

**UNIEVANGÉLICA**

**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**FELLYPE AUGUSTTO RAMOS DE LIMA**

**RAPHAEL DE SOUZA SANTOS**

**ANÁLISE DA AÇÃO DO VENTO NA ESTRUTURA DE  
EDIFICAÇÕES**

**ANÁPOLIS / GO**

**2019**

**FELLYPE AUGUSTTO RAMOS DE LIMA  
RAPHAEL DE SOUZA SANTOS**

**ANÁLISE DA AÇÃO DO VENTO NA ESTRUTURA DE  
EDIFICAÇÕES**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA**

**ORIENTADOR: AGNALDO ANTÔNIO M. T. DA SILVA  
COORIENTADORA: WANESSA MESQUITA G. QUARESMA**

**ANÁPOLIS / GO: 2019**

## FICHA CATALOGRÁFICA

LIMA, Fellype Augustto Ramos De/ SANTOS, Raphael De Souza

ANÁLISE DA AÇÃO DO VENTO NA ESTRUTURA DE EDIFICAÇÕES

77 P, 297 mm (ENC/UNI, Bacharel, Engenharia Civil, 2019).

TCC - UniEvangélica

Curso de Engenharia Civil.

1. Vento	2. NBR 6123/1988
3. Solicitações Estáticas	4. Aerodinâmica
I. ENC/UNI	II. Título (Série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LIMA, Fellype Augustto Ramos De; SANTOS, Raphael de Souza. Análise da ação do vento na estrutura de edificações. TCC, Curso de Engenharia Civil, UniEvangélica, Anápolis, GO, 77 p. 2019.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Fellype Augustto Ramos de Lima

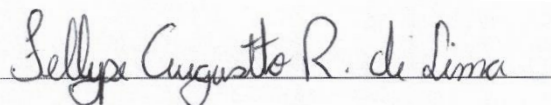
Raphael de Souza Santos

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: Análise da ação do vento na estrutura de edificações.

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil

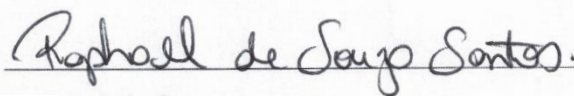
ANO: 2019

É concedida à UniEvangélica a permissão para reproduzir cópias deste TCC e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste TCC pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.



Fellype Augustto Ramos de Lima

E-mail: Fellype.augustto@outlook.com



Raphael de Souza Santos

E-mail: Raphael.097@live.com

**FELLYPE AUGUSTTO RAMOS DE LIMA**  
**RAPHAEL DE SOUZA SANTOS**

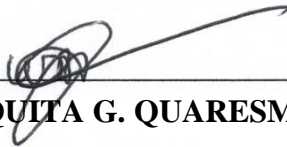
**ANÁLISE DA AÇÃO DO VENTO NA ESTRUTURA DE  
EDIFICAÇÕES**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO CURSO DE  
ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL**

**APROVADO POR:**



\_\_\_\_\_  
**AGNALDO ANTÔNIO M. T. DA SILVA, Mestre (UniEVANGÉLICA)**  
**(ORIENTADOR)**



\_\_\_\_\_  
**WANESSA MESQUITA G. QUARESMA, Mestra (UniEVANGÉLICA)**  
**(COORIENTADORA)**



\_\_\_\_\_  
**MARCOS FRANCISCO N. VALENTINO, Mestre (UniEVANGÉLICA)**  
**(EXAMINADOR INTERNO)**



\_\_\_\_\_  
**ROGÉRIO SANTOS CARDOSO, Mestre (UniEVANGÉLICA)**  
**(EXAMINADOR INTERNO)**

**DATA: ANÁPOLIS/GO, 04 de DEZEMBRO de 2019.**

## **AGRADECIMENTOS**

“Esforço e trabalho duro, nunca desapontam.” Com essa frase, finalizo mais uma etapa da minha vida. Visto que essa expressão de poucas palavras, mas com muito significado, representa bastante sobre mim. Por muitas vezes pareceu desanimador, mas durante o percurso fui moldado, e agradeço a Deus por sempre estar presente comigo, pois no final, sempre deu tudo certo. Compartilho minha felicidade aos familiares que sempre pude contar, aos meus amigos de longa data, e aos amigos que a graduação me proporcionou. Em especial, fico grato com minha dupla de TCC que me ajudou em várias etapas do curso, e no fim, neste trabalho tão importante. Enfim, agradeço a todas as pessoas que participaram e ajudaram na minha vida, principalmente aos professores orientadores Agnaldo e Wanessa pela realização deste trabalho, por fim fico orgulhoso por ter passado todos esses momentos que essa etapa me permitiu, pois amadureci pensamentos e deveres da vida, ao qual vou levar para a eternidade.

Fellype Augustto Ramos de Lima

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por cada momento vivido dentro do curso, agradeço a Ele por me proporcionar esse momento que sempre fez parte dos meus sonhos e sei que primeiramente deve ser dada toda honra e glória a Ele. Agradeço aos meus pais pelo apoio que sempre foi dado no decorrer do curso e por sempre me incentivarem. Agradeço a minha namorada Drielle por sempre me ajudar, sempre me apoiar, sempre me dar suporte nos momentos difíceis, penso que talvez seja a pessoa mais importante para minha formação e que me fez querer ser uma pessoa melhor. Agradeço também ao meu amigo e parceiro de TCC, muito obrigado pela paciência, compreensão e ajuda nos momentos difíceis, sem a sua ajuda não seria possível a conclusão deste trabalho. Agradeço ao orientador Agnaldo e a coorientadora Wanessa, pela paciência, pelos ensinamentos e incentivo.

Raphael de Souza Santos

## RESUMO

Nas últimas décadas a construção civil sofreu grande avanço, dessa forma surgiram estruturas mais ousadas de maiores dimensões e menos densas, gerando a necessidade de aprimorar os cuidados com os projetos e execução. Assim, as edificações cada vez mais altas e esbeltas estão sujeitas a solicitações dinâmicas, um exemplo, é através de fenômenos meteorológicos como o vento, que influencia de maneira complexa na estrutura. De modo que a aerodinâmica das estruturas se torna um assunto muito relevante, de forma que, com o auxílio dos túneis de vento os projetistas vêm cada vez mais aprimorando suas estimativas na hora de projetar e analisar as forças produzidas pelas rajadas. Por meio dessas novas técnicas, é possível com o auxílio da norma estimar os valores dos carregamentos pela força vento ao que realmente acontece com a estrutura. Neste trabalho, o objetivo é apresentar os princípios e procedimentos para determinar ações das rajadas de ar de acordo com a norma brasileira NBR 6123 (ABNT, 1988), e utilizar o túnel de vento juntamente com um simulador de fluxo de ar virtual seguindo as diretrizes normativas, e comparar os resultados em modelo reduzido de um estudo de caso usando o princípio com ou sem vizinhança, no que diz respeito aos conceitos envolvendo os efeitos das correntes de ar em edificações. Também foram calculadas as pressões dinâmicas nas construções do empreendimento seguindo o mesmo raciocínio anterior para melhor compreensão e comparação com a norma e entendimento de temas estudados no curso de engenharia civil.

### **PALAVRAS-CHAVE:**

Vento. Edificações esbeltas. Solicitações Estáticas. NBR 6123/1988. Aerodinâmica.

## **ABSTRACT**

In the last decades civil construction has made great progress, so bolder, larger and less dense structures have emerged, leading to the need to improve projects and execution care. This way, the increasingly tall and slender buildings are subject to dynamic demands, for example, it is through the meteorological phenomena such as wind that influence the structure in a complex way. So the aerodynamics of the structures becomes a very relevant subject, in such a way as with the help of the wind tunnels the designers are increasingly improving their estimates when designing and analyzing the forces produced by the bursts. Through these new techniques, it is possible, with the help of the norm, to estimate the values of the loads by the wind force to what really happens with the structure. In this paper, the objective is to present the principles and procedures to determine air gusts actions according to the Brazilian standard NBR 6123 (ABNT, 1988), and to use the wind tunnel, herewith a virtual airflow simulator, following the normative guidelines, comparing the results in a reduced model of a case study, using the principle of with or without neighborhood, regarding the concepts involving the effects of air currents on buildings. We also calculated the dynamic pressures in the construction of the enterprise following the same previous thought to improve understanding and comparison with the standard, and understanding of topics studied in the civil engineering course.

### **KEYWORDS:**

Wind. Slender buildings. Static Requests. NBR 6123/1988. Aerodynamics.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Variação ao longo do tempo da pressão dinâmica do vento, conforme Rausch.....	19
Figura 2 – Vórtices de Kármán.....	20
Figura 3 – Vórtices de Kármán numa esteira.....	21
Figura 4 – Força transversal ao vento.....	21
Figura 5 – Ação do vento em uma edificação.....	23
Figura 6 – O efeito de cargas laterais de vento.....	24
Figura 7 – Regime de escoamento de corpo isolado.....	25
Figura 8 – Regime de escoamento deslizante.....	25
Figura 9 – Regime de interferência de esteira.....	25
Figura 10 – Influência das proporções.....	26
Figura 11 – Efeito Venturi.....	27
Figura 12 – Deflexão do vento na direção vertical.....	27
Figura 13 – Turbulência da esteira.....	28
Figura 14 – Torção concentrada e rotação da estrutura.....	29
Figura 15 – Gráfico das isopletas.....	30
Figura 16 – Fator topográfico $S_1$ .....	32
Figura 17 – Coeficiente de arrasto para vento de baixa turbulência.....	39
Figura 18 – Coeficiente de arrasto para vento de alta turbulência.....	40
Figura 19 – Linhas de fluxo para edificação para telhado duas águas.....	43
Figura 20 – Aplicação do teorema de Bernoulli.....	43
Figura 21 – Sistema de um grau de liberdade.....	50
Figura 22 – Sistema de vários graus de liberdade com AMS instalado.....	52
Figura 23 – Túnel de vento.....	54
Figura 24 – Empreendimento.....	55
Figura 25 – Distância entre as maquetes em centímetros.....	56
Figura 26 – Dimensão da maquete em centímetros.....	57
Figura 27 – Modelo em MDF.....	57
Figura 28 – Distância entre as edificações em metros.....	58
Figura 29 – Dimensão da estrutura em metros.....	59
Figura 30 – Experimento no aparelho.....	60
Figura 31 – Experimento no programa.....	61
Figura 32 – Experimento no aparelho.....	62

Figura 33 – Experimento no programa .....	62
Figura 34 – Ensaio no programa da estrutura isolada do efeito Vórtices de Kármán .....	63
Figura 35 – Ensaio no programa da construção isolada do efeito galope .....	64
Figura 36 – Ensaio no programa da construção isolada explorando a torção .....	64
Figura 37 – Ensaio no programa da estrutura isolada analisando o regime de escoamento ....	64
Figura 38 – Ensaio no programa da estrutura isolada do efeito da deflexão do vento .....	65
Figura 39 – Teste no programa em todo empreendimento observando o martelamento .....	65
Figura 40 – Teste no programa em todo empreendimento investigando o efeito galope .....	66
Figura 41 – Teste no programa em todo empreendimento explorando o regime de escoamento .....	66
Figura 42 – Teste no programa em todo empreendimento atentando ao efeito Venturi.....	67
Figura 43 – Teste no programa em todo empreendimento examinando o efeito da deflexão do ar .....	67
Figura 44 – Teste no programa em todo empreendimento analisando a turbulência de esteira .....	68
Figura 45 – Teste no programa em todo empreendimento estudando o arrastamento .....	68

## LISTA DE TABELA

Tabela 1 – Parâmetros meteorológicos .....	35
Tabela 2 – Valor $S_2$ .....	36
Tabela 3 – Valores mínimos do fator estatístico $S_3$ .....	37
Tabela 4 – Fator $S_3$ .....	37

## **LISTA DE ABREVIATURA E SIGLA**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADVs	Absorvedores Dinâmicos de Vibrações
AMS	Amortecedor de Massa Sintonizado
NBR	Norma Brasileira

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1 JUSTIFICATIVA .....	15
1.2 OBJETIVOS .....	15
<b>1.2.1 Objetivo geral</b> .....	<b>15</b>
<b>1.2.2 Objetivos específicos</b> .....	<b>16</b>
1.3 METODOLOGIA .....	16
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	16
<b>2 EMBASAMENTO TEÓRICO</b> .....	<b>18</b>
2.1 DEFINIÇÃO DO VENTO .....	18
2.2 DINÂMICAS DO VENTO .....	18
<b>2.2.1 Energia cinética das rajadas</b> .....	<b>19</b>
<b>2.2.2 Martelamento</b> .....	<b>20</b>
<b>2.2.3 Desprendimento de vórtices</b> .....	<b>20</b>
<b>2.2.4 Aerodinâmica por galope</b> .....	<b>21</b>
2.3 DINÂMICAS DAS ESTRUTURAS .....	22
2.4 EFEITO DO VENTO EM EDIFICAÇÕES .....	23
<b>2.4.1 Regime de escoamento</b> .....	<b>23</b>
<b>2.4.2 Influência das proporções</b> .....	<b>26</b>
<b>2.4.3 Efeitos de vizinhança</b> .....	<b>26</b>
2.4.3.1 Efeito Venturi .....	27
2.4.3.2 Deflexão do vento na direção vertical .....	27
2.4.3.3 Turbulência da esteira .....	28
<b>2.4.4 Conforto do usuário</b> .....	<b>28</b>
<b>2.4.5 Torção</b> .....	<b>29</b>
2.5 NBR 6123/1988 .....	30
<b>2.5.1 Velocidade básica do vento <math>V_0</math></b> .....	<b>30</b>
<b>2.5.2 Velocidade característica do vento <math>V_k</math></b> .....	<b>31</b>
2.5.2.1 Fator topográfico $S_1$ .....	31
2.5.2.2 Fator de rugosidade do terreno, altura sobre o terreno, e dimensões da edificação $S_2$ .....	33
2.5.2.3 Fator estatístico $S_3$ .....	36
<b>2.5.3 Pressão dinâmica <math>q</math></b> .....	<b>38</b>

<b>2.5.4</b>	<b>Força de arrasto <math>F_a</math></b> .....	<b>38</b>
2.5.4.1	Coeficiente de arrasto $C_a$ .....	38
<b>2.5.5</b>	<b>Momento torçor <math>M_t</math></b> .....	<b>40</b>
<b>2.5.6</b>	<b>Efeitos de vizinhança</b> .....	<b>41</b>
<b>2.6</b>	<b>AERODINÂMICA DAS EDIFICAÇÕES</b> .....	<b>43</b>
<b>2.6.1</b>	<b>Aeroelasticidade</b> .....	<b>44</b>
<b>2.6.2</b>	<b>Arrastamento</b> .....	<b>44</b>
<b>2.6.3</b>	<b>Coeficientes aerodinâmicos</b> .....	<b>45</b>
2.6.3.1	Coeficientes de forças $C_f$ .....	45
2.6.3.2	Coeficientes de pressão $C_p$ .....	46
2.6.3.3	Coeficientes de forma, externa e interna $C_e$ e $C_i$ .....	47
<b>2.7</b>	<b>ABSORVEDORES DINÂMICOS DE VIBRAÇÕES</b> .....	<b>48</b>
<b>2.7.1</b>	<b>Amortecedor de massa sintonizado (AMS)</b> .....	<b>49</b>
<b>2.7.2</b>	<b>Sistema com um grau de liberdade</b> .....	<b>49</b>
<b>2.7.3</b>	<b>Sistemas com vários graus de liberdade</b> .....	<b>52</b>
<b>3</b>	<b>ESTUDO DE CASO</b> .....	<b>54</b>
3.1	TÚNEL DE VENTO.....	54
3.2	TÚNEL DE VENTO VIRTUAL.....	54
3.3	EMPREENDIMENTO.....	55
3.4	MODELO FÍSICO.....	55
3.5	MODELO VIRTUAL .....	58
<b>4</b>	<b>ANÁLISES DA AÇÃO DO VENTO</b> .....	<b>60</b>
4.1	COMPARAÇÃO ENTRE OS TÚNEIS DE VENTO .....	60
<b>4.1.1</b>	<b>Observação na estrutura isolada</b> .....	<b>60</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Observação em todo o empreendimento</b> .....	<b>61</b>
4.2	EFEITOS OBSERVADOS .....	62
<b>4.2.1</b>	<b>Análise na estrutura isolada</b> .....	<b>63</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Análise em todo o empreendimento</b> .....	<b>65</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Comparação entre o edifício isolado e os associados</b> .....	<b>68</b>
4.3	CÁLCULOS .....	69
<b>4.3.1</b>	<b>Estudo na estrutura isolada</b> .....	<b>69</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Estudo em todo o empreendimento</b> .....	<b>70</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>72</b>
5.1	SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS .....	73

**REFERÊNCIAS..... 75**

## 1 INTRODUÇÃO

Ao longo da evolução, a humanidade se expandiu por novos territórios, aumentando seu conhecimento, e desenvolvendo-o em novas áreas. Na engenharia civil, técnicas, linguagens, materiais e conceitos sofreram mudanças significativas no decorrer do tempo, e dessa forma as construções se tornaram cada vez mais complexas. Porém, devido à proporção que os edifícios possuem, surgem novos desafios aos projetistas estruturais, e um deles, é em função de um fenômeno meteorológico, que é o comportamento da estrutura sob ação de cargas vento.

Segundo Blessmann (1995), o vento é definido como a movimentação de uma massa de ar que é causado pelas variações de pressão e temperatura, ele varia seu comportamento de acordo com o local, e exerce nas construções, de forma contínua ou não, e diversificada, forças de pressão e sucção. No Brasil, é utilizada NBR 6123 (ABNT, 1988) – “Forças devidas ao vento em edificações”, ela trata de condições para forças à ação estática e dinâmica do vento em construções.

Erros em construções são bastante comuns, sejam eles arquitetônicos, estruturais, hidráulicos ou elétricos. Todavia, por falta de planejamento esses erros causam acidentes, e em relação ao vento, as consequências desses erros são, usualmente severas. Gonçalves *et al.* (2004), comenta que os acidentes causados por aerodinâmica estão relacionados a pequenos danos, porém, quando ocorre algo mais severo como a ruína total da estrutura, são em decorrência de somatórias de erros, por exemplo, erros de projeto, de execução, de qualidade de material empregado, e de avaliação nas cargas das rajadas. Segundo Loredou-Souza *et al.* (2012), dentre esses acidentes, um caso bastante famoso é do desastre ocorrido na Ponte Tacoma Narrows em 1941, localizada no condado Pierce, em Washington, EUA, que entrou em colapso após receber fortes rajadas de vento.

No território brasileiro, mesmo utilizando os recursos da norma, falta conhecimento específico nessa área e aplicabilidade eficaz, pois simples rajadas intensas em estruturas e coberturas leves já provocam grandes acidentes. A NBR 6123 (ABNT, 1988) fornece apenas dados para cálculo em edifícios de geometria simples, em contraponto a isso, a arquitetura das construções sofre inovação a cada momento e para entender cada estrutura, deve-se produzir a maquete e realizar o ensaio em túnel de vento, sendo então necessário uma análise mais específica.

