

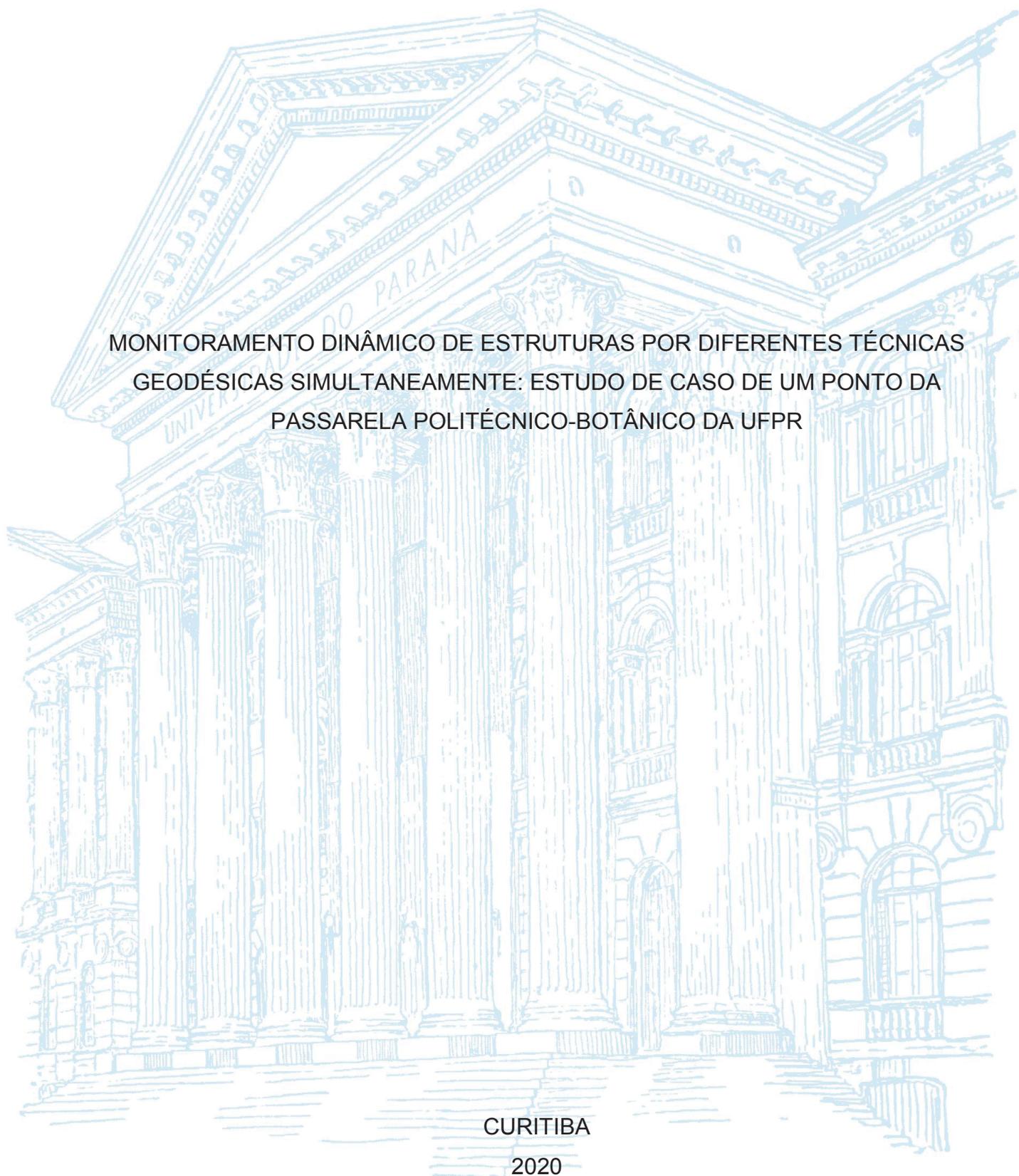
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LEANDRO ÍTALO BARBOSA DE MEDEIROS

MONITORAMENTO DINÂMICO DE ESTRUTURAS POR DIFERENTES TÉCNICAS  
GEODÉSICAS SIMULTANEAMENTE: ESTUDO DE CASO DE UM PONTO DA  
PASSARELA POLITÉCNICO-BOTÂNICO DA UFPR

CURITIBA

2020



LEANDRO ÍTALO BARBOSA DE MEDEIROS

MONITORAMENTO DINÂMICO DE ESTRUTURAS POR DIFERENTES TÉCNICAS  
GEODÉSICAS SIMULTANEAMENTE: ESTUDO DE CASO DE UM PONTO DA  
PASSARELA POLITÉCNICO-BOTÂNICO DA UFPR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, do Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Luis Faggion

CURITIBA

2020

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR  
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

M488m

Medeiros, Leandro Ítalo Barbosa de

Monitoramento dinâmico de estruturas por diferentes técnicas geodésicas simultaneamente: estudo de caso de um ponto da passarela Politécnico-Botânico da UFPR [recurso eletrônico] /Leandro Ítalo Barbosa de Medeiros. – Curitiba, 2020.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, 2020.

Orientador: Pedro Luis Faggion.

1. Monitoramento geodésico. 2. Modelos matemáticos. 3. Geologia - Levantamentos. I. Universidade Federal do Paraná. II. Faggion, Pedro Luis. III. Título.

CDD: 526.1

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIAS  
GEODÉSICAS - 40001016002P6

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS GEODÉSICAS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **LEANDRO ÍTALO BARBOSA DE MEDEIROS** intitulada: **MONITORAMENTO DINÂMICO DE ESTRUTURAS POR DIFERENTES TÉCNICAS GEODÉSICAS SIMULTANEAMENTE: ESTUDO DE CASO DE UM PONTO DA PASSARELA POLITÉCNICO-BOTÂNICO DA UFPR**, sob orientação do Prof. Dr. PEDRO LUÍS FAGGION, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 17 de Fevereiro de 2020.

PEDRO LUÍS FAGGION

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

CARLOS AURÉLIO NADAL

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

LUÍS AUGUSTO KOENIG VEIGA

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Dedico este trabalho ao querido e saudoso professor José Lincoln de Sousa Meneses, quem me apresentou a geodésia e à geodésia, me indicou o caminho da vida acadêmica e um dos primeiros a representar a grandeza e o esforço do povo piauiense no Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da UFPR.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, detentor de todo o conhecimento e soberania, pela proteção e todas as bênçãos. A Ele toda honra e toda glória!

Ao meu filho Joaquim, meu combustível diário.

À minha companheira, esposa e amiga Rebeca pelo apoio, amor e incentivo.

À minha mãe e irmãos, pelo alicerce afetivo.

Ao meu orientador Prof. Dr. Pedro Luis Faggion, pela confiança, incentivo e por todos os ensinamentos repassados nestes dois anos de pesquisa. Agradeço ainda pelos conselhos tanto profissionais como pessoais.

Ao Prof. Dr. Luis Augusto K. Veiga, pelos ensinamentos e amizade.

Ao Prof. Dr. Carlos Aurélio Nadal, pelo aceite em participar da banca e por todas as contribuições no trabalho, e também por sua amizade.

Ao Prof. Dr. Wander Da Cruz, pela amizade e conhecimentos compartilhados.

Agradeço ao corpo docente citado acima, chefes do nosso grupo de pesquisa, por todo o empenho e dedicação na busca contínua de melhorias para o nosso grupo, principalmente no quesito parcerias. Os senhores são exemplos de liderança!

Aos meus amigos do Laboratório de Geodésia Aplicada à Engenharia (GEENG): Felipe Carvajal, Andreas Jerke, Samir Alves, Livia Sampaio, Ana Luiza Bandeira, Dayanne Wiggers e Josevando pela amizade e apoio em todos os momentos.

Aos meus professores da UFPI, em especial, Emanuel Gomes e Alessandro Rhadamek, por todo o apoio durante minha graduação, e pelo auxílio e incentivo para o mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos de pós-graduação a nível de mestrado.

À empresa Hexagon Leica Geosystems por todo o auxílio prestado, incluindo o empréstimo de receptores GNSS de alta frequência para os experimentos realizados.

Ao corpo discente, docente e demais funcionários do Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas.

A todos que de alguma forma contribuíram para que eu chegasse até aqui, meu muito obrigado!

Liberdade é poder fazer o que é preciso!  
Leandro Karnal

## RESUMO

O monitoramento geodésico de estruturas é uma das atividades da engenharia que contribuem para avaliar o comportamento de determinados pontos de uma estrutura e, em conjunto com outras informações, permite avaliar o comportamento da estrutura como um todo, corroborando para a minimização e prevenção de anomalias estruturais, as quais podem culminar em desastres como os ocorridos no Brasil nos últimos anos. Além disto, tem uma contribuição importante no monitoramento de obras de engenharia como pontes, viadutos e afins. Esta pesquisa analisa o monitoramento dinâmico da passarela que liga os campi Centro Politécnico e Botânico, da Universidade Federal do Paraná (UFPR), com 89 m de comprimento, localizada sobre a antiga BR-116, hoje Linha Verde, utilizando dois métodos geodésicos distintos, a saber: Leitura Contínua de Direções, que é uma adaptação da irradiação topográfica, no qual se utiliza uma estação total robotizada visando um alvo de comportamento dinâmico com seus deslocamentos calculados em função das projeções dos ângulos medidos a uma distância horizontal entre alvo e instrumento previamente fixada; e levantamento GNSS relativo, modo dinâmico a 20 Hz. O procedimento adotado consistiu na comparação das amplitudes dos deslocamentos do ponto monitorado, assim como das frequências de vibração para ambos os métodos. Com o intuito de compatibilizar os resultados, adotou-se um sistema de referência local, aqui denominado de sistema da passarela. Em complemento, o estudo apresenta uma análise da frequência amostral de aquisição de observações com a estação total robotizada para o método proposto, assim como um arcabouço bibliográfico acerca do estado da arte das técnicas mencionadas dos modelos matemáticos mais comumente utilizados na passagem de sinais do domínio do tempo para o domínio das frequências. Os resultados apresentam um ganho de duas vezes na taxa amostral da estação total robotizada e uma alta convergência entre as frequências de vibração obtidas entre ambos os métodos, em cerca de 3,5 Hz, e com diferenças de resultados de aproximadamente 0,5 Hz entre os métodos. O método LCD poderá ser utilizado alternativamente no monitoramento de estruturas como pontes e barragens.

**Palavras-chave:** Monitoramento geodésico dinâmico de estruturas. Integração de métodos geodésicos. Frequências de vibração estrutural.

