



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

VITOR CLAUDINO MACHADO

A TORÇÃO NOS EDIFÍCIOS E A ABNT NBR 6123:1988

JOÃO PESSOA

JUNHO 2022

VITOR CLAUDINO MACHADO

A TORÇÃO NOS EDIFÍCIOS E A ABNT NBR 6123:1988

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal da Paraíba (UFPB) como parte
das exigências para a obtenção do título de bacharel
em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. José Marcílio Filgueiras Cruz

JOÃO PESSOA

2022

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

M149t Machado, Vitor Claudino.

A torção nos edifícios e a ABNT NBR 6123:1988 /
Vitor Claudino Machado. - João Pessoa, 2022.
66 f. : il.

Orientação: José Marcílio Filgueiras Cruz.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Efeito do vento. 2. ABNT NBR 6123:1988. 3. Torção
global. 4. Túnel de vento. 5. Excentricidade da força
de arrasto. 6. Segurança. I. Cruz, José Marcílio
Filgueiras. II. Título.

UFPB/CT/BSCT

CDU 624(043.2)

FOLHA DE APROVAÇÃO

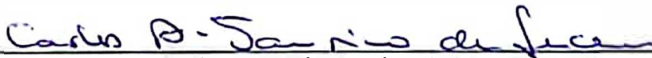
VITOR CLAUDINO MACHADO

A TORÇÃO NOS EDIFÍCIOS E A ABNT NBR 6123:1988

Trabalho de Conclusão de Curso em 22/06/2022 perante a seguinte Comissão Julgadora:


José Márcio Filgueiras Cruz
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UEPB

Aprovado


Carlos Antônio Taurino de Lucena
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UEPB

APROVADO


Enildo Tais Ferreira
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UEPB

APROVADO

Profª. Andrea Brasiliano Silva
Matrícula Siape: 1549557
Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil

AGRADECIMENTOS

É notável que na vida, muitas pessoas estão ao nosso redor, todavia poucas delas realmente se importam com o nosso bem estar e nos apoiam em nossos objetivos e metas. Em vista disso, o presente trabalho de conclusão de curso é resultado de uma gama de pessoas que contribuíram para o seu desenvolvimento, de maneira direta ou indireta.

Gostaria de agradecer primeiramente à Deus, por me dar condições de desenvolver, junto ao meu orientador, José Marcílio, o presente TCC. A fé é algo intrínseco ao ser humano e sem ela nada seríamos. Logo a mesma constitui um dos pilares fundamentais que me fizeram chegar até onde estou no presente momento.

Minha família também é responsável por esse momento ímpar, uma vez que sem ela não seria possível chegar nesse ponto. Um agradecimento especial dedico a minha mãe, Ana Paula, que muito se esforçou para que eu pudesse ter os meios necessários para alcançar meus objetivos e por isso dedico esse trabalho a ela. Não poderia deixar de citar também minhas avós, ambas com nome de Maria, que muito me apoiaram e sem elas nada disso seria possível.

Uma menção especial faço a minha companheira e amiga, Maria Paula, que em muito me ajudou ao longo de toda minha graduação, sempre me apoiando nos momentos difíceis do curso, não permitindo que eu pensasse sequer em desistir, por isso ela também é uma das responsáveis pela produção do presente TCC.

Quero agradecer, também, ao querido professor José Marcílio, que aceitou o desafio de me orientar e muito me ajudou com o tema aqui proposto. Sem seus ensinamentos nas disciplinas de engenharia e seus conhecimentos, o presente trabalho jamais seria, sequer, uma opção.

Sem mais delongas, deixo então o meu muito obrigado a todos aqueles que também não citei aqui, os quais foram de vital importância ao longo de toda minha graduação e ao longo de toda minha vida. Dentre eles estão familiares e amigos que sempre estiveram comigo em todos os momentos, fossem bons ou ruins.

Logo, sou grato a todos pela ajuda a mim prestada e dedico o presente trabalho a todos esses que permitiram que esse momento de fato acontecesse. Logo, fica registrada minha gratidão para com todos, muito obrigado.

RESUMO

Dentre os vários campos de atuação da Engenharia Civil, é possível destacar o cálculo estrutural como sendo um dos mais importantes. Essa área é responsável por estudar as estruturas de maneira minuciosa, analisando as cargas atuantes, bem como o comportamento de cada uma delas perante a ação dessas cargas. Em vista disso, o presente TCC estuda o momento torçor global que surge em edificações consideradas altas, a partir dos efeitos provocados pelo vento que nelas incide. Para tanto, há no Brasil, a ABNT NBR 6123:1988, que rege o dimensionamento de estruturas baseado no efeito do vento. Todavia, há ainda o ensaio de Túnel de Vento, que permite obter resultados mais precisos para esses efeitos, a partir da réplica da edificação e de seus arredores.

Ademais, muito se discute acerca de qual método adotar para se realizar o estudo do efeito do vento. Cabe então, ao calculista, optar pelo método que julgar melhor para cada situação. Assim, é possível observar a responsabilidade que recai, muitas vezes, sobre engenheiros recém formados e, conseqüentemente, inexperientes na área da engenharia estrutural. Logo, este trabalho visa realizar um estudo da bibliografia existente acerca do assunto supracitado, através da evolução do Estado da Arte. Além desse estudo, realizou-se uma releitura da norma, para que fossem analisadas 7 edificações, com o intuito de comparar os resultados obtidos através de ensaios em TV com os obtidos através das excentricidades propostas pela norma.

Conhecendo-se os parâmetros de cálculo tais como, força de arrasto e sua excentricidade, foi possível determinar os valores da torção global provocada pelo vento, com e sem o efeito de vizinhança. Notou-se que, no caso de edifícios que não atendem as características arquitetônicas consideradas na norma, o mais seguro é submetê-los a ensaios em túneis de vento, visto que os valores daí advindos mais se aproximam da realidade. Todavia, para os edifícios normatizados, pode-se de fato utilizar os parâmetros recomendados pela norma com segurança, embora em alguns casos os valores encontrados chegam a ser 50% maiores que os valores obtidos em ensaios de TV, o que torna a edificação superdimensionada. Portanto, é importante conhecer a edificação, a norma e outros recursos, para que o calculista possa, com propriedade, optar pela metodologia que leve à solução mais eficaz em caráter de segurança e custo.

Palavras-chave: Efeito do vento, ABNT NBR 6123:1988, Torção global, Túnel de vento, Excentricidade da força de arrasto, Segurança

ABSTRACT

Among the various fields of activity in Civil Engineering, it is possible to highlight structural calculation as one of the most important. This area is responsible for studying the structures in a detailed way, analyzing the active loads, as well as the behavior of each one of them in the face of the action of these loads. Because of this, the present TCC studies the global torsional moment that arises in buildings considered tall, from the effects caused by the wind that affects them. For that, there is in Brazil, the ABNT NBR 6123:1988 governs the design of structures based on the wind effect. However, there is also the Wind Tunnel test, which allows for more accurate results for these effects, from the replica of the building and its surroundings.

In addition, much is discussed on which method to adopt to carry out the study of the wind effect. It is then up to the calculator to choose the method he deems best for each situation. Thus, it is possible to observe the responsibility that often falls on newly graduated engineers and, consequently, inexperienced in the area of structural engineering. Therefore, this work aims to carry out a study of the existing bibliography on the aforementioned subject, through the evolution of the State of the Art. In addition to this study, a re-reading of the standard was carried out, so that 7 buildings were analyzed, to compare the results obtained through TV tests with those obtained through the eccentricities proposed by the standard.

Knowing the calculation parameters such as drag force and its eccentricity, it was possible to determine the values of the global torsion caused by the wind, with and without the neighborhood effect. It was noted that, in the case of buildings that do not meet the architectural characteristics considered in the standard, the safest thing is to submit them to tests in wind tunnels, since the resulting values are closer to reality. However, for standardized buildings, the parameters recommended by the standard can be used safely, although in some cases the values found are up to 50% higher than the values obtained in TV tests, which makes the building oversized. Therefore, it is important to know the building, the standard, and other resources, so that the calculator can properly choose the methodology that leads to the most effective solution in terms of safety and cost.

Keywords: Wind effect, ABNT NBR 6123:1988, Global Torsion, Wind Tunnel, Drag Force eccentricity, Safety

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1: Força global e força de arrasto	25
Figura 4.2: A geometria do edifício e o sistema de referencia	26
Figura 4.3: Isopletras de velocidade do vento V_o	27
Figura 4.4-a: Ábaco para o cálculo do C_a , vento com baixa turbulência	31
Figura 4.4-b: Ábaco para o cálculo do C_a , vento com alta turbulência	32
Figura 4.5: Edifício e direções do vento	32
Figura 4.6: Faixas consideradas no cálculo da força do vento	33
Figura 4.7: Distribuição da força do vento na fachada $B_y \times H$	34
Figura 4.8: Forças concentradas devido ao vento incidente na fachada maior, $B \times H$, atuando nos níveis de vigamento ou nós do pórtico	35
Figura 5.1-a: Edifícios Odebrecht Atlanta Maquete arquitetônica	36
Figura 5.1-b: Modelo reduzido para ensaio em Túnel de Vento	36
Figura 5.2: Seção transversal com referencial para indicação do ângulo de incidência do vento e indicação do CT e do CC	37
Figura 5.3: Gráfico com valores do momento torçor na base da edificação, obtidos em ensaios no Túnel de Vento	37
Figura 5.4: Cortes verticais	37
Figura 5.5: Maquete arquitetônica do edifício Cristal Tower	40
Figura 5.6: Seção transversal com referencial para indicação do ângulo de incidência do vento e do CT e do CC	41
Figura 5.7: Gráfico com valores do momento e indicação do torçor na base da edificação obtidos em ensaios no Túnel de Vento	41
Figura 5.8-a: Edifício L'Essence Jardins, Maquete arquitetônica	43

Figura 5.8-b: Edifício L'Essence Jardins, Modelo reduzido para ensaio em Túnel de Vento	43
Figura 5.9: Seção transversal com referencial para indicação do ângulo de incidência do vento do CT e do CC	44
Figura 5.10: Gráfico com valores do momento torçor na base da edificação, obtidos em ensaios no T.V	44
Figura 5.11: Corte vertical	44
Figura 5.12-a: Edifício Prosperitas, Maquete arquitetônica	47
Figura 5.12-b: Edifício Prosperitas Modelo reduzido para ensaio em Túnel de Vento ..	47
Figura 5.13: Seção transversal com referencial para indicação do ângulo de incidência do vento e indicação do CT e do CC	48
Figura 5.14: Gráfico com valores do momento torçor na base da edificação, obtidos em ensaios no T.V	48
Figura 5.15: Fachadas	48
Figura 5.16-a: Edifício Comendador Araújo, Maquete arquitetônica	51
Figura 5.16-b: Edifício Comendador Araújo Modelo reduzido para ensaio em Túnel de Vento	51
Figura 5.17: Seção transversal com referencial para indicação do ângulo de incidência do vento e do CT e do CC	51
Figura 5.18: Gráfico com valores do momento torçor na base da edificação, obtidos em ensaios no T.V.	51
Figura 5.19-a: Edifício CENU – Torre IV, Maquete arquitetônica	54
Figura 5.19-b: Edifício CENU – Torre IV Modelo reduzido para ensaio em Túnel de Vento	54
Figura 5.20: Seção transversal com referencial para indicação do ângulo de incidência do vento e do CT e do CC	54

Figura 5.21: Gráfico com valores do momento torçor na base da edificação, obtidos em ensaios no T.V.	54
Figura 5.22-a: Edifício Unique Residence, Maquete arquitetônica	57
Figura 5.22-b: Edifício Unique Residence Modelo reduzido para ensaio em Túnel de Vento	57
Figura 5.23-a: Seção transversal com referencial para indicação do ângulo de incidência do vento e do CT e do CC	58
Figura 5.23-b: Gráfico com valores do momento torçor na base da edificação, obtidos em ensaios no T.V com indicação do ângulo de incidência do vento com vizinhança	58
Figura 5.23 c: Gráfico com valores do momento torçor na base da edificação, obtidos em ensaios no T.V com indicação do ângulo de incidência do vento sem vizinhança	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Fator topográfico S_1	28
Tabela 4.2: Fator S_2	30
Tabela 4.3: Valores mínimos do fator S_3	31
Tabela 4.4: Parâmetros meteorológicos	34
Tabela 5.1: Parâmetros para utilização da Norma do Vento (Edifício Odebrecht Atlanta)	38
Tabela 5.2: Parâmetros para utilização da Norma do Vento (Edifício Cristal Tower) ...	41
Tabela 5.3: Parâmetros para utilização da Norma do Vento (Edifício L'Essence Jardins)	44
Tabela 5.4: Parâmetros para utilização da Norma do Vento (Edifício Prosperitas)	48
Tabela 5.5: Parâmetros para utilização com a Norma do Vento (Edifício Comendador Araújo)	51
Tabela 5.6: Parâmetros para utilização com a Norma do Vento (Edifício CENU – Torre IV)	55
Tabela 5.7: Parâmetros para utilização com a Norma do Vento (Edifício Unique Residence)	58
Tabela 6.1: Resumo dos valores estudados	64

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	17
2.1 OBJETIVO GERAL	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3. METODOLOGIA DO TRABALHO	18
4. ESTADO DA ARTE	19
4.1 INTRODUÇÃO	19
4.2 ASPECTOS DO DESENVOLVIMENTO DE ESTUDOS SOBRE OS EFEITOS DO VENTO NOS EDIFÍCIOS	19
4.3 A ABNT NBR 6123:1988 E A TORÇÃO NOS EDIFÍCIOS	23
4.3.1 FORÇAS DEVIDAS AO VENTO E SEUS RESPECTIVOS COEFICIENTES	25
4.3.2 MARCHA DE CÁLCULO PARA A OBTENÇÃO DAS FORÇAS DE ARRASTO F_{ax} e F_{ay}	27
5. A AÇÃO DO VENTO NAS ESTRUTURAS E A TORÇÃO NOS EDIFÍCIOS	36
5.1 A TORÇÃO NOS EDIFÍCIOS DE ARQUITETURA REGULAR (SEÇÃO TRANVERSAL CONSTANTE) E PROJEÇÃO HORIZONTAL CONSTANTE.....	36
5.1.1 TORÇÃO NOS EDIFÍCIOS DE ARQUITETURA REGULAR, PROJEÇÃO HORIZONTAL QUADRADA E SISTEMA ESTRUTURAL DE CONTRAVENTAMENTO SIMÉTRICO	36
5.1.1.1 CÁLCULO DO MOMENTO TORÇOR COM AS EXCENRICIDADES e_a E/OU e_b DA NORMA DO VENTO ..	37
5.1.2. TORÇÃO NOS EDIFÍCIOS DE ARQUITETURA REGULAR (SEÇÃO TRANSVERSAL CONSTANTE) COM PROJEÇÃO HORIZONTAL QUADRADA E SEC ASSIMÉTRICO	40
5.1.2.1. CÁLCULO DO MOMENTO TORÇOR COM AS EXCENRICIDADE e_a E/OU e_b DA NORMA DE	41
5.2. A TORÇÃO NOS EDIFÍCIOS DE ARQUITETURA REGULAR (SEÇÃO TRANVERSAL CONSTANTE) E PROJEÇÃO HORIZONTAL RETANGULAR E SEC COM SIMETRIA DE RIGIDEZA	43

5.2.1 CÁLCULO DO MOMENTO TORÇOR COM AS EXCENTRICIDADES e_a E/OU e_b DA NORMA DO VENTO	44
5.3. TORÇÃO NOS EDIFÍCIOS DE ARQUITETURA NÃO REGULAR (SEÇÃO TRANSVERSAL VARIADA) E PROJEÇÃO HORIZONTAL NÃO REGULAR	46
5.3.1. EDIFÍCIO PROSPERITAS	46
5.3.1.1 CÁLCULO DO MOMENTO TORÇOR COM AS EXCENTRICIDADES e_a E/OU e_b DA NORMA DO VENTO ..	48
5.3.2. EDIFÍCIOS COMENDADOR ARAÚJO	50
5.3.2.1. CÁLCULO DO MOMENTO TORÇOR COM AS EXCENTRICIDADES e_a E/OU e_b DA NORMA DO VENTO ..	51
5.4. A TORÇÃO NOS EDIFÍCIOS DE ARQUITETURA REGULAR E PROJEÇÃO HORIZONTAL CONSTANTE FRACAMENTE ASSEMBELHÁVEL À RETANGULAR	53
5.4.1. CÁLCULO DO MOMENTO TORÇOR COM AS EXCENTRICIDADES e_a E/OU e_b DA NORMA DO VENTO	55
5.5. A TORÇÃO NOS EDIFÍCIOS DE ARQUITETURA REGULAR E PROJEÇÃO HORIZONTAL CONSTANTE FRACAMENTE ASSEMBELHÁVEL À RETANGULAR COM SEC FORTEMENTE ASSIMÉTRICO	57
5.5.1. CÁLCULO DO MOMENTO TORÇOR COM AS EXCENTRICIDADES e_a E/OU e_b DA NORMA DO VENTO	58
6. OBSERVAÇÕES	61
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	65
REFERÊNCIAS	67

1. INTRODUÇÃO

O avanço da tecnologia e o consequente aperfeiçoamento dos métodos construtivos vem proporcionando os meios indispensáveis, para que edificações cada vez mais desafiadoras e inovadoras sejam construídas. A utilização de materiais mais leves e mais resistentes, aliada à evolução dos softwares de análise, dimensionamento e detalhamento de estruturas, são, também, aspectos indispensáveis para que os engenheiros estruturais possam responder a contento, ao desafio que lhes é imposto na tarefa de garantir a materialização do sonho arquitetônico dos edifícios atuais, cada vez mais altos e mais esbeltos.