No Brasil, por mais que tenha a norma em vigor composta com o mapa de isopleias, mostrando as velocidades básicas do vento, ainda assim ele é mal compreendido, devido a



norma ser da década de 80 e até o momento não ter publicado uma revisão, ou seja, a norma está defasada. Um estudo realizado por Beck e Corrêa (2012), ambos professores da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, propõe uma atualização das velocidades básicas utilizando estações presentes em aeroportos. Assim sendo, percebe-se que as construções da atualidade necessitam de melhores métodos para análise da ação do vento, sendo proposto investimentos em coleta de dados e utilização de softwares para avaliação estrutural.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Ao projetar uma edificação muito se pensa na questão, da estrutura, da hidráulica, e da elétrica, parâmetros como, números de pessoas na habitação, quantidade de consumo de água e energia, quantidade de ambientes, local da construção, e relação de quantidade de carga que a estrutura irá sofrer, são fatores importantes que muitas vezes faltam detalhes a levar em consideração. Por exemplo, o fator de carga do vento que é deixado de lado por muitos projetistas, por considerar que no Brasil a edificação não sofre com este fenômeno de forma significativa ao conforto do usuário, ou mesmo não desenvolver ensaios, para melhor fundamento na hora de dimensionar a mesma. Visto que ao longo dos anos, as edificações estão cada vez mais alcançando novos patamares em suas alturas, de modo que as cargas produzidas pelo vento se intensificam à medida que altura da construção aumenta, logo o conforto do usuário pode ser prejudicado, e também a estrutura pode sofrer mal dimensionamento. De maneira que, por mais que exista a norma para consulta, ela está ultrapassada por não atualizar seus dados desde a sua apresentação na década de 80, assim suas informações, como o mapa com a velocidade básica do vento ficam obsoletos.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral, apresentar conteúdo específicos para dissertar sobre o assunto e explorar a NBR 6123 (ABNT, 1988), propor o estudo nessa área e investigar novas definições. Além de que, analisar um empreendimento já implantado, e utilizar o túnel de vento para apresentar estudos sobre efeitos do escoamento das correntes de ar.

### 1.2.2 Objetivos específicos

O trabalho tem como objetivo específico, compreender a relação do vento com um empreendimento implementado no município de Anápolis no estado de Goiás, considerando carregamentos estáticos através dos conceitos da NBR 6123 (ABNT, 1988), analisar os esforços e, usando o túnel de vento, observar o comportamento do escoamento do ar de maneira que a edificação esteja em estado isolado e associado no empreendimento.

### 1.3 METODOLOGIA

O trabalho foi feito com base em pesquisas de sites, artigos, teses, e publicações relacionadas a ação do vento. As selecionadas dentre elas foram, as que propõem os efeitos das cargas de ar e suas consequências, principalmente na área da construção civil. A abordagem se deu sobre ação em edificações, com fundamentos da NBR 6123 (ABNT, 1988). Utilizando destes conceitos, foi feita uma análise das forças externa causadas pelo vento em um empreendimento composto de 8 torres, de forma a exemplificar como é realizado o cálculo das cargas atuantes, sendo que, foi considerado todo o conjunto das 8 estruturas associadas, e também, um único edifício isolado. Foram elaborados também, ensaios com as maquetes do empreendimento em túnel de vento através do aparelho da instituição de ensino e comparado com o software em versão estudantil da Autodesk de simulação de vento. Por fim, foi mostrado os efeitos que as correntes de ar causam nas estruturas do empreendimento, e assim o comportamento sobre aerodinâmica delas.

### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Capítulo 1: é composto por elementos preliminares ao qual apresenta a justificativa, objetivo geral e objetivos específicos do tema abordado.

Capítulo 2: é formado pelo embasamento teórico de diversos estudos relacionados ao vento na engenharia civil, como aerodinâmica, absorvedores e outros. E, mostra as etapas presentes na norma vigente sobre as cargas que as rajadas de ar produzem na estrutura, relacionado através de textos, imagens, tabelas e fórmulas.

Capítulo 3: é dedicado a apresentar os modelos de túnel de vento que foram utilizados, sendo eles, o aparelho na instituição de ensino e o simulador de vento virtual. Também são

retratadas as características do empreendimento, as dimensões das maquetes em modelo físico e virtual.

Capítulo 4: é explicado como foram realizados os ensaios, assim demonstrando como foi efetuado cada um deles, diferenciando as características dos túneis e de ensaio para ensaio, também foi feita uma analogia entre o empreendimento como um só edifício e o empreendimento em conjunto, ou seja, as 8 torres. Outra análise realizada é em relação aos efeitos estudados no embasamento teórico, apontando quais efeitos foram captados e qual a relevância do mesmo, tanto no sistema isolado quanto no sistema associado. Além de apresentar os cálculos da velocidade característica do vento  $V_k$  e pressão dinâmica  $q$ , para ambos dos sistemas.

Capítulo 5: este capítulo é destinado a conclusão final, onde são feitas considerações do trabalho, mencionando os pontos de vista mais relevantes abordados no decorrer de sua execução. Também são sugeridas temas para estudos futuros, visando os conteúdos existentes em relação a área é deficiente.

## 2 EMBASAMENTO TEÓRICO

### 2.1 DEFINIÇÃO DO VENTO

De acordo com Blessmann (1995), o sol aquece o planeta terra de forma não uniforme, consequentemente o geoide sofre variações de temperatura em suas regiões, portanto alguns locais aquece e a pressão atmosférica diminui e o ar quente expande, enquanto outros lugares permanecem frios e o ar denso, assim gerando movimentação das massas de ar em que a aquecida eleva-se para outras regiões enquanto a fria se desloca da área de maior pressão para ocupar o espaço deixado. Dessa forma, o deslocamento das massas de ar de zonas de alta pressão para baixa pressão produz o vento.

Gonçalves *et al.* (2004) complementa que, o vento também pode ser estabelecido como uma corrente de ar médio sobreposto a flutuações de fluxo, denominada de turbulências ou mais precisamente rajadas, que são responsáveis por atuar forças nas edificações e sua velocidade apresenta um valor superior à média.

### 2.2 DINÂMICAS DO VENTO

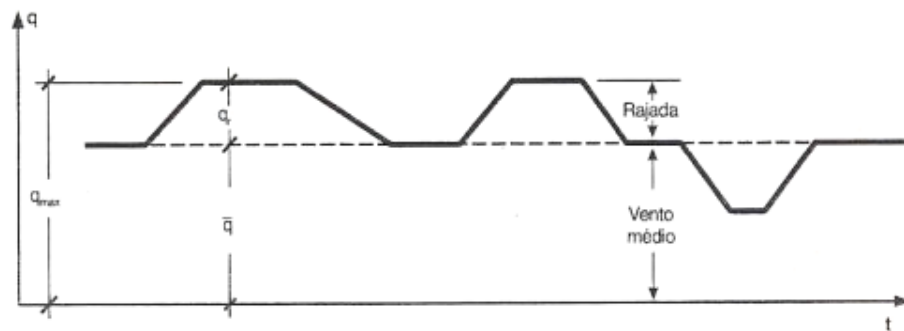
Segundo Azevedo (2016), o carregamento dinâmico é compreendido como todo carregamento em que o tempo é uma variável ao qual interfere na relação de aplicação da carga, ou seja, pode ser entendido como a intensidade da carga, podendo ser constante ou não, variando de acordo com o tempo. Para o projetista estrutural, interpretar esse fenômeno é um grande desafio devido a sua complexidade, pois sofre dificuldades ao propor carregamento variável na estrutura em função do tempo.

Então, o vento pode ser caracterizado como um carregamento dinâmico, porém é frequente os casos em que o mesmo é considerado um carregamento estático equivalente na estrutura, ou seja, uma carga aplicada gradativamente e sem variação de intensidade ao longo do tempo. Ao qual em situações em que a estrutura demonstra uma ação dinâmica moderada, ocorre um superdimensionamento da mesma, ou na ação inversa, possui uma resposta intensa no carregamento dinâmico, logo podendo causar o colapso estrutural. Para modelar a ação dinâmica do vento é necessário entender alguns dos seus principais efeitos, Blessmann (2005) diz respeito da energia cinética das rajadas, martelamento, desprendimento de vórtices e aerodinâmica por galope.

### 2.2.1 Energia cinética das rajadas

Segundo Blessmann (2005), o primeiro estudo feito de forma racional para determinar os efeitos dinâmicos das rajadas de vento foi divulgado pelo Rausch (1933 *apud* BLESSMANN, 2005), que baseou nos estudos estatísticos de Föppl de maneira que esse método foi incluído a norma alemã da época. De acordo com os registros da época, Rausch representou o comportamento das rajadas do vento, relacionando a pressão dinâmica do vento ao decorrer do tempo. Dentre seus estudos, ele explica que uma rajada média tem sua pressão elevada até certo ponto, permanece constante por uma determinada duração e depois volta a cair. Após um período, surgem outras rajadas que permanecem constantes, aumentam e diminuem de acordo com o tempo, mas conservando a pressão dinâmica média (Figura 1). Para Rausch, não se pode concluir que exista uma periodicidade das rajadas, nem que sua duração seja sempre a mesma. Ou seja, não se pode considerar que sua força aconteça no mesmo período de tempo e nem com a mesma intensidade ou mesma duração, assim a força do vento não pode ser considerada como efeito perigoso causadora de ressonância. Para chegar à essas conclusões primeiramente foi observado rajadas únicas para depois fazer um estudo de rajadas variadas.

**Figura 1 – Variação ao longo do tempo da pressão dinâmica do vento, conforme Rausch**



Fonte: BLESSMANN, 2005.

Davenport (1961 *apud* BLESSMANN, 2005) seguindo o raciocínio de Rausch (1933 *apud* BLESSMANN, 2005), desassocia o vento natural em uma parcela média e outra flutuante. Os esforços estáticos equivale à parcela média e os esforços dinâmicos correspondem à parcela flutuante. Os esforços dinâmicos podem não ser predominantemente ressonantes, quando boa parte da energia contida no espectro de potência está correspondendo inferior à menor frequência de vibração da estrutura, e no entanto podem ser ressonantes quando grande parte dessa energia corresponder à frequência natural de vibração da estrutura.

### 2.2.2 Martelamento

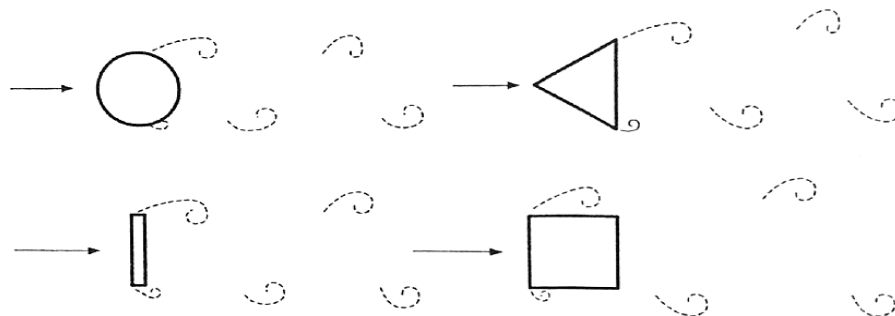
Segundo Simiu e Scanlan (1996 *apud* CARRIL JR., 2000), o martelamento corresponde com a excitação da estrutura pela flutuação da velocidade do vento. Quando a corrente original do vento é alterada por algum obstáculo na frente da estrutura, isso gera esforços dinâmicos associados a turbulência na mesma, denominado de martelamento de esteira. Nessa situação, com a geração de turbulência, a frequência excitadora pode condizer com umas das frequências das vibrações naturais da estrutura, assim gerando efeitos dinâmicos significativos.

De acordo com Blessmann (2005), ele estabelece que existem dois tipos de martelamento, o de esteira, que é considerado como sendo simplesmente o martelamento. E o devido à turbulência atmosférica, definido como a excitação da estrutura pelas rajadas.

### 2.2.3 Desprendimento de vórtices

Blessmann (2005) mostra que, com a variação da forma geométrica da estrutura pode haver um desprendimento alternado de vórtices, com uma frequência bem definida (Figura 2). É conhecido como Vórtices de Kármán, os quais produz forças oblíquas em correlação à direção do vento médio. Seções como, retangular, triangular, ou que possuem arestas vivas, estão sujeitas a excitações mais intensas pelo desprendimento de vórtices, do que as seções circulares.

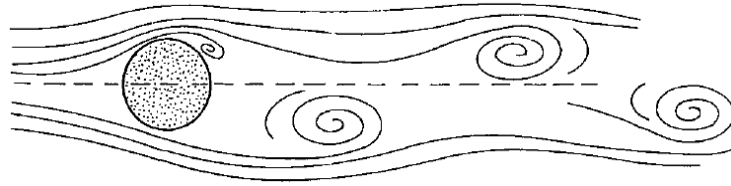
**Figura 2 – Vórtices de Kármán**



Fonte: BLESSMANN, 2005.

Segundo Labegalini *et al.* (1992), os Vórtices de Kármán apresentam uma configuração de sentidos alternados quando um fluido escoar em volta de um obstáculo, sendo que a esteira atrás da obstrução não é regular (Figura 3).

**Figura 3 – Vórtices de Kármán numa esteira**

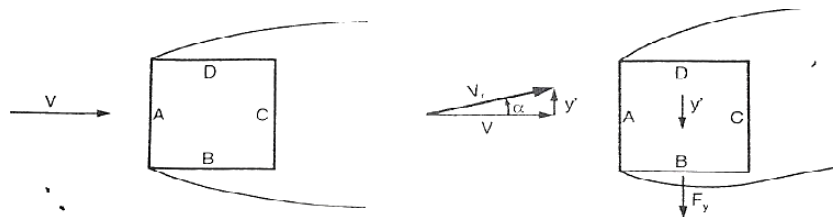


Fonte: LABEGALINI *et al.*, 1992.

#### 2.2.4 Aerodinâmica por galope

De acordo com Blessmann (2005), galope é um fenômeno causado em estruturas leves e flexíveis de pouco amortecimento ao qual podem sofrer oscilações de instabilidade aerodinâmica, e conforme a velocidade do vento aumenta, a amplitude das oscilações também, sem um limite superior. Dentre os números de seções usuais na construção civil, como prismas de seção retangular, triangular e quadrada, por exemplo, são potencialmente sensíveis a este efeito. Em conformidade, o galope possui características de sua intensidade ser violenta e um súbito aparecimento, e acontece quando uma certa velocidade do vento é excedida, denominada de velocidade de disparo, gerando oscilações transversais à direção do vento (Figura 4). No decorrer da oscilação, o ângulo de incidência do vento está em constante mudança, e em resposta a esta incidência variável, pode ser provocado uma força na direção e sentido do movimento, que extrai a energia do vento e mantém o movimento oscilatório.

**Figura 4 – Força transversal ao vento**



Fonte: BLESSMANN, 2005.

Blessmann (2005) indica algumas formas de reduzir as oscilações por galope, dentre elas está, a mudança da forma ou orientação da estrutura, de tal maneira que os coeficientes aerodinâmicos se tornem estabilizantes. E outro modo, é aumentar o amortecimento interno da estrutura, já que a velocidade de disparo é proporcional ao amortecimento, e certas estruturas possuem o amortecimento cada vez menores, fazendo com que a velocidade de disparo se assemelhe com a velocidade de projeto.

### 2.3 DINÂMICAS DAS ESTRUTURAS

De acordo com Soriano (2014) as estruturas estão sujeitas à fatores externos, pois são sistemas físicos em que podem conduzir esforços. Esses fatores são causados por elementos que alteram com o tempo, como resultante de atividade humana as quais podem ser, correr e dançar, e também equipamentos ou partes móveis, como veículos e compactadores, e por fim, provenientes de explosões, ondas ou vento. Tais ações externas são importantes para a consideração de um bom dimensionamento do projeto estrutural, e para caracterizar matematicamente essas solicitações externas e estabelecer a importância e os efeitos das oscilações, é feito o estudo denominado de dinâmica das estruturas.

Cunha (1969), em seu trabalho conseguiu estabelecer as frequências naturais de vibrações transversais de uma viga simplesmente apoiada com carga axial, através de análise de um modelo de uma viga com uma mola e uma massa concentrada e, outro caso de uma viga, novamente com apenas uma mola, porém com várias massas. Foi concluído que as frequências de vibração são consideradas as próprias frequências de vibração livre da viga, quando o sistema tem ausência de massa e mola. E também complementou que enquanto a força de compressão aumenta, a frequência de vibração da viga diminui, já quando se trata de força de tração, à medida que a força cresce a frequência também aumenta.

Paula (2001), em seu estudo fez uma formulação e implementação numérica de modelos matemáticos do comportamento de estruturas levando em conta as não-linearidades físicas e geométricas, e concluiu que na análise dinâmica, a resposta da estrutura sofre interferência do acréscimo de danificação submetido pelas influências inerciais. Além disso, outro resultado relevante através do método numérico é que a danificação reage com a frequência de vibração livre da estrutura e com o amortecimento, diminuindo ambos.

Castro (2006), realizou um estudo de modelagem computacional de ligações semi-rígidas e sua influência na resposta dinâmica não-linear de pórticos de aço, assim ele propôs no seu trabalho um modelo computacional em que represente o comportamento estrutural de ligação viga-coluna, especialmente em ligação semi-rígida, adotando um elemento de mola rotacional de parâmetro não-linear, considerando a resposta estática e dinâmica de pórticos de aço e mistos. Como resultado em respostas ao carregamentos estáticos e dinâmicos, obteve que para pórticos semi-rígidos não lineares não acontece a manifestação de ressonância, que corresponde a frequência da excitação igual, ou similar, da frequência fundamental da estrutura, devido a dissipação de energia da excitação associado com fenômeno denominado histerese.



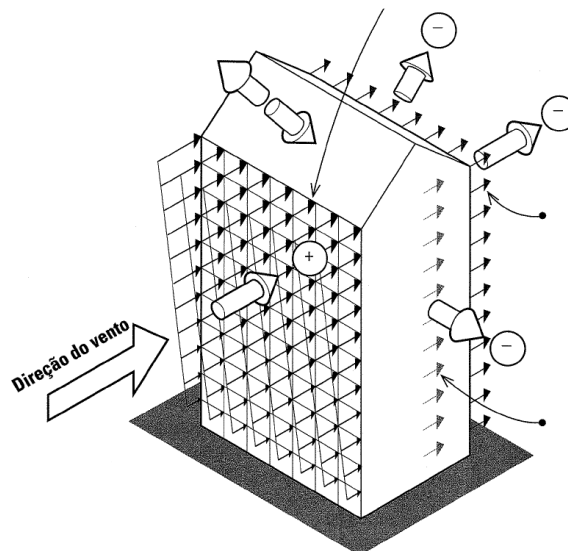
## 2.4 EFEITO DO VENTO EM EDIFICAÇÕES

Em um sistema estrutural de uma edificação, consideramos primeiramente, como transferir aos apoios, as cargas mortas, como o peso próprio da estrutura, e também as cargas acidentais, tais como cargas de serviço ou de sobrecarga. Porém fatores ambientais, como os ventos, são capazes de desestruturar os elementos de transmissão de cargas de gravidade. Ching *et al.* (2010) define que os ventos ocasionam um carregamento dinâmico, entretanto podem ser analisados como cargas estáticas equivalentes, e geralmente tem mudanças rápidas em fatores de magnitude e ponto de aplicação, e também o efeito da sua carga se intensifica à medida que a altura aumenta.

### 2.4.1 Regime de escoamento

Segundo Ching *et al.* (2010), as forças produzidas pelas cargas de vento são consequência da energia cinética do movimento de uma massa de ar, que produz pressões diretas (positivas) ou sucção (negativas), o que impõem esforços a qualquer obstáculo em seu caminho, particularmente nas estruturas, e na sua vedação externa. A pressão direta na edificação ocorre quando a superfície que recebe a carga do vento está em posição perpendicular ao percurso do mesmo, ou seja, paredes a barlavento, já na pressão negativa, são superfícies laterais consideradas sotavento, que são contrárias ao barlavento, no qual ambas as pressões podem causar estragos em coberturas e fachadas dos edifícios (Figura 5).

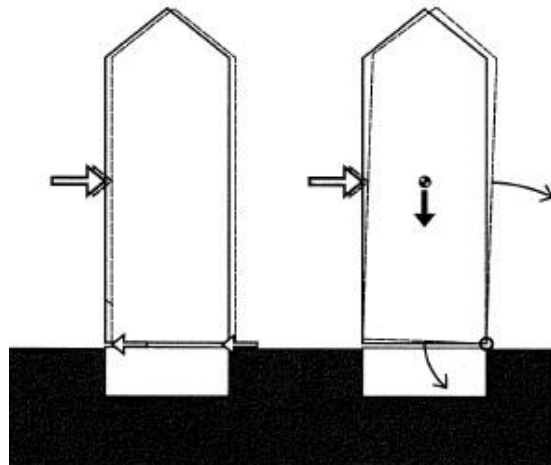
**Figura 5 – Ação do vento em uma edificação**



Fonte: CHING *et al.*, 2010.

