

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS  
CURSO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA**

**Ramon Egídio Lepeck Santa Ritta**

**DETECÇÃO DA AÇÃO DOS VENTOS SOBRE ESTRUTURAS DE ENGENHARIA  
UTILIZANDO SENSORES ACELERÔMETROS.**

**Porto Alegre  
2019**

Ramon Egídio Lepeck Santa Ritta

**DETECCÃO DA AÇÃO DOS VENTOS SOBRE ESTRUTURAS DE ENGENHARIA  
UTILIZANDO SENSORES ACELERÔMETROS.**

Projeto Cartográfico apresentado ao Curso de Engenharia Cartográfica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul para obtenção do grau de Engenheiro Cartógrafo

**Orientador:** Prof. Dr. Roosevelt De Lara Santos Jr.

Porto Alegre

2019

Ramon Egídio Lepeck Santa Ritta

DETECÇÃO DA AÇÃO DOS VENTOS SOBRE ESTRUTURAS DE ENGENHARIA  
UTILIZANDO SENSORES ACELERÔMETROS.

Projeto Cartográfico apresentado ao Curso de  
Engenharia Cartográfica do Instituto de  
Geociências da Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul para obtenção do grau de  
Engenheiro Cartógrafo

Aprovado em \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Roosevelt De Lara Santos Jr. – UFRGS (orientador)

---

Carlos Roberto Moura de Moraes – Eng. Civil

---

Prof. Dr. Sérgio Florêncio de Souza - UFRGS

## AGRADECIMENTOS

Começo meus agradecimentos lembrando e agradecendo as cinco pessoas mais importantes da minha vida. Meus pais Áureo e Núbia, minha irmã Mariana, meu padrinho Sandro e minha noiva amada Ana Paula. Aos meus pais agradeço por todo o carinho, incentivo e dedicação ao longo destes meus 26 anos de vida. Obrigado por me ensinarem a ser uma pessoa correta, honesta e tão sonhadora. Agradeço por sempre deixarem seus sonhos de lado para viverem os de seus filhos. Amo vocês! A minha irmã Mariana por toda amizade, carinho e força. Lembre-se sempre, não importa se for dentro de um Fiat 147 sem motor, em casa com um picolé derretido no bolso ou dentro um salão de atos de uma universidade, eu quero sempre estar ao teu lado e sempre aplaudirei de pé todas tuas conquistas! Te amo! Ao meu padrinho Sandro por toda a dedicação comigo e com a Mariana sendo por diversas vezes um segundo pai! A minha noiva Ana Paula, agradeço toda a compreensão, incentivo, amor e companheirismo ao longo destes 8 anos. Nós conhecemos através de um sonho comum chamado UFRGS e hoje concluímos esta etapa. Jamais esqueça não importa onde for quero sempre estar ao seu lado! Te amo meu amor, está conquista é nossa!

Ao meu orientador professor Roosevelt por aceitar o convite para o desenvolvimento deste projeto.

Ao colega e amigo Augusto Michel agradeço sobremaneira por toda ajuda e parceria no desenvolvimento e entendimento do funcionamento dos sensores acelerômetros.

Aos amigos Paulo, Guilherme, Atílio e Alexandre por toda ajuda durante o desenvolvimento deste trabalho tanto, nos trabalhos de campo, análises matemáticas e desenvolvimento de rotinas para um melhor aproveitamento do estudo. Meu sincero agradecimento!

A Funilaria do Forte, meu pai Áureo, Seu Júlio e o Jeferson por toda ajuda deste a etapa de planejamento dos parafusos de centragem forçada até o desenvolvimento da última atividade de campo. Muito obrigado pessoal!

Aos meus professores Sérgio e Felipe. Ao professor Sérgio agradeço por ser o primeiro incentivador para o estudo de monitoramento de estruturas e ao professor Felipe agradeço por ser tão dedicado e comprometido com o curso e principalmente com seus alunos.

Ao engenheiro Carlos por toda a ajuda e apoio técnico no desenvolvimento deste projeto. Muito obrigado! Ao seu Moro e ao seu Paulinho, síndico e zelador do edifício Mirage por todo o suporte e disponibilidade. Muito obrigado!

“Eu não falhei. Apenas descobri 10 mil maneiras que não funcionam.”

(Thomas Edison)

## RESUMO

A concepção da importância do tema de monitoramento / detecção de movimentos em estruturas está diretamente ligada à questão da segurança. Este acompanhamento visa verificar se os padrões de construção respondem as mais variadas ações e intempéries (ocupação, temperatura, umidade, ventos) e se, principalmente, mantém os fatores de segurança necessários à sua ocupação ou uso. O presente estudo teve por finalidade apresentar uma proposta alternativa ao tema de monitoração de estruturas com ênfase na detecção da ação dos ventos sobre edificações. Assim, para o desenvolvimento deste estudo, realizou-se a análise do comportamento de uma edificação de 19 pavimentos com 54,250 m de altura, frente à ação das cargas de ventos durante o período de 24 horas, utilizando como meios auxiliares sensores acelerômetros de baixo custo com precisão horizontal de  $0,01^\circ$ , instalados nos vértices da edificação, e um dispositivo anemômetro com taxa de aquisição de dados de 3 segundos. A partir do desenvolvimento de um sistema de coordenadas cartesianas tridimensionais local foi realizada a análise dos deslocamentos da estrutura. O estudo apresentou resultados muito significativos, foram detectados movimentos entre 0,021 e 0,026 m valores de mesma ordem em relação ao previsto pela NBR 6118 e pelo Software CAD/TQS quando da exposição da estrutura a cargas de vento de 85,24 km/h.

**Palavras chaves:** Monitoramento. Detecção. Sensores Acelerômetros. Anemômetro. Ventos.

## **ABSTRACT**

The conception of the importance of the subject of monitoring / detection of movements in structures is directly linked to the issue of safety. This monitoring aims to verify if the construction patterns respond to the most varied actions and weather (occupation, temperature, humidity, winds) and, mainly, maintain the safety factors necessary for its occupation or use. The present study aimed to present an alternative proposal to the theme of structural monitoring with emphasis on wind action detection in buildings. Thus, for the development of this study, the behavior analysis of a building of 19 floors with 54,250 m height was performed, against the action of wind loads during the 24 hours period, using as an auxiliary means low cost accelerometer sensors. with 0.01 ° horizontal accuracy, installed at the building's vertices, and an anemometer device with data acquisition rate of 3 seconds. From the development of a local three-dimensional Cartesian coordinate system, the analysis of the structure displacements was performed. The study presented very significant results, were detected movements between 0.021 and 0.026 m values of the same order in relation to the predicted by NBR 6118 and CAD / TQS Software when the structure exposure to wind loads of 85.24 km / h.

**Keywords:** Monitoring. Detection. Accelerometer Sensors. Anemometer. Winds.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> Gráfico das Isopletas da Velocidade Básica do Vento.....	21
<b>Figura 2:</b> Análise do Fator Topográfico em Taludes e Morros.....	22
<b>Figura 3:</b> Definição de Categorias do Terreno.....	22
<b>Figura 4:</b> Definição das Dimensões da Estrutura.....	23
<b>Figura 5:</b> Parâmetros para Definição do Fator (S2).....	23
<b>Figura 6:</b> Definição do Fator (S3).....	24
<b>Figura 7:</b> Esquema IBGE-PPP.....	30
<b>Figura 8:</b> Sensor WT901WIFI.....	33
<b>Figura 9:</b> Exemplificação do Funcionamento Interno de um Acelerômetro Piezoelétrico.....	35
<b>Figura 10:</b> Edifício Mirage.....	38
<b>Figura 11:</b> Interface do Sistema WitMotion – Udp (V1.1.0).....	41
<b>Figura 12:</b> Dados Gerados por Sensor Interligado.....	41
<b>Figuras 13 e 14:</b> Descrição do Modelo do Parafuso de Centragem Forçada.....	46
<b>Figuras 15 e 16:</b> Preparação e Parafusos de Centragem Forçada Prontos.....	46
<b>Figuras 17 e 18:</b> Instalação dos Parafusos de Centragem Forçada.....	47
<b>Figuras 19 e 20:</b> Parafusos Instalados e Nivelados.....	47
<b>Figuras 21 e 22:</b> Instalação e Posicionamento do Anemômetro.....	48
<b>Figura 23:</b> Velocidade Média dos Ventos em Porto Alegre (1980-2016).....	49
<b>Figura 24:</b> Direção dos Ventos em Porto Alegre (1980-2016).....	50
<b>Figura 25:</b> Vértices e Pontos de Apoio.....	51
<b>Figuras 26:</b> Detecção em Conjunto – Receptor GNSS e Sensor WT901.....	52
<b>Figura 27:</b> Método de Pothenot (Análise Gráfica).....	53
<b>Figuras 28 e 29:</b> Prisma Refletor e PA1.....	53
<b>Figuras 30 e 31:</b> Prisma Refletor e Estação Total.....	54
<b>Figura 32:</b> Caixa de Proteção para os Sensores Acelerômetros.....	54
<b>Figura 33:</b> Preparação dos Dispositivos para o Monitoramento.....	55
<b>Figura 34 e 35:</b> Sensor Sobre o P2 e Caixa de Proteção com Dispositivos Acoplados em P1.....	56
<b>Figura 36:</b> Precisões do PPP.....	58
<b>Figura 37:</b> Processamento vide Topcon Tools.....	59
<b>Figura 38:</b> Estações para Realização dos Trabalhos Topográficos.....	61
<b>Figura 39 e 40:</b> Determinação das Coordenadas das Estações vide Problema de Pothenot...62	
<b>Figura 41:</b> Imagem Aérea da Edificação.....	64

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Classificação da Intensidade dos Ventos.....	19
<b>Tabela 2:</b> Especificações Técnicas do Sensor WT901WIFI.....	34
<b>Tabela 3:</b> Teste de Autonomia do Sensor.....	42
<b>Tabela 4:</b> Análise da Variação da Taxa de Aquisição de Dados nos Sensores.....	43
<b>Tabela 5:</b> Análise dos Resíduos dos Sensores 14C, 158 e 159.....	45
<b>Tabela 6:</b> Análise de Ventos Quanto à Duração e Velocidade.....	49
<b>Tabela 7:</b> Dados da Instalação em Conjunto dos Receptores e Sensores.....	52
<b>Tabela 8:</b> Resultado do PPP vide IBGE.....	58
<b>Tabela 9:</b> Precisoões - 05 horas de Rastreo.....	58
<b>Tabela 10:</b> Análise das Precisoões das Bases P5-P6 e P6.....	60
<b>Tabela 11:</b> Coordenadas dos Vértices a partir da Base P6.....	60
<b>Tabela 12:</b> Leituras de Ângulos e Distâncias das Estações.....	62
<b>Tabela 13:</b> Coordenadas Cartesianas Tridimensionais dos Vértices da Edificação Calculadas via Topografia.....	63
<b>Tabela 14:</b> Análise de Correlação entre os vetores resultantes e as cargas máximas de ventos.....	77
<b>Tabela 15:</b> Orçamentação.....	78

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1:</b> Resíduos do Sensor 14C (°).....	43
<b>Gráfico 2:</b> Resíduos do Sensor 158 (°).....	44
<b>Gráfico 3:</b> Resíduos do Sensor 159 (°).....	44
<b>Gráfico 4:</b> Vetor Resultante da Análise de Resíduos.....	44
<b>Gráfico 5:</b> Pressão Dinâmica em Função da Carga de Vento.....	65
<b>Gráfico 6:</b> Análise do Vento em 09/04/2019.....	66
<b>Gráficos 7, 8, 9 e 10:</b> Análise dos Vetores Resultantes.....	67
<b>Gráfico 11:</b> Análise do Intervalo de 11:27:20 á 11:28:20.....	69
<b>Gráfico 12:</b> Análise do Intervalo de 12:18:03 á 12:19:03.....	70
<b>Gráfico 13:</b> Análise do Intervalo de 13:01:23 á 13:02:23.....	71
<b>Gráfico 14:</b> Análise do Vento em 11/04/2019.....	72
<b>Gráfico 15:</b> Análise do Vento em 11/04/2019 das 17:36:00 ás 17:37:50.....	72
<b>Gráfico 16:</b> Vetores Resultantes dos Sensores durante o Período de Máximas Velocidades do Vento.....	73
<b>Gráfico 17:</b> Vetores Resultantes x Velocidade do Vento (análise de tendência).....	74
<b>Gráfico 18:</b> Análise dos Eixos x e y em Função das Maiores Cargas de Vento (P1).....	75
<b>Gráfico 19:</b> Análise dos Eixos x e y em Função das Maiores Cargas de Vento (P2).....	75
<b>Gráfico 20:</b> Análise dos Eixos x e y em Função das Maiores Cargas de Vento (P3).....	75
<b>Gráfico 21:</b> Análise dos Eixos x e y em Função das Maiores Cargas de Vento (P4).....	76
<b>Gráfico 22:</b> Vetores resultantes x cargas máximas de ventos.....	77

## LISTA DE FLUXOGRAMAS

<b>Fluxograma 1:</b> Sequência de Atividades Desenvolvidas.....	38
<b>Fluxograma 2:</b> Funcionamento e Transmissão dos Dados.....	39

## GLOSSÁRIO DE SIGLAS

**A** – Área

**ABNT** – Associação Brasileira de Normas Técnicas

**Ae** – Área Frontal Efetiva

**Ca** - Coeficiente de Arrasto

**Fa** – Força de Arrasto

**g** – Valor da Gravidade (9,81 m/s<sup>2</sup>)

**GPS** – Global Positioning System

**GNSS** – Global Navigations Satellite System

**h** - Altura

**Hz** – Hertz

**IBGE** – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

**km/h** – Quilômetros por Hora

**m** – Metro

**Mb** - Megabyte

**mm** – Milímetro

**MEMS** – Sistemas Microeletromecânicos

**m/s** – Metros por Segundo

**min** – Minuto

**NBR 6118/2004** – Estruturas de Concreto Armado

**NBR 6123/1988** – Forças Devidas ao Vento em Edificações

**P** – Ponto

**PA** – Ponto Auxiliar

**POAL** – Estação da RBMC (cidade de Porto Alegre / RS)

**PPP** – Processamento por Ponto Preciso

**q** – Pressão Dinâmica

**RBMC** – Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo

**RINEX** - Receiver Independent Exchange Format

**S1** - Fator Topográfico

**S2** - Fator de Rugosidade e Dimensões da Estrutura Analisada

**S3** - Fator Estatístico

**s** – Segundo

**UTM** – Universal Transversa de Mercator

**UFRGS** – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**V<sub>k</sub>** – Velocidade Característica

**V<sub>0</sub>** - Velocidade Inicial

**x** – Eixo x

**y** – Eixo y

**z** – Eixo z

**3D** – Tridimensional

° - Grau

' - Minuto

" - Segundo

Δ - Delta

**β** – Ângulo Formado entre os Pontos B e C

**α** - Ângulo Formado entre os Pontos A e B

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
1.1. Objetivo.....	16
1.2. Objetivos Secundários.....	16
1.3. Justificativa.....	17
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>18</b>
2.1. O Vento.....	18
2.2 A NBR 6123.....	20
2.2.1. A Velocidade Inicial (V0).....	20
2.2.2. O Fator Topográfico (S1).....	21
2.2.3. O Fator de Rugosidade e Dimensões da Estrutura Analisada (S2).....	22
2.2.4. O Fator Estatístico (S3).....	23
2.2.5. Determinação da Pressão Dinâmica ou de Obstrução.....	24
2.2.6. Determinação das Forças Estáticas Devido ao Vento.....	24
2.3. O Desenvolvimento do Monitoramento.....	25
2.4. Sistemas de Posicionamento por Satélites.....	28
2.4.1 Métodos de Posicionamento.....	29
2.4.1.1 Posicionamento Absoluto.....	29
2.4.1.2 IBGE-PPP.....	29
2.4.1.3 Posicionamento Relativo.....	30
2.5. Sensores Acelerômetros.....	31
2.5.1 Sensor WT901WIFI.....	33
2.5.2 Especificações Técnicas Sensor WT901WIFI.....	34
2.5.3 Microprocessador MPU 6050.....	34
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>37</b>
3.1. Testes e Desenvolvimentos de Parâmetros do Sensor WIT901WIFI.....	39
3.1.1 Integração do Sistema para Transmissão de Dados.....	40
3.1.2 Análise da Autonomia de Bateria dos Sensores.....	42
3.1.3 Análise da Taxa de Frequência dos Sensores.....	42
3.1.4 Análise dos Ruídos dos Sensores Quando em Inércia.....	43
3.2 Desenvolvimento do Parafuso de Centragem Forçada e Primeira Atividade de Campo....	45
3.3 Segunda Atividade de Campo, Rastreo GNSS e Detecção da Ação dos Ventos com Uso dos Sensores WIT901WIFI.....	50

3.3.1 Rastreo GNSS.....	50
3.3.2 Instalação dos Sensores WIT901.....	51
3.4 Terceira Atividade de Campo: Levantamento Topográfico.....	52
3.5 Quarta Atividade de Campo: Detecção da ação dos ventos sobre o Edifício Mirage Utilizando Sensores WT901 Durante o Período de 24 Horas.....	55
<b>4. PROCESSAMENTOS E ANÁLISES PÓS-CAMPO.....</b>	<b>57</b>
4.1. Processamentos GNSS.....	57
4.2. Determinação das Coordenadas dos Vértices da Edificação Utilizando Topografia.....	61
4.3. Padrões da Edificação (Geometria e Deslocamento Lateral).....	64
4.4. Análise do Comportamento dos Sensores Acelerômetros.....	66
4.5. Detecção da Ação dos Ventos Durante 24 Horas Contínuas Utilizando Sensores Acelerômetros.....	72
4.6. Análise do Deslocamento Posicionais no Intervalo de Maior Carga de Ventos.....	74
<b>5. ORÇAMENTAÇÃO.....</b>	<b>78</b>
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>80</b>
<b>7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>82</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>83</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Barragens, pontes, edifícios e outras grandes obras civis apresentam uma das maiores parcelas de investimentos de um país. Estas obras de infraestrutura fornecem os subsídios necessários para a sobrevivência e cotidiano do ser humano. O fator segurança destas estruturas é objeto de preocupação da engenharia nas fases de projeto, construção e operação, sendo necessário verificar e acompanhar o comportamento estrutural com periodicidade.

Nas últimas décadas foram introduzidas significativas melhoras nos conceitos e nos procedimentos relativos aos projetos estruturais. Porém, tal aperfeiçoamento nos modelos espaciais não pode abstrair de informações extraídas no mundo real, uma vez que o conhecimento de resultados das ações verificadas nas estruturas contribui diretamente para o aprimoramento destes novos modelos. Tais acompanhamentos e o desenvolvimento tecnológico nos conduzem a continuadas investigações e análises com o objetivo de aprimorar e desenvolver novas técnicas para determinação de variáveis geométricas e mecânicas em estruturas, como deslocamentos e tensões.

O acompanhamento citado é realizado através da atividade de monitoramento / detecção de movimentos em estruturas, nesta situação independe a idade da estrutura, pois todos os casos requerem avaliações de desempenho. Também, após a análise, os resultados são utilizados para verificar o cumprimento e manutenção das características de projeto como também para colher subsídios para melhorar futuros empreendimentos.

Muito além de uma atividade para a manutenção de uma estrutura, a adequada monitoração deve ser fator integrante desde a fase de projeto até o último momento de vida útil da estrutura.

### 1.1. Objetivo

Realizar a detecção e análise dos movimentos causados pela ação dos ventos em uma edificação com dezenove andares utilizando sensores acelerômetros.

### 1.2. Objetivos Secundários

- a. Comparar os resultados obtidos com os valores previstos em projeto;
- b. Analisar a viabilidade deste processo de detecção;
- c. Propor uma análise crítica do assunto em virtude da questão de segurança.

### **1.3. Justificativa**

O significativo aumento populacional das últimas décadas e o avanço populacional para as grandes cidades faz com que a engenharia necessite de maior planejamento para a alocação de toda a população. Grandes empreendimentos e obras fazem parte de nosso cotidiano e visam o aumento da qualidade de vida nos grandes centros. Desta forma, é crescente a demanda por habitações e empreendimentos verticais, buscando o aprimoramento das técnicas de desenvolvimento de estruturas verticais e seus projetos, a monitoração tem por objetivo auxiliar de forma vital nesta concepção. Desde o momento do planejamento até o fim da vida útil de qualquer empreendimento a monitoração deve estar presente, buscando o acompanhamento das ações desenvolvidas junto ao seu respectivo projeto, visando assim o melhoramento de futuros projetos, o aumento da seguridade e da infraestrutura das pessoas que habitam e utilizam de tais estruturas.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Pontes, túneis, barragens, estruturas subterrâneas (túneis) e muitas outras estão sujeitas a diversos fatores, internos e externos, que podem gerar mau funcionamento por desgaste. Como, por exemplo, em função da deterioração, processo de construção incorreto, falta de controle de qualidade ou influência do meio ambiente. Para observar essas mudanças (propriedades geométricas, condições do contorno, características do sistema) do material e para reagir de forma adequada antes que problemas graves aconteçam com isso, a implementação de um sistema de identificação de danos é fator vital. O monitoramento de estruturas ajuda a detectar intempéries do tempo, permitindo, assim, a implementação de ações eficientes para manutenção e reparo, com impacto direto na redução dos custos operacionais e proporcional aumento na segurança.

A falta de normativas básicas para a realização de monitoramento de estruturas de engenharia torna necessário o apoio no histórico de pesquisas e projetos até hoje realizados. Diversos autores buscaram e buscam apresentar soluções plausíveis e compatíveis com os avanços da engenharia. Um dos maiores problemas enfrentados por projetistas e engenheiros é quantificar valores para análise de estruturas quando consideramos fatores externos como, por exemplo, o vento.

Conforme PITTA (2016), ainda em meados do século XX não haviam sido elaboradas normas específicas sobre a ação dos ventos em edificações; assim sendo, a determinação dessas ações eram realizadas em conjunto com demais ações sobre a estrutura. Dessa forma, os resultados das observações serviam de base para os projetistas e calculistas de qualquer região do país. O desenvolvimento de novos materiais e novas tecnologias permitiu grande avanço no fator segurança. Ainda, o autor questiona a cultura do engenheiro brasileiro, o qual não tem o hábito de solicitar e até mesmo de exigir ensaios prévios para a modelagem e construção de novos empreendimentos estruturais.

