

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS GUARAPUAVA
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA CIVIL**

Gisele Isabel dos Santos de Lima

**ANÁLISE DO EFEITO DE TORÇÃO EM PRÉDIOS ALTOS
SUBMETIDOS À AÇÃO DO VENTO**

GUARAPUAVA

2019

GISELE ISABEL DOS SANTOS DE LIMA

**ANÁLISE DO EFEITO DE TORÇÃO EM PRÉDIOS ALTOS
SUBMETIDOS À AÇÃO DO VENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação de Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná, Campus
Guarapuava, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Msc. Dyorgge Alves Silva

GUARAPUAVA

2019

Gisele Isabel dos Santos de Lima

ANÁLISE DO EFEITO DE TORÇÃO EM PRÉDIOS ALTOS SUBMETIDOS À AÇÃO DO VENTO

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Civil, do curso de Engenharia Civil da Coordenação de Engenharia Civil (COECI) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Guarapuava, 02 de Julho de 2019.

Prof. Msc. Edson Florentino de Souza
Coordenador de Curso de
Engenharia Civil

Prof. Dr. Petronio Rodrigo Mello Montezuma
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Civil do COECI

ORIENTAÇÃO

Prof. Msc. Dyorgge Alves Silva
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Msc. Dyorgge Alves Silva
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Msc. Edson Florentino de Souza
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Msc. Carlos Francisco Pecapedra Souza
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Civil.

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Msc. Dyorgge Alves Silva, orientador deste trabalho pelo direcionamento durante a realização deste trabalho.

A minha mãe Maria e ao meu pai Ressoli pela minha educação e pelo apoio e incentivo durante que sempre me deram. Aos meus irmãos que me ajudaram nos momentos complicados.

A todos que me apoiaram e incentivaram durante esta caminhada meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

LIMA, G. I. S. **Análise do efeito de torção em prédios altos submetidos à ação do vento**. TCC – Programa de Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, 2019.

O aumento da construção de prédios altos e a implementação de materiais mais leves, com o intuito de reduzir as reações geradas pelas cargas do peso próprio das construções, acaba tendo como contra ponto o aumento das cargas nesses edifícios. Onde o vento é uma das principais cargas atuantes em edifícios altos e uma das características deste carregamento é a sua propriedade fluida, o que resulta na variação temporal do seu perfil de velocidade conforme a resistência gerada pelo terreno, no local em que ocorre o escoamento. A alteração da forma como o vento incide na fachada do edifício gera esforços, como o de torção, os quais têm sua forma de ocorrência afetada não apenas pelo vento, mas também pelas características físicas da estrutura. Portanto as cargas presentes podem ser tratadas de forma estática, que é um tipo de abordagem adotada pela ABNT (1988) NBR 6123 ou de forma experimental, com dados obtidos a partir de ensaios através edifícios em escala reduzida. Deste modo o presente trabalho estuda através de forma analítica teórica e experimental os parâmetros estabelecidos pela norma brasileira de vento para o a torção gerada pelo efeito da vizinhança, tendo em vista que em estudos sobre torção feitos por outros autores conta-se a necessidade de analisar este limite.

Palavras-chave: Torção. Vento. Edifício. NBR 6123.

ABSTRACT

LIMA, G. I. S. **Analysis of the torsion effect in tall buildings subjected to the wind loads.** TCC – Civil Engineering Undergraduate Program, Federal University of Technology of Paraná (UTFPR), Guarapuava, 2019.

The increase in the construction of higher buildings and the implementation of lighter materials, with the aim of reduce the reactions generated by the building weight, ends up having as counterpoint the increase of the loads in these buildings. Where the wind is one of the main loads acting in high buildings and a characteristic of this load is the fluid property, which results in the velocity profile's temporal variation according to the resistance generated by the terrain at the place where the flow occurs. The change in the way the wind focuses on the building's facade generates efforts, such as torsion, which have their form of occurrence affected not only by the wind, but also by the physical structure characteristics. Therefore the present loads can be treated in a static way, which is a type of approach adopted by ABNT (1988) NBR 6123 or experimentally, with data obtained from small-scale buildings. In this way the present work studies through theoretical and experimental analytical forms the parameters established by the Brazilian wind norm for the twist generated by the effect of the neighborhood, considering that in studies on twisting made by other authors, it is necessary to analyze this limit.

Keywords: Twist. Wind. Building. NBR 6123.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Perfil de velocidade média sobre terrenos de distinta rugosidade.	16
Figura 2.2 – Variação da velocidade ao longo do tempo.	18
Figura 2.3 – Perfil de velocidades médias, intensidade e escala da componente longitudinal de turbulência.....	21
Figura 2.4 – Efeito Venturi.	23
Figura 2.5 – Deflexão vertical.	24
Figura 2.6 – Turbulência de esteira.	25
Figura 2.7 – Força Global e algumas das direções possíveis de decomposição desta força ...	29
Figura 2.8 – Critérios para decomposição da força horizontal devido ao vento	29
Figura 2.9 – Eixo de coordenadas, excentricidades e esforços.	31
Figura 2.10 – Curvas propostas para excentricidades normalizadas com e sem vizinhança...	33
Figura 2.11 – Dimensões de referencia.	33
Figura 2.12 – Túnel de vento Professor Joaquim Blessmann.	37
Figura 2.13 – Circuito aerodinâmico do túnel de vento Professor Joaquim Blessmann.	37
Figura 2.14– Edifício CAARC Standart Tall Building (m).	40
Figura 3.1– Orientações estudadas.	42
Figura 3.2 – Configuração de vizinhança.	43

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Parâmetros para perfis de velocidade média do vento.	22
Quadro 2.2 – Classificação de terrenos.	22
Quadro 4.1 – Coeficientes de torção calculado pela ABNT (1988) NBR 6123.	44
Quadro 4.2 – Coeficientes de força e de torção experimentais.	45
Quadro 4.3 – Excentricidade experimentais.	46
Quadro 4.4 – Excentricidades e coeficiente de torção 1.	47
Quadro 4.5 – Excentricidades e coeficiente de torção 2.	47
Quadro 4.6 – Excentricidades e coeficiente de torção 3.	48
Quadro 4.7 – Excentricidades e coeficiente de torção 4.	48
Quadro 4.8 – Excentricidade normalizada.	49
Quadro 4.9 – Coeficiente de torção.	49

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1– Coeficiente de torção para o terreno de Categoria I.....	50
Gráfico 4.2 – Coeficiente de torção para o terreno de Categoria II-III, para o túnel de vento e para a ABNT (1988) NBR 6123.	51
Gráfico 4.3 – Coeficiente de torção para o terreno de Categoria II-III, para Carini ¹ e Carini ²	51
Gráfico 4.4 – Excentricidades.	52

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	DELIMITAÇÃO DO TEMA	13
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO	13
1.2.1	Objetivo principal.....	14
1.2.2	Objetivos secundários	14
2	A TORÇÃO EM EDIFÍCIOS.....	15
2.1	O VENTO NA ENGENHARIA ESTRUTURAL	15
2.1.1	Características do vento	15
2.1.2	Modelo matemático da velocidade do vento	17
2.1.3	Perfil vertical da velocidade média	19
2.1.3.1	Perfil de velocidade logarítmica	20
2.1.3.2	O perfil potencial de velocidades	20
2.2	FORÇAS DO VENTO EM EDIFÍCIOS ALTOS	22
2.2.1	Terminologias.....	23
2.2.2	Efeito da vizinhança.....	23
2.2.3	Fatores de forma.....	25
2.2.3.1	O coeficiente de pressão média	25
2.2.3.2	Coeficiente de pressão rms	26
2.2.3.3	Coeficientes de pressão máximo e mínimo.	26
2.2.3.4	Resultante das pressões	27
2.2.3.5	Coeficiente de força.....	28
2.2.4	Força global	28
2.2.4.1	Coeficiente de forças globais	29
2.2.4.2	Coeficiente de torção	30
2.2.5	Excentricidade.....	31
2.2.5.1	Determinação da excentricidade segundo a ABNT(1988)NBR6123	32
2.2.5.2	Carini	32
2.2.5.3	Excentricidade Normalizada	35
2.2.6	Momento torçor pela norma	35
2.3	TÚNEL DE VENTO	36
2.3.1	Ensaio no túnel de vento.....	36

2.3.2	Edifício CAARC Standard Tall Building.....	39
3	METODOLOGIA	41
4	RESULTADOS	44
4.1	ABNT (1988) NBR 6123	44
4.2	EXPERIMENTAL	44
4.2.1	Coeficientes	45
4.2.2	Excentricidades obtidas	46
4.3	CARINI	46
4.3.1	Envoltório proposto	47
4.3.2	Melhor ajuste	47
4.4	EXCENTRICIDADE NORMALIZADA	48
4.5	DISCUSSÕES	50
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
5.1	CONCLUSÃO.....	54
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	55
6	REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

Devido ao desenvolvimento econômico em grandes metrópoles surge necessidade de expansão dos centros urbanos e a falta de espaços para o crescimento horizontal leva à verticalização dessas regiões, visto que segundo Helsley e Strange (2008) a construção de prédios altos, proporciona maior rentabilidade devido ao aumento da aglomeração de pessoas nessas localidades.

A importância econômica de arranha céus também é citada por Baskaran, (1993) onde ele destaca a importância do aumento do número de edifícios altos para atendimento da demanda de escritórios nas principais cidades dos Estados Unidos, como Nova York e Chicago.

O aumento do número de edifícios, cada vez mais altos, torna-se um problema nos projetos estruturais, pois a construção edifícios cada vez mais altos aumentam as cargas verticais suportadas pela estrutura levando à necessidade de desenvolvimento de novos materiais que tornam as construções leves, porém segundo Baskaran (1993) forças inesperadas do vento podem atuar sobre essas estruturas.

Blessmann (2011) afirma que o efeito de torção é influenciado pelas características fluidas do vento onde a rugosidade do terreno possui uma forte influência na forma de incidência do vento, o que pode ser agravado pelo fator de vizinhança, onde os desvios sofridos pelo ar podem aumentar os efeitos da torção.

No Brasil as cargas geradas pelo vento são calculadas segundo a ABNT (1988) NBR 6123, a qual estabelece um diâmetro limite, para considerar o efeito da vizinhança na excentricidade da torção, com valor igual à altura da edificação em estudo ou seis vezes o comprimento do menor lado do edifício, com recomendação de que deve ser adotado o menor valor, para considerar o efeito de prédios vizinhos na força de torção, sendo desprezados os efeitos que qualquer outra edificação existente fora desse raio.

Entretanto a análise de tais limites estabelecidos, nesta norma, necessita ser avaliados com cautela, a fim de evitar erros de dimensionamento de elementos estruturais, pois quando um elemento estrutural não considera os carregamentos de forma adequada, problemas como o do edifício John Hancock, em Boston, em 1973, citada por Blessmann (1989 p. 47), manifestam-se ocorrendo o rompimento dos

vidros da fachada toda vez que o vento no local chegava a 22 m/s, o motivo dessa situação foi à deformação por torção, apresentada pelo edifício, acarretando na deformação das janelas fazendo com que e os vidros saltassem para fora, gerando gasto com a reposição dos vidros, com reforço estrutural e implementação de amortecedores.

Em casos extremos pode ocasionar o colapso da estrutura, como, por exemplo, o desabamento do edifício Real Class localizado da região litorânea do Pará em 2011, onde segundo o Tribunal Da Justiça Do Pará (2016) a queda ocorreu, porque o engenheiro responsável não considerou as cargas horizontais ocasionadas pelo vento e nem o peso próprio da estrutura o que levou ao óbito de três pessoas.

Portanto, uma abordagem com outras recomendações e técnicas existentes na literatura no meio técnico é essencial para diminuir qualquer insegurança, principalmente entre estruturas de grande porte que possam estar submetidas a efeitos de outras edificações nas proximidades, que por sua vez, acabam influenciando as cargas do vento significativamente.

1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

A pesquisa se delimita no estudo do momento de torção estático em edifícios altos, causados pela ação do vento, por conta do efeito da vizinhança, com a análise de dois diâmetros para considerar o efeito da vizinhança na torção, dispondo de dados experimentais, bem como de metodologias teóricas e analíticas.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos do trabalho estão classificados em principal e secundário e serão apresentados nos próximos itens.

1.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é a análise da adequação da ABNT (1988) NBR 6123 quanto aos parâmetros estabelecidos pela mesma para considerar o efeito da vizinhança para o cálculo do momento torçor.