Em concordância com Ching *et al.* (2010), toda construção está sujeita a ação de cargas laterais impostas pelo vento, e quanto maior a estrutura e esbelteza, maior será o domínio que estas cargas terá sobre a mesma, já que podem causar grandes momentos fletores nos elementos verticais e com a força cortante provocada entre a estrutura e a fundação causa o deslocamento lateral (Figura 6).

**Figura 6 – O efeito de cargas laterais de vento**



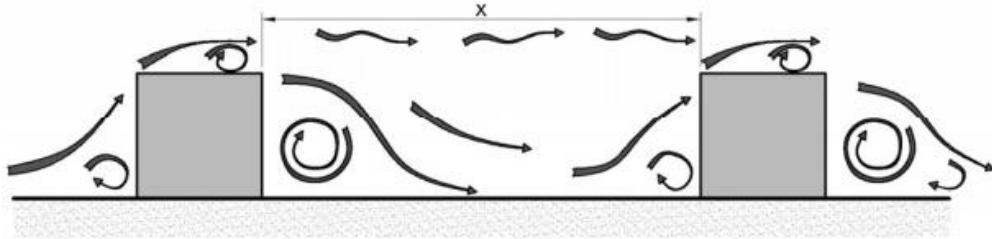
Fonte: CHING *et al.*, 2010.

Segundo Cook (1990 *apud* CARPEGGIANI, 2004), para estruturas que estão alinhadas na direção do vento são definidos três regimes diferentes de escoamento, são eles:

- Regime de escoamento de corpo isolado (Figura 7);
- Regime de escoamento deslizante (Figura 8);
- Regime de escoamento de interferência de esteira (Figura 9).

No regime de escoamento de corpo isolado (Figura 7), os edifícios sofrem de maneira independente com o vento, pois as estruturas estão afastadas de tal modo que cada uma atua de maneira isolada. Forma-se um vórtice chamado de pé de fachada em volta de cada edifício individualmente e o escoamento decorrente da esteira recola ao solo, antes mesmo de chegar à próxima edificação. Nessa situação, a distância de afastamento é denominada de  $x$ , que é superior à somatória dos comprimentos de separação a barlavento e de recolamento a sotavento, assim o escoamento é tratado como se o edifício estivesse isolado, tendo a formação completa da esteira, com carga positivas e negativas (CARPEGGIANI, 2004).

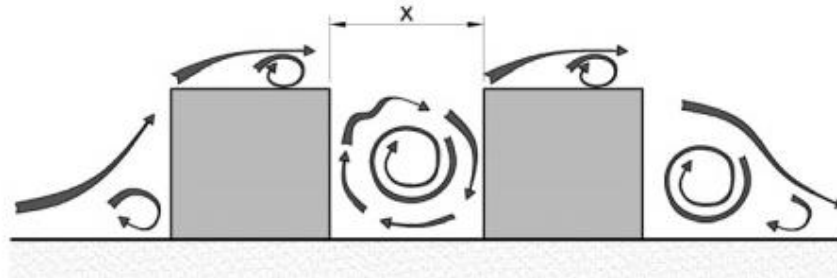
**Figura 7 – Regime de escoamento de corpo isolado**



Fonte: CARPEGGIANI, 2004.

Já no regime deslizante (Figura 8), forma-se um vórtice estável entre os edifícios, pois estão próximos suficientes, assim o vento flui pelo topo das estruturas como se fossem um único obstáculo. E as edificações posicionadas a sotaventos, individualmente, possui forças muitas pequenas, visto que a estrutura está imersa na esteira do primeiro (CARPEGGIANI, 2004).

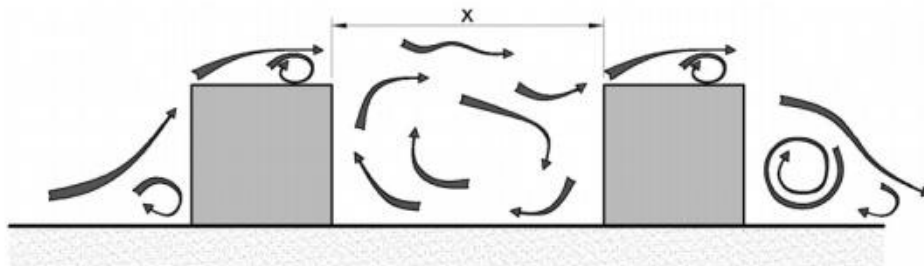
**Figura 8 – Regime de escoamento deslizante**



Fonte: CARPEGGIANI, 2004.

E o regime de escoamento de interferência de esteira (Figura 9), é uma versão intermediária entre o regime de corpo isolado e o regime deslizante. Ou seja, o espaço entre as edificações é pequeno demais para a formação completa da esteira, entretanto, é muito grande para criação de vórtices estabilizados (CARPEGGIANI, 2004).

**Figura 9 – Regime de interferência de esteira**

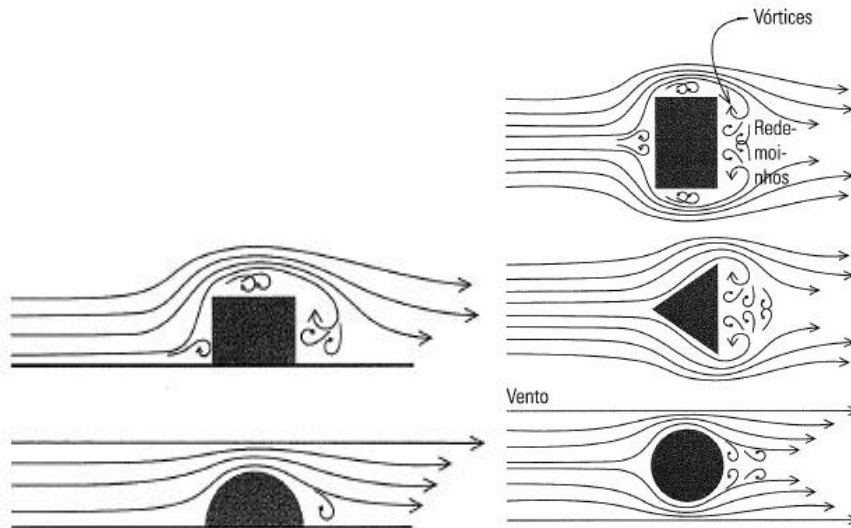


Fonte: CARPEGGIANI, 2004.

### 2.4.2 Influência das proporções

Segundo Ching *et al.* (2010), o projeto de edificações mais alargadas do que altas é conduzido principalmente pelas forças de gravidade verticais. Assim, o impacto de dimensionamento de suas componentes através das cargas de vento é baixo, no entanto devem ser consideradas. E numa edificação, o perfil e a forma são capazes de aumentar ou diminuir os efeitos do vento. Assim, quando um edifício possui um perfil aerodinâmico por exemplo, em que apresenta formas arredondadas ou curvas, apresenta menos resistência às cargas de vento do que em relação a uma forma retangular, com superfícies retas (Figura 10).

Figura 10 – Influência das proporções



Fonte: CHING *et al.*, 2010.

### 2.4.3 Efeitos de vizinhança

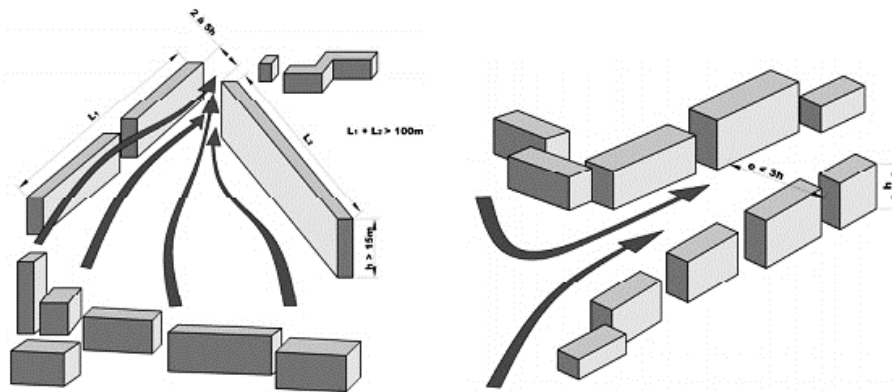
A presença de construções vizinhas pode influenciar os coeficientes aerodinâmicos, deste modo, um obstáculo próximo a estrutura altera o efeito do vento sobre a mesma. Assim, alterando as pressões, forças, e os momentos torçores. De modo geral, estes efeitos são característicos de cada circunstância, logo as normas propõem os coeficientes aerodinâmicos se referindo a construções isoladas (CARPEGGIANI, 2004).

A NBR 6123 (ABNT, 1988) propõe no anexo G três principais maneiras de como a presença de edificações vizinhas altera as forças de vento, que são, o efeito Venturi, a deflexão do vento na direção vertical e a turbulência da esteira.

### 2.4.3.1 Efeito Venturi

Este efeito é descrito como um afunilamento do vento (Figura 11), visto que as formas, dimensões e orientações das construções vizinhas pode acelerar o escoamento do ar entre as paredes confrontantes, como resultado alterando as pressões exercidas. Sobretudo, este efeito tem a característica de aparecer principalmente em construções próximas, os picos de sucção ocorrem nas paredes confrontantes, próximas às arestas de barlavento (ABNT, NBR 6123/1988).

**Figura 11 – Efeito Venturi**

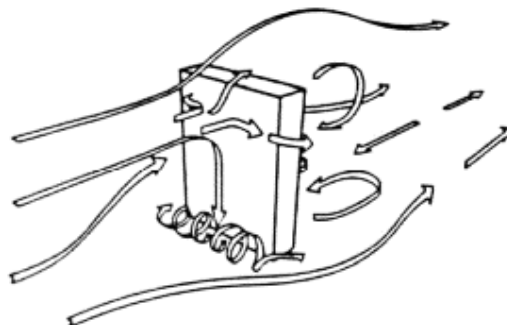


Fonte: CARPEGGIANI, 2004.

### 2.4.3.2 Deflexão do vento na direção vertical

Este fenômeno acontece, quando parte do vento incidido a barlavento na fachada de edificações altas é defletido para baixo, desta maneira, aumentado a velocidade do mesmo em regiões próximas ao do terreno (Figura 12). Através deste efeito, as construções mais baixas próximas a estas zonas podem sofrer com cargas de vento excessivas (ABNT, NBR 6123/1988).

**Figura 12 – Deflexão do vento na direção vertical**

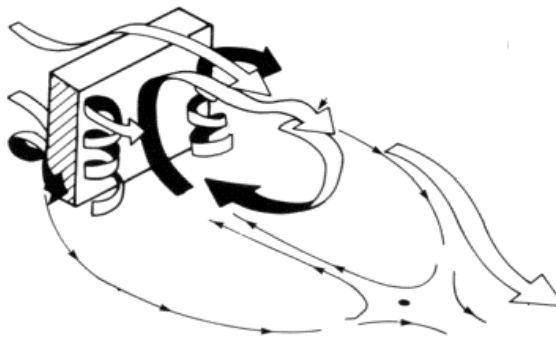


Fonte: CARPEGGIANI, 2004.

### 2.4.3.3 Turbulência da esteira

Segundo a NBR 6123 (ABNT, 1988) este efeito, é quando uma construção localizada à sotavento de outra, sofre com a turbulência gerada por esteiras de uma edificação a barlavento (Figura 13). A turbulência pode causar efeitos dinâmicos chamados de efeitos de golpe que provoca mudanças nas pressões, e se dá principalmente, em estruturas com coberturas e painéis de vedação composto de materiais leves.

**Figura 13 – Turbulência da esteira**



Fonte: CARPEGGIANI, 2004.

### 2.4.4 Conforto do usuário

A interferência do vento não é só na segurança estrutural de uma edificação, mas também nas condições de uso da mesma, já que as oscilações geradas pelas rajadas podem interferir na relação do nível de conforto do usuário. Assim, em certos casos os níveis de oscilações podem ser imperceptíveis, no entanto, também podem chegar à valores que causam sensação de mal-estar ou náusea para pessoas mais sensíveis. Fontes (2003) complementa que mesmo enrijecendo a estrutura, pode acontecer de nem sempre resolver o transtorno, já que, assim reduz a amplitude de aceleração, porém aumenta a frequência, o que pode continuar o efeito desagradável.

De acordo com a NBR 6123 (ABNT, 1988), a amplitude máxima de aceleração  $a_j$  para construções de ocupação humana, não pode ultrapassar o limite de  $0,1 \text{ m/s}^2$ , porém pode ser considerada admissível quando excedida, em média, uma vez a cada 10 anos. Em um determinado nível  $z$  acima da superfície, a amplitude máxima de aceleração é calculada de acordo com expressão 1:

$$a_j = 4 \pi^2 f_j^2 u_j \quad (1)$$

De maneira que:

$a_j$  = amplitude máxima de aceleração ( $m/s^2$ );

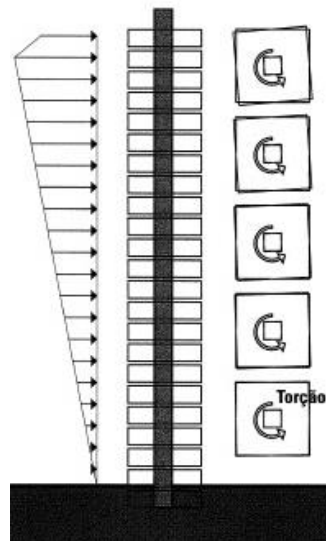
$f_j$  = frequência do modo de vibração  $j$  ( $s^{-1}$ );

$u_j$  = deslocamento do nível  $z$  devido à resposta flutuante do modo de vibração  $j$  ( $m$ ).

#### 2.4.5 Torção

Conforme Ching *et al.* (2010), a torção pode estar em estruturas de qualquer altura, entretanto o comportamento fica crítico em edificações altas, desta maneira, a torção de um único pavimento seria aceitável, porém este efeito se concentra sobre vários pavimentos o que acumula e resulta na rotação total da estrutura (Figura 14).

**Figura 14 – Torção concentrada e rotação da estrutura**



Fonte: CHING *et al.*, 2010.

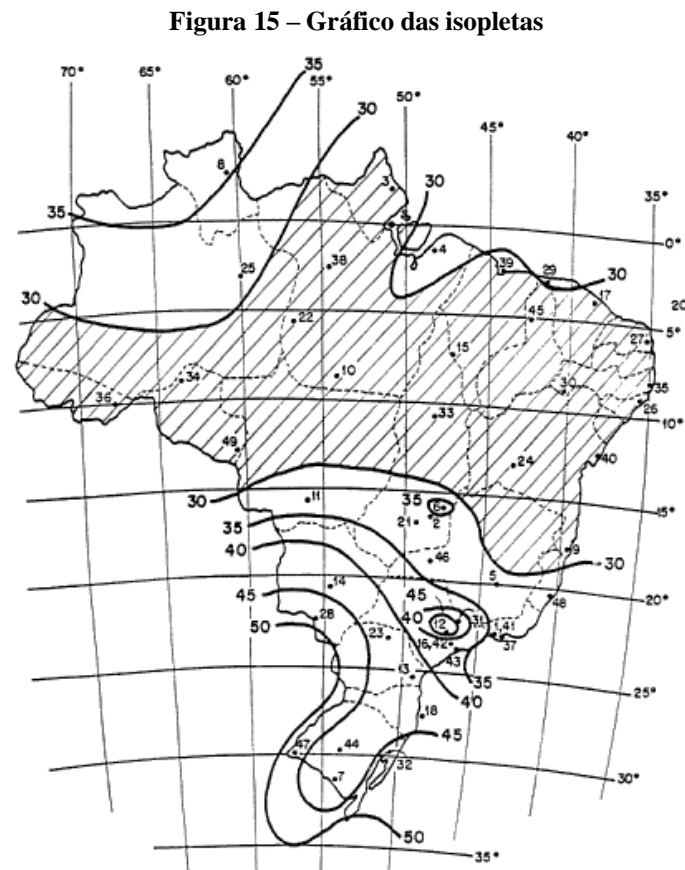
Fontes (2003) acrescenta que as cargas de torção podem acontecer devido a diferença de distribuição de pressão ou também pela assimetria arquitetônica da estrutura. No entanto, complementa que através de ensaios em túneis de vento vem comprovando que edificações com o eixo de simetria torcional, geométrico, e estrutural coincidentes podem sofrer cargas significativas de torção. Que são consequências de um vento oblíquo ou, por um que atua perpendicularmente a uma das faces, assim pode haver distribuição não simétrica das pressões através do resultado da turbulência.

## 2.5 NBR 6123/1988

A norma trata duas maneiras de cálculo, uma estática e outra dinâmica, porém nos itens seguintes, são representadas as sequências de cálculos para as forças resultantes devido a ação estática do vento em estruturas. Visto que, segundo Loredou-Souza *et al.* (2012) explica que nem todos os corpos apresentam repostas relevantes a ação dinâmica, devido as suas particularidades que não estarão sofrendo com a excitação das rajadas, como a frequência natural e o amortecimento.

### 2.5.1 Velocidade básica do vento $V_0$

De acordo com a NBR 6123 (ABNT, 1988), a velocidade básica do vento  $V_0$  (m/s) corresponde à uma velocidade de uma rajada de duração de 3 segundos que, uma vez a cada 50 anos em média pode ser excedida, numa altura de 10 metros acima do terreno plano, em local de campo aberto. Para determinar essa velocidade, utiliza-se o gráfico das isopletas (Figura 15) que tem a relação do mapa brasileiro com as velocidades equivalentes de cada local.



Fonte: NBR 6123 (ABNT, 1988), adaptada.



## 2.5.2 Velocidade característica do vento $V_k$

Em conformidade com Gonçalves *et al.* (2004), a velocidade característica do vento corresponde com a velocidade que o vento atuará de fato na estrutura, visto que visa corrigir a velocidade básica para condições próximas ao real do edifício. Dado que multiplica a velocidade básica por diversos fatores que dentre eles estão em função, da topografia do local, da rugosidade do terreno, da dimensão da edificação, do tipo de ocupação, e também pela altura do edifício.

A NBR 6123 (ABNT, 1988) propõe a expressão 2 para determinar a velocidade característica do vento:

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 \quad (2)$$

De modo que:

$V_k$  = velocidade característica do vento,  $m/s$ ;

$V_0$  = velocidade básica do vento,  $m/s$ ;

$S_1$  = fator topográfico;

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

$S_3$  = fator estatístico.