## ABSTRACT

Geodetic monitoring of structures is one of the engineering activities that contribute to evaluate the behavior of certain points of a structure and, together with other information, allows to evaluate the behavior of the structure, corroborating for the minimization and prevention of structural problems, which can culminate in disasters such as those that have occurred in Brazil in recent years. In addition, it has a fundamental contribution in monitoring engineering structures such as bridges, viaducts. This research analyzes the dynamic monitoring of the walkway that connects the Centro Politécnico e Botânico campuses, of the Federal University of Paraná (UFPR), across the BR-116, today Linha Verde, with 89 m in length, using two distinct geodesic methods: Continuous Directions Measurements, which is an adaptation of topographic irradiation, and which uses a robotic total station aiming at a dynamic behavior target with its displacements are calculated according to the projections of the angles measured at a horizontal fixed distance; and relative GNSS survey, in dynamic mode. The adopted procedure consisted of comparing the amplitudes of the displacements of the monitored point, as well as the vibration frequencies. In order to make the results compatible, a local reference system was adopted, here called the catwalk system. In addition, the study presents an analysis of the sampling frequency with the robotic total station for the proposed method, as well as a bibliographic framework about the state of the art of the techniques mentioned and main the mathematical models most commonly used in the passage of domain signals of time for the frequency domain. The results showed a gain of two times in the sampling rate of the robotic total station and a high convergence between the vibration frequencies obtained, with differences in results of approximately 0.5 Hz. The method presented may be used alternatively to monitor structures such as bridges and dams.

**Keywords:** Dynamic geodetic monitoring of structures. Integration of geodetic methodologies. Structural vibration frequencies.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – SINAIS GPS A PARTIR DA FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL .....	31
FIGURA 2 – REPRESENTAÇÃO DA SIMPLES DIFERENÇA DE FASE .....	33
FIGURA 3 – REPRESENTAÇÃO DA DUPLA DIFERENÇA DE FASE .....	34
FIGURA 4 – A) PRINCIPAIS ELEMENTOS DE UMA ETR; B) SISTEMA DE RECONHECIMENTO AUTOMÁTICO DE ALVOS E EDM – VISTA LATERAL .....	37
FIGURA 5 – REPRESENTAÇÃO DO MÉTODO POR PULSO .....	40
FIGURA 6 – REPRESENTAÇÃO DA MEDIDA POR DIFERENÇA DE FASE .....	41
FIGURA 7 – CORRELAÇÃO TRIGONOMÉTRICA DOS ELEMENTOS DE UMA ONDA.....	41
FIGURA 8 – REPRESENTAÇÃO DE CODIFICADOR DIGITAL DE ÂNGULOS BINÁRIO .....	45
FIGURA 9 – INTERPOLAÇÃO PARA AUMENTO DA PRECISÃO NA LEITURA ANGULAR.....	46
FIGURA 10 – REPRESENTAÇÃO DE UM SDGIF .....	47
FIGURA 11 – LOCALIZAÇÃO AUTOMÁTICA DE PRISMAS .....	48
FIGURA 12 – DETERMINAÇÃO DA POSIÇÃO ANGULAR DOS ALVOS POR ATR .....	49
FIGURA 13 – SOBREPOSIÇÃO DE DIFERENTES FREQUÊNCIAS SENOIDAIS ..	52
FIGURA 14 – RESULTADO DAS SOMAS DE SÉRIES TEMPORAIS PARA OS PERÍODOS .....	52
FIGURA 15 – DISPOSIÇÃO DAS FREQUÊNCIAS E DOS ESPECTROS DE ENERGIA RESULTANTE APÓS A APLICAÇÃO DA TF .....	53
FIGURA 16 – TRANSFORMADA DE FOURIER JANELADA .....	54
FIGURA 17 – EXEMPLO DO TEOREMA DA AMOSTRAGEM IMAGENS A CADA 60 SEGUNDOS.....	56
FIGURA 18 – EXEMPLO DO TEOREMA DE AMOSTRAGEM IMAGENS A CADA 75 SEGUNDOS.....	56
FIGURA 19 – LOCALIZAÇÃO DA PASSARELA.....	57
FIGURA 20 – IMAGEM DA PASSARELA MONITORADA.....	58
FIGURA 21 – GNSS GS15 UTILIZADO NO EXPERIMENTO.....	58
FIGURA 22 – ETR LEICA TS15 UTILIZADA NO EXPERIMENTO .....	59

FIGURA 23 – PRISMAS REFLETORES UTILIZADOS NO EXPERIMENTO.....	59
FIGURA 24 – SUPORTE PARA PRISMA E ANTENA GNSS .....	60
FIGURA 25 – CONJUNTO SOBRE A BASE NIVELANTE.....	60
FIGURA 26 – SENSOR METEOROLÓGICO UTILIZADO .....	61
FIGURA 27 – FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA A SER EMPREGADA.....	62
FIGURA 28 – DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE IMPLANTAÇÃO DO SGP .....	64
FIGURA 29 – REPRESENTAÇÃO DA COMUNICAÇÃO GEOCOM .....	67
FIGURA 30 – CONFIGURAÇÃO DA COMUNICAÇÃO LAPTOP/ETR .....	68
FIGURA 31 – TESTES REALIZADOS EM LABORATÓRIO .....	69
FIGURA 32 – DEMONSTRAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS VERTICAIS .....	71
FIGURA 33 – DEMONSTRAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS.....	72
FIGURA 34 – PRISMA DE ORIENTAÇÃO SOBRE O PILAR P1000.....	77
FIGURA 35 – RECEPTOR GS16 INSTALADO SOBRE O PILA P1000 .....	77
FIGURA 36 – RECEPTOR ROVER INSTALADO NO PONTO DE MONITORAMENTO.....	78
FIGURA 37 – IMAGEM TOMADA ATRAVÉS DA LUNETAS DURANTE UMA DAS COLETAS .....	78
FIGURA 38 – GRUPO DE VEÍCULOS SE APROXIMANDO AO PONTO MONITORADO .....	79
FIGURA 39 – EXEMPLO DE UM DOS GRUPOS DE VEÍCULOS PRESENTES NO EXPERIMENTO .....	80
FIGURA 40 – GRÁFICOS DOS RESULTADOS DE FREQUÊNCIAS E DESLOCAMENTOS PARA O BLOCO 1 DO EXPERIMENTO 1 - ETR .....	82
FIGURA 41 – GRÁFICOS DOS RESULTADOS DE FREQUÊNCIAS E DESLOCAMENTOS PARA O BLOCO 1 DO EXPERIMENTO 1 - GNSS .....	83
FIGURA 42 – GRÁFICOS DOS RESULTADOS DE FREQUÊNCIAS E DESLOCAMENTOS PARA O BLOCO 1 DO EXPERIMENTO 2 - ETR .....	84
FIGURA 43 – GRÁFICOS DOS RESULTADOS DE FREQUÊNCIAS E DESLOCAMENTOS PARA O BLOCO 1 DO EXPERIMENTO 2 - GNSS .....	85

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – RESUMO DOS TRABALHOS CITADOS DE GNSS.....	25
TABELA 2 – RESUMO DOS TRABALHOS CITADOS DE ETR.....	27
TABELA 3 – PRINCIPAIS ERROS INERENTES AO GNSS.....	36
TABELA 4 – COORDENADAS EM SIRGAS2000, ÉPOCA 2000.4, DOS PONTOS AUXILIARES .....	63
TABELA 5 – COORDENADAS DOS PONTOS NO SGL .....	66
TABELA 6 – COORDENADAS DOS PONTOS NO SGP .....	66
TABELA 7 – QUANTIDADE DE MEDIDAS POR FREQUÊNCIA.....	69
TABELA 8 – AMOSTRA DE DADOS OBTIDOS DURANTE O TESTE EM LABORATÓRIO .....	70
TABELA 9 – FAIXAS DE FREQUÊNCIAS FUNDAMENTAIS OS PRIMEIRO HARMÔNICOS DOS CARREGAMENTOS HUMANOS RECOMENDADOS PELO CEB .....	80
TABELA 10 – RESULTADOS DE FREQUÊNCIA OBTIDOS NOS EXPERIMENTOS APRESENTADOS.....	81
TABELA 11 – RESULTADOS DO PRIMEIRO EXPERIMENTO COM ETR.....	86
TABELA 12 – RESULTADOS DO PRIMEIRO EXPERIMENTO COM GNSS .....	86
TABELA 13 – RESULTADOS DO SEGUNDO EXPERIMENTO COM ETR.....	87
TABELA 14 – RESULTADOS DO SEGUNDO EXPERIMENTO COM GNSS.....	88
TABELA 15 – DIFERENÇAS DOS DESLOCAMENTOS MÁXIMOS E FREQUÊNCIAS DE VIBRAÇÃO ENTRE GNSS E ETR PARA OS DOIS EXPERIMENTOS.....	88

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CCD	Charge-Coupled Device
CDMA	Code Division Multiple Access
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
DDF	Dupla Diferença De Fase
DPRM	Direct Phase Residual Method
ET	Estação Total
ETR	Estação Total Robotizada
FFT	Transformada Rápida De Fourier
FIG	International Federation Of Surveyors
GALILEO	European Satellite Navigation System
GLONNAS	Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
GNSS	(Gnss) Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
ICAO	International Civil Aviation Organization
LCD	Leitura Contínua De Direções
MED	Medidor Eletrônico De Distância
MEF	Modelo De Elementos Finitos
NAVSTAR-GPS	Navigation System With Time And Ranging - Global Positioning System
PPP	Posicionamento Por Ponto Preciso
RFSF	Russian Federation Space Force
RGL	Rede Geodésica Local
RMBC	Rede Brasileira De Monitoramento Contínuo
RTK	Real Time Kinematic
SD	Simple Diferenças De Fase
STFT	Transformada de Fourier Janelada

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
1.1 OBJETIVOS .....	18
1.1.1 Objetivo Geral .....	18
1.1.2 Objetivos Específicos .....	18
1.2 JUSTIFICATIVAS .....	19
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>20</b>
2.1 ESTADO DA ARTE .....	20
2.1.1 Uso do GNSS no monitoramento dinâmico de estruturas .....	20
2.1.2 Uso de ETR no monitoramento dinâmico de estruturas .....	25
2.2 MONITORAMENTO GEODÉSICO .....	28
2.2.1 Introdução aos Sistemas GNSS .....	29
2.2.2 Estações Totais Robotizadas (ETR).....	37
2.3 ANÁLISE DE SINAIS.....	50
2.3.1 Efeito Aliasing.....	55
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>57</b>
3.1 DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	57
3.1.1 Características da passarela .....	57
3.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS .....	58
3.2.1 Receptores GNSS.....	58
3.2.2 Estação Total TS15.....	59
3.2.3 Prismas Refletores .....	59
3.2.4 Suporte para prisma e antena GNSS .....	60
3.2.5 Base Nivelante .....	60
3.2.6 Sensor meteorológico.....	61
3.2.7 Laptop .....	61
3.3 PROTOCOLOS E SOFTWARES UTILIZADOS .....	61
3.4 FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA EMPREGADA.....	62
3.5 DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE REFERÊNCIA DA PASSARELA.....	63
3.6 MONITORAMENTO COM ETR.....	67
3.6.1 - Precisão das observações com ETR .....	73
3.7 MONITORAMENTO UTILIZANDO GNSS.....	74
3.8 EXPERIMENTOS DE CAMPO.....	76