### **2.1.O Vento**

Conforme JET STREAM (2008) quando analisamos a superfície terrestre, o vento consiste no deslocamento de massas de ar em grandes quantidades. Podem ser classificados conforme sua escala, rapidez, tipos de forças que acarretam e também as regiões em que seus fenômenos ocorrem. Ainda, podemos caracterizar os ventos através de sua velocidade, densidade dos gases envolvidos na análise e a sua energia eólica.

No campo da meteorologia, os ventos têm uma classificação específica que leva em consideração sua intensidade e direção de movimento. Em suma, podemos classifica-los de três maneiras conforme segue:

- a. Ventos súbitos: apresentam curta duração e velocidade elevada, sendo denominadas rajadas;
- b. Ventos fortes: apresentam uma duração intermediária (+/- 1 minuto); assim, são denominadas borrascas ou lufadas;
- c. Ventos de longa duração: conforme sua intensidade, podem ser denominados como brisa, vento forte, ventania, tempestade ou furacão.

Tabela 1: Classificação da intensidade dos ventos

Escala bft	Velocidade do Vento m/s	Velocidade do Vento Km/h	Classificação	Fenômenos Observáveis
0	<0,3	< 1,0	Calmo	Fumaça sobe na Vertical
1	0,3 a 1,5	1 a 5	Corrente Leve	Fumaça inclinada na direção do vento
2	1,6 a 3,3	6 a 11	Brisa Leve	Folhas das árvores movem
3	3,5 a 5,4	12 a 19	Brisa Suave	Vento move ramos finos e bandeiras se agitam
4	5,5 a 7,9	20 a 28	Brisa Moderada	Poeira e papéis são levantados, agitam os galhos das arvores
5	8 a 10,7	29 a 38	Brisa Fresca	Movimentação de Grandes Galhos e árvores pequenas, cristas de espuma se formam em lagos
6	10,8 a 13,8	39 a 49	Vento fresco	Difícil usar guarda-chuva, assobio do vento nos fios dos postes e árvores
7	13,9 a 17,1	50 a 61	Vento Forte	Dificuldade em andar no vento
8	17,2 a 20,7	62 a 74	Ventania	Dificuldade elevada de andar no vento, galhos de arvores são quebrados, barcos permanecem nos portos
9	20,8 a 24,4	75 a 88	Ventania forte	Impossível andar contra o vento, pequenos danos nas casas
10	24,5 a 28,4	89 a 102	Tempestade	Arvores são arrancadas e danos consideráveis nas casas
11	28,5 a 32,6	103 a 117	Tempestade Violenta	Danos generalizados em construções
12	>32,7	>118	Furacão	Destruição e devastação significativa

FONTE: Consultoria & Engenharia

Os ventos são capazes de modificar a superfície terrestre por meio da erosão e sedimentação eólica, originando solos férteis para agricultura. Outro fator importante nas ações do vento é o transporte ao longo de grandes distâncias de sementes de diversas plantas e poeira dos desertos, fato fundamental para a sobrevivência de várias espécies. O vento também apresenta diversos aspectos negativos, tais como: propagação de incêndios florestais, afetando as reservas alimentares do gado; quando associado a baixas temperaturas, as áreas de cisalhamento de vento provocadas por fenômenos meteorológicos podem provocar situações perigosas para a aviação e também, quando da ocorrência de ventos fortes pode-se ter a

danificação ou até mesmo a destruição de árvores e empreendimentos de engenharia por exemplo.

## 2.2 A NBR 6123

Na década de 90, foi criada a NBR 6123 (forças devidas aos ventos em edificações), norma que busca estabelecer parâmetros para a construção dos mais variados tipos de empreendimentos de engenharia ao redor do país, levando em conta o fator vento e seu comportamento em função da localidade da construção em questão. O presente estudo utilizará dois aspectos da norma como parâmetros iniciais: velocidade característica e pressão dinâmica.

Na NBR 6123, a velocidade característica ( $V_k$ ) é a velocidade utilizada em projeto onde faz-se uso de quatro parâmetros:

$V_0$  = velocidade inicial;

$S_1$  = fator topográfico;

$S_2$  = fator de rugosidade e dimensões da estrutura analisada;

$S_3$  = fator estatístico.

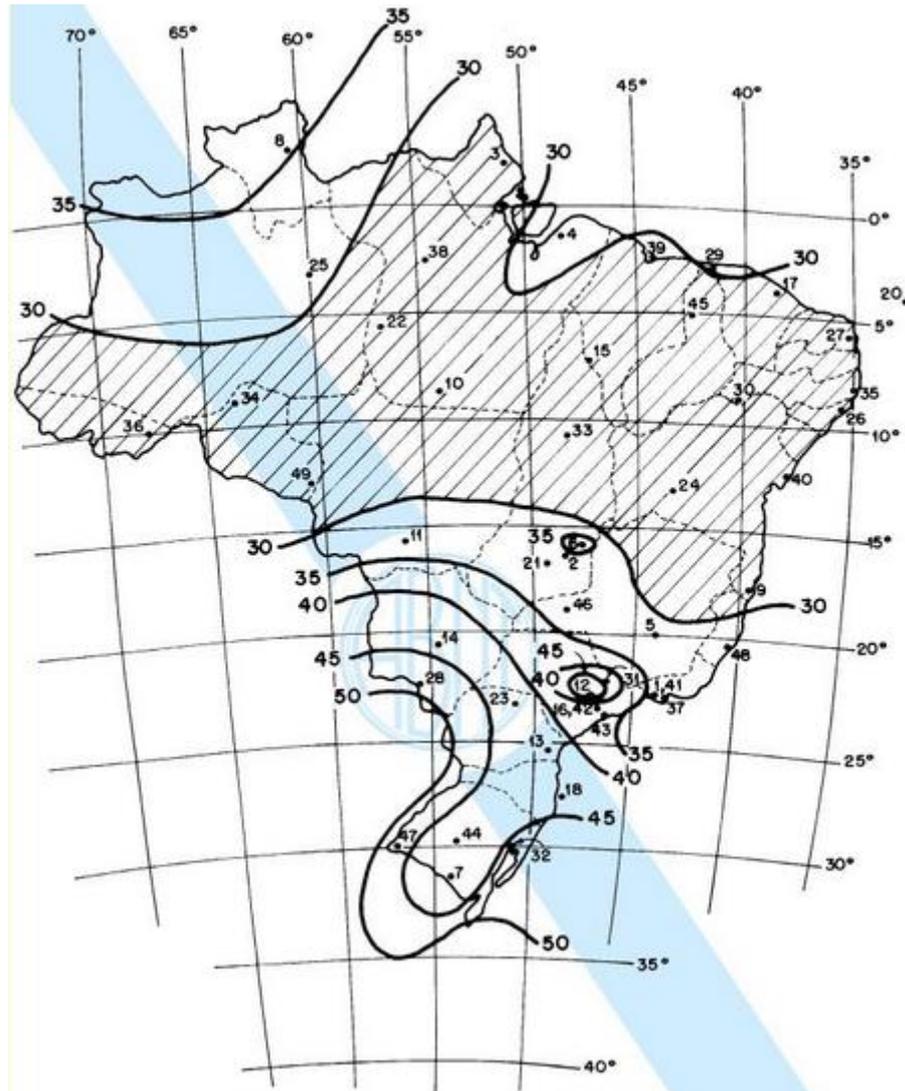
### 2.2.1 A Velocidade Inicial ( $V_0$ )

A velocidade inicial ( $V_0$ )<sup>1</sup> é definida com base no mapa abaixo, no qual a velocidade é dada em m/s, e sua média é extraída com base em uma análise de 3 s, que pode ser exercida, em média, uma vez em 50 anos, a 10 m sobre o nível do terreno em lugar aberto e plano.

---

<sup>1</sup> ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR6123: Forças devido ao vento em edificações. Rio de Janeiro. 1988.

Figura 1 Gráfico das Isopletas da Velocidade Básica do Vento



FONTE: NBR6123/1988

## 2.2.2 O Fator Topográfico (S1)

O fator topográfico  $S_1$ <sup>2</sup> está diretamente ligado à forma do relevo em que se encontra ou será projetada a edificação, e é determinada conforme segue:

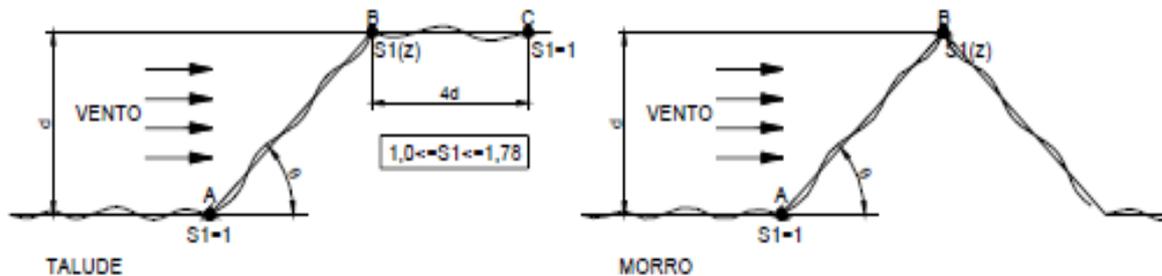
- a) Terreno plano ou quase plano:  $S_1 = 1,0$
- b) Taludes e morros (veja-se NBR6123/1988)
- c) Vales protegidos:  $S_1 = 0,9$

Para o item b desse fator, levam-se em consideração as imagens extraídas da norma

<sup>2</sup> ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR6123: Forças devido ao vento em edificações. Rio de Janeiro. 1988.

conforme a Figura 2.

Figura 2: Análise do Fator Topográfico em Taludes e Morros



FONTE: NBR6123/1988

### 2.2.3 O Fator de Rugosidade e Dimensões da Estrutura Analisada ( $S_2$ )

O fator  $S_2$ <sup>3</sup> é determinado a partir de dois parâmetros: o primeiro diz respeito a uma categoria (rugosidade do terreno) e uma classe que tem como base as dimensões da estrutura analisada. As categorias são encontradas na tabela 3.2 e o dimensionamento da estrutura na tabela 3.3 da NBR 6123.

Figura 3: Definição de Categorias do Terreno

Definição de categorias de terreno segundo NBR6123/1988	
Categoria	Descrição do ambiente
I	mar calmo, lagos, rios, pântanos
II	campos de aviação, fazendas
III	casas de campo, fazendas com muros, subúrbios, com altura média dos obstáculos de 3,0m
IV	cidades pequenas, subúrbios densamente construídos, áreas industriais desenvolvidas, com muros, subúrbios, com altura média dos obstáculos de 10,0m
V	florestas com árvores altas, centros de grandes cidades, com altura média igual ou superior a 25,0m

FONTE: NBR6123/1988

<sup>3</sup> ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR6123: Forças devido ao vento em edificações. Rio de Janeiro. 1988.

Figura 4: Definição das Dimensões da Estrutura

Classe	Descrição
A	Maior dimensão da superfície frontal menor ou igual a 20 metros
B	Maior dimensão da superfície frontal entre 20 e 50 metros
C	Maior dimensão da superfície frontal que 50 metros

FONTE: NBR6123/1988

Desta forma, é possível calcular o fator (S2) a partir da equação descrita abaixo:

$$S2 = b \cdot Fr \cdot (z/10)^p \quad (1)$$

Onde os termos b, Fr e p são obtidos a partir da Figura 5, e o termo z faz referência à altura da edificação no seu ponto mais alto (cumeeira).

Figura 5: Parâmetros para Definição do Fator (S2)

Categoria	Z <sub>g</sub> (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
		Fr	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: NBR6123/1988

#### 2.2.4 O Fator Estatístico (S3)

O fator S3<sup>4</sup> é definido de acordo com a finalidade da edificação, normalmente especificando a vida útil da mesma para 50 anos. Os valores mínimos que podem ser adotados estão definidos na Tab. 3.5 da norma.

<sup>4</sup> ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR6123: Forças devido ao vento em edificações. Rio de Janeiro. 1988.

Figura 6: Definição do fator (S3)

Grupo	Descrição	S <sub>3</sub>
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, centrais de comunicação, etc.)	1,10
2	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação	1,00
3	Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc.)	0,95
4	Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc.)	0,88
5	Edificações temporárias. Estruturas dos grupos 1 a 3 durante a construção	0,83

FONTE: NBR6123/1988

Após o conhecimento desses quatro fatores, podemos calcular a velocidade característica (V<sub>k</sub>) conforme equação abaixo:

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

Conforme a PITTA (2016), anteriormente à norma, os parâmetros utilizados por calculistas para os mais diversos projetos eram os mesmos independentemente da localização. Já a NBR 6123 traz a possibilidade de se particularizarmos parâmetros para a região de estudo e característica próprias de terreno e da futura edificação.

### 2.2.5 Determinação da Pressão Dinâmica ou de Obstrução

Após o conhecimento de V<sub>k</sub>, podemos projetar a pressão dinâmica que será exercida sobre a estrutura. Dessa forma, utilizamos a equação descrita abaixo, na qual se considera condições normais de pressão (1 atm = 101320Mpa) e temperatura de 15°C (NBR6123/1988).

$$q = 0,613 \cdot V \cdot k^2 \cdot (N/m^2) \quad (3)$$

### 2.2.6 Determinação das Forças Estáticas Devido ao Vento

A força devido ao vento depende da diferença de pressão nas faces opostas da parte da edificação em estudo (coeficientes aerodinâmicos). A NBR6123 permite calcular as forças tendo como base coeficientes de pressão ou coeficientes de força. Os coeficientes de forma

têm valores definidos para diferentes tipos de construção na NBR6123 que foram obtidos através de estudos experimentais em túneis de vento. A força devida ao vento através dos coeficientes de forma pode ser expressa por (NBR6123/1988):

$$F = (C_{pe} - C_{pi}) \cdot q \cdot A \quad (4)$$

Onde  $C_{pe}$  e  $C_{pi}$  são os coeficientes de pressão de acordo com as dimensões geométricas da edificação,  $q$  é a pressão dinâmica obtida de acordo com a equação 3 e a área frontal ou perpendicular a atuação do vento. Valores positivos dos coeficientes de forma ou pressão externa ou interna correspondem a sobre pressões, e valores negativos correspondem a suções. A força global do vento sobre uma edificação ou parte dela ( $F_g$ ) é obtida pela soma vetorial das forças que aí atuam. A força global na direção do vento ( $F_a$ ) é expressa por (NBR6123/1988):

$$F_a = C_a \cdot q \cdot A_e \quad (5)$$

Onde:

$C_a$  = coeficiente de arrasto (coeficiente de força)

$A_e$  = área frontal efetiva

O desenvolvimento da NBR 6123 trouxe grandes possibilidades para o aprimoramento de técnicas e elaboração de projetos tanto para, calculistas e projetistas, por exemplo, facilitou sobremaneira o planejamento e detecção dos efeitos que a força eólica poderá causar em uma estrutura. Porém, não é comum a realização de monitoramentos após a estrutura estar pronta e ao longo de sua vida útil. A cultura do monitoramento de estruturas com certeza ajudaria muito no planejamento e desenvolvimento de novos empreendimentos.

Tendo em vista as questões citadas, para que seja possível a realização do presente estudo, utilizaremos como base trabalhos anteriormente realizados no âmbito das técnicas de monitoramento de estruturas.

### 2.3 O Desenvolvimento do Monitoramento

HENNEBERG (1972) apresenta como uma recordação histórica os trabalhos desenvolvidos na Suíça no ano de 1919, utilizando as clássicas redes trigonométricas para

investigação das deformações de muros de contenção. Quase um século se passou desde o evento, e notório é o avanço das pesquisas e o desenvolvimento tecnológico que encontramos em nosso dia a dia. Arranha-céus quase quilométricos, pontes que ligam países e aeroportos em pleno mar são obras presentes e que motivam a engenharia atual. Ao passo que a engenharia cresceu a tecnologia teve que acompanhá-la, surgiram tecnologias tais como:

- a. Distanciômetros;
- b. Desenvolvimento da fotogrametria,
- c. GNSS;
- d. Evolução dos sistemas inerciais;
- e. Leituras por código de barras e o reconhecimento automático de alvos;
- f. E o mais atual, o sistema de varredura a laser.

Assim como em diversas áreas, os avanços no campo da informática permitiram o desenvolvimento de novas técnicas e aplicações para a Geodésia. no início deste século, os instrumentos de uso geodésico eram, basicamente, limitados pela taxa de aquisição dos dados, obtendo-se resultados mais significativos para o monitoramento de carga estática ou dinâmica consideravelmente lenta. A partir de da década de 1990, com o avanço da tecnologia por satélite, foi possível romper essas barreiras quando foram lançados receptores capazes de observar frequências de 10 Hz. Desse momento em diante, foi possível desenvolver linhas de pesquisa voltadas a comportamentos dinâmicos. A seguir, são apresentados alguns experimentos que dão base para a sustentação teórica deste trabalho.

Os pesquisadores Netto et al (2002) realizaram estudo em de pilares e vigas de uma edificação com o uso de instrumento óptico (nível digital), onde alcançaram medidas de recalque da ordem de 1,4mm. O autor também realizou estudos e monitoramento em um viaduto, usando equipamentos de GPS e nivelamento geométrico, apresentando uma diferença entre o GPS e o nivelamento de 7,1mm.

Já Larocca (2004), em sua tese de doutorado, apresenta um método de monitoramento com o uso de GPS. Sua precisão foi uma das principais vantagens apresentadas pelo autor, que permitiu medir deslocamentos de 2,0mm. Apontou também que a geometria dos satélites traz uma maior precisão e confiabilidade dos resultados. A autora ainda propôs uma comparação entre GPS e acelerômetro, mostrando que o GPS possui grande exatidão para a medição de frequências e maior confiabilidade, pois é orientado pelo relógio atômico.

Shall e Larocca (2009) compararam o sistema GPS com um transdutor de deslocamentos para realizar monitoramento em uma passarela com o, encontrando precisões

da ordem de 2,0 mm para o GPS e 5,0 mm para o transdutor. Concluíram, assim, e apontaram como vantagens que o GPS a não necessidade de calibração inicial e do estabelecimento de um índice de referência na estrutura.

Shaal, Larocca e Guimarães (2012) utilizaram (GNSS) com taxas de 100hz para monitoramento de uma ponte, apontando a possibilidade de monitorar grandes pontes e edifícios para pequenos deslocamentos com o uso do GPS. Mostram também a possibilidade de conseguir precisões da ordem de 3mm usando períodos de dezenas de segundos. Por fim, neste estudo, os autores ressaltam que os deslocamentos precisos na direção horizontal são mais difíceis de serem alcançados devido aos erros introduzidos e aos efeitos atmosféricos.

Haroldo Antonio Marques et al (2016) utilizaram das técnicas de posicionamento GNSS para monitorar o comportamento da Barragem na Usina de Apolônio Sales da CHESF. Na ocasião, foi determinada uma rede geodésica e a análise estimativa posicional. A precisão horizontal das linhas de bases variou de 0,6 a 1 mm, enquanto que a precisão vertical variou de 1,2 a 2,8 mm. Como resultado, puderam constatar que a repetibilidade na componente horizontal foi da ordem de milímetros ente às estimativas de cada sessão de coleta de dados GNNS.

Ainda, neste contexto de atividades já realizadas e premissas básicas aos trabalhos de monitoramento, e como o enfoque deste trabalho são edificações, Antunes (2007) aponta que, no caso de edifícios, a monitoração deve ser um processo dinâmico, tendo assim como objetivo evitar desastres e / ou tragédias, garantindo a seus usuários conforme a segurança necessária.

Assim, os trabalhos de monitoramento / detecção devem ter alguns princípios básicos como os que são apresentados a seguir:

- a. Monitoração remota;
- b. Acompanhamento instantâneo;
- c. Precisão e acurácia;
- d. Alta sensibilidade;
- e. Sensores bem pequenos;
- f. Não interferência devido a ondas eletromagnéticas;
- g. Familiaridade entre os fabricantes dos sensores (Interligação);
- h. Baixo custo;
- i. Preocupação quanto à segurança dos usuários;
- j. Possibilidade de medições de recalques (Variação de cota);
- k. Medição da frequência natural da estrutura.

## 2.4 Sistemas de Posicionamento por Satélites

Os sistemas de posicionamento por satélite tiveram sua implementação inicial em 1970, tendo como o precursor NAVSTAR-GPS, seguido, posteriormente, de outros desenvolvidos. Ainda, o autor cita que, em 1991, durante a 10<sup>a</sup> Conferência de Navegação Aérea, foi concebido o nome de GNSS (Global Navigation Satellite System), também reconhecido, nesta conferência, o GNSS como sendo fonte primária para a navegação aérea. Tendo como o objetivo central proporcionar o posicionamento em qualquer lugar do planeta Terra, surgiram os sistemas de posicionamento global. Inicialmente, eles tinham objetivo militar, sendo liberado para o uso civil após alguns anos. Porém, para esse fim, apresentavam uma ampla margem de erro. Com passar dos anos e o aprimoramento das tecnologias de posicionamento, esse erro foi reduzindo até chegar aos parâmetros atuais. Por meio do sistema de posicionamento, é possível obter dados relativos à posição, distância, área resolvendo, assim, questões de localização, deslocamento e mensuração. Conforme já citado dentre esses sistemas, destaca-se o posicionamento por satélites, referido em sua totalidade pelo termo Global Navigation Satellite System (GNSS), que inclui o sistema Global Positioning System (GPS), além do sistema de posicionamento Glonass, Galileo e Compass ou Beidou. O sistema GPS utiliza frequência fundamental de 10,23MHz, que transmitem o sinal, e dois sinais em frequências diferentes denominadas portadoras L1 e L2, ou simplesmente, fases da onda portadora. Sobre as ondas portadoras, estão modulados os códigos binários (C/A e P), que correspondem às mensagens de navegação, apresentando os arquivos em que estão contidos os parâmetros orbitais, as pseudodistâncias, as fases ou ondas emitidas, os dados para a correção do erro dos relógios dos satélites e dos receptores. Na portadora L1, são modulados os códigos C/A de uso civil e que correspondem à observável pseudodistância, e o código militar P, uma vez que, na portadora L2 é modulado o código P, que é criptografado gerando o código Y. Alguns receptores geram o denominado código P simulado, ou seja, obtido em função das observáveis contidas nos arquivos Receiver Independent Exchange Format (RINEX); contudo, não se tratam do código original sendo, portanto, grosseiras aproximações, uma vez que o código P original é de uso restrito. O posicionamento GNSS baseia-se na medição da distância entre o receptor a, pelo menos, quatro satélites, para que se possa obter simultaneamente a posição tridimensional (X, Y e Z) e haja a correção do erro de sincronismo entre os relógios dos receptores GNSS e dos satélites que compõem estes sistemas de posicionamento por satélites artificiais (MONICO, 2008).