### 2.5.2.1 Fator topográfico $S_1$

Em conformidade com a NBR 6123 (ABNT, 1988), para determinar o fator topográfico leva em observação as características do relevo para assim, ser consideradas as seguintes hipóteses:

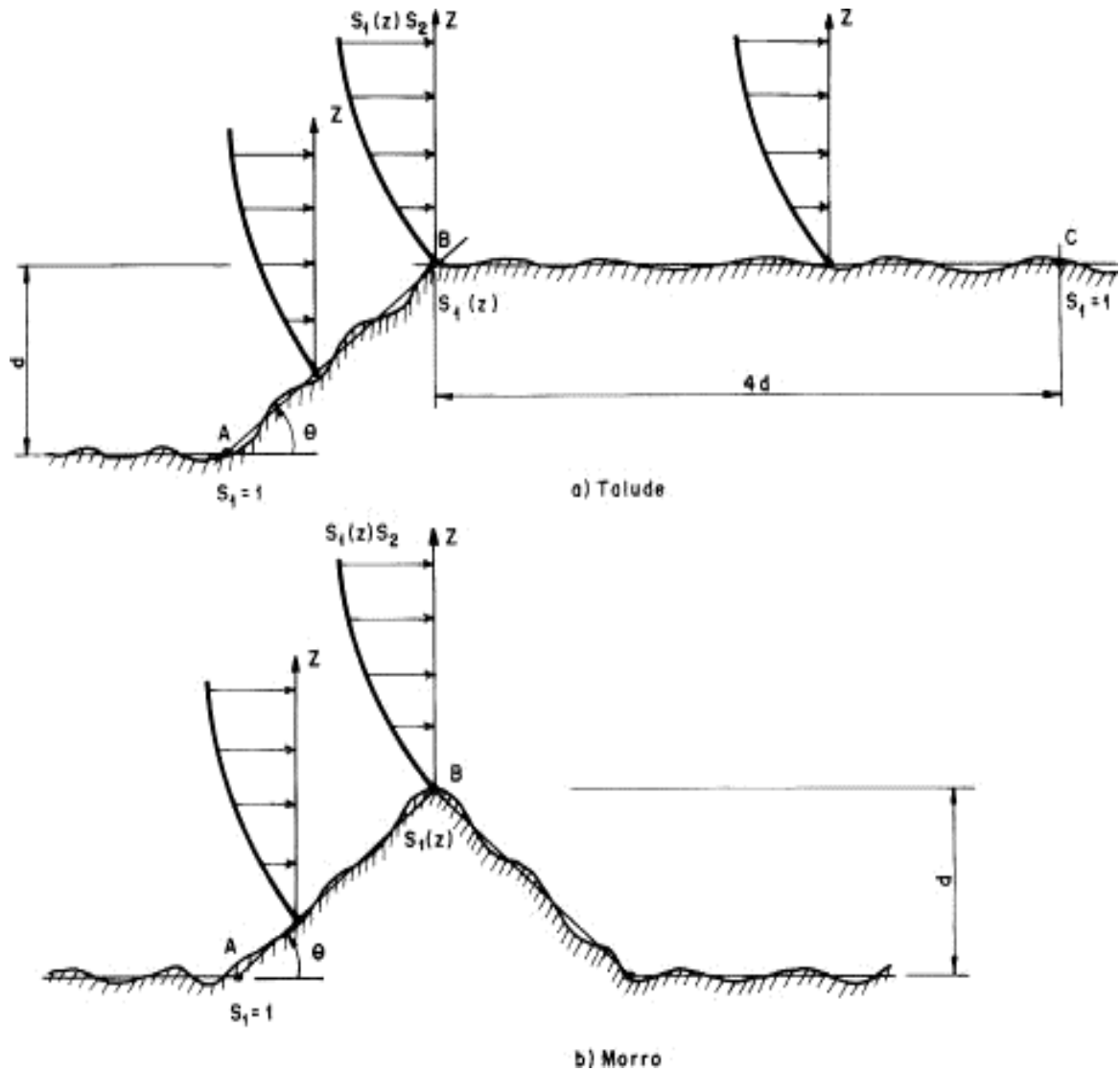
- a) Terrenos planos ou fracamente acidentados, expressão 3:

$$S_1 = 1,0 \quad (3)$$

- b) Taludes e morros:

Segundo a NBR 6123 (ABNT, 1988), a incidência de ventos de fluxo bidimensional é apresentada nas seguintes situações (Figura 16):

Figura 16 – Fator topográfico  $S_1$



Fonte: NBR 6123 (ABNT, 1988), adaptada.

$S_1 = 1,0$  em locais que diz respeito ao pé do morro ou talude, correspondente ao ponto A, e no talude em seu topo à uma distância da crista maior que 4 vezes a proporção de sua altura ( $d$ ), conforme a Figura 16 nos pontos A e C (talude) e ponto A (morro).

$S_1$  é variável de acordo com a altura ( $z$ ) quando localizado no ponto B (talude e morro), levando em observação as variações da inclinação ( $\theta$ ), de modo que:

- Se:  $\theta < 3^\circ$ , logo equação 4;

$$S_1(z) = 1,0 \quad (4)$$

- Se:  $6^\circ \leq \theta \leq 17^\circ$ , logo equação 5:

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

- Se:  $\theta \geq 45^\circ$ , logo equação 6:

$$S_1(z) = 1,0 + \left(2,5 - \frac{z}{d}\right) 0,31 \quad (6)$$

De forma que:

$S_1$  = fator topográfico;

$z$  = altura medida a partir do terreno,  $m$ ;

$d$  = diferença de nível entre o topo e a base,  $m$ ;

$\theta$  = inclinação média do talude ou encosta do morro, graus ( $^\circ$ ).

Vale a observação que em todos os casos, o valor deve ser maior ou igual a 1,0. E também, quando os ângulos estiverem entre  $3^\circ < \theta < 6^\circ$  e  $17^\circ < \theta < 45^\circ$ , o valor de  $S_1$  é obtido através de interpolação linear.

- c) Para vales profundos protegidos de ventos de qualquer direção, expressão 7:

$$S_1 = 0,9 \quad (7)$$

#### 2.5.2.2 Fator de rugosidade do terreno, altura sobre o terreno, e dimensões da edificação $S_2$

A NBR 6123 (ABNT, 1988) apresenta a condição do valor de  $S_2$  considerando a combinação de efeitos que envolvem a rugosidade do terreno, as dimensões do edifício, ou a própria parte da edificação em consideração, e também, a variação da velocidade do vento com a altura relativa sobre o terreno. A norma indica em cinco categorias a classificação da rugosidade do terreno, que são destacadas a seguir:

Categoria I: Corresponde em superfícies lisas de grandes proporções com extensão de mais de 5  $km$ , no qual é medida no sentido e direção do vento incidente, por exemplo, lagos, rios, pântanos sem presença de vegetação, e mar calmo.

Categoria II: Refere-se em terrenos abertos com alguns obstáculos isolados, como edifícios baixos, e árvores. Os obstáculos devem ter a cota média não excedendo o valor de 1 metro. Isto inclui locais como, fazendas sem muros, campos de aviação, pradarias, charnecas, pântanos com vegetação rala e zonas costeiras planas.

Categoria III: Diz respeito à terrenos planos ou com ondulações, com obstáculos como, edificações baixas, muros e esparsas. Os obstáculos possuem a cota média de 3 metros. Inclui lugares como fazendas com muros, casas de campo e granjas.

Categoria IV: São terrenos cobertos por obstruções pouca espaçadas e numerosas, em locais de zonas florestais, industriais ou urbanas. Tais como, cidades pequenas, áreas industriais, bosques e parques com muitas árvores. O topo dos obstáculos tem a cota média por volta de 10 metros.

Categoria V: Representa terrenos cheios de obstáculos grandes, altos e com pouco espaçamento, como florestas com árvores altas, complexos industriais muito desenvolvidos e centros de grandes cidades. A cota média corresponde igual ou superior a 25 metros de altura dos obstáculos.

Na questão das dimensões dos edifícios, a NBR 6123 (ABNT, 1988) classifica os edifícios em A, B e C, e determina alguns intervalos de tempo como 3, 5 e 10 segundos, respectivamente, para o cálculo da velocidade média. Portanto, as classes são:

Classe A: corresponde ao intervalo de tempo de 3 segundos, e é composta de todas unidades de vedação, seus elementos de fixação e também as peças isoladas de estruturas sem vedação. Faz parte, toda edificação em que a maior dimensão vertical ou horizontal não ultrapasse 20 metros.

Classe B: refere-se ao intervalo de 5 segundos, e é composta por parte ou toda a edificação, em que a maior dimensão da superfície frontal tanto vertical ou horizontal esteja entre os valores de 20 a 50 metros.

Classe C: diz respeito ao intervalo de 10 segundos, e é formada por toda ou parte da edificação, no qual a maior dimensão da superfície frontal tanto vertical ou horizontal ultrapasse o valor de 50 metros.

Segundo a NBR 6123 (ABNT, 1988), para encontrar o valor de  $S_2$  começa através das escolhas das categorias e das classes em função da altura  $z$  em metros sobre o nível do terreno, a norma ainda complementa que existe duas formar diferentes para encontrar tal valor.

A primeira maneira é usando a expressão 8:

$$S_2 = b F_r \left( \frac{z}{10} \right)^p \quad (8)$$

Logo que:

$S_2$  = fator de rugosidade;

$b$  e  $p$  = são parâmetros meteorológicos, presentes na Tabela 1;

$F_r$  = corresponde ao fator de rajada, sempre em referência à categoria II;

$z$  = é a altura do ponto em análise do edifício, dado em metros.

**Tabela 1 – Parâmetros meteorológicos**

Categoria	$Z_g(m)$	Parâmetros	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: NBR 6123 (ABNT, 1988), adaptada.

Sendo que  $Z_g$ , diz respeito à altura que forma o contorno superior da camada atmosférica.

Já à segunda forma de conseguir o valor de  $S_2$ , é por meio da Tabela 2 através da categoria, classe e altura do edifício.

Tabela 2 – Valor  $S_2$ 

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: NBR 6123 (ABNT,1988), adaptada.

### 2.5.2.3 Fator estatístico $S_3$

Conforme a NBR 6123 (ABNT, 1988), para determinar o valor de  $S_3$  é através de conceitos estatísticos levando em consideração a vida útil e segurança da edificação. A norma também estabelece uma vida útil para a edificação por volta de 50 anos, e propõem que a velocidade básica seja excedida ao menos uma vez no intervalo, com probabilidade de 63%. Os valores correspondentes de  $S_3$  estão presentes na Tabela 3 a seguir:

**Tabela 3 – Valores mínimos do fator estatístico  $S_3$** 

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

Fonte: NBR 6123 (ABNT, 1988), adaptada.

A NBR 6123 (ABNT, 1988) também considera a obtenção para outros valores de  $S_3$ , de modo que considera outros valores para os níveis de probabilidade e para outros intervalos de exposição do vento, utilizando a Tabela 4 e a expressão 9, também conclui que os valores não podem ser inferiores aos da Tabela 3.

**Tabela 4 – Fator  $S_3$** 

<b><math>m</math></b>	<b>Valores de <math>S_3</math> para <math>Pm</math></b>					
	<b>0,10</b>	<b>0,20</b>	<b>0,50</b>	<b>0,63</b>	<b>0,75</b>	<b>0,90</b>
2	0,86	0,76	0,64	0,60	0,57	0,53
10	1,10	0,98	0,82	0,78	0,74	0,68
25	1,27	1,13	0,95	0,90	0,85	0,79
50	1,42	1,26	1,06	1,00	0,95	0,88
100	1,58	1,41	1,18	1,11	1,06	0,98
200	1,77	1,57	1,31	1,24	1,18	1,09

Fonte: NBR 6123 (ABNT, 1988), adaptada.

$$S_3 = 0,54 \left[ -\frac{\ln(1 - Pm)}{m} \right]^{-0,157} \quad (9)$$

De maneira que:

$S_3$  = fator estatístico;

$Pm$  = probabilidade excedida;

$m$  = período em anos.

### 2.5.3 Pressão dinâmica $q$

A NBR 6123 (ABNT, 1988) determina através da fórmula 10 a pressão dinâmica exercida pelo vento na superfície, em função da velocidade característica:

$$q = 0,613 V_k^2 \quad (10)$$

Sendo que:

$q$  = pressão dinâmica,  $N/m^2$ ;

$V_k$  = velocidade característica,  $m/s$ .

### 2.5.4 Força de arrasto $F_a$

A NBR 6123 (ABNT, 1988) apresenta que na edificação a força global do vento  $F_g$ , é dada através da soma vetorial de todas as forças que incidem nas várias superfícies da estrutura. A componente dessa força, é denominada de força de arrasto,  $F_a$ , que é calculada conforme a expressão 11:

$$F_a = C_a q A_e \quad (11)$$

De maneira que:

$F_a$  = força de arrasto,  $N$ ;

$C_a$  = coeficiente de arrasto;

$q$  = pressão dinâmica,  $N/m^2$ ;

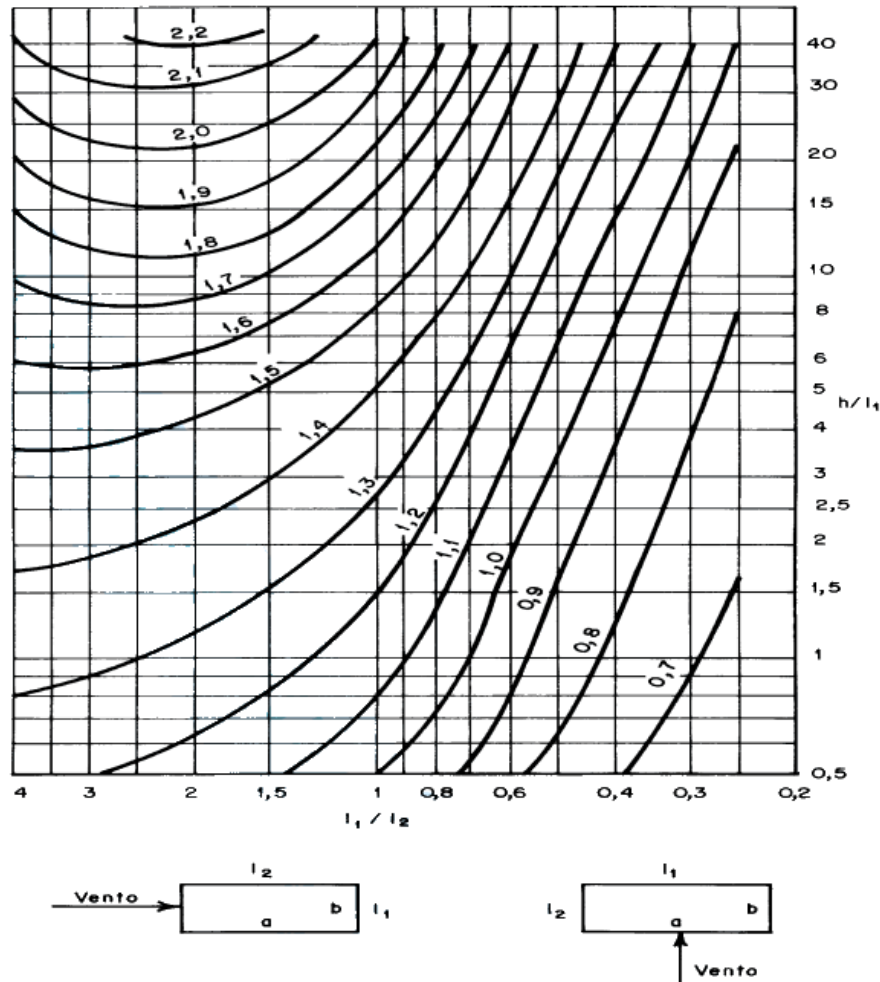
$A_e$  = área frontal efetiva,  $m^2$ .

#### 2.5.4.1 Coeficiente de arrasto $C_a$

Segundo a NBR 6123 (ABNT, 1988), para determinar o coeficiente de arrasto utiliza-se o ábaco presente na Figura 17 em razão da relação de  $h/l_1$  e  $l_1/l_2$ , em corpos com seção paralelepípedica, utilizado para vento de baixa turbulência, e considerando ventos com incidências perpendiculares.



Figura 17 – Coeficiente de arrasto para vento de baixa turbulência

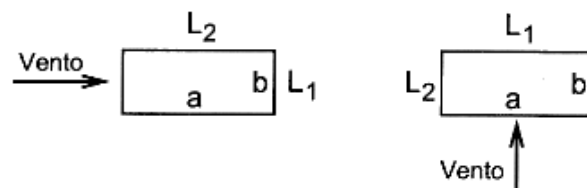
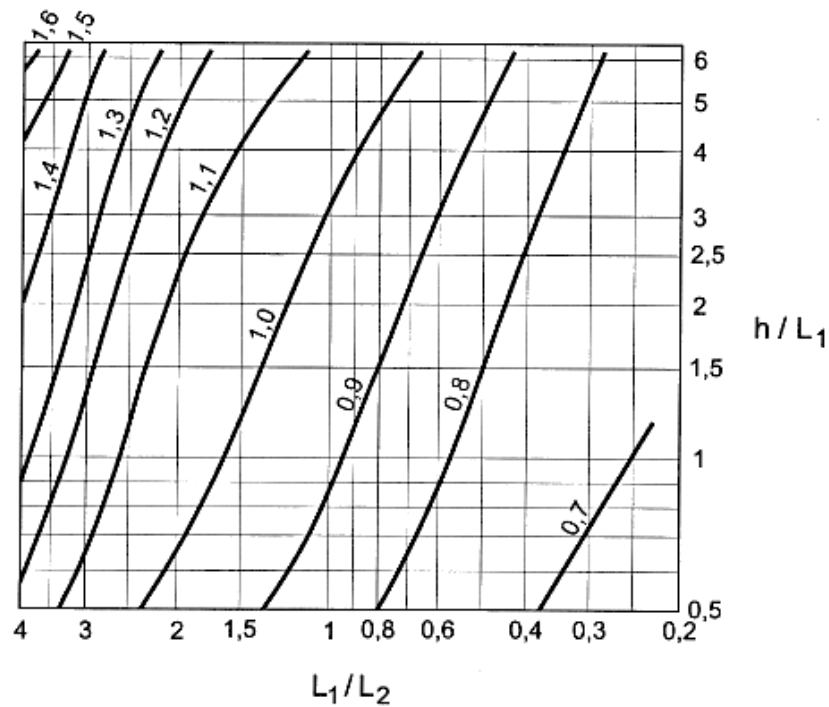


Fonte: NBR 6123 (ABNT, 1988), adaptada.

Para vento de alta turbulência referente a Figura 18, a NBR 6123 (ABNT, 1988) considera quando a edificação não excede duas vezes a altura média em relação as edificações vizinhas, levando em conta uma distância mínima na direção e sentido do vento incidente:

- 500 m, para um edifício de até 40 m de altura;
- 1000 m, para um edifício de até 55 m de altura;
- 2000 m, para um edifício de até 70 m de altura;
- 3000 m, para um edifício de até 80 m de altura.

Figura 18 – Coeficiente de arrasto para vento de alta turbulência



Fonte: NBR 6123 (ABNT, 1988), adaptada.

### 2.5.5 Momento torçor $M_t$

Segundo a NBR 6123 (ABNT, 1988) as forças horizontais são obtidas através da análise da ação do vento incidindo apenas perpendicularmente as faces de edificações paralelepipedais. Os momentos torçores são determinados através da multiplicação das excentricidades em relação ao eixo vertical geométrico pelas forças horizontais. A norma propõe os valores das tais excentricidades que estão definidas a seguir:

- Edificações sem efeitos de vizinhança, expressões 12 e 13:

$$e_a = 0,075 a \quad (12)$$

$$e_b = 0,075 b \quad (13)$$

- Edificações com efeitos de vizinhança, expressões 14 e 15:

$$e_a = 0,15 a \quad (14)$$

$$e_b = 0,15 b \quad (15)$$

De forma que:

$e_a$  = excentricidade de lado maior;

$e_b$  = excentricidade de lado menor;

$a$  = comprimento de lado maior;

$b$  = comprimento de lado menor.

Por fim, para estabelecer o momento torçor a fórmula 16 é a seguinte:

$$M_t = F e \quad (16)$$

Sendo:

$M_t$  = momento torçor,  $N \cdot m$ ;

$F$  = força resultante,  $N$ ;

$e$  = excentricidade,  $m$ .

### 2.5.6 Efeitos de vizinhança

De acordo com a NBR 6123 (ABNT, 1988), de maneira geral os efeitos de vizinhança não podem ser definidos numericamente de modo genérico e normativo. A norma sugere que a maneira mais adequada seria através de ensaios em túnel de vento, de forma que, reproduz as características dos arredores da edificação de modo que seja compatível com o real, assim encontrando valores das interferências das estruturas em volta que causam à edificação em estudo. No entanto, pode acontecer contrariedade quando ocorrer mudanças significativas no ambiente em volta da estrutura durante o decorrer do tempo de vida útil da mesma. No anexo G, indica uma metodologia de cálculo para descobrir valores próximos dos coeficientes aerodinâmicos pelo efeito de vizinhança. Assim, o efeito de vizinhança é definido na equação 17:

$$F_v = \frac{C \text{ na edificação com vizinhança}}{C \text{ na edificação isolada}} \quad (17)$$

De tal que:

$F_v$  = efeito de vizinhança;

$c$  = coeficiente aerodinâmico.