3.8.1 Primeiro experimento .....	76
3.8.2 Segundo experimento .....	79
3.9 PARÂMETROS DE COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE FREQUÊNCIA.....	80
<b>4 RESULTADOS E ANÁLISES .....</b>	<b>81</b>
4.1 RESULTADOS DO BLOCO 1 DO EXPERIMENTO 1 COM ETR .....	81
4.2 GRÁFICOS DOS RESULTADOS DO BLOCO 1 DO EXPERIMENTO 1 COM GNSS	83
4.3 RESULTADOS DO BLOCO 1 DO EXPERIMENTO 2 COM ETR .....	84
4.4 RESULTADOS DO BLOCO 1 DO EXPERIMENTO 2 COM GNSS .....	85
4.5 RESUMO DOS RESULTADOS DO PRIMEIRO E SEGUNDO EXPERIMENTOS 85	
<b>5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>90</b>
5.1 RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....	92
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>93</b>
<b>ANEXO 1 - RESULTADOS OBTIDOS DOS EXPERIMENTOS.....</b>	<b>98</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Grandes obras de arte especiais tais como pontes e viadutos, e obras hidráulicas como barragens, canais, estações elevatórias hidrovíarias, portos, eclusas e outras, representam uma das maiores parcelas de investimento de recursos públicos. Segundo Bueno (2007), a importância da aplicação de verbas nestas estruturas está atrelada ao fato de tais obras serem utilizadas para viabilizar o transporte de pessoas, insumos e da produção, a manufatura de bens, proporcionar a geração de energia e ainda para a proteção da sociedade contra desastres naturais, como as rápidas e volumosas cheias, além de possuírem alta relevância na defesa do território. Deste modo, a boa condução da economia se correlaciona à operação e manutenção eficiente da saúde destas estruturas.

O Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias (DNIT, 2004) apresenta os procedimentos normatizados a serem adotados nos trabalhos de inspeção de tais obras viárias, com destaque para os tipos de inspeções (Cadastral, Rotineira, Especial, Extraordinária e Intermediária), e para a periodicidade de realização destas, que variam de 1 a cinco anos, contemplando ainda aquelas cuja realização é urgente ou não programada, apresentando assim, intervalos indefinidos.

Chang et al. (2003) destaca que além do fator econômico, a constante manutenção destas estruturas se faz necessária devido a possíveis impactos ambientais e sociais. A ocorrência de anomalias, que podem levar ao colapso de uma estrutura, implica em riscos à vida humana e ao meio ambiente, muitas vezes com consequências irreversíveis. Alguns exemplos de estruturas colapsadas podem ser citados: a Ponte sobre o rio Tamandateí, na cidade de São Paulo em 2015; um bloco do viaduto da Galeria dos Estados, em Brasília em 2018; a barragem de rejeitos em Brumadinho, em fevereiro de 2019; parte da barragem Whaley Bridge, na Inglaterra, em agosto de 2019, dentre outros. Assim, desde sua construção, e perdurando por toda sua vida útil, é importante que sejam realizados trabalhos de monitoramento, dentre os quais se inclui o monitoramento geodésico de estruturas.

Entende-se como monitoramento geodésico de estruturas o emprego de métodos de levantamentos geodésicos, cuja finalidade seja avaliar deslocamentos de pontos localizados na estrutura monitorada, referenciados a um sistema de coordenadas externo, pré-estabelecido pelo profissional responsável (SILVEIRA, 2003).

Nesta pesquisa, o monitoramento geodésico de estruturas é dividido em dois subgrupos tendo como critérios o estado do alvo monitorado (em repouso ou em movimento), a quantificação do intervalo de monitoramento e os métodos empregados. Classifica-se como estático o monitoramento no qual, durante a sua realização, o alvo esteja em repouso, ou em movimento imperceptível ao método, e que tem como finalidade principal a detecção, mensuração e a avaliação de deslocamentos de alvos no corpo monitorado referentes a campanhas de levantamento entre épocas distintas, obedecendo a um intervalo de tempo entre as campanhas compatível à finalidade. Já como monitoramento dinâmico, classifica-se o monitoramento de alvos com comportamento dinâmico, de maneira contínua durante um certo evento, com o objetivo de avaliar o comportamento deste para o intervalo de tempo, e resultando tanto na detecção e mensuração dos deslocamentos assim como na determinação da frequência de vibração do alvo monitorado, e sendo este último um dos objetos de estudo deste trabalho.

Avanços tecnológicos na área da geodésia têm impactado positivamente a evolução dos equipamentos e softwares, resultando em trabalhos cada vez mais precisos e com um tempo necessário de execução cada vez menor. Pode-se citar, por exemplo, o emprego da geodésia espacial, a qual conta hoje com um diversificado e abrangente conjunto de constelações de satélites utilizados no posicionamento geodésico, com destaque para o *Global Positioning System* (GPS), além de uma gama de equipamentos capazes de obter as informações sob taxas de rastreamento cada vez maiores, por exemplo, equipamentos que trabalham a 100 Hz, como mostra Moschas e Stiros (2015), e com processamento em tempo real.

Na mesma tendência, experimenta-se uma forte evolução das estações totais, que já operam de maneira robotizada, com uma intervenção mínima do operador, e com sistemas de hardware e software que vêm apresentando uma crescente melhora no que diz respeito à praticidade na obtenção dos dados e suas precisões (WOLF, 2003). Com essa melhora, a cada dia surgem novos métodos de utilização dos equipamentos, evoluindo e aumentando o leque de possibilidades de sua aplicação no monitoramento dinâmico de estruturas.

No que tange ao monitoramento dinâmico de estruturas utilizando geodésia espacial, alguns trabalhos têm sido desenvolvidos, como o de Schaal e Larocca (2002) que desenvolveram uma metodologia que analisa o espectro de frequências por meio de uma filtragem dos resíduos da dupla diferença de fase (DDF) direto nos

dados brutos, e estudos como o de Bueno (2007), que realiza testes com receptores de dupla frequência, com a utilização de filtragens sobre os dados oriundos do pós-processamento, sendo que ambos conseguem chegar a precisões milimétricas.

Com relação ao uso de estações totais, Lienhart, Ehrhart e Grick (2016) apresentaram uma proposta de metodologia, para o aumento da taxa de rastreamento de alvos. O procedimento consiste na coleta contínua de direções horizontais e ângulos verticais referentes ao rastreamento de um alvo no modo travado (*lock*)<sup>1</sup>, uma função das estações totais robotizadas (ETR), que partindo-se de uma distância inicialmente determinada. Aqui, este método é intitulado de leitura contínua de direções (LCD). Os experimentos realizados pelos autores apresentaram um ganho de duas vezes na velocidade de obtenção dos dados, mostrando que este é um método promissor para o monitoramento dinâmico de estruturas utilizando estações totais robotizadas.

Diante do exposto, este trabalho visa apresentar uma análise do monitoramento dinâmico de um ponto geodésico materializado sobre a estrutura da passarela que liga os campi Centro Politécnico e Botânico, da Universidade Federal do Paraná (UFPR), com o uso de levantamento por Global Navigation Satellite System (GNSS), método relativo cinemático, a taxas de rastreamento de 20 Hz, assim como com estação pela técnica Leitura Contínua de Direções (LCD), com a finalidade de comparar as respostas obtidas para as frequências de vibração e os deslocamentos da estrutura referentes a eventos de passagens de diferentes quantidades de pedestres sobre a passarela, e veículos trafegando sob esta, utilizando as técnicas e equipamentos mencionados.

Para o desenvolvimento da pesquisa, parte-se da hipótese de que se é possível realizar o levantamento, processamento e filtragem dos dados GNSS no modo relativo cinemático, utilizando uma taxa de rastreamento de 20 Hz, e também a leitura contínua de ângulos verticais e direções horizontais, com estação total com uma distância horizontal pré-fixada, então é possível analisar e comparar os resultados de resposta obtidas para as frequências de vibração e deslocamentos referentes a ambas as técnicas.

---

<sup>1</sup> O modo travado, ou *lock*, é uma função das estações totais robotizadas que possibilita que o equipamento rastreie um alvo, prisma, de maneira automatizada, apontando para este de maneira contínua, inclusive com o alvo em movimento.

## 1.1 OBJETIVOS

Nos tópicos seguintes estão descritos o objetivo geral da pesquisa, bem como os objetivos específicos necessários à obtenção deste.

### 1.1.1 Objetivo Geral

Identificar e mensurar os deslocamentos e frequências de vibração de um ponto geodésico previamente escolhido e materializado sobre a estrutura da passarela Politécnico/Botânico da UFPR utilizando a Leitura Contínua de Direções (LCD) por ETR e levantamento GNSS dinâmico, simultaneamente.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

1) Identificar a vibração e deslocamentos tridimensionais do ponto escolhido, sob ação de cargas móveis referentes à passagem de diferentes quantidades de pedestres sobre a estrutura além de veículos trafegando sob esta, por meio de levantamento GNSS no modo relativo cinemático;

2) Identificar a vibração e deslocamentos verticais e transversais do ponto geodésico em estudo simultaneamente, sob as mesmas condições, utilizando a leitura contínua de direções (LCD) por ETR;

3) Em um segundo momento, identificar as frequências de vibração e os deslocamentos tridimensionais de um ponto materializado sobre a passarela em estudo, somente sob ação de cargas móveis referentes somente à passagem de diferentes quantidades de veículos trafegando sob a estrutura por meio de levantamento GNSS no modo relativo cinemático;

4) Identificar a vibração e deslocamentos verticais e transversais do mesmo ponto simultaneamente, utilizando a leitura contínua de direções (LCD);

3) Realizar a análise e comparação dos resultados obtidos pelos métodos supracitados.

## 1.2 JUSTIFICATIVAS

A utilização de métodos geodésicos é indicada para o monitoramento de estruturas pelo fato de se avaliar o comportamento dos alvos monitorados com relação a um referencial exterior ao corpo monitorado, diferentemente do monitoramento geotécnico, o qual faz uso de equipamentos como extensômetros e transdutores de deslocamento, mas que não permitem avaliar de maneira absoluta as variações posicionais da estrutura.