Logo, a cada dia projetos de edifícios mais arrojados na sua forma arquitetônica, na sua altura e esbeltez, têm suas estruturas submetidas a análises que obrigatoriamente consideram o efeito do vento e do desaprumo, utilizando conceitos como estabilidade global, análise de segunda ordem, sistema estrutural de contraventamento e torção global.

É intuitivo, embora facilmente demonstrado, que estruturas verticais (como as dos edifícios) mais altas e esbeltas são mais sensíveis à ação de carregamentos laterais, dos quais o efeito do vento surge quase sempre como o mais importante. Estes carregamentos laterais ao deslocarem horizontalmente as estruturas e o carregamento vertical nelas atuante, provoca os chamados efeitos de 2ª ordem e concorrem para o aparecimento do que se convencionou chamar de torção global.

Entendendo a estrutura do edifício, grosso modo, como um *pilar* engastado na base e livre no topo que, ao ser submetido à deslocamentos horizontais (com intensidades diferentes em cada cota), apresenta em qualquer delas, numa mesma direção e sentido, deslocamentos iguais e se comporta como uma barra fletida. Quando os deslocamentos referidos são diferentes, além de flexão o *pilar* será solicitado também à torção. Nestas condições a estrutura do edifício estará submetida à flexão e à torção globais combinadas.

A ABNT NBR 6123:1988, que trata das forças devidas ao vento em edificações, apresenta procedimentos específicos apenas para edifícios de arquitetura regular e projeção retangular. Para estas edificações, a citada Norma recomenda que os efeitos do vento sejam avaliados incidindo perpendicularmente às fachadas. Isto é, com ângulo (α) de incidência igual à 0°, 90°, 180° e 270° com relação a uma das fachadas, sendo obtidas as forças de arrasto (F_a) para estas mesmas incidências.

No caso de edifícios de arquitetura regular, com seção transversal constante, porém com projeção horizontal não retangular, é comum proceder a análise dos efeitos do vento a partir do retângulo que circunscreva a referida seção transversal. Para a avaliação da torção global no edifício e sua estrutura, esta mesma Norma preconiza a aplicação das forças de arrasto com excentricidades em relação ao eixo vertical geométrico. Desse modo, serão levados em conta o efeito do vento atuando obliquamente às fachadas, bem como os efeitos de vizinhança.

No que diz respeito à torção global, duas situações podem ser observadas na análise dessas edificações de arquitetura regular e projeção horizontal retangular, ou circunscrita a um retângulo. Na primeira, o edifício e sua estrutura de contraventamento são simétricos em relação aos eixos horizontais ortogonais, que são paralelos aos lados do retângulo e às suas fachadas.

Nesta situação a interseção desses eixos define um ponto (Centroide da seção transversal ou da projeção horizontal, por vezes chamado, também, de centro geométrico, CG) que se situa sobre o eixo vertical geométrico no qual atua a resultante do carregamento devido ao vento, também definido como centro de carga (CC), ponto em relação ao qual se aplicam as excentricidades supracitadas. Quando este eixo vertical geométrico é, também, o eixo elástico da edificação, ele é o próprio eixo de torção e sua interseção em cada pavimento é o centro de torção, CT.

Na segunda situação, embora a projeção horizontal da edificação seja simétrica, a estrutura de contraventamento não é. Entendida esta estrutura a partir de dois sistemas estruturais de contraventamento (SEC da direção x e SEC da direção y) verticais ortogonais compostos por estruturas planas (pórticos planos, pilares-parede etc.) então, é possível identificar uma excentricidade de projeto, e_y , para aplicação da força de arrasto da direção X , F_{ax} , e uma excentricidade, e_x , para a aplicação da força de arrasto da direção Y , F_{ay} . Combinando, adequadamente, em cada direção, a excentricidade de projeto com a excentricidade normatizada e considerando a intensidade das forças de arrasto, obtém-se uma boa estimativa da torção global, em conformidade com a mencionada Norma NBR 6123:1988.

Entretanto, a prática tem demonstrado que em alguns casos nos quais a projeção horizontal não é retangular e mesmo para os edifícios normatizados com SEC simétrico, resultados obtidos para a torção global via recomendações da ABNT NBR 6123:1988, se apresentam contra a segurança. Isto é, os resultados apresentam valores menores que os obtidos experimentalmente em Túnel de Vento, TV.

Desse modo, percebe-se claramente que os resultados dos esforços de interesse calculados, dependerão dos procedimentos a serem utilizados na consideração dos efeitos do vento nas estruturas dos edifícios. Tal constatação se reveste de grande importância pois torna claro que, embora tenha sido conduzida a análise corretamente via Norma, a estrutura poderá ser subdimensionada, comprometendo a sua segurança bem como a dos seus usuários.

Assim, esta constatação evidencia a grande responsabilidade que recai sobre o calculista ao optar por utilizar as recomendações da Norma (ABNT NBR 6123:1988) ou a análise via TV para quantificar as solicitações advindas do vento. Isso se dá ao fato de a própria Norma ressaltar que, para edifícios de formas, dimensões ou localização fora do comum, estudos especiais devem ser realizados para a determinação das forças do vento e seus efeitos na estrutura.

Consequentemente, surge o questionamento sobre quais são os limites a serem utilizados para a definição das formas, das dimensões e/ou localização fora do comum. Em se tratando de edifícios *normatizados* (ou seja: de arquitetura regular e seção transversal retangular) a forma arquitetônica já está definida, restando, portanto, uma discussão sobre a altura e a localização. Estas variáveis influenciam na determinação do fator S_2 ao considerar o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e as dimensões da edificação.

A literatura técnica sobre o tema apresenta sugestões de limites para algumas grandezas relevantes na tomada de decisão quanto a avaliação dos efeitos do vento via Norma ou via TV. Assim, se considera prudente, por exemplo, submeter os edifícios com altura maior que 100m ou com mais de 40 andares aos ensaios em Túnel de Vento. E bem assim, os edifícios para os quais o índice de esbeltez geométrico seja maior que 5.

Neste contexto, o presente Trabalho de Conclusão de Curso procurará demonstrar a importância da escolha dos procedimentos, para a determinação das solicitações devidas ao vento e seus efeitos na estrutura de contraventamento do edifício, explanando a bibliografia existente acerca do assunto, bem como resultados relativos à estudos já conhecidos.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O presente trabalho tem por objetivo geral chamar a atenção, principalmente, dos estudantes de engenharia e dos engenheiros recém-formados, para a importância de bem escolher os procedimentos a serem adotados, para a quantificação das intensidades de valores de solicitações devidas ao vento nas estruturas de edifícios de arquitetura regular. Sendo, que dentre as solicitações, ênfase especial será dada à quantificação e análise do momento de torção, considerados sua obtenção via ABNT NBR 6123:1988 e via TV.

2.2. Objetivos específicos

- 2.2.1. Apresentar discrepância em alguns casos entre os valores obtidos para as solicitações decorrentes dos efeitos do vento quando a análise é levada a efeito via Norma e via TV.
- 2.2.2. Identificar a necessidade de corrigir os valores a serem adotados para as excentricidades e_a e e_b recomendadas pela ABNT NBR 6123:1988, para avaliação da torção global sem vizinhança nos edifícios por ela normatizados.

3. METODOLOGIA DO TRABALHO

Para atingir os objetivos propostos, foi realizada uma revisão bibliográfica sendo consultados trabalhos que tratam da análise dos efeitos do vento nas estruturas dos edifícios. Desses trabalhos foram utilizados, principalmente, resultados da análise dos efeitos de torção em edifícios de arquitetura regular, com projeção horizontal retangular ou assemelhável, através das recomendações da Norma de Vento e, também, através do Túnel de Vento.

Uma releitura da Norma específica, a ABNT NBR 6123:1988, foi realizada com a preocupação de explicitar as recomendações nela contidas, bem como indicar a formulação de interesse por ela apresentada para a quantificação das solicitações devidas ao vento, nos edifícios, e seus efeitos nas estruturas. Dentre os trabalhos consultados, alguns foram selecionados de modo a possibilitar uma vista panorâmica sobre o estado da arte do tema enfocado neste TCC. Estes trabalhos são citados e comentados no próximo item denominado Estado da arte.

4. ESTADO DA ARTE

4.1. Introdução

Muito se tem estudado, pesquisado e publicado sobre os efeitos do vento nos edifícios altos e suas estruturas, especialmente sobre a torção, cujos resultados apresentados foram obtidos através de ensaios em Túneis de Vento ou através de procedimentos analíticos geralmente recomendados pelas normas. Este item 4 (Estado da Arte) traz uma revisão da construção do conhecimento adquirido sobre o tema desde o início da era dos arranha-céus, isto é da década de 1930, até os dias da década passada.

4.2. Aspectos do desenvolvimento de estudos sobre os efeitos do vento nos edifícios

Segundo Carpeggiani (2004, p.10), na época dos primeiros arranha-céus, o cálculo estrutural considerava o efeito do vento como uma ação estática obtida a partir das máximas velocidades observadas e variando com a altura em relação ao solo. De fato, o vento provoca tanto solicitações estáticas quanto dinâmicas (Vanin, 2011, p.22) tornando necessário um tratamento estatístico das velocidades máximas e mínimas, das velocidades médias, bem como do tempo de duração das rajadas. O tratamento estatístico das velocidades máximas do vento começou a ser proposto a partir de 1940, embora problemas de vibração já serem estudados desde 1929.

Harris (1934) talvez tenha sido o pioneiro no estudo da torção em edifícios, ao analisar os efeitos de vizinhança de duas edificações no entorno do Empire State Building. No resumo do trabalho, página 103, lê-se:

Measurements have been made of the wind pressure over a model of the Empire State Building as affected by the presence of neighboring models simulating buildings which might be erected on the adjacent blocks. The object was to determine the shielding effect for different directions of the wind.

While the pressure on certain faces of the building was increased somewhat by the pressure of the neighboring structures, the resultant of pressure on the windward face and suction on the lee face was decreased. The decrease was greatest when the interfering structures was closed by and directly upstream.

The height shielded was not so great as the height of the interfering structure.

Shielding may produce a variation in the twisting moment about a vertical axis at different levels.
The stresses set up by this loading may require consideration in special cases.

Ou seja:

Foram feitas medições da pressão do vento sobre uma maquete do Empire State Building afetada pela presença de maquetes vizinhas simulando edifícios que podem ser erguidos nos blocos adjacentes. O objetivo era determinar o efeito de blindagem para diferentes direções do vento. Enquanto a pressão em determinadas faces da edificação foi aumentada um pouco pela pressão das estruturas vizinhas, a resultante de pressão na face de barlavento e sucção na face de sotavento foi diminuída. A diminuição foi maior quando as estruturas interferentes foram fechadas diretamente a montante. A altura blindada não era tão grande quanto a altura da estrutura interferente. A blindagem pode produzir uma variação no momento de torção sobre um eixo vertical em diferentes níveis. As tensões estabelecidas neste carregamento podem exigir consideração em casos especiais.

Chien et al (1951) observou que em edificações paralelepípedicas, baixas e alongadas, há um grande aumento das sucções nas paredes confrontantes de duas edificações colocadas próximas e paralelas, para certos ângulos de incidência do vento. As sucções nestas paredes foram aumentadas de até três vezes em certos casos.

Scruton e Newberry (1963) também observaram que em conjuntos de edifícios podem aparecer altas sucções nas faces confrontantes, para certas incidências do vento, e que em edifícios sobre pilotis parte do vento incidente passa por baixo, de modo que, sendo afunilado, ganha aceleração dando origem a altas sucções que devem ser consideradas no projeto de forros, janelas, etc, nesta região.

Leutheusser (1971) constatou que em um modelo cercado por vários outros, ocorre uma diminuição nas sobrepressões e um aumento nas sucções quando comparado com uma edificação isolada.

Kelnhöfer (1971) estudando a influência de uma edificação vizinha sobre as sucções na cobertura horizontal de um edifício paralelepípedo alteado, constatou aumentos de 3,16 vezes superiores às medidas em modelo isolado.

Surry e Lythe (1981) realizaram um estudo comparativo da norma canadense com resultados de ensaios em túnel de vento da University of Western Ontario no qual

observaram que mesmo para edifícios de formas simples, com planta retangular, a indicação da norma pode muitas vezes ser inadequada. Considerável parte dos coeficientes de torção obtidos a partir das pressões medidas nos modelos retangulares, foram de 1,5 a 4,0 vezes maiores que os obtidos via norma.

Estes estudos, de acordo com Carpeggiani (2004), demonstraram, ainda, que ao representar a torção devida ao vento nos edifícios como o efeito de uma força excêntrica ao centro geométrico da planta da edificação, em geral a força obtida via norma muito se aproxima do seu real valor, porem a excentricidade recomendada é em geral subestimada.

Estudando os efeitos da geometria (das dimensões externas) da edificação, nas grandezas de interesse para a análise dos efeitos do vento, Blessmann (1983) observou que para relações diferentes entre altura e aresta da base (relação chamada de alteamento), estas grandezas são fortemente afetadas, no caso do momento torçor, valores com variação de até 112% e no coeficiente de pressão externa de torção diferenças de até 10,60 vezes. No ano seguinte, em Blessmann (1984), o pesquisador constatou que o fator de vizinhança representativo da situação no entorno da edificação analisada pode ter grande influência, como no caso demonstrado no estudo do edifício sede do Citybank em São Paulo. Já em 1985 o professor Blessmann apresenta resultados de estudos realizados com edifícios de planta retangular que confirmam resultados apresentados em Surry e Lythe (1981). Continuando suas pesquisas Joaquim Blessmann apresenta em 1986 conclusões indicando que edifícios prismáticos e de projeção ou planta retangular, construídos muito próximos, poderão ser submetidos a sução de 2 a 5 vezes maior que os mesmos edifícios isolados.

Em 1990 Surry e Lythe analisaram os esforços de torção em edifícios altos com variadas seções transversais. E em 1992, Blessmann constatou que os momentos torçores variam muito nos edifícios altos, dependendo da quantidade e da relação dos edifícios vizinhos. Significando que os coeficientes de torção podem ser fortemente influenciados pelo fator de vizinhança (FV)

Importante contribuição ao estado da arte foi dada por Zhang, quando ele e seus colaboradores utilizaram o Túnel de Vento para estudar o comportamento de edifícios com seção transversal quadrada com SEC assimétrico. O principal objetivo foi

compreender a influência da excentricidade do centro de torção em relação ao centro elástico na variação do momento torçor dos edifícios ensaiados. Zhang et al (1995).

