estão representadas na figura 42.

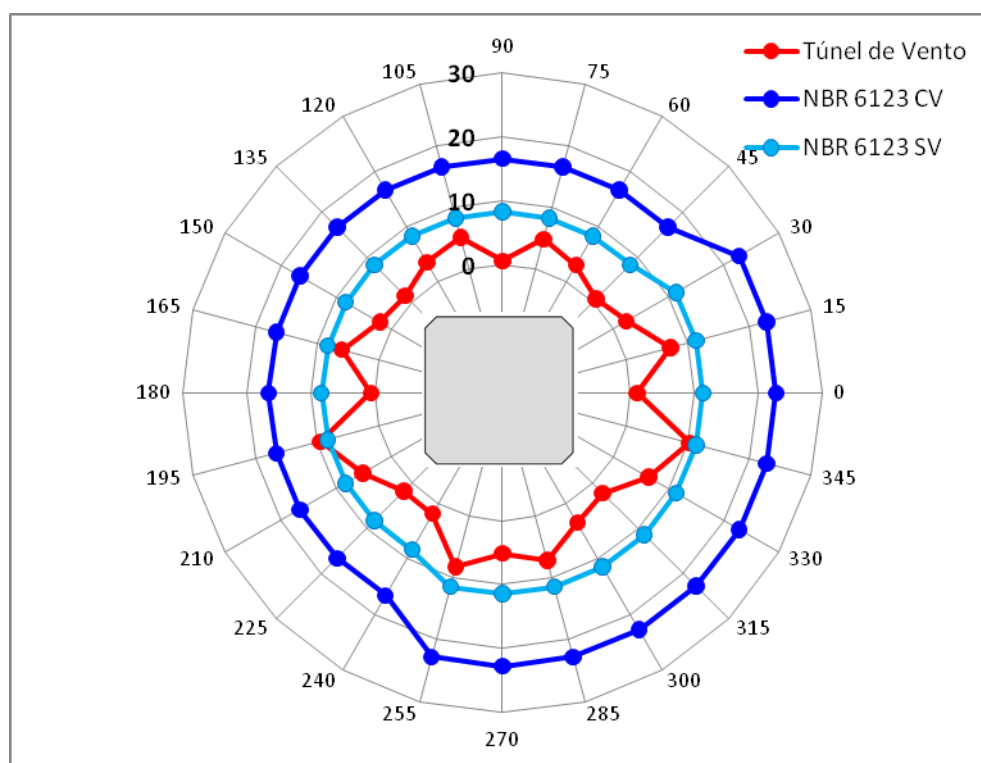


Figura 42: momentos de torção, por ângulo de incidência do vento, atuantes sobre o edifício Cristal Tower

A figura 42 mostra que os valores do momento de torção calculados pela NBR 6123/1988, com a consideração da vizinhança, são superiores aos valores calculados a partir do ensaio em túnel de vento para todos os ângulos de incidência do vento. Entretanto, o valor do momento de torção calculado pela Norma foi superado em 12% pelo valor obtido pelo túnel de vento para o ângulo de incidência do vento de 195°. Estes resultados mostram que o valor calculado pela NBR 6123/1988 está adequado quanto ao momento de torção, para este edifício.

### 6.1.2 Atlanta

De acordo com a classificação da rugosidade do terreno apresentada pela NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 10) o edifício Atlanta se enquadra entre a categoria III e a IV.

A figura 43 apresenta os momentos de torção, em MNm, calculados pela NBR 6123/1988 e pelo estudo em túnel de vento para o edifício Atlanta. Os momentos de torção foram calculados por ângulo de incidência do vento.

Os ensaios em túnel de vento foram realizados com a presença da vizinhança existente no local da construção do edifício. Contudo, como a vizinhança é composta de edificações baixas em relação ao edifício Atlanta, foram consideradas duas configurações no cálculo feito pela Norma: uma com vizinhança (CV) e outra sem vizinhança (SV). Estas configurações estão representadas na figura 43.

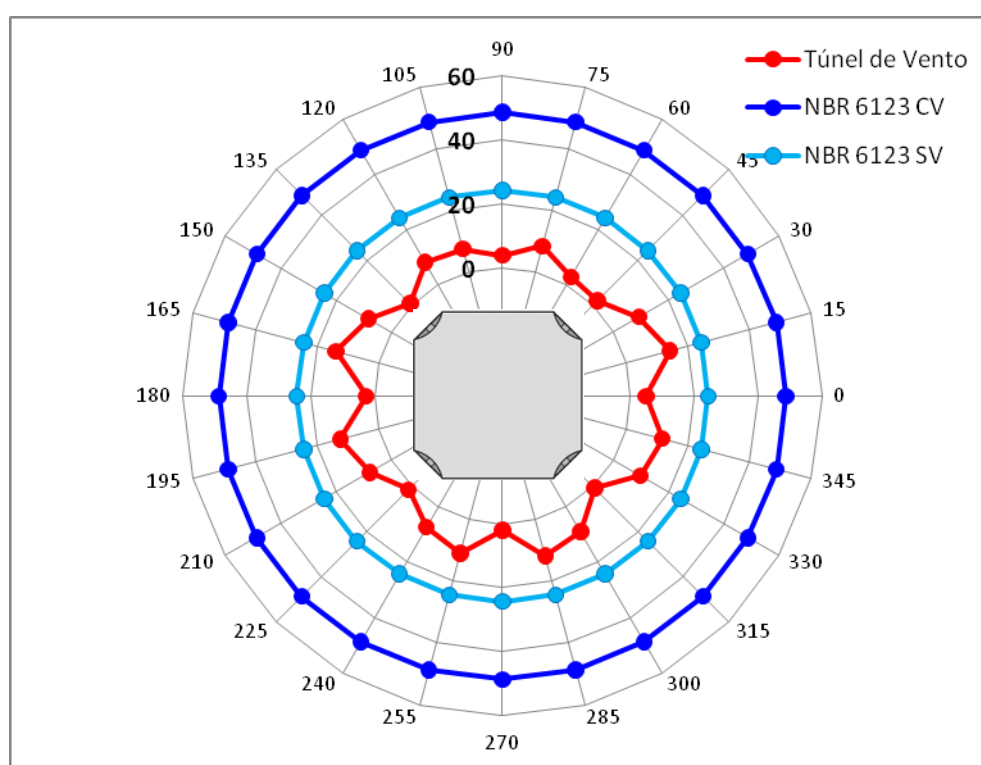


Figura 43: momentos de torção, por ângulo de incidência do vento, atuantes sobre o edifício Atlanta

A figura 43 mostra que os valores do momento de torção calculados pela NBR 6123/1988 superam os valores calculados a partir do ensaio em túnel de vento tanto para o caso com vizinhança quanto para o caso sem vizinhança. Este resultado mostra que o valor calculado pela NBR 6123/1988 é adequado quanto ao momento de torção, para este edifício.

### 6.1.3 Comendador Araújo

As figuras 44 e 45 apresentam os momentos de torção, em MNm, calculados pela NBR 6123/1988 e pelo estudo em túnel de vento para o edifício Comendador Araújo. Os momentos de torção foram calculados por ângulo de incidência do vento. Na figura 44 foram representados os prédios vizinhos e na figura 45 o edifício foi estudado isoladamente, sem o efeito de vizinhança.