1.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários deste trabalho são:

- Avaliar metodologias analíticas, teóricas e experimentais;
- Verificar os parâmetros limites da ABNT (1988) NBR 6123.

2 A TORÇÃO EM EDIFÍCIOS

De acordo com Siqueira (2009) para considerar a ação do vento durante o projeto de um edifício, é necessário conhecer a interação do vento com a estrutura, tendo em vista que os carregamentos causados pelo vento dependem de parâmetros arquitetônicos, assimetria estrutural, ângulo de incidência do vento e efeitos de interferência causados pela vizinhança. Portanto neste capítulo serão abordadas características do vento bem como a interação do vento com a estrutura associada à suas características arquitetônicas.

2.1 O VENTO NA ENGENHARIA ESTRUTURAL

Em meados de 1930 surgem os primeiros estudos relacionados à ação do vento, onde o cálculo estrutural baseava-se em cargas estáticas obtidas a partir das máximas velocidades do vento observadas. No mesmo período passa a levar em conta a importância da rigidez para o controle de vibrações em conjunto com propostas empíricas de limites de deflexões, no entanto a ação do vento na estrutura se dá de forma complexa, pois a forma como as pressões geradas pelo vento se distribuem sobre a estrutura depende tanto do formato do edifício quanto da região onde as mesmas estão localizadas, já na década 40 alguns estudos propuseram o tratamento estatístico da velocidade máximas do vento. (CARPEGGIANI, 2004; DAVID 2007).

2.1.1 Características do vento

O ar é um fluido e por conta disto quando submetido à ação de uma força o ar continua a se deformar enquanto houver força agente, isso ocorre por conta da propriedade de viscosidade dos fluidos que controla sua velocidade de deformação (BLESSMANN, 2011, p. 15). O vento pode ser caracterizado como o movimento de massas de ar sob a superfície terrestre decorrente das diferenças de pressões na

atmosfera (GONÇALVES et. al, 2004, p.1). Segundo Maia (2009) o movimento de ar na superfície terrestre depende de três forças, a força de fricção, a força gerada por gradiente de pressão e a força de Coriolis. A força de fricção surge como consequência da interação entre massas de ar em movimento e a rugosidade do terreno, dificultando o deslocamento do ar por conta da força de atrito gerada, o que resulta na variação desta força com a altura, pois quanto mais próxima à superfície maior é o seu efeito sob o perfil do vento. Sendo a camada limite atmosférica delimitada pela região de influencia da fricção (FERREIRA, 2008).

Já a força gerada por gradiente de pressão ocorre por conta das diferenças de pressões na atmosfera, responsáveis pelo deslocamento do ar das zonas de alta pressão para as zonas de baixa pressão, onde o gradiente de pressão é diretamente proporcional à velocidade de escoamento do vento, portanto o topo da camada limite atmosférica é denominado altura do gradiente. Enquanto que a força de Coriolis é originada pelo movimento de rotação da Terra (FERREIRA, 2008). O comportamento da camada limite, anteriormente descrito, pode ser observado na figura 2.1, onde pode observar com clareza a variação do gradiente conforme é alterada a rugosidade do terreno.

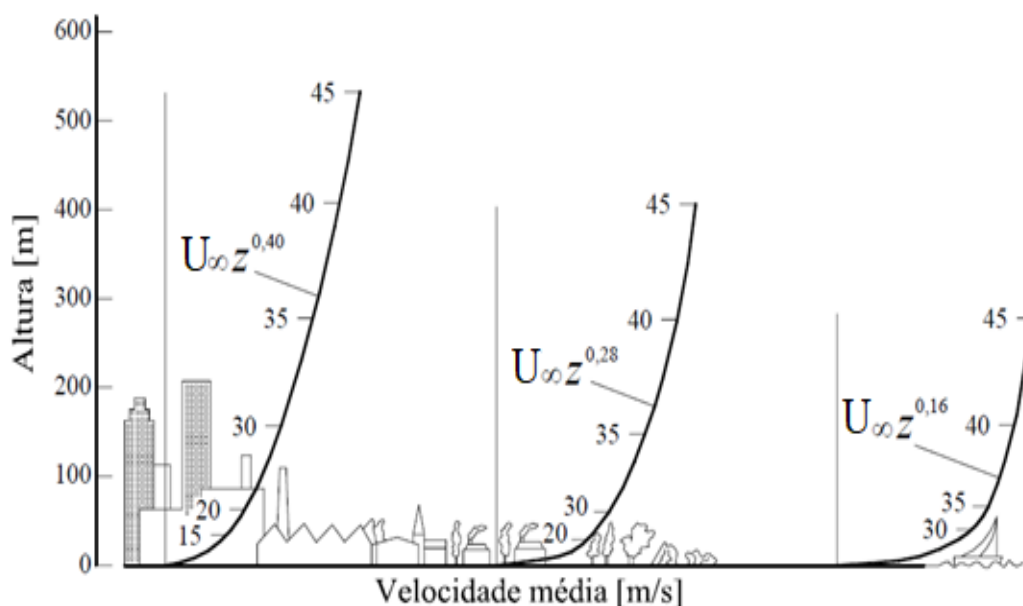


Figura 2.1 – Perfil de velocidade média sobre terrenos de distinta rugosidade.

Fonte: Adaptado de CARPEGGIANI, 2005.

2.1.2 Modelo matemático da velocidade do vento

A velocidade do vento é caracterizada por possuir um constante comportamento flutuante, tal comportamento ocorre devido à natureza turbulenta da camada limite atmosférica. Segundo Blessmann (2011) para fins da construção civil a velocidade média pode ser calculada para um período que varia de dez minutos à uma hora, enquanto que para energia eólica esse período de registro pode durar meses, já para um túnel aerodinâmico, com a finalidade de estudos aeronáuticos a média da velocidade é calculada para o período de um segundo, portanto o período da turbulência depende da finalidade do estudo. No Brasil a ABNT (1988) NBR 6123 considera a velocidade básica do vento de uma rajada de três segundos, excedida em média uma vez em 50 anos a 10 m acima do terreno, em campo aberto e plano.

Essa oscilação pode ser observada na figura 2.2, onde está registrada uma amostragem de velocidade U em um período de tempo T_1 , também é possível verificar as numerosas variações de picos da velocidade, sendo a máxima velocidade de projeto baseado no máximo valor com probabilidade de ocorrência de \bar{U} , sob um intervalo de tempo T (TREIN, 2005).

No entanto o valor máximo de \bar{U} obtido de um registro de velocidade do vento $U(t)$ não é único, pois depende da duração do período de amostra T , o que pode ser constatado no gráfico ilustrado na figura 2.2 onde períodos longos com o T_1 tende a suprimir os efeitos das rajadas de curta duração resultando na velocidade média U_1 , a qual quando comparada com a velocidade média U_2 , possui um valor relativamente menor, pois a velocidade média U_2 é obtida em um menor intervalo de tempo T_2 , o que permite o estudo da turbulência e os efeitos de rajadas de curta duração, conduzindo a valores maiores de velocidades médias (TREIN, 2005).

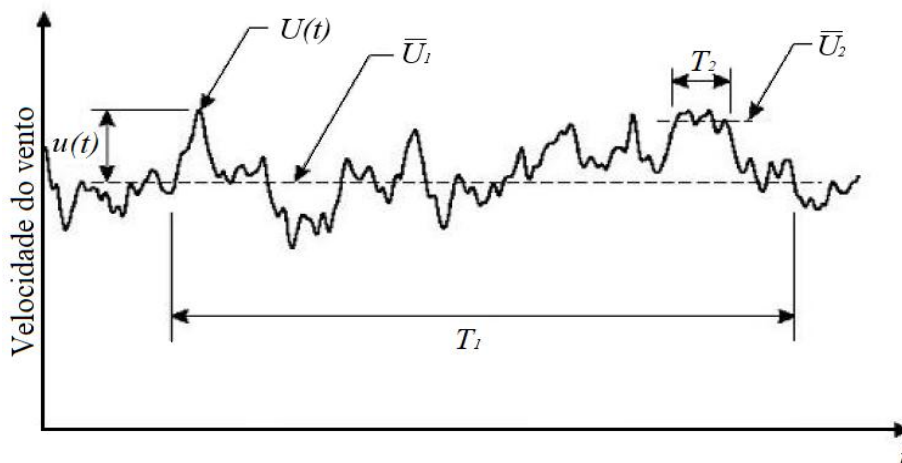


Figura 2.2 – Variação da velocidade ao longo do tempo.

Fonte: TREIN, 2005.

O comportamento do vento descrito no gráfico da figura 2.2 pode ser representado pelas equações 2.1 e 2.2. A velocidade instantânea do vento num dado local é descrita como a soma da velocidade média e da parcela flutuante devido às rajadas é dada pela equação 2.1.

$$U(t) = \bar{U} + u(t) \quad (\text{Equação 2.1})$$

Onde:

\bar{U} é a velocidade média [m/s];

$U(t)$ é a velocidade instantânea do vento [m/s];

$u(t)$ é a componente flutuante da velocidade do vento (devido às rajadas) [m/s].

Já a intensidade do vento pode ser avaliada pela velocidade média, através da equação 2.2.

$$\bar{U} = \frac{1}{T} \cdot \int U(t) dt \quad (\text{Equação 2.2})$$

Onde:

$U(t)$ é a velocidade instantânea [m/s];

t é o período de tempo sobre o qual a média é tomada [s];

T é o intervalo de tempo de amostragem[s].

Enquanto que as pressões de vento utilizadas como base de cálculo, obtidas a partir da velocidade de projeto, é obtida através da equação 2.3.

$$q = \frac{1}{2} \rho_a \bar{U}^2 \quad (\text{Equação 2.3})$$

Onde:

q é a pressão média em pascal e [Pa];

\bar{U} é a velocidade média [m/s];

ρ_a é a massa específica do ar [kg/m³].

2.1.3 Perfil vertical da velocidade média

Na engenharia de estruturas é fundamental o conhecimento do perfil de velocidades médias e das propriedades da turbulência, para determinar a ação estática e a ação dinâmica do vento, sabendo que a velocidade média varia ao longo da altura z acima do terreno conforme ilustrado na figura 2.1 (CARPEGIANI, 2005).

Segundo Holmes (2004) existem diversas expressões matemáticas propostas para modelar o perfil de velocidade do vento na camada limite

atmosférica, no entanto destacam-se o perfil logarítmico e o potencial, descritos a seguir.

2.1.3.1 Perfil de velocidade logarítmica

O perfil de velocidade logarítmica é dado pela equação 2.4, onde a variação da velocidade média do vento varia em função da altura (z) e força de atrito por unidade de área exercida pela superfície (τ_0). Sendo válida apenas para alturas próximas da superfície e desprezando a força de Coriolis. A equação 2.4 representa uma variação logarítmica da velocidade do vento com a altura z . (HOLMES, 2004).

$$\bar{U}(z) = \frac{1}{k} u_* \ln \frac{z}{z_0} \quad (\text{Equação 2.4})$$

Onde:

u_* é a velocidade de fricção [N];

z é a altura [m];

k é a constante de Von Karman usualmente considerada como igual a 0,4;

z_0 é o comprimento de rugosidade [m].

2.1.3.2 O perfil potencial de velocidades

O perfil de velocidade média do vento pode ser expresso pela lei da potência, a qual permite a integração ao longo da altura, é dada pela equação 2.5.

$$\bar{U}(z) = \bar{U}_{10} \left(\frac{z}{z_{10}} \right)^p \quad (\text{Equação 2.5})$$

Onde:

\bar{U}_{10} a velocidade média numa altura de referência z_{10} [m/s];

z_{10} é a altura fixada, costuma ser 10 m ou a altura gradiente [m];

z_g é a altura gradiente[m];

p é o expoente que depende da rugosidade do terreno.

Sendo os valores típicos para p estão expostos no quadro 2.1 de acordo com o tipo de terreno e o perfil de velocidade média, intensidade e escala da componente longitudinal de turbulência para diferentes camadas limites, simuladas no túnel de vento Professor Joaquim Blessmann, representado na figura 2.3.