Continuando a pesquisa sobre a influência da excentricidade do SEC nos efeitos de torção devidos ao vento, Liang et al (1997) concluiu que, para edifícios de seção transversal retangular, se a rigidez à torção da estrutura for próxima à rigidez lateral, as respostas torcionais terão significativa influencia no comportamento do edifício.

Mario Franco (2003) nas considerações sobre a torção dos edifícios altos em *A Torção nos Edifícios Altos*, introduziu os conceitos de Centro de torção de um pavimento e de eixo de torção de edifícios. Ele também apresentou o parâmetro de instabilidade global à torção, chamado Gama Teta e concluiu que as vigas periféricas são muito importantes no combate aos efeitos da torção.

Em Carpeggiani (2004) edifícios de diversas configurações arquitetônicas foram analisados a partir de modelos reduzidos em Túnel de Vento. Os resultados obtidos para o momento torçor via Túnel de vento, foram comparados com os correspondentes valores estimados a partir das recomendações das Normas do vento brasileira, canadense e alemã. Esta comparação demonstrou, especialmente no caso da Norma brasileira, que as excentricidades das forças de arrasto recomendadas para a situação de edifícios sem vizinhança estão subestimadas. Nos casos das análises considerando a vizinhança os valores recomendados cobrem boa parte dos casos.

Mais recentemente em Siqueira (2009) no seu trabalho de diplomação ao procurar verificar a adequação dos resultados para o momento de torção em edifícios altos de várias configurações arquitetônicas, concluiu, tal como Carpeggiani, que para edifícios isolados os valores recomendados pela Norma de Vento são menores que os obtidos via Túnel de Vento.

Em Vianin (2011), a autora demonstra através de estudos utilizando o modelo chamado *CAARC Standard Tall Building* a grande influência do efeito do vento em edificações altas e das condições de vizinhança.

Arrais (2011) no seu estudo sobre as pressões exercidas pelo vento nos revestimentos das fachadas, também comparou forças provocadas pelo vento avaliadas

segundo a ABNT NBR 6123:1988 com as obtidas via Túnel de Vento. Ao final o autor conclui que na maioria dos casos os valores do TV são maiores.

4.3 A ABNT NBR 6123:1988 e a torção nos edifícios

A ABNT NBR 6123:1988 originária da NB-599/1987, também referida, neste trabalho, como a Norma do Vento ou simplesmente Norma, é o código brasileiro atual que reúne as recomendações e informações que devem nortear o calculista na consideração dos efeitos do vento, indicando caminhos e limites a serem observados na análise das estruturas dos edifícios. Ela é, portanto, a norma específica que fixa as condições exigíveis na consideração das forças devidas à ação estática e dinâmica do vento, para efeitos de cálculo das estruturas das edificações no Brasil.

As forças devidas ao vento sobre uma edificação devem ser calculadas separadamente para: a) elementos de vedação e suas fixações (telhas, vidros, esquadrias, painéis de vedação, etc.); b) partes da estrutura (telhados, paredes, etc); ou c) para a estrutura como um todo.

No caso do estudo da ação das forças devidas ao vento na estrutura como um todo, devem ser consideradas as forças de arrasto atuando perpendicularmente às fachadas da edificação. Nos edifícios ditos regulares (de projeção horizontal retangular e seção transversal constante) a utilização dessas forças possibilitam além da quantificação do carregamento lateral nos elementos do sistema estrutural de contraventamento, a verificação dos parâmetros Alfa e Gama-Z para a avaliação da necessidade de se considerar os efeitos de segunda ordem e sua quantificação quanto for o caso.

Ademais, quando consideradas atuando com as excentricidades (e_a e e_b) recomendadas na norma *Forças devidas ao vento em edificações* de 1988, permitem levar em conta os efeitos de torção. É que mesmo nos casos dos edifícios de arquitetura regular os esforços de torção decorrentes da ação do vento, podem ser relevantes especialmente quando a incidência do vento não é perpendicular às fachadas ou quando o sistema estrutural de contraventamento da edificação não é simétrico.

Dos vários modelos estruturais, do mais simples ao mais complexo, há que se considerar as limitações de cada um, sendo, portanto, de responsabilidade do engenheiro projetista de estruturas a escolha do que for mais conveniente em cada caso. Neste contexto é possível citar dois modelos para análise via Norma: o de pórticos planos e o do pórtico espacial, em que pese a afirmação encontrada em Cordeiro (2012, p.9) dando

conta de que o modelo com pórticos planos não possibilita a consideração das forças de arrasto com a aplicação das excentricidades recomendadas na Norma de Vento. Neste TCC, é pretendido apresentar uma sequência de procedimentos que permitirão a aplicação destas excentricidades, tornando possível o uso do modelo de pórticos planos inclusive nos casos em que os esforços de torção sejam significativos,

Sobre as excentricidades e_a e e_b da força de arrasto, assim se manifesta a Norma do Vento nos dois subitens do item 6.6, onde lê-se o seguinte:

6.6.1. Devem ser considerados, quando for o caso, os efeitos da excentricidade da força de arrasto.

6.6.2. Para o caso de edificações paralelepípedicas, o projeto deve levar em conta:

- as forças devidas ao vento agindo perpendicularmente a cada uma das fachadas, de acordo com as especificações desta Norma;
- as excentricidades causadas por vento agindo obliquamente ou por efeitos de vizinhança. Os esforços de torção daí oriundos são calculados considerando estas forças agindo, respectivamente, com as seguintes excentricidades, em relação ao eixo vertical geométrico;

- 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 $e_b = 0,15 b$,

Sendo e_a medido na direção do lado maior, a , e e_b medido na direção do lado menor, b .

Os efeitos de vizinhança serão considerados somente até a altura do topo da(s) edificação(ões) situada(s) na(s) proximidade(s), dentro de um círculo de diâmetro igual à altura da edificação em estudo, ou igual a seis vezes o lado menor da edificação, b , adotando-se o menor destes dois valores.

Na análise e dimensionamento das estruturas devem ser considerados os esforços oriundos da ação do vento que sobre elas incide. Isto é prescrito no subitem 11.4.1.2 da ABNT NBR 6118:2014, devendo estes esforços serem determinados de acordo com a ABNT NBR 6123:1988, onde se explica que a ação do vento que é dinâmica pode ser considerada como uma ação estática, principalmente dos edifícios de rigidez elevada e período fundamental T_1 , baixo.

De acordo com o item 9.1 da Norma, a resposta dinâmica total é igual à superposição das respostas média e flutuante, sendo que as edificações com período fundamental T_1 igual ou inferior a 1s, a influência da resposta flutuante é pequena, sendo seus efeitos já considerados na determinação do intervalo de tempo adotado para o fator S_2 . Entretanto, edificações com período fundamental superior a 1s, em particular aquelas

fracamente amortecidas, podem apresentar importante resposta flutuante na direção do vento médio. Tais flutuações da velocidade podem induzir em estruturas muito flexíveis, especialmente em edificações altas e esbeltas, oscilações importantes na direção da velocidade média, aqui designadas como resposta flutuante.

4.3.1 Forças devidas ao vento e seus respectivos coeficientes

De acordo com a ABNT NBR 6123:1988 (subitem 4.2.3; p.5), a força global do vento que atua em uma edificação, F_g , é igual à resultante das forças do vento nesta, podendo ser obtida como o vetor resultante das forças em questão. A componente desta força global que atua na direção do vento é a força de arrasto, F_a . Como indicado na Figura 4.1.

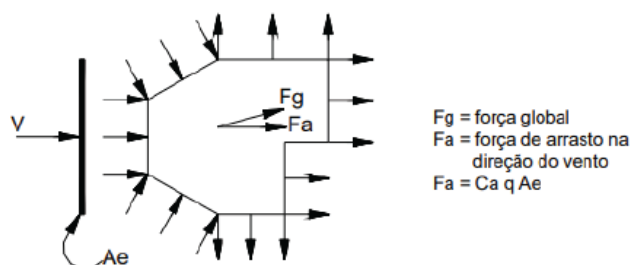


Figura 4.1 Força global e força de arrasto
Fonte: CRUZ (2019; p.16)

Esta é calculada por meio da expressão geral $F_a = C_a q A_e$ ou de modo mais específico através das equações Eq. 4.1- “a” e “b”.

$$F_{a,x} = C_{a,x} q A_{ey} \quad (4.1 - a)$$

onde: $C_{a,x} = F_{a,x} / q A_{ey}$ é o coeficiente de arrasto para a força de arrasto paralela ao eixo X; A_{ey} , neste caso, igual a, $B_y H$ é a área frontal efetiva: área da projeção ortogonal da edificação, estrutura ou elemento estrutural sobre um plano perpendicular à direção do vento, também chamada de área de sombra (notar que $B_y = b$, sendo **b** definido como menor lado do retângulo que representa a seção transversal da edificação ou o que a circunscreve). E analogamente tem-se para a força de arrasto paralela ao eixo Y:

$$F_{a,y} = C_{a,y} q A_{ex} \quad (4.1 - b)$$

Neste caso, A_{ex} é igual a $B_x H$ e $C_{a,y} = F_{a,y} / q A_{ex}$. É importante observar que $B_x = a$, sendo **a** definido como o menor lado do retângulo que representa a seção transversal da edificação ou que a circunscreve.

De modo geral a força de arrasto pode ser traduzida matematicamente por:

$$F_a = C_a q A = C_a q B H \quad (4.1 - c)$$

A mencionada norma esclarece ainda, que uma componente qualquer da força global pode ser calculada através da expressão: $F = C_f q A$ em que C_f é o coeficiente de força especificado em cada caso (ABNT NBR 6123:1988, subitem 4.2.3; p.5). Por exemplo, para o cálculo da força F_x , componente da força global devido ao vento que atua paralelamente ao eixo de referência X , tem-se o C_x , e, analogamente, para a F_y , componente da força global devido ao vento que atua paralelamente ao eixo de referência Y tem-se o C_y . Assim, obtém-se:

$$F_x = C_x q A_{ey} = C_x q b H \therefore C_{yx} = F_x / q b H$$

$$F_y = C_y q A_{ex} = C_y q a H \therefore C_y = F_x / q a H$$

Nestas expressões, $A_{ex} = aH = B_x H$ e $A_{ey} = bH = B_y H$ representam a área de referência, especificada em cada caso; C_x e C_y são os coeficientes de força segundo o eixo X e o eixo Y , respectivamente, sendo q a pressão dinâmica do vento. No caso do momento torçor, tem-se:

$$M_t = F_{ay} * e_a$$

$$M_t = F_{ax} * e_b$$

(4.2. a - b)

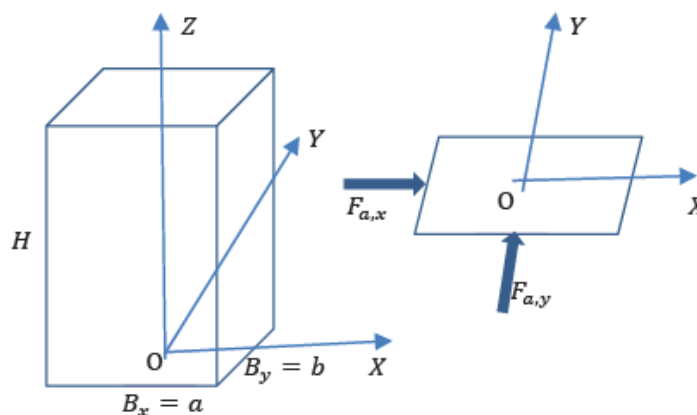


Figura 4.2 A geometria do edifício e o sistema de referencia

Fonte: CRUZ (2019; p.24)

4.3.2 Marcha de cálculo para a obtenção das forças de arrasto, F_{ax} e F_{ay}

A marcha de cálculo para a determinação da carga do vento nos edifícios de projeção horizontal retangular, usuais, pode ser assim resumida:

a) Identificar na Fig.4.3 a localização do edifício ou da futura edificação. Na figura vê-se o mapa do Brasil e sobre ele as isopletas da velocidade básica do vento. Nesta etapa obtém-se o valor da velocidade V_0 (m/s);

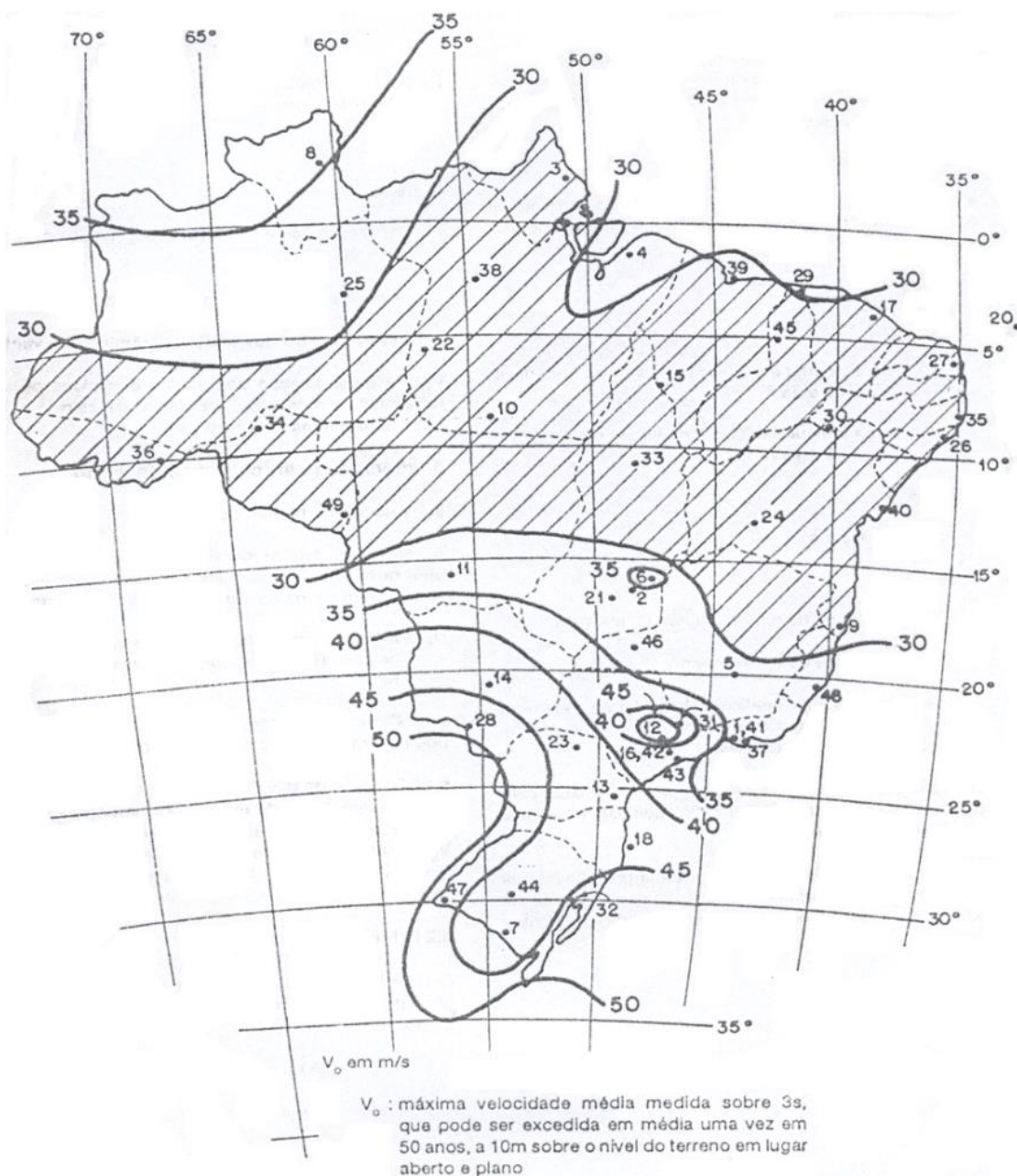


Fig.4.3. Isopletas de velocidade do vento V_0
Fonte: ABNT NBR 6123:1988

b) Devem ser identificados os valores dos coeficientes: S_1 , S_2 e S_3 . Esses coeficientes são necessários para a determinação da velocidade característica V_k (m/s), sendo: S_1 é o fator topográfico que leva em consideração as variações do relevo do terreno, seus valores estão na Tab. 4.1; S_2 é o fator que considera o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação ou parte componente em consideração, seus valores podem ser vistos na Tab. 4.2. Por fim, o S_3 que é o fator estatístico, considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação, seus valores estão definidos na Tab. 4.3.