Através do afastamento dos planos do edifício principal e vizinha, e com relação a menor das duas dimensões dos edifícios, a NBR 6123 (ABNT, 1988) aponta valores específicos para  $F_v$ , usando a equação 18 a seguir:

$$\frac{s}{d^*} \quad (18)$$

Sendo:

$s$  = é o afastamento dos planos das faces confrontantes de dois edifícios altos vizinhos, de maneira que,  $a \times b$  é as proporções em planta dos edifícios ( $a \times b$  entre  $1 \times 1$  e  $4 \times 1$ );

$d^*$  = corresponde entre a menor das dimensões, do lado menor  $b$  ou a semidiagonal representada na fórmula 19 abaixo:

$$\frac{1}{2} \sqrt{a^2 + b^2} \quad (19)$$

Logo, os valores específicos para  $F_v$  estão nas condições 20 e 21 a seguir:

$$\frac{s}{d^*} \leq 1,0 \quad F_v = 1,3 \quad (20)$$

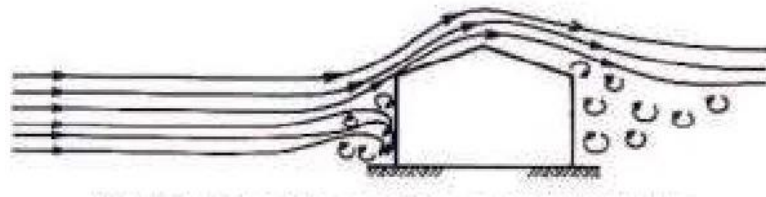
$$\frac{s}{d^*} \geq 3,0 \quad F_v = 1,0 \quad (21)$$

Por fim, a NBR 6123 (ABNT, 1988) indica que em casos que os valores estejam entre 1,0 e 3,0 de  $s/d^*$ , deve-se utilizar do cálculo de interpolação linear para obter o fator de  $F_v$ , no qual estará nos valores entre 1,0 e 1,3.

## 2.6 AERODINÂMICA DAS EDIFICAÇÕES

Aerodinâmica segundo o dicionário Michaelis (2019) é parte da mecânica que trata do movimento do ar e de outros fluidos gasosos, bem como das forças que agem sobre corpos sólidos, isto é, estuda a dinâmica dos corpos que se movem dentro do fluido (ar). Dentro do assunto são estudadas as forças de sustentação e de arrasto, pois elas interagem em corpos em movimento ou parados. Essa ciência é utilizada para projetar aviões, carros, edificações, e entre outros objetos que estão em muito contato com o vento e precisam da aerodinâmica para adquirir estabilidade. Sendo assim, o vento ao entrar em contato com a superfície de qualquer objeto, tende a forçá-lo ao movimento na mesma direção, ou seja, sempre que o vento contorna um objeto seu campo de velocidade gera em toda a superfície um campo de tensões, a que se encontra atuando sobre todo o objeto (Figura 19).

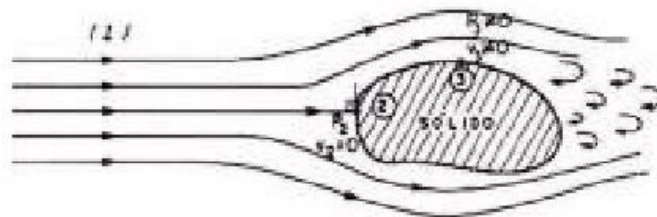
**Figura 19 – Linhas de fluxo para edificação para telhado duas águas**



Fonte: GONÇALVES *et al.*, 2004.

O Princípio de Bernoulli é utilizado para relacionar a velocidade do fluxo do ar e a pressão correspondente (Figura 20). Segundo Gonçalves *et al.* (2004) pode se dizer que para um fluido incompressível e um fluido permanente, as somas das pressões dinâmica, estática e piezométrica é constante, mas no caso da ação do vento em edificações é possível desprezar a pressão piezométrica, o que permite dizer que a soma das demais pressões é constante. Este teorema vale para uma mesma linha de fluxo se o escoamento é rotacional e entre dois pontos se o escoamento é irrotacional.

**Figura 20 – Aplicação do teorema de Bernoulli**



Fonte: GONÇALVES *et al.*, 2004.

Para Martins (2018) os carregamentos gerados pelas pressões aerodinâmicas flutuam constantemente, uma vez que o vento atua em forma de rajadas. A resposta do edifício ocorre tanto na direção longitudinal da incidência do vento quanto na direção transversal. Ela é composta das respostas dinâmica e estática, sendo que a primeira leva em consideração atuação das rajadas de vento.

Existem três tipos de forças das integrações das tensões ao longo da superfície, força de sustentação, arrasto e transversais, onde Lopes (1992) segue uma regra geral para classificá-las, ele explica que a força de sustentação tem pequena importância do ponto de vista da segurança estrutural, exceto em casos particulares, como por exemplo as pontes suspensas. Já a força de arrastamento é a que assume um maior grau de relevância, pois pode ser considerada em qualquer estudo aerodinâmico ou aeroelástico. No que respeita às forças transversais, embora não seja tão evidente o seu interesse, assumem um papel muito importante na análise dinâmica de estruturas muito altas e esbeltas.

No que diz questão ao formato da edificação, Ching *et al.* (2010) demonstram que edificações com perfis aerodinâmicos, representadas por formas arredondadas ou curvas, usualmente oferecem menor esforço às cargas de vento do que as retangulares, com predomínio de superfícies retas, o que implica diretamente no tipo de esforço aerodinâmico, isso significa que o perfil e a forma são variáveis, com grande influência sobre os efeitos de pressão causados pelo vento em uma edificação, podendo aumentá-los ou diminuí-los.

### **2.6.1 Aeroelasticidade**

A aeroelasticidade conforme Lopes (1992) tem como objetivo o estudo da interação entre as forças aerodinâmicas e as forças elásticas, constituindo um domínio científico inicialmente explorado pela engenharia aeronáutica, e posteriormente por outras áreas da engenharia preocupada com o estudo de escoamentos em torno de objetos imersos, isto é, a aeroelasticidade estuda a parte dos fenômenos em que as forças aerodinâmicas e o movimento das estruturas interagem de maneira significativa.

### **2.6.2 Arrastamento**

Sendo principal força a ser analisada dentro do âmbito da aerodinâmica, Loredou-Souza *et al.* (2012) explicam que o arrastamento pode ser descrito como uma ação estática ocasionada pela incidência do vento nas edificações. Essa força acontece no eixo longitudinal da edificação,

na direção da corrente. Sendo assim, a medida que o arrastamento é menor, os esforços na edificação também serão menores, contudo, pode se dizer que uma simples análise da força de arrasto pode reduzir o consumo de gastos com ferragens e concreto, assim diminuindo no orçamento da construção. E seguindo a NBR 6123 (ABNT, 1988) para determinar a força de arrastamento  $F_a$ , segue o item 2.5.4 correspondente do trabalho.

### 2.6.3 Coeficientes aerodinâmicos

A norma NBR 6123 (ABNT, 1988) estabelece condições exigíveis na consideração das forças devidas à ação estática e dinâmica do vento para efeitos de cálculo em edificações, porém neste trabalho será somente considerado os efeitos estáticos que serão estabelecidos pelos coeficientes aerodinâmicos. Nela também não se aplica a edificações de formatos, dimensões ou localização incomuns, nesses casos devem ser feitos outros tipos de estudos para determinar as forças atuantes das rajadas e seus efeitos. Os resultados serão experimentados e obtidos em um túnel de vento, com simulação das principais características do vento natural e podem ser usados em substituição do recurso aos coeficientes constantes na norma. Assim, dentro dos coeficientes a serem definidos estão, o de arrasto  $C_a$  presente no item 2.5.4.1 do trabalho, o de forças  $C_f$ , o de pressão  $C_p$ , e por fim os coeficientes de forma externa e interna.

#### 2.6.3.1 Coeficientes de forças $C_f$

Através da NBR 6123 (ABNT, 1988) o coeficiente de força global é obtido pela expressão 22, decomposta tanto na vertical como na horizontal ( $x$  e  $y$ ):

$$C_f = \frac{F}{q A} \quad (22)$$

Sendo que:

$C_f$  = coeficiente de força, especificado em cada caso, direção ( $x$  e  $y$ );

$F$  = força resultante,  $N$ ;

$q$  = pressão dinâmica do vento,  $N/m^2$ ;

$A$  = área de referência, especifica em cada caso,  $m^2$ .

### 2.6.3.2 Coeficientes de pressão $C_p$

Segundo a NBR 6123 (ABNT, 1988) a força do vento depende da diferença de pressão em duas faces que sejam opostas da parte da edificação em estudo, os coeficientes de pressão são dados para superfícies externas e internas, portanto entende-se por pressão efetiva  $\Delta_p$ , em que valor definido pela fórmula 23:

$$\Delta_p = \Delta_{pe} - \Delta_{pi} \quad (23)$$

De modo que:

$\Delta_p$  = pressão efetiva em um ponto na superfície;

$\Delta_{pe}$  = pressão efetiva externa;

$\Delta_{pi}$  = pressão efetiva interna.

Logo, expressão 24:

$$\Delta_p = (C_{pe} - C_{pi}) q \quad (24)$$

De maneira que:

$\Delta_p$  = pressão efetiva em um ponto na superfície;

$C_{pe}$  = coeficiente de pressão externa;

$C_{pi}$  = coeficiente de pressão interna;

$q$  = pressão dinâmica do vento,  $N/m^2$ .

Sendo assim, o coeficiente de pressão externa  $C_{pe}$  pode ser obtido através do método 25 a seguir:

$$C_{pe} = \frac{\Delta_{pe}}{q} \quad (25)$$

E, o coeficiente de pressão interna  $C_{pi}$  pode ser determinado pela fórmula 26 a seguir:



$$C_{pi} = \frac{\Delta_{pi}}{q} \quad (26)$$

Os valores desses coeficientes determinam se a pressão está causando sucção ou sobrepressão na estrutura, caso seja positiva, indica sobrepressão, caso negativa, indica sucção. Se o valor de  $\Delta_p$  for positivo indica uma pressão efetiva com o sentido de uma sobrepressão externa, e se o valor de  $\Delta_p$  for negativo indica uma pressão efetiva com o sentido de uma sucção externa.

### 2.6.3.3 Coeficientes de forma, externa e interna $C_e$ e $C_i$

A NBR 6123 (ABNT, 1988) determina que a fórmula 27 indica quando a força do vento está em direção perpendicular à área da superfície da edificação, como demonstra abaixo:

$$F = F_e - F_i \quad (27)$$

Determinado por:

$F$  = força resultante,  $N$ ;

$F_e$  = força externa à edificação, agindo na superfície plana de área  $A$ ;

$F_i$  = força interna à edificação, agindo na superfície plana de área  $A$ .

Onde, equação 28:

$$F = (C_e - C_i) q A \quad (28)$$

Sendo assim:

$F$  = força resultante,  $N$ ;

$C_e$  = coeficiente de forma externo;

$C_i$  = coeficiente de forma interno;

$q$  = pressão dinâmica do vento,  $N/m^2$ ;

$A$  = área de referência,  $m^2$ .

Portanto, para determinar o coeficiente de forma externo  $C_e$  segue a fórmula 29.

$$C_e = \frac{F_e}{q A} \quad (29)$$

Já, para definir o coeficiente de forma interno  $C_i$  é utilizado a equação 30, a seguir:

$$C_i = \frac{F_i}{q A} \quad (30)$$

Da mesma maneira que se considerou os coeficientes de pressão, os valores positivos dos coeficientes de forma externo e interno correspondem a sobrepressões, e valores negativos correspondem a sucções. Um valor positivo para  $F$  indica que esta força atua para o interior, e um valor negativo indica que esta força atua para o exterior da edificação. Para os casos previstos na NBR 6123 (ABNT, 1988), considera ser que a pressão interna é distribuída de maneira exclusiva no interior da edificação. Conseqüentemente em superfícies internas planas, expressão 31.

$$C_{pi} = C_i \quad (31)$$

De maneira que:

$C_{pi}$  = coeficiente de pressão interna;

$C_i$  = coeficiente de forma interno.

## 2.7 ABSORVEDORES DINÂMICOS DE VIBRAÇÕES

Existem diversos tipos de dispositivos absorvedores de vibrações, sejam eles controlados por aparelhos digitais ou até mesmo dispositivos que dissipam as energias geradas por essas oscilações. A escolha do melhor método varia de acordo com a necessidade, como por exemplo, se o método é viável para responder as solicitações externas expostas a ele, além de ser levar em consideração a segurança dos usuários, considerando sempre o conforto e seu bem-estar.

Para Rao (2009) um absorvedor dinâmico de vibração pode ser definido como um sistema massa-mola, projetado para que as frequências naturais do sistema resultante fiquem longe da frequência de excitação. Onde são divididos em ADVs (absorvedores dinâmicos de

vibrações) passivos não amortecidos e ADVs com amortecimento viscoso, sendo eles ligados inicialmente a estruturas primárias constituídas de sistemas amortecidos e não amortecidos de um grau de liberdade.

Para Beneveli (2002), um sistema de controle passivo pode ser definido como uma instalação de um ou mais dispositivos acoplados a uma estrutura que absorvem parte da energia conduzida pelo carregamento dinâmico, reduzindo a dissipação dessa energia na estrutura principal.

### **2.7.1 Amortecedor de massa sintonizado (AMS)**

Alves (2015) fez um estudo com o controle de vibrações para os casos de ação de vento e terremoto. Foram usados como dispositivos de controle o AMS (amortecedor de massa sintonizado) e o isolamento de base. Os resultados revelaram que o AMS é eficiente no controle da estrutura sob ação do vento, desde que os esforços tenham frequências próximas a do dispositivo. No caso de terremotos, apenas o isolamento da base é eficaz. E complementa que amortecedor de massa sintonizado é um dispositivo de controle passivo, caracterizado como um sistema massa-mola-amortecedor. Estando a estrutura sujeita a carregamentos dinâmicos, o amortecedor promove a dissipação da energia do sistema, através da oscilação de seus elementos em frequência semelhante ao que está sendo excitada.

A técnica de Den Hartog (1956 *apud* ALVES, 2015), utilizada com o objetivo de diminuir os deslocamentos da estrutura, ou seja, reduzir a amplitude do pico de ressonância. Assim, para se atingir este objetivo, devem-se definir os parâmetros do AMS visando obter os valores ótimos. É divulgado um estudo mais aprofundado sobre o tema, entretanto, a maior parte que foi desenvolvida foi destinada a engenharia mecânica empregando em maquinários. Estruturas de edifícios, são sujeitas ainda a outros tipos de carregamentos, como ventos e terremotos, que possuem variados elementos de frequência. O AMS em um sistema de muitos graus de liberdade e em edificações amortecidas reage de maneira diferente.

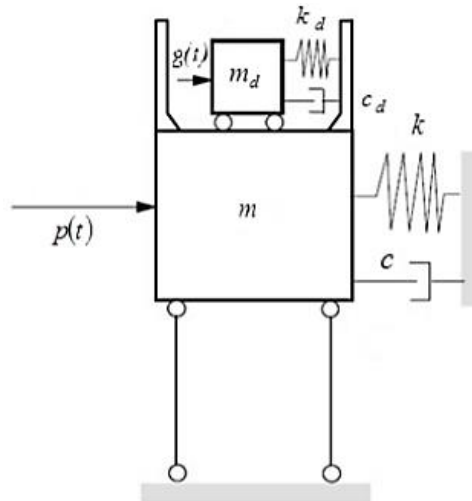
### **2.7.2 Sistema com um grau de liberdade**

Housner *et al.* (1997 *apud* ALVES, 2015), diz que em edificações altas, quanto a um AMS sintonizado na frequência natural do primeiro modo de vibração da estrutura, essa primeira resposta pode ser reduzida de maneira notável, sendo assim, o que obtém melhor

resultado, no entanto, os resultados associados aos modos mais altos são, de certa maneira, apenas um pouco reduzidos ou, até mesmo, ampliados.

Em concordância com Den Hartog (1956 *apud* ALVES, 2015) a Figura 21 apresenta um sistema de apenas um grau de liberdade sujeito a uma força externa dinâmica, e na parte superior está um sistema massa-mola que controla as vibrações.

**Figura 21 – Sistema de um grau de liberdade**



Fonte: BENEVELI, 2002.

Com uma análise da figura, fazendo um equilíbrio de forças e reações é possível chegar às equações 32 e 33 de equilíbrio dinâmico do sistema a seguir:

$$m \ddot{u} + c \dot{u} + k u = c_d \dot{u}_d + k_d u_d + p(t) \quad (32)$$

$$m_d \ddot{u}_d + c_d \dot{u}_d + k_d u_d = -m_d \ddot{u} + g(t) \quad (33)$$

Sendo que:

$m_d$  = massa do amortecedor;

$m$  = massa do sistema estrutural;

$u$  = é o deslocamento relativo do sistema estrutural de massa  $m$ ;

$u_d$  = é o deslocamento relativo da massa do AMS, em relação à estrutura;

$c$  = amortecimento do sistema principal;

$k$  = rigidez do sistema principal;

$c_d$  = amortecimento do AMS;

$k_d$  = rigidez do AMS;

$g(t)$  = é a força aplicada à base da estrutura. No caso do vento seu valor é zero e para excitações sísmicas é igual a força efetiva do terremoto.

A frequência natural da estrutura quando sujeita à vibração livre é definida pela fórmula 34, e o amortecimento crítico é dado pela expressão 35.

$$\omega^2 = \frac{k}{m} \quad (34)$$

$$c = 2 m \omega \xi \quad (35)$$

Para o amortecedor, a frequência natural e o coeficiente de amortecimento estão definidos pelas fórmulas 36 e 37:

$$\omega_d^2 = \frac{k_d}{m_d} \quad (36)$$

$$c_d = 2 \xi_d \omega_d m_d \quad (37)$$

Sendo:

$c_d$  = amortecimento do AMS;

$k_d$  = rigidez do amortecedor;

$m_d$  = massa do amortecedor;

$\xi_d$  = fator de amortecimento;

$\omega_d$  = frequência do amortecedor.

Relacionando a massa da estrutura principal com a massa do amortecedor, têm-se a seguinte relação 38:

$$\mu = \frac{m_d}{m} \quad (38)$$

É definido os coeficientes adimensionais de frequência através das fórmulas 39 e 40:

$$\rho = \frac{\Omega}{\omega} = \frac{\Omega}{\sqrt{k/m}} \quad (39)$$

$$\rho_d = \frac{\Omega}{\omega_d} = \frac{\Omega}{\sqrt{k_d/m_d}} \quad (40)$$

Sendo que:

$\Omega$  = é a frequência de excitação da estrutura;

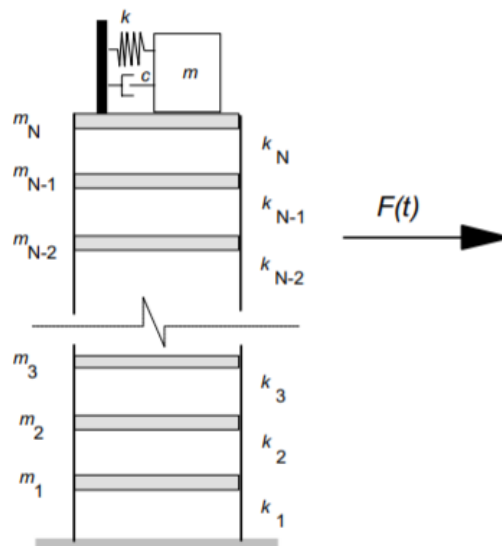
$\omega$  = é a frequência do sistema principal.

### 2.7.3 Sistemas com vários graus de liberdade

De acordo com Connor (2003 *apud* ALVES, 2015), as equações que definem a maneira de como se comporta um sistema AMS com  $N$  graus de liberdade, são definidas seguindo um sistema de dois graus de liberdade e um amortecedor no topo.