## **2.4.1 Métodos de Posicionamento**

Os métodos de posicionamento GNSS podem ser realizados de forma absoluta ou relativa (MONICO, 2008). No presente estudo, serão discutidas e analisadas três formas de posicionamento: absoluto, posicionamento por ponto preciso (PPP) e relativo estático.

### **2.4.1.1 Posicionamento Absoluto**

No posicionamento absoluto, as coordenadas de um ponto localizado na superfície terrestre são determinadas tendo como base o geocentro, ou seja, ao centro de massa da Terra. Este método de posicionamento, a partir do código C/A, traz precisão inferior aos demais métodos e técnicas de posicionamento existentes, em razão de apenas utilizar a observável pseudodistância que apresenta erros de ordem métrica, uma vez que os erros envolvidos nos métodos de posicionamento por satélites artificiais como refração ionosférica e troposférica, erros orbitais, erros dos relógios dos satélites e do receptor, multicaminho, centro de fase da antena propagam-se diretamente às coordenadas que se deseja estimar (MONICO, 2008).

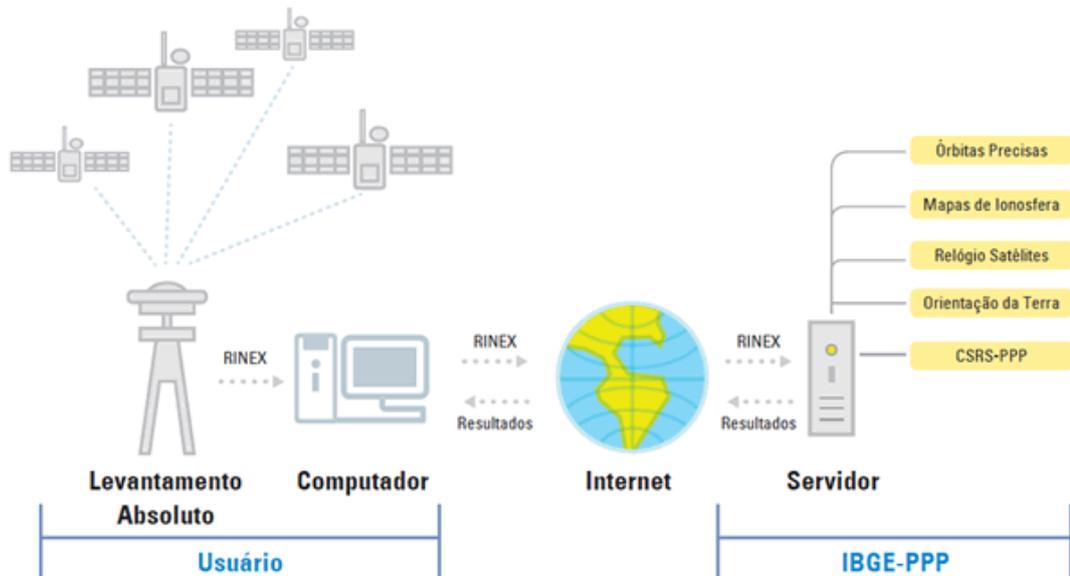
### **2.4.1.2 IBGE-PPP**

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística o Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) é um serviço online gratuito para o pós-processamento de dados GNSS, que utiliza o programa CSRS-PPP (GPS Precise Point Positioning), desenvolvido pelo NRCan (Geodetic Survey Division of Natural Resources of Canada). Esse sistema foi feito aos usuários com receptores GPS e/ou GLONASS obterem coordenadas referenciadas ao SIRGAS2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas) e ao ITRF (International Terrestrial Reference Frame) através de um processamento preciso. O IBGE-PPP processa dados GNSS que foram coletados por receptores de uma ou duas frequências utilizando o modo estático ou cinemático.

Os resultados são fornecidos através de relatórios que apresentam as coordenadas processadas dos pontos de interesse, suas referências e precisões. Para utilizar tal serviço, é necessário que o usuário informe o arquivo de observação no formato RINEX ou HATANAKA, o modo levantamento (estático ou cinemático), o modelo e a altura da antena

utilizada, e um e-mail válido. Ao final do processamento, será disponibilizado um link para obtenção dos arquivos com os resultados.

Figura 7: Esquema IBGE-PPP



Fonte: IBGE

### 2.4.1.3 Posicionamento Relativo

Neste sistema, as coordenadas de um ponto são determinadas em relação a um ou mais pontos de coordenadas conhecidas. A estação com coordenadas conhecidas (base) é ocupada por um receptor, ao mesmo tempo em que outro receptor é ligado simultaneamente no ponto cujas coordenadas deseja-se determinar. O princípio básico deste método é minimizar os erros envolvidos no posicionamento GNSS em função da diferença das observações enviadas simultaneamente pelos satélites comuns entre os receptores. O método de posicionamento relativo é classificado de acordo com o tempo de rastreamento para obtenção dos dados e subdivide em: posicionamento relativo estático, estático rápido, semicinemático, cinemático entre outros. (MONICO, 2008).

No posicionamento relativo estático, o receptor da base e os pontos cujas coordenadas desejam-se estimar são ocupados por cerca de 20 minutos a algumas horas, dependendo da geometria local e do comprimento do vetor linha base formado entre a base e o ponto ocupado denominado de *rover*. É o método que permite obter as melhores precisões, desta forma, sendo utilizada na medição de linhas de bases curtas (até 20 km) e longas (maiores que 100 km), rede geodésica, etc., (MONICO, 2008).

## 2.5 Sensores Acelerômetros

Acelerômetros são dispositivos utilizados para realizar a determinação da aceleração própria de um sistema o qual esteja inserido. Albert Einstein, em seus estudos em 1915 sobre a Teoria da Relatividade Geral, introduziu pela primeira vez o conceito de aceleração própria. Em resumo, é a medida em relação a outro sistema o qual se encontra em queda livre, de modo que está atrelado à sensação de peso. Sendo assim, um acelerômetro que se encontra em repouso na superfície da Terra apresentará uma aceleração  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  apontando, considerando e comparando a um objeto em queda livre. As aplicações desse tipo de dispositivo são as mais variadas possíveis no âmbito da indústria e ciência. Esses sensores são utilizados para detectar e monitorar vibrações em sistemas mecânicos, caixas de compartimentos de engrenagens, e componentes estruturais em geral. No campo da saúde, são utilizados para detectar e caracterizar inclinações de membros, e assim possibilitar a medição da transmissibilidade de vibrações de componentes, máquinas e ferramentas para o corpo humano. Na área bélica são utilizados acoplados a sistemas de navegação de aeronaves e mísseis. Outro uso comum e corriqueiro desses sensores ocorre em dispositivos celulares e tablets, onde o sensor é utilizado para manter a imagem de exibição da tela sempre na posição vertical (PAUL, 2011).

Acelerômetros são dispositivos que podem funcionar a partir dos mais diversos princípios, tais como: efeitos físicos, com destaque para os piezoelétricos, os piezoresistivos, os capacitivos, MEMS, transferência de calor, magnetoresistivo entre outros. De modo geral, esses sensores fornecem uma saída que é proporcional à aceleração a ser medida. Os mais diversos tipos de acelerômetros podem ser encontrados de acordo com os requisitos básicos de sua aplicação, podendo variar em massa, tamanho, eixos de medição, faixas de amplitude e frequência e massa, por exemplo. Os principais tipos de acelerômetros e suas características (BALBINOT, 2011):

- a. Piezoelétrico: são amplamente utilizados para medições de aceleração, choque e vibração de propósito geral. Esse sistema é composto por uma massa (denominada massa sísmica) que é posta em contato direto com o componente piezoelétrico. Quando o acelerômetro sofre uma aceleração em função de qualquer ação externa, o cristal piezoelétrico experimenta uma força (de acordo com a Segunda Lei de

Newton)<sup>5</sup>; desta forma, o sistema desenvolve uma carga elétrica proporcional à aceleração gerada;

- b. Piezoresistivo: nesse sistema, quando pressão é aplicada, a deflexão do diafragma de material piezoresistivo (normalmente silício) leva a mudanças nas resistências implantadas de acordo com o efeito piezoresistivo, o qual é medido por meio. Assim, a espessura do diafragma, a área da superfície e o desenho geométrico dos resistores determinam a permissibilidade da faixa de pressão;
- c. Capacitivo: os sensores de capacitância variável, ou simplesmente capacitivos, têm como base o princípio da mudança de capacitância em resposta a uma aceleração aplicada. São formados por uma massa sísmica que se movimenta em resposta à aceleração aplicada;
- d. MEMS: os sistemas MEMS, ou sistemas micro eletromecânicos, são fabricados com técnicas de fabricação microeletrônicas, o qual permite a criação de estruturas mecânicas de tamanho microscópicas feitas, tipicamente, de silício. Mais comumente, são de dois tipos: os de capacitância variável e os piezoresistivos;
- e. Acelerômetro de Efeito Hall: nesse dispositivo, a aceleração move uma fita que conduz corrente elétrica através de um campo magnético não uniforme. Assim, quanto maior for o deslocamento, maior será o campo magnético; portanto, maior será a diferença de potencial transversal à corrente devido ao efeito Hall<sup>6</sup>;
- f. Magnetoresistivo: a aceleração causa um deslocamento em uma massa de material magnético e, na parte fixa do dispositivo, há materiais que alteram sua resistência com a presença de um campo magnético;
- g. Acelerômetro de transferência de calor: esse princípio usa uma fonte de calor como massa de prova e tem termoresistores em posições opostas. Assim, quando se tem uma aceleração, é alterada a posição da fonte de calor e, conseqüentemente, muda-se a resistência de cada termoresistor;
- h. Redes de Bragg em fibras ópticas: são fibras ópticas com regiões de variação periódicas do índice de refração. Elas têm a propriedade de transmitir diversos comprimentos de onda e refletir em um comprimento de onda bem determinado.

---

<sup>5</sup>A Segunda Lei de Newton diz que a força resultante que age sobre um corpo deve ser igual ao produto da massa do corpo por sua aceleração ( $F = ma$ ).

<sup>6</sup> Este efeito está relacionado ao surgimento de uma diferença de potencial em um condutor elétrico, transversal ao fluxo de corrente e um campo magnético perpendicular à corrente;

Portanto, funciona como um filtro de comprimento de onda. Ao sofrer uma deformação, a densidade da fibra óptica é alterada, consequentemente, o índice de refração, e finalmente, o comprimento de onda filtrado.

### 2.5.1 Sensor WT901WIFI

O sensor WT901WIFI, que apresenta, conforme seu manual técnico, as características que seguem abaixo<sup>7</sup>:

- a. Módulo integrado com giroscópio, acelerômetro e módulo WIFI ESP 12-F;
- b. Microprocessadores (MPU 6050) de alto desempenho; desta forma, baseado no uso do filtro de Kalman, consegue apresentar solução dinâmica as questões de movimentos e atitude;
- c. Uso da filtragem de Kalman, que reduz efetivamente o ruído, apresentando melhor precisão na medição dos dados;
- d. Integra o solucionador de gestos com algoritmo dinâmico de filtro de Kalman, podendo-se obter a atitude precisa; desta forma, em ambiente dinâmico, a precisão da medição de atitude é de até 0,05 graus com alta estabilidade;
- e. Tensão de funcionamento é de 3.3 v á 5 v;
- f. O modo de baixo consumo de energia, atual <1mA, que suporta medições de até 2 horas em ambientes internos e externos;
- g. Conexão Wi-Fi. Visualização remota e em tempo real dos dados.

Figura 8: Sensor WT901WIFI



FONTE: MANUAL - WIFI Attitude Sensor SPECIFICATION

---

<sup>7</sup> Manual Técnico WiFi Attitude Sensor SPECIFICATION

### 2.5.2 Especificações Técnicas Sensor WT901WIFI

Ainda conforme manual WIFI Attitude Sensor SPECIFICATION, também são apresentadas as especificações técnicas do sensor. A tabela abaixo traz as especificações e possibilidades de uso do sensor.

Tabela 2 - Especificações Técnicas do Sensor WT901WIFI

1	Voltagem	De 3 a 5 Volts
2	Corrente de consumo	100 Ma
3	Volume	36 x 51,3 x 21 (mm)
4	Dimensões de medição	Aceleração: X Y Z; Velocidade angular: X Y Z; Ângulo: X Y Z; Campo magnético: X Y Z.
5	Faixa de aceleração	Aceleração: $\pm 16g$ . Velocidade angular: $\pm 2000^\circ / s$ ; Ângulo: X Z $\pm 180^\circ$ , Y $\pm 90^\circ$ .
6	Estabilidade	Aceleração: 0,01g; Velocidade angular 0,05 $^\circ / s$ .
7	Precisão da medida da atitude	Dinâmico: 0.1 $^\circ$ Estático: 0.05 $^\circ$
8	Saída de dados	Tempo, aceleração, velocidade angular, ângulo, campo.
9	Frequência de saída de dados	1 a 200hz

FONTE: Elaborado pelo autor

### 2.5.3 Microprocessador MPU 6050

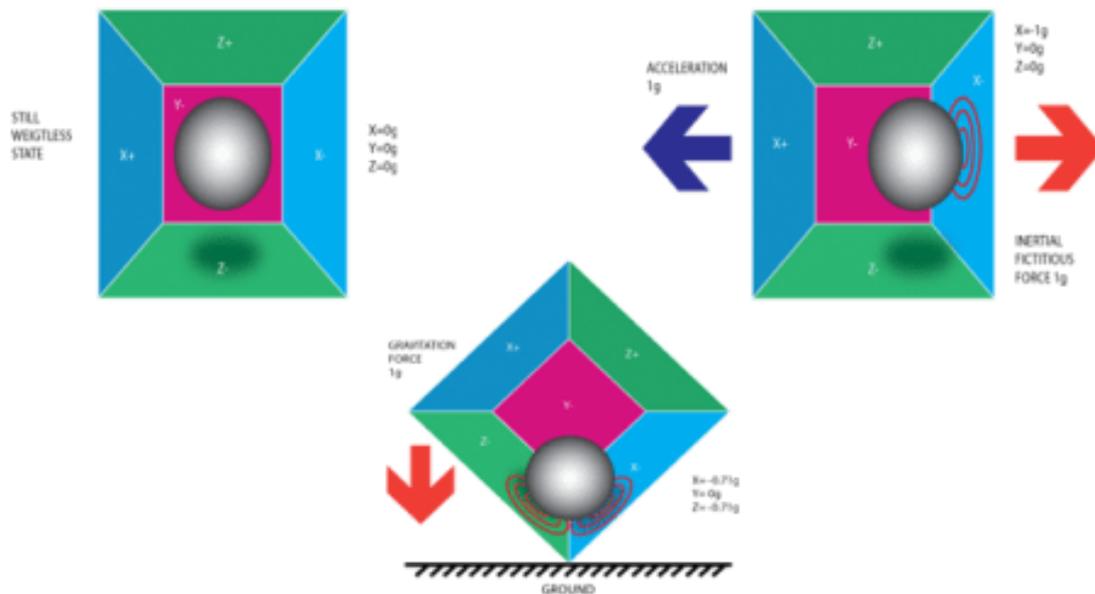
O MPU6050<sup>8</sup> é um sensor que utiliza de seis eixos. Assim, fornece seis valores de saída, três valores do acelerômetro (X, Y e Z) e três do giroscópio. Tanto o acelerômetro quanto o giroscópio estão integrados dentro de um único chip que utiliza o protocolo I2C<sup>9</sup> para se comunicar com o controlador. O sensor ainda conta com um DMP (Digital Motion Processor) que pode realizar inúmeros cálculos e algoritmos complexos dentro do próprio MPU6050. Tais algoritmos podem exercer funções como: detecção de passos, tap-detection, cálculos de ângulo entre outros. Além dessas medições, o sensor também pode medir temperaturas de -40 a 80°C.

<sup>8</sup> Autocore Robótica

<sup>9</sup> I2C é um barramento serial Barramento multimestre desenvolvido pela Philips que é usado para conectar periféricos de baixa velocidade a uma placa mãe, a um sistema embarcado ou a um telefone celular.

Com já exemplificado na seção 2.5 deste capítulo, existem diversos tipos de acelerômetros e funcionalidades. O sensor MPU 6050 traz consigo integrado um dispositivo acelerômetro com o princípio de funcionamento é o Piezoelétrico, que é a propriedade de alguns cristais gerarem tensão elétrica por resposta a uma pressão mecânica.

Figura 9: Exemplificação do Funcionamento Interno de um Acelerômetro Piezoelétrico



Fonte: DiY Hacking

No exemplo acima, a caixa é feita com cristais piezoelétricos. Quando houver inclinação da caixa independente da direção, a bola é forçada a se mover na direção da inclinação devido à gravidade. Assim, a parede em que a bola colide cria pequenas correntes conforme ele toca em alguma das seis paredes do cubo. Cada par de paredes corresponde a um eixo no espaço 3D: eixos X, Y e Z. Dependendo da corrente produzida a partir das paredes piezoelétricas, podemos determinar a direção da inclinação e sua magnitude. Os giroscópios MEMS<sup>10</sup> conseguem determinar as velocidades angulares do corpo ao qual estão fixados e, portanto, a orientação do objeto ou veículo em relação à sua trajetória. Didaticamente, o funcionamento de um giroscópio é um pouco mais complexo. Imaginando uma estrutura semelhante a um garfo que esteja em constante balançando, é mantida no lugar usando cristais piezoelétricos. Sempre que houver inclinação do conjunto, as pontas do garfo se moverão; contudo, a face oposta à qual está sujeita ao movimento se inclinará muito mais.

<sup>10</sup>Micro-Electro-Mechanical Systems.

Esse é o resultado da inércia do garfo. Os cristais produzem assim uma corrente em consenso com o efeito piezoelétrico, e essa corrente é amplificada e mandada para o controlador<sup>11</sup>.

---

<sup>11</sup> Autocore Robótica

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Abaixo são listados os materiais e softwares utilizados no desenvolvimento deste projeto de monitoramento:

- a. Parafusos de centragem forçada (06);
- b. Anemômetro Digital com Datalogger “taxa de gravação de dados de 03 seg”;
- c. Sensor WT901WIFI (06);
- d. Powerbank 5000mah Xtrax (06);
- e. Powerbank 2500mah Xtrax (01);
- f. Roteador TP Link AC750 (01);
- g. Estação Total Geodetic GT2 nº de serie “075518” (01);
- h. Prisma Refletor (06);
- i. Receptor Topcon GNSS GR-3 (01 par);
- j. Receptor Topcon GNSS Hiper Lite (02 pares);
- k. Topcon Tools versão 8.2.3;
- l. Microsoft Excel 2010;
- m. Software TCGeo;
- n. CAD TQS 2019;
- o. Materiais para Fixação dos parafusos de centragem forçada: Furadeira de impacto, broca 5/8, tesoura direita/esquerda para galvanizado, marreta, talhadeira, cola anaeróbica TekBond 138 (trava rosca), cola TeckBond Tix da Quartzolit (ferro / concreto), nível de bolha, fita isolante, fita crepe, fita dupla face, entre outros.
- p. Caixa de leite (06);
- q. Materiais para auxílio do rastreamento com GNSS e levantamento topográfico: Bases niveladoras, trenas métricas, tripé de alumínio (02), fio de prumo.

A primeira atividade e mais importante atividade para o desenvolvimento do presente estudo foi a escolha da edificação. Após várias visitas e consultas chegou-se até o Edifício Mirage, situado na Rua Prof. Cristiano Fischer nº 181 - Bairro Petrópolis, Porto Alegre – RS. Distante 8,5 km e 15 minutos do Campus do Vale da UFRGS, o empreendimento atendeu ao estudo tanto em termos técnicos quanto logísticos.

De segmento residencial, o edifício teve sua conclusão em dezembro de 2008. A estrutura conta com 19 pavimentos com dois apartamentos por andar, três pavimentos no subsolo, sendo dois para garagem e um pavimento com espaço fitness e piscina térmica. O

mesmo encontra-se em uma região elevada da Zona Norte de Porto Alegre, tendo seu ponto mais alto situado a mais de 100 metros de altura em relação à Avenida Sen. Tarso Dutra. Outro fator determinante para a escolha da edificação foi sua posição em relação a outras edificações: o prédio não apresenta edificações “gêmeas”, tampouco vizinhas que possam causar alguma obstrução da ação dos ventos no estudo.