Tab. 4.1 - Fator topográfico S_1

SITUAÇÃO	Fator S_1
Terreno plano ou fracamente acidentado	1,0
Taludes e morros	Ver Norma
Vales profundos, protegidos de ventos de qualquer direção.	0,9

Fonte: ABNT NBR 6123:1988

É importante lembrar que os fatores S_1 e S_3 , uma vez definidos, se mantêm constantes em todo o processo de cálculo, enquanto o S_2 assume vários valores, um para cada faixa de altura da edificação, em função da categoria e da classe nas quais se enquadre a estrutura.

Elementos para a definição do S_2 extraídos do subitem 5.3 da NBR 6123:1988:

“Rugosidade do terreno

Categoria I: Superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5km de extensão, medida na direção e sentido do vento incidente. Exemplos:

- mar calmo;
- lagos e rios;
- pântanos sem vegetação.

Categoria II: Terrenos abertos em nível, ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas. Exemplos:

- zonas costeiras planas;
- pântanos com vegetação rala;
- campos de aviação;
- pradarias e charnecas;

- fazendas sem sebes ou muros.

A cota média do topo dos obstáculos é considerada inferior ou igual a 1,0m.

Categoria III: Terrenos planos ou ondulados com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas. Exemplos:

- granjas e casas de campo, com exceção das partes com matos;
- fazendas com sebes e/ou muros;
- subúrbios a considerável distância do centro, com casas baixas e esparsas.

A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 3,0m.

Categoria IV: Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zonas florestais, industriais ou urbanizados. Exemplos:

- zonas de parques e bosques com muitas árvores;
- cidades pequenas e seus arredores;
- subúrbios densamente construídos de grandes cidades;
- áreas industriais plena ou parcialmente desenvolvidas.

A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 10m.

Esta categoria também inclui zonas com obstáculos maiores que ainda não possam ser considerados na Categoria V.

Categoria V: Terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados. Exemplos:

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

A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual ou superior a 25m.

Dimensões da edificação

Classe A: Todas as unidades de vedação, seus elementos de fixação e peças individuais de estruturas sem vedação. Toda edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical não exceda a 20m.

Classe B: Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja entre 20m e 50m.

Classe C: Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda a 50m.”

c) Determinados os valores dos fatores S_1 , S_2 e S_3 , encontra-se a velocidade característica do vento, para cada faixa de altura da edificação, através da Eq. (4.3):

$$V_K = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot V_0 \quad (4.3)$$

d) Conhecidos os valores de V_K em m/s para cada faixa de altura da edificação, serão então calculados os valores da pressão dinâmica nessas faixas.

$$q(kg/m^2) = \frac{V_K^2}{16} \quad (4.4 - a)$$

$$q(N/m^2) = 0,613 \cdot V_K^2 \quad (4.4 - b)$$

Tab. 4.2 – Fator S_2

z (m)	Categoria														
	I			II			III			IV			V		
	Classe			Classe			Classe			Classe			Classe		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
≤ 5	1,06	1,04	1,01	0,94	0,92	0,89	0,88	0,86	0,82	0,79	0,76	0,73	0,74	0,72	0,67
10	1,10	1,09	1,06	1,00	0,98	0,95	0,94	0,92	0,88	0,86	0,83	0,80	0,74	0,72	0,67
15	1,13	1,12	1,09	1,04	1,02	0,99	0,98	0,96	0,93	0,90	0,88	0,84	0,79	0,76	0,72
20	1,15	1,14	1,12	1,06	1,04	1,02	1,01	0,99	0,96	0,93	0,91	0,88	0,82	0,80	0,76
30	1,17	1,17	1,15	1,10	1,08	1,06	1,05	1,03	1,00	0,98	0,96	0,93	0,87	0,85	0,82
40	1,20	1,19	1,17	1,13	1,11	1,09	1,08	1,06	1,04	1,01	0,99	0,96	0,91	0,89	0,86
50	1,21	1,21	1,19	1,15	1,13	1,12	1,10	1,09	1,06	1,04	1,02	0,99	0,94	0,93	0,89
60	1,22	1,22	1,21	1,16	1,15	1,14	1,12	1,11	1,09	1,07	1,04	1,02	0,97	0,95	0,92
80	1,25	1,24	1,23	1,19	1,18	1,17	1,16	1,14	1,12	1,10	1,08	1,06	1,01	1,00	0,97
100	1,26	1,26	1,25	1,22	1,21	1,20	1,18	1,17	1,15	1,13	1,11	1,09	1,05	1,03	1,01
120	1,28	1,28	1,27	1,24	1,23	1,22	1,20	1,20	1,18	1,16	1,14	1,12	1,07	1,06	1,04
140	1,29	1,29	1,28	1,25	1,24	1,24	1,22	1,22	1,20	1,18	1,16	1,14	1,10	1,09	1,07
160	1,30	1,30	1,29	1,27	1,26	1,25	1,24	1,23	1,22	1,20	1,18	1,16	1,12	1,11	1,10
180	1,31	1,31	1,31	1,28	1,27	1,27	1,26	1,25	1,23	1,22	1,20	1,18	1,14	1,14	1,12
200	1,32	1,32	1,32	1,29	1,28	1,28	1,27	1,26	1,25	1,23	1,21	1,20	1,16	1,16	1,14
250	1,34	1,34	1,33	1,31	1,31	1,31	1,30	1,29	1,28	1,27	1,25	1,23	1,20	1,20	1,18
300	-	-	-	1,34	1,33	1,33	1,32	1,32	1,31	1,29	1,27	1,26	1,23	1,23	1,22
350	-	-	-	-	-	-	1,34	1,34	1,33	1,32	1,30	1,29	1,26	1,26	1,26
400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,34	1,32	1,32	1,29	1,29	1,29
420	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,35	1,35	1,33	1,30	1,30	1,30
450	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,32	1,32	1,32
500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,34	1,34	1,34

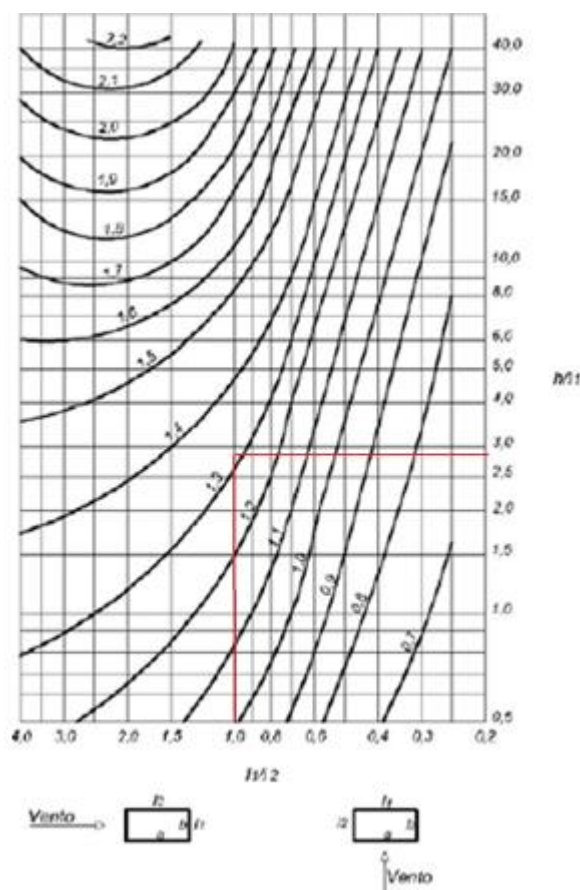
Fonte: ABNT NBR 6123:1988

Tab.4.3 – Valores mínimos do fator S_3

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

Fonte: ABNT NBR 6123:1988

e) Determina-se o coeficiente de arrasto, C_a , para o edifício, utilizando o ábaco mostrado na Fig. 4.4-a para vento de baixa turbulência ou o mostrado na Fig.4.4-b para vento de alta turbulência.

Fig. 4.4-a – Ábaco para o cálculo do C_a Vento com baixa turbulência

Fonte: ABNT NBR 6123:1988

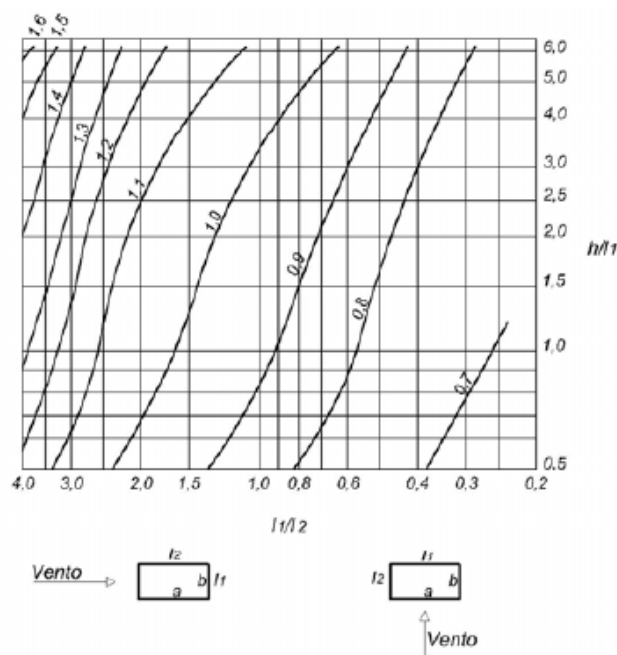


Fig. 4.4-b Ábaco para o cálculo do C_a Vento com alta turbulência
Fonte: ABNT NBR 6123:1988

Para a determinação da carga do vento na fachada de maior área, de dimensões B_x e H , Fig. 4.5, considera-se l_1 igual a B_x e l_2 igual a B_y ; sendo, desse modo, l_1/l_2 igual B_x/B_y . Em seguida, calcula-se h/l_1 igual a H/B_x . Entrando com esses valores no ábaco, Fig. 4.5, determina-se o valor do C_{a_y} . Para o cálculo da força do vento que incide na fachada de menor área, de dimensões B_y e H , o l_1 é igual ao B_y e o l_2 , ao B_x , sendo, agora l_1/l_2 igual B_y/B_x e h/l_1 igual a H/B_y . Entrando com esses valores em um dos ábacos das Figs. 4.4 obtém-se o valor do C_{a_x} .

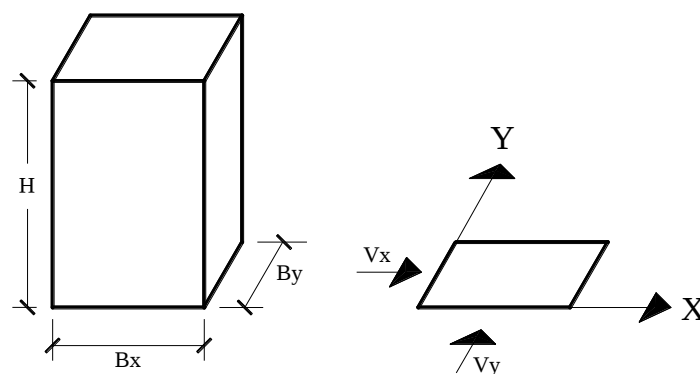


Fig. 4.5 – Edifício e direções do vento
Fonte: ABNT NBR 6123:1988

f) Calcula-se o efeito do vento em cada faixa de altura da edificação – Fig. 4.6. Em cada uma delas a força (em N/m^2) em estudo pode ser considerada uniformemente distribuída e seu valor será obtido pela expressão:

$$f_{vy} = C a_y q, \quad (4.5)$$

para o vento na direção Y , paralela à dimensão B_Y e

$$f_{vx} = C a_x q, \quad (4.6)$$

para o vento na direção X , paralela à dimensão B_X . Como mostrado na Fig.4.6.

A definição das faixas horizontais acima referidas pode se dar de várias maneiras diferentes. Uma delas é proceder de acordo com a indicação de altura da Tab. 4.2, através da qual são obtidas faixas com 5 m e 10 m de altura, outra maneira é fazer coincidir a largura de cada faixa com a altura dos pavimentos da edificação, a terceira opção é fazer com que a largura de cada faixa horizontal se estenda da cota média de um pavimento até a cota média do pavimento que esta imediatamente acima, de acordo com a Fig. 4.6.

Na prática, a última das opções parece ser a melhor delas, os resultados são obtidos mais facilmente e apresentam ótima aproximação. O segundo caminho é utilizado com frequência no cálculo automático, enquanto as consideração da primeira maneira conduz a resultados com menor precisão e maior quantidade de operações aritméticas.

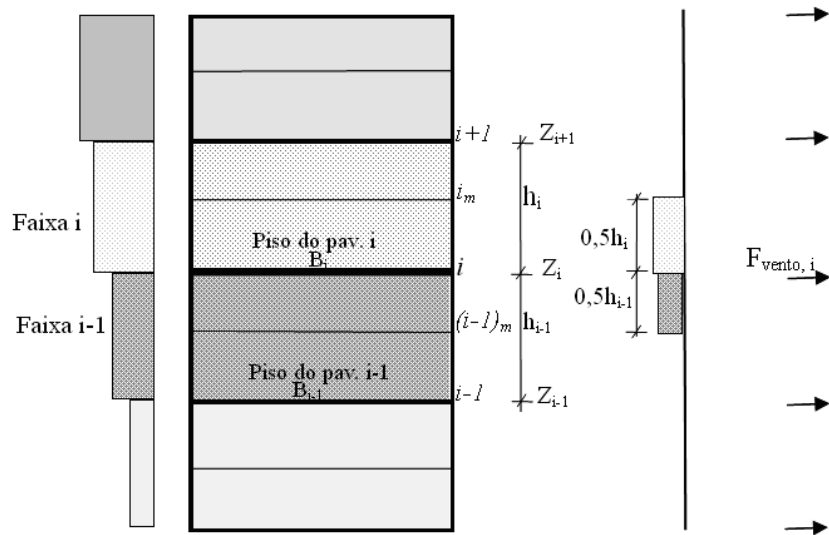


Fig. 4.6 – Faixas consideradas no cálculo da força do vento

Fonte: Cruz, Ferreira e Lucena

Para a obtenção do valor do fator S_2 em cada cota desejada utilizam-se a Eq. (4.7) com os parâmetros b , p e F_r – apresentados na Tab. 4.4 - extraídos do subitem 5.3.3 da norma do vento.

$$S_2 = b F_r (Z/10)^p \quad (4.7)$$

Tab. 4.4 – Parâmetros meteorológicos

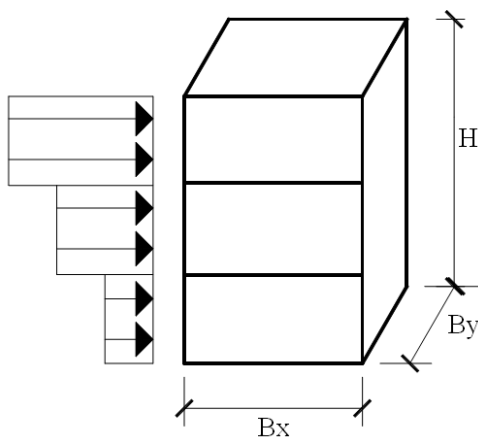
Categoria	Z_g (m)	Param.	Classes		
			A	B	C
I	250	b	1,10	1,11	1,12
		p	0,06	0,065	0,07
II	300	b	1,00	1,00	1,00
		F_r	1,00	0,98	0,95
		p	0,085	0,09	0,10
III	350	b	0,94	0,94	0,93
		p	0,10	0,105	0,115
IV	420	b	0,86	0,85	0,84
		p	0,12	0,125	0,135
V	500	b	0,74	0,73	0,71
		p	0,15	0,16	0,175

Fonte: ABNT NBR 6123:1988

Onde Z é a cota para a qual se calcula o fator S_2 e Z_g a altura que define o contorno superior da camada atmosférica.

g) Agora são calculados os carregamentos, uniformemente distribuídos por faixa de altura: uma na direção X e a outra na direção Y, ambas as direções da projeção horizontal da edificação, como mostrado para a força na direção X, na Fig. 4.7. A distribuição da força do vento (em N/m) para cada faixa horizontal na direção X é obtida através da equação (4.8) e da direção Y, através da Eq. (4.9)

$$f_{vx}^* = C_{a_x} q B_y \quad (4.8)$$

Fig. 4.7 – Distribuição da força do vento na fachada $B_y \times H$

Fonte: ABNT NBR 6123:1988

$$f_{vy}^* = C_{a_y} q B_x \quad (4.9)$$

h) obtêm-se as forças concentradas que atuam nos níveis de vigamento da edificação, mostradas na Fig. 4.8, através das Eqs. (4.10) para as forças da direção X e (4.11) para as da direção Y, considerada a terceira definição das faixas horizontais.

i) dividindo o somatório dos momentos calculados com as forças de arrasto na base da edificação pelo somatório destas forças, obtém-se a cota de aplicação da força de arrasto total que atua naquela fachada da edificação em análise.