Segundo Beneveli (2002), a Figura 22 demonstra um sistema de vários graus de liberdade com um dispositivo AMS instalado e sujeito à uma excitação externa qualquer.

Figura 22 – Sistema de vários graus de liberdade com AMS instalado



Fonte: BENEVELI, 2002.

Assim, é possível fazer uma análise e chegar nas seguintes equações 41 e 42:

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = F(t) + D' p(t) \quad (41)$$

$$m_d \ddot{u}_d(t) + c_d \dot{u}_d(t) + k_d u_d(t) = -m\ddot{u}_N + g(t) \quad (42)$$

De maneira que:

$m$  = matrizes de massa;

$m_d$  = massa do amortecedor;

$c$  = amortecimento;

$c_d$  = amortecimento do AMS;

$k$  = rigidez da estrutura;

$k_d$  = rigidez do amortecedor;

$F(t)$  = carregamentos dinâmicos aplicados sobre a estrutura;

$g(t)$  = carregamentos dinâmicos aplicados sobre a estrutura e o AMS;

$u(t)$  = é o deslocamento da massa em relação ao solo;

$u_d(t)$  = é o deslocamento do AMS em relação ao andar em que ele se encontra instalado.

O  $p(t)$ , corresponde pela fórmula 43:

$$p(t) = cz(t) + kz(t) \quad (43)$$

E o  $D'$ , representa o vetor de localização do AMS, e o componente  $d_j$  do vetor  $D'$  é dado pela relação 44 e 45.

$$j \neq k, d_j = 0 \quad (44)$$

$$j = k, d_j = 1 \quad (45)$$

Além disso, na Figura 22 representada acima, podemos estimar que para  $k$  o valor do andar do AMS, em relação ao exemplo o AMS está situado no topo da estrutura, então expressão 46:

$$k = N \quad (46)$$

### 3 ESTUDO DE CASO

#### 3.1 TÚNEL DE VENTO

Segundo Loredo-Souza *et al.* (2012), os ensaios em túnel de vento demonstram intensas relações de um corpo em escala reduzida com o escoamento do vento natural. Também diz que se torna necessário tal ensaio, quando o estudo teórico não fornece relações entre as características do escoamento de um fluido em um perfil. Por fim, salienta que o modelo reduzido da estrutura requer a compatibilidade com as limitações do aparelho de túnel de vento, como por exemplo, dimensões da câmara de ensaio.

O aparelho para a prova de vento utilizado neste trabalho, corresponde ao da marca Heliotec, com o comprimento total de 5 m e com seções de 40x40x100 cm da câmara de ensaio (Figura 23). Tal instrumento se apresenta na instituição de ensino UniEvangélica – Centro Universitário de Anápolis.

**Figura 23 – Túnel de vento**



Fonte: HELIOTEC, 2014.

#### 3.2 TÚNEL DE VENTO VIRTUAL

Neste trabalho, com o intuito de complementar a elaboração e dados acerca do estudo sobre aerodinâmica, e também ajustar alguns parâmetros devido a limitação do aparelho da Heliotec, foi usado um software de versão estudantil que simula o túnel de vento, disponibilizado pela empresa Autodesk. O programa *Flow Design*, produz uma modelagem sobre o fluxo de vento em torno de conceitos criados por engenheiros e arquitetos.

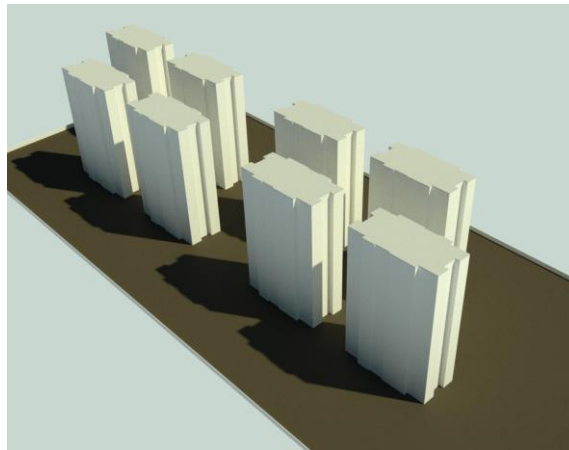


### 3.3 EMPREENDIMENTO

Para realização deste experimento foi escolhido um empreendimento dentro do município de Anápolis no interior do estado de Goiás para elaboração do estudo de caso, com o objetivo de uma análise aerodinâmica, e do método estático exposto na norma de vento para as edificações. Foi desconsiderado possíveis aberturas como janelas e sacadas, sendo assim, os modelos foram elaborados usando a projeção da área construída de cada edificação. O empreendimento é composto de 8 torres com dimensões iguais (Figura 24), de modo que o modelo com o tamanho real está descrito no item 3.5.

O ensaio partiu do conteúdo estudado anteriormente, baseando na arquitetura das estruturas, sendo que, a escolha do empreendimento teve como critérios, possuir estruturas semelhantes e simétricas, sendo próximas umas das outras, além disso estar situada em terreno plano, e ser de uso residencial. Por fim, a análise será feita observando todas as 8 estruturas do empreendimento como um todo, e também como apenas uma única edificação de maneira isolada.

**Figura 24 – Empreendimento**

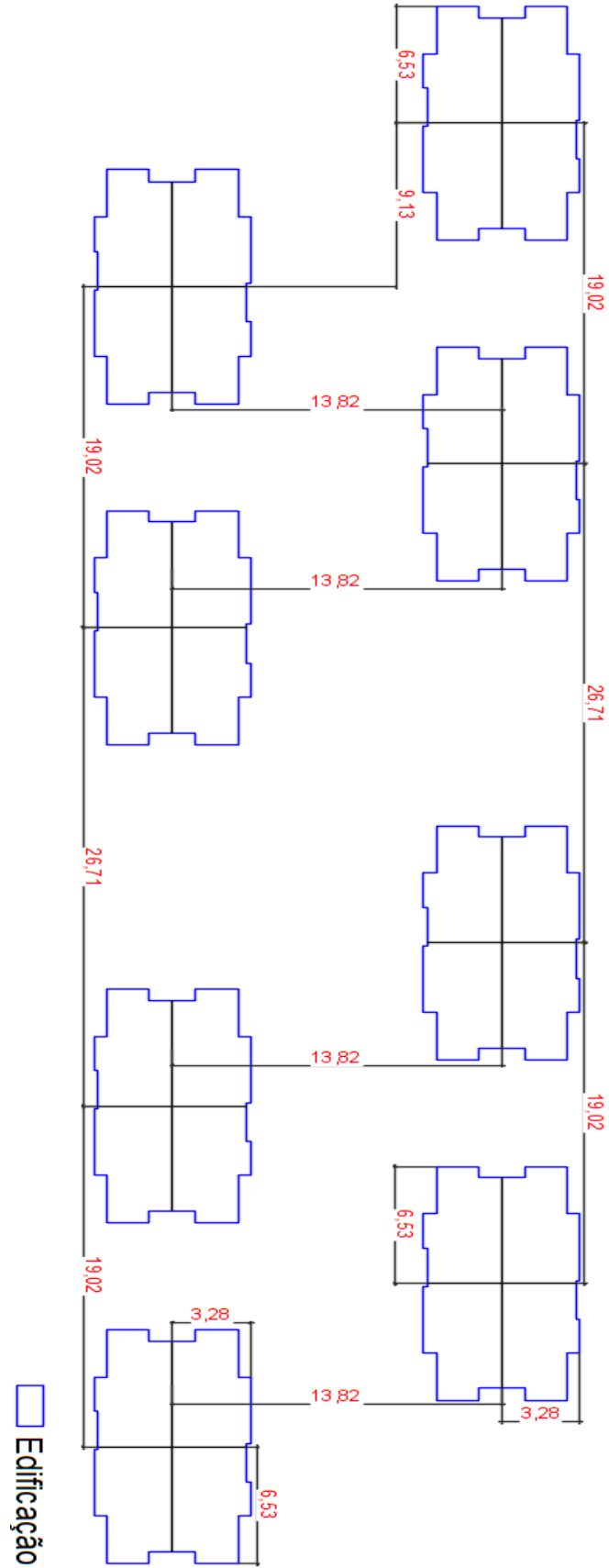


Fonte: PRÓPRIOS AUTORES, 2019.

### 3.4 MODELO FÍSICO

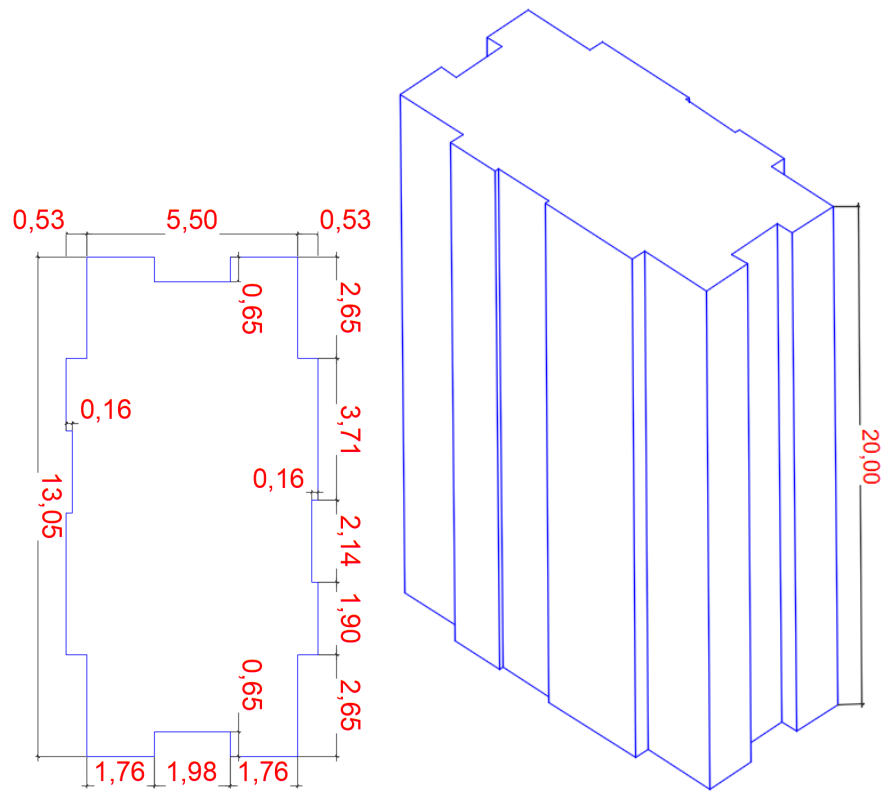
As maquetes fabricadas para o ensaio no aparelho presente na instituição de ensino, foram desenvolvidas em escala no programa AutoCad, de maneira que as dimensões foram reduzidas 252 vezes do tamanho real (Figura 25 e 26). Foi utilizado o painel de fibras de média densidade como material das maquetes, também conhecido popularmente como MDF, com placa de 6 mm de espessura em corte à laser (Figura 27).

Figura 25 – Distância entre as maquetes em centímetros



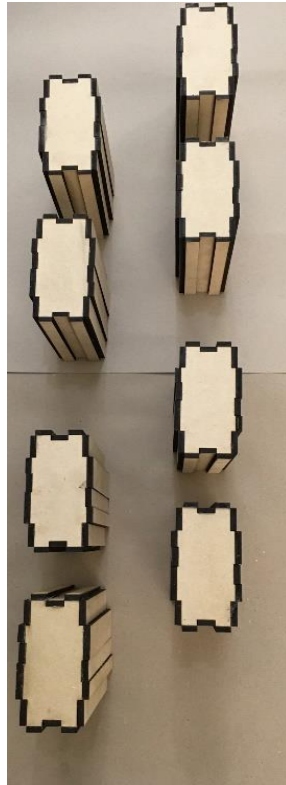
Fonte: PRÓPRIOS AUTORES, 2019.

**Figura 26 – Dimensão da maquete em centímetros**



Fonte: PRÓPRIOS AUTORES, 2019.

**Figura 27 – Modelo em MDF**

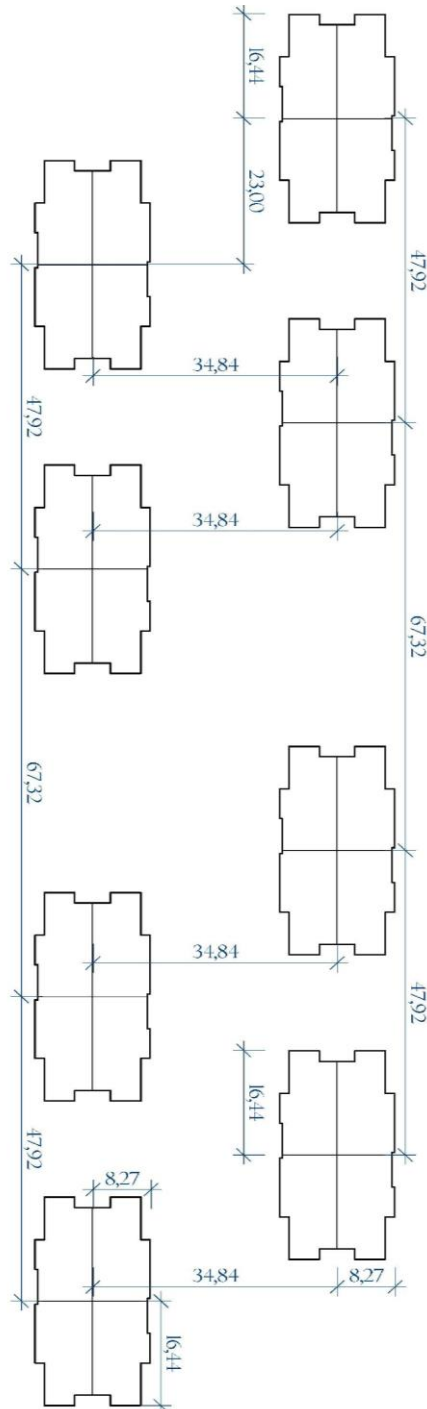


Fonte: PRÓPRIOS AUTORES, 2019.

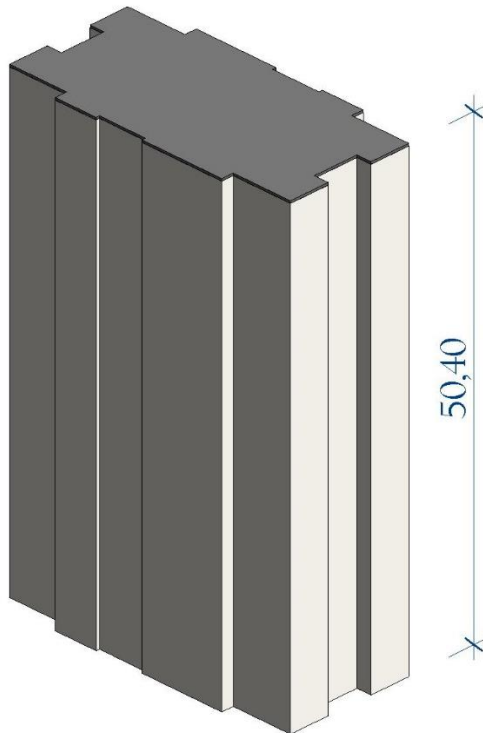
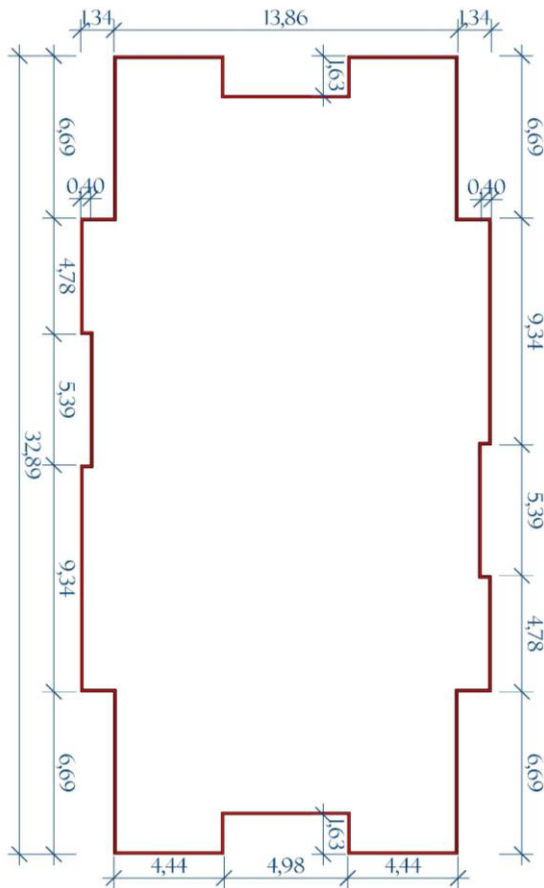
### 3.5 MODELO VIRTUAL

Este modelo foi elaborado no programa Revit para o experimento na simulação do túnel virtual, e exportado em modelo 3D no formato fbx para o *Flow Design*, de forma que possui a proporção real de todo o empreendimento (Figura 28 e 29).

**Figura 28 – Distância entre as edificações em metros**



Fonte: PRÓPRIOS AUTORES, 2019.

**Figura 29 – Dimensão da estrutura em metros**

Fonte: PRÓPRIOS AUTORES, 2019.

## 4 ANÁLISES DA AÇÃO DO VENTO

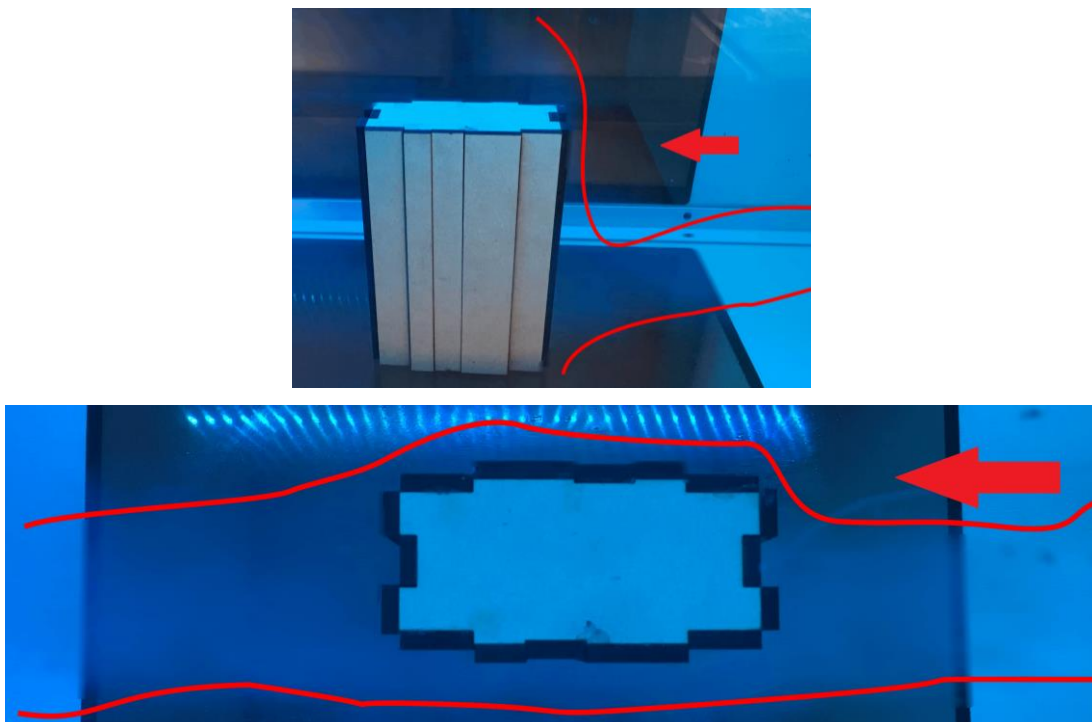
### 4.1 COMPARAÇÃO ENTRE OS TÚNEIS DE VENTO

Através da simulação das correntes de ar feita pelo aparelho e o programa, obteve-se os ensaios com incidência de vento paralela ao sentido longitudinal do empreendimento, ou seja, em ângulo  $0^\circ$ . Dessa forma, a configuração do software *Flow Design* foi definida na escala em metros, e no dispositivo da Heliotec a potência do exaustor foi estabelecida em 30%, logo sendo possível realizar uma comparação entre métodos.