Figura 10: Edifício Mirage

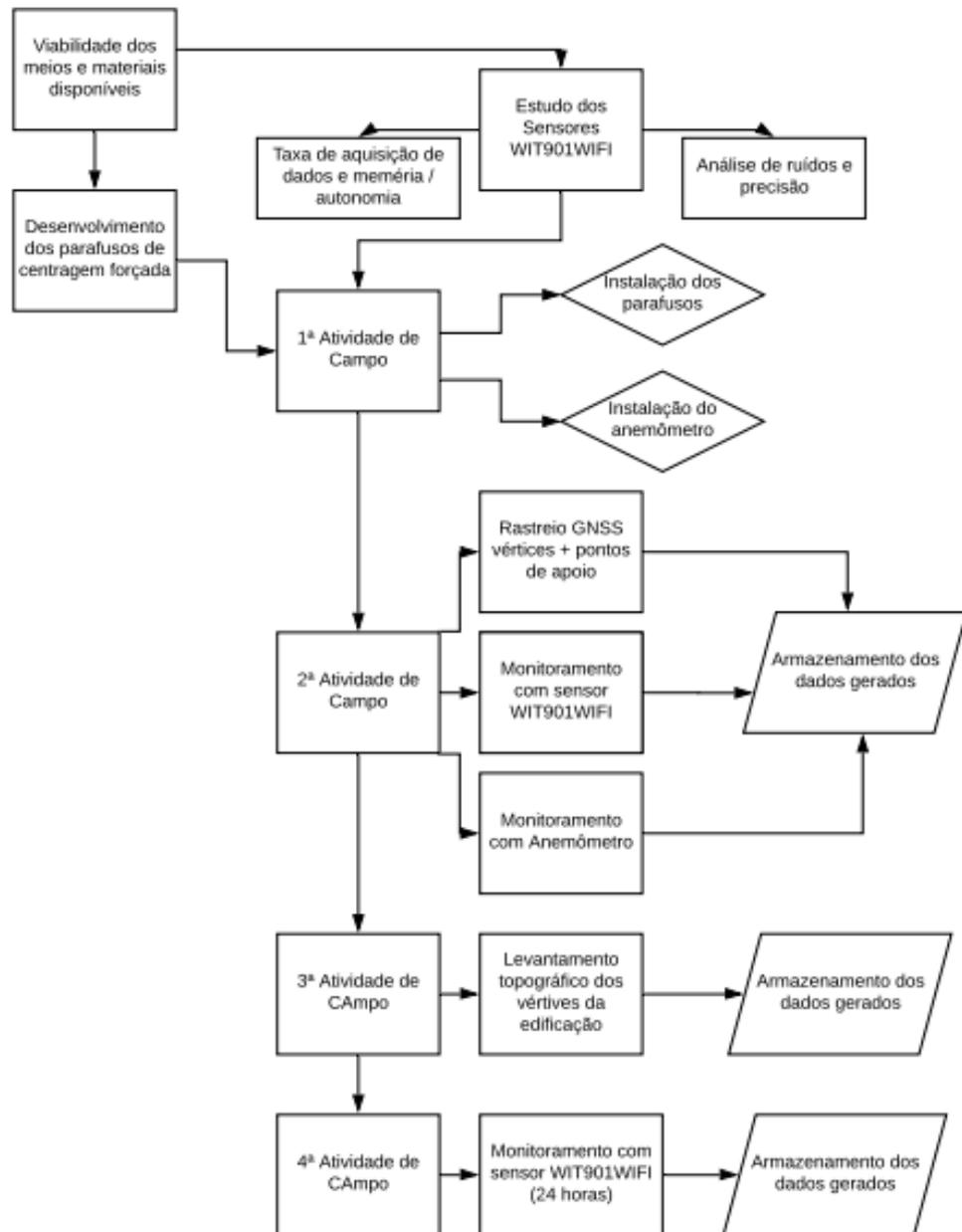


Fonte: Mapio.net

Por fim, levou-se em consideração o fato da estrutura apresentar um estilo de edificação “esbelta”. Com mais de 60 metros de altura, a estrutura apresenta uma proporção de 1/2 em relação à largura e 1/6 em relação à profundidade da edificação. Além disso, a estrutura apresenta em seu ponto mais alto uma laje sobre a casa de máquinas, local ideal para a instalação das bases de rastreamento dos pontos de apoio vide GNSS.

Após a escolha e autorização para estudo no edifício Mirage, passou-se para a etapa de análise e testes dos equipamentos disponíveis. Por se tratar de uma atividade pouco explorada e com pouca base bibliográfica, alguns métodos foram adaptados à realidade encontrada. Abaixo, é apresentado um fluxograma que descreve a sequência das atividades realizadas e seus respectivos métodos.

Fluxograma 1: Sequência de Atividades Desenvolvidas



Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.1 Testes e Desenvolvimentos de Parâmetros do Sensor WIT901WIFI

Por se tratar de um equipamento novo e com pouquíssimas referências sobre sua aplicação, foi necessário inicialmente estabelecer alguns parâmetros para seu teste e posterior melhor aproveitamento quando efetivamente utilizado em campo. Por mais que o manual técnico trouxesse informações acerca de seu funcionamento, algumas questões geraram dúvidas. Neste caso, pode-se citar a inversão dos eixos horizontais (x, y) em seu layout de

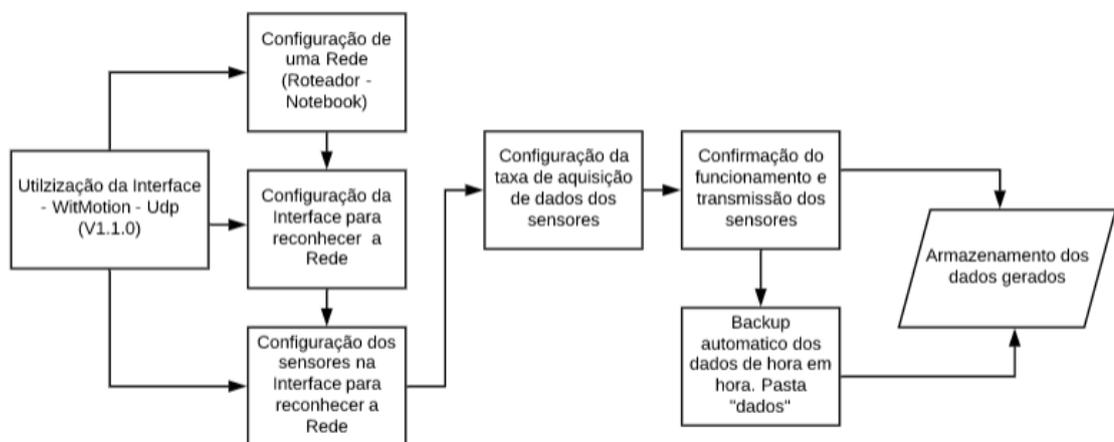
apresentação. Desta forma, foram estabelecidos os seguintes parâmetros para melhor compreensão do sensor WT901WIFI:

- Integração do sistema para transmissão de dados;
- Análise da autonomia de bateria dos sensores;
- Análise da taxa de frequência dos sensores;
- Análise dos ruídos dos sensores quando em inércia.

### 3.1.1 Integração do Sistema para Transmissão de Dados

Primeiramente foi estudada a forma de transmissão dos dados e como seria possível o armazenamento deles. O manual técnico do sensor explica diversas possibilidades; mas, em função da viabilidade do projeto, foi realizada a integração dos sensores ao computador via Roteador. Abaixo é apresentado o fluxo desta integração.

Fluxograma 2. Funcionamento e Transmissão dos Dados



Fonte: Elaborado pelo autor

A interface –WitMotion – Udp (V1.1.0) permite a integração da quantidade de sensores que o usuário desejar, sendo que o backup dos dados gerados ocorre de forma automática e, seus resultados são gravados em arquivo de formato .txt de hora em hora.



### 3.1.2 Análise da Autonomia de Bateria dos Sensores

O manual técnico do sensor apresenta que seu corrente de consumo é de 100mA. Porém, não apresenta testes que mostrem a autonomia real deste dado. Desta forma, em 24 de fevereiro de 2019, foi realizado um teste de autonomia utilizando quatro sensores com taxa de transmissão de dados de 1hz.

Tabela 3: Teste de Autonomia do Sensor

Sensor	Hora inicial	Hora final	Tempo de duração
14E	16h 12min 05seg	18h 15min 20seg	2h 04min 15seg
158	16h 30min 08seg	18h 21min 37seg	1h 51min 29seg
159	16h 23min 23seg	18h 18min 07seg	1h 54min 54seg
14C	16h 13min 36seg	18h 13min 17seg	1h 59min 41seg

Fonte: Elaborado pelo autor

Após este teste, verificou-se que o tempo médio que os sensores funcionaram foi de 1h 57min e 35seg. Como o monitoramento ocorreria durante um período de 24h, tal autonomia não era suficiente. Assim, foi adquirido e integrado ao sensor 159 um Powerbank 2500mah Xtra. Desta forma, a autonomia do sistema passou a ser de 17h 28min 05seg. Ainda insuficiente, foi adquirido por fim um Powerbank 5000mah Xtrax e novamente integrado ao sensor 159 desta vez, o resultado da autonomia do conjunto passou a ser de 27h 03min 59seg, resultado satisfatório e assim foi definido que, para o monitoramento, todos os sensores seriam acoplados a Powerbanks de 5000mah.

### 3.1.3 Análise da Taxa de Frequência dos Sensores

O manual técnico do sensor prevê a possibilidade de configuração da frequência de aquisição de dados podendo variar de 1 a 200hz. Também, foi realizada uma análise para verificar a necessidade ou não do uso de uma taxa de aquisição de dados maior do que um 1hz. Para essa atividade, foram utilizados cinco sensores: 137, 14E, 13F, 158 e 138.

Tabela 4: Análise da Variação da Taxa de Aquisição de Dados nos Sensores

Frequência	Tempo médio de duração	Consumo (Mb)
01 hz	02 h 02 min 49 seg	6,048
10 hz	01 h 59 min 56 seg	54,733
100 hz	01 h 56 min 48 seg	65,817

Fonte: Elaborado pelo autor

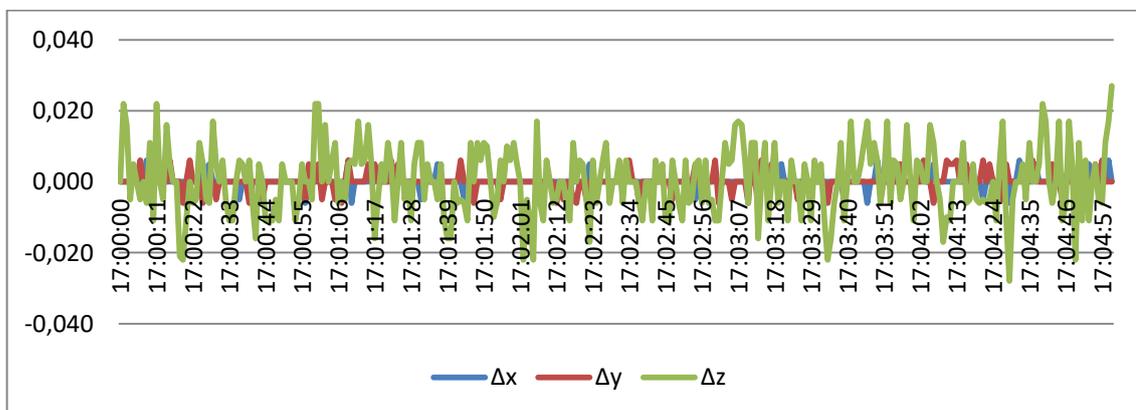
Conforme a tabela, 4 pode-se observar que a variação de frequências não altera de forma considerável a autonomia dos sensores: o tempo médio de duração é praticamente o mesmo.

Após esta análise ficou definido que os sensores seriam utilizados uma taxa de aquisição de dados de 1 hz, tendo em vista o menor consumo de dados e também em função dos dados com está taxa serem compatíveis com os dados de ventos de 3 em 3 seg.

### 3.1.4 Análise dos Ruídos dos Sensores Quando em Inércia

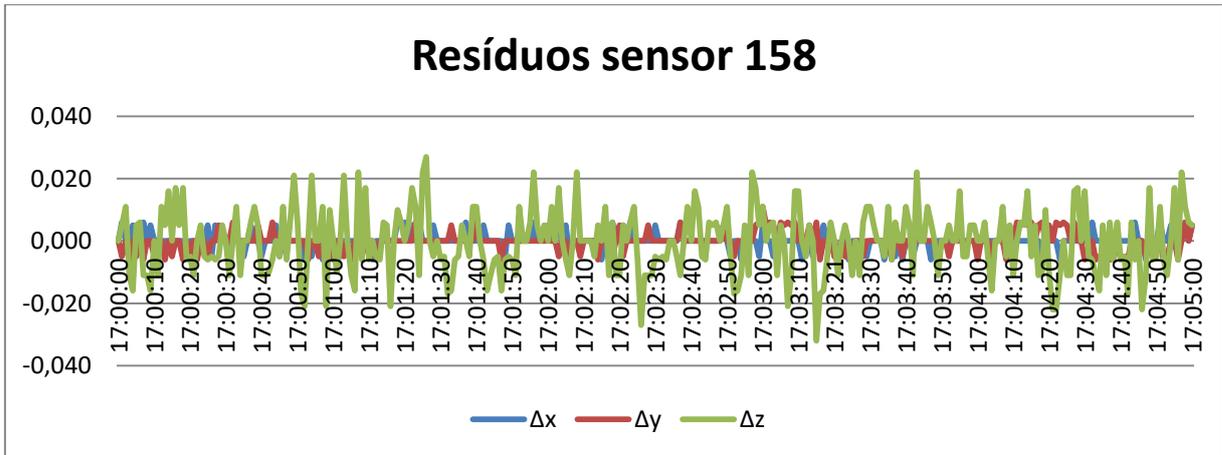
Foi realizado também um teste para verificação dos ruídos dos eixos x, y e z de três sensores. Por serem sensores baseados em componentes eletrônicos – apesar de ter uma precisão descrita em manual –, todo instrumento baseado em eletrônica pode apresentar ruídos em seus dados em algum instante de tempo. Com o objetivo de verificar a variação e amplitude desses ruídos nos sensores, escolheu-se uma amostra aleatoriamente de 5 minutos dentro dos intervalos utilizados para análises também dos itens 4.2.2 e 4.2.3.

Gráfico 1: Resíduos do Sensor 14C (°)



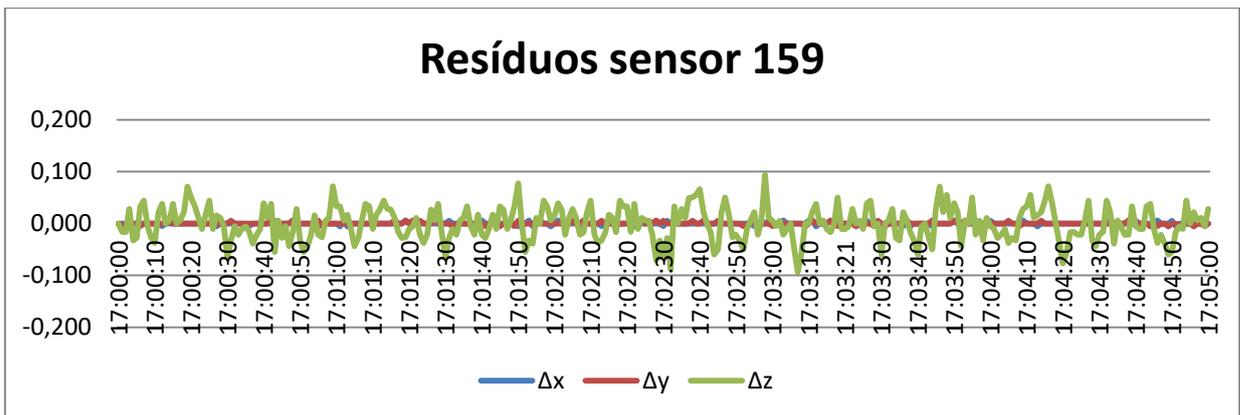
Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 2: Resíduos do Sensor 158 (°)



Fonte: Elaborado pelo autor

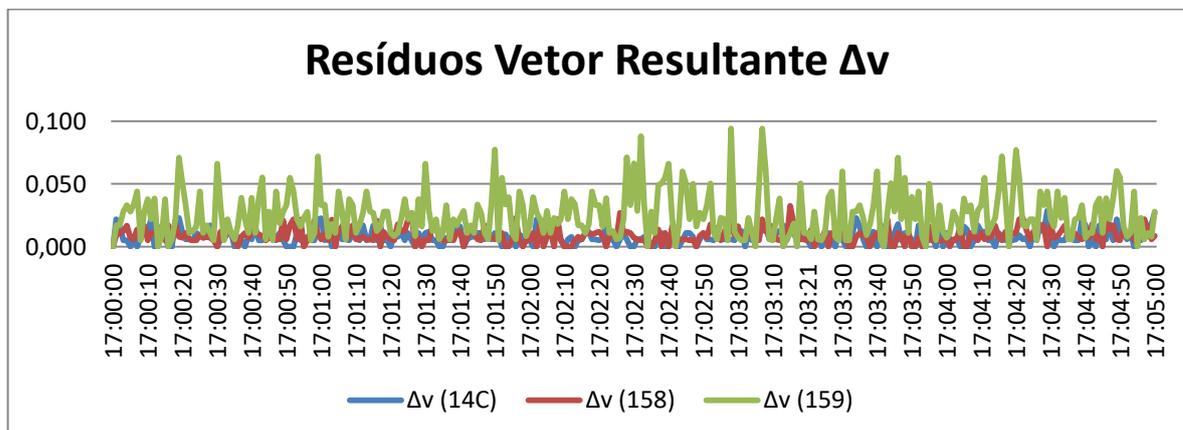
Gráfico 3: Resíduos do Sensor 159 (°)



Fonte: Elaborado pelo autor

Com base nos dados acima foi elaborado um gráfico de vetor resultante  $v^2 = (x^2 + y^2 + z^2)^{0,5}$ .

Gráfico 4: Vetor Resultante da Análise de Resíduos



Fonte: Elaborado pelo autor

Ao analisarmos os gráficos dos sensores 14C, 158 e 159, em comparação ao gráfico de  $\Delta v$ , verifica-se que o eixo z é o que mais apresenta ruído. Desta forma, o vetor resultante mostra sua dependência direta com eixo z. Este eixo contribui quase de forma exclusiva para o vetor resultante. Abaixo, foi criada uma tabela com os valores das amplitudes de cada sensor e suas resultantes.

Tabela 5: Análise dos Resíduos dos Sensores 14C, 158 e 159.

Sensor	$\Delta x$ máx	$\Delta x$ min	Amp x	$\Delta y$ máx	$\Delta y$ min	Amp y	$\Delta z$ máx	$\Delta z$ min	Amp z
14C	0,006	-0,006	0,000	0,006	-0,006	0,000	0,027	-0,028	-0,001
158	0,006	-0,006	0,000	0,011	-0,006	0,005	0,027	0,000	0,027
159	0,006	-0,006	0,000	0,006	-0,006	0,000	0,094	-0,094	0,000
Média	0,006	-0,006	0,000	0,008	-0,006	0,002	0,049	-0,041	0,009

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nos dados da tabela 5, é possível verificar que os sensores apresentam ruídos médios nos três eixos. E, conforme o gráfico do vetor resultante  $\Delta v$  e a tabela acima, verifica-se que o eixo z é que apresenta maior contribuição para a amplitude resultante dos dados do sensor. Assim também se deve levar em consideração os ruídos dos sensores no eixo x e y, onde, em x, temos um ruído médio de  $0,006^\circ$  e em y  $0,008^\circ$  quando em inércia. Desta forma, os ruídos médios devem ser considerados para análise do efeito dos ventos sobre a edificação, haja vista a possibilidade de se considerar um possível movimento quando se pode estar considerando na análise um ruído do sensor.

### 3.2 Desenvolvimento do Parafuso de Centragem Forçada e Primeira Atividade de Campo

Foi desenvolvido um modelo de parafuso de centragem forçada que se adaptasse às necessidades do estudo. Projetando causar o menor dano possível na edificação tanto em termos estruturais quanto visuais, optou-se pelo modelo abaixo descrito.

Figuras 13 e 14: Descrição do Modelo do Parafuso de Centragem Forçada



Fonte: Elaborado pelo autor

Para a confecção do parafuso mostrado nas figuras acima, foi utilizado uma barra de 1m com rosca 5/8. Cada parafuso foi cortado com o tamanho de 8cm e também foram torneadas duas peças de com diâmetro de 5 cm. Assim, 5cm serviram para a fixação na estrutura utilizando uma das peças circulares como base. A segunda peça foi utilizada para o nivelamento dos sensores acelerômetros. Para a fixação da base circular nos parafusos, foi utilizada a Cola Anaeróbica TekBond 138, específica para a uso e travamento de buchas e rolamentos. A vantagem desta cola é que, após o uso, pode-se separar as estruturas coladas apenas com o aquecimento do conjunto.

Figuras 15 e 16: Preparação e Parafusos de Centragem Forçada Prontos



Fonte: Elaborado pelo autor

No dia 04 de abril de 2019, foi realizada a instalação dos parafusos na edificação. Foi definido que seriam instalados os parafusos um parafuso em cada um dos 04 vértices da edificação e mais 02 parafusos sobre a casa de máquinas/caixa d'água do prédio (ponto aproximadamente 7 metros mais alto que os vértices do prédio).

Figuras 17 e 18: Instalação dos Parafusos de Centragem Forçada



Fonte: Elaborado pelo autor

Os 04 vértices do prédio, assim como todo seu entorno são revestidos por capa de chapa galvanizada. Assim, foi necessário realizar o recorte da chapa no entorno do parafuso. Já nos 02 pontos situados no nível acima a fixação foi realizada diretamente na laje da estrutura. Para a fixação dos parafusos utilizou-se duas brocas para o furo com uma furadeira de impacto primeiro utilizou-se uma broca número 6 e, posteriormente, uma broca 5/8. Após o furos prontos foi aplica a cola TeckBond Tix da Quartzolit nos furos e posteriormente, colocado os parafusos. Esta cola é específica para a fixação de materiais metálicos em estruturas de concreto, a estrutura secou por 72 horas antes de ser ocupada pelos receptores GNSS. Os parafusos foram nivelados utilizando nível de bolha.

Figuras 19 e 20: Parafusos Instalados e Nivelados



Fonte: Elaborado pelo autor

Junto dos parafusos, foi instalado a base e um sistema de anemômetro com biruta integrada, este dispositivo foi instalado na parte mais alta da edificação. O anemômetro teve por finalidade validar as possíveis variações da estrutura, tendo em vista em vista que o

mesmo foi programado para realizar o registro da velocidade e direção dos ventos com o intervalo de 3 segundos sem interrupção no período em que ocorressem as medidas de dados.