Diversos trabalhos de monitoramento geodésico dinâmico de estruturas têm sido desenvolvidos nos últimos anos, podendo-se citar as teses de doutorado Chaves (2001), Larocca (2004), Bueno (2007), Palazzo (2008) e Araújo Neto (2017). Na literatura nacional, durante a pesquisa até aqui realizada, localizaram-se estudos realizados pela Escola de Engenharia de São Carlos e Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, especialmente com uso do GPS, e também pelo grupo de pesquisa de Geodésia Aplicada à Engenharia, do Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná (PPGCG), do qual faz parte o autor, sendo o último com uso de estação total, realizado em uma ponte pênsil de concreto protendido. Salienta-se que os trabalhos acima mencionados abordam estruturas de concreto, em sua maioria, pontes de concreto.

Ressalta-se ainda que, tanto no âmbito nacional quanto internacional, existe um número reduzido os trabalhos desenvolvidos com uso de estações totais no monitoramento dinâmico de estruturas, e mais ainda os que utilizam mais de um método de monitoramento geodésico em um mesmo experimento. Ou seja, em sua quase totalidade, o acervo de trabalhos de monitoramento dinâmico de estruturas apresenta a utilização de um método geodésico em conjunto com um ou mais instrumentais não geodésicos.

Deste modo, tendo como base o exposto, esta pesquisa se justifica pela necessidade de aumento do acervo de pesquisas sobre o monitoramento geodésico dinâmico de estruturas, com resultados apresentados incluindo o domínio das frequências, com a utilização de estações totais robotizadas. Além disso, com distintos métodos de monitoramento geodésico dinâmico em um mesmo estudo. A estrutura monitorada foi uma importante passarela metálica, situada sobre uma rodovia de tráfego intenso e sujeita a uma grande trafegabilidade de pedestres entre dois campi da Universidade Federal do Paraná.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os tópicos seguintes apresentam o arcabouço bibliográfico necessário à elaboração e desenvolvimento da pesquisa. Buscou-se trabalhar tanto com estudos da literatura nacional como internacional, visando-se a atualização quanto aos trabalhos desenvolvidos, principalmente no que diz respeito ao uso de estações totais no monitoramento dinâmico de estruturas. Abordam-se ainda os conceitos matemáticos envolvidos no monitoramento dinâmico, como os modelos necessários à obtenção dos resultados no domínio das frequências.

### 2.1 ESTADO DA ARTE

#### 2.1.1 Uso do GNSS no monitoramento dinâmico de estruturas

Pesquisas sobre GNSS para monitoramento dinâmico de estruturas têm sido desenvolvidas desde o início dos anos 2000, acompanhando a evolução dos equipamentos, principalmente por pesquisadores da China, Estados Unidos, Inglaterra, Alemanha, Itália, Portugal, Austrália e Brasil. Um apanhado mais aprofundado pode ser visto em Araújo Neto (2017).

Um dos primeiros estudos é datado de 2001, em que Roberts, Meng e Dodson (2001) utilizaram receptores GPS de dupla frequência e taxa de rastreamento de 10 Hz em conjunto com acelerômetros, cuja finalidade era observar a movimentação de uma ponte situada na Inglaterra. Os estudos apontaram para uma dificuldade na realização do monitoramento devido à baixa taxa de rastreamento dos receptores e à instabilidade posicional dos acelerômetros. Contudo, os autores demonstraram a possibilidade de distinguir a movimentação da componente vertical dos demais ruídos a partir de filtragem dos sinais.

No Brasil, Schaal e Larocca (2002), utilizando receptores de 5 Hz, apresentaram uma metodologia pioneira para o monitoramento dinâmico vertical de estruturas, capaz de detectar a frequência natural de vibração, além de deslocamentos subcentimétricos. A metodologia faz uso dos resíduos oriundos da Dupla Diferença de Fase (DDF), a partir da análise espectral, por meio de filtragens dos sinais. Para tanto, utilizam-se apenas dois satélites, que devem formar um ângulo próximo a 90° tendo a antena como vértice. Os autores concluíram que o

método apresenta potencialidade para detectar deslocamentos menores que um centímetro, periódicos, sob particular configuração dos satélites, e classificam a metodologia como promissora para tal finalidade.

Yu, Guo e Chengwu (2006) desenvolveram um estudo de monitoramento dinâmico de uma ponte estaiada com o uso da tecnologia GPS, pelo método relativo cinemático, e utilizando a filtragem de sinais, como *Wavelet* e Transformada Rápida de Fourier (FFT). O posicionamento foi realizado através de dois receptores de dupla frequência. Com a *Wavelet* eliminou-se os ruídos das coordenadas, e então aplicou-se a Transformada de Fourier Rápida (FFT) para obter a frequência de vibração da ponte. Os pesquisadores concluíram que o receptor GPS pode ser utilizado como instrumento eficaz para caracterizar o comportamento de pontos geodésicos em obras de artes especiais, e afirmam que o sistema de monitoramento com receptor GPS pode ser combinado com outros sensores como o de temperatura, humidade e pressão.

Em 2007, um estudo desenvolvido por Meng, Dodson e Roberts (2007) apresenta a comparação dos valores para da frequência natural de vibração de uma passarela suspensa, um obtido com monitoramento por GPS e outro estimado com a aplicação de um modelo de elementos finitos. A passarela foi induzida a deslocamentos por cargas móveis, com a participação de pessoas, resultando em um total de aproximadamente 2000 kg. A filtragem foi feita por passa-banda e a Transformada de Fourier Rápida (FFT), utilizadas para extrair a frequência. Os autores concluíram que o receptor GPS pode ser dado como uma ferramenta viável para monitoramento de variações posicionais de pontos geodésicos e detecção de frequência natural de vibrações de obras de engenharia.

Bueno (2008) apresenta uma metodologia para determinação da frequência de vibração de um receptor GPS acoplado a um dispositivo que realiza movimentos verticais periódicos. Foram utilizados receptores GPS com taxa de gravação de dados de 20 Hz. As coordenadas tridimensionais foram obtidas a partir do método de posicionamento relativo cinemático, com pós-processamento. A análise dos dados foi realizada com o uso de técnicas de filtragem: transformada de Fourier e de *Wavelet*. Os autores concluíram que, quando não realizada a filtragem, as séries temporais obtidas com o posicionamento por receptores GPS diferiram das obtidas com o transdutor de deslocamento. A partir da análise espectral, notaram a superioridade da transformada *Wavelet* em relação à transformada de Fourier, pois

a transformada Wavelet permite separar a contribuição de cada frequência da contribuição total da energia para série temporal. Devido os dados se apresentarem bastante ruidosos, os autores recomendam que estudos sejam desenvolvidos com a finalidade de mitigar efeitos perturbadores.

Larocca et al. (2009) apresentam resultados preliminares de um experimento para a determinação de frequências de vibração compreendidas entre 0,05 a 1 Hz, as baixas frequências. Os dados, provenientes das observáveis GPS, utilizaram um simulador de movimentação, em uma linha de base curta, e com de duração inferior a 30 segundos por levantamento, sendo este o primeiro experimento no cenário nacional a utilizar um receptor com taxa de gravação de 100 Hz. As séries temporais dos dados GPS analisadas foram obtidas com a adição de ondas senoidais simuladas. Empregou-se a mesma metodologia de obtenção dos dados de Schaal e Larocca (2002). Após as filtrações, observou-se que baixas frequências podem ser detectadas com o uso do GPS a altas taxas de gravação.

Casciati e Fuggini (2009) realizaram um experimento de monitoramento dinâmico com a finalidade de quantificar a faixa de frequência, à taxa de amostragem de 20 Hz, deslocamentos que poderiam ser rastreados com receptores GPS de dupla frequência. Os testes dinâmicos foram realizados impondo diferentes frequências e amplitudes de deslocamentos longitudinais com o uso de um dispositivo com deslocamento linear, com ênfase à faixa de frequência de oscilação em torno de 4,0 Hz. Utilizou-se o método *Real Time Kinematic* (RTK). Observou-se que o receptor GPS foi capaz de detectar as mudanças súbitas na amplitude do deslocamento, assim como a variação da frequência, ocorridas em curto período de tempo. O estudo mostrou também que com as observações GPS, pode-se determinar deslocamentos subcentimétricos com frequência de até 2,0 Hz, e que precisão oriunda do método depende da combinação de amplitude e frequência da oscilação. Ainda, segundo os autores, o experimento demonstrou que receptor GPS é uma ferramenta promissora no campo da engenharia civil, sendo sua acurácia condizente com os requisitos para o monitoramento de estruturas flexíveis.

Iniciando no mesmo ano, Larocca e Schaal (2009, 2010) apresentaram uma metodologia denominada de *Direct Phase Residual Method* (DPRM), em sequência aos trabalhos desenvolvidos pelos autores. No entanto, neste método, os resíduos da dupla diferença de fase são obtidos diretamente dos dados brutos coletados, através do ajuste de um polinômio originado do modelo paramétrico do método dos

mínimos quadrados (MMQ), onde foram utilizados dois experimentos, com receptores operando 20 Hz e 100 Hz, acoplados a um simulador de movimentos senoidais. Os autores concluíram que o método para detecção de altas frequências diretamente das medidas de fase bruta no monitoramento de grandes estruturas é de fácil implementação e apresentam resultados consistentes. A utilização de linha de base curta com pequeno intervalo de rastreamento dispensa softwares de pós-processamento dos dados, sendo estes processados na própria rotina desenvolvida. Os autores sugerem ainda o desenvolvimento de pesquisas com relação ao multicaminhamento dos sinais com o uso de receptores GPS com taxa de gravação igual ou superior a 100 Hz.

Kalooop e Li (2011) apresentam um trabalho, utilizando três receptores de dupla frequência, sendo 2 sobre a estrutura e um como base, no qual utilizam dados observações ambientais. Os autores também implementaram filtragem Wavelet. O estudo tinha como finalidade observar os deslocamentos da estrutura e possíveis danos da ponte. Utilizou-se a técnica RTK para as estações de monitoramento, a uma taxa de 20 Hz. Para a análise dos dados foi utilizada a transformada discreta Wavelet e a transformada Fourier disponíveis no software Matlab. Essas análises permitiram concluir que a transformada de Fourier janelada (STFT) é um passo à frente da transformada rápida de Fourier em termos de análise de resposta estrutural. Concluiu-se ainda que sinal GPS tem alta sensibilidade para detectar movimentos e danos na estrutura e isso independe da posição da antena sobre a estrutura.