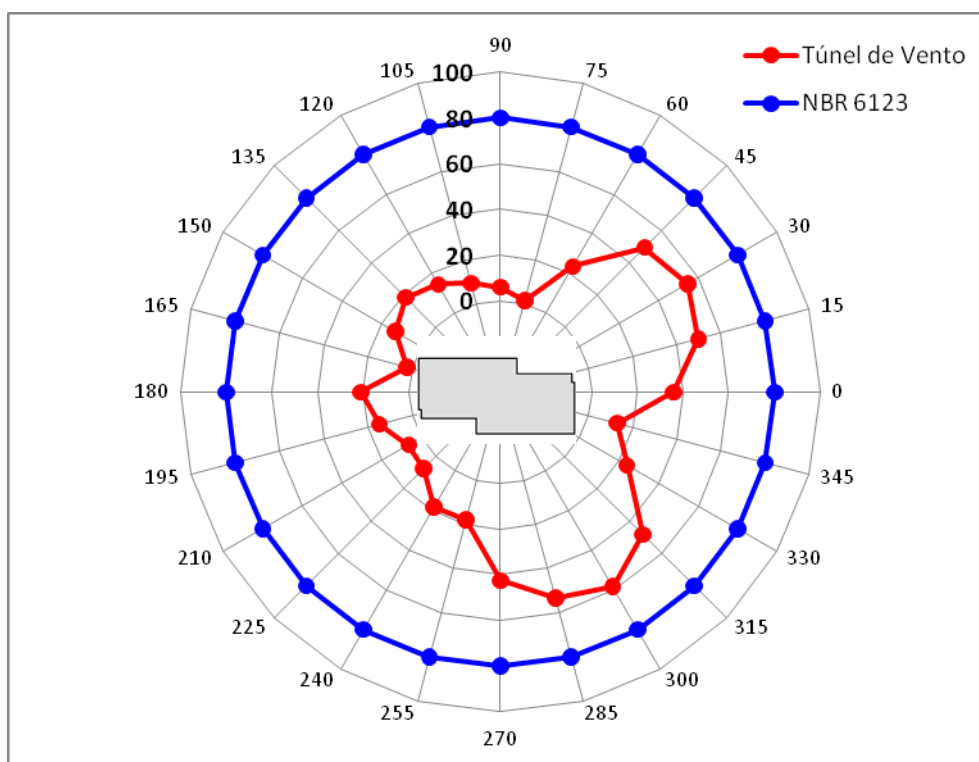


Figura 44: momentos de torção, por ângulo de incidência do vento, atuantes sobre o edifício Comendador Araújo, com vizinhança



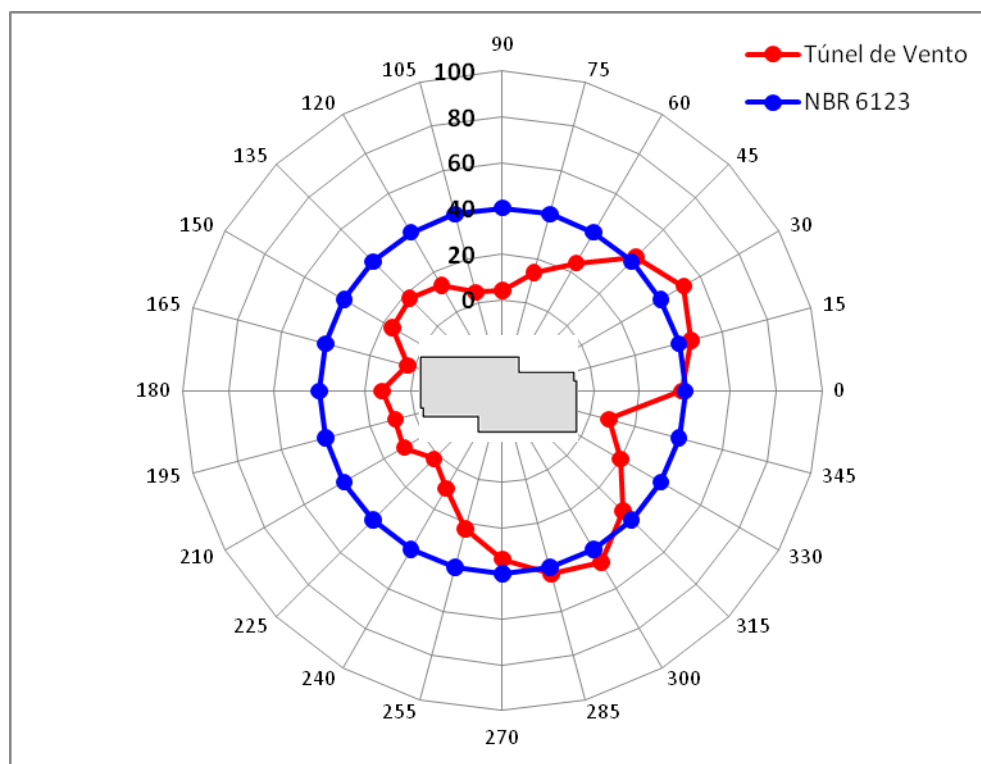


Figura 45: momentos de torção, por ângulo de incidência do vento, atuantes sobre o edifício Comendador Araújo, sem vizinhança

Segundo a classificação da rugosidade do terreno apresentada pela NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 10) o edifício Comendador Araújo se enquadra entre a categoria III e a IV.

Na figura 44, em que a vizinhança de entorno é considerada no cálculo, os valores do momento de torção calculados pela NBR 6123/1988 superaram os valores calculados a partir do ensaio em túnel de vento em todos os ângulos de incidência do vento. Este resultado mostra que o valor calculado pela NBR 6123/1988 é adequado quanto ao momento de torção, para esta configuração.

Entretanto, na figura 45, onde o edifício é analisado isoladamente, os valores calculados a partir do ensaio em túnel de vento superaram em no máximo 30% os valores do momento de torção calculados pela NBR 6123/1988 para os ângulos de incidência do vento de 15° a 45° e de 285° a 300°. Estes resultados mostram que para a configuração isolada deste edifício a NBR 6123/1988 não está adequada.

### 6.1.4 Prósperitas

De acordo com a classificação da rugosidade do terreno apresentada pela NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 10) o edifício Prósperitas se enquadra entre a categoria III e a IV.

A figura 46 apresenta os momentos de torção, em MNm, calculados pela NBR 6123/1988 e pelo estudo em túnel de vento para o edifício Prósperitas. Os momentos de torção foram calculados por ângulo de incidência do vento.