O anemômetro pode ser definido com um instrumento utilizado para medir a velocidade de um fluido que pode ser o ar (vento) ou a água em modelos físicos em laboratórios de hidráulica, de aerodinâmica ou qualquer outro fluido como os gases existentes em estrelas e planetas. O anemômetro utilizado usa um sistema datalogger que armazena os dados no formato.txt em um cartão de memória de 2GB – nessas configurações, pode-se realizar medidas ininterruptas por 2 anos). Comprado junto a empresa WRFCOMERCIAL, o equipamento foi configurado para fornecer leituras de 3 em 3 segundos para atender a NBR 6123/1988.

Figuras 21 e 22: Instalação e Posicionamento do Anemômetro



Fonte: Elaborado pelo autor

Para que fosse possível um melhor entendimento da região de estudo quanto ao fator vento, foi consultado o site <https://pt.weatherspark.com>, que dispõe de dados com base em uma análise estatística de relatórios horários históricos e reconstruções de modelo de 1 de janeiro de 1980 a 31 de dezembro de 2016.

Para a análise do comportamento do vento no período de 36 anos, é considerado o vetor médio horário de vento (velocidade e direção) em uma grande área e a 10 metros acima do solo. O fator topográfico, por exemplo, é determinante para a variação de sensação do vento em diferentes localidades. A velocidade e direção do vento em um determinado instante variam mais do que quando consideramos as médias horárias. No caso de Porto Alegre, a velocidade média dos ventos passa por variações sazonais pequenas ao longo do tempo. A

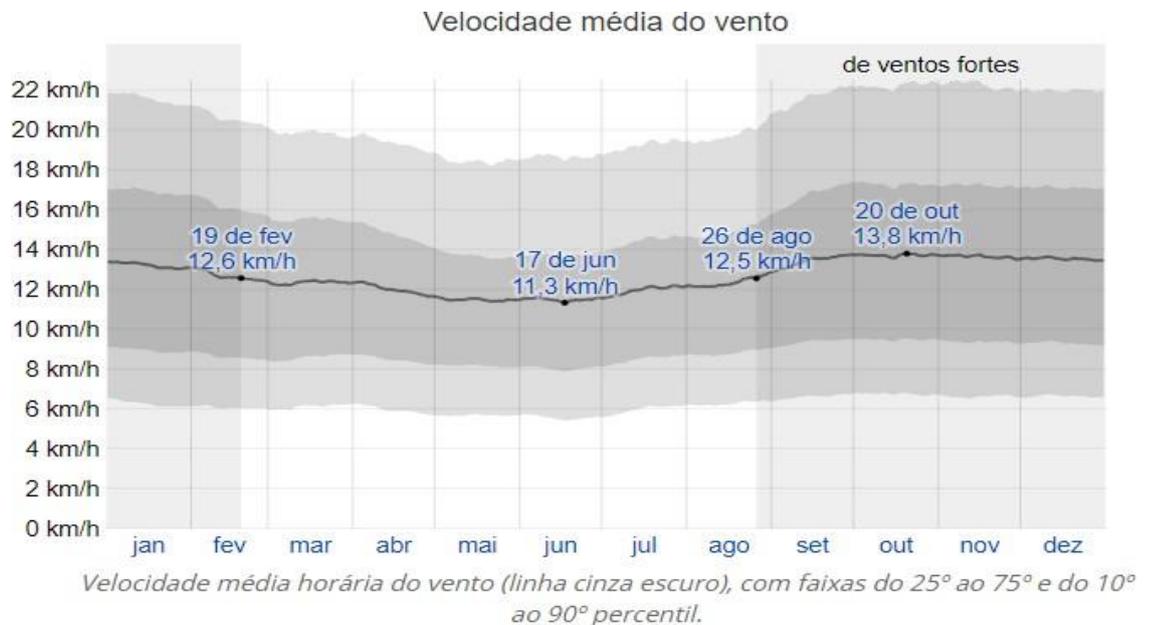
tabela I apresenta dados relativos a esta análise histórica extraídos deste estudo.

Tabela 6: Análise de Ventos Quanto à Duração e Velocidade

Descrição	Duração	Período	Vel med (km/h)
Época + ventos	5,8 meses	26 de agosto a 19 de fevereiro	-
Dia com vento + forte	-	20 de outubro	13,8
Época – ventos	6,2 meses	19 de fevereiro a 26 de agosto	-
Dia com vento + fraco	-	17 de junho	11,3

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 23: Velocidade média dos ventos em Porto Alegre (1980-2016)

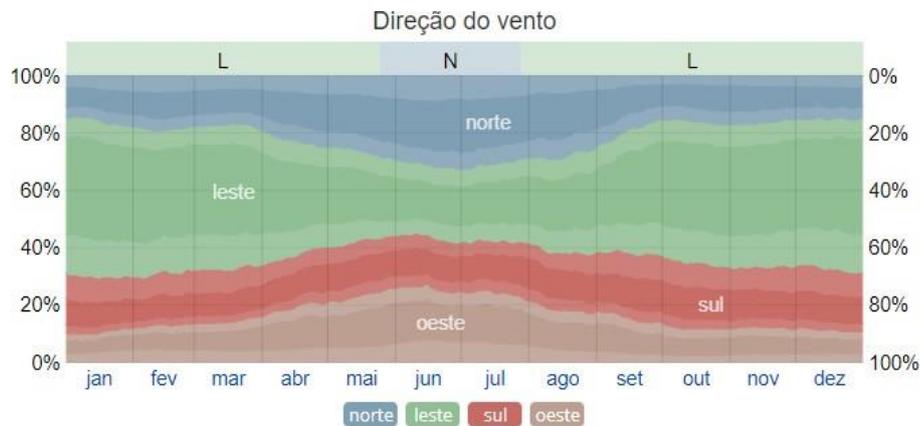


Fonte: Weatherspark

Quanto à direção média horária dos ventos em Porto Alegre é possível verificar que a mesma varia ao longo do ano. O vento mais frequente dura 2,1 meses vindo do norte no período entre 24 de maio e 28 de julho, onde o dia 30 de junho apresenta porcentagem máxima de 33%. O vento mais frequente tem duração de 9,9 meses, vindo do leste no período de 28 de julho a 24 de maio, apresentando porcentagem máxima de 54% em 1 de janeiro.

Figura 24: Direção dos ventos em Porto Alegre (1980-2016)

Fonte: Weatherspark



*A porcentagem de horas em que o vento tem direção média de cada uma das quatro direções cardeais de vento, exceto nas horas em que a velocidade média do vento é inferior a 1,6 km/h. As áreas mais esmaecidas nas interseções indicam a porcentagem de horas passadas nas direções intermediárias implícitas (nordeste, sudeste, sudoeste e noroeste).*

### 3.3 Segunda Atividade de Campo, Rastreamento GNSS e Detecção da Ação dos Ventos com Uso dos Sensores WIT901WIFI

No dia 09 de abril de 2019 foi realizada a segunda atividade de campo o qual teve por objetivos iniciais:

- Rastreamento GNSS dos pontos principais e apoio (conforme será apresentado na Figura 25);
- Instalação dos sensores WIT901 para detecção de movimentos em função da ação dos ventos;
- Integração do anemômetro aos sensores WIT901.

#### 3.3.1 Rastreamento GNSS

Com o objetivo de realizar a determinação das coordenadas dos vértices do prédio e dos pontos de apoio, foi realizado um rastreamento GNSS com duração de 7 horas. Nos vértices (pontos vermelhos) do prédio, foram utilizados dois pares de Receptores GNSS Hiper Lite e um par de Receptores Topcon GNSS GR-3 para os pontos de apoio (pontos em amarelo).



Tabela 7: Dados da Instalação em Conjunto dos Receptores e Sensores

Ponto	Modelo GNSS	Nº	Altura da antena (m)	Tempo de rastreio	Sensor	Distância ao receptor GNSS (m)
P1	HYPER LITE	8354	0,190	07h 13min	13F	0,185
P2	HYPER LITE	8357	0,096	07h 09min	158	0,165
P3	HYPER LITE	8352	0,104	07h 20min	14E	0,331
P4	HYPER LITE	8349	0,164	07h 10min	137	0,305
P5	GR-3	2273	0,210	07h 01min	....	.....
P6	GR-3	2358	0,238	07h 06min	....	.....

Fonte: Elaborado pelo autor

Figuras 26: Detecção em Conjunto – Receptor GNSS e Sensor WT901



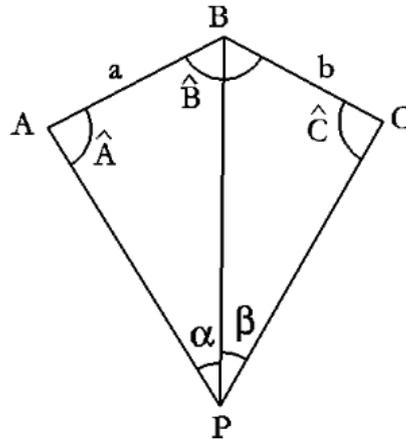
Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.4 Terceira Atividade de Campo: Levantamento Topográfico

No dia 10 de abril foi realizado um levantamento topográfico no terraço do Edifício Mirage. Tendo como objetivo principal o cálculo dos vetores formados entre os pontos de apoio e vértices, a topografia também foi inserida como método complementar ao estudo em função produzir os dados mais “puros” possíveis quando comparado aos pós – processamentos vide GNSS.

Como seriam processadas posteriormente as coordenadas dos pontos do rastreio GNSS, optou-se por utilizar para o levantamento topográfico o método da interseção inversa. Neste método, o ponto de coordenadas que se deseja determinar é ocupado, realizando a leitura de ângulos horizontais para três pontos de coordenadas conhecidas.

Figura 27: Interseção Inversa (Análise Gráfica)



Fonte: <https://nagarvil.webs.upv.es>

Desta forma, foram estabelecidos dois pontos fora do conjunto de pontos de apoio e vértices para a realização destes cálculos. Os pontos foram definidos como PA1 (ponto auxiliar) e PA2. A partir de cada um dos pontos auxiliares, foram feitas um conjunto de cinco leituras para cada um dos pontos visíveis, estabelecendo os conjuntos que seguem e serão analisados no próximo capítulo.

PA1 – P1, P2 e P3;

PA2 – P3, P4 e P2.

Figuras 28 e 29: Prisma Refletor e PA1



Fonte: Elaborado pelo autor

Figuras 30 e 31: Prisma Refletor e Estação Total



Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.5 Quarta Atividade de Campo: Detecção da ação dos ventos sobre o Edifício Mirage utilizando sensores WT901 durante o período de 24 horas

No dia 11 de abril foi realizada a última atividade de campo. Como objetivo central deste trabalho é desenvolver e apresentar uma alternativa para as técnicas de detecção de movimentos de estruturas, nesse dia foram instalados quatro sensores WT901 acelerômetros, um em cada vértice do prédio. Como o período pretendido de para análise era de 24 horas ininterruptas, foi necessário elaborar uma “proteção” para abrigar os dispositivos acelerômetros que seriam acoplados aos Powerbank 5000mah Xtrax. Utilizando caixas de leite de 1 litro, foi criado um modelo para proteção e aplicação no edifício.

Figura 32: Caixa de Proteção para os Sensores Acelerômetros



Fonte: elaborado pelo autor

As caixas inicialmente foram lavadas e, quando secas, foram invertidas, permitindo que a face de alumínio ficasse exposta refletindo assim, a luz e o calor. As laterais das caixinhas foram grampeadas, deixando apenas abertura da caixinha livre para transmissão do sinal. Após o desenvolvimento das caixas de proteção, foi necessário estabelecer na edificação um esquema para ligação dos dispositivos eletrônicos (notebook, roteador, anemômetro) que deveriam permanecer na área de estudo pelo mesmo período de 24 horas. Foi verificado que a casa de máquinas tinha suporte elétrico para a ligação dos dispositivos necessários, assim foram feitas as ligações conforme segue.

Figura 33: Preparação dos Dispositivos para o Monitoramento



Fonte: Elaborado pelo autor

Na figura, 33 é possível verificar todos os dispositivos que compõem e possibilitam o desenvolvimento da detecção de movimentos. A descrição dos itens numerados acima é apresentada a seguir:

- 1- Ligação inicial do notebook para estabelecimento de uma rede wireless que tem por finalidade permitir a transmissão de dados dos sensores acelerômetros para o computador. Os sensores também são configurados no computador após o estabelecimento da rede wireless;
- 2- Roteador, utilizado para configuração da rede wireless, permitindo assim que os sensores acelerômetros transmitam os dados captados ao notebook;

- 3- Datalogger do anemômetro digital, ligado independente de qualquer outro dispositivo. A gravação dos dados de ventos ocorre de 3 em 3 segundos e seu backup é feito diretamente no cartão de memória acoplado ao datalogger;
- 4- Sensores WIT901 acelerômetros configurados junto ao roteador utilizando a interface WitMotion – Udp (V1.1.0) apresentada no item 4.2.1 e tendo seu backup realizado diretamente na pasta Dados desta interface no notebook.

Após a etapa 4 concluída, os sensores foram distribuídos nos vértices e pontos de apoio do edifício. Concluída a instalação de todos os dispositivos e Powerbanks, foi verificada a estabilidade do sinal de transmissão por haver apenas uma parede entre os sensores e roteador o sinal foi facilmente transmitido. Um fato importante a se considerar é que a abertura da caixinha de proteção sempre precisou ficar apontada para a direção do roteador, o fato contrário impediu a transmissão de dados com qualidade.

Figura 34 e 35: Sensor sobre o P2 e Caixa de Proteção com Dispositivos Acoplados em P1



Fonte: Elaborado pelo autor

Os sensores WIT901 foram posicionados sobre os parafusos de centragem forçada utilizando fita dupla face, os Powerbanks também foram presos com fita isolante e dupla face. Após, a fixação destes dois dispositivos foi colado à caixa de proteção que não teve contato com os dispositivos, a mesma foi fixada sem encostarem-se aos dispositivos eletrônicos garantindo assim, que não houve interferência nas vibrações / movimentos captados pelos dispositivos e também no sinal captado através do roteador. As caixas por sua vez foram fixadas com fita dupla face e fita durex larga.

Após, os três dias de campo todos os dados coletados foram organizados, processados e analisados.

## **4 PROCESSAMENTOS E ANÁLISES PÓS-CAMPO.**

Neste capítulo serão apresentadas as análises dos resultados obtidos a partir dos métodos desenvolvidos e descritos no capítulo 4. Serão descritas e analisadas as etapas de processamentos dos dados GNSS e os trabalhos topográficos.

### **4.1 Processamentos GNSS**

A primeira etapa relativa à análise de resultados foi à realização do processamento dos dados GNSS obtidos a partir do rastreamento realizado em 09 de abril. Para o processamento desses dados, foram utilizados três métodos: PPP vide IBGE, processamento utilizando a RBMC (Base POAL) e processamento relativo utilizando os pontos P5 e P6 como bases.

Após o trabalho de campo, os arquivos importados utilizando o software Topcon Tools versão 8.2.3. Neste momento, foi verificado que o P5 apresentava um arquivo descontínuo, segmentado em nove partes. Durante a atividade de campo não foi possível configurar o GNSS GR-3 n° 2273 utilizando a controladora em função do “Bluetooth” não estar comunicando dados diretamente assim, a configuração desta estação foi feita manualmente. Essa estação criava arquivos de uma hora e posteriormente reinicia a atividade. As demais estações criaram arquivos contínuos conforme descrito na Tabela 7.

Para a realização do PPP do IBGE, utilizamos o site da instituição onde são carregados os arquivos RINEX, configurado o modo da ocupação estático ou cinemático, a altura da antena e o e-mail do usuário para envio do “Sumário do Processamento do marco”. Para todos os processamentos que serão utilizados, consideramos que as duas primeiras horas de rastreamento serviram para a estabilização dos receptores. Isso possibilitará a análise de possíveis movimentos com os sensores já previamente estáveis. Assim, os dados processados são referentes ao período entre a 3ª e 7ª hora de rastreamento. A Tabela 8 apresenta as coordenadas extraídas do PPP.

Tabela 8: Resultado do PPP vide IBGE

Pontos	Latitude (gms)	Longitude (gms)	UTM N (m)	UTM E (m)	Alt. Geo (m)
P1	30°02'30,4991"S	51°10'20,1206"	6676569,769	483393,29	156,65
P2	30°02'30,5111"S	51°10'20,4718"	6676569,385	483383,885	156,69
P3	30°02'29,5022"S	51°10'20,3879"	6676600,443	483386,085	156,7
P4	30°02'29,5574"S	51°10'20,0430"	6676598,758	483395,324	156,7
P5	30°02'29,9489"S	51°10'20,2756"	6676586,698	483389,113	163,38
P6	30°02'30,0487"S	51°10'20,2854"	6676583,626	483388,855	163,37

Fonte: Elaborado pelo autor

Após processamento, também foram analisadas as precisões do processamento. O IBGE impõem alguns parâmetros de precisões esperados de acordo com tempo de rastreo utilizado em campo.

Figura 36: Precisões do PPP

<b>Precisão esperada para um levantamento estático (metros)</b>				
<b>Tipo de Receptor</b>	<b>Uma frequência</b>		<b>Duas frequências</b>	
	<b>Planimétrico</b>	<b>Altimétrico</b>	<b>Planimétrico</b>	<b>Altimétrico</b>
<b>Após 1 hora</b>	0,700	0,600	0,040	0,040
<b>Após 2 horas</b>	0,330	0,330	0,017	0,018
<b>Após 4 horas</b>	0,170	0,220	0,009	0,010
<b>Após 6 horas</b>	0,120	0,180	0,005	0,008

Fonte: IBGE

Tabela 9: Precisões - 05 Horas de Rastreo

Pontos	Latitude (m)	Longitude (m)	Alt. Geo.(m)
P1	0,002	0,005	0,006
P2	0,003	0,008	0,009
P3	0,003	0,007	0,008
P4	0,003	0,007	0,009
P5	0,004	0,011	0,013
P6	0,003	0,007	0,008

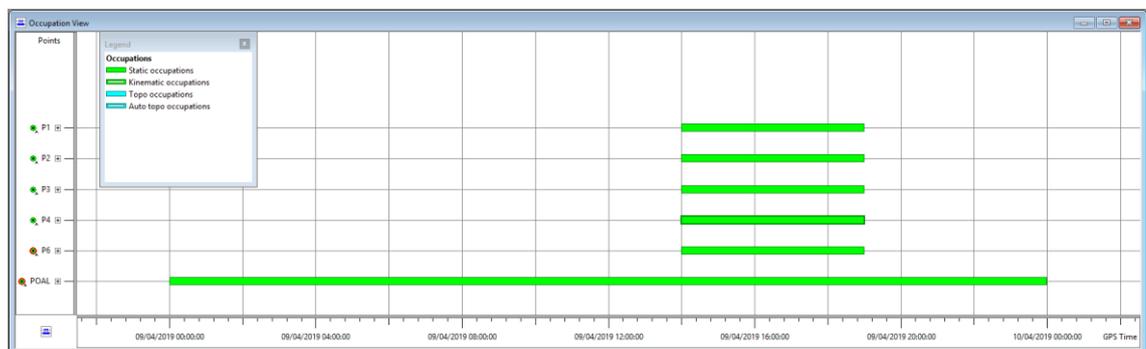
Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme a tabela 9 é possível verificar que todos os pontos a exceção de P5 apresentam precisões dentro dos parâmetros do IBGE. Ao analisarmos a precisão na longitude

e altitude geométrica de P5, verifica-se que são maiores 0,002 e 0,003 m maiores do que os padrões do IBGE. Apesar disso, foi realizado o processamento dos pontos em relação à POAL para verificar a precisão dos vetores entre os pontos.

Finalizada a etapa de processamento vide IBGE, foi realizado o processamento utilizando a estação POAL da RBMC. Essa atividade teve objetivo de realizar o processamento dos dados da base e vértices da edificação, utilizando uma estação com coordenadas e parâmetros previamente estabelecidos para que posteriormente, com os resultados obtidos fosse possível realizar o processamento dos dados dos vértices utilizando uma base local, no caso os pontos P5 e P6.

Figura 37: Processamento vide Topcon Tools



Fonte: Elaborado pelo autor

Inicialmente, consultou-se, no site do IBGE, o Relatório de Informações de Estação com dados relativos à POAL (coordenadas geodésicas da estação, Latitude: - 30° 04' 26,55276; Longitude: - 51° 07' 11,15324 e Altitude Elipsoidal: 76,745 m). Com esses dados, foi utilizado o software Topcon Tools para processamento dos dados.

Em função de P5 não atender inicialmente as precisões do IBGE, foram realizados dois processamentos distintos:

- 4.2 Processar P5 e P6 em relação à base POAL e, posteriormente P5 e P6 com base para determinação dos pontos P1, P2, P3 e P4;
- 4.3 Processar P6 em relação à base POAL e, posteriormente P6 como base para determinação dos pontos P1, P2, P3 e P4;

Como resultado das etapas descritas acima, foram analisados os resultados dos vetores horizontal e vertical dos processamentos GNSS.

Tabela 10: Análise das Precisões das Bases P5-P6 e P6

Base	Horz RMS (m)	Vert RMS (m)
P5-P6	0,007	0,013
P6	0,002	0,003

Fonte: Elaborado pelo autor

É possível observar que os vetores resultantes horizontais e verticais dos processamentos utilizando as bases locais P5-P6 e, posteriormente, P6 apresentam valores bem discrepantes. Desta forma, assim como foi apresentando no PPP, pode-se confirmar que o P5 apresenta problemas em função de sua configuração no rastreo. Por “contaminar” as precisões do processamento quando utilizado como base em conjunto com P6, este ponto será desconsiderado do processamento assim, utilizaremos os resultados apenas tendo P6 como base local. Abaixo são apresentadas as coordenadas de P6 após o processamento com POAL e posteriormente as coordenadas dos vértices da edificação tendo como base o ponto P6.

Latitude: 30°02'30,04835"S; Longitude: 51°10'20,28420"W; Altitude Geométrica: 163,247 (m).