Yi, Li e Gu (2013) realizaram alguns experimentos, no modo estático e cinemático, para testar o desempenho de receptores GPS com alta taxa de gravação: em termos de acurácia, limitação e potencial para o monitoramento dinâmico das oscilações de pontes. Os autores utilizaram dois receptores com capacidade de 50 Hz e dois receptores com capacidade de 100 Hz, operando no modo cinemático. Para a validação dos dados, utilizou-se um acelerômetro e um modelo estrutural construído por elementos finitos. Neste estudo, buscou-se avaliar, principalmente, a frequência natural e o ruído, bem como o potencial de uso de receptores GPS para o monitoramento dinâmico de estruturas. Os estudos revelam o potencial de receptores GPS com alta taxa de coleta de dados para medir elevadas frequências de estruturas rígidas. A alta taxa de gravação dos receptores GPS fornece dados compatíveis aos dos acelerômetros na faixa de alta frequência e

acurácia centimétrica, sendo um bom desempenho dos receptores com alta taxa de gravação para quantificar os deslocamentos induzidos por fatores ambientais, e os deslocamentos transitórios provocados pelo tráfego de veículos.

Os estudos anteriores têm a característica comum de utilizar apenas um único método geodésico por vez para o monitoramento dinâmico estrutural, sendo, em sua maioria, complementados por um método não geodésico. No entanto, Moschas e Stiros (2014) realizaram estudos envolvendo um número maior de sensores geodésicos: GPS, GNSS com capacidade de rastreamento de 100 Hz, e Estação Total Robotizada. Como complemento, os autores utilizaram um acelerômetro. Os dados foram complementados ainda com filtragem dos sinais. A finalidade dos estudos foi, no primeiro, analisar os deslocamentos e vibrações em cada um dos eixos de uma passarela rígida metálica, excitada por deslocamentos verticais sincronizados e controlados. No segundo, empregar as técnicas anteriores em uma ponte construída parte em madeira e parte em aço. As excitações provocadas na passarela produziram deslocamentos verticais milimétricos, deslocamentos laterais submilimétricos e longitudinais quase nulos, sendo estes últimos excluídas das análises. Em ambas as estruturas, os dados obtidos por geodésia (GNSS e ETR) apresentaram comportamento condizente aos dados apresentados pelo acelerômetro, com frequência por volta de 7 Hz. Ainda, os autores concluíram que ao utilizar o GNSS os resultados se tornam mais reais do que somente utilizando o GPS.

Araújo Neto (2017) apresentou um novo estudo, baseado nos desenvolvidos por Schall e Larocca, com a finalidade de detectar frequências de vibração e deslocamentos milimétricos de uma ponte de concreto sob a ação de carga dinâmica provocada por trânsito veicular. Para tanto, o autor utilizou um par de equipamentos GPS com taxa de gravação de 100 Hz, e as devidas filtrações necessárias, com softwares desenvolvidos em ambiente matlab. O autor concluiu que a ponte apresentou frequências de vibração condizente com a fornecida pelos projetistas desta, entre 4 e 10 Hz, e que os receptores GPS se apresentam como ferramentas capazes de serem utilizadas em conjunto com os demais instrumentos de monitoramento dinâmico de estruturas, ou ainda como um instrumento primário, capaz de detectar os primeiros sinais de necessidade de um monitoramento mais detalhado e, por conseguinte, mais custoso. A TABELA 1 apresenta um resumo dos trabalhos citados.

TABELA 1 - RESUMO DOS TRABALHOS CITADOS DE GNSS

Autores	Ano	Instrumental	Método	Freq. Hz	Filtragem	Estrutura	País	Conclusão
Roberts, Meng e Dodson	2001	GPS L1/L2 + acelerômetros	Estático	10	FFT	Ponte Suspensa	UK	Baixa taxa de rastreamento
Schaal e Larocca	2002	GPS L1/L2	Estático	5	DDF	Passarela estaiada	BRA	Sub-centimétricos
Yu, Guo e Chengwu	2006	GPS L1/L2	Cinemático	10 e 20	Wavelet + FFT	Ponte Estaiada	CHN	Combinar sensores
Meng, Dodson e Roberts	2007	GPS + E. Finitos	Cinemático	20	P. Banda + FFT	Passarela	UK	Estudo de deflexões
Bueno et al.	2008	GPS L1/L2	Cinemático	20	FT + Wavelet	Dispositivo	BRA	Wavelet com poder superior
Larocca et al	2009	GPS L1	Estático	100	DDF	Dispositivo	BRA	Baixas frequências
Casciati e Fuggini	2009	GPS L1/L2	RTK	20	FFT	Dispositivo	ITA	Mudanças súbitas
Larocca e Schaal	2010	GPS L1	Estático	20 e 100	DPRM	Dispositivo/ponte	BRA	Desloc. milimétricos
Yi, Li e Gu	2013	GPS + acelerômetro + E.F.	Cinemático	50 e 100	FFT	Ponte de Concreto Rígido	CHN	Precisão centimétrica
Moschas e Stiros	2015	GPS + GNSS + ETR + Acelerometro	Estático	100	Exclusivo	Passarela Metálica	GER	Diferentes deflexões 3D
Araújo Neto	2017	GPS L1	Estático	100	FFT + Wavelet	Pontes de concreto	BRA	Propõe a Integração de dados

FONTE: O autor (2020).

### 2.1.2 Uso de ETR no monitoramento dinâmico de estruturas

A utilização de estações totais no monitoramento dinâmico de estruturas se deu a partir da implementação dos sistemas que permitiram o rastreamento e reconhecimento automático de alvos.

Radovanovic e Teskey (2001) realizaram um experimento baseado em testes comparativos da precisão posicional obtida através de levantamentos com uma ETR e um par de receptores GPS de 10 Hz. Os autores avaliaram a capacidade do equipamento no modo *stop-and-go* e no modo dinâmico. No primeiro, os resultados dos testes com a ETR superaram os obtidos com GPS, com precisão milimétrica. Já no modo cinemático, o que representaria um monitoramento dinâmico, os autores encontraram uma disparidade entre as observáveis direções e distâncias. Isto ocorre porque o medidor eletrônico de distância (MED) na ETR o medidor de distância opera com um tempo de integração maior que o tempo de integração da medição angular que pode ser considerada em tempo real. Como resultado, para uma dada medição, os ângulos medidos são corretos (dentro da precisão da medição), mas as

distâncias registradas correspondem a alguma época próxima anterior, diferente da época em que foram realizadas as medições angulares. Os autores ressaltam que este erro é maior quanto maior a velocidade de movimentação do alvo.

No ano seguinte, um dos primeiros estudos voltados à aplicação de ETR no monitoramento dinâmico de estruturas começou a ser desenvolvido por Cosser et al. (2003). Os autores utilizaram uma das primeiras ETR postas no mercado, da marca Leica Geosystems, modelo TCA 2003, cujas especificações técnicas, para o modo de medição contínuo são 0,5" de precisão angular e linear de  $\pm (5 \text{ mm} + 2 \text{ ppm})$  para linear, com um reconhecimento automático de alvos para distâncias de até 1 km (LEICA, 2004). O equipamento foi utilizado na tentativa de monitoramento de uma ponte metálica em Nottingham, Inglaterra. Neste estudo, os autores observaram que tais equipamentos ainda apresentavam capacidade limitada de rastreamento, sendo este realizado na frequência aproximada de 1 Hz, e ainda inconstante, inviabilizando a detecção da frequência de vibração da estrutura. Os autores adicionam que, devido à alta taxa de vibração da estrutura, os ângulos e as distâncias obtidos pelos equipamentos possivelmente não correspondiam a observações simultâneas, ou seja, existia uma latência entre as leituras angular e linear do equipamento.

No Brasil, sendo o único estudo localizado pelo autor da presente pesquisa, Palazzo (2008) realizou testes em laboratório, assim como um experimento em uma ponte pênsil executada em concreto armado com alta vibração no central, para avaliar o desempenho de uma ETR Leica TCRA 1205 no modo dinâmico. Os resultados dos testes sobre a ponte mostraram que o monitoramento apresentou boa precisão, com valores próximos aos determinados em testes realizados em laboratório, com uso de um motor simulador de movimentos verticais. As amplitudes de deslocamento observadas foram próximas a 4 cm. Em todos os experimentos, a precisão da ETR estava acima ou próxima da precisão fornecida pelo fabricante. O autor obteve como algumas de suas conclusões que o fenômeno da latência produzia mudanças nas observações que deveriam ser investigadas no futuro e, além disso, que a ponte necessitava receber uma estrutura de amortecimento, o que foi posteriormente realizado.

Chang e Qunge (2009) apresentam um estudo realizado com uma Estação total TCA2003 em uma ponte estaiada na China, comparando os resultados da ETR com os valores encontrados através da análise de modelo de elementos finitos (MEF), com o objetivo de avaliar a viabilidade e o potencial do equipamento na

medição das características dinâmicas de pontes. Para tanto, utilizaram o posicionamento cinemático. Os autores destacam que os resultados obtidos eram promissores, demonstrando a potencialidade da ETR na avaliação dinâmica de deformação de grandes estruturas. No entanto, para aquele equipamento, o tempo de obtenção dos dados era próximo a 1 Hz, assim, os ângulos e as distâncias eram medidos com incerteza temporal. Os autores apresentam ainda que a taxa de amostragem do equipamento poderia variar ao longo do tempo de experimento. Os autores finalizam indicando que a condição ambiental, especialmente o problema de refração atmosférica, deve ser examinada em trabalhos futuros.

Lienhart, Ehrhart e Grick (2016) apresentam um estudo realizado na Áustria, em que os autores realizam experimentos com uma estação total TS15 e uma *multstation* MS60, um equipamento que apresenta a união de uma estação total robotizada e um laser scanner, ambas da marca Leica, utilizados para o monitoramento dinâmico de uma passarela de metal. Com os experimentos, os autores puderam perceber que existe uma inconstância na frequência dos dados obtidos com a estação total, quando feitos leituras lineares e angulares ao mesmo tempo, ocasionado, possivelmente, pela limitação de acompanhamento dos motores horizontal e vertical de giro do equipamento. Como solução, os autores propuseram a utilização de somente leituras angulares do equipamento durante o monitoramento, sendo utilizado para cálculo da projeção do movimento, através uma medida de distância horizontal inicial ao alvo monitorado. Com isso, puderam comprovar um aumento significativo da taxa amostral do equipamento, passando de cerca de 7 Hz para valores em torno de 25 Hz. Um resumo dos trabalhos analisados é apresentado na TABELA 2.