#### 4.1.1 Observação na estrutura isolada

A Figura 30 apresenta a prova no aparelho, e infelizmente a capacidade da máquina para gerar a fumaça não é tão precisa e nem potente. Mas, ainda assim, foi possível ver a influência das correntes de ar na maquete, de modo que para facilitar a percepção na imagem a mesma foi editada, na qual as linhas vermelhas representam o limite do escoamento e as setas apresentam o sentido do vento. Sendo assim, percebe-se que neste exemplo o escoamento do vento é intenso e direto na estrutura, de maneira que as faces de barlavento e sotavento sofrem com forças acentuadas.

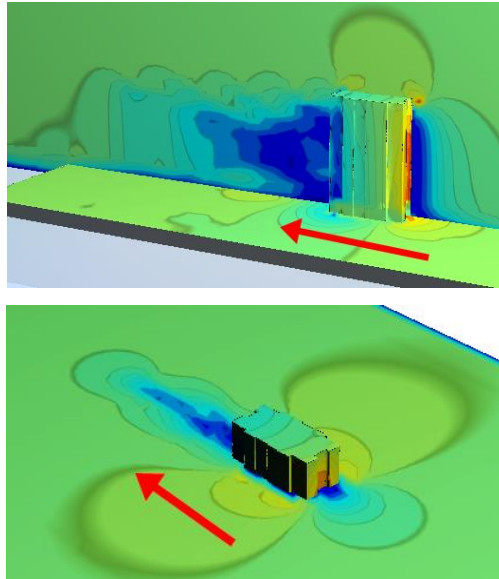
Figura 30 – Experimento no aparelho



Fonte: PRÓPRIOS AUTORES, 2019.

Comparando com o ensaio anterior, na Figura 31 foi visto as mesmas características do fluxo, porém no programa é possível evidenciar em diferentes tonalidades efeitos subsequentes. Em cor azul mostra o escoamento e a turbulência gerada no fluido, e na medida em que se afasta do edifício, tende ao seu estado original respectivamente mudando o tom até chegar ao verde.

**Figura 31 – Experimento no programa**



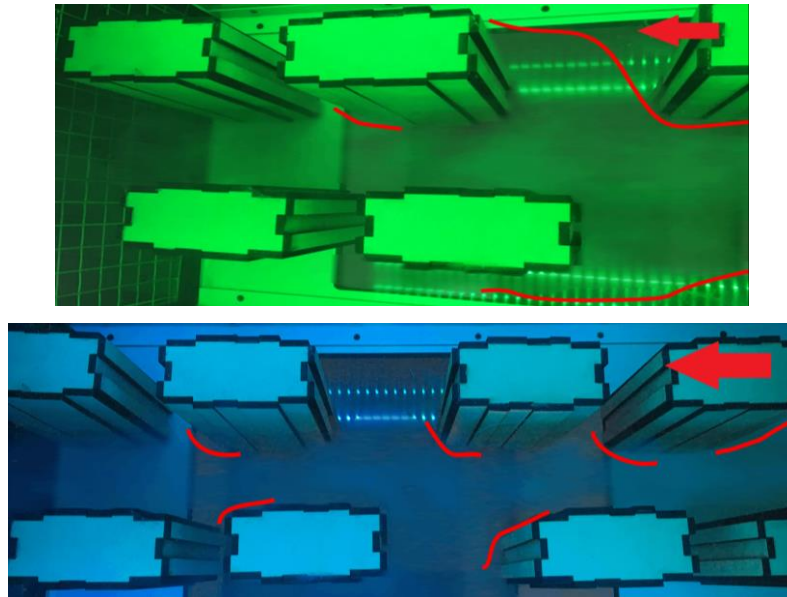
Fonte: PRÓPRIOS AUTORES, 2019.

Contudo, foi possível compreender que o software preenche as limitações da máquina, sendo visível de certo modo as possíveis pressões exercidas na maquete virtual, com cores variando de azul turquesa, amarelo e vermelho. Já no âmbito do escoamento é evidente a modelagem do fluido sendo semelhante ao do equipamento, sua variação da velocidade e turbulência causada pela resistência da edificação são caracterizadas também por cores informativas levando em tom verde claro o fluxo sem interferência, ao verde escuro e até azul com turbulência.

#### **4.1.2 Observação em todo o empreendimento**

Diante da Figura 32, seguindo o sentido do vento de acordo com a seta em vermelho, foi observado que possui intenso escoamento entre as edificações, principalmente entre a primeira fileira com a segunda, e entres os cantos das miniaturas foi notado o desvio das correntes de ar para os lados perpendiculares à incidência. Por fim, pode-se observar devido a acentuada corrente entra as fileiras à possível capacidade de interferir no conforto do usuário.

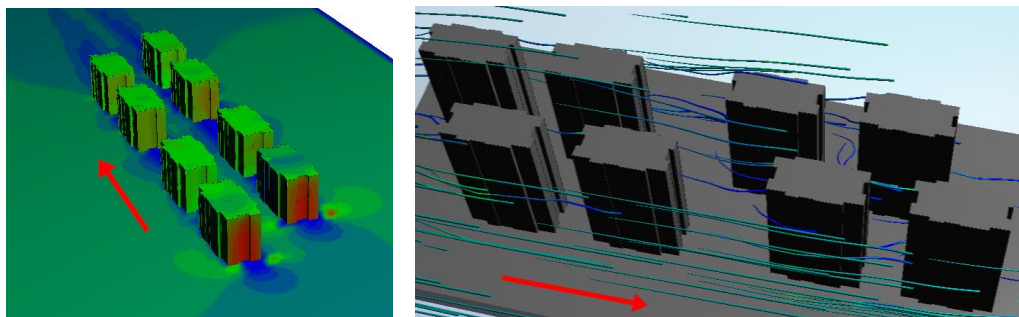
**Figura 32 – Experimento no aparelho**



Fonte: PRÓPRIOS AUTORES, 2019.

Na Figura 33, temos as correntes de ar atuando semelhante ao ensaio anterior no instrumento, sendo que na vista gerada pelo programa demonstra intensa pressão na face de barlavento, principalmente nas primeiras estruturas, preenchidas de vermelho na imagem. Já nas arestas dos modelos foi visto que houve uma aceleração do vento, em coloração verde claro, de maneira que causou influência nos edifícios posteriores, e também no interior entre as fileiras ocorreu o escoamento das correntes.

**Figura 33 – Experimento no programa**



Fonte: PRÓPRIOS AUTORES, 2019.

## 4.2 EFEITOS OBSERVADOS

Usando os princípios apresentados previamente, foram feitas observações através de provas empregadas no software da Autodesk visando obter como é o comportamento da estrutura tanto isolada quanto associadas ao empreendimento. Destes experimentos foram

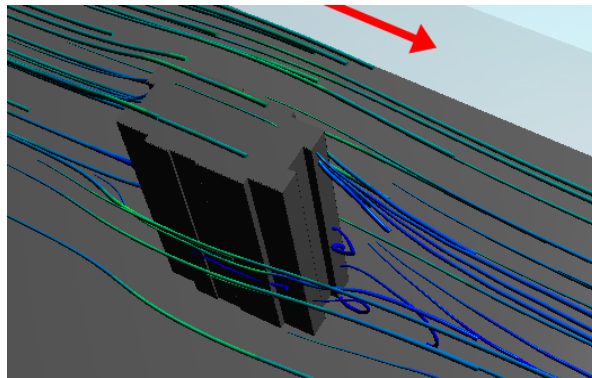


obtidas imagens para melhor demonstração desses efeitos e suas características, gerando uma comparação entre as edificações como um todo e também como única, tendo em vista apresentar suas diferenças.

#### 4.2.1 Análise na estrutura isolada

Na Figura 34, podemos observar que a medida em que o vento escoar ao redor do edifício, ocorre uma formação de vórtices com sentido alternados intitulado de Vórtices de Kármán, como consequência da estrutura ter geometria retangular. Essas excitações têm como características seguir a mesma direção da corrente original e surgir após à estrutura.

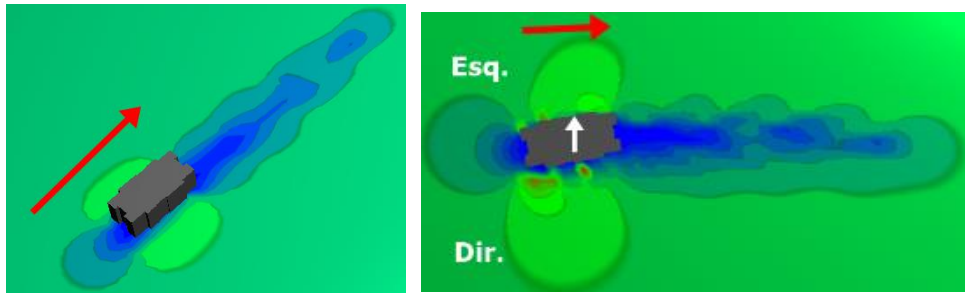
**Figura 34 – Ensaio no programa da estrutura isolada do efeito Vórtices de Kármán**



Fonte: PRÓPRIOS AUTORES, 2019.

Seguindo com os ensaios, verificamos uma alteração na influência da velocidade do vento em relação a amplitude da direção do mesmo, caracterizado como efeito de galope. Levando em consideração que a direção do vento está em constante mudança, variamos sua angulação para  $10^\circ$  para melhor observarmos. A Figura 35 exemplificada bem esse efeito, o primeiro ensaio (imagem na esquerda) tem angulação  $0^\circ$ , podemos observar nenhuma mudança da velocidade do vento nas laterais da estrutura. Já no segundo ensaio (imagem na direita) com angulação de  $10^\circ$ , pode observar uma maior incidência do vento na face voltada para a direção da corrente de ar original, demonstrando maior velocidade na estrutura na face da esquerda do que na face da direita, com isso podemos considerar que a estrutura sofreu uma variação de pressão, sendo uma diminuição de pressão na lateral esquerda e um aumento da mesma na lateral direita, assim gerando oscilações transversais à direção do vento de acordo com a seta em branco a seguir.

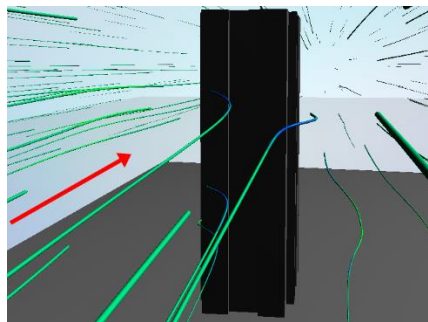
**Figura 35 – Ensaio no programa da construção isolada do efeito galope**



Fonte: PRÓPRIOS AUTORES, 2019.

De fato, as proporções de uma edificação influenciam na questão aerodinâmica, por ter seção retangular, apresenta maior arrasto em comparação com uma de seção circular, sendo assim, quanto maior altura e esbelteza da edificação, maior será sua tendência a torção. Como podemos ver na Figura 36.

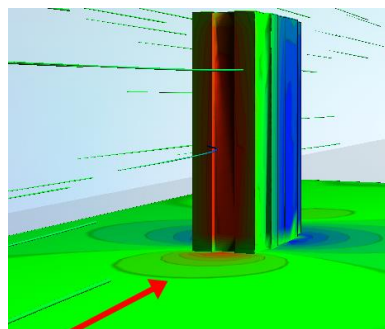
**Figura 36 – Ensaio no programa da construção isolada explorando a torção**



Fonte: PRÓPRIOS AUTORES, 2019.

A Figura 37 demonstra o regime de escoamento devido as pressões geradas pelo vento sendo que, em barlavento temos pressões diretas (positivas) exibida em cor vermelha e a sotavento temos pressão de sucção (negativas) em cor azul, representadas abaixo.

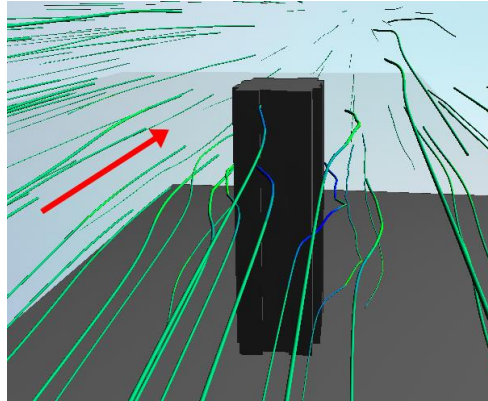
**Figura 37 – Ensaio no programa da estrutura isolada analisando o regime de escoamento**



Fonte: PRÓPRIOS AUTORES, 2019.

Em conformidade com a Figura 38, podemos observar que a estrutura não sofre com deflexão do vento na direção vertical, pelo fato do vento incidido em barlavento da edificação não estar sendo desviado para baixo. Devido ao formato da estrutura, a face analisada é pequena e estreita, com isso as esteiras acabam contornando a edificação ao invés de defletir para baixo, neste caso evitando o aumento da velocidade do vento em locais próximos ao terreno.

**Figura 38 – Ensaio no programa da estrutura isolada do efeito da deflexão do vento**

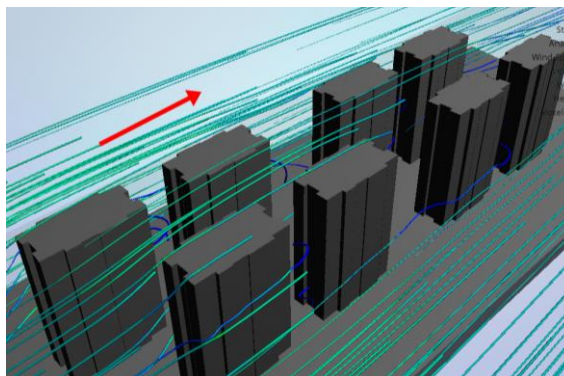


Fonte: PRÓPRIOS AUTORES, 2019.

#### 4.2.2 Análise em todo o empreendimento

Tendo em conta que o martelamento ocorre quando a estrutura experimenta forças dinâmicas em consequência da turbulência gerada por correntes de ar desviadas por obstáculos à frente da mesma. Como na Figura 39, o fato das edificações estarem agrupadas faz o escoamento do ar sofrer constante variação em certos pontos, ocasionando agitação nas construções decorrentes. E também, como os Vórtices de Kármán são influenciados pela forma da arquitetura da estrutura existe a possibilidade de sua formação, como visto na imagem.

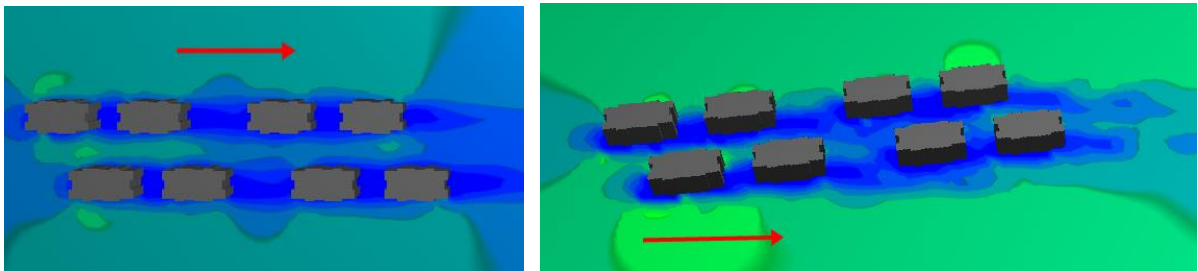
**Figura 39 – Teste no programa em todo empreendimento observando o martelamento**



Fonte: PRÓPRIOS AUTORES, 2019.

Da mesma maneira que na edificação isolada, realizamos ensaios com variação da angulação para compreender o efeito galope. Na Figura 40, a imagem da esquerda e direita respectivamente com angulação de  $0^\circ$  e  $10^\circ$  pode observar que os efeitos foram semelhantes ao do experimento já realizado. No entanto, neste caso entre o corredor dos alinhamentos das construções, a corrente de ar de velocidade média em  $0^\circ$  de tom azul claro e verde, foi para menor de cor azul escuro em ângulo de  $10^\circ$ .

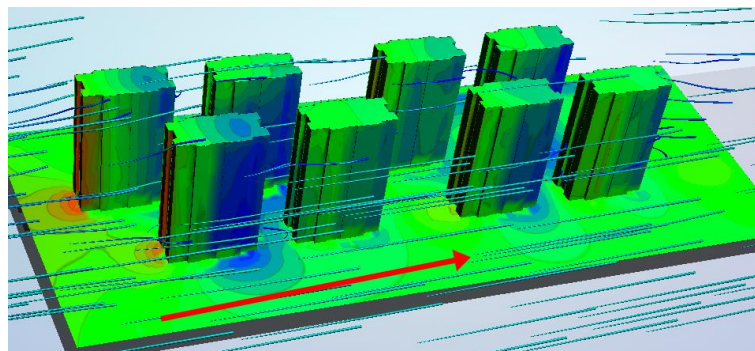
**Figura 40 – Teste no programa em todo empreendimento investigando o efeito galope**



Fonte: PRÓPRIOS AUTORES, 2019.

Na Figura 41 expõe o regime escoamento devido às pressões geradas, sendo que, em sotavento temos pressão de sucção (negativas) em cor azul e barlavento temos pressões diretas (positivas) exibida em cor vermelha, de modo que podemos observar que as pressões sofridas nas edificações em primeiro contato com o vento são maiores que nas construções seguintes. Em conformidade com o embasamento teórico, as construções podem classificadas de acordo com o seu regime de escoamento, sendo elas de corpo isolado, deslizante e interferência de esteira, e com análise feita a partir do ensaio, pode se classificar como regime de escoamento deslizante, pois os edifícios estão muitos próximos e atuam em conjunto como um único obstáculo.

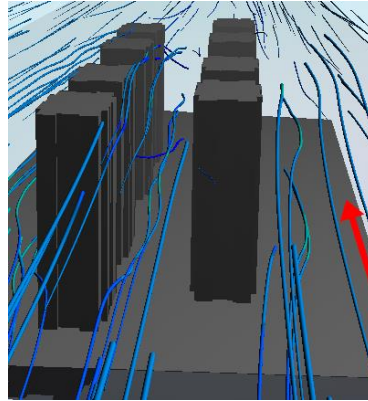
**Figura 41 – Teste no programa em todo empreendimento explorando o regime de escoamento**



Fonte: PRÓPRIOS AUTORES, 2019.

Dentro dos efeitos de vizinhança temos o efeito Venturi, que ocorre quando há construções muito próximas das outras fazendo com que ocorra um afinilamento das esteiras nas paredes confrontantes, conseqüentemente surgem picos de sucção próximo as arestas da edificação de tonalidade em verde claro mostrado na Figura 42.

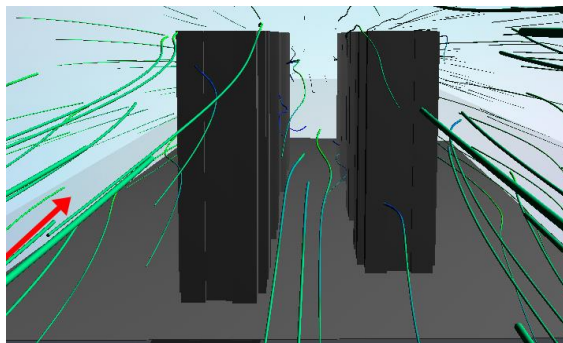
**Figura 42 – Teste no programa em todo empreendimento atentando ao efeito Venturi**



Fonte: PRÓPRIOS AUTORES, 2019.

Outro efeito de vizinhança é quando ocorre a deflexão do ar para baixo, e da mesma maneira que na estrutura isolada, não ocorreu na estrutura em conjunto pois depende basicamente da face em barlavento, e como podemos ver na Figura 43 por ser tratar de edificações muito estreitas, o vento acaba contornando a estrutura e não concretizando o efeito.