Tabela 11: Coordenadas dos vértices a partir da base P6

Pontos	Latitude (gms)	Longitude	Alt. Geo (m)
P1	30°02'30,49873"S	51°10'20,11964"W	156,585
P2	30°02'30,51071"S	51°10'20,47152"W	156,586
P3	30°02'29,50189"S	51°10'20,38758"W	156,609
P4	30°02'29,55701"S	51°10'20,04191"W	156,600

Fonte: Elaborado pelo autor

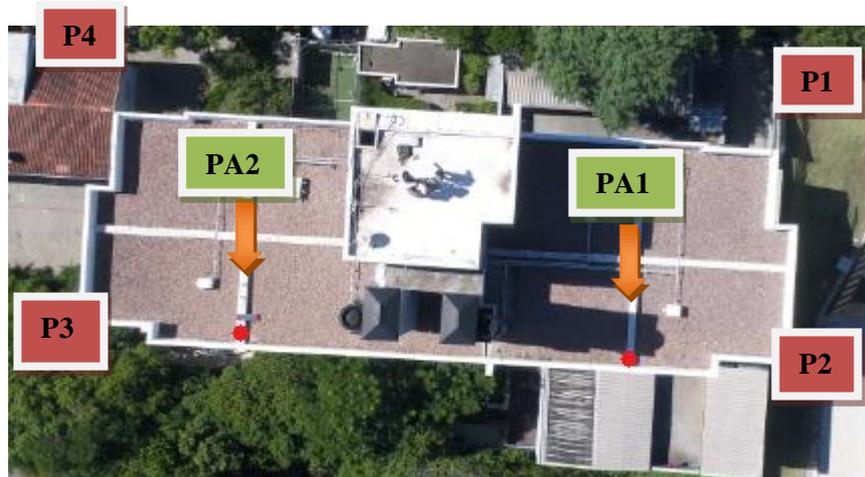
O principal objetivo do processamento GNSS utilizando uma base local é geração de coordenadas que apresentarão melhor qualidade posicional em comparação ao PPP do IBGE e também ao processamento com a estação POAL da RBMC em função de ter uma base pertencente a estrutura analisada e também pelo fato dos vetores gerados pela combinação dos pontos apresentarem pequenas dimensões, diminuindo, assim, a interferência e erros gerados por agentes externos.

## 4.2 Determinação das Coordenadas dos Vértices da Edificação Utilizando Topografia

Após a determinação das coordenadas do ponto de apoio e dos vértices da edificação, no dia de 10 de abril foi realizado um trabalho topográfico no terraço do edifício com o objetivo de realizar a determinação das coordenadas dos vértices da edificação a partir do uso de topografia convencional e, posteriormente, criar um sistema de coordenadas tridimensional local que apresentasse a melhor qualidade posicional possível.

Desta forma, conforme já mencionado no item 4.4, foi utilizado o processo de interseção inversa/Pothenot. Para tal, foram determinadas duas estações dentro dos limites dos vértices da edificação.

Figura 38: Estações para Realização dos Trabalhos Topográficos



Fonte: Elaborado pelo autor

Na figura acima, é apresentado o posicionamento das estações PA1 e PA2. Assim, foram realizados dois conjuntos de leituras de ângulos e distâncias diferentes.

- |    |                       |     |                       |
|----|-----------------------|-----|-----------------------|
| I. | Estação PA1:          | II. | Estação PA2:          |
|    | Ré: P1                |     | Ré: P3                |
|    | Visadas: P2, P3 e PA2 |     | Visadas: P4, P2 e PA1 |

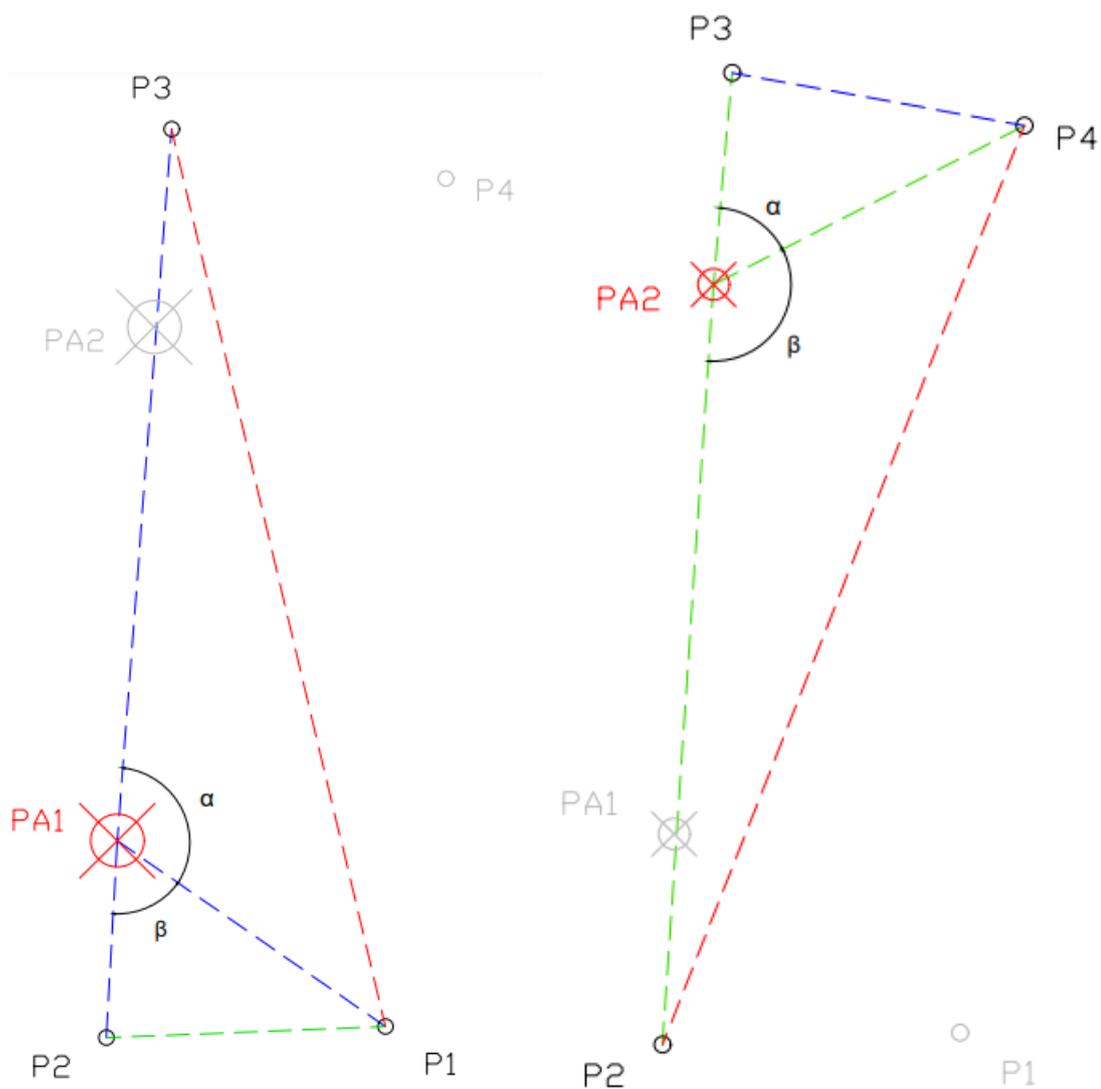
Para cada conjunto, foram realizadas cinco leituras de ângulos e distâncias para cada ponto visado desta forma, o valor médio dos ângulos (horizontal e vertical) e da distância inclinada foi utilizado para o cálculo das coordenadas das estações.

Tabela 12: Leituras de Ângulos e Distâncias das Estações

Estação	Ponto	AH	AV	DI
P1	P2	58° 05' 55"	93° 38' 50"	6,778
	P3	239° 15' 39"	90°55'13"	24,429
	PA2	239° 00' 53"	93°24'34"	17,681
P3	P4	57° 46' 02"	91° 54' 58"	11,119
	P2	178° 51' 43"	90° 55' 28"	24,393
	PA1	179° 06' 56"	93° 15' 35,6"	17,675

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 39 e 40: Determinação das Coordenadas das Estações vide Interseção Inversa



Fonte: Elaborado pelo autor

Utilizando o método de Pothenot, os dados da tabela 12 e as figuras 47 e 48 foram calculados as coordenadas das estações PA1 e PA2, e os resultados são os que seguem abaixo:

PA1 483384,262 (E); 6676576,130 (N)      PA2 483385,509 (E); 6676593,692 (N)

Após a determinação das coordenadas das estações, foram determinadas as novas coordenadas dos vértices da edificação. Utilizando as estações e o método de irradiações foi possível determinar um sistema de coordenadas cartesianas tridimensionais. Para a determinação das altitudes dos vértices, foi utilizado como base à altura de projeto da edificação, contando do térreo até a platibanda a estrutura apresenta uma altura de 54,250 m.

Tabela 13: Coordenadas Cartesianas Tridimensionais dos Vértices da Edificação Calculadas Via Topografia

Pontos	Coord X (m)	Coord Y (m)	Altura (m)
P1	100,000	150,000	54,268
P2	90,573	149,556	54,249
P3	92,784	180,737	54,271
P4	102,097	179,020	54,287

Fonte: Elaborado pelo autor

As coordenadas descritas na tabela 13 serão utilizadas nos próximos itens como parâmetros para análise das variações da edificação em função da ação dos ventos. Os tópicos são destinados à análise dos resultados dos trabalhos realizados entre os dias 09 e 12 de abril de 2019. Sendo dividido em três partes: padrões da edificação, análises dos receptores GNSS em conjunto com os sensores acelerômetros e detecção da ação dos ventos durante 24 horas contínuas utilizando sensores acelerômetros.

### 4.3 Padrões da Edificação (Geometria e Deslocamento Lateral)

Conforme já apresentado no capítulo 4, o edifício Mirage apresenta um estilo de construção “quase esbelta”. Este padrão é definido na proporção 1:7 quando se relaciona a largura da edificação em função de sua respectiva altura. A altura de projeto do edifício é igual a 54,25 metros enquanto sua largura é de 9,45 metros desta forma, tem-se uma relação de aproximadamente 1:6. Estruturas com este padrão de geometria estão mais suscetíveis à ação dos ventos.

Figura 41: Imagem Aérea da Edificação



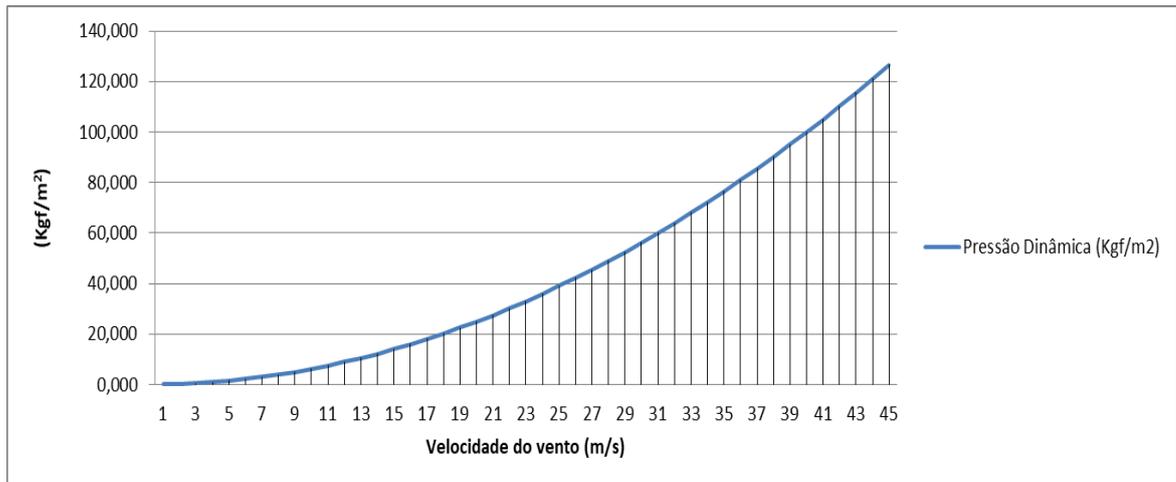
Fonte: Elaborado pelo autor

Para o desenvolvimento do projeto do Edifício Mirage foi utilizado a ABNT NBR 6118/2004, projeto de estruturas de concreto – procedimento. Nesta norma, é apresentada a Tabela 13.2 - Limites para deslocamentos que se deve considerar o deslocamento lateral em função de  $h/1700$ , onde  $h$  é a altura da edificação em metros. Desta forma, o deslocamento lateral admissível para esta estrutura seria de 0,0319 m. Em consulta ao engenheiro projetista da edificação, foi repassado ao presente projeto os valores previstos de deslocamento nos eixos  $x$  e  $y$  para a edificação. Utilizando o Software CAD/TQS, foi realizada a simulação das variações em função do vento. Para tal, foi utilizado o valor de vento característico de Porto Alegre (conforme figura 1) igual a 45 m/s, e fatores:  $S1 = 1,00$ ,  $S2 = 1,00$  e  $S3 = 1,00$ . Assim, o vento característico para a edificação é igual a 45 m/s e apresenta os seguintes deslocamentos laterais:

Eixo  $x$ : 4,2 cm; Eixo  $y$ : 3,1 cm (apresentando um vetor resultante máximo da ordem de 5,22 cm.).

Com base na equação 3, foi confeccionado um gráfico que apresenta a relação da pressão dinâmica exercida na edificação em função da carga de vento.

Gráfico 5: Pressão dinâmica em função da carga de vento



Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme já descrito anteriormente a pressão dinâmica é considerada como uma carga atuante sobre toda a face de uma edificação durante o período de 3 segundos. Desta forma, para efeitos de estudo e análise de todas as cargas de vento que serão analisadas será considerado que a carga atua sobre toda a face afetada no intervalo de 3 segundos conforme direção do vento captada no momento da ação.

Considerando os padrões desta edificação, sua altura e a precisão de  $0,01^\circ$  do sensor acelerômetro, foi calculado o valor da velocidade mínima de vento para que o sensor pudesse detectar de maneira efetiva as variações na estrutura. Sabendo que este desvio em relação à altura da edificação poderia ser calculado com a seguinte equação:

$$\text{Desvio} = \text{Alt} \times \text{sen}(\eta) \quad (6)$$

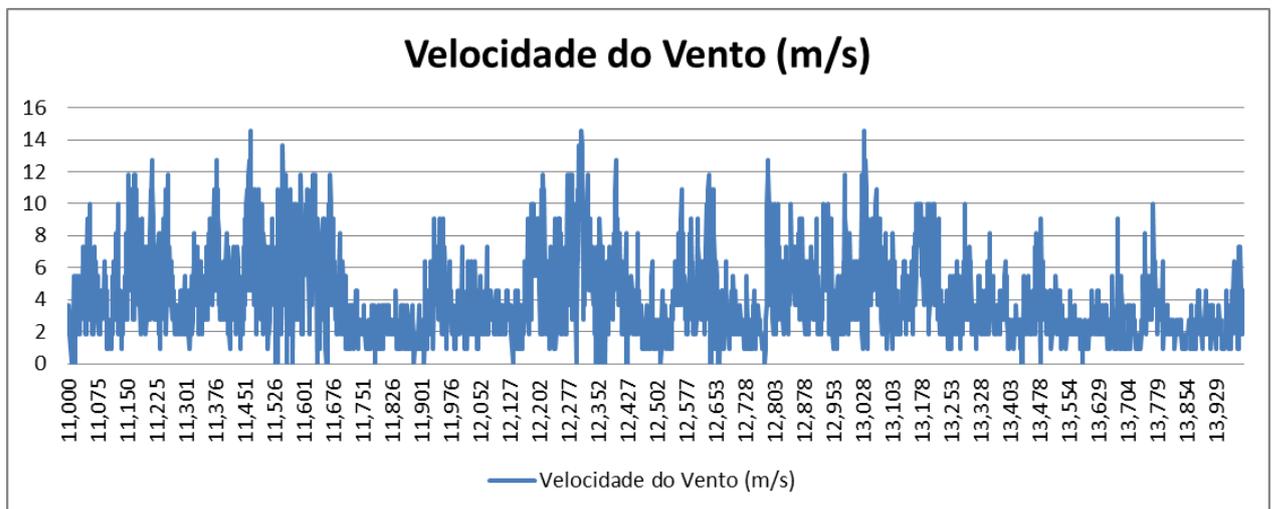
$$\text{Alt} = 54,25 \text{ metros e } \eta = 0,01^\circ$$

Os sensores apresentam uma precisão de 0,009 m. Assim, calculou-se para qual valor de vento tem-se uma variação de 0,009 m. Utilizando a equação 3, e sabendo que o carregamento na estrutura é proporcional ao deslocamento, chegou-se ao valor de 16,5 m/s ou 59,4 km/h. Desta forma, é possível inicialmente concluir que os sensores podem não apresentar precisão para carregamentos de ventos menores do que 60 km/h. Esse valor de velocidade será utilizado como fator de análise para os itens que seguem.

#### 4.4 Análise do Comportamento dos Sensores Acelerômetros

No dia 9 de abril foi realizada a primeira análise utilizando sensores acelerômetros. Nesta oportunidade, foi definido para análise o período compreendido entre as 11 e 14 horas: esse intervalo se deve ao fato de conferir estabilidade aos sensores para que fosse uma análise com menor interferência de ruídos possível. Neste mesmo período de tempo foi ligado o dispositivo anemômetro para captação das velocidades do vento ao longo das 03 horas de análise.

Gráfico 6: Análise do Vento em 09/04/2019



Fonte: Elaborado pelo autor

Como é possível verificar no gráfico acima foram detectados ventos máximos da ordem de 14,58 m/s (52,48 km/h). Conforme o gráfico 5, essa velocidade apresenta uma pressão dinâmica de 13,28 kgf/m<sup>2</sup>. Como já apresentado no item anterior apenas velocidade acima de, aproximadamente, 60 km/h apresentam precisão com os sensores utilizados. Porém, serão analisados os três momentos em que foram detectados as velocidades máximas nos quatro sensores. Foram detectadas as maiores velocidades nos seguintes horários: 11h 27min 51seg, 12h 18min 35seg e 13h 01min 52. Para realizar a análise das variações detectadas foi realizado o cálculo do vetor resultante segundo a segundo e cada um dos quatro sensores. Esse vetor consiste na componente resultante da análise horizontal dos movimentos detectados pelos dispositivos acelerômetros.

$$\text{Vetor Resultante} = [(\text{sen } (\Delta x) + \text{sen } (\Delta y))] \frac{1}{2} \times \text{Altura do vértice} \quad (7)$$

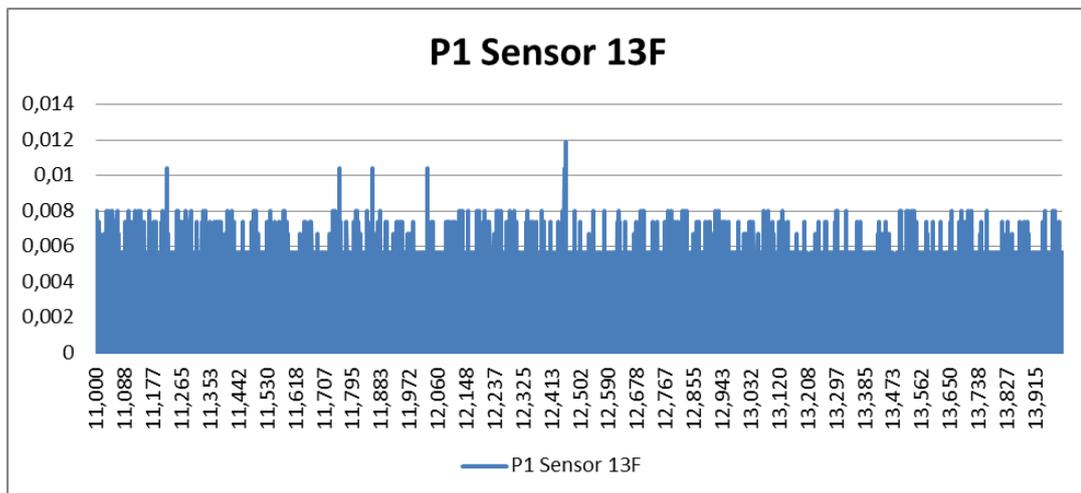
$\Delta x$  = variação angular do eixo x (segundo a segundo);

$\Delta y$  = variação angular do eixo y (segundo a segundo);

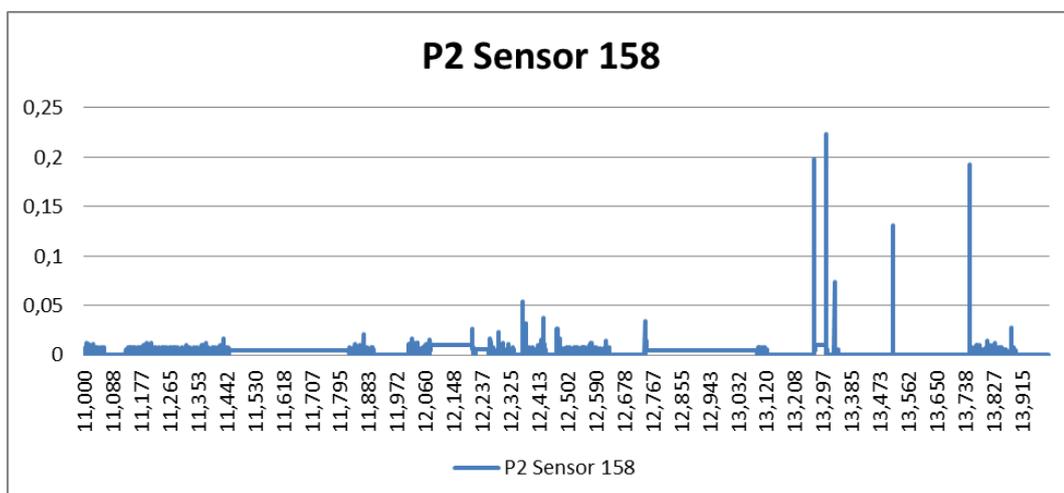
Altura do vértice = Altura dos vértices conforme descrito na tabela 13.

Desta forma, abaixo são apresentados os quatro gráficos de cada um dos sensores instalados nos vértices da edificação onde, o eixo horizontal apresenta a hora decimal enquanto, o eixo vertical representa a variação do vetor resultante dada em metros.