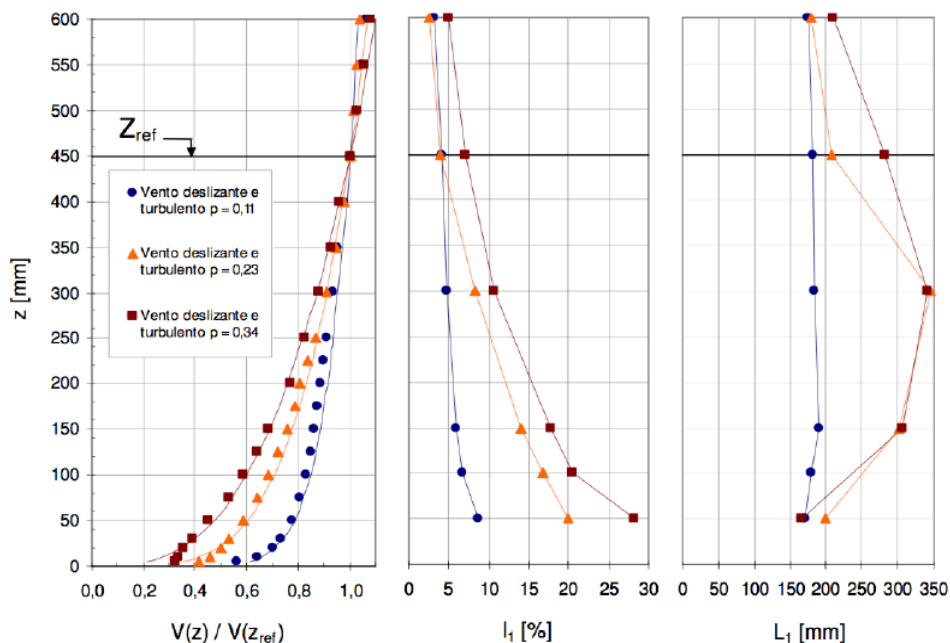


Figura 2.3 – Perfil de velocidades médias, intensidade e escala da componente longitudinal de turbulência.

Fonte: ALBERTI, 2015.

Terreno	p
Zona costeira	0,11
Granjas e casas de campo	0,23
Cidades pequenas esubúrbios densos	
Centros de grandes cidades	0,34

Quadro 2.1 – Parâmetros para perfis de velocidade média do vento.

Fonte: Elaborado pela autora, baseado na ABNT(1988)NBR6123.

Onde a ABNT (1988) NBR 6123 classifica as rugosidade de teren em cinco categorias, conforme a quadro 2.

Categoria	Descrição do ambiente
I	Mar calmo, lagos, rios, pântanos.
II	Campos de aviação, fazendas.
III	Casas de campo, fazendas com muros, subúrbios, com altura média dos obstáculos de 3,0m.
IV	Cidades pequenas, subúrbios densamente construídos, áreas industriais desenvolvidas, com muros, subúrbios, com altura média dos obstáculos de 10,0m.
V	Florestas com árvores altas, centros de grandes cidades, com altura média igual ou superior a 25,0m.

Quadro 2.2 – Classificação de terrenos.

Fonte: ABNT (1988) NBR 6123.

2.2 FORÇAS DO VENTO EM EDIFÍCIOS ALTOS

A ação do vento em edifícios altos é determinada a partir de coeficientes aerodinâmicos, os quais são análogos à construção isolada. Entretanto edificações vizinhas podem causar alterações na forma como o ar incide na fachada da edificação, por conta do comportamento do fluxo do vento na camada limite atmosférico em torno de um edifício alto, o que por sua vez pode resultar na

alteração do comportamento das reações estruturais, como força e momentos torçores (CARPEGGIANI, 2004; HOLMES, 2004, p. 194).

2.2.1 Terminologias

De acordo com a ABNT (1988) NBR 6123 a face Barlavento do edifício é a região onde ocorre a incidência de vento na edificação, sendo esta a área de sobrepressão, onde a pressão efetiva é superior à atmosférica, já a face sotavento é a região oposta à incidência de vento, onde a pressão efetiva é de sucção, pois é inferior a pressão atmosférica.

2.2.2 Efeito da vizinhança

De acordo com Carpeggiani (2004) o efeito da vizinhança pode causar o aumento das forças do vento de três modos pelo efeito de Venturi, a deflexão do vento na direção vertical e pela turbulência da esteira. O efeito de Venturi ocorre quando as construções estão dispostas de tal forma que acabam por causar o afunilamento do vento, conforme se observa na figura 2.4, o que resulta no aceleração do escoamento do ar e consequentemente altera as pressões.

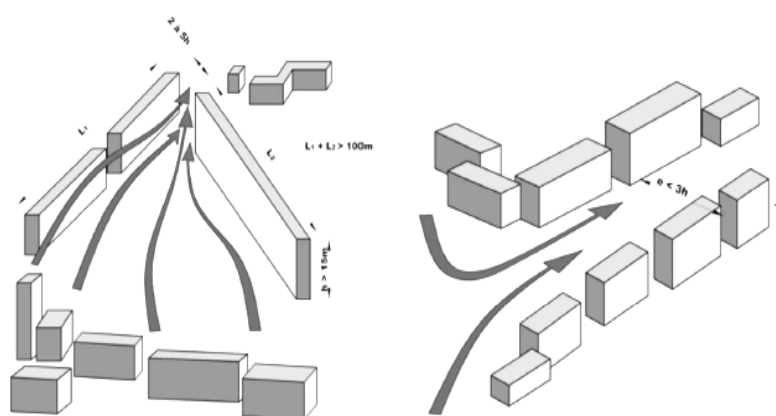


Figura 2.4 – Efeito Venturi.

Fonte: CARPEGGIANI, 2004.

A deflexão vertical ocorre na face de barlavento, onde ocorre à descendência do fluxo abaixo do ponto de estagnação, a uma cota de 70 a 80% da altura total do edifício, pode ser observada na figura 2.5. Esse comportamento descendente do fluxo é responsável pela causa de problemas na base, devido à incidência de alta velocidade do vento, nos níveis superiores, já a face sotavento é uma área de pressão negativa onde as pressões médias são de menor magnitude e possui baixo nível de pressões flutuantes (HOLMES, 2004, p. 194).

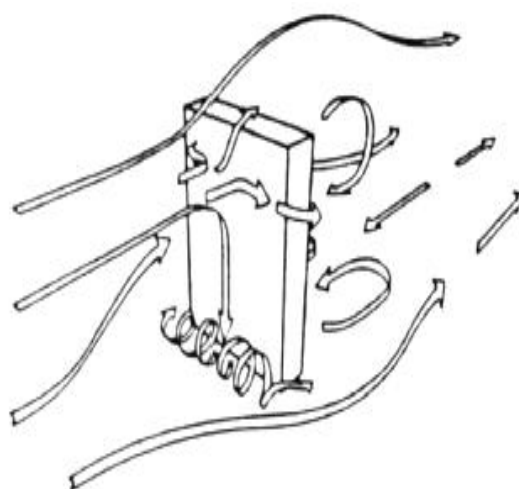


Figura 2.5 – Deflexão vertical.

Fonte: CARPEGIANI, 2004.

Quando o vento incide em uma construção e a barlavento e existe uma edificação a sotavento, ocorre a turbulência de esteira, pois conforme ilustrado na figura 2.6 tal configuração pode alterar a direção do vento no espaço existente entre as duas edificações. Esse comportamento do vento pode causar efeitos dinâmicos e alterações consideráveis na pressão externa (GONÇALVES et al., 2004).

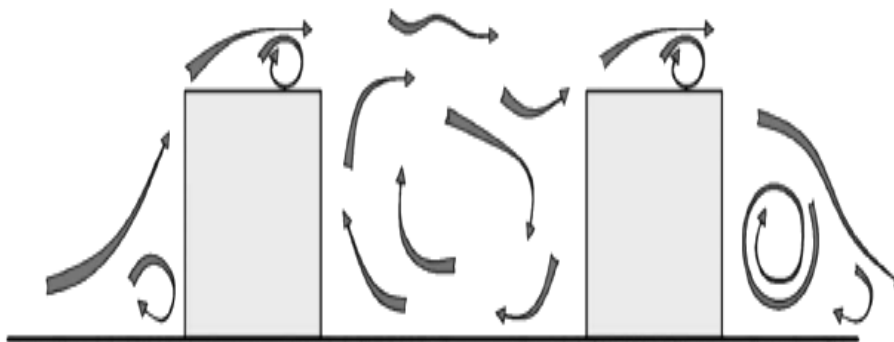


Figura 2.6 – Turbulência de esteira.

Fonte: CARPEGGIANI, 2004.

2.2.3 Fatores de forma

Os coeficientes de pressão são definidos em função de uma velocidade média do vento no topo do edifício, denotada por \bar{U} . Portanto, os coeficientes médios de flutuação, desvio padrão e o valor máximo de pressão são definidos de acordo com as equações (2.6), (2.7) e (2.8), respectivamente.

2.2.3.1 O coeficiente de pressão média

Esse coeficiente é determinado para uma superfície da construção e permitem definir as pressões sobre essa superfície. Segundo Holmes (2004) e Carpeggiani (2004), o coeficiente de pressão médio pode ser definido pela equação 2.6.

$$\bar{C}_p = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (\text{Equação 2.6})$$

Onde:

q é a pressão dinâmica [Pa];

\bar{C}_p é o coeficiente de pressão;

$p(t)$ é a pressão instantânea, na superfície da edificação, em relação à pressão estática de referência [Pa];

t é o tempo [s];

T é o intervalo de tempo da amostragem[s];

2.2.3.2 Coeficiente de pressão rms

O coeficiente de pressão rms (root mean square) obtido através da equação 2.7 é uma medida estatística da magnitude da variação de pressão.

$$C_p = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (p(t) - \bar{p})^2 dt}}{q} \quad (\text{Equação 2.7})$$

Onde:

$p(t)$ a pressão instantânea, na superfície da edificação, medida em relação à pressão estática de referencia [Pa];

\bar{p} o valor médio de pressão instantânea para um período de amostragem [Pa].

Para pontos onde ocorra a estagnação do escoamento adota-se o coeficiente de pressão exterior igual a 1,0 e para os pontos onde a velocidade do escoamento é superior a \bar{U} o coeficiente de pressão recebe valores negativos (HOLMES, 2004, p. 194).

2.2.3.3 Coeficientes de pressão máximo e mínimo.

Os coeficientes de pressão máxima e mínimo são dados pelas equações 2.8 e 2.9, respectivamente.

$$C_p = \frac{p_{\max}}{q} \quad (\text{Equação 2.8})$$

$$\check{C}_p = \frac{p_{\min}}{q} \quad (\text{Equação 2.9})$$

Onde:

p_{\min} o valor máximo de $p(t)$ em um período de amostragem T ;

p_{\max} o valor mínimo de $p(t)$ em um período de amostragem T ;

C_p o coeficiente de pressão máxima;

\check{C}_p o coeficiente de pressão mínimo;

q é a pressão dinâmica [Pa].

2.2.3.4 Resultante das pressões

Para obter a pressão total nessa superfície é necessário considerar também o coeficiente de pressão interior. A força total atuante sobre a área da fachada de um edifício é dada pela diferença das pressões atuantes em cada uma das superfícies como apresentado na equação 2.10.

$$F = \int_A \bar{C}_p q dA = (C_{pe} - C_{pi}) \cdot A \cdot q \quad (\text{Equação 2.10})$$

Onde:

C_{pi} é o coeficiente de pressão interna;

C_{pe} é o coeficiente de pressão externa;

A é a área de incidência de vento[m²];

F é a resultante das pressões atuante perpendicularmente sobre a superfície [N].

2.2.3.5 Coeficiente de força

O coeficiente de força pode ser expresso pela equação 2.11.

$$C_F = \frac{F}{q \cdot A} \quad (\text{Equação 2.11})$$

Onde:

F a resultante das pressões atuante perpendicularmente sobre a superfície [N];

q é a pressão dinâmica [Pa];

A é a área de incidência de vento [m²];

C_F é o coeficiente de força.

2.2.4 Força global

A força global do vento é a soma vetorial de todas as forças que atuam na edificação, esta força pode ser decomposta em várias direções conforme ilustrado na figura 2.7, onde a força global é decomposta em força de arrasto, força de sustentação, força horizontal e uma força de direção genérica, sendo que o sentido destas será de acordo com as condições e hipóteses a serem efetuadas para o cálculo da estrutura (Gonçalves, 2004, p. 74).

A força de arrasto é a componente da força global na direção do vento. Esta força permite ao calculista determinar ações com características globais. A força de arrasto é normalmente utilizada para a determinação da ação do vento em edifícios de andares múltiplos, torres, estruturas isoladas (GONÇALVES, 2004. p. 75).