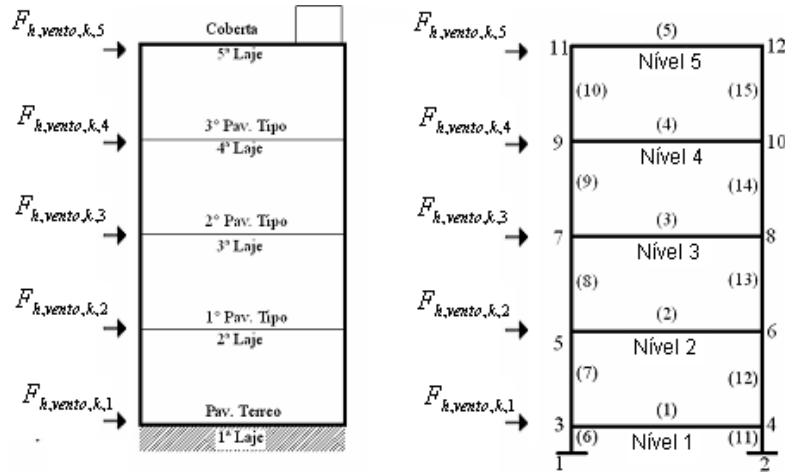


Fig. 4.8 – forças concentradas devido ao vento incidente na fachada maior, $B \times H$, atuando nos níveis de vigamento ou nós do pórtico
Fonte: Cruz, Ferreira e Lucena

$$F_{h,vento,x,i} = Ca_x (q_i B_{y,i} h_i + q_{i-1} B_{y,i-1} h_{i-1}) 0,5 \quad (4.10)$$

$$F_{h,vento,y,i} = Ca_y (q_i B_{x,i} h_i + q_{i-1} B_{x,i-1} h_{i-1}) 0,5 \quad (4.11)$$

onde i indica o nível de vigamento ou o pavimento da edificação.

5. A AÇÃO DO VENTO NAS ESTRUTURAS E A TORÇÃO NOS EDIFÍCIOS

5.1. A torção nos edifícios de arquitetura regular (seção transversal constante) e projeção horizontal retangular

5.1.1. Torção nos edifícios de arquitetura regular, projeção horizontal quadrada e sistema estrutural de contraventamento simétrico

Neste subitem será apresentado um exemplo de edifício normatizado (isto é: com projeção horizontal quadrada coincidindo com sua seção transversal que é constante ao longo de toda a altura) com SEC simétrico em relação aos dois eixos x e y, cuja maquete arquitetônica esta mostrada na Fig. 5.1-a e o modelo reduzido no túnel de vento, na Fig. 5.1-b.

Nas Figuras 5.2, 5.3 e 5.4 são mostrados, respectivamente, a seção transversal com indicação do Centro de Torção e ângulo de referência para verificação da incidência do vento, um gráfico com resultados para o momento torçor obtidos para a base da edificação e obtidos em Túnel de Vento e cortes verticais.

Julga-se importante notar que, sob estas condições, o efeito de torção verificado é decorrente total e unicamente da ação do vento e das condições de vizinhança quando consideradas. Trata-se do edifício Odebrecht Atlanta, cujas características geométricas e de rugosidade, extraídas de Siqueira (2009), são indicadas a seguir:

$$H = 129,20m$$

$$B_x = a = B_y = b = 44,45m$$

CT Coincidindo com *CC*

Rugosidade do terreno: Entre as categorias III e IV



Fig. 5.1 Edifícios Odebrecht Atlanta

a) Maquete arquitetônica e b) Modelo reduzido para ensaio em Túnel de Vento

Fonte: Loredo-Souza (2007) citado em Siqueira (2009; p.39)

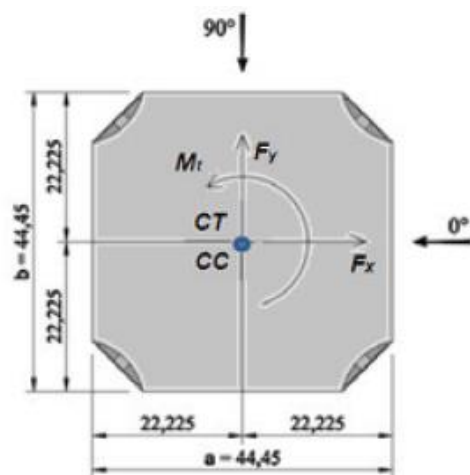


Fig. 5.2. Seção transversal com referencial para indicação do ângulo de incidência do vento e indicação do CT e do CC
Fonte: Loredo-Souza(2007) citado em Siqueira (2009; p.39)

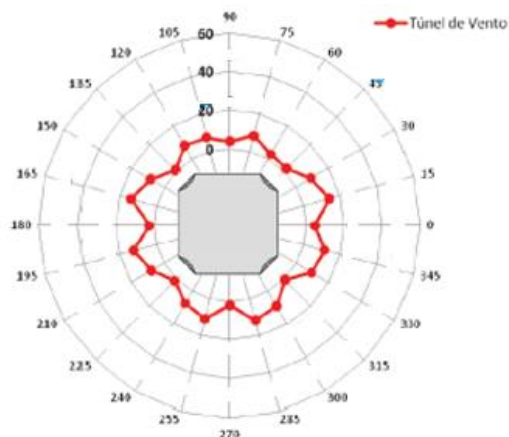


Fig. 5.3. Gráfico com valores do momento torçor na base da edificação, obtidos em ensaios no Túnel de Vento
Fonte: Loredo-Souza (2007) citado em Siqueira (2009; p.39)

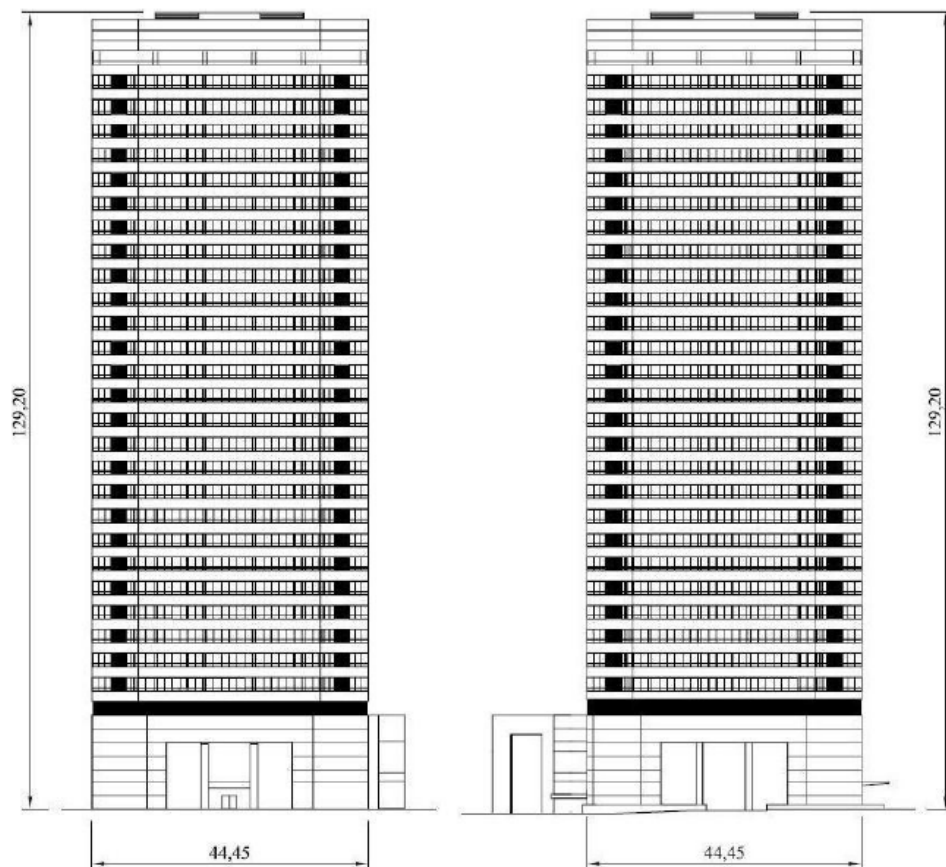


Fig.5.4. Cortes verticais
Fonte: Arrais (2011; p.61)

5.1.1.1. Cálculo do momento torçor com as excentricidades e_a e/ou e_b da Norma do Vento

Aqui serão calculados os valores do momento torçor na base do edifício a partir dos parâmetros constantes da Tab. 5.1. Estes parâmetros foram obtidos em Siqueira (2009; p.67) e/ou calculados conforme orientação da ABNT NBR 6123:1988.

Tab. 5.1- Parâmetros para utilização da Norma do Vento (Edifício Odebrecht Atlanta)

$V_0(\text{m/s})$	$a=B_x(\text{m})$	$b=B_y(\text{m})$	$H(\text{m})$	S_1	S_2	S_3	$V_k(\text{m/s})$	$q(\text{kPa})$	$C_{ax}=C_{ay}$	e_a/a (%)	
38,00	44,45	44,45	129,2	1	1,214	1	46,14	1,30	1,31	CV	15
										SV	7,5

Fonte: Adaptado de Siqueira (2009; p.67)

Cálculos utilizando fórmulas e definições da ABNT NBR 6123:1988:

- Vento a 0°

Cálculo do Coeficiente de Arrasto em X (conforme letra e do subitem 4.3.2). Vide Fig. 4.4-a; p. 30

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{B_x}{B_y} = \frac{44,45}{44,45}$$

$$\frac{H}{l_1} = \frac{H}{B_x} = \frac{129,2}{44,45} = 2,91$$

$$C_{ax} = 1,31 \quad (5.1)$$

Determinação da força de arrasto F_{ax} (conforme Eq. 4.1- a).

$$F_{ax} = 1,31 \times 1,30 \times 44,45 \times 129,2 = 9,78 \text{ MN} \quad (5.2)$$

Cálculo da excentricidade e_b (conforme item 6.6.2 da Norma do Vento)

$e_b = 15\%$ de B_y com efeito de vizinhança

$$e_b = 0,15 \times 44,45 = 6,67 \text{ m} \quad (5.3)$$

Cálculo do momento torçor na base do edifício (Com vizinhança) (conforme Eq.4.2 - b)

$$M_t = F_{ax} \times e_b = 9,78 \times 6,67 = 65,23 \text{ MNm} \quad (5.4)$$

Cálculo do momento torçor na base do edifício (Sem vizinhança)

$$M_t = F_{ax} \times e_b = 9,78 \times 3,05 = 32,62 MNm \quad (5.5)$$

- Vento a 90°

Obtenção do Coeficiente de Arrasto em Y (conforme letra *e* do subitem 4.3.2)

$$C_{ay} = C_{ax} = 1,31 \quad (5.6)$$

Determinação da força de arrasto F_{ay} (conforme Eq. 4.1- b)

$$F_{ay} = F_{ax} = 1,31 \times 1,30 \times 44,45 \times 129,2 = 9,78 MN \quad (5.7)$$

Cálculo da excentricidade e_a (conforme item 6.6.2 da Norma do Vento)

$e_a = 15\%$ de B_x com efeito de vizinhança

$$e_a = e_b = 0,15 \times 44,45 = 6,67 m \quad (5.8)$$

Cálculo do momento torçor na base do edifício (Com vizinhança, conforme Eq. 4.2 - b)

$$M_t = F_{ay} \times e_a = F_{ax} \times e_b = 9,78 \times 6,67 = 65,23 MNm \quad (5.9)$$

Cálculo do momento torçor na base do edifício (Sem vizinhança)

$$M_t = F_{ay} \times e_a = 9,78 \times 3,05 = 33,62 MNm \quad (5.10)$$

5.1.2. Torção nos edifícios de arquitetura regular (seção transversal constante) com projeção horizontal quadrada e SEC assimétrico

Neste subitem será apresentado um exemplo de edifício normatizado (projeção horizontal quadrada coincidindo com sua seção transversal, que é constante ao longo de toda a altura) com SEC assimétrico em relação ao eixo y, cuja maquete arquitetônica está indicada na Fig. 5.5 e o modelo reduzido no túnel de vento, na Fig. 5.6-b. Nas Fig. 5.6 e 5.7 estão mostrados, na ordem, a seção transversal com indicação do Centro de Torção e o ângulo de referência para verificação da incidência do vento, um gráfico com resultados para o momento torçor obtidos para a base da edificação e obtidos em Túnel de Vento.

Julga-se importante notar que sob estas condições o efeito de torção verificado é decorrente da ação do vento combinada com a assimetria do SEC. Trata-se do edifício Cristal Tower cujas características geométricas e de rugosidade, extraídas de Siqueira (2009, p. 67) são indicadas a seguir:

$$H = 86,16m$$

$$Bx = a = By = b = 27,30m$$

$$CT \text{ não coincidindo com } CC : \text{excentricidades } \begin{aligned} ex &= -0,40m \\ ey &= +0,00m \end{aligned}$$

Rugosidade do terreno: Categorias I de 250^0 a 30^0

Entre as categorias III e IV de 45^0 a 240^0



Fig. 5.5. Maquete arquitetônica do edifício Cristal Tower
Fonte: Loredou-Souza (2008) em Siqueira (2009; p.37)

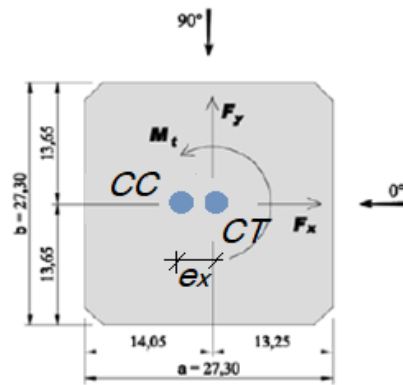


Fig. 5.6. Seção transversal com referencial para indicação do ângulo de incidência do vento e do CT e do CC.

Fonte: Loredou-Souza(2008) citado em Siqueira (2009; p.38)

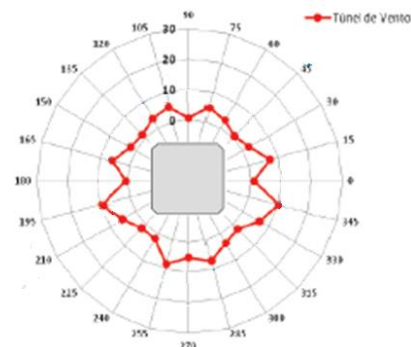


Fig. 5.7. Gráfico com valores do momento e indicação do torçor na base da edificação obtidos em ensaios no Túnel de Vento.