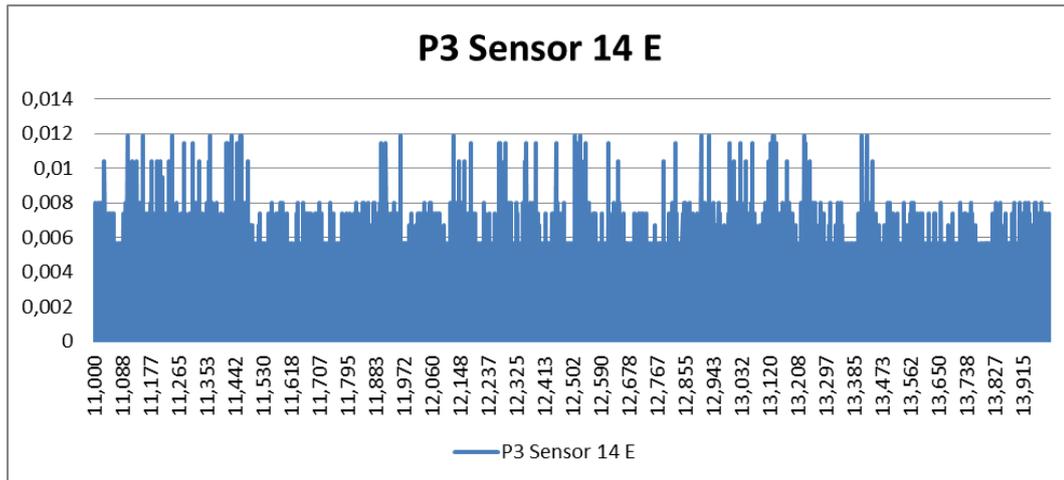
Gráficos 7, 8, 9 e 10: Análise dos Vetores Resultantes.



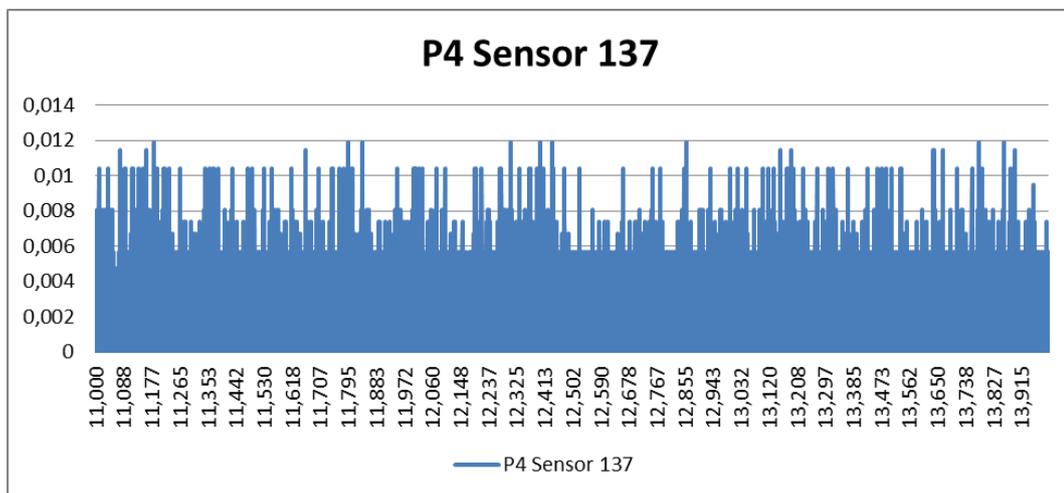
Fonte: Elaborado pelo autor



Fonte: Elaborado pelo autor



Fonte: Elaborado pelo autor

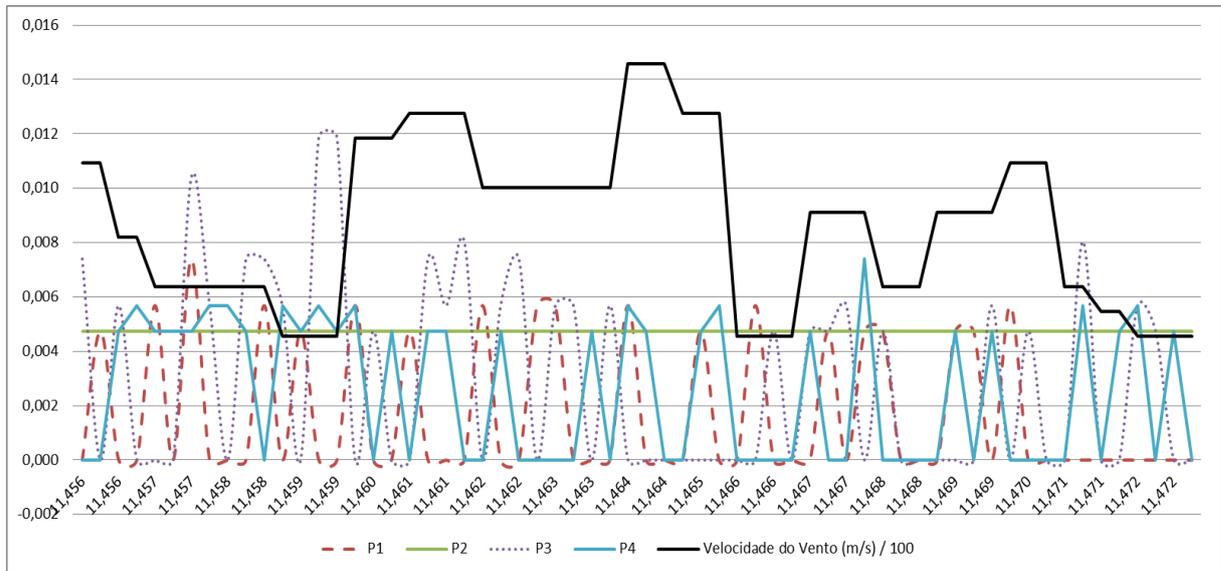


Fonte: Elaborado pelo autor

Como é possível verificar nos gráficos 8, o sensor 158 (P2) apresentou grandes variações da ordem de dezenas de centímetros. Isso se deve em função do sensor ter apresentado problemas técnicos no dia do trabalho de campo “ligando e desligando” por diversas ocasiões. Os demais sensores apresentam uma variação uniforme muito próxima da própria de precisão do instrumento como descrita no item anterior “0,009 m”.

Como já descrito variações abaixo de 0,009 m e com ventos menores do que 60 km/h não apresentam precisão. Porém, analisaram-se as variações dos sistemas nos três intervalos detectados com velocidades de 52,48 km/h. Para essa análise, utilizou-se um intervalo de 30 segundo antes e 30 segundo após o evento de velocidade máxima.

Gráfico 11: Análise do Intervalo de 11:27:20 à 11:28:20

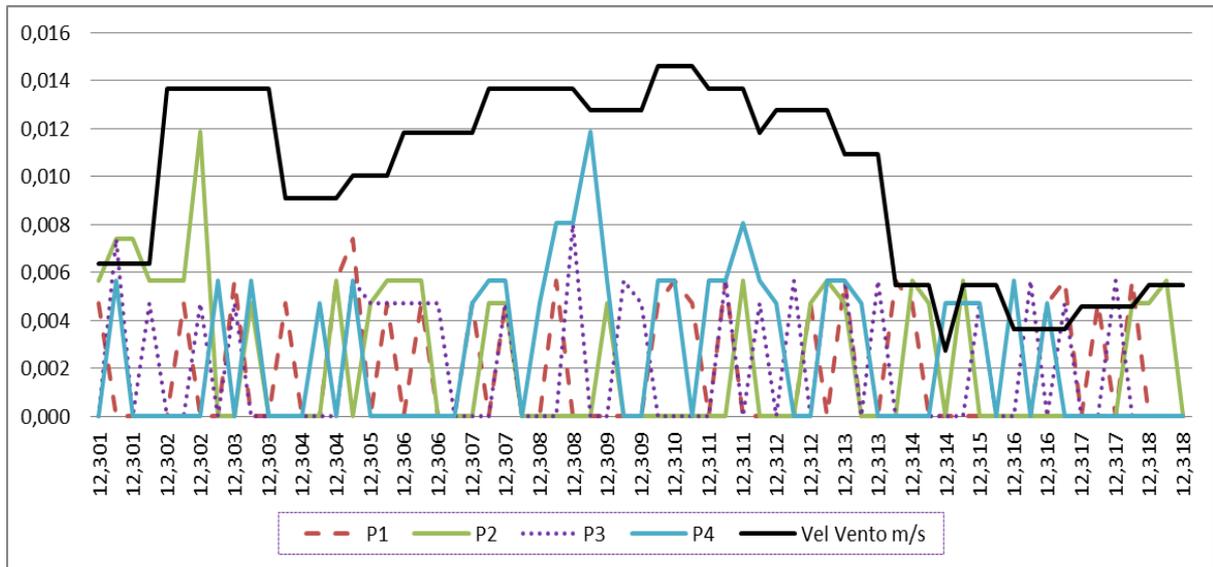


Fonte: Elaborado pelo autor

Como é possível verificar no gráfico 11 o vértice P2, foi ocupado pelo sensor 158 que apresentou diversos desligamentos durante a detecção e seus valores apresentados, se dão em função interpolação de valores desta forma não apresentando significância nesta primeira análise. Os dados dos pontos P1, P3 e P4 apresentam variações uniformes entre si e senso que todas estão dentro da precisão do equipamento.

No ponto de velocidade máxima da linha da velocidade do vento nenhum dos sensores apresentou variação brusca tão pouca seus dados acompanharam a curva de crescimento da velocidade do vento. Apenas é possível observar que a curva do sensor em P3 no instante 11,459 h acompanhou a tendência de crescimento da curva de ventos para uma velocidade de 42,6 km/h. Para essa velocidade, o deslocamento previsto é da ordem de 0,0045 m a considerar a precisão do equipamento de 0,009 m. Neste instante, a detecção pode ser decorrente da ação dos ventos sobre a edificação; ainda, no mesmo momento, é possível também verificar a ocorrência de uma variação em P4 da ordem de 0,006 m. Por pertencerem mesma face da edificação, esse efeito foi detectado simultaneamente pelo sensor conforme apresentado no gráfico.

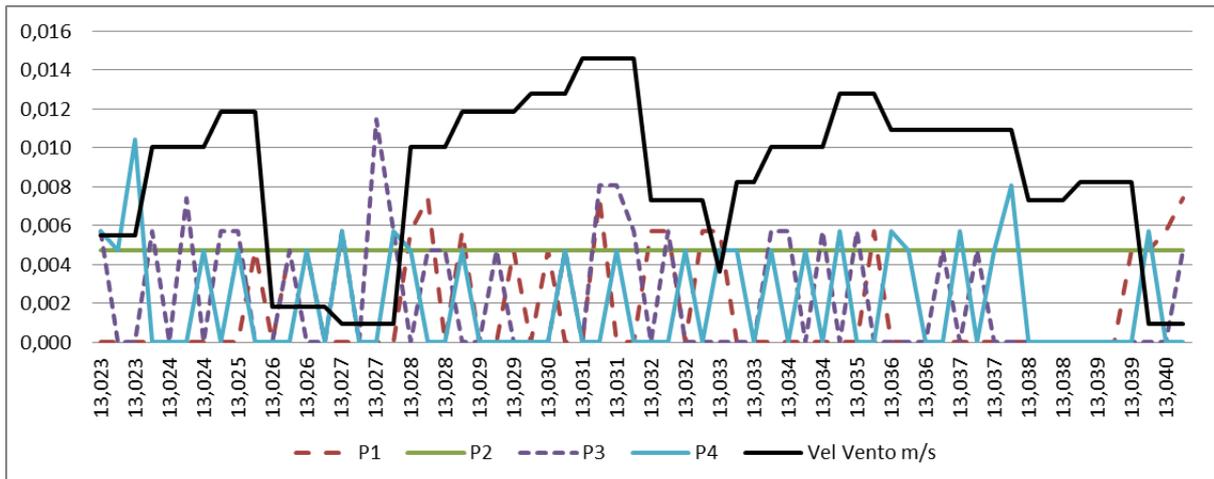
Gráfico 12: Análise do intervalo de 12:18:03 à 12:19:03



Fonte: Elaborado pelo autor

O gráfico 12 apresenta os quatro sensores funcionamento em conjunto e apresentando variações dentro da precisão do instrumento contundo, destacam-se dois momentos onde os valores apresentados foram maiores que a precisão do instrumento. Em 12,302 h, observa-se uma variação em P2 da ordem de 0,012 m para uma velocidade de 49,2 km/h. Ao considerar essa velocidade, o deslocamento admissível fica na faixa de 0,005 m. Já no instante 12,308 h, o vértice P4 apresenta uma variação da mesma ordem P2, conforme já descrito anteriormente, porém, agora, para uma velocidade de 45,9 km/h que admite uma variação de 0,0045 m. Ambos os efeitos ocorrem de forma isolada sem possíveis relações com os demais sensores, ao considerar os instrumentos tais variações são plausíveis, porém não apresentam precisão para a altura da edificação.

Gráfico 13: Análise do Intervalo de 13:01:23 à 13:02:23



Fonte: Elaborado pelo autor

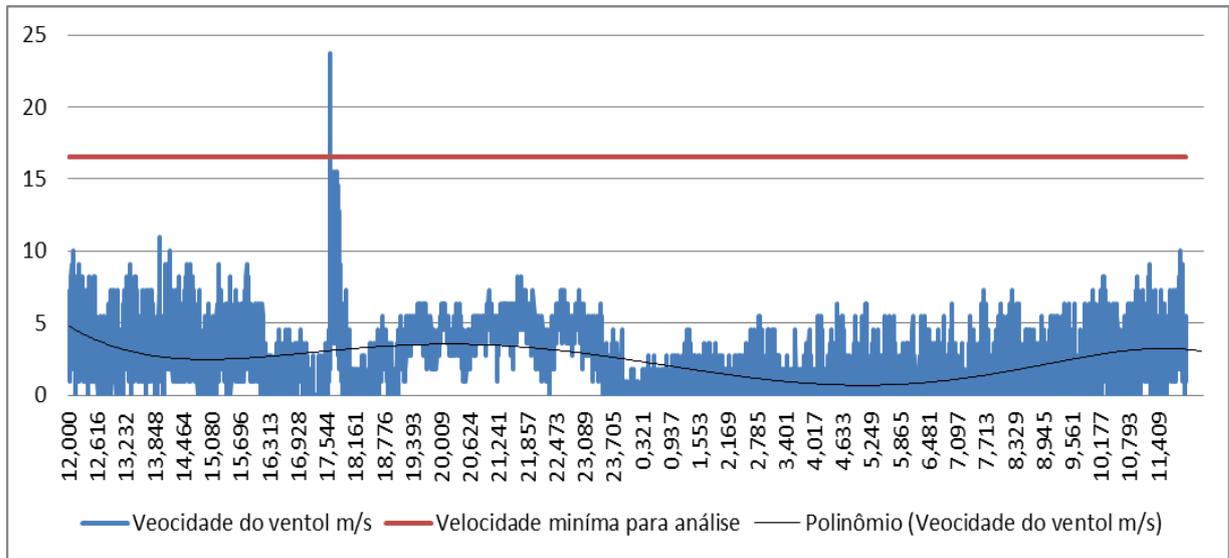
Por fim, no gráfico 13, é possível verificar que há variações relacionadas à variação da curva de vento. Todas as possíveis variações detectadas ficam dentro dos padrões de precisão da altura da edificação.

Após a análise do comportamento dos sensores em função das cargas de ventos no dia 09 de abril de 2019, verificou-se que todos os valores apresentados ficaram dentro da expectativa da precisão do instrumento. Como nenhuma das cargas de ventos foi maior do que 60 km/h, para que fosse possível avaliar a veracidade dos dados, em um primeiro momento, todas as variações acima de 0,009 m podem ser consideradas como imprecisas, haja vista a não possibilidade de confirmá-las em função de uma carga de ventos que proporcione esse deslocamento de forma real.

#### 4.5 Detecção da Ação dos Ventos Durante 24 Horas Contínuas Utilizando Sensores Acelerômetros

No dia 11 de abril, foi realizada a etapa de detecção da ação dos ventos durante um intervalo de 24 horas contínuas. Baseados nos resultados apresentados no item anterior, foram analisados os picos de ventos maiores que 60 km/h.

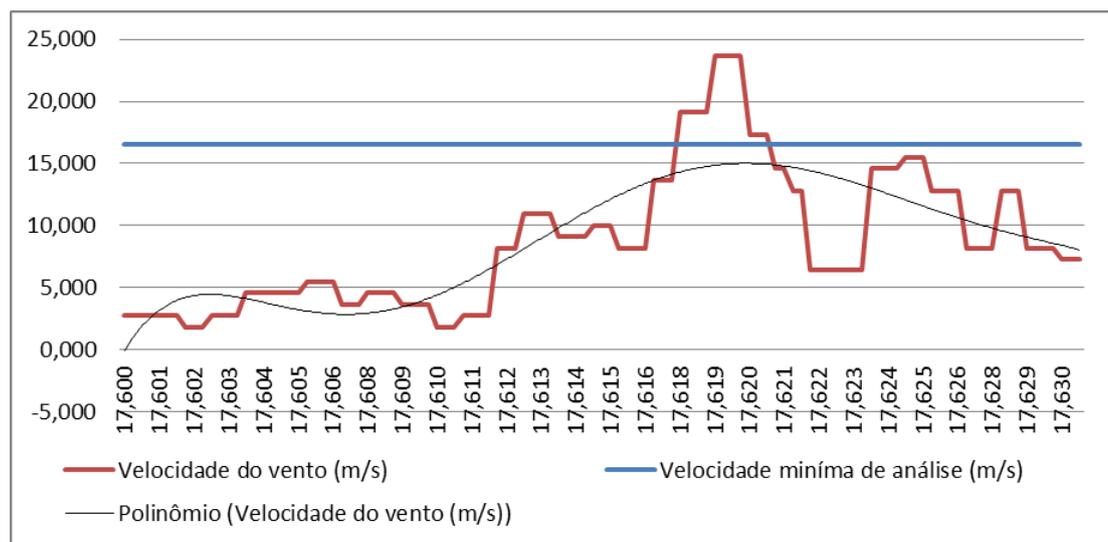
Gráfico 14: Análise do Vento em 11/04/2019



Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme apresentado no gráfico 14, foram detectados ventos da ordem de 23,69 m/s (85,28 km/h) às 17h 37min 08seg. Essa foi a máxima rajada de vento detectada nos dois dias de campo. Também é possível observar no gráfico a linha vermelha contínua divide os valores de vento abaixo e acima de 60 km/h. Desta forma, serão analisados apenas os dados acima desta reta.

Gráfico 15: Análise do vento em 11/04/2019 das 17:36:00 às 17:37:50



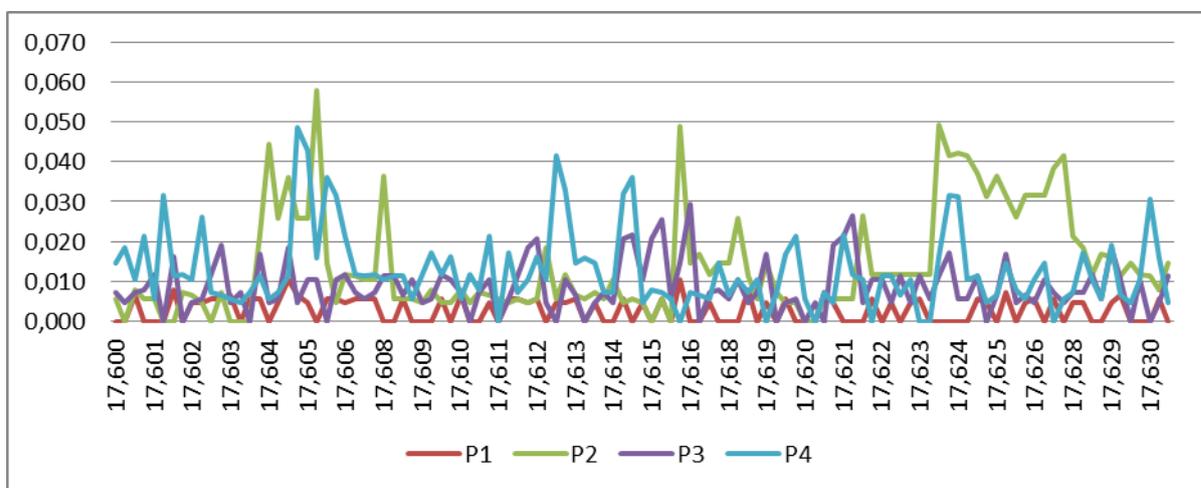
Fonte: Elaborado pelo autor

O gráfico 15 apresenta o período (de 17:36:00 às 17:37:50) onde ocorreram as maiores cargas de ventos no segundo dia de campo. O gráfico também apresenta a reta de

corde de velocidades mínimas para análise ( $\geq 60$  km/h) e uma linha corresponde ao polinômio de 6° grau que define e modela o comportamento do vento neste período.

O período onde as velocidades foram maiores do que 60 km/h ocorreu entre às 17:37:05 às 17:37:11. Considerando que anemômetro capta dados de 3 em 3 segundos, a presente análise ocorrerá das 17:35:02 às 17:37:14, ou seja, durante um período de 12 segundo equivalente a quatro rajadas conforme prevê a NBR 6123.

Gráfico 16: Vetores Resultantes dos Sensores Durante o Período de Máximas Velocidades do Vento.