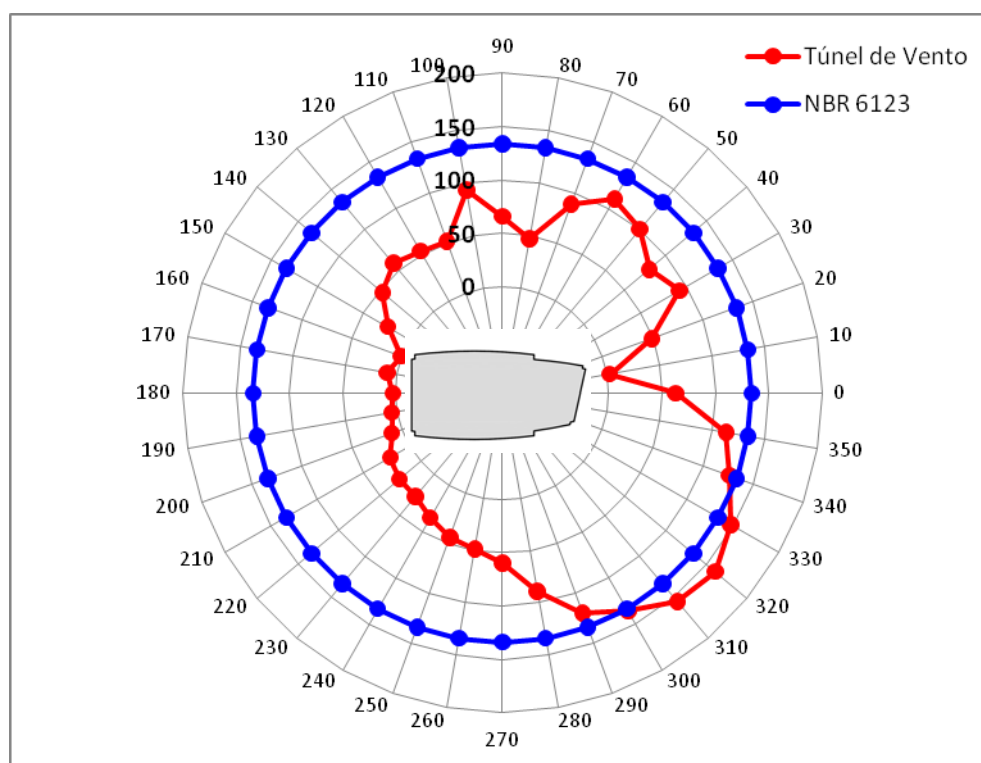


Figura 46: momentos de torção, por ângulo de incidência do vento, atuantes sobre o edifício Prósperitas

A figura 46 mostra que os valores do momento de torção calculados pela NBR 6123/1988 são superiores aos valores calculados a partir do ensaio em túnel de vento entre os ângulos de incidência do vento de 340° a 290°, e são inferiores entre os ângulos de 300° e 330°, onde o túnel de vento superou a NBR 6123/1988 em até 20%. Estes resultados mostram que para este edifício a NBR 6123/1988 não está adequada para alguns ângulos de incidência do vento.

### 6.1.5 Leopoldo Green

De acordo com a classificação da rugosidade do terreno apresentada pela NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 10) o edifício Leopoldo Green se enquadra entre a categoria III e a IV.

A figura 47 apresenta os momentos de torção, em MNm, calculados pela NBR 6123/1988 e pelo estudo em túnel de vento para o edifício Leopoldo Green. Os momentos de torção foram calculados por ângulo de incidência do vento.

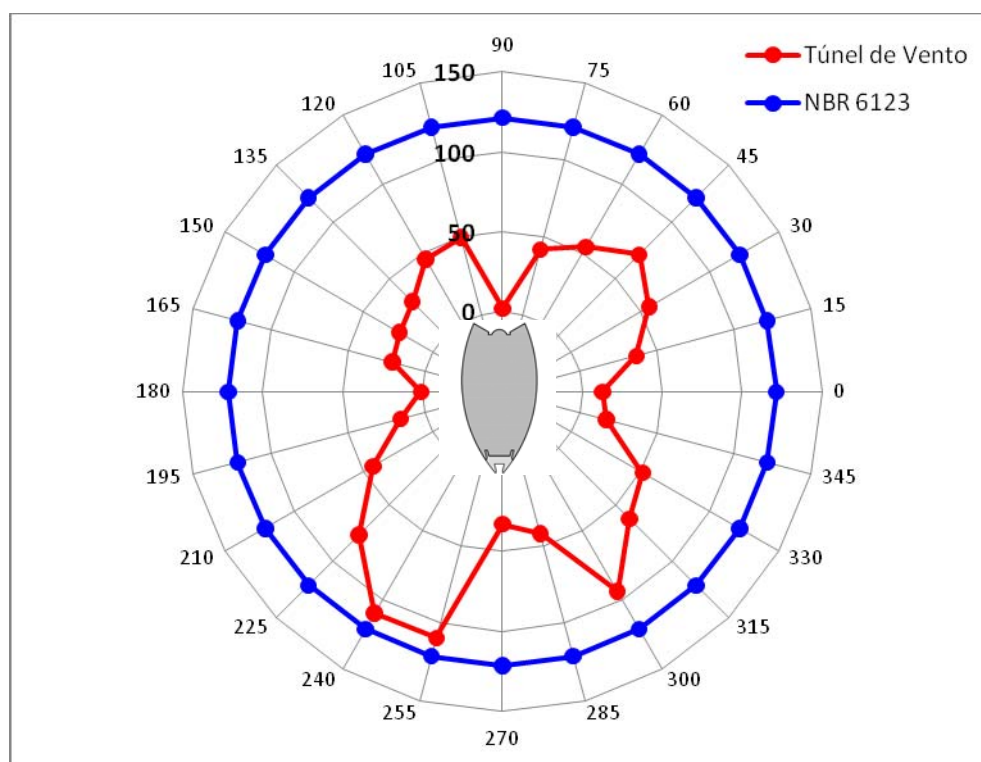


Figura 47: momentos de torção, por ângulo de incidência do vento, atuantes sobre o edifício Leopoldo Green

A figura 47 mostra que os valores do momento de torção calculados a partir do ensaio em túnel de vento são inferiores aos valores calculados pela NBR 6123/1988 em todos os ângulos de incidência do vento. Apesar da forma característica deste edifício não ser prevista pela NBR 6123/1988, o resultado apresentado pela figura 47 mostra que o valor calculado pela Norma para este prédio é adequado quanto ao momento de torção.

### 6.1.6 CENU Torre IV

Segundo a classificação da rugosidade do terreno apresentada pela NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 10) o edifício CENU Torre IV se enquadra entre a categoria III e a IV.

A figura 48 apresenta os momentos de torção, em MNm, calculados pela NBR 6123/1988 e pelo estudo em túnel de vento para o edifício CENU Torre IV. Os momentos de torção foram calculados por ângulo de incidência do vento.