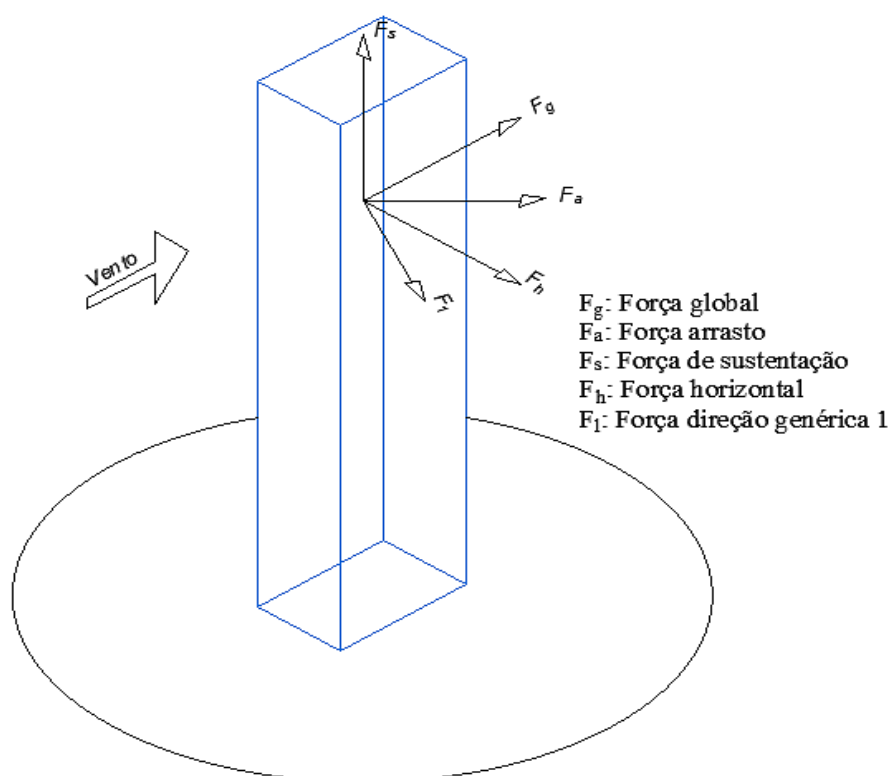


Figura 2.7 – Força Global e algumas das direções possíveis de decomposição desta força

Fonte: adaptado de GONÇALVES, 2004, p. 75.

2.2.4.1 Coeficiente de forças globais

Para determinação dos coeficientes de força global, dispõem-se da força de arrasto, a qual ao incidir na fachada pode ser decomposta nos eixos x e y, conforme figura 2.8.

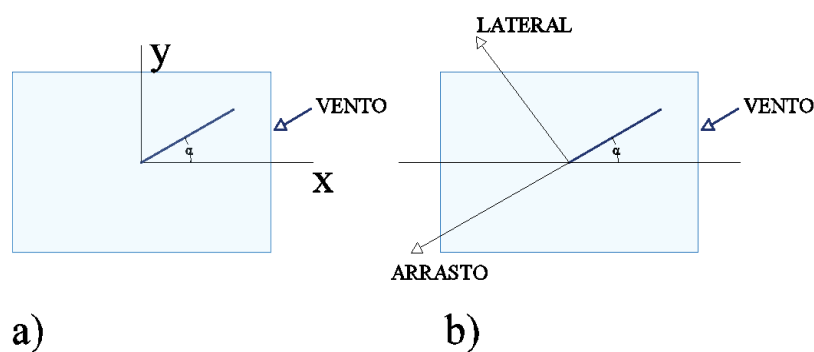


Figura 2.8 – Critérios para decomposição da força horizontal devido ao vento

Fonte: AUTORA

$$C_x = \frac{F_x}{q \cdot B_x H} \quad (\text{Equação 2.12})$$

$$C_y = \frac{F_y}{q \cdot B_y H} \quad (\text{Equação 2.13})$$

Onde:

F_x é a força total na base da edificação, (incidência do vento para a direção x);

F_y é a força total na base da edificação, (incidência do vento para a direção y);

B_x e B_y são as dimensões nominais da seção transversal do prédio;

H é a altura de referencia.

2.2.4.2 Coeficiente de torção

O coeficiente de torção é definido pela equação 2.14.

$$C_t = \frac{M_t}{q B_x B_y H} \quad (\text{Equação 2.14})$$

Onde:

M_t é o momento torçor com relação ao ponto de origem dos eixos x e y;

2.2.5 Excentricidade

Reduzindo os esforços horizontais F_x e F_y nas direções x e y, causados pela pressão pelo vento, e aplicando as excentricidades e_a e e_b ao centro de torção obtém-se a torção, conforme ilustrado na figura 2.9.

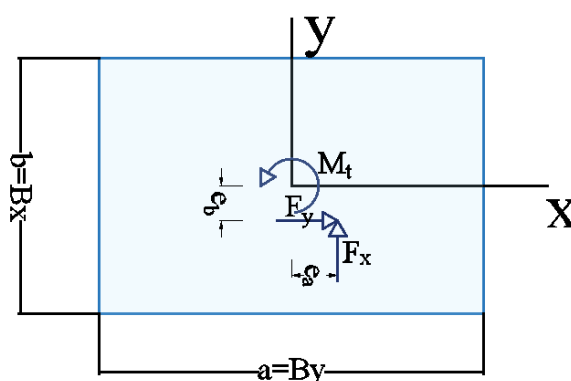


Figura 2.9 – Eixo de coordenadas, excentricidades e esforços.

Fonte: CARPEGGIANI, 2004.

Portanto a excentricidade na direção y é dada pela equação 2.15.

$$e_a = \frac{M_t}{F_y} = \frac{C_t B_y}{C_y} \quad (\text{Equação 2.15})$$

Onde:

F_y é a força total na base da edificação, (incidência do vento na direção y);

e_a é a excentricidade normalizado.

Considerando $a = B_y$ e $b = B_x$ obtém-se:

$\frac{e_a}{a}$ é o coeficiente de excentricidade normalizado na direção x;

$\frac{e_b}{b}$ é analogamente o coeficiente de excentricidade normalizado na direção y .

2.2.5.1 Determinação da excentricidade segundo a ABNT(1988)NBR6123

No Brasil ação do vento nas estruturas é abordada através da ABNT (1988) NBR 6123, onde o dimensionamento é executado através de coeficientes para o cálculo das ações estáticas do vento em uma edificação. A referida norma segundo Dewes (2016) foi desenvolvida a partir de estudos realizados no Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

A norma brasileira de forças devidas ao vento apresenta uma metodologia para estimativas das forças em edificações paralelepipedicas. De acordo com o item 6.6 da norma de vento brasileira os esforços de torção são calculados considerando estas forças agindo, respectivamente, com as seguintes excentricidades, em relação ao eixo vertical geométrico (figura 2.9):

Edificações sem efeitos de vizinhança: $e_a = 0,075 a$ e $e_b = 0,075 b$;

Edificações com efeitos de vizinhança: $e_a = 0,15 a$ e $e_b = 0,15 b$.

2.2.5.2 Carini

No ano de 2017 Carini ao estudar a torção em edifícios altos propôs um método para a estimativa do momento torçor médio estático. Ao analisar os resultados o autor concluiu que o ângulo de incidência do vento responsável pelo maior momento torçor médio não é o ângulo onde as forças médias no eixo x e y são máximas, mas sim quando o vento incide com um ângulo pequeno e a força na maior fachada (eixo x) é máxima.

Nesse método as forças em x e y são calculadas de acordo com a ABNT (1988) NBR6123, a excentricidade é determinada pela equação 2.16, para edificações sem efeito da vizinhança, e 2.17, para edificações com efeito de vizinhança, as quais são baseadas nos dados experimentais ajustadas à função de uma parábola (figura 2.10) essas equações possuem uma confiabilidade de 95% e são ajustadas á um envoltório parabólico e consideram como parâmetros de maior

importância a forma da seção em planta baixa do edifício, com uma excentricidade constante levando em consideração a fachada de maior profundidade.

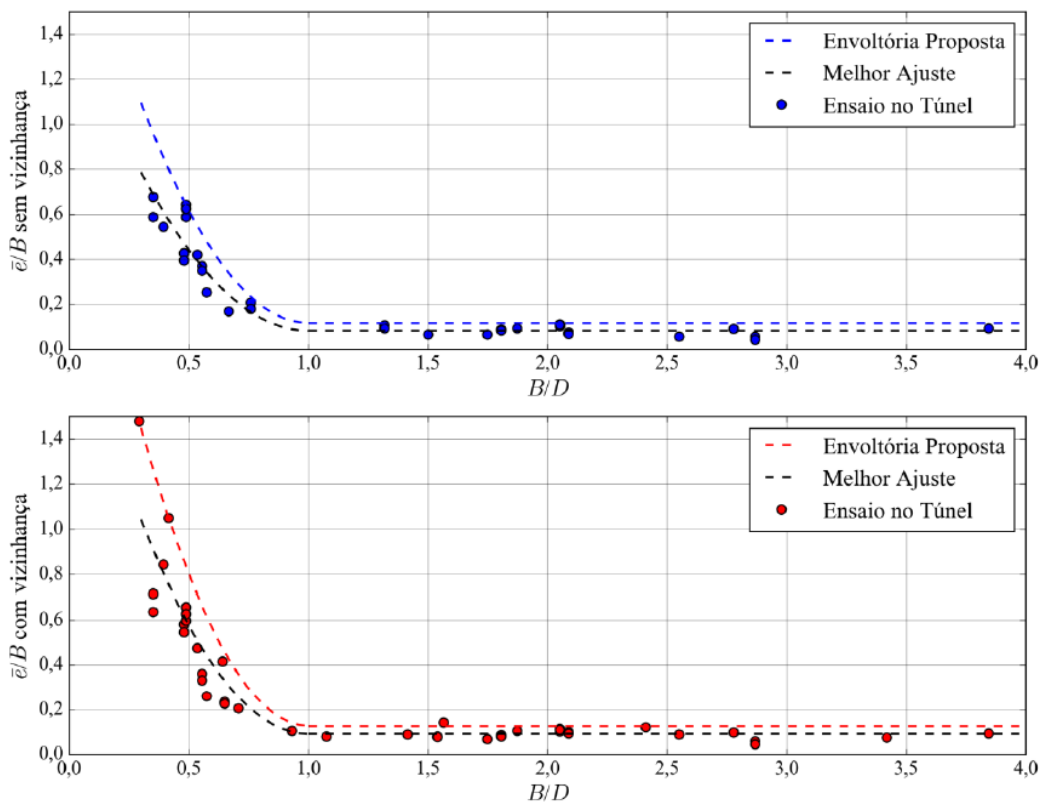


Figura 2.10 – Curvas propostas para excentricidades normalizadas com e sem vizinhança.

Fonte: CARINI, 2017.

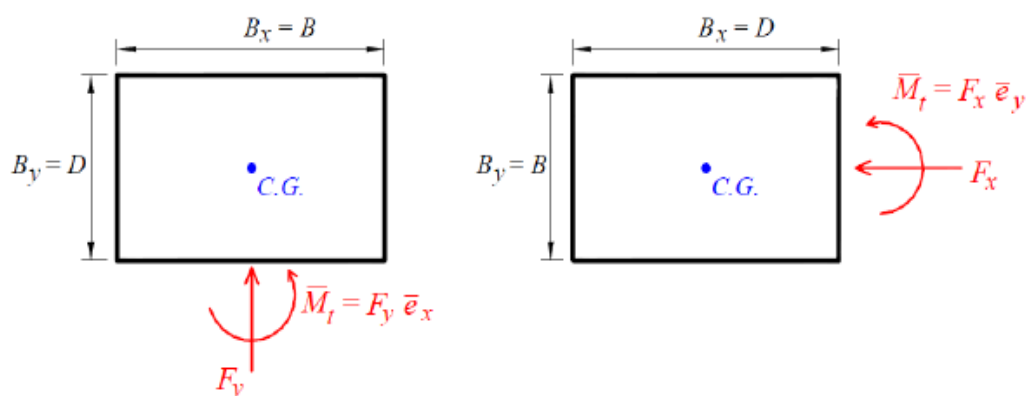


Figura 2.11 – Dimensões de referencia.