TABELA 2 - RESUMO DOS TRABALHOS CITADOS DE ETR

<b>Autores</b>	<b>Ano</b>	<b>Técnica</b>	<b>Precisão</b>	<b>Método</b>	<b>Freq. Hz</b>	<b>Estrutura</b>	<b>Conclusão</b>
Radovanovic e Teskey	2001	GPS + estação	-	<i>Stop and go</i> e Dinâmico	10	-	ETR com precisão superior
Cosser et al.	2003	TCA 2003	0,5" ± (5 mm + 2 ppm)	Dinâmico	~ 1	Ponte metálica	Limitação e Latência
Palazzo	2008	TCRA 1205	5" e ± (1 mm + 1,5 ppm)	Dinâmico	~ 6	Ponte Pênsil em Concreto	Disparidade

(continuação)

Autores	Ano	Técnica	Precisão	Método	Freq. Hz	Estrutura	Conclusão
Chang e Qunge	2009	TCA 2003 + EF	0,5" e $\pm$ (5 mm + 2 ppm)	Dinâmico	~ 1	Ponte de concreto armado	Indisponibilidade temporal de dados
Lienhart, Ehrhart e Grick	2016	TS 15 + MS60	1" e $\pm$ (1 mm + 1,5 ppm)	LCD e Sanner	~ 25	Passarela concreto	Ganho na taxa de rastreamento

FONTE: O autor (2020).

## 2.2 MONITORAMENTO GEODÉSICO

Em projetos de estruturas, uma das principais etapas é a determinação do período de vida útil da obra de engenharia a ser construída, deste modo, para que se garanta a confiabilidade do tempo de vida calculado, faz-se imprescindível o monitoramento da estrutura e, caso necessário, as devidas intervenções (PALAZZO, 2006). O monitoramento uma estrutura contribui para a garantia da sua integridade, incluindo-se a avaliação do seu comportamento dinâmico. Tal monitoramento diz respeito à medição, aquisição, ao tratamento dos dados, à avaliação e aos registros digitais dos componentes da estrutura.

Do ponto de vista geodésico, pode-se dizer que há um constante avanço no aprimoramento das técnicas de coleta e processamento dos dados. Iniciado entre o final dos anos 70 e início da década de 80, o Grupo de Trabalho 6.1, *do International Federation of Surveyors (FIG)*, vem concentrando os seus esforços no apoio ao incremento de novas técnicas de monitoramento e análise geométrica de deformações estruturais (FIG, 2020).

Para Viseu e Almeida (2000), a eficácia da instrumentação é diretamente ligada à qualidade da organização dos recursos humanos e do orçamento suficiente para realizar o levantamento e analisar os resultados em tempo útil. Os autores salientam a necessidade da periodicidade e especialização dos envolvidos na atividade da execução de monitoramento de estruturas, destacando a automação na aquisição dos dados.

Veiga (2006) afirma que, independente do grau, o processo de automação objetiva a intervenção mínima do operador sobre instrumento durante a coleta dos dados. Com isto, baseado na influência humana acerca de erros grosseiros e aleatórios, deduz-se que há uma melhora na qualidade das observações adquiridas.

No cenário atual, a automação já ultrapassou os limites da aquisição dos dados, e já se faz presente em todo o processo de monitoramento, desde a coleta até a apresentação dos resultados.

As técnicas e métodos de levantamentos geodésicos empregados no monitoramento utilizam diversos tipos de equipamentos. Na conjuntura atual, 2019, o GNSS, as estações totais e os níveis, com o nivelamento geodésico de alta precisão, representam como os principais e mais difundidos métodos e técnicas utilizados para tal finalidade. No entanto, destaca-se o crescente número de pesquisas e trabalhos técnicos de aplicação de *laser scanner* para este tipo de aplicação, e ainda uso de outras técnicas como o uso de radares terrestres.

Em se tratando de GNSS, utilizam-se, em sua maioria, os métodos de levantamentos convencionais, já consolidados na literatura sobre o assunto, tais como o levantamento relativo estático, utilizados, principalmente, para a implementação e avaliação da estabilidade de redes geodésicas locais (RGL) e ligação destas a uma rede de ordem superior, por exemplo, uma rede local à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC).

As estações totais, no monitoramento geodésico estático, são utilizadas geralmente, para a realização de irradiações partindo de vértices da rede geodésica local, com a finalidade de monitorar pontos materializados na estrutura, assim como na densificação da rede geodésica local.

Para uma consulta acerca da integração das duas técnicas acima mencionadas no monitoramento geodésico de longo período, recomenda-se Jerke (2019), onde o autor apresenta o procedimento completo de monitoramento de pontos materializados na estrutura da barragem da Usina Hidrelétrica Mauá, em Telêmaco Borba - PR.

### 2.2.1 Introdução aos Sistemas GNSS

O *Global Navigation Satellite System* (GNSS) abrange todo o sistema global de posicionamento por satélites, assim como a combinação, o aprimoramento e aumento desses sistemas (HOFMANN-VELLENHOF et al., 2008). O termo GNSS surgiu durante a Décima Conferência de Navegação Aérea, em 1991, quando a *International Civil Aviation Organization* (ICAO) reconheceu que o sistema de navegação do século XXI proporcionaria um sistema global de navegação.

Basicamente, estes sistemas são compostos por três segmentos: o segmento espacial que consiste nos satélites em órbita ao redor do planeta, o segmento de controle, composto pelo conjunto de estações que monitoram os satélites, determinam suas órbitas e definem as informações a serem transmitidas aos satélites, e, por fim, o segmento dos usuários, associado aos receptores, os quais devem ser apropriados para os propósitos a que se destinam (MONICO, 2008)

Os sistemas atualmente operacionais são: o NAVSTAR-GPS (*NAVigation System with Time And Ranging - Global Positioning System*), dos Estados Unidos da América, o russo GLONASS (*Global'naya Navigatsionnaya Sputnikowaya Sistema*), e o sistema Chinês BEIDOU/COMPASS. Encontra-se ainda em desenvolvimento o Sistema de Navegação por Satélite da União Europeia (*European Satellite Navigation System*) denominado GALILEO (KRUEGER, 2018). Destes, o GPS e o GLONASS foram os utilizados nesta pesquisa.

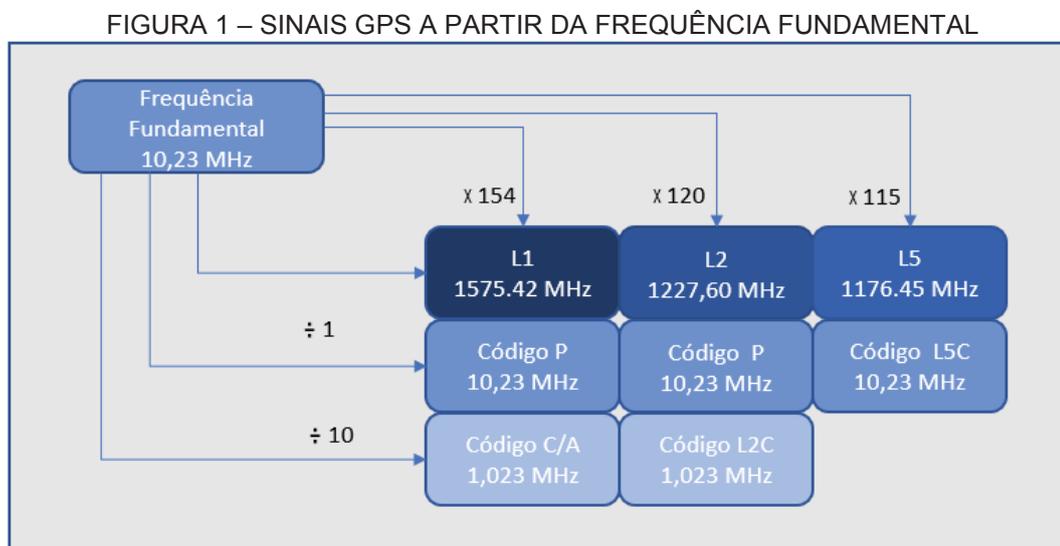
A precisão posicional dos pontos levantados via GNSS varia de acordo com método empregado, do tipo de efemérides utilizadas, e dos cuidados durante o levantamento. Além disso, fatores como o multicaminhamento e o sinal ruído são responsáveis pela degradação da qualidade dos resultados obtidos. Para maiores detalhes acerca do assunto, recomenda-se que o leitor busque os trabalhos de Seeber (2003), MONICO (2008)

#### 2.2.1.1 O GPS

Apesar da existência de um vasto conjunto de conceitos e modelos matemáticos pertinentes à tecnologia GPS, aqui serão explorados apenas conceitos introdutórios deste, ligados ao desenvolvimento do projeto. Como material para aprofundamento acerca de outros tópicos, mais abrangente, além de incluir os demais sistemas, recomenda-se a leitura de Seeber (2003), Leick (2004), Hofmann-Wellenhof (2008) e Monico (2008).

Os sinais emitidos pela constelação GPS se originam de uma frequência fundamental com valor de 10,23 MHz. Assim, a partir desta são geradas as três portadoras emitidas pelos satélites do sistema GPS: L1, com comprimento de onda de 19 cm; L2, com 24 cm; e a portadora com L5, com comprimento de onda 25,5 cm. Além destas, existem ainda os códigos P, C/A e L2C (LEICK, 2004). A FIGURA

1 apresenta o esquema clássico de geração dos sinais GPS a partir da frequência fundamental.



FONTE: Adaptado de Araújo Neto (2017)

### 2.2.1.2 O GLONASS

Segundo Seeber (2003), o GLONASS foi desenvolvido pela antiga União Soviética de maneira análoga ao GPS, ou seja, também para a finalidade militar, em meados de 1970. Atualmente, este sistema é operado pela Agência Espacial Russa, a *Russian Federation Space Force (RFSF)*, e possui uma constelação de 27 satélites, sendo destes, 23 operacionais, 1 em fase de testes, 2 sob verificação e 1 para peças de reposição. A maior diferença entre os satélites GLONASS e GPS é que cada satélite GLONASS possui sua própria frequência de transmissão de sinal, assim, a identificação dos satélites ocorre, em maioria, a partir da verificação da frequência do sinal a partir da técnica denominada FDMA (*Frequency Division Multiple Acces*) (LEICK, 2004; MONICO, 2008; GOMES, 2015). Com o lançamento da série de satélites K, o GLONASS passou a transmitir, também, sinais do tipo *Code Division Multiple Access (CDMA)*, desde fevereiro de 2015 (ESA, 2018).