Fonte: Loredou-Souza (2008) citado em Siqueira (2009; p.38)

5.1.2.1. Cálculo do momento torçor com as excentricidades e_a e/ou e_b da Norma do Vento

Tab. 5.2- Parâmetros para utilização da Norma do Vento (Edifício Cristal Tower)

V_0 (m/s)	$a=B_x$ (m)	$b=B_y$ (m)	H (m)	S_1	S_2	S_3	V_k (m/s)	q (kPa)	$C_{ax}=C_{ay}$	e_a/a (%)	
46	27,3	27,3	86,16	1	1,184	1	54,50	1,82	1,31	CV	15
										SV	7,5

Fonte: Adaptado de Siqueira (2009; p.67)

Cálculos utilizando formulas e definições da ABNT NBR 6123:1988

- Vento a 0°

Cálculo do Coeficiente de Arrasto em X (conforme letra e do subitem 4.3.2)

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{27,3}{27,3} = 1,0$$

$$\frac{H}{l_1} = \frac{86,16}{27,3} = 3,15$$

$$C_{ax} = 1,31 \quad (5.11)$$

Determinação da força de arrasto F_{ax} (conforme Eq. 4.1 - a)

$$F_{ax} = 1,31 \times 1,82 \times 27,30 \times 86,16 = 5.651 \text{ MN} \quad (5.12)$$

Cálculo da excentricidade e_b (conforme item 6.6.2 da Norma do Vento)

$e_b = 15\%$ de B_y com efeito de vizinhança

$$e_b = 0,15 \times 27,3 = 4,09m \quad (5.13)$$

Cálculo do momento torçor na base do edifício (Com vizinhança, conforme Eq. 4.2 - b)

$$M_t = F_{ax} \times e_b = 5,65 \times 4,09 = 23,14 MNm \quad (5.14)$$

Cálculo do momento torçor na base do edifício (Sem vizinhança)

$$M_t = F_{ax} \times e_b = 5,65 \times 2,04 = 11,57 MNm \quad (5.15)$$

- Vento a 90°

Obtenção do Coeficiente de Arrasto em Y (conforme letra e do subitem 4.3.2)

$$C_{ay} = C_{ax} = 1,31 \quad (5.16)$$

Determinação da força de arrasto F_{ay} (conforme Eq. 4.1 - a)

$$F_{ay} = F_{ax} = 1,31 \times 1,82 \times 27,30 \times 86,16 = 5.651 MN \quad (5.17)$$

Cálculo da excentricidade e_a (conforme item 6.6.2 da Norma do Vento)

$e_a = 15\%$ de B_x com efeito de vizinhança

$$e_a = e_b = 0,15 \times 27,3 = 4,09m \quad (5.18)$$

Cálculo do momento torçor na base do edifício (Com vizinhança, conforme Eq. 4.1 - b)

$$M_t = F_{ay} \times e_a = F_{ax} \times e_b = 5,65 \times 4,09 = 23,14 MNm \quad (5.19)$$

Cálculo do momento torçor na base do edifício (Sem vizinhança)

$$M_t = F_{ay} \times e_a = 5,65 \times 2,04 = 11,57 MNm \quad (5.20)$$

5.2. A torção nos edifícios de arquitetura regular (seção transversal constante) e projeção horizontal retangular e SEC com simetria de rigidez

Neste subitem será apresentado um exemplo de edifício normatizado (projeção horizontal retangular coincidindo com sua seção transversal que é constante ao longo de toda a altura) com SEC simétrico (em rigidez) em relação aos eixos X e Y , cuja maquete arquitetônica esta mostrada na Fig. 5.8-a e o modelo reduzido no túnel de vento, na figura 5.8-b. Nas Figs. 5.9, 5.10 e 5.11 são mostrados, respectivamente, a seção transversal com indicação do Centro de Torção e ângulo de referência para verificação da incidência do vento, um gráfico com resultados para o momento torçor obtidos para a base da edificação e obtidos em Túnel de Vento e um corte vertical.

Julga-se importante notar que sob estas condições o efeito de torção verificado é decorrente da ação do vento combinada com os efeitos de vizinhança. Trata-se do edifício L'Essence Jardins cujas características geométricas e de rugosidade, extraídas de Carpeggiani (2004) são indicadas a seguir:

$$H = 120,10m$$

$$B_x = a = 40,74m$$

$$B_y = b = 17,30m$$

$$CT \text{ coincidindo com } CC : \text{excentricidades } ex = ey = 0$$

Rugosidade do terreno: Entre as categorias III e IV



Fig. 5.8 Edifício L'Essence Jardins

a) Maquete arquitetônica e b) Modelo reduzido para ensaio em Túnel de Vento

Fonte: Carpeggiani (2004; p.57)

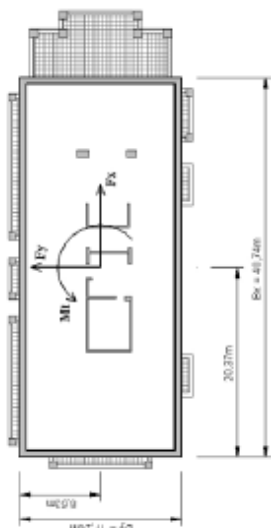


Fig. 5.9. Seção transversal com referencial para indicação do ângulo de incidência do vento do CT e do CC.

Fonte: Carpeggiani (2004; p.58)

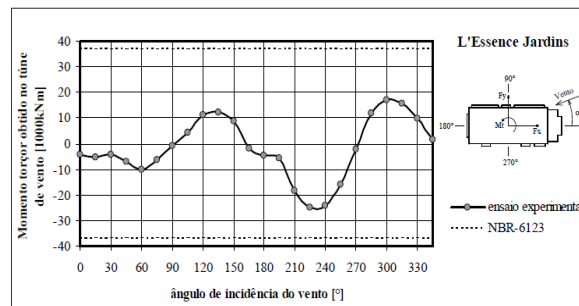


Fig. 5.10. Gráfico com valores do momento torçor na base da edificação, obtidos em ensaios no T.V.

Fonte: Carpeggiani (2004; p.91)

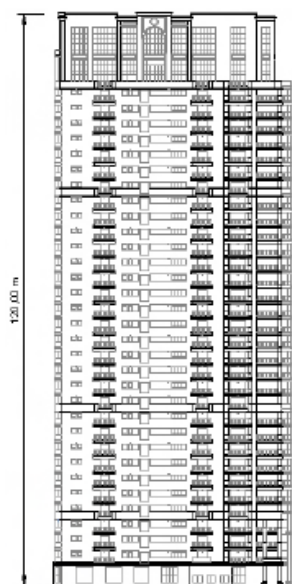


Fig. 5.11. Corte vertical

Fonte: Carpeggiani (2004; p.58)

5.2.1. Cálculo do momento torçor com as excentricidades e_a e/ou e_b da Norma do Vento

Tab. 5.3- Parâmetros para utilização da Norma do Vento (Edifício L'Essence Jardins)

V_0 (m/s)	$a=B_x$ (m)	$b=B_y$ (m)	H (m)	S_1	S_2	S_3	V_k (m/s)	q (kPa)	$C_{ax}=C_{ay}$	e_a/a (%)
38	40,74	17,30	120,1	1	1,15	1	43,6	1,17	C_{ax} 1,42 C_{ay} 1,10	15

Fonte: Adaptado de Carpeggiani (2004; p.56)

Cálculos utilizando formulas e definições da ABNT NBR 6123:1988

- Vento a 0°

Cálculo do Coeficiente de Arrasto em X (conforme letra e do subitem 4.3.2)

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{40,74}{17,26} = 2,36$$

$$\frac{H}{l_1} = \frac{120,1}{40,74} = 2,95$$

$$C_{ax} = 1,42 \quad (5.21)$$

Determinação da força de arrasto F_{ax} (conforme Eq. 4.1 - a)

$$F_{ax} = 1,42 \times 1,17 \times 17,26 \times 120,1 = 3,45 MN \quad (5.22)$$

Cálculo da excentricidade e_b (conforme item 6.6.2 da Norma do Vento)

$e_b = 15\%$ de B_y com efeito de vizinhança

$$e_b = 0,15 \times 17,26 = 2,59 m \quad (5.23)$$

Cálculo do momento torçor na base do edifício (Com vizinhança, conforme Eq. 4.2 - b)

$$M_t = F_{ax} \times e_b = 3,45 \times 2,59 = 8,94 MNm \quad (5.24)$$

Cálculo do momento torçor na base do edifício (Com vizinhança, conforme Eq. 4.2 - b)

$$M_t = F_{ax} \times e_b = 3,45 \times 1,30 = 4,47 MNm \quad (5.25)$$

- Vento a 90°

Obtenção do Coeficiente de Arrasto em Y (conforme letra e do subitem 4.3.2)

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{17,26}{40,74} = 0,42$$

$$\frac{H}{l_1} = \frac{120,1}{17,26} = 6,96$$

$$C_{ay} = 1,10 \quad (5.26)$$

Determinação da força de arrasto F_{ay} (conforme Eq. 4.1 - b)

$$F_{ay} = 1,10 \times 1,17 \times 40,74 \times 120,1 = 6,30 MN \quad (5.27)$$

Cálculo da excentricidade e_a (conforme item 6.6.2 da Norma do Vento)

$e_a = 15\%$ de B_x com efeito de vizinhança

$$e_a = 0,15 \times 40,74 = 6,11 m \quad (5.28)$$

Cálculo do momento torçor na base do edifício (Com vizinhança, conforme Eq. 4.2 - a)

$$M_t = F_{ay} \times e_a = 6,30 \times 6,11 = 38,49 MNm \quad (5.29)$$

Cálculo do momento torçor na base do edifício (Sem vizinhança)

$$M_t = F_{ay} \times e_a = 6,30 \times 3,05 = 12,25 MNm \quad (5.30)$$

5.3. Torção nos edifícios de arquitetura não regular (seção transversal variada) e projeção horizontal não retangular

5.3.1. Edifício Prosperitas

Neste subitem será apresentado um exemplo de edifício não normatizado (projeção horizontal não retangular e seção transversal variando ao longo da altura) com SEC assimétrico em relação aos eixos X e Y , cuja maquete arquitetônica está mostrada na Fig. 5.12-a e o modelo reduzido no túnel de vento, na figura 5.12-b. Nas Figs. 5.13, 5.14 e 5.15 são mostrados, respectivamente, a seção transversal com indicação do Centro de

Torção e ângulo de referência para verificação da incidência do vento, um gráfico com resultados para o momento torçor obtidos para a base da edificação e obtidos em Túnel de Vento e as fachadas.

Julga-se importante notar que sob estas condições o efeito de torção verificado é decorrente da ação do vento combinada com os efeitos de vizinhança. Trata-se do edifício Prosperitas cujas características geométricas e de rugosidade, extraídas de Siqueira (2009) são indicadas a seguir:

$$H = 146,72m$$

$$Bx = a = 66,63m$$

$$By = b = 33,96m$$

$$CT \text{ coincidindo com } CC : \text{excentricidades } ex = -11,265m$$

$$ey = +0,36m$$

Rugosidade do terreno: Entre as categorias III e IV



Fig. 5.12 Edifício Prosperitas

a) Maquete arquitetônica e b) Modelo reduzido para ensaio em Túnel de Vento

Fonte: Loredou-Souza (2007) em Siqueira (2009; p.41-42)

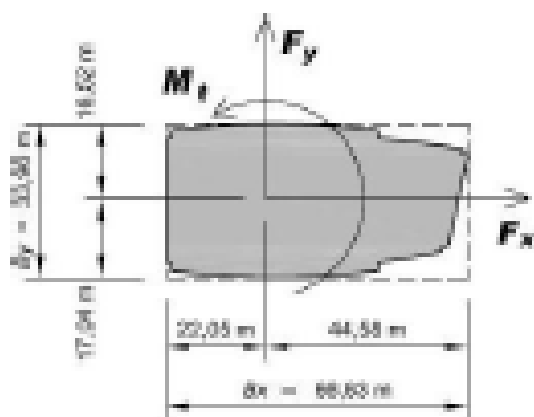


Fig.5.13.Seção transversal com referencial para indicação do ângulo de incidência do vento e indicação do CT e do CC.
Fonte: Loredo-Souza (2007) citado em Siqueira (2009; p.42)

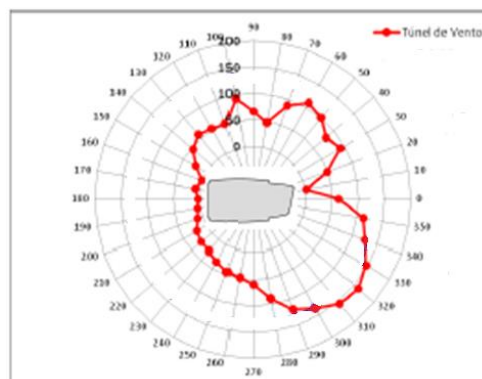


Fig.5.14. Gráfico com valores do momento torçor na base da edificação, obtidos em ensaios no T.V.
Fonte: Loredo-Souza (2007), adaptado do citado em Siqueira (2009; p.)

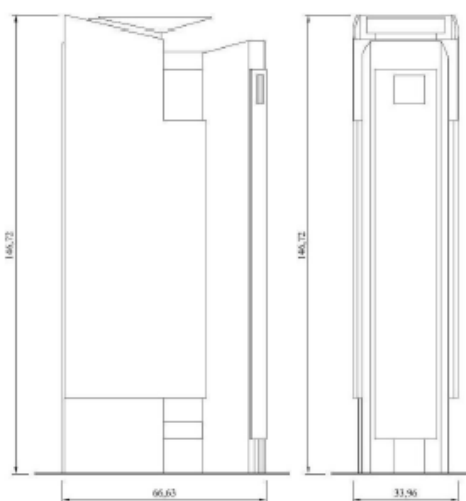


Fig. 5.15. Fachadas
Fonte: Arrais (2011; p. 69)

5.3.1.1. Cálculo do momento torçor com as excentricidades e_a e/ou e_b da Norma do Vento

Tab. 5.4- Parâmetros para utilização da Norma do Vento (Edifício Prosperitas)

V_0 (m/s)	$a=B_x$ (m)	$b=B_y$ (m)	H(m)	S_1	S_2	S_3	V_k (m/s)	q (kN/m ²)	C_{ax}	C_{ay}
38	66,63	33,96	146,72	1	1,229	1	46,70	1,34	1,38	1,05

Fonte: Adaptado de Siqueira (2009; p.67)

Cálculos utilizando formulas e definições da ABNT NBR 6123:1988

- Vento a 0°

Cálculo do Coeficiente de Arrasto em X (conforme letra e do subitem 4.3.2)

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{33,96}{66,63} = 0,51$$

$$\frac{H}{l_1} = \frac{146,72}{33,96} = 4,32$$

$$C_{ax} = 1,38 \quad (5.31)$$

Determinação da força de arrasto F_{ax} (conforme Eq. 4.1 - a)

$$F_{ax} = 1,38 \times 1,34 \times 33,96 \times 146,72 = 9,21 MN \quad (5.32)$$

Cálculo da excentricidade e_a (conforme item 6.6.2 da Norma do Vento)

$e_b = 15\%$ de B_y com efeito de vizinhança

$$e_a = 0,15 \times 33,96 = 5,09 m \quad (5.33)$$

Cálculo do momento torçor na base do edifício (com vizinhança, conforme Eq. 4.2 - b)

$$M_t = F_{ax} \times e_b = 9,21 \times 5,09 = 46,89 MNm \quad (5.34)$$

Cálculo do momento torçor na base do edifício (sem vizinhança)

$$M_t = F_{ax} \times e_b = 4,6 \times 2,54 = 23,44 MNm \quad (5.35)$$

- Vento a 90°

Cálculo do Coeficiente de Arrasto em Y (conforme letra e do subitem 4.3.2)

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{66,63}{33,96} = 1,96$$

$$\frac{H}{l_1} = \frac{146,72}{66,63} = 2,20$$

$$C_{ay} = 1,05 \quad (5.36)$$

Determinação da força de arrasto F_{ax} (conforme Eq. 4.1 - a)

$$F_{ay} = 1,05 \times 1,34 \times 66,63 \times 146,72 = 14,62 MN \quad (5.37)$$

Cálculo da excentricidade e_a (conforme item 6.6.2 da Norma do Vento)

$e_a = 15\%$ de B_x com efeito de vizinhança

$$e_a = 0,15 \times 66,63 = 9,99 m \quad (5.38)$$

Cálculo do momento torçor (com vizinhança, conforme Eq. 4.2 - b)

$$M_t = F_{ax} \times e_b = 14,62 \times 9,99 = 146,08 MNm \quad (5.39)$$

Cálculo do momento torçor na base do edifício (sem vizinhança)

$$M_t = F_{ax} \times e_b = 14,62 \times 5,00 = 73,04 MNm \quad (5.40)$$

5.3.2. Edifício Comendador Araújo

Neste subitem será apresentado um exemplo de edifício não normatizado (projeção horizontal não retangular com seção transversal que não é constante ao longo de toda a altura) com SEC assimétrico em relação aos eixos X e Y , cuja maquete arquitetônica está mostrada na Fig. 5.16-a e o modelo reduzido no túnel de vento, na Fig. 5.16-b. Nas Figs. 5.17 e 5.18 são mostrados, respectivamente, a seção transversal com indicação do Centro de Torção e ângulo de referência para verificação da incidência do vento, e um gráfico com resultados para o momento torçor obtidos para a base da edificação e obtidos em Túnel de Vento.