Fonte: CARINI, 2017.

$$\bar{e} = \begin{cases} \frac{2B^3}{D^2} - \frac{4B^3}{D} + 2,116B & \text{para } 0,3 \leq B < D \\ 0,116B & \text{para } D \leq B < 4D \end{cases} \quad (\text{Equação 2.16})$$

$$\bar{e} = \begin{cases} \frac{2,7B^3}{D^2} - \frac{5,4B^3}{D} + 2,827B & \text{para } 0,3 \leq B < D \\ 0,127B & \text{para } D \leq B < 4D \end{cases} \quad (\text{Equação 2.17})$$

Onde:

B é a largura conforme a figura 2.11;

D é a profundidade conforme a figura 2.11.

As equações 2.18 e 2.19 representam as curvas ajustadas aos dados experimentais. Onde a equação 2.18 representa a curva para a situação sem efeito da vizinhança e a equação 2.19 representa a curva para a situação com o efeito da vizinhança, onde ambas as equações são ajustadas pelo método dos mínimos quadrados.

$$\bar{e} = \begin{cases} \frac{1,44B^3}{D^2} - \frac{2,88B^3}{D} + 1,521B & \text{para } 0,3 \leq B < D \\ 0,081B & \text{para } D \leq B < 4D \end{cases} \quad (\text{Equação 2.18})$$

$$\bar{e} = \begin{cases} \frac{1,94B^3}{D^2} - \frac{3,88B^3}{D} + 2,031B & \text{para } 0,3 \leq B < D \\ 0,091B & \text{para } D \leq B < 4D \end{cases} \quad (\text{Equação 2.19})$$

2.2.5.3 Excentricidade Normalizada

A excentricidade normalizada é um método de comparação de resultados obtidos experimentalmente com os obtidos através das recomendações da norma brasileira de vento, sendo utilizada por Carpeggini em 2004. Para a aplicação desse método utiliza-se o coeficiente de torção médio para os ângulos de incidência do vento na fachada dentro do túnel de vento, selecionando o maior valor absoluto e comparando com o maior valor sugerido pela ABNT (1988) NBR 6123. Essa comparação é possibilitada pelas equações 2.20 e 2.21.

$$\frac{\hat{e}_x}{B_x} = \frac{M_t^{túnel}}{F_y^{NBR} B_x} \quad (\text{Equação 2.20})$$

$$\frac{\hat{e}_y}{B_y} = \frac{M_t^{túnel}}{F_x^{NBR} B_y} \quad (\text{Equação 2.21})$$

Onde:

$M_t^{túnel}$ é o máximo torçor médio obtido no túnel de vento;

F_x^{NBR} é a força em x calculada pela metodologia da NBR 6123;

F_y^{NBR} é a força em y calculada pela metodologia da NBR 6123.

2.2.6 Momento torçor pela norma

Para o cálculo do momento torçor médio utiliza-se as recomendações da ABNT (1988) NBR6123, onde os esforços de torção são estimados pela força de arrasto e uma das excentricidades conforme representado na equação 2.22.

$$\overline{M}_t = F_a e_a \quad (\text{Equação 2.22})$$

Onde:

\overline{M}_t é o momento torçor médio;

F_a é força de arrasto;

e_a é a excentricidade de torção.

2.3 TÚNEL DE VENTO

O túnel de vento é um equipamento utilizado em pesquisas com relação aos efeitos do ar sobre ou em torno de objetos sólidos. Onde, segundo Green e Quest (2011), o primeiro túnel de vento construído relatado na literatura foi construído por Wenham em 1871 na Inglaterra, o aparato que foi construído pela Aeronautical Society of Great Britain, era feito de um tronco de madeira com 12 pés de comprimento, 18 polegadas de área e era acionado por uma máquina a vapor para impulsionar o ar na entrada.

No entanto, de acordo com Holmes (2004), apenas após a Segunda Guerra Mundial, com o aumento da quantidade de edifícios altos construídos, que o túnel de vento de camada limite começou a ser desenvolvido, o qual com o passar dos anos continua a ser a ferramenta mais importante para o estabelecimento de cargas de vento de projeto em grandes construções em muitos países.

2.3.1 Ensaio no túnel de vento

O túnel de vento Professor Joaquim Blessmann (figura 2.12) é um dos poucos túneis de vento de camada limite construídos no Brasil, ele está localizado

no Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC) na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e opera desde 1977.



Figura 2.12 – Túnel de vento Professor Joaquim Blessmann.

Fonte: UFRGS, 2018.

O circuito aerodinâmico representado na figura 2.13 é um túnel de retorno fechado, sendo o vento gerado por um ventilador com potência de 75 kW. A câmara principal de ensaios possui relação comprimento/altura de 10,3, dimensões 1,30 x 0,90 x 9,32 m (largura, altura e comprimento, respectivamente) e a velocidade máxima atingida pelo escoamento de ar nesta câmara é de 150 km/h. O circuito é composto por quatro mesas giratórias, para ensaios estáticos e dinâmicos (BLESSMANN, 2011).

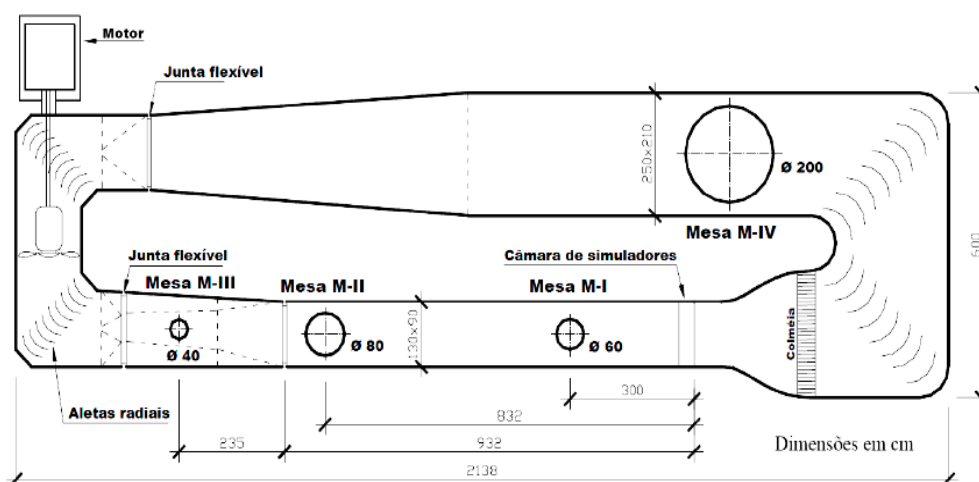


Figura 2.13 – Circuito aerodinâmico do túnel de vento Professor Joaquim Blessmann.

Fonte: BLESSMANN, 2011.

No ensaio do túnel a velocidade do vento é monitorada através da medida diferencial de pressão estática (Δpa), através de anéis piezométricos. Logo, se utiliza o coeficiente k_0 com o intuito de vincular o diferencial de pressão estática com a pressão dinâmica de referência (CARINI, 2017). Portanto a pressão dinâmica no topo do modelo é dada pela equação 2.23:

$$q_m^{túnel} = k_0 \Delta pa \quad (\text{Equação 2.23})$$

Onde:

$q_m^{túnel}$ é a pressão dinâmica no túnel do vento [Pa];

k_0 é o coeficiente que vincula q_m ;

Δpa é a diferença de pressão estática [Pa].

A velocidade média no túnel é dada pela equação 2.24.

$$U_m^{túnel} = k_b \sqrt{\frac{2q_m^{túnel}}{\rho_{ar}}} \quad (\text{Equação 2.24})$$

Onde:

$U_m^{túnel}$ é a velocidade média no túnel [m/s];

k_b é o fator de bloqueio;

ρ_{ar} é a massa específica do ar [kg/m³].

Para ensaios no túnel de vento a massa específica do ar deve ser calculada pela equação 2.25.

$$\rho_{ar} = \frac{1}{\Theta} \left(\frac{P_{atm}}{R_0} - \phi P_w \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_w} \right) \right) \quad (\text{Equação 2.25})$$

Onde:

Θ é a temperatura [K];

R_0 vale 287,5 J/kgK (constante dos gases para o ar seco);

ϕ é a umidade relativa do ar;

$$P_w = 0,0000205e^{0,0631846T} ;$$

P_{atm} é a pressão atmosférica [Pa];

R_w vale 461,5 J/kgK (constante dos gases para o vapor d'água).

2.3.2 Edifício CAARC Standard Tall Building

O CAARC Standard Tall Building (figura 2.14) é um modelo padrão de edifício alto utilizado para a comparação de ensaios de simulação do vento natural em túneis de vento, o qual representa uma edificação hipotética, desenvolvido em 1969 pela Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council (CAARC), Com o objetivo de estabelecer uma forma de comparar as diferentes técnicas de ensaios que estavam sendo utilizadas em vários túneis de vento até então no mundo.

O prédio padrão possui o formato de um prisma retangular de 182,88 x 30,48 x 45,72 m considerando em escala real, conforme representado na figura 2.14, o topo do edifício é horizontal, suas fachadas são planas e sem parapeitos, possui massa específica de 160kg/m³, amortecimento de 1% e frequência natural, de 0,10Hz (Melbourne, 1980).

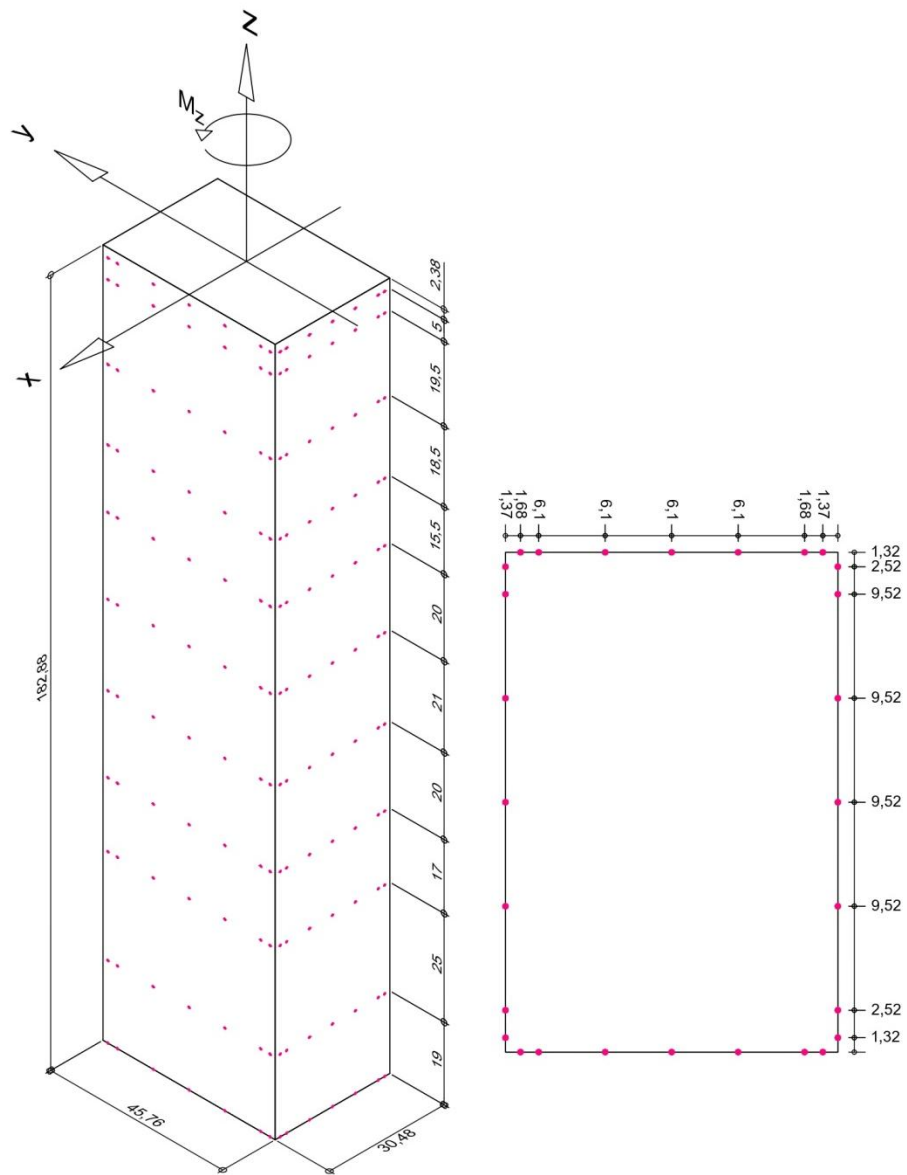


Figura 2.14– Edifício CAARC Standart Tall Building (m).