Os satélites GLONASS transmitem sinais nas bandas L1 e L2, modelo em FDMA, em que cada satélite emite uma frequência diferente. O plano original para as frequências GLONASS é definido a partir da frequência central dos canais (SEGANTINE, 2005), ou seja:

$$L1 = 1602 + 0,5620n \text{ (MHz)} \quad (01)$$

$$L2 = 1246 + 0,4375n \text{ (MHz)} \quad (02)$$

Tanto para L1 como L2,  $n$  varia de 0, 1, 2, ..., 24 e corresponde ao número dos canais.

Uma vantagem da FDMA é a rápida identificação do satélite que está emitindo o sinal, unicamente pela frequência deste sinal, diferentemente do CDMA, que necessita decodificar o código e, a partir do ruído pseudoaleatório deste detectar qual é o satélite rastreado. No entanto, FDMA é usado apenas no GLONASS. Assim, o GLONASS conseguiu aprovação para adicionar o CDMA ao seu sistema. Isto se deu para facilitar compatibilidade deste aos demais sistemas GNSS existentes, como o GALILEO e o GPS (SEEBER, 2003; MONICO, 2008).

### 2.2.1.3 Diferenças de Fase

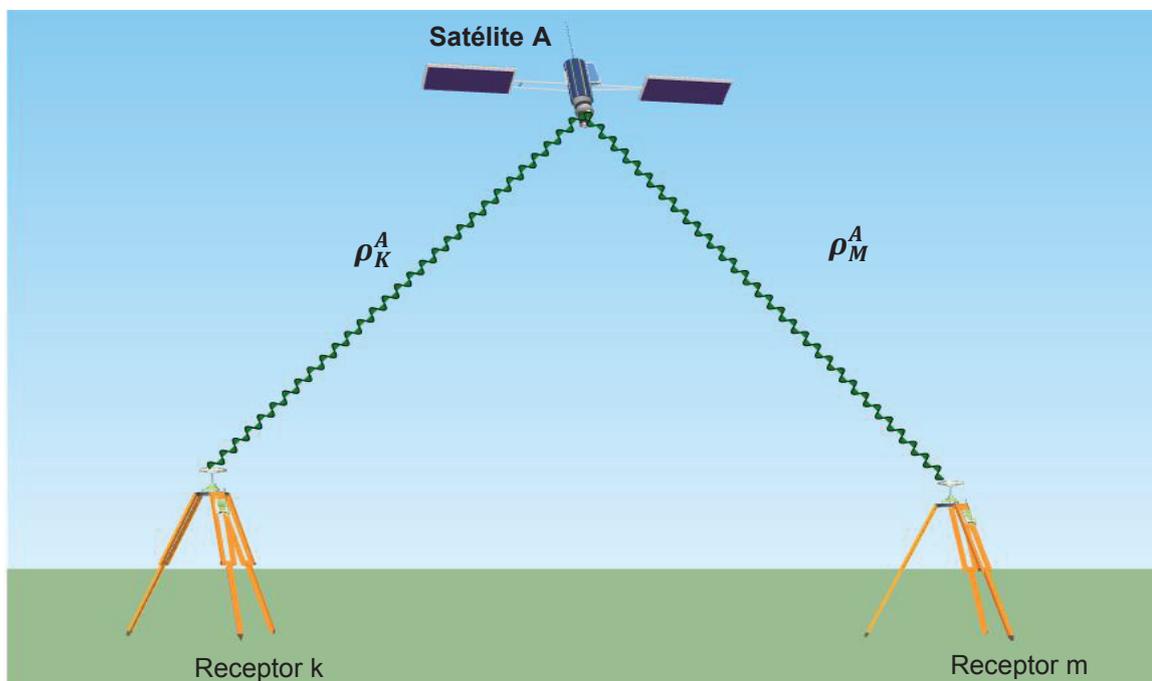
O posicionamento GNSS é baseado no tempo da propagação da onda eletromagnética. Conhecendo-se a velocidade da onda, torna-se possível calcular a distância entre satélite e receptor. No entanto, para que se alcance o objetivo de forma mais precisa, necessita-se o uso de combinações lineares entre as diferentes observações: a) através de observações em diferentes estações; b) através de observações de diferentes satélites; c) através de observações de mesmo tipo; d) através de observações de diferentes tipos; e) através de observações entre épocas distintas (SEEBER, 2003).

O uso das combinações apresenta a vantagem de eliminar, ou ao menos reduzir alguns erros presentes nas observações originais. As ambiguidades, que são o número de ciclos inteiros percorridos pela onda em sua propagação, por exemplo, em alguns casos, apresentam resolutividade mais simples para as observações oriundas das diferenças do que para as observações originais. Araújo Neto (2017) ressalta que a dupla diferença de fase (DDF) é a técnica mais utilizada, principalmente nos softwares de pós-processamento.

A DDF é configurada na diferença de observáveis combinadas entre receptores e satélites, a partir de duas simples diferenças de fase (SD). Deste modo, a compreensão da SD proporciona um entendimento mais claro da DDF. Para tal,

aqui se faz o uso da terminologia apresentada por Leick et al. (2015). Inicialmente, considere a FIGURA 2:

FIGURA 2 – REPRESENTAÇÃO DA SIMPLES DIFERENÇA DE FASE



FONTE: Adaptado de Leick et al. (2016)

A SD, para este caso, é dada pela subtração de duas equações da fase da portadora ( $\varphi$ ) entre dois receptores ( $k$  e  $m$ ) no momento de recepção ( $t$ ) das observáveis da fase da portadora enviados de maneira simultânea por um satélite ( $A$ ), apresentado na equação (1).

$$\varphi_{km}^A(t) = \varphi_k^A(t) - \varphi_m^A(t) \quad (1)$$

Ao se expandir a equação, levando em consideração todos os elementos que compõem a equação da fase, o modelo acima torna-se (LEICK et al., 2015):

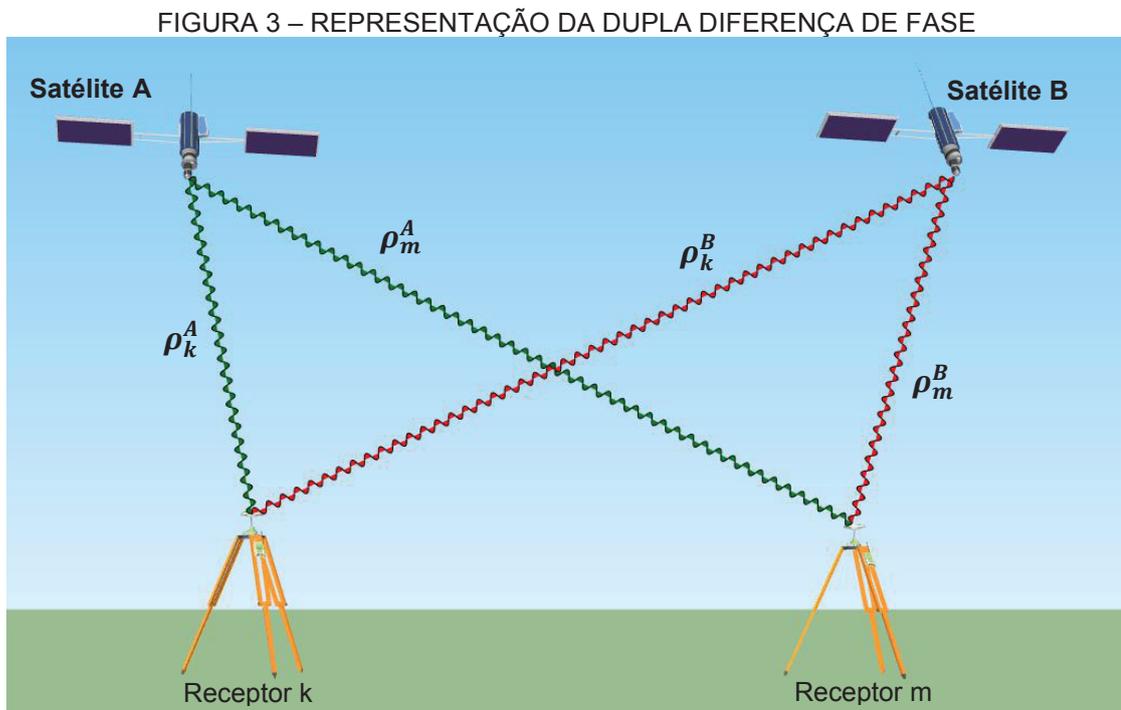
$$\begin{aligned} \varphi_{km,1}^p(t) = & \frac{f}{c} \rho_{km}^A(t^A) + N_{km,1}^A(1) - f(dt_k - dt_m) + I_{km,1,\varphi}^A(t) + \frac{f}{c} T_{km}^A(t) + \\ & + d_{km,1,\varphi}(t) + d_{km,1,\varphi}^A(t) + \varepsilon_{km,1,\varphi}^A \end{aligned} \quad (2)$$

em que:

- $f$ : frequência da portadora;
- $c$ : velocidade da onda (luz no vácuo);

- $\rho$ : representa as distâncias geométricas (vácuo);
- $N$ : representa o valor das ambiguidades;
- $I$ : representa o erro da Ionosfera;
- $T$ : representa o erro da troposfera;
- $M$ : representa os multicaminhamentos;
- $\varepsilon$ : representa os erros aleatórios.

Para a DDF, insere-se um segundo satélite ( $q$ ), com mostrado na FIGURA 3, ou seja, o modelo é gerado a partir da diferença entre duas SD.



FONTE: Adaptado de Leick (2004)

A Equação (3) apresenta o modelo matemático utilizado no cálculo para a dupla diferença de fase, já expandido, apresentando os principais elementos degradadores do posicionamento por satélites (LEICK et al. 2015).

$$\varphi_{km,1}^{AB}(t) = \frac{f}{c} \rho_{km}^{AB}(t^A) + N_{km,1}^{AB}(1) + I_{km,1,\varphi}^{AB}(t) + \frac{f}{c} T_{km}^{AB}(t) + M_{km,1,\varphi}^{AB}(t) + \varepsilon_{km,1,\varphi}^{AB} \quad (3)$$

em que:

- $\varphi_{km,1}^{AB}(t)$ : dupla diferença de fase na portadora (L1);

- $\rho_{km}^{AB} = \rho_{km}^A(t^A) - \rho_{km}^B(t^B)$ : diferenças entre as distâncias geométricas (vácuo);
- $N_{km}^{AB}(1) = N_{km}^A(1) - N_{km}^B(1)$ : diferença entre os valores das ambiguidades;
- $I_{km,\varphi}^{AB}(t) = I_{km,\varphi}^A(t) - I_{km,\varphi}^B(t)$ : diferença entre os erros da Ionosfera;
- $T_{km,\varphi}^{AB}(t) = T_{km,\varphi}^A(t) - T_{km,\varphi}^B(t)$ : diferença entre os erros da Troposfera;
- $M_{km,\varphi}^{AB}(t) = d_{km,\varphi}^A(t) - d_{km,\varphi}^B(t)$ : diferença entre os multicaminhamentos;
- $\varepsilon_{km,\varphi}^{AB}(t) = \varepsilon_{km,\varphi}^A(t) - \varepsilon_{km,\varphi}^B(t)$ : diferença entre os erros aleatórios.