Julga-se importante notar que sob estas condições o efeito de torção verificado é decorrente da ação do vento combinada com os efeitos de vizinhança e com as excentricidades do CT. Trata-se do edifício Comendador Araújo cujas características geométricas e de rugosidade, extraídas de Siqueira (2009) são indicadas a seguir:

$$H = 152,08 m$$

$$B_x = a = 47,05 m$$

$$B_y = b = 22,55m$$

CT não coincidindo com CC : excentricidades $e_x = -1,10$

$$e_y = +3,37$$

Rugosidade do terreno: Entre as categorias III e IV



Fig. 5.16 Edifício Comendador Araújo

a) Maquete arquitetônica e b) Modelo reduzido para ensaio em Túnel de Vento

Fonte: Loredo-Souza (2007) citado em Siqueira (2009; p.40)

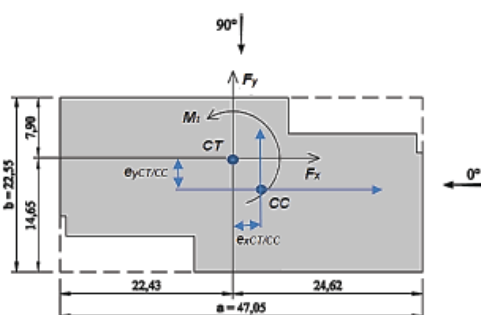


Fig.5.17.Seção transversal com referencial para indicação do ângulo de incidência do vento e do CT e do CC

Fonte: Loredo-Souza (2007) citado em Siqueira (2009; p.40)

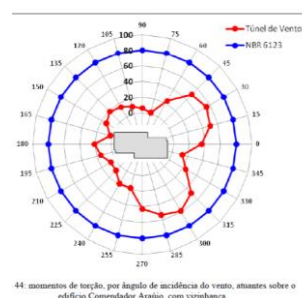


Fig.5.18. Gráfico com valores do momento torçor na base da edificação, obtidos em ensaios no T.V. Fonte: Loredo-Souza (2007) adaptado do citado em Siqueira (2009; p.54)

5.3.2.1. Cálculo do momento torçor com as excentricidades e_a e/ou e_b da Norma do Vento

Tab. 5.5- Parâmetros para utilização com a Norma do Vento (Edifício Comendador Araújo)

V_0 (m/s)	$a=B_x$ (m)	$b=B_y$ (m)	H (m)	S_1	S_2	S_3	V_k (m/s)	q (kN/m ²)	C_{ax}	C_{av}
41	47,05	22,55	152,08	1	1,329	1	54,49	1,82	1,00	1,43

Fonte: Adaptado de Siqueira (2009; p.67)

Cálculos utilizando formulas e definições da ABNT NBR 6123:1988

- Vento a 0°

Cálculo do Coeficiente de Arrasto em X (conforme letra e do subitem 4.3.2.)

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{22,55}{47,05} = 0,48$$

$$\frac{H}{l_1} = \frac{152,08}{22,55} = 6,74$$

$$C_{ax} = 1,00 \quad (5.41)$$

Determinação da força de arrasto F_{ax} (conforme Eq. 4.1 - a)

$$F_{ax} = 1,00 \times 1,82 \times 22,55 \times 152,08 = 6,10 MN \quad (5.42)$$

Cálculo da excentricidade e_b (conforme item 6.6.2 da Norma do Vento)

$e_b = 15\%$ de B_y com efeito de vizinhança

$$e_a = 0,15 \times 22,55 = 3,38 m \quad (5.43)$$

Cálculo do momento torçor na base do edifício (com vizinhança, conforme Eq. 4.2 - b)

$$M_t = F_{ax} \times e_b = 6,10 \times 3,38 = 20,62 MNm \quad (5.44)$$

Cálculo do momento torçor na base do edifício (Sem vizinhança)

$$M_t = F_{ax} \times e_b = 6,10 \times 1,269 = 10,31 MNm \quad (5.45)$$

- Vento a 90°

Cálculo do Coeficiente de Arrasto em Y (conforme letra e do subitem 4.3.2.)

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{47,05}{22,55} = 2,09$$

$$\frac{H}{l_1} = \frac{152,08}{47,05} = 3,23$$

$$C_{ay} = 1,00 \quad (5.46)$$

Determinação da força de arrasto F_{ay} (conforme Eq. 4.1 - a)

$$F_{ay} = 1,00 \times 1,82 \times 47,05 \times 152,08 = 13,02 MN \quad (5.47)$$

Cálculo da excentricidade e_a (conforme item 6.6.2 da Norma do Vento)

$e_a = 15\%$ de B_x com efeito de vizinhança

$$e_a = 0,15 \times 47,05 = 7,06 m \quad (5.48)$$

Cálculo do momento torçor na base do edifício (Com vizinhança, conforme Eq.4.2 - b)

$$M_t = F_{ay} \times e_a = 13,02 \times 7,06 = 91,93 MNm \quad (5.49)$$

Cálculo do momento torçor na base do edifício (sem vizinhança, conforme Eq.4.2 - b)

$$M_t = F_{ay} \times e_a = 13,02 \times 3,53 = 45,96 MNm \quad (5.50)$$

5.4. A torção nos edifícios de arquitetura regular e projeção horizontal constante fracamente assemelhável à retangular

Aqui será apresentado um exemplo de edifício não normatizado (projeção horizontal não retangular porém com seção transversal constante ao longo de toda a altura) com SEC assimétrico em relação aos eixo Y, cuja maquete arquitetônica esta mostrada na Fig. 5.19-a e o modelo reduzido no túnel de vento, na Fig. 5.19-b. Nas Figs. 5.20 e 5.21 são mostrados, respectivamente, a seção transversal com indicação do Centro de Torção e ângulo de referência para verificação da incidência do vento, e um gráfico com resultados para o momento torçor obtidos para a base da edificação e obtidos em Túnel de Vento.

Julga-se importante notar que sob estas condições o efeito de torção verificado é decorrente da ação do vento combinada com os efeitos de vizinhança e com a excentricidade do CT. Trata-se do Edifício CENU – Torre IV cujas características geométricas e de rugosidade, extraídas de Siqueira (2009) são indicadas a seguir:

$$H = 124,00m$$

$$B_x = a = 60,18m$$

$$B_y = b = 57,54m$$

CT não coincidindo com CC : excentricidades $e_x = 0,0m$

$$e_y = +4,12m$$

Rugosidade do terreno: Entre as categorias III e IV



Fig. 5.19 Edifício CENU – Torre IV
a) Maquete arquitetônica e b) Modelo reduzido para ensaio em Túnel de Vento
Fonte: Loredo-Souza (2007) em Siqueira (2009; p.44)

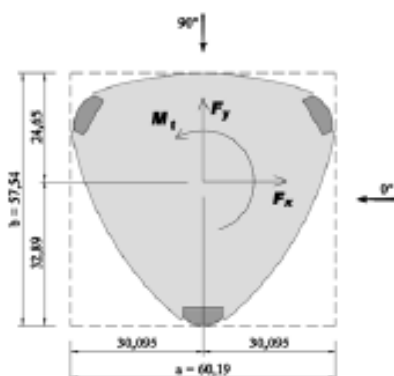


Fig.5.20. Seção transversal com referencial para indicação do ângulo de incidência do vento e do CT e do CC
Fonte: Loredo-Souza (2007) citado em Siqueira (2009; p.44)

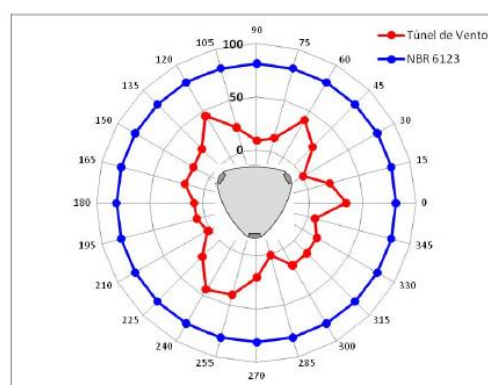


Fig.5.21. Gráfico com valores do momento torçor na base da edificação, obtidos em ensaios no T.V.
Fonte: Loredo-Souza (2007), citado em Siqueira (2009; p.58)

5.4.1. Cálculo do momento torçor com as excentricidades e_a e/ou e_b da Norma do Vento

Tab. 5.6- Parâmetros para utilização com a Norma do Vento (Edifício CENU – Torre IV)

$V_0(\text{m/s})$	$a=B_x(\text{m})$	$b=B_y(\text{m})$	$H(\text{m})$	S_1	S_2	S_3	$V_k(\text{m/s})$	$q(\text{kN/m}^2)$	C_{ax}	C_{ay}
38	60,19	57,54	124,0	1	1,329	1	40,39	1,00	1,25	1,23

Fonte: Adaptado de Siqueira (2009; p.67)

Cálculos utilizando formulas e definições da ABNT NBR 6123:1988

- Vento a 0°

Cálculo do Coeficiente de Arrasto em X (conforme letra e do subitem 4.3.2.)

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{57,54}{60,19} = 0,96$$

$$\frac{H}{l_1} = \frac{124,00}{57,84} = 2,15$$

$$C_{ax} = 1,25 \quad (5.51)$$

Determinação da força de arrasto F_{ax} (conforme Eq. 4.1 - a)

$$F_{ax} = 1,25 \times 1,00 \times 57,54 \times 124,00 = 8,19 \text{ MN} \quad (5.52)$$

Cálculo da excentricidade e_b (conforme item 6.6.2 da Norma do Vento)

$$e_b = 15\% \text{ de } B_y \text{ com efeito de vizinhança}$$

$$e_b = 0,15 \times 57,54 = 8,63 \text{ m} \quad (5.53)$$

Cálculo do momento torçor na base do edifício (Com vizinhança, conforme Eq. 4.2 - b)

$$M_t = F_{ax} \times e_b = 8,19 \times 8,63 = 70,68 \text{ MNm} \quad (5.54)$$

Cálculo do momento torçor na base do edifício (Sem vizinhança)

$$M_t = F_{ax} \times e_b = 8,19 \times 4,31 = 35,34 MNm \quad (5.55)$$

- Vento a 90°

Cálculo do Coeficiente de Arrasto em Y (conforme letra *e* do subitem 4.3.2.)

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{60,19}{57,54} = 1,04$$

$$\frac{H}{l_1} = \frac{124,0}{60,19} = 2,06$$

$$C_{ay} = 1,23 \quad (5.56)$$

Determinação da força de arrasto F_{ay} (conforme Eq.4.1 - b)

$$F_{ay} = 1,23 \times 1,00 \times 60,19 \times 124,0 = 9,18 MN \quad (5.57)$$

Cálculo da excentricidade e_a (conforme item 6.6.2 da Norma do Vento)

$e_a = 15\%$ de B_x com efeito de vizinhança

$$e_a = 0,15 \times 60,19 = 9,03 m \quad (5.58)$$

Cálculo do momento torçor na base do edifício (Com vizinhança, conforme Eq. 4.2 - a)

$$M_t = F_{ay} \times e_a = 9,18 \times 9,02 = 82,89 MNm \quad (5.59)$$

Cálculo do momento torçor na base do edifício (sem vizinhança, conforme Eq. 4.2 - a)

$$M_t = F_{ay} x e_a = 9,18 * 4,51 = 41,40 MNm \quad (5.60)$$

5.5. A torção nos edifícios de arquitetura regular e projeção horizontal constante fracamente assemelhável à retangular com SEC fortemente assimétrico

Desta vez mostra-se um exemplo de edifício não normatizado (projeção horizontal não retangular porém com seção transversal não constante ao longo de toda a altura) com SEC fortemente assimétrico em relação aos eixos X e Y, cuja maquete arquitetônica esta mostrada na Fig. 5.22-a e o modelo reduzido no túnel de vento, na Fig. 5.22-b. Nas Figs. 5.23-a;b e c são mostrados, respectivamente, a seção transversal com indicação do Centro de Torção e ângulo de referência para verificação da incidência do vento, e dois gráficos com resultados para o momento torçor obtidos para a base da edificação e obtidos em Túnel de Vento.

Julga-se importante notar que sob estas condições o efeito de torção verificado é decorrente da ação do vento combinada com os efeitos de vizinhança e com as excentricidades do CT. Trata-se do Edifício Unique Residence cujas características geométricas e de rugosidade, extraídas de Siqueira (2009; p. 67) são indicadas a seguir:

$$H = 111,96m$$

$$B_x = a = 31,42m$$

$$B_y = b = 13,48m$$

$$CT \text{ não coincidindo com } CC : \text{excentricidades } e_x = -8,47m$$

$$e_y = -5,69m$$

Rugosidade do terreno: Entre as categorias III e IV



Fig. 5.22 Edifício Unique Residence

a) Maquete arquitetônica e b) Modelo reduzido para ensaio em Túnel de Vento

Fonte: Loredo-Souza (2007) em Siqueira (2009; p.47)

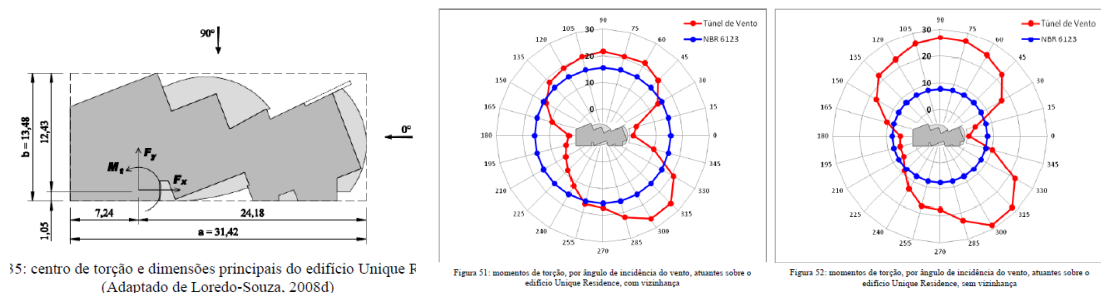


Fig. 5.23 a) Seção transversal com referencial para indicação do ângulo de incidência do vento e do CT e do CC; b) Gráfico com valores do momento torçor na base da edificação, obtidos em ensaios no T.V com indicação do ângulo de incidência do vento com vizinhança e c) Gráfico com valores do momento torçor na base da edificação, obtidos em ensaios no T.V com indicação do ângulo de incidência do vento sem vizinhança

5.5.1. Cálculo do momento torçor com as excentricidades e_a e/ou e_b da Norma do Vento

Tab. 5.7- Parâmetros para utilização com a Norma do Vento (Edifício Unique Residence)

V_0 (m/s)	$a=B_x$ (m)	$b=B_y$ (m)	H (m)	S_1	S_2	S_3	V_k (m/s)	q (kN/m ²)	C_{ax}	C_{av}
30	31,42	13,48	111,96	1	1,016	1	38,64	0,914	1,47	0,99

Fonte: Adaptado de Siqueira (2009; p.67)

Cálculos utilizando formulas e definições da ABNT NBR 6123:1988

- Vento a 0°

Cálculo do Coeficiente de Arrasto em X (conforme letra e do subitem 4.3.2.)