Fonte: AUTORA.

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa aborda modelos teóricos e experimentais através de metodologias analíticas teóricas e experimentais. Este estudo utiliza duas categorias de terreno indicadas pela ABNT (1988) NBR6123, a primeira categoria de terreno analisada é a composta campos abertos sendo classificado como Categoria I, onde o expoente p de rugosidade do perfil de velocidade média do vento vale 0,11 o segundo tipo de terreno analisado se enquadra em uma categoria de terreno intermediária do tipo II-III da norma de vento brasileira, a qual possui expoente p de rugosidade do perfil de velocidade média do vento de 0,23.

O edifício utilizado para o estudo é o edifício modelo da Commonwealth Advisory Aeronautical Council (CAARC), o qual é caracterizado no item 2.3.2 do presente trabalho, em escala reduzida de 1:406 para uso no túnel de vento Professor Joaquim Blessmann. Os dados experimentais utilizados para a análise são dados não publicados fornecidos por Silva (no prelo), os quais foram obtidos em ensaios no túnel de vento Professor Joaquim Blessmann, onde o tipo de escoamento de ar simulado é o de camada limite.

O CAARC utiliza 282 transdutores de pressão *Honeywell* para a aquisição de dados experimentais, os quais são distribuídos igualmente em todas as fachadas, conforme ilustrado na figura 2.14 sendo dois destes transdutores localizados no topo do prédio e um conjunto de computadores para o processamento dos dados, onde os transdutores possuem uma precisão de 2%. Os dados foram analisados para o vento incidindo na face 0° do edifício estudado, a qual corresponde à maior fachada do prédio. Na figura 3.2 o centro geométrico do edifício CAARC em planta é representado em planta pelo ponto da letra A.

Para a simulação da vizinhança é utilizado apenas um edifício mudo, com mesmas dimensões do modelo de prédio principal, porém sem medidores de pressão. A incidência do vento no edifício mudo ocorre nos ângulos 0° e 90° com o intuito de simular os desvios de fluxo sofridos pelo ar para a análise das excentricidades de torção geradas pela vizinhança, conforme ilustrado na figura 3.1.

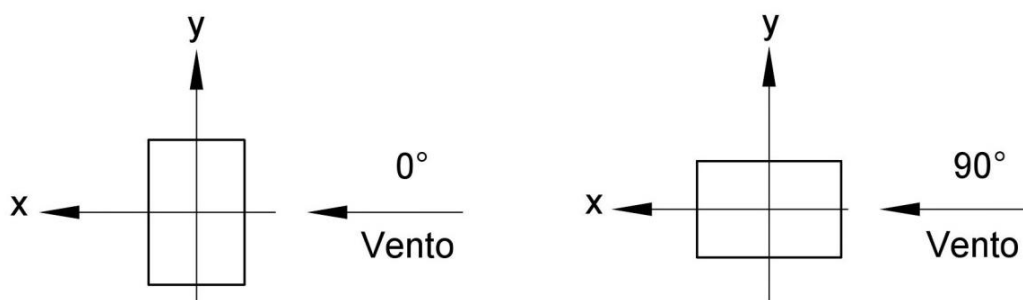


Figura 3.1 – Orientações estudadas.

Fonte: AUTORA.

Na análise dos dados experimentais, os parâmetros normativos da ABNT (1988) NBR 6123 relativo ao diâmetro (afastamento) de influência dos prédios vizinhos na torção, abordado pelo item 6.6 da norma brasileira de vento, serão comparados com dois diâmetros de influência de vizinhança, sendo o primeiro diâmetro D_1 igual a 182,88m e o D_2 igual a 304,80m, onde o centro geométrico da seção em planta do edifício muda, no primeiro afastamento, posicionado no ponto B e em seguida para estudo do segundo afastamento o edifício vizinho é movido para o ponto C, conforme representado na figura 3.2, onde a malha representada na mesma figura apresenta como medida base o comprimento da menor fachada em planta do edifício CAARC.

Os respectivos cálculos dos dados experimentais são executados através do MATLAB. Os coeficientes de forma e as excentricidades calculadas a partir do procedimento experimental são comparados com os métodos utilizados por Carini e os critérios da ABNT (1988) NBR 6123 através do método comparativo de Carpeggini. Sendo os resultados obtidos pela metodologia de Carini, Carpeggini e através das recomendações da referida norma computada através de planilhas no Excel.

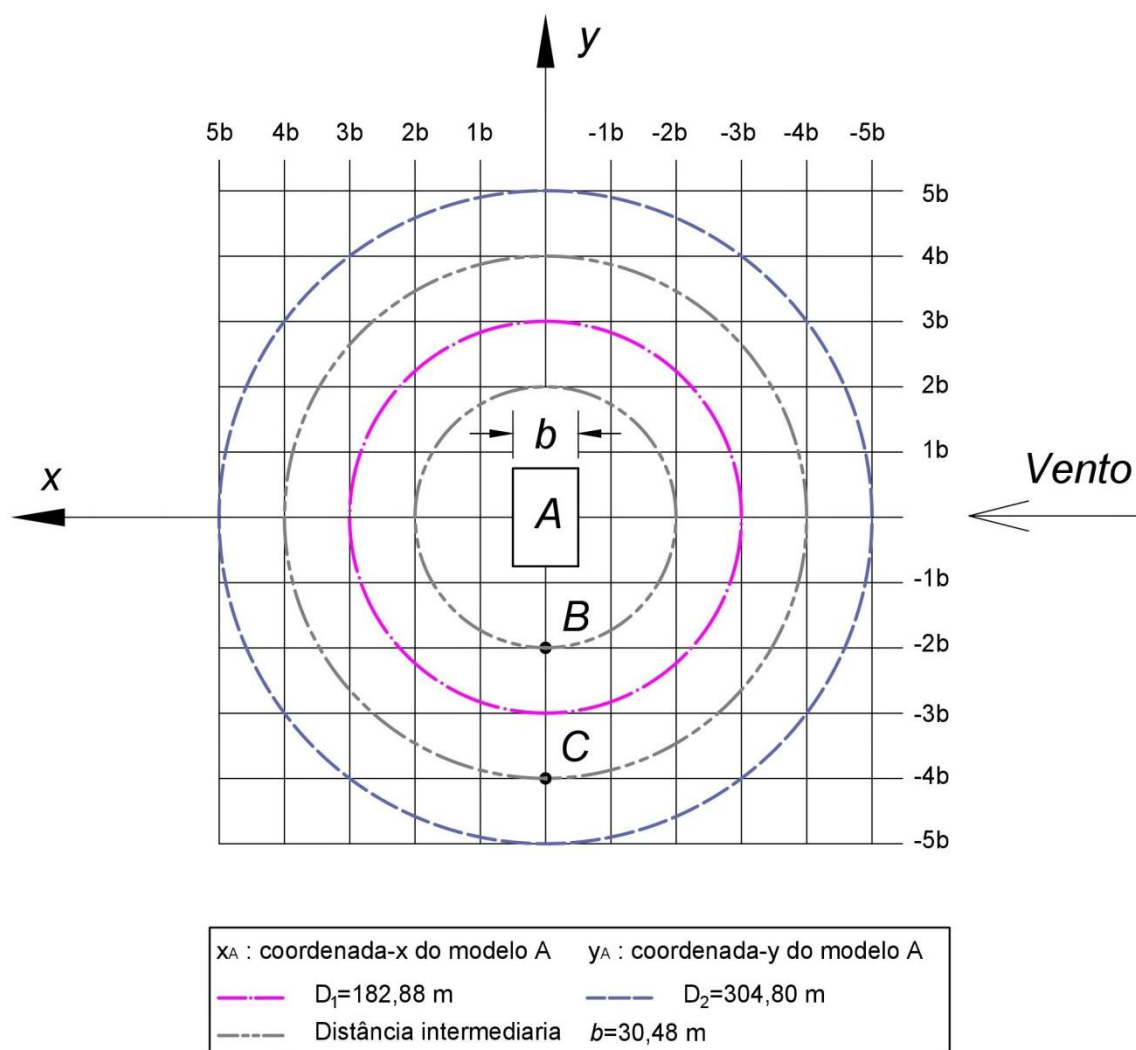


Figura 3.2 – Configuração de vizinhança.

Fonte: AUTORA.

4 RESULTADOS

Neste capítulo será apresentada uma análise comparativa das excentricidades e coeficiente de torção obtido para a ação do vento no edifício CAARC através dos métodos proposto por Carini em 2017, das excentricidades normatizadas utilizadas por Carpeggiane em 2014, as recomendações da ABNT (1988) NBR 6123 e o método experimental, o qual conta com dados de ensaios não publicados, executados no Túnel de vento Professor Joaquim Blessmann por Silva, no prelo.

4.1 ABNT (1988) NBR 6123

No quadro 4.1 estão dispostos os valores dos coeficientes de torção obtido através das recomendações da ABNT (1988) NBR6123. Neste quadro a alteração do afastamento determina se o efeito da vizinhança é considerado ou não na situação estudada, sendo D_1 o caso com vizinhança e D_2 o caso sem vizinhança.

p	Diâm.	C_p	C_a	q	V_k (m/s)	V_0 (m/s)	S1	S2	S3	Mt (N.m)	C_t	e/a
0,11	D1	1,20	1,5	823	36,65	26,70	1,00	1,37	1,00	1497456	0,007	15,0%
	D2									748728	0,004	7,5%
0,23	D1	1,20	1,5	551	29,98	23,00	1,00	1,30	1,00	1001747	0,007	15,0%
	D2									500874	0,004	7,5%

Quadro 4.1 – Coeficientes de torção calculado pela ABNT (1988) NBR 6123.

Fonte: AUTORA.

4.2 EXPERIMENTAL

Para a análise experimental o edifício CAARC permanece em todos os casos analisados na mesma posição com o vento incidindo na face 0° enquanto que o edifício inerte que simula a vizinhança primeiramente é alocado a uma distância D_1

com o vento incidindo da face 0° em seguida ainda no mesmo afastamento o edifício mudo passa á receber a incidência de vento na face 90° . Alterando o afastamento para D_2 é repetida a mudança de orientação do edifício inerte, com vento incidindo inicialmente na face 0° e em seguida na face 90° , essas configurações de vizinhança se repetem para as duas rugosidades de terreno simuladas (figura 3.2).

4.2.1 Coeficientes

No quadro 4.2 onde estão dispostos os coeficientes de torção. Neste quadro percebe-se que o aumento do afastamento e a modificação da rugosidade do terreno causam uma alteração pequena no coeficiente de torção se comparado quando o edifício mudo é posicionado no afastamento D_1 tem sua orientação alterada de 0° para 90° , o que não ocorre para o afastamento D_2 . Pois a vizinhança muda para a orientação 90° no afastamento D_1 o coeficiente de torção apresenta uma redução maior que 60%, enquanto que para o afastamento D_2 a redução é menor que 50%. Esta diferença se deve ao efeito da vizinhança, pois a configuração adotada simula o efeito de Venturi.

Portanto ao alterar de orientação do edifício mudo de 0° para 90° gerando um alívio de pressão na região como um todo. Quando a distância entre os edifícios é aumentada a influência da alteração do ângulo do edifício vizinho é reduzida, pois o fluxo do ar que percorre o trecho é alterado.

p	Diâmetros	Ângulo	C_t	M_t (N.m)
0,11	D1	0°	0,0162	1456279
		90°	0,0069	605282
	D2	0°	0,0059	536837
		90°	0,0038	350096
0,23	D1	0°	0,0121	1178042
		90°	0,0013	121793
	D2	0°	0,0014	133799
		90°	0,0011	107296

Quadro 4.2 – Coeficientes de força e de torção experimentais.

Fonte: AUTORA.

4.2.2 Excentricidades obtidas

No quadro 4.3, observa-se que mesmo quando utilizado o afastamento D_1 na maioria dos casos estudados as excentricidades sugeridas pela norma de vento brasileira não são ultrapassadas, quando o edifício vizinho está na posição 0° o afastamento D_2 atende os valores sugeridos pela norma, para o afastamento D_2 a vizinhança alocada na posição 0° para a categoria I de terreno as excentricidades encontradas estão dentro do valor mínimo de 7,5% sugerido pela norma de vento brasileira para o caso sem vizinhança, já quando a vizinhança é alocada na posição 90° as excentricidades alcançam á valores elevados chegando até 11,30%.

p	Diâmetros	Ângulo	e_a/a	e_b/b
0,11	D_1	0°	3,43%	1,22%
		90°	2,51%	0,45%
	D_2	0°	6,33%	0,43%
		90°	11,30%	0,25%
0,23	D_1	0°	4,50%	1,04%
		90°	0,71%	0,12%
	D_2	0°	1,21%	0,10%
		90°	2,98%	0,09%

Quadro 4.3 – Excentricidade experimentais.