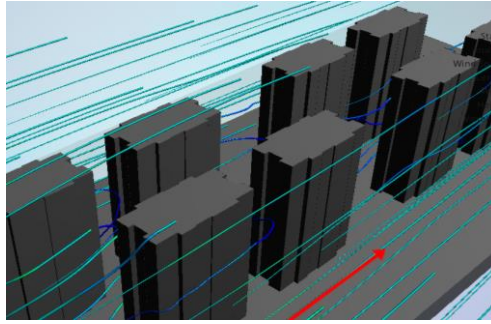
**Figura 43 – Teste no programa em todo empreendimento examinando o efeito da deflexão do ar**



Fonte: PRÓPRIOS AUTORES, 2019.

Na Figura 44 é possível observar o efeito de turbulência de esteira, as estruturas posteriores sofrem pelos efeitos causados pela anterior, essas turbulências geram efeitos de golpe e assim provocam mudanças de pressão.

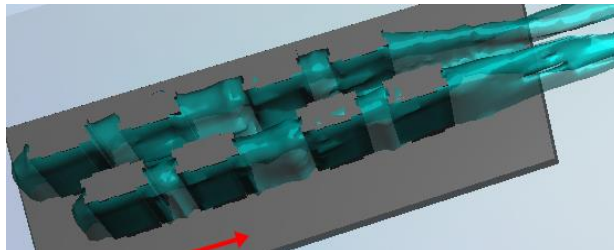
**Figura 44 – Teste no programa em todo empreendimento analisando a turbulência de esteira**



Fonte: PRÓPRIOS AUTORES, 2019.

Dentre os efeitos que requerem maior análise, temos o arrastamento, pois está diretamente ligada a proporção da edificação. Outro fato é que está inteiramente ligada a aerodinâmica, por isso requer ensaios para melhor entendimento de seus efeitos, a Figura 45 representa a influência do vento, se levarmos em consideração os efeitos de torção, podemos analisar que as estruturas que estão à frente são as que sofrem maior parte das cargas de vento, assim sofrendo mais com os efeitos de torção.

**Figura 45 – Teste no programa em todo empreendimento estudando o arrastamento**



Fonte: PRÓPRIOS AUTORES, 2019.

### **4.2.3 Comparação entre o edifício isolado e os associados**

De acordo com o que foi observado, ambos os segmentos avaliados sofrem semelhantes efeitos, sendo eles prejudiciais ao conforto do usuário e aos sistemas estruturais. Em relação ao sistema isolado com o associado, indagamos que pelo fato do isolado não possuir obstáculos, não tem a possibilidade de ocorrer o martelamento, pois sua corrente de ar não foi alterada por outra estrutura nas proximidades, esse fato só ocorre no sistema associado, e tem como consequência gerar oscilação no sistema estrutural da construção.

É notável que por possuírem a mesma forma arquitetônica efeitos consequentes desta causa são similares independentemente do número de construções. No entanto quando realiza análise do efeito como o de turbulência de esteira, o raciocínio deve abranger a quantidade de

estruturas, outro caso também é no regime de escoamento em que o conjunto do empreendimento funciona como um único obstáculo de acordo com o regime deslizante.

Contudo, no conjunto associado temos que considerar quais edificações sofrem mais com as rajadas de vento, nas análises feitas com o software nos mostram em muitos dos ensaios que as torres que sofrem maior influência do vento são as duas primeiras, por sofrerem o primeiro impacto com as rajadas e estarem na direção da corrente original. Outra analogia que podemos aplicar, são sobre os produtos gerados a partir desse primeiro contato com as edificações que estão à frente, pois o vento se choca com esse obstáculo e provoca outras resultantes para as construções posteriores, já no sistema com a torre isolada, apenas sofre pelos efeitos provocados pela corrente original do vento.

### 4.3 CÁLCULOS

Usando os conceitos visto anteriormente sobre velocidade característica do vento  $V_k$ , e também da pressão dinâmica  $q$ , itens 2.5.2 e 2.5.3 respectivamente. Será calculada para as duas observações, em relação a todo o empreendimento e em seguida na estrutura isolada, os fatores de vento e pressão através das fórmulas 2 e 10.

#### 4.3.1 Estudo na estrutura isolada

Primeiramente, utilizando a Figura 15 do gráfico das isopleias para obter a velocidade básica do vento, foi adotada para a cidade de Anápolis o valor de  $V_0 = 34 \text{ m/s}$ . Já para o fator topográfico, visto que o terreno é plano, seu valor foi de  $S_1 = 1,0$ . No item do fator de rugosidade do terreno, devido em não ter nenhuma estrutura próxima e fazer análise somente do empreendimento, foi considerado a categoria I, e como a edificação estar superior aos 50 metros de altura, foi escolhida a classe C.

Para obter o valor mais aproximado possível do fator de rugosidade, foi usado a primeira maneira apresentada no trabalho, pela fórmula 8 ao contrário da segunda, que consiste nos valores da Tabela 2. Para encontrar os valores da expressão 8, foi empregado a Tabela 1 que determinou os parâmetros de  $b = 1,12$  e  $p = 0,07$ , e considerando o pior caso, a altura em análise será de 50,40 metros, sendo assim o cálculo do  $S_2$  está a seguir na resolução 47:

$$S_2 = 1,12 \left( \frac{50,40}{10} \right)^{0,07} \quad (47)$$

$$S_2 = 1,254 \quad (47)$$

Em relação ao fator estatístico em função do edifício ser de uso residencial, foi escolhido o grupo 2 na Tabela 3, em que determina o valor de  $S_3 = 1,00$ . Portanto, usando o princípio da equação 2, o valor obtido do vento característico  $V_k$  com análise da edificação isolada, está na resolução 48 em seguida:

$$V_k = 34 * 1,0 * 1,254 * 1,00 \quad (48)$$

$$V_k = 42,64 \text{ m/s} \quad (48)$$

Desta maneira, empregando o valor do vento característico é possível conseguir determinar o valor da pressão dinâmica exercida pelo vento na superfície, através da equação 10. Logo, o resultado alcançado está na resolução 49 a seguir:

$$q = 0,613 * 42,64^2 \quad (49)$$

$$q = 1114,54 \text{ N/m}^2 \quad (49)$$

$$q = 113,65 \text{ kgf/m}^2 \quad (49)$$

Como foi abordado anteriormente, a pressão dinâmica corresponde a unidade de força por área, sendo assim é a pressão do vento exercida na superfície da edificação em função da velocidade característica. Considerando a construção isolada em seu pior caso, de maneira que o valor seja  $113,65 \text{ kgf/m}^2$ , desse modo entrou em regime de escoamento de corpo isolado.

#### 4.3.2 Estudo em todo o empreendimento

Seguindo o mesmo raciocínio do item anterior, desta vez considerando todo o empreendimento como exemplo. Será feito o mesmo cálculo para encontrar o valor da velocidade do vento característico e da pressão dinâmica. Usando os mesmos valores



encontrados, sendo eles  $V_0 = 34 \text{ m/s}$ ,  $S_1 = 1,0$  e por fim  $S_3 = 1,00$  e nesta situação por ser várias edificações muito próximas, foi alterado o parâmetro do fator de rugosidade para categoria para V, e continuando na classe C, encontra-se novos valores para o  $b = 0,71$  e  $p = 0,175$ .

Através da resolução 50 a seguir, foi obtido o novo valor para o fator de rugosidade  $S_2$ :

$$S_2 = 0,71 \left( \frac{50,40}{10} \right)^{0,175} \quad (50)$$

$$S_2 = 0,942 \quad (50)$$

Sendo novamente considerado as condições para encontrar a velocidade do vento característico  $V_k$ , foram obtidas e está logo a seguir na resolução 51:

$$V_k = 34 * 1,0 * 0,942 * 1,00 \quad (51)$$

$$V_k = 32,03 \text{ m/s} \quad (51)$$

Enfim, com o atual valor do vento característico é possível encontrar a nova pressão dinâmica  $q$  com o cálculo 52 a seguir:

$$q = 0,613 * 32,03^2 \quad (52)$$

$$q = 628,89 \text{ N/m}^2 \quad (52)$$

$$q = 64,13 \text{ kgf/m}^2 \quad (52)$$

Levando em conta as construções em conjunto, pode se observar um valor de  $64,13 \text{ kgf/m}^2$  para pressão dinâmica, sendo que a alteração do fator da rugosidade do terreno, altura sobre o terreno e dimensões da edificação  $S_2$ , alterou-se assim a velocidade característica e o valor da pressão. Como as estruturas estão em conjunto e muito próximas, entrou em um regime de escoamento deslizante, assim reduziu as cargas na estrutura e conseqüentemente o dimensionamento da mesma.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o avanço da construção civil, surgem a cada dia novas técnicas e conceitos a serem considerados, assim aparecem novos desafios aos projetistas, e o vento por se comportar de maneira complexa necessita de estudos especiais, como a utilização da norma, ensaios em túnel ou em simuladores de escoamento do vento. Através do embasamento teórico pode se observar as características do vento e suas variações, os efeitos causados nas estruturas de edificações, e a maneira como a norma aborda as forças estáticas. Também foi abordado a maneira como os corpos sólidos escoam dentro do fluido, e por fim a concepção para absorver vibrações da estrutura.

Para compreender efetivamente os efeitos do vento e também o método abordado pela norma, foi elaborado um estudo de caso, através de um empreendimento na cidade Anápolis, e teve como critério para sua escolha estar em um terreno plano e ser um edifício residencial. Nessa análise foram consideradas duas vertentes, analisando o caso real composta pelas oito estruturas e outro caso com uma única estrutura isolada.

Como foi explorado no capítulo das análises da ação do vento, pode-se observar, através dos experimentos, a coerência com as referências adotadas. De maneira que, os testes feitos comparando os túneis de vento, mostram que ambos têm a capacidade de demonstrar o fluxo de escoamento, no entanto com suas limitações. No caso do aparelho da instituição, é perceptível alguns efeitos em volta da miniatura, porém sua capacidade de visualizar o vento através da fumaça não é ideal, sendo que as resultantes ficam claras o suficiente no momento em que abrange a simulação do software. Já no programa, as observações feitas foram simplesmente através da modelagem da forma da construção, não levando qualquer aspecto estrutural e material da mesma e, inclusive as cores adotadas pelo mesmo, sofrem variação em alguns detalhes diferenciando de outros ensaios.

Fica evidente com experimentos que o fluido é maleável e gera cargas, no qual as observações dos sistemas em ambos os ensaios podemos registrar efeitos que podem ocorrer em uma edificação de tamanho real, justificando a importância dos ensaios, sejam eles em túnel real ou virtual. Em ambos os sistemas, sendo ele com o edifício isolado ou em relação ao todo empreendimento, os efeitos em maioria são semelhantes, somente aqueles que os obstáculos são considerados ao redor possuem fluxo complexo, sendo no caso o associado.

Outra observação nos pontos de escoamento e aerodinâmica é a de que a prova no túnel mostrou que de modo geral a estrutura por possuir o aspecto retangular com cantos intensos gera resistência na passagem do ar, e desta maneira em casos de estruturas esbeltas

podem gerar torção na mesma. Também foi perceptível ver que internamente entre as edificações em conjunto, gerou-se aceleração do escoamento do ar, de maneira que ficou evidente o afunilamento do vento, como já visto acima de efeito Venturi, assim gerando desconforto ao usuário.

Através das análises pelos ensaios e cálculos, foi praticável a exploração dos conceitos abordados. Atentando com o empreendimento como um todo, vemos que as primeiras estruturas recebem a maior carga de barlavento, e por consequência reduz para as construções posteriores. Neste estudo, como considerou a incidência da rajada paralela ao sentido longitudinal do topo de todas as estruturas, a carga calculada de  $64,13 \text{ kgf/m}^2$  foi refletida para as estruturas posteriores visto que, não tinha nada à frente dos primeiros edifícios para assim entrar na categoria V do fator de rugosidade, o mesmo raciocínio segue para a velocidade característica de  $32,03 \text{ m/s}$ .

Já na análise da estrutura isolada e também para as primeiras estruturas de barlavento no âmbito de todo o empreendimento, sendo considerado categoria I na rugosidade pelo fato de não ter obstrução do sentido do vento. O valor da corrente de ar que dever ser considerado é de  $42,64 \text{ m/s}$  e para a pressão exercida no topo é de  $113,65 \text{ kgf/m}^2$ . Vendo o conceito de velocidade e carga, neste caso pode-se concluir que na medida em que possui mais estruturas o valor da velocidade do vento diminui na área interna, e por consequência o valor da pressão.

Por fim, o trabalho apresentou características importantes para compreender o fluxo de ar e suas consequências em construções altas. A partir destes estudos é clara a responsabilidade dos projetistas arquitetônicos e principalmente estruturais, pois a forma geométrica, ocupação, tipo de uso, localização em relação à vizinhança, esbeltez, entre outros, são fatores que levam consigo no momento de dimensionar um prédio.

## 5.1 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Sugerimos a continuação do trabalho, analisando os parâmetros de vizinhança abrangendo os obstáculos pertencentes em um maior raio de distância do empreendimento. E também, avaliar a incidência da massa de ar em outras angulações, não somente em  $0^\circ$  e  $10^\circ$ , para desenvolver uma análise mais acertada dos possíveis efeitos resultantes.

É necessário também que seja averiguada uma retificação da norma NBR 6123 (ABNT, 1988) – “Forças devidas ao vento em edificações”, pois já foi mostrado no trabalho sua ineficiência em certos pontos, como o gráfico de isopletras. Abrangendo um pouco mais a temática, também seria interessante criar observações no plano diretor instituído na cidade

visando analisar possíveis interferências ao conforto do usuário, já que em determinadas circunstâncias, é possível canalizar o vento, de modo que até mesmo o formato arquitetônico do prédio pode contribuir com essa resultante.

O trabalho teve como intuito, provocar interesses em novos estudos sobre a área, e servir como material específico e didático para elaboração de novos trabalhos, pois os conteúdos relacionados a este tema não são muitos e nem de fácil acesso, além disso os poucos que existem, estão desatualizados para a nossa atual condição.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, Lorena da Silva. **Controle de vibrações em edifícios altos sujeitos a vento ou terremoto**. 2015. Monografia - Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás. Disponível em: <[https://www.eec.ufg.br/up/140/o/CONTROLE\\_DE\\_VIBRA%C3%87%C3%95ES\\_EM\\_EDIF%C3%8DCIOS\\_ALTOS\\_SUJEITOS\\_A\\_VENTO\\_OU\\_TERREMOTO.pdf](https://www.eec.ufg.br/up/140/o/CONTROLE_DE_VIBRA%C3%87%C3%95ES_EM_EDIF%C3%8DCIOS_ALTOS_SUJEITOS_A_VENTO_OU_TERREMOTO.pdf)>. Acesso em: 25 abr. 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.
- AZEVEDO, Domingos Flávio de Oliveira. **Tipos de carregamentos**. 2016. Disponível em: <<ftp://ftpaluno.umc.br/aluno/domingos/engenharia%20auxiliada%20por%20computadores/projeto%20de%20sistemas%20mec%C3%A2nicos%20iv/tipos%20de%20carregamentos%20-%202016.pdf>>. Acesso em: 04 mar. 2019.
- BECK, André T.; CORRÊA, Márcio R. S. **Proposta de atualização das velocidades básicas do vento no Brasil**. 2012. Disponível em: <<http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/184/artigo285952-1.aspx>>. Acesso em: 25 fev. 2019.
- BENEVELI, Suzana Moreira Avila. **Controle híbrido para atenuação de vibrações em edifícios**. 2002. Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil. Disponível em: <[https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/3124/3124\\_1.PDF](https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/3124/3124_1.PDF)>. Acesso em: 11 maio 2019.
- BLESSMANN, Joaquim. **Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento**. 2º edição – Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.
- BLESSMANN, Joaquim. **O vento na engenharia estrutural**. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 1995.
- CARPEGGIANI, Elvis Antônio. **Determinação dos efeitos estáticos de torção em edifícios altos devidos à ação do vento**. 2004. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/6015/000479420.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 13 mar. 2019.
- CARRIL JR., Célio Fontão. **Análise numérica e experimental do efeito dinâmico do vento em torres metálicas treliçadas para telecomunicações**. 2000. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3144/tde-18022002-154920/publico/TDE154920.pdf>>. Acesso em: 9 mar. 2019.

CASTRO, Rafael A. **Modelagem computacional de ligações semi-rígidas e sua influência na resposta dinâmica não-linear de pórticos de aço**. 2006. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Disponível em:

<<http://www.labbas.eng.uerj.br/pgeciv/nova/files/dissertacoes/06.pdf>>. Acesso em: 29 maio 2019.

CHING, Francis D. K.; ONOUYE, Barry S.; ZUBERBUHLER, Douglas. **Sistemas estruturais ilustrados, padrões, sistemas e projeto**. Porto Alegre: Bookman, 2010.

CUNHA, Helio D. **Vibrações transversais de viga comprimida apoiada sobre sistema massa-mola**. 1969. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em:

<<https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/2293/1/121737.pdf>>. Acesso em: 27 maio 2019.

FONTES, Augusto César Dias. **Importância dos efeitos de vizinhança na resposta dinâmica de um edifício à ação do vento**. 2003. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Rio Grande do Sul. Disponível em:

<<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/7324/000542228.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 23 mar. 2019.

GONÇALVES, Roberto M.; SALES, José Jairo de; MALITE, Maximiliano; NETO, Jorge Munaiar. **Ação do vento em edificações: teoria e exemplos**. 1º edição – São Carlos: SET/EESC/USP, 2004.

HELIOTEC. **Túnel de vento didático com injeção de fumaça**. Versão 5. 2014. Disponível em: <[http://www.heliodon.com.br/tunel\\_de\\_vento\\_00.html](http://www.heliodon.com.br/tunel_de_vento_00.html)>. Acesso em: 31 julho 2019.

LABEGALINI, P. R.; LABEGALINI, J. A.; FUCHS, R. D.; ALMEIDA, M. T. **Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão**. 2º edição - São Paulo: Edgard Blucher, 1992.

LOPES, Adelino Vasconcelos. **A ação do vento e a resposta dinâmica de edifícios altos**. 1992. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/13349/2/Texto%20integral.pdf>>. Acesso em: 19 maio 2019.

LOREDO-SOUZA, Acir M.; NÚÑEZ, Gustavo J. Z.; ROCHA, Marcelo M. **Uso do túnel de vento como ferramenta de projeto no design aerodinâmico**. Porto Alegre: UFRGS, 2012. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/det/index.php/det/article/view/69/45>>. Acesso em: 11 maio 2019.

MARTINS, Yuri Luiz Dias. **Ação dinâmica do vento em edifícios altos**. 2018. Monografia - Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás. Disponível em: <[http://www.eec.ufg.br/up/140/o/A%C3%87%C3%83O\\_DIN%C3%82MICA\\_DO\\_VENTO\\_EM\\_EDIF%C3%8DCIOS\\_ALTOS.pdf](http://www.eec.ufg.br/up/140/o/A%C3%87%C3%83O_DIN%C3%82MICA_DO_VENTO_EM_EDIF%C3%8DCIOS_ALTOS.pdf)>. Acesso em: 20 abr. 2019.

MICHAELIS. **Dicionário Online**. Editora Melhoramentos Ltda. Disponível em: <<http://michaelis.uol.com.br/busca?id=31BZ>>. Acesso em: 20 abr. 2019.

PAULA, Cristina F. **Contribuição ao estudo das respostas numéricas não-lineares estática e dinâmica de estruturas reticuladas planas.** 2001. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. Disponível em: <[http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-31032016-164210/publico/Tese\\_Paula\\_CristinaF.pdf](http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-31032016-164210/publico/Tese_Paula_CristinaF.pdf)>. Acesso em: 28 maio 2019.

RAO, Singiresu S. **Vibrações mecânicas.** 4<sup>o</sup> edição - São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2009.

SORIANO, Humberto Lima. **Introdução à dinâmica das estruturas.** 1<sup>o</sup> edição - Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.