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{31,42}{13,48} = 2,33$$

$$\frac{H}{l_1} = \frac{111,96}{31,42} = 3,56$$

$$C_{ax} = 1,47 \quad (5.61)$$

Determinação da força de arrasto F_{ax} (conforme Eq. 4.1 - a)

$$F_{ax} = 1,47 \times 0,99 \times 13,48 \times 111,96 = 2,20 \text{ MN} \quad (5.62)$$

Cálculo da excentricidade e_b (conforme item 6.6.2 da Norma do Vento)

$e_b = 15\%$ de B_y com efeito de vizinhança

$$e_b = 0,15 \times 13,48 = 2,02m \quad (5.63)$$

Cálculo do momento torçor na base do edifício (Com vizinhança, conforme Eq. 4.2 - b)

$$M_t = F_{ax} \times e_b = 2,20 \times 2,02 = 4,45 MNm \quad (5.64)$$

Cálculo do momento torçor na base do edifício (Sem vizinhança)

$$M_t = F_{ax} \times e_b = 2,20 \times 1,01 = 2,23 MNm \quad (5.65)$$

- Vento a 90°

Cálculo do Coeficiente de Arrasto em Y (conforme letra e do subitem 4.3.2.)

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{13,48}{31,42} = 0,43$$

$$\frac{H}{l_1} = \frac{111,96}{13,48} = 8,3$$

$$C_{ay} = 0,99 \quad (5.66)$$

Determinação da força de arrasto F_{ay} (conforme Eq.4.1 - b)

$$F_{ay} = 0,99 \times 0,99 \times 31,42 \times 111,96 = 3,45 MN \quad (5.67)$$

Cálculo da excentricidade e_a (conforme item 6.6.2 da Norma do Vento)

$e_a = 15\%$ de B_x com efeito de vizinhança

$$e_a = 0,15 \times 31,42 = 4,71m \quad (5.68)$$

Cálculo do momento torçor na base do edifício (Com vizinhança, conforme Eq. 4.2 - a)

$$M_t = F_{ay} \times e_a = 3,45 * 4,71 = 16,26 MNm \quad (5.69)$$

Cálculo do momento torçor na base do edifício (sem vizinhança, conforme Eq. 4.2 - a)

$$M_t = F_{ay} \times e_a = 3,45 * 2,36 = 8,12 MNm \quad (5.70)$$

6. OBSERVAÇÕES

Nesta seção são apresentadas observações relativas aos valores de momento torçor aqui obtidos via ABNT NBR 6123:1988, a Norma do Vento, e os valores obtidos nas referências bibliográficas utilizadas e citadas. As observações são relatadas edifício por edifício dos sete apresentados neste TCC de modo que a análise de todo o material possa ser facilmente realizada.

I) Relativas ao Edifício Odebrecht Atlanta

Excentricidades do CT em relação ao CC nulas

Valor máximo do M_t obtido via TV (extraído de Arrais) igual a **14,3MNm**

Valor do M_t obtido via Norma do Vento para vento a 0^0 e 90^0 igual a **65,23MNm** considerando a vizinhança e igual a **33,62MNm** sem vizinhança.

II) Relativas ao Edifício Cristal Tower

Excentricidades do CT em relação ao CC não nulas

Valor máximo do M_t obtido via TV (extraído de Siqueira) igual a **10,40MNm**;

Valor do M_t obtido via Norma do Vento para vento a 0^0 e a 90^0 igual a **23,14MNm** considerando a vizinhança e igual a **11,57MNm** sem vizinhança

Quanto aos dois edifícios citados nos itens I e II, é possível observar que os valores de momento de torção obtidos via Norma são bem superiores aos obtidos via TV, seja para a avaliação considerando vizinhança ou no caso isolados. A comparação entre os resultados via Norma e via TV sugere inclusive que os valores da Norma podem conduzir a dimensionamento de estruturas bastante conservadoras.

Para o Edifício Odebrecht Atlanta o valor do momento de torção máximo calculado de acordo com a norma, $M_{t, \max, NBR}$, é 4,56 vezes maior que o valor do momento de torção máximo obtido através do Túnel de Vento, $M_{t, \max, TV}$, e para o Edifício Cristal Tower o $M_{t, \max, NBR}$ é 2,22 vezes maior que o $M_{t, \max, TV}$. Para estes dois edifícios os valores obtidos via Norma sem vizinhança são maiores que os valores obtidos no TV com vizinhança. Tais ocorrências são explicadas pelo fato de que cada um dos dois edifícios tem arquitetura regular com seção transversal retangular (quadrada) e constante.

III) Relativas ao Edifício L'Essence Jardins

Excentricidades do CT em relação ao CC não nulas

Valor máximo do M_t obtido via TV (extraído de Carpeggiani) igual a **26,00MNm**

Valor do M_t obtido via Norma do Vento para vento a 0^0 igual a **8,94MNm** considerando a vizinhança e igual a **4,47MNm** sem vizinhança

Valor do M_t obtido via Norma do Vento para vento a 90^0 igual a **38,49MNm** considerando a vizinhança e igual a **12,25MNm** sem vizinhança.

Neste caso observa-se que os valores de momento de torção obtidos via Norma são bem superiores aos obtidos via TV, para a avaliação considerando vizinhança. A comparação entre os resultados via Norma e via TV sugere inclusive que os valores da Norma podem conduzir a dimensionamento de estruturas bastante conservadoras. O valor do momento de torção máximo calculado de acordo com a norma, $M_{t, \max, NBR}$, é 1,48 vezes maior que o valor do momento de torção máximo obtido através do Túnel de Vento, $M_{t, \max, TV}$. Como verificado nos casos anteriores o Edifício L'Essence Jardins tem arquitetura regular com seção transversal retangular constante e CT coincidindo com o CC.

IV) Relativas ao Edifício Prosperitas

Excentricidades do CT em relação ao CC não nulas

Valor máximo do M_t obtido via TV (extraído de Siqueira) igual a **160,90MNm**

Valor do M_t obtido via Norma do Vento para vento a 0^0 igual a **46,89MNm** considerando a vizinhança e igual a **23,44MNm** sem vizinhança

Valor do M_t obtido via Norma do Vento para vento a 90^0 igual a **146,08MNm** considerando a vizinhança e igual a **73,04MNm** sem vizinhança.

Para este Edifício Prosperitas, tem-se que o valor do $M_{t, \max, NBR}$ para vento a 90^0 igual a 146,08MNm sendo menor que o $M_{t, \max, TV}$ que é igual a 160,90MNm sendo, portanto, contra a segurança o valor obtido com a aplicação da ABNT NBR 6123:1988, a Norma do Vento.

Verifica-se quanto a arquitetura do edifício que a seção transversal não é retangular assim como não é constante ao longo da altura da edificação. Ademais, o CT não coincide com o CC.

V) Relativas ao Edifício Comendador Araújo

Excentricidades do CT em relação ao CC não nulas

Valor máximo do Mt obtido via TV (extraído de Siqueira), com vizinhança, igual a **58,40MNm** e **51,7MNm** sem vizinhança

Valor do Mt obtido via Norma do Vento para vento a 0^0 igual a **20,62MNm** considerando a vizinhança e igual a **10,31MNm** sem vizinhança

Valor do Mt obtido via Norma do Vento para vento a 90^0 igual a **91,93MNm** considerando a vizinhança e igual a **45,96MNm** sem vizinhança.

Este Edifício Comendador Araújo se caracteriza por não ter arquitetura regular com seção transversal retangular constante. Para ele os valores obtidos via TV com e sem vizinhança são, respectivamente menores que os valores obtidos via Norma para vento incidente a 90^0 .

VI) Relativas ao Edifício CENU – Torre 4

Excentricidades do CT em relação ao CC não nulas

Valor máximo do Mt obtido via TV (extraído de Siqueira) igual a **44,70 MNm**

Valor do Mt obtido via Norma do Vento para vento a 0^0 igual a **70,68MNm** considerando a vizinhança e igual a **35,34MNm** sem vizinhança

Valor do Mt obtido via Norma do Vento para vento a 90^0 igual a **82,89MNm** considerando a vizinhança e igual a **41,40MNm** sem vizinhança

Neste caso em que a excentricidade do CT em relação ao CC ocorre apenas em uma das coordenadas de referência e a seção transversal do edifício que não é retangular é constante ao longo da sua altura, tem-se: Os $M_{t, \max, NBR}$ são maiores do que $M_{t, \max, TV}$, todos os valores calculados considerando a vizinhança. Logo, os valores obtidos via norma são a favor da segurança, quando se considera efeitos de vizinhança.

VII) Relativas ao Edifício Unique Residence

Excentricidades do CT em relação ao CC grandes.

Valor máximo do Mt obtido via TV (extraído de Siqueira), com vizinhança, igual a **26,10MNm** e **28,6MNm** sem vizinhança.

Valor do Mt obtido via Norma do Vento para vento a 0^0 igual a **4,45MNm** considerando a vizinhança e igual a **2,23MNm** sem vizinhança.

Valor do Mt obtido via Norma do Vento para vento a 90^0 igual a **16,26 MNm** considerando a vizinhança e igual a **8,12MNm** sem vizinhança.

Com relação ao Edifício Unique Residence percebe-se que os valores de momento torçor obtidos via TV são maiores que os obtidos via Norma, com ou sem vizinhança. É importante observar que a edificação tem arquitetura com fachadas que não são retangulares muito acidentadas e apresentando grandes excentricidades entre o CT e o CC.

Logo, com todos os valores apresentados anteriormente, foi criada a tabela resumo 6.1 a seguir:

Tab. 6.1 – Resumo dos valores estudados

Edifício	Mt máx TV	Mt máx Norma
Odebrecht Atlanta	14,30 MNm	65,23 MNm
Cristal Tower	10,40 MNm	23,14 MNm
L'Essence Jardins	26,00 MNm	38,49 MNm
Prosperitas	160,90 MNm	146,08 MNm
Comendador Araújo	58,40 MNm	91, 93 MNm
CENU - Torre IV	44,70 MNm	82,89 MNm
Unique Residence	28,60 MNm	16,26 MNm

Fonte: Autor

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste Trabalho de Conclusão de Curso, foi realizada uma revisão do estado-da-arte relacionado ao tema dos efeitos do vento nas edificações e suas estruturas, com ênfase no efeito da torção global. Vários autores são referenciados com suas contribuições. As informações relativas aos ensaios em Túnel de Vento foram todas extraídas ou adaptadas dos trabalhos de Carpeggiani (2004), Siqueira (2009) e Arrais (2011).

Os valores do momento torçor na base de cada edifício foram calculados de acordo com as recomendações da ABNT NBR 6123:1988, com o objetivo de proceder a uma análise comparativa entre estes valores e os valores obtidos em ensaios via túnel de vento. Com os resultados da análise das observações constantes da seção anterior deste TCC, é possível apresentar as seguintes conclusões e recomendações:

1. No caso de edifícios que não atendem as condições para as quais a Norma apresenta recomendações para o cálculo das forças de arrasto, das excentricidades e dos valores de momento torçor, dentre outras grandezas de interesse, o mais seguro é submetê-los a ensaios em túneis de vento.

Dos sete casos aqui discutidos, quatro deles não atendem as recomendações quanto à geometria. Destes, um apresenta valores do momento de torção (com vizinhança e sem vizinhança) maiores quando calculados via Túnel de Vento, sendo esse o caso do Edifício Unique Residence. Para este edifício os valores calculados, com e sem vizinhança, via Norma, representam respectivamente 62,30% e 28,38% dos valores obtidos em Túnel de Vento.

2. Nos casos em que o edifício tem seção transversal constante retangular, é possível proceder a análise de acordo com as recomendações da Norma. Situação exemplificada com os três primeiros edifícios apresentados, O Edifício Odebrecht Atlanta, o Edifício Cristal Tower e o Edifício L'Essence Jardins, dos quais os dois primeiros têm seção transversal quadrada. Para estes edifícios os valores do momento torçor calculado via norma são até 50% maiores que os obtidos via Túnel de Vento, fato que pode levar ao superdimensionamento dos elementos do SEC.

3. Em boa parte dos edifícios estudados o momento torçor obtido via Túnel de Vento tem valores menores quando considerada a vizinhança e valores maiores quando não se considera a vizinhança. Nota-se que, nestes casos, quando a excentricidade

recomendada pela norma para esta situação sem vizinhança é calculada como 0,15 de e_a ou 0,15 de e_b , os momentos de torção obtidos pela norma serão maiores que os obtidos via Túnel de vento.

REFERÊNCIAS

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de Estrutura de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

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

ARRAIS, G.P.; PRESSÕES EXERCIDAS PELO VENTO EM FACHADAS DE EDIFÍCIOS ALTOS: ESTUDO COMPARATIVO DOS VALORES OBTIDOS ATRAVÉS DE ENSAIOS EM TUNEL DE VENTO E ESPECIFICAÇÕES NORMATIVAS; TCC do Curso de Engenharia Civil; UFRS; 2011; 79p.;

CARPEGGIANI, E.A., Determinação dos Efeitos Estáticos de Torção em Edifícios Altos Devidos à Ação do Vento. (Dissertação) Mestrado, UFRGS, Porto Alegre, RGS.2004, 160p.

CORDEIRO, S.G.F., MODELAGEM DE EDIFÍCIOS DE CONCRETO ARMADO COM A CONSIDERAÇÃO DO EFEITO DE TORÇÃO DEVIDO A FORÇA DE VENTO. TCC (Graduação em engenharia civil) UFSC, São Carlos, SP, 2012, 94p.;

CRUZ, JMF; FERREIRA, E.T; LUCENA, C.A.T. Estruturas: a estabilidade global dos edifícios altos. João Pessoa: Leia Livros, 2019. Livro digital, 261p.

FERREIRA, E.T. Estudo comparativo entre a velocidade básica do vento estabelecida na NBR 6123 e a obtida de estações meteorológicas na Paraíba – Impactos nos âmbitos do projeto estrutural. João Pessoa, 2005. 130p. Dissertação – Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba – João Pessoa, 2005.

FONTOURA, P.C.C.N. de O; Estudo experimental em túnel de vento dos efeitos de vizinhança em edifícios altos. Tese (Doutorado), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UNB, Brasília, DF. 2014, 318p.

HARRIS, C. L. Influence of neighboring structure on the wind pressure on tall building. **Bureau of Standards Journal of Research- Research**. Paper RP637, vol.12, january 1935.

SIQUEIRA, G.M.; ESTUDO DA TORÇÃO DEVIDA AO VENTO EM EDIFÍCIOS ALTOS: COMPARAÇÃO ENTRE TÚNEL DE VENTO E NBR 61231988; TD (Graduação) UFRGS, Porto Alegre, RGS, 2009,70p.

Stéphane Domeneghinina na entrevista encontrada em <https://grupoodp.com.br/ensaios-de-túnel-de-vento-garantem-seguranca>, visitada em 23/03/2021.

VANIN, D.D.; Resposta Dinâmica de Edifícios Altos Frente à Ação do Vento: Comparação de Técnicas Experimentais em Túnel de Vento. 2011.11 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), UFRGS, porto Alegre; R.G.S.