Fonte: AUTORA.

4.3 CARINI

As equações para análise das excentricidades utilizadas neste item são uma proposta de método estático, a qual de acordo com Carini no caso do item 4.3.1 possui uma confiabilidade de 95% e é ajustada á um envoltório parabólico (equação 2.16 e equação 2.17), no caso do item 4.3.2 as equações 2.18 e 2.19, utilizadas, possuem o ajuste em forma de uma parábola através de método de mínimos quadrados. Essa metodologia considera apenas casos com vizinhança e sem vizinhança, sem sugestão de novos diâmetros de influência da vizinhança, portanto nessa metodologia considerou-se o limite de afastamento sugerido pela ABNT (1988) NBR 6123, para calcular as excentricidades e para calcular os coeficientes.

4.3.1 Envoltório proposto

No quadro 4.4 estão dispostas as excentricidades calculadas para o edifício CAARC, para a categoria I de terreno da ABNT (1988) NBR 6123, e os seus respectivos coeficientes de torção. Neste quadro é possível notar como o caso sem vizinhança, extrapola a excentricidades estipuladas pela referida norma para o caso com vizinhança, enquanto que no caso sem vizinhança a excentricidade encontrada é inferior à normatizada.

Categoria I			
Vizinhança	e_a/a	C_t	$M_t (N.m)$
<i>com vizinhança</i>	12,7%	0,0060	1267846
<i>sem vizinhança</i>	11,6%	0,0055	1158032

Quadro 4.4 – Excentricidades e coeficiente de torção 1.

Fonte: AUTORA.

No quadro 4.5 os resultados são calculados para para uma categoria II – III de terreno da norma brasileira de vento, neste quadro as excentricidade permanecem as mesmas porém o coeficiente de torção sofre um grande aumano por conta da alteração da rugoridade do terreno.

Categoria II - III			
Vizinhança	e_a/a	C_t	$M_t (N.m)$
<i>com vizinhança</i>	12,7%	2,4245	848146
<i>sem vizinhança</i>	11,6%	2,2145	774685

Quadro 4.5 – Excentricidades e coeficiente de torção 2.

Fonte: AUTORA.

4.3.2 Melhor ajuste

Ao aplicar a equação da curva ajustada, quando comparado com o item 4.3.1 nota-se no quadro 4.6 e quadro 4.7 a redução das excentricidades, bem como a redução de seus respectivos coeficientes de torção.

Categoria I			
Vizinhança	e_a/a	C_t	M_t (N.m)
com vizinhança	9,1%	0,0043	908457
sem vizinhança	8,1%	0,0039	808626

Quadro 4.6 – Excentricidades e coeficiente de torção 3.

Fonte: AUTORA.

Categoria II - III			
Vizinhança	e_a/a	C_t	M_t (N.m)
com vizinhança	9,1%	1,7372	607727
sem vizinhança	8,1%	1,5463	540944

Quadro 4.7– Excentricidades e coeficiente de torção 4.

Fonte: AUTORA.

4.4 EXCENTRICIDADE NORMALIZADA

No quadro 4.8 estão dispostas as excentricidades normalizadas de acordo com item 2.2.5.3 no presente quadro é possível notar que a excentricidade normalizada não sofre grandes alterações, sendo os valores obtidos próximos aos estipulados pela norma brasileira de vento. No quadro 4.8, onde $Carini^1$ é o envoltório proposto e $Carini^2$ é o melhor ajuste, percebe-se que os resultados obtidos no item 4.3.1 do presente trabalho são os que mais se aproximam dos resultados experimentais, mostrando-se ser o mais próximo da realidade encontrada no método experimental.

p	Diâmetro	Ângulo	Túnel/NBR6123		Carini1/NBR6123		Carini2/NBR6123	
			\hat{e}_x/b_x	\hat{e}_y/b_y	\hat{e}_x/b_x	\hat{e}_y/b_y	\hat{e}_x/b_x	\hat{e}_y/b_y
0,11	D1	0°	0,479%	0,319%	0,417%	0,278%	0,299%	0,199%
		90°	0,320%	0,213%	0,417%	0,278%	0,299%	0,199%
	D2	0°	0,199%	0,133%	0,381%	0,254%	0,266%	0,177%
		90°	0,115%	0,077%	0,381%	0,254%	0,266%	0,177%
0,23	D1	0°	0,579%	0,386%	0,417%	0,278%	0,299%	0,199%
		90°	0,066%	0,044%	0,417%	0,278%	0,299%	0,199%
	D2	0°	0,060%	0,040%	0,381%	0,254%	0,266%	0,177%
		90°	0,053%	0,035%	0,381%	0,254%	0,266%	0,177%

Quadro 4.8 – Excentricidade normalizada.

Fonte: AUTORA.

No quadro 4.9 estão dispostos os coeficientes de torção obtidos em cada um dos métodos estudados, no mesmo quadro percebe-se que os coeficientes de torção obtidos a partir das duas sugestões de Carini (2017) apresentam valores elevados quando aumentada a rugosidade do terreno, onde Carini¹ é o envoltório proposto e Carini² é o melhor ajuste.

p	Diâmetro	Ângulo	C_t			
			Túnel	Carini ¹	Carini ²	NBR6123
0,11	D ₁	0°	0,0162	0,0060	0,0043	0,0071
		90°	0,0059	0,0060	0,0043	0,0071
	D ₂	0°	0,0069	0,0055	0,0039	0,0036
		90°	0,0038	0,0055	0,0039	0,0036
0,23	D ₁	0°	0,0121	2,4245	1,7372	0,0071
		90°	0,0014	2,4245	1,7372	0,0071
	D ₂	0°	0,0013	2,2145	1,5463	0,0036
		90°	0,0011	2,2145	1,5463	0,0036

Quadro 4.9 – Coeficiente de torção.

Fonte: AUTORA.

4.5 DISCUSSÕES

Ao analisar os gráficos 4.1 e 4.2 observa-se que quando levado em conta a alteração da rugosidade do terreno, as recomendações da ABNT (1988) NBR 6123 não provoca alteração do coeficiente de torção, no entanto conforme pode ser observado no quadro 4.1 o aumento da rugosidade reduz o momento torçor. No quadro 4.9 nota-se na proposta de Carini para determinação da excentricidade, que a alteração da categoria do terreno causa alterações notáveis no coeficiente de torção devido aos parâmetros de cálculo da excentricidade, fato o qual pode ser observado nos gráficos 4.1, 4.2 e 4.3. Com relação aos dados do túnel de vento a alteração do escoamento de vento afetou tanto os valores obtidos para o coeficiente de torção (quadro 4.2) quanto os valores das excentricidades (quadro 4.3).

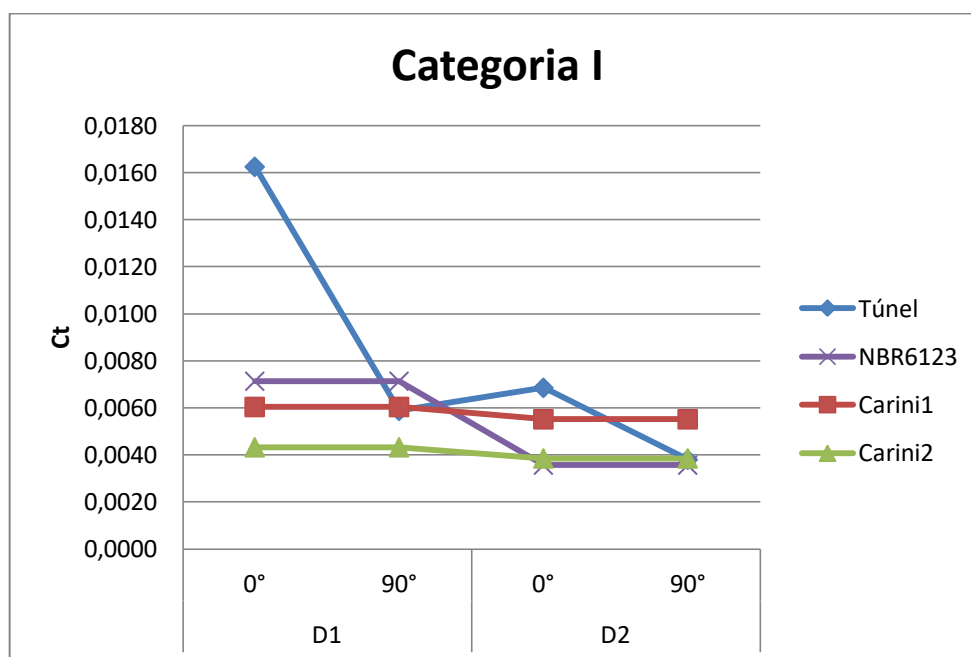


Gráfico 4.1– Coeficiente de torção para o terreno de Categoria I.

Fonte: AUTORA.

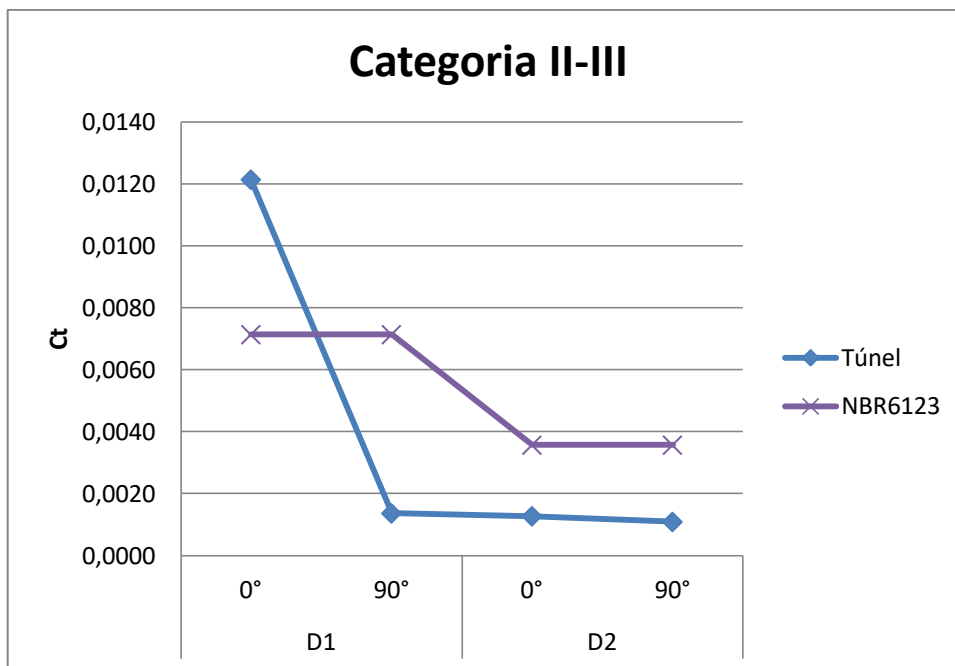


Gráfico 4.2 – Coeficiente de torção para o terreno de Categoria II-III, para o túnel de vento e para a ABNT (1988) NBR 6123.

Fonte: AUTORA.