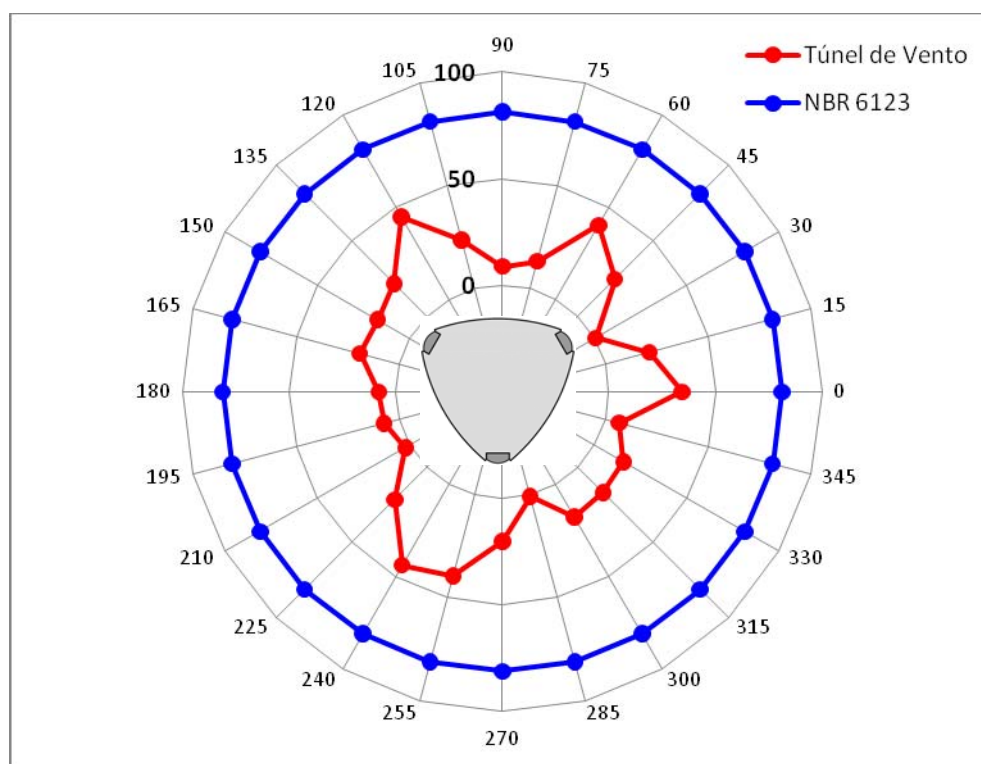


Figura 48: momentos de torção, por ângulo de incidência do vento, atuantes sobre o edifício CENU Torre IV

A figura 48 mostra que os valores do momento de torção calculados pela NBR 6123/1988 são superiores aos valores calculados a partir do ensaio em túnel de vento para todos os ângulos de incidência do vento. Embora este edifício tenha uma forma triangular de faces levemente curvadas em planta, formato não previsto pela NBR 6123/1988, o resultado apresentado pela figura 48 mostra que o valor calculado pela Norma é adequado quanto ao momento de torção.

### 6.1.7 Ocean Palace

As figuras 49 e 50 apresentam os momentos de torção, em MNm, calculados pela NBR 6123/1988 e pelo estudo em túnel de vento para o edifício Ocean Palace. Os momentos de torção foram calculados por ângulo de incidência do vento. Na figura 49 foram representados os prédios vizinhos e na figura 50 o edifício foi estudado isoladamente, sem o efeito de vizinhança.

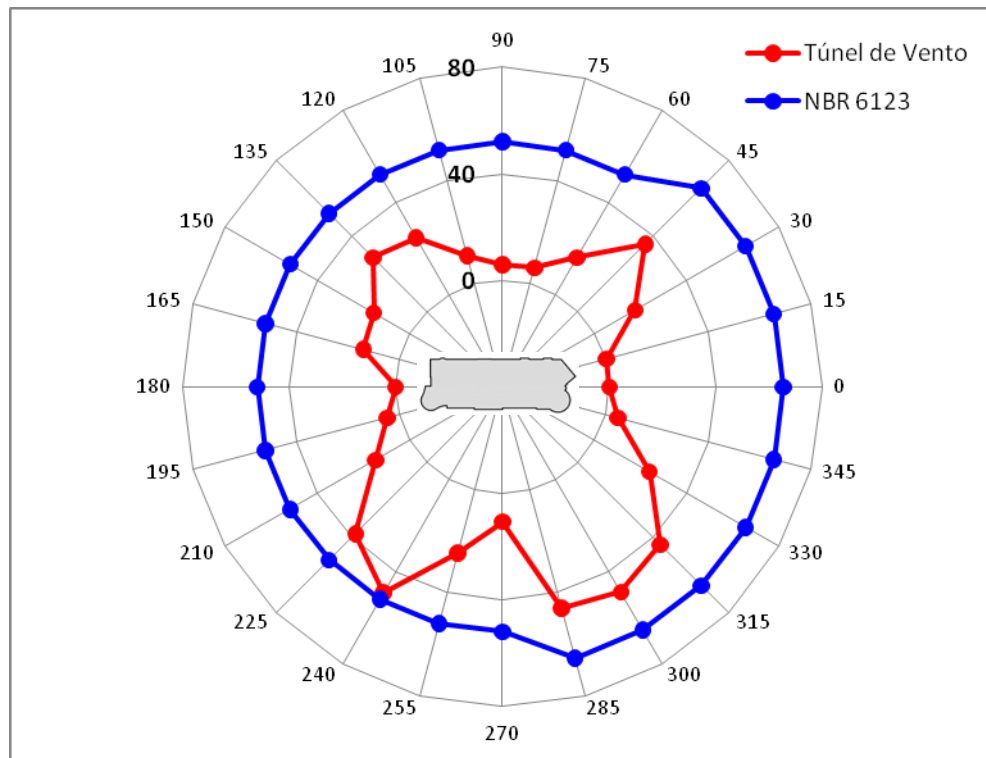


Figura 49: momentos de torção, por ângulo de incidência do vento, atuantes sobre o edifício Ocean Palace, com vizinhança

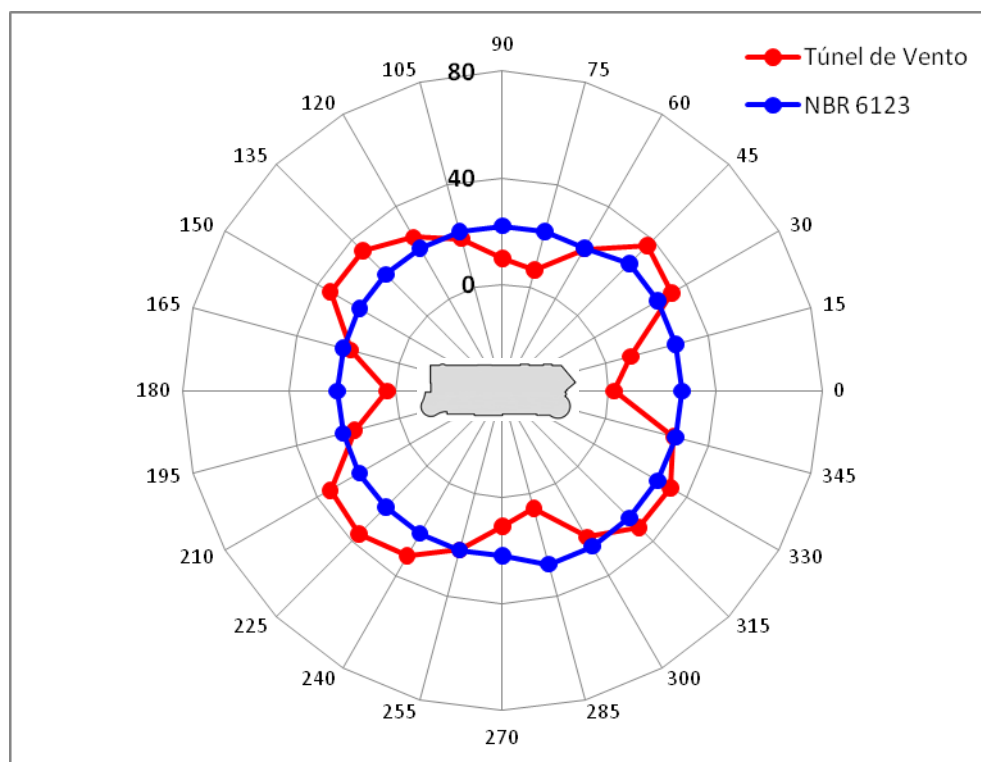


Figura 50: momentos de torção, por ângulo de incidência do vento, atuantes sobre o edifício Ocean Palace, sem vizinhança

Segundo a classificação da rugosidade do terreno apresentada pela NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 10) o edifício Ocean Palace se enquadra na categoria I para ventos incidentes entre os ângulos  $285^\circ$  e  $45^\circ$  e está entre a categoria III e a IV para os ângulos de incidência do vento entre  $60^\circ$  e  $270^\circ$ .

Na figura 49, em que a vizinhança de entorno é considerada no cálculo, os valores do momento de torção calculados pela NBR 6123/1988 são maiores que os valores calculados a partir do ensaio em túnel de vento em todos os ângulos de incidência do vento.

Entretanto, na figura 50, onde o edifício é analisado isoladamente, os valores calculados a partir do ensaio em túnel de vento superam em até 65% os valores calculados pela NBR 6123/1988 entre os ângulos de incidência do vento de  $30^\circ$  a  $45^\circ$ , de  $120^\circ$  a  $150^\circ$ , de  $210^\circ$  a  $240^\circ$  e de  $315^\circ$  a  $330^\circ$ . Cabe ressaltar que estes ângulos são oblíquos às faces do edifício e que a NBR 6123/1988 considera apenas a incidência do vento de forma perpendicular às faces do prédio. A torção deste edifício é maior, quando analisado isoladamente, para ângulos de incidência do vento não previstos pela NBR 6123/1988.

### 6.1.8 Unique Residence

Segundo a classificação da rugosidade do terreno apresentada pela NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 10) o edifício Unique se enquadra entre a categoria III e a IV.

As figuras 51 e 52 apresentam os momentos de torção, em MNm, calculados pela NBR 6123/1988 e pelo estudo em túnel de vento para o edifício Unique. Os momentos de torção foram calculados por ângulo de incidência do vento. Na figura 51 foram representados os prédios vizinhos e na figura 52 o edifício foi estudado isoladamente, sem o efeito de vizinhança.

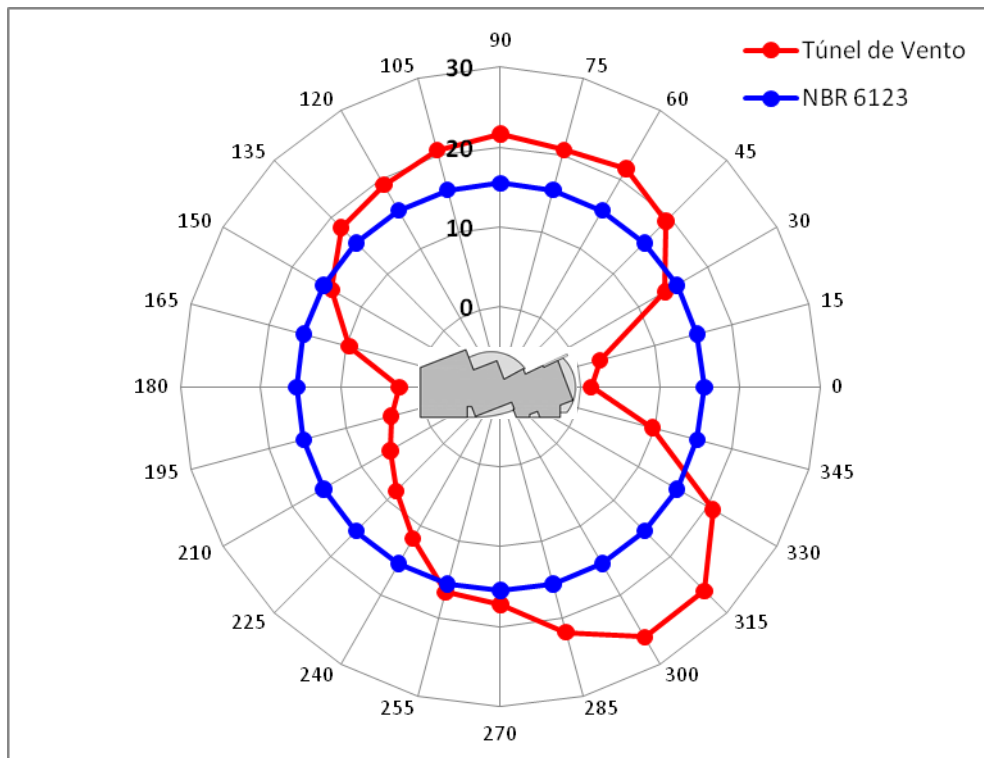


Figura 51: momentos de torção, por ângulo de incidência do vento, atuantes sobre o edifício Unique Residence, com vizinhança

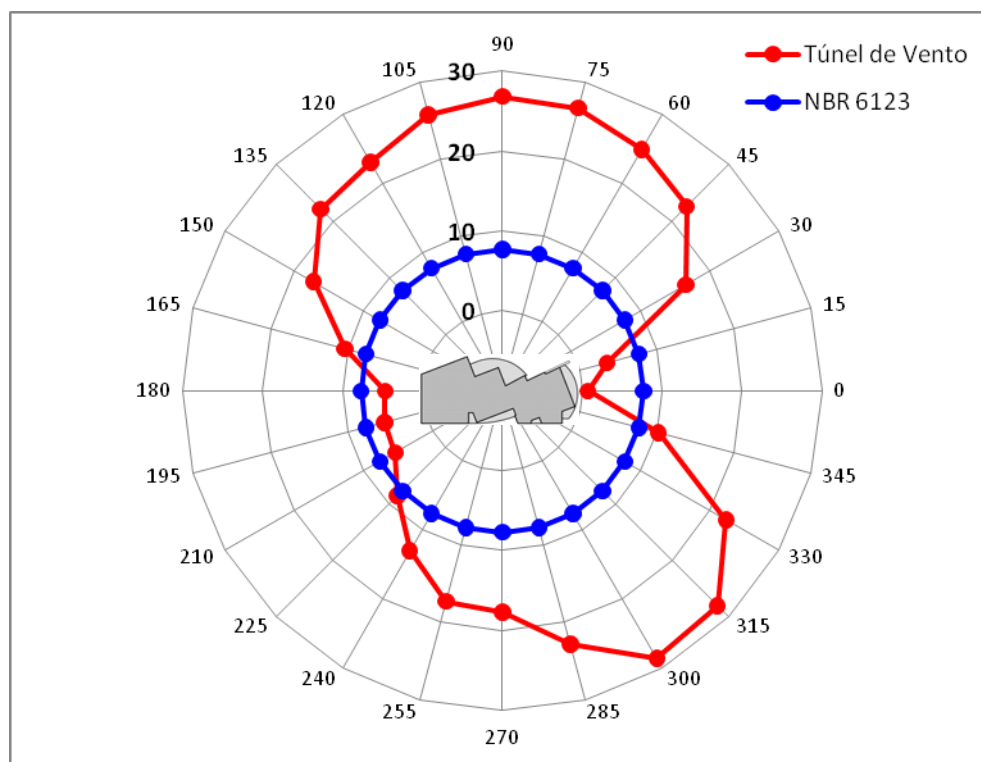


Figura 52: momentos de torção, por ângulo de incidência do vento, atuantes sobre o edifício Unique Residence, sem vizinhança

Na figura 51, onde a vizinhança de entorno é considerada no cálculo, os valores do momento de torção calculados pela NBR 6123/1988 foram superados em até 70% pelos valores calculados a partir do ensaio em túnel de vento para os ângulos de incidência do vento entre 45° e 135° e entre 255° e 330°, o que representa mais de 50% dos ângulos de incidência do vento.

Na figura 52, em que a vizinhança não é considerada, esta situação se acentua, pois a NBR 6123/1988 é superada em 80% dos ângulos de incidência do vento, e os valores calculados a partir do ensaio em túnel de vento chegam a superar em mais de 270% os valores calculados pela NBR 6123/1988. Essa diferença exagerada entre os valores calculados pela NBR 6123/1988 e os calculados pelo túnel de vento pode ser explicada pela grande excentricidade das forças em relação ao centro de torção do edifício, uma vez que este é consideravelmente afastado do seu centro geométrico. Esta situação é agravada quando não possui vizinhança de entorno, pois pela NBR 6123/1988 a excentricidade é estimada em 7,5% da maior dimensão em planta, contra os 15% da maior dimensão em planta utilizada quando há vizinhança.



### 6.1.9 Issa Hazbum

De acordo com a classificação da rugosidade do terreno apresentada pela NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 10) o edifício Issa Hazbum se enquadra na categoria I para ventos incidentes entre os ângulos  $270^\circ$  e  $0^\circ$  e está entre a categoria III e a IV para os ângulos de incidência do vento entre  $15^\circ$  e  $255^\circ$ .

A figura 53 apresenta os momentos de torção, em MNm, calculados pela NBR 6123/1988 e pelo estudo em túnel de vento para o edifício Issa Hazbum. Os momentos de torção foram calculados por ângulo de incidência do vento.

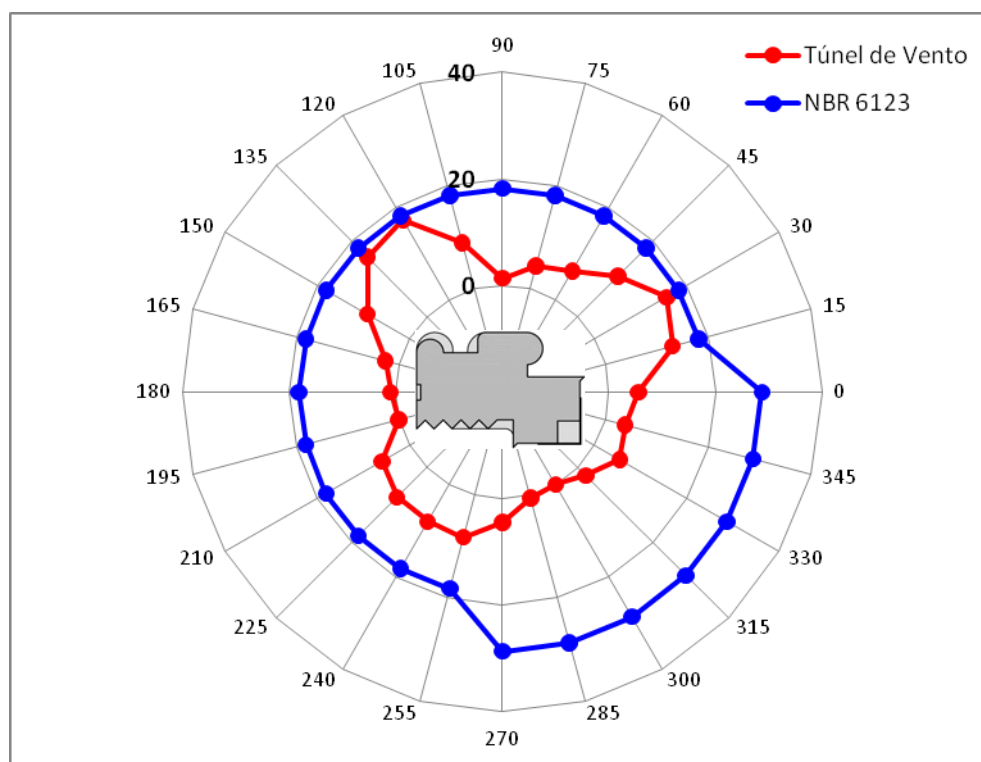


Figura 53: momentos de torção, por ângulo de incidência do vento, atuantes sobre o edifício Issa Hazbum

A figura 53 mostra que os valores do momento de torção calculados a partir do ensaio em túnel de vento são inferiores aos valores calculados pela NBR 6123/1988 em todos os ângulos de incidência do vento. O resultado apresentado pela figura 53 mostra que o valor calculado pela Norma para este prédio é adequado quanto ao momento de torção.

### 6.1.10 Barra Tower

As figuras 54 e 55 apresentam os momentos de torção, em MNm, calculados pela NBR 6123/1988 e pelo estudo em túnel de vento para o edifício Barra Tower. Os momentos de torção foram calculados por ângulo de incidência do vento. Na figura 54 a maior sacada do edifício foi considerada aberta, com escoamento de ar na sacada, e na figura 55 a maior sacada do edifício foi considerada fechada, ou seja, sem escoamento do vento no interior da sacada.

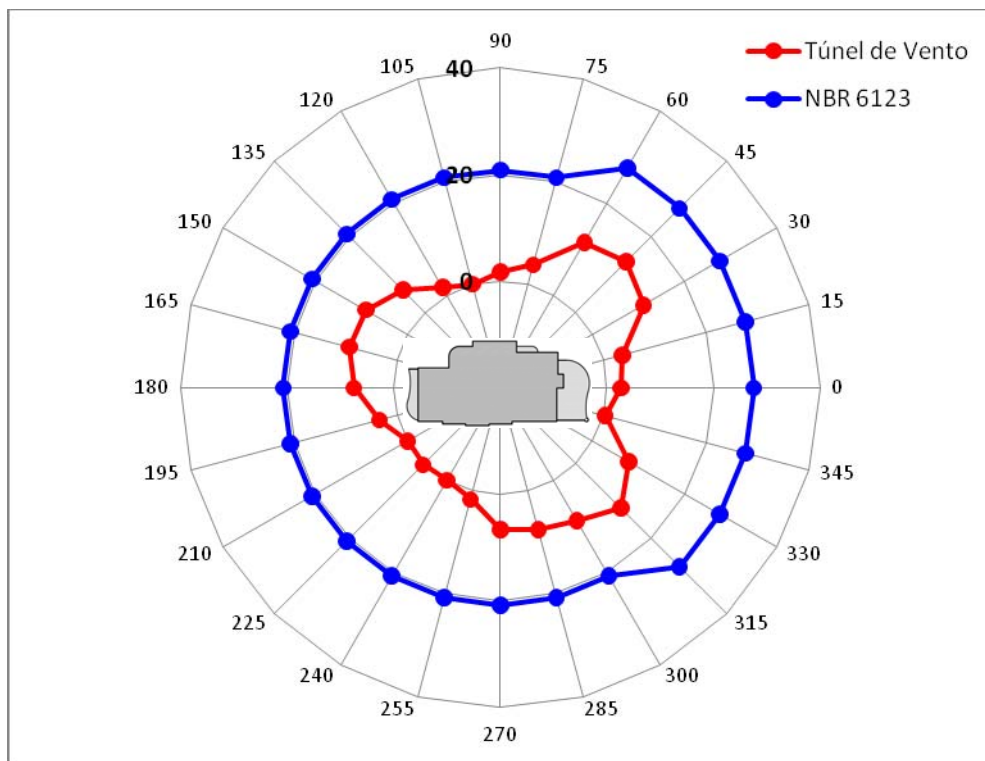


Figura 54: momentos de torção, por ângulo de incidência do vento, atuantes sobre o edifício Barra Tower, com sacadas abertas