Contudo, a partir da análise da equação da dupla diferença de fase, verifica-se que os erros randômicos remanescentes permanecem, sendo estes capazes de serem detectados a partir dos resíduos, mesmo com a eliminação dos principais erros inerentes ao método, efeitos de discrepância devido à variação do centro de fase da antena receptora, multicaminhamento e perdas de ciclo (ARAUJO NETO, 2017).

Segundo Larocca (2006), devido ao fato de os resíduos apresentarem diferentes comportamentos, a disposição destes possibilita o desmembramento entre os erros aleatórios e as informações referentes à movimentação dinâmica do corpo em estudo, para um levantamento no modo relativo, utilizando-se da análise espectral.

A tripla diferença é a diferença de duas DF ao longo do tempo (LEICK et al. 2015).

$$\Delta\varphi_{km,1}^{AB}(t) = \frac{f}{c} \Delta\rho_{km}^{AB} + \Delta I_{km,1,\varphi}^{AB} + \frac{f}{c} T_{km}^{AB} + M_{km,1,\varphi}^{AB} + \varepsilon_{km,1,\varphi}^{AB} \quad (4)$$

em que o símbolo  $\Delta$  significa que houve um intervalo de tempo.

#### 2.2.1.4 Resumo dos erros envolvidos no GNSS

Para a correta utilização do GNSS no posicionamento de alta precisão, é importante que o usuário detenha conhecimento acerca dos principais erros envolvidos na determinação do posicionamento por satélites. É importante que o usuário tenha ciência de tais erros e busque a sua minimização, ou até mesmo a eliminação, o que contribui para que sejam alcançados resultados de qualidade milimétrica, geralmente a finalidade do monitoramento dinâmico. A seguir, na

TABELA 3, são apresentados alguns dos principais erros inerentes ao posicionamento por satélites.

TABELA 3 – PRINCIPAIS ERROS INERENTES AO GNSS

Fonte	Erro
Satélite	Erro da órbita
	Erro do relógio
	Relatividade
Propagação do sinal	Refração da troposférica
	Refração da ionosfera
	Perdas de ciclo
	Multicaminhamento
	Rotação da terra
Receptor/Antena	Erro do relógio;
	Erro entre os canais;
	Centro de fase da antena

FONTE: Adaptado de MONICO (2008)

Existem metodologias específicas para a eliminação ou, ao menos, a redução dos efeitos destes erros. Por exemplo, para a ionosfera que, segundo Leick (2004), é a que mais prejudica o posicionamento por GPS, o principal efeito é caracterizado pela mudança de velocidade na propagação dos sinais enviados pelos satélites, resultando em atrasos e avanços na propagação das ondas, e conseqüentemente valores maiores e menores, respectivamente, para as pseudodistâncias, existem modelos desenvolvidos e implementados em *softwares* capazes de mitigar a degradação, além disto, a utilização de bases curtas também auxiliam na eliminação do erro causado pela ionosfera (SEEBER, 2003).

No entanto, existem casos em que somente a modelagem matemática não soluciona o problema. Por exemplo, com relação ao multicaminhamento, em que acontece a recepção na antena de sinais refletidos em superfícies vizinhas, ou seja, sinais que são desviados da menor trajetória entre satélite e receptor e chegam a antena após contato com outra superfície. Não existem modelos matemáticos capazes de mitigar o erro para todos os casos. Isso se deve ao fato de que cada levantamento envolve um ambiente distinto, com obstáculos e superfícies refletoras com características peculiares, e ainda com distintas geometrias com relação às posições dos satélites. Deste modo, a utilização de equipamentos adequados, como antenas do tipo *choke ring* e a escolha de locais adequados são possíveis atitudes

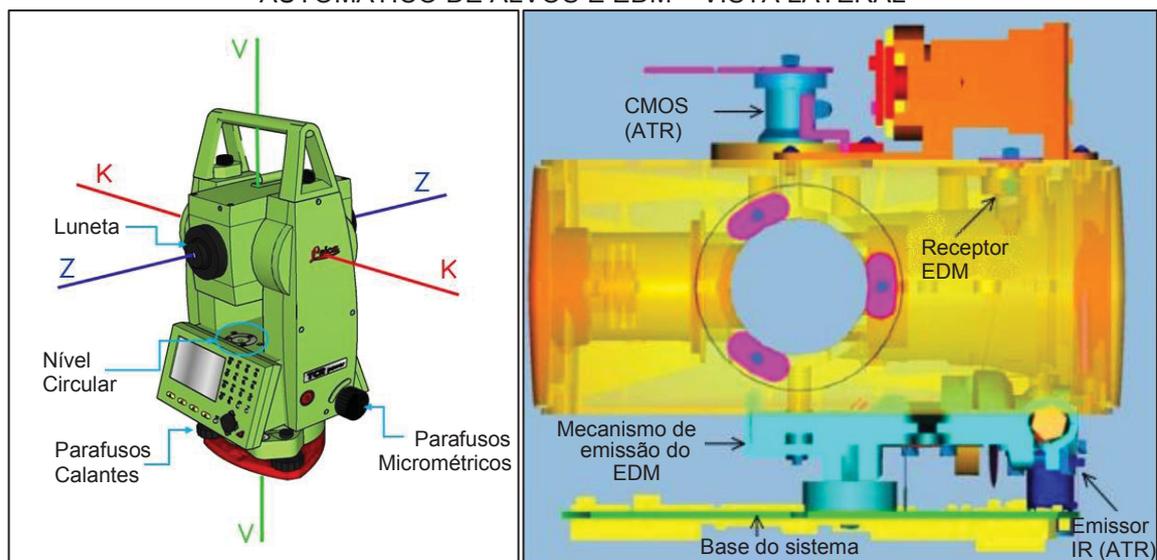
capazes de reduzir o efeito do multicaminhamento (HOFMANN-WELLENHOF, 2008).

### 2.2.2 Estações Totais Robotizadas (ETR)

As Estações Totais Robotizadas (ETR) são equipamentos compostos de um sistema de múltiplos sensores que permitem a medida de distâncias inclinadas (I), ângulos verticais (V) e direções horizontais (HZ) de forma automatizada, com intervenção mínima do operador, podendo ser controladas de maneira remota. Uma ETR possui sistemas de segmentação automatizados, sensores e motores, capazes de localizar e rastrear alvos: prismas (LIENHART, EHRHART e GRICK, 2016), fazendo uso de princípios de fotogrametria e sensoriamento remoto. Para a localização automática de alvos, uma ETR emite um feixe infravermelho (IR) que, ao retornar, é interpretado por um *Complementary Metal Oxide Semiconductor* - CMOS (EHRHART et al., 2015).

Para um melhor entendimento acerca do funcionamento de uma ETR, apresenta-se uma introdução dos principais elementos que a compõe, assim como o seu sistema de eixos, apresentados na FIGURA 4.

FIGURA 4 – A) PRINCIPAIS ELEMENTOS DE UMA ETR; B) SISTEMA DE RECONHECIMENTO AUTOMÁTICO DE ALVOS E EDM – VISTA LATERAL



FONTE: Adaptado de VEIGA et. al. (2012); LEICA (2007)

sendo:

- VV, o Eixo Vertical, Principal ou de Rotação do Instrumento;
- KK, o Eixo Secundário ou de Rotação da Luneta;
- ZZ, Eixo de Colimação ou Linha De Visada.

#### 2.2.2.1 Determinação de distâncias

O desenvolvimento de medidores de distância eletro-ópticos evoluiu de técnicas utilizadas para a determinação da velocidade da luz, partindo-se da medição do valor da velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas. O uso de ondas de rádio refletidas para medições de distância foi sugerido por tesla em 1889. No entanto, o primeiro medidor de distância eletro-óptico foi desenvolvido no Optical Institute da URSS em 1936. Em 1943 o cientista sueco E. Bergstrand projetou o primeiro Geodímetro, sendo o primeiro equipamento posto no mercado em 1950. O medidor de distância por micro-ondas, usando o princípio de medição da fase, foi desenvolvido por T. L. Wadley no Instituto Nacional de Pesquisa em Telecomunicações da África do Sul em 1954, já o laser foi introduzido nos anos 60. Mais recentemente, em 1983, os medidores empregando o princípio de medição por pulso foram postos no mercado (RÜEGER, 1996).

A velocidade de propagação da luz no meio não é possível de ser medida diretamente em campo; em virtude disso, utiliza-se a velocidade de propagação desta mesma onda estipulada para o vácuo, 299.792.458 m/s, e o índice de refração no meio ( $n$ ) para obter este valor. O índice de refração pode ser determinado em ensaios de laboratório durante o processo de fabricação do equipamento, utilizando como base um determinado comprimento de onda, pressão atmosférica e temperatura, e também pode ser calculado em campo (FAGGION, 2001).

Os medidores eletrônicos de distâncias (MED) são os componentes responsáveis pelas medidas lineares em uma ETR. Estes são dispositivos eletro-ópticos que utilizam uma fonte de luz infravermelha ou laser, para medidas com e sem prismas, respectivamente. Em ambos os casos, ao retornar, o sinal é dirigido pelo conjunto de lentes, através da luneta, para um receptor apropriado que analisa os dados de acordo com os tipos de alvo. Para tal, os MED utilizam dois princípios de funcionamento: I) o método de pulso e II) a medida da diferença de fase (RÜEGER, 1996).

### 2.2.2.1.1 O método de pulso ou *time-of-flight* (TOF)

No método de pulso, mostrado na FIGURA 5, o instrumento envia pulsos eletromagnéticos em direção ao alvo que, pela potência do tipo de sinal, refletem e retornam ao instrumento. Ou seja, a energia eletromagnética, transportada em ondas, é emitida pelo transmissor e refletida em direção à porta integrada no distanciômetro eletrônico, o qual usando o oscilador determina o tempo de percurso da onda. O sinal de partida abre uma conexão entre o oscilador e um contador de alta velocidade, essa conexão é fechada pelo pulso de retorno. A distância entre duas estações é dada pelo tempo de percurso, também chamado *time-of-flight*, segundo a Equação (5) (RÜEGER, 1996).