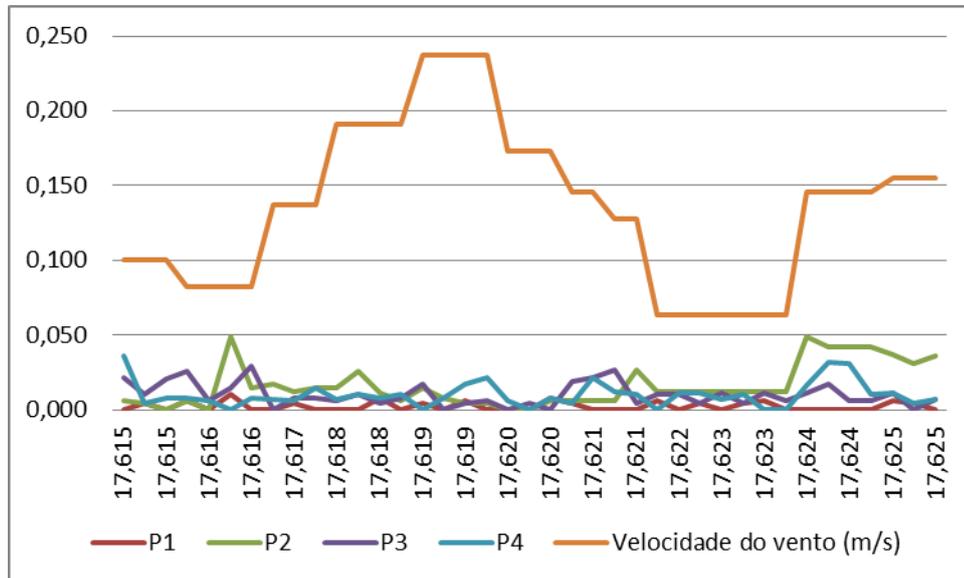


Fonte: Elaborado pelo autor

Após análise da velocidade máxima detectada no estudo, mais uma vez foi consultado o engenheiro projetista da edificação que, utilizando o Software CAD/TQS, informou que o deslocamento previsto para uma carga de ventos da ordem de 85,28 km/h corresponde a um deslocamento máximo de 0,016 m no eixo x e 0,020 m no eixo y tendo, desta forma, a possibilidade de um vetor resultante de 0,0256 m.

Ao analisarmos o gráfico 11 é possível observar que ocorreram variações maiores do que o previsto pelo projeto e essas variações foram detectadas a partir das cargas de ventos captadas pelo anemômetro. Em função dos relógios do datalogger do anemômetro e dos sensores acelerômetros não serem sincronizados, a análise dos dados deve ocorrer dentro de um intervalo de tempo e não necessariamente um instante “isolado”. Porém, ao analisarmos as curvas dos vetores resultantes em conjunto da curva de ventos, é possível, sim, afirmar que existe tendência nos deslocamentos captados em função das cargas de vento que a edificação experimentou no dia 11 de abril.

Gráfico 17: Vetores Resultantes x Velocidade do Vento (Análise de Tendência)



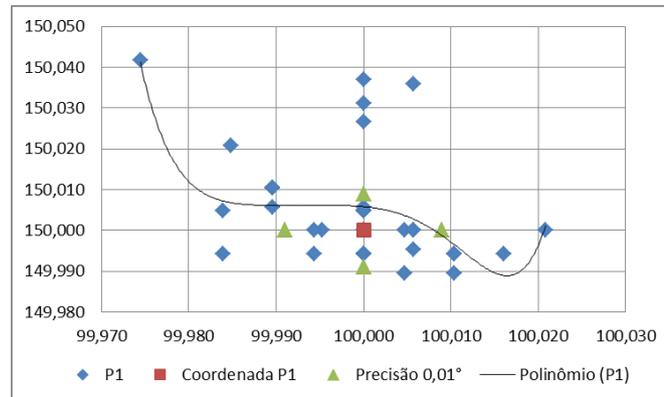
Fonte: Elaborado pelo autor

Por fim, o gráfico 17 traz, de forma reduzida, a análise do comportamento dos sensores acelerômetros em função da curva de vento. É possível observar que, apesar dos valores detectados ultrapassarem a precisão de projeto, as curvas de uma forma geral acompanham a tendência do deslocamento da curva de ventos, o que, inicialmente, dada à estrutura e concepção do presente projeto, pode ser considerado como um resultado muito bom.

#### 4.6 Análise do Deslocamento Posicional no Intervalo de Maior Carga de Ventos

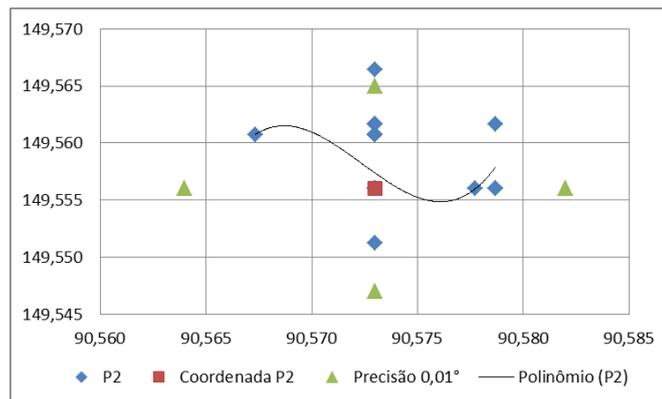
Para o intervalo de tempo apresentado no gráfico 17 compreendido entre às 17:36:53 às 17:37:31, foram analisadas a variação do eixos x e y de cada um dos vértices quando expostos as maiores cargas de vento do estudo.

Gráfico 18: Análise dos Eixos x e y em Função das Maiores Cargas de Vento (P1)



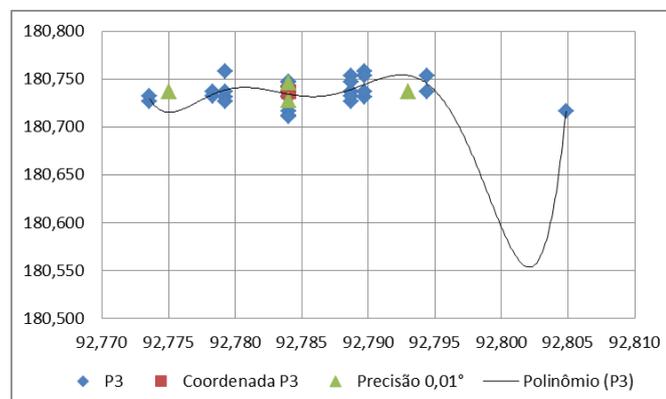
Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 19: Análise dos Eixos x e y em Função das Maiores Cargas de Vento (P2)



Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 20: Análise dos Eixos x e y em Função das Maiores Cargas de Vento (P3)



Fonte: Elaborado pelo autor

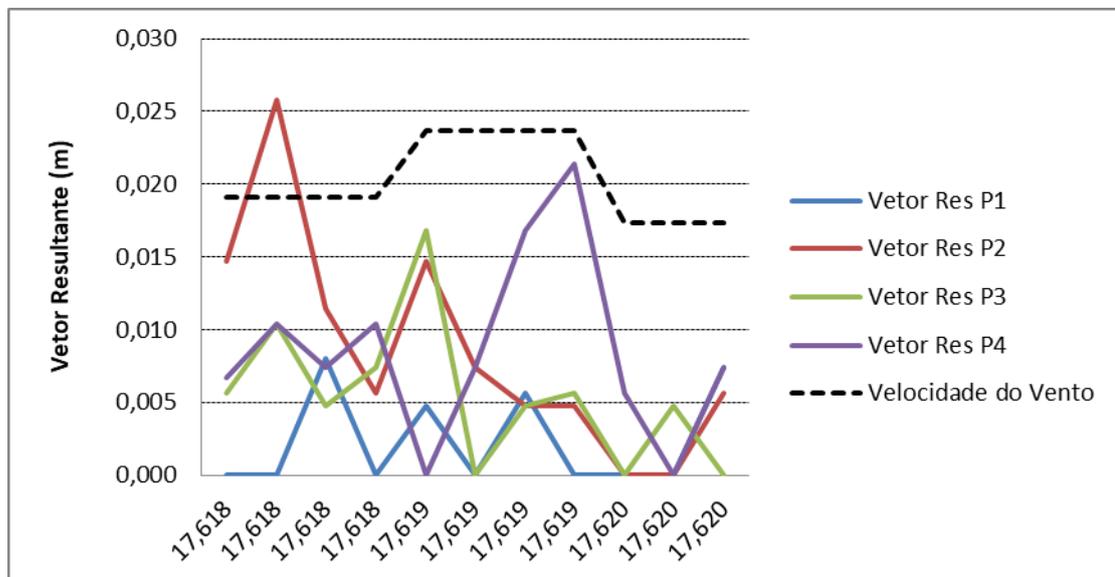


Tabela 14: Análise de Correlação entre os vetores resultantes e as cargas máximas de ventos

	<i>Vetor Res P1</i>	<i>Vetor Res P2</i>	<i>Vetor Res P3</i>	<i>Vetor Res P4</i>	<i>Velocidade do Vento</i>
Vetor Res P1	1				
Vetor Res P2	0,02993918	1			
Vetor Res P3	0,01811263	0,59886245	1		
Vetor Res P4	-0,0485313	-0,0393226	-0,1655819	1	
Velocidade do Vento	0,0425805	0,1108334	0,32690341	0,4245228	1

Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 22: Vetores resultantes x cargas máximas de ventos



Por fim, o gráfico 22 e a tabela 15 apresentam a análise de correção e os valores dos vetores resultantes respectivamente. É possível verificar que no momento onde ocorreu a maior carga de vento a face P3-P4 foi mais atingida em função dos valores obtidos na tabela de correlação. Outro ponto a ser analisado são os valores experimentados pelos vértices durante o intervalo de carga máxima de vento, conforme já apresentado no item 4.5 o vetor resultante para uma carga de vento de 85,28 km/h é igual a 0,0256 m e conforme o gráfico 22 apresenta, o vértice P2 apresentou um deslocamento de 0,026 m, o vértice P3 0,017 m e o vértice P4 0,021 m.

## 5 ORÇAMENTAÇÃO

Conforme já apresentado no Capítulo 3 deste trabalho, foram utilizados diversos equipamentos e softwares. A tabela abaixo apresenta os valores que simulam o aluguel dos equipamentos, diárias de auxiliares e também os valores reais gastos para aquisição de equipamentos pelo discente.

Tabela 16: Orçamento

Descrição do material	Quantidade	Valor Unitário	Valor Total
a. Parafusos de centragem forçada	6	R\$ 50,00	R\$ 300,00
b. Anemômetro Digital com Datalogger “taxa de gravação de dados de 03 seg”;	1	R\$ 650,00	R\$ 650,00
c. Sensor WT901WIFI (06);	6	R\$ 128,00	R\$ 768,00
d. Powerbank 5000mah Xtrax (06);	6	R\$ 65,00	R\$ 390,00
e. Powerbank 2500mah Xtrax (01);	1	R\$ 39,00	R\$ 39,00
f. Roteador TP Link AC750 (01);	1	R\$ 250,00	R\$ 250,00
g. Estação Total Geodetic GT2 nº de serie “075518” (01); Prisma Refletor (06), Tripé de alumínio (02), trenas metálicas, fio de prumo.	1	R\$ 100,00	R\$ 100,00
i. Receptor Topcon GNSS GR-3 (01 pares); Materiais para auxílio do rastreamento com GNSS: Bases niveladoras, trenas métricas, fio de prumo. (03 dias - 1 conf; 1 rastreamento; 1 exp. arq / entrega)	3	R\$ 300,00	R\$ 900,00
j. Receptor Topcon GNSS Hiper Lite (02 pares): Materiais para auxílio do rastreamento com GNSS: Bases niveladoras, trenas métricas, fio de prumo. (03 dias - 1 conf; 1 rastreamento; 1 exp. arq / entrega)	6	R\$ 300,00	R\$ 1.800,00
l. Materiais para Fixação dos parafusos de centragem forçada: Furadeira de impacto, broca 5/8, tesoura direita/esquerda para galvanizado, marreta, talhadeira, cola anaeróbica TekBond 138 (trava rosca), cola TeckBond Tix da Quartzolit (ferro / concreto), nível de bolha, fita isolante, fita crepe, fita dupla face...	1	R\$ 250,00	R\$ 250,00
m. 02 Auxiliares / dia (05 dias de trabalho c/ almoço)	10	R\$ 80,00	R\$ 800,00
n. Combustível (30 km/ dia - 1/3 tanque)	1	R\$ 100,00	R\$ 100,00
n. Caixa de leite (06);			R\$ -
o. Software Topcon Tools versão 8.2.3;			R\$ -
p. Software Microsoft Excel 2010;			R\$ -
q. Software TCGeo;			R\$ -

Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme a tabela acima, o valor total do projeto foi de R\$ 6.347,00. A UFRGS cedeu para o estudo os equipamentos GNSS e estação total e a empresa Funilaria do Forte (Porto Alegre / RS) apoiou sobremaneira o projeto com a elaboração e instalação dos parafusos de centragem forçada, além da cessão de pessoal sem custo para auxílio na montagem dos

aparatos relativos à instalação do anemômetro e caixas de proteção dos sensores acelerômetros.

Além dos colegas de curso Guilherme e Paulo que voluntariamente se colocaram a disposição para auxiliarem no segundo dia de trabalho de campo nos trabalhos de levantamento topográfico. Todo esse auxílio representou uma economia ao projeto de R\$ 3.600,00. Os demais valores foram custeados pelo acadêmico.

## 6 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve por objetivo apresentar e desenvolver uma metodologia alternativa para o tema de monitoramento de estruturas com ênfase na detecção de movimentos em função da ação dos ventos sobre estruturas de engenharia. Desta forma, foi escolhido o Edifício Mirage (Porto Alegre/RS) constituído de 19 pavimentos e tendo uma altura total de 54,250 metros.

Para o desenvolvimento desta atividade, foram utilizadas técnicas de posicionamento GNSS e realizados trabalhos topográficos. Após estas etapas, foi criado um sistema de coordenadas cartesiano tridimensional local para análise dos movimentos da estrutura ao longo do estudo. No âmbito da detecção dos ventos, foram utilizados sensores acelerômetros modelo WT901WIFI integrados a um dispositivo anemômetro que captou dados de velocidade do vento com frequência de 3 segundo.

Esses sensores apresentam uma precisão horizontal de  $0,01^\circ$  representando, para a altura da edificação em questão, uma precisão da ordem de 0,009 metros. Após diversos testes e análises das NBR 6123 e 6118, foi constatado que este equipamento só poderia apresentar precisões acima de rajadas de 60 km/h. Acoplados a dispositivos Powerbank de 5000 mAh, foram realizados duas atividades de detecção de movimentos a primeira com duração de 5 horas e a segunda de 27 horas.

Na segunda atividade de campo, foram detectados ventos da ordem de 85,24 km/h e, desta forma, analisadas as ações destas cargas na edificação. Seguindo as especificações da NBR 6118, foi verificado que a edificação pode variar lateralmente 0,031 m, considerando a velocidade de projeto de 162 km/h. Para a velocidade máxima captada nos dois dias de campo o deslocamento lateral (vetor resultante horizontal) segundo o Software CAD/TQS é de 0,0256 m. Conforme, o gráfico 22 foi possível observar que três vértices da edificação apresentaram valores desta ordem durante a carga máxima de vento. O vértice P4 além de apresentar o valor mais alto de correlação com o vento conforme a tabela 15 apresentou uma variação de 0,021 m e o vértice P2 0,026 m ambos para o intervalo com a maior carga de vento do estudo, valores estes totalmente compatíveis com as previsões e prescrições de norma e Software

Por fim, é possível concluir que resultados finais foram muito satisfatórios. Foi possível detectar, mesmo que com um aparato simplificado e com baixo custo, as variações na edificação em função das cargas máximas de vento, além do fato de também poder observar as tendências de deslocamento nas faces da edificação. Considerando o intervalo de 9

segundos onde houve a maior carga de ventos do estudo foi possível verificar os mesmos valores de deslocamento previstos em norma e pelo Software sendo detectados pelos sensores.

## 7 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após, o término deste estudo foram constatadas algumas oportunidades de melhoria e passos que devem ser seguidos para o desenvolvimento de um projeto de detecção da ação dos ventos. Abaixo são apresentadas algumas considerações e conclusões para o melhoramento e / ou aprimoramento da técnica de detecção utilizando a instrumentação descrita ao longo deste trabalho.

- Realizar testes para análise da precisão do instrumento (conferir as prescrições de manual);
- Como estes sensores não possuem uma calibração efetiva é importante testar suas variações angulares via modelos de variação angular (estrutura de madeira com transferidor, por exemplo);
- Definir com base na precisão se a estrutura que desejar analisar poderá efetivamente apresentar deslocamentos mensuráveis;
- Determinar a velocidade de vento mínima para que seja possível a detecção de movimentos (acima do ruído eletrônico);
- Determinar o tempo de estudo e análise para que seja possível acoplar, por exemplo, dispositivos Powerbank suficientes para o intervalo de tempo desejado;
- Procurar posicionar os sensores evitando o contato direto com o vento, contudo, sempre em contato direto com a estrutura a ser analisada;
- Elaborar caixas / proteções para acondicionar os sensores e seus respectivos Powerbank evitando estruturas metálicas ou que tenham componentes metálicos para que não ocorra a possibilidade de interferência na transmissão de sinal;
- Não posicionar os sensores próximos a redes elétricas, para raios ou outros dispositivos ligados a energia para evitar a criação de ruídos na transmissão de sinal.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTUNES, P. F. C. Análise dinâmica de estruturas com sensores de Bragg. 2007. 97f. Dissertação (Mestrado em Física Aplicada) - Departamento de Física, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2007.

ANTUNES, P.; LIMA, H.; PINTO, P.; VARUM, H. ANDRÉ, P. Sensor óptico para monitorização do comportamento dinâmico de estruturas. Aveiro: Universidade de Aveiro, [2009]

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR6118: Projetos de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR6123: Forças devido ao vento em edificações. Rio de Janeiro. 1988.

AUTOCOREROBOTICA. ACELERÔMETRO MPU 6050<<http://autocorerobotica.blog.br/aprenda-a-utilizar-o-acelerometro-mpu6050/>>. Acesso em: 02 jun. 2019.

BALBINOT, A. BRUSAMARELLO, V. J. Instrumentação e Fundamentos de Medidas, Volume 2. 2ª edição. LTC, 2011

CHAVES, J. C. et al. Monitoração de estrutura com o sistema GPS: estudo de caso dos efeitos do vento num edifício. In: Simpósio Epusp sobre estruturas de concreto, 5., 2003, Presidente Prudente. Anais... Presidente Prudente: UNESP, [2003].

CHAVES, J. C. Uso da Tecnologia GPS na monitoração de deformações: Sistemas, etapas e experimentos. 2001, 155f. Tese (Doutorado)- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2001.

ÇELEBI, M.; SANLI, A. GPS Successfully monitoring dynamic response of a tall building in San Francisco: Implications. [2000];

ÇELEBI, M. GPS in dynamic monitoring of long-period structures. In 12WCEE 2000. USA 2000.

GHILANI, Charles D. Elementary surveying: an introduction to geomatics. 13 ed. Norteamericana.

GNSS Planing Online. Disponível em:< <https://www.gnssplanning.com/#/satellites>>. Acesso em 16 mar. 2019.

GPS and GNSS for Geospatial Professionals. GPS and GNSS for Geospatial Professionals. Disponível em:< <https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1879>>. Acesso em 02 mar.

GPS and GNSS for Geospatial Professionals. GNSS. Disponível em:< <https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1871>>. Acesso em: 02 mar. 2019.

Hewitt, Paul G. Física Conceitual. 2ª edição. Bookman, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA. Serviço online para pós-processamento de dados GNSS - IBGE-PPP. Disponível em:< <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/servicos-para-posicionamento-geodesico/16334-servico-online-para-pos-processamento-de-dados-gnss-ibge-ppp.html>> Acesso em: 24 mar. 2019.

HBM. Solução Modular para um Monitoramento Estrutural Eficiente. Disponível em:< <https://www.hbm.com/pt/5530/monitoramento-estrutural/>>. Acesso em: 06. Jun. 2019.

LAROCCA, A. P. C. O uso do GPS como instrumento de controle de deslocamentos dinâmicos de obras civis- Aplicação na área de transporte. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

LAROCCA, A. P. C. Using high-rate GPS data to monitor the dynamic behavior of a cable-stayed bridge. In: International technical meeting of the satellite division, p 21-24, sept, São Carlos Engineering School, University of São Paulo, 2004.

MARQUES, A, H; PACHECO P, A; TANAJURA X,L,E. Uma abordagem de Monitoramento Geoespacial de barragens Hidroelétricas a partir do GNSS: Resultados Preliminares. Programa de pós Graduação em Geociências - UFPE - 2016

MONICO, G, F. JOÃO. Posicionamento pelo GNSS. 2. Ed. Unesp. São Paulo. 2008

MUNDO GEO. Sistemas GNSS. Disponível em:<  
<https://mundogeo.com/blog/2011/03/10/sistemas-gnss/>>. Acesso em 04 mar.2019

NETTO, N.P. et al. Monitoramento de deslocamento em estruturas com GPS. In : Assembléia Luso-espanhola de Geodésia e Geofísica, 3. 2002. Valência. Anais... 2002

OMEGA. Acelerômetros. Disponível em:<  
<https://br.omega.com/prodinfo/acelerometros.html>>. Acesso em 16 mar. 2019.

PITTA. A, A, J. Acidentes em edificações devidos à ação do vento.Edufscar. São Paulo. 2014.

SCHAAL, R. E.; LAROCCA, A. P. C. Measuring Dynamic Oscillations of a Small span cable-stayed footbridge: case study using L1 GPS receivers. In: Journal of Surveying Engineering. Feb, P.37. Escola Politécnica, USP, 2009.

SCHAAL, R. E.; LAROCCA, A. P. C.; GUIMARÃES, G. N. Use of a single L1 GPS receiver for monitoring structure: First results of the detection of millimetric dynamic oscillations. . In: Journal of Surveying Engineering. may, P.95. Escola Politécnica, USP, 2012.

STREAM. J Origin of Wind. National Weather Service Southern Region Headquarters. (2008).

TORRES, Henrique. Sensores inerciais. Disponível em:<  
<https://www.embarcados.com.br/sensores-inerciais-parte-1/>>. Acesso em 06. Mai.2019

VIDA DE SILICIO. Módulo WiFi ESP8266 ESP-12F. Disponível em:<  
<https://www.vidadesilicio.com.br/modulo-wifi-esp8266-esp-12f>>. Acesso em 24 mar. 2019.

WORDPRESS. Sistemas de navegação por satélite. Disponível em:  
 <<https://invisibleflamelight.wordpress.com/2018/11/15/sistemas-de-navegao-por-satlite/>>.  
 Acesso em: 24 mai. 2019.