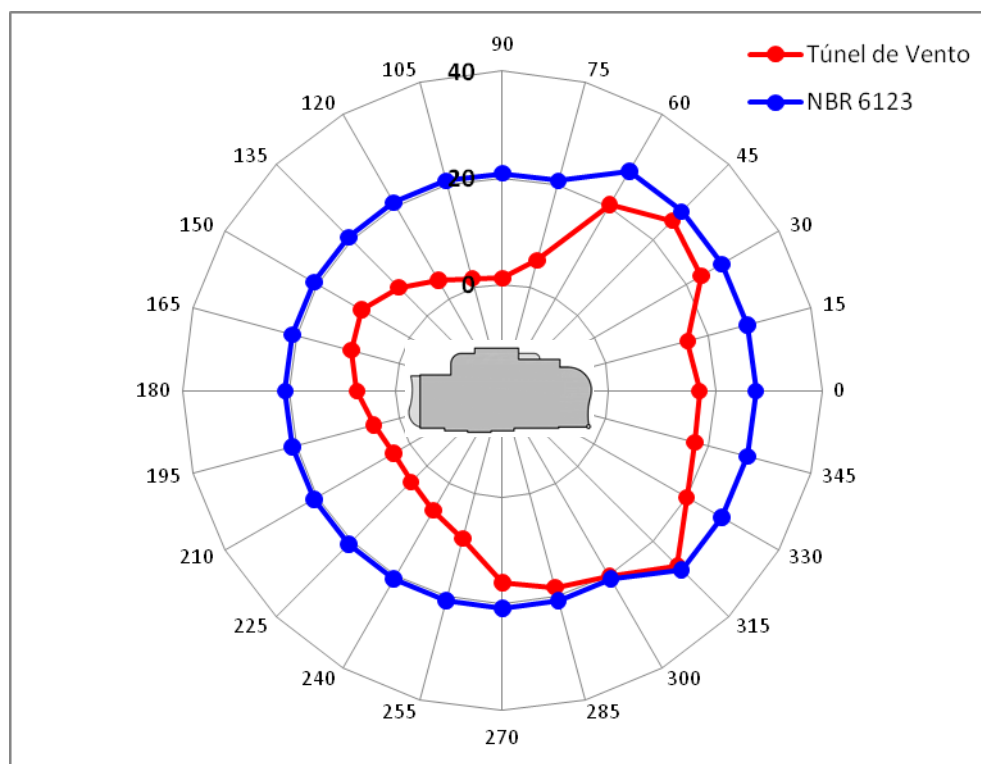


Figura 55: momentos de torção, por ângulo de incidência do vento, atuantes sobre o edifício Barra Tower, com sacadas fechadas

De acordo com a classificação da rugosidade do terreno apresentada pela NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 10) o edifício Barra Tower se enquadra na categoria I para ventos incidentes entre os ângulos  $315^\circ$  e  $60^\circ$  e está entre a categoria III e a IV para os ângulos de incidência do vento entre  $75^\circ$  e  $300^\circ$ .

A figura 54 mostra que os valores do momento de torção calculados pela NBR 6123/1988 são superiores aos valores calculados a partir do ensaio em túnel de vento para todos os ângulos de incidência do vento. Este resultado mostra que o valor calculado pela NBR 6123/1988 é adequado quanto ao momento de torção, para este edifício.

Na figura 55 é testada uma configuração que considera as sacadas fechadas totalmente com vidro. Esta configuração é frequentemente utilizada nos edifícios, principalmente em casos como este, em que a sacada é de frente para o mar. Essa configuração foi testada para verificar as alterações nos carregamentos sobre a estrutura do prédio devido à ação do vento para esta situação. Os valores dos momentos de torção do edifício sofreram um aumento significativo com o fechamento das sacadas. Por exemplo, o caso do ângulo de incidência do vento de  $345^\circ$  que tinha seu valor inferior a 0,02% do valor da Norma, praticamente zerado, e

com o fechamento da sacada chegou a 63% do valor da Norma. Apesar deste aumento percebido no momento de torção do edifício, o valor calculado pela NBR 6123/1988 está adequado para este edifício, pois não foi superado em nenhum ângulo pelos valores calculados pelo túnel de vento.

## 6.2 ANÁLISE GERAL

A partir do estudo do momento de torção de cada edifício e das análises feitas sobre os seus resultados, é possível organizar os dados de cada prédio de forma resumida para uma análise geral sobre todos os edifícios apresentados neste trabalho.

A tabela 1 apresenta as principais características de cada prédio apresentado neste trabalho e os seus respectivos resultados de torção e de excentricidade obtidos pela NBR 6123/1988 e pelo túnel de vento. Os valores de excentricidade mostrados na tabela 1 são adimensionais, gerados através da divisão pela maior dimensão em planta.

Uma vez calculada, pela NBR 6123/1988, a força resultante sobre cada edificação, procura-se determinar qual valor de excentricidade deveria ser utilizado em cada edifício para se obter o momento de torção igual ao momento calculado pelo túnel de vento. Os valores dessas excentricidades são apresentados na coluna “Túnel” da coluna “ $e_a/a$ ” da tabela 1. Desta forma, estaremos determinando os valores das excentricidades que conduzirão aos momentos de torção que realmente irão agir sobre cada edifício.

Tabela 1: análise geral dos edifícios estudados.

Prédio	Planta do Pav. Tipo	Elevação	H (m)	a (m)	b (m)	a/b	H/a	Escala	Categorias	V <sub>0</sub> (m/s)	Local	Configuração	Mt máximo		e <sub>r</sub> /a	
													NBR	Túnel	NBR	Túnel
Atlanta			129.2	44.45	44.45	1.0	2.9	1/400	III/IV	38.0	Barueri - SP	Com Vizinhança	48.7	14.3	15.0%	4.4%
Cristal Tower			86.16	27.3	27.3	1.0	3.2	1/350	I e III/IV	46.0	Porto Alegre - RS	Sem Vizinhança	24.4	14.3	7.5%	4.4%
CENU Torre IV			124.00	60.19	57.54	1.0	2.1	1/400	III/IV	38.0	São Paulo - SP	Com Vizinhança	81.2	44.7	15.0%	8.3%
Issa Harzum			114.90	33.05	22.79	1.5	3.5	1/400	I e III/IV	30.0	Natal - RN	Com Vizinhança	28.7	17.2	15.0%	14.2%
Prosperitas			146.72	66.63	33.96	2.0	2.2	1/400	III/IV	38.0	São Paulo - SP	Com Vizinhança	133.9	160.9	15.0%	18.0%
Leopoldo Green			118.00	73.90	37.34	2.0	1.6	1/400	III/IV	38.0	São Paulo - SP	Com Vizinhança	121.4	110.2	15.0%	13.6%
Comendador Araújo			152.08	47.05	22.55	2.1	3.2	1/400	III/IV	41.0	Curitiba - PR	Com Vizinhança	80.1	58.4	15.0%	10.9%
Barra Tower			122.5	24.62	11.3	2.2	5.0	1/250	I e III/IV	43.0	Balneário Camboriú - SC	Sacadas Abertas	27.6	13.4	15.0%	7.3%
Unique Residence			111.96	31.42	13.48	2.3	3.6	1/250	III/IV	30.0	Natal - RN	Sacadas Fechadas	27.6	26.5	15.0%	14.6%
Ocean Palace			136.84	32.14	10.75	3.0	4.3	1/250	I e III/IV	43.0	Balneário Camboriú - SC	Com Vizinhança	15.5	26.1	15.0%	25.3%
												Sem Vizinhança	7.7	28.6	7.5%	27.9%
												Com Vizinhança	65.5	49.4	15.0%	14.3%
												Sem Vizinhança	27.4	37.1	7.5%	12.4%

Nos casos estudados com o efeito de vizinhança, os valores das excentricidades ( $e_a/a$ ) obtidos pela NBR 6123/1988 foram superiores aos obtidos pelo túnel de vento, com exceção dos edifícios Prosperitas e Unique Residence. O Unique Residence será analisado separadamente mais adiante por se tratar de um caso específico. De forma geral, a Norma está adequada para a configuração com a presença de vizinhança, sendo superada apenas em quatro ângulos de incidência do vento no caso do edifício Prosperitas, onde o valor da excentricidade ( $e_a/a$ ) que deveria ser utilizada pela NBR 6123/1988 para a correta determinação do momento de torção é de 18%.

Através da análise das excentricidades ( $e_a/a$ ), para os casos sem o efeito de vizinhança, percebe-se que o valor de 7,5% da maior dimensão em planta utilizado pela NBR 6123/1988 foi superado pelo túnel de vento em diversos casos. Este resultado indica que a Norma não está contemplando estes casos e, portanto, este parâmetro da NBR 6123/1988 deveria ser revisto. De acordo com os resultados apresentados na tabela 1 para os edifícios Cristal Tower, Comendador Araújo e Ocean Palace, cujas excentricidades ( $e_a/a$ ) sem o efeito de vizinhança são, respectivamente, 8,5%, 9,7% e 12,4%, observa-se que a utilização de 15% da maior dimensão em planta (NBR-6123 com o efeito de vizinhança) como um valor único para todos os casos seria mais adequado.

No caso do edifício Unique Residence, os valores de torção e de excentricidade ( $e_a/a$ ) calculados pelo túnel de vento foram muito superiores aos valores calculados pela NBR 6123/1988. Este resultado pode ser explicado devido à grande distância entre o centro de torção da estrutura e o centro geométrico deste edifício. Para edifícios com esta configuração de centro de torção recomenda-se um estudo específico em túnel de vento para a determinação do momento de torção. Recomenda-se, ainda, que sejam realizados mais trabalhos sobre este assunto a fim de determinar até que distâncias entre o centro de torção e o centro geométrico o método da NBR 6123/1988 pode ser utilizado.

## 7 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados neste trabalho mostram que, em determinados casos, os valores dos momentos de torção calculados pela NBR 6123/1988 são inferiores aos valores calculados a partir dos coeficientes de pressão obtidos em túnel de vento.

A NBR 6123/1988, de forma geral, é adequada para o cálculo do momento de torção para configurações com vizinhança.

Com base nos resultados apresentados, seria razoável a utilização de um único valor de excentricidade no processo de cálculo da NBR 6123/1988 igual a 15% da maior dimensão em planta.

Em prédios cujo centro de torção é muito deslocado em relação ao centro geométrico, como é o caso mostrado pelo edifício Unique Residence, a NBR 6123/1988 não é adequada para determinar os valores do momento de torção. Nestes casos recomenda-se um estudo específico em túnel de vento.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.
- BLESSMANN, J. **Aerodinâmica das Construções**. 2. ed. Porto Alegre: Sagra, 1990.
- 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.
- LOREDO-SOUZA, A. M.; SCHETTINI, E. B. C.; PALUCH, M. J. Simulação da Camada Limite Atmosférica em Túnel de Vento. In: MÖLER, S. V.; SILVESTRINI, J. H. (Org.). **Turbulência**. Porto Alegre: ABCM, 2004. p.137-163.
- LOREDO-SOUZA, A. M. **Ação Estática do Vento sobre o Empreendimento Planolar – Barra Tower, Balneário Camboriú, SC**. Porto Alegre: LAC/UFRGS, ago. 2007a. Relatório Técnico.
- LOREDO-SOUZA, A. M.; ROCHA, M. M. **Ação Estática do Vento sobre o Empreendimento Prosperitas, São Paulo, SP**. Porto Alegre: LAC/UFRGS, set. 2007b. Relatório Técnico.
- LOREDO-SOUZA, A. M. **Ação Estática do Vento sobre o Edifício do Empreendimento Odebrecht Atlanta, Alphaville, Barueri, SP**. Porto Alegre: LAC/UFRGS, dez. 2007c. Relatório Técnico.
- LOREDO-SOUZA, A. M. **Ação Estática do Vento sobre o Empreendimento CENU Torre IV, São Paulo, SP**. Porto Alegre: LAC/UFRGS, jan. 2008a. Relatório Técnico.
- LOREDO-SOUZA, A. M.; ROCHA, M. M. **Ação do Vento sobre a Torre Comendador Araújo, Curitiba, PR**. Porto Alegre: LAC/UFRGS, abr. 2008b. Relatório Técnico.
- LOREDO-SOUZA, A. M. **Ação Estática do Vento sobre o Edifício Ocean Palace, Balneário Camboriú, SC**. Porto Alegre: LAC/UFRGS, jun. 2008c. Relatório Técnico.
- LOREDO-SOUZA, A. M. **Ação Estática do Vento sobre o Edifício Unique Residence, Natal, RN**. Porto Alegre: LAC/UFRGS, jun. 2008d. Relatório Técnico.
- LOREDO-SOUZA, A. M. **Ação Estática do Vento sobre o Edifício Issa Hazbum, Natal, RN**. Porto Alegre: LAC/UFRGS, jul. 2008e. Relatório Técnico.
- LOREDO-SOUZA, A. M. **Ação Estática do Vento sobre o Empreendimento YUNY Leopoldo Green, São Paulo, SP**. Porto Alegre: LAC/UFRGS, nov. 2008f. Relatório Técnico.
- LOREDO-SOUZA, A. M. **Ação Estática do Vento sobre o Edifício Cristal Tower, Porto Alegre, RS**. Porto Alegre: LAC/UFRGS, dez. 2008g. Relatório Técnico.