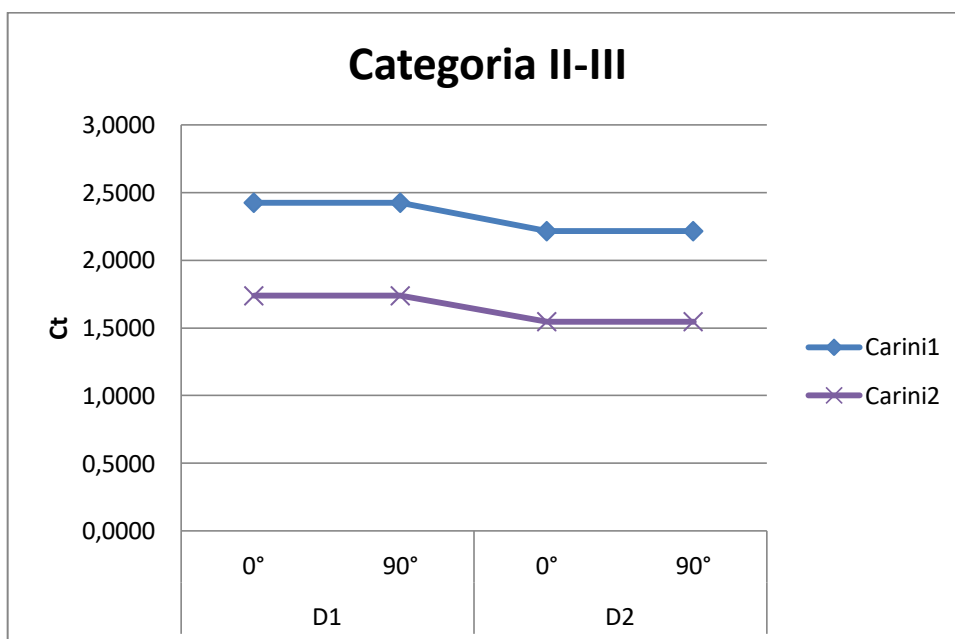


Gráfico 4.3 – Coeficiente de torção para o terreno de Categoria II-III, para Carini¹ e Carini².

Fonte: AUTORA.

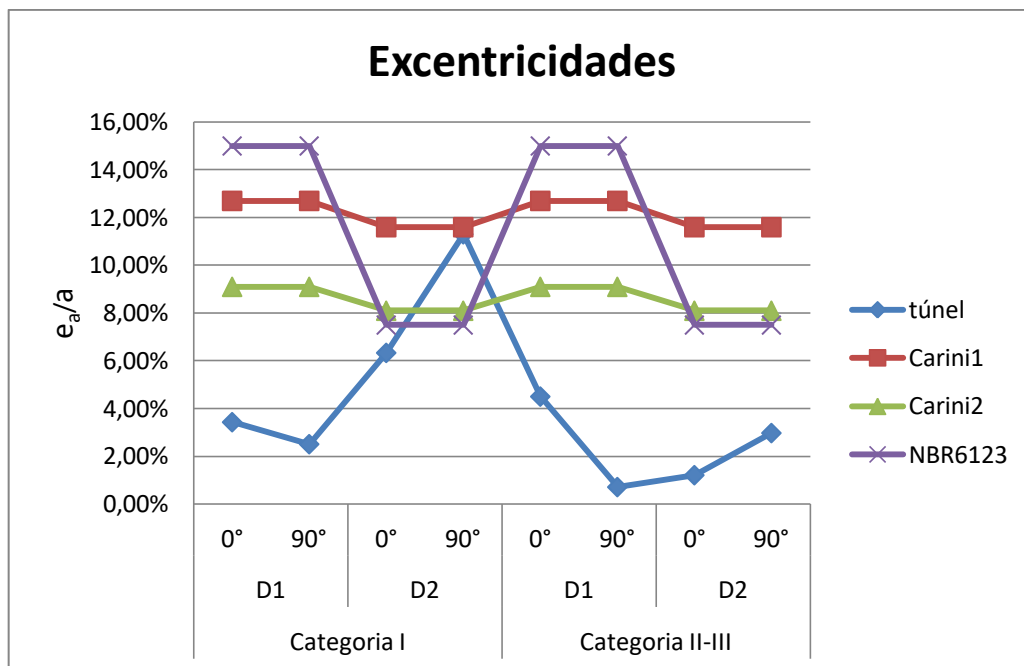


Gráfico 4.4 – Excentricidades.

Fonte: AUTORA.

Quando levado em conta o ângulo de incidência do vento no edifício vizinho, percebe-se que as metodologias analisadas não apresentam alterações no coeficiente de torção e na excentricidade com exceção do túnel de vento o qual apresenta variação nos valores das excentricidades e coeficientes de torção (gráficos 4.1, 4.2, 4.3 e 4.5).

Ao avaliar a alteração do afastamento do edifício vizinho de D_1 para D_2 no túnel percebe-se que o diâmetro limite estipulado pela ABNT (1988) NBR 6123 para considerar o efeito da vizinhança na torção na categoria de terreno I é inferior ao valor obtido em situação simulada em laboratório (gráfico 4.4). Problema similar a este foi constatado por Carini (2017), onde em sua dissertação de mestrado o autor constata que edifícios fora do diâmetro limite causavam o aumento da excentricidade torção, porém o trabalho não chega a estudar os efeitos de torção causados fora desse limite.

Vieira, Brito e Loredou-Souza (2018) chegam a estudar esse parâmetro, para um terreno de categoria II – III, com uma ampla quantidade de edifícios simulando a vizinhança, para quatro diâmetros de afastamentos, o primeiro diâmetro de 182,88m, o segundo de 274,32m, o terceiro de 362,76m e o quarto de 457,20m. Para todos os afastamentos os autores encontraram valores para as torções superiores ao da

norma de vento brasileiras, ao observar os dados da pesquisa nota-se que quanto maior o afastamento maior é o número de amostras que ultrapassa os limites da ABNT (1988) NBR 6123, situação similar à encontrada no quadro 4.3 para o afastamento D_2 no terreno de categoria I aonde uma das excentricidades chega á 11,3% no entanto o mesmo resultado não se repete para o terreno de categoria II – III aonde nenhuma das excentricidades chega á 7,5%.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÃO

As excentricidades obtidas através do túnel de vento no geral estão próximas das recomendadas pela ABNT (1988) NBR 6123 com exceção das obtida para D_2 com o edifício vizinho orientado a 90° na categoria de terreno I onde a excentricidade recomendada pela norma brasileira de vento apresenta valor superior ao experimental, porém na categoria de terreno II-III as excentricidade recomendadas pela norma apresentam valores menores que os experimentais.

O momento torçor encontrado pela norma de vento brasileira para a categoria de terreno I, dentro do D_1 e D_2 , e categoria II-III, dentro do afastamento D_2 , são maiores que os valores obtidos através de ensaios no túnel de vento. Portanto mesmo os parâmetros da ABNT (1988) NBR 6123 não chegando à excentricidade obtida no túnel de vento e os coeficientes de torção apresentando algum distanciamento dos experimentais, o momento torçor da referida norma, calculado para a configuração de vizinhança estudada atende a maioria dos valores encontrados, com exceção de uma amostra alocada na região D_1 na categoria II-III de terreno com vizinhança orientada a 0° , a qual pelo método comparativo de Carpeggini apresenta o resultado com maior afastamento dos resultados experimentais, logo para o caso da vizinhança com apenas um edifício vizinho, portanto a excentricidade de 7,5% atende o momento torçor experimental.

No método de Carini¹ (2017) quando utilizado o método de comparação de Carpeggini (2004) percebe-se que as excentricidades deste método quando normatizadas são as que mais se aproximam dos resultados experimentais, quanto aos coeficientes de torção para o terreno de categoria I os resultados chegam próximos dos obtidos no túnel de vento, com exceção do coeficiente obtido para o afastamento D_1 , porém para a categoria II-III esses coeficientes de torção chegam a valores elevados de comparados com os experimentais. Quanto ao momento torçor calculado por esse método para o diâmetro D_1 com o edifício mudo na orientação 0° possui valor inferior ao obtido no túnel, contudo nas demais configurações estudadas o momento torçor extrapola os obtidos experimentalmente.

As excentricidades encontradas por Carini² se distanciam dos resultados experimentais e possui coeficientes de torção elevados, mas não tanto quanto os resultados obtidos por Carini¹. Os momentos torçores calculados por Carini² apresentam comportamento similar aos obtidos por Carini¹, porém menores que os calculado por Carini¹.

Dentre os métodos Carini¹ e Carini², o primeiro é o que mais se aproxima dos momentos torçores obtidos por ensaios no túnel de vento, porém a ABNT (1988) NBR 6123, no caso avaliado, chega mais próximo dos momentos torçores experimentais se comparada com Carini¹, no entanto como alguns dos resultados encontrados no túnel de vento extrapolam os encontrados através das recomendações da norma brasileira de vento, é necessário ou o aumento da excentricidade ou o aumento do diâmetro de influência da vizinhança na torção.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Simulação computacional da ação do vento em diferentes tipos de malhas de terreno;
- Estudar como a torção global do edifício, causada pela ação do vento afeta os elementos de fachada e estruturais.

6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **Forças devido ao vento em edificações**, NBR 6123, ABNT, Rio de Janeiro, 69p, 1988.

ALBERTI, F. A. Determinação experimental em túnel de vento dos efeitos estáticos de proteção causados por edificações vizinhas: contribuição para a revisão dos fatores de vizinhança da NBR 6123. 2015. 123 f. Dissertação Mestrado em Engenharia – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

BASKARAN, A. Wind engineering studies on tall buildings – transitions in research. *Building and Environment*, Montreal, v. 28, n. 1, p. 1-19, Jan. 1993.

BLESSMANN, J. **Aerodinâmica das Construções**. 3. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2011. 261 p. Autor: Joaquim Blessmann.

BLESSRNANN, J. **Ação do vento em edifícios**. 2. ed. rev. Porto Alegre : Ed. Universidade/ UFRGS 1989. 81 p.

CARINI, Matheus Roman. **Resposta dinâmica em torção de edifícios sob ação do vento**. 2017. 137 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2017. Cap. 7.

CARPEGGANI, E. A. **Determinação dos efeitos estáticos de torção em edifícios altos devidos à ação do vento**. 2004. Dissertação (Mestre em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 2004.

CARPEGGANI, E. A. et al. **Determinação dos Efeitos Estáticos de Torção em Edifícios Altos Devidos à Ação do Vento**. INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47. Congresso Brasileiro do Concreto. Porto Alegre: Ibracon, 2005. p. 1 - 27.

DAVID, C. R. P.. **O Efeito da Incidência Oblíqua do Vento em Edifícios Altos**. 2007. 124 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento De engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2007.

DEWES, T. C. **Influência da vizinhança na ação estática do vento sobre edificações: comparação de métodos.** 98 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Departamento De engenharia Civil, Centro Universitário Univates, Lajeado, 2016. Cap. 6.

FERREIRA, Nuno André Costa. **Efeito Do Vento Em Edifícios Altos – Aplicação A Um Caso Concreto.** 2008. 179 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - FEUP, Porto, 2007.

GONÇALVES, R. M. et al. **Ação do Vento em edificações: Teoria e exemplos.** São Carlos: EESC, 2004. 124 p.

GREEN, John; QUEST, Jürgen. A short history of the European Transonic Wind Tunnel ETW. **Progress in Aerospace Sciences**, v. 47, n. 5, p. 319-368, 2011.

HELSLEY, Robert W.; STRANGE, William C. **A game-theoretic analysis of skyscrapers.** Journal of Urban Economics, v. 64, n. 1, p. 49-64, 2008.

HOLMES, John D. **Wind Loading of Structures.** New York: Taylor & Francis E-library, 2004. 356 f.

LABORATÓRIO DE AERODINÂMICA DAS CONSTRUÇÕES (Brasil). UFRGS. **Túnel de vento Professor Joaquim Blessmann.** Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/lac/TV%20FOTO%20zoom.htm>>. Acesso em: 04 set. 2018.

MAIA, Vasco M. J. **Análise e dimensionamento de torre eólica offshore: estudo paramétrico.** Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.

MELBOURNE, W. H. Comparison of measurements on the CAARC standard tall building model in simulated model wind flows. Austrália: Monash University, 1980.

SILVA, D. A.. **Análise Experimental Em Túnel De Vento Dos Efeitos Dinâmicos Do Vento Em Prédios Altos Devido A Vizinhança.** Dissertação de Mestrado No prelo

Trein, Cristiano A.. **Modelagem dinâmica equivalente de edifícios altos submetidos à ação do vento**. Dissertação de mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2005.

TRIBUNAL DA JUSTIÇA DO PARÁ: **Justiça do Pará condena engenheiro do edifício Real Class por homicídio**, 31 de maio de 2016. Disponível em: <<http://www.tjpa.jus.br/PortalExterno/imprensa/noticias/Informes/332703-Justica-do-Para-condena-engenheiro-do-edificio-Real-Class-por-homicidio.xhtml>>. Acesso em: 10 set. 2018.

VIEIRA, G. S.; BRITO, J. L. V. de; LOREDO-SOUZA, A. M.. Experimental Study On The Interference Intensity Produced By The Presence Of Neighboring Buildings In The Wind Action In A Tall Building. Revista Ibracon De Estruturas E Materiais, [s.l.], v. 11, n. 5, p.1036-1052, out. 2018. Fap UNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952018000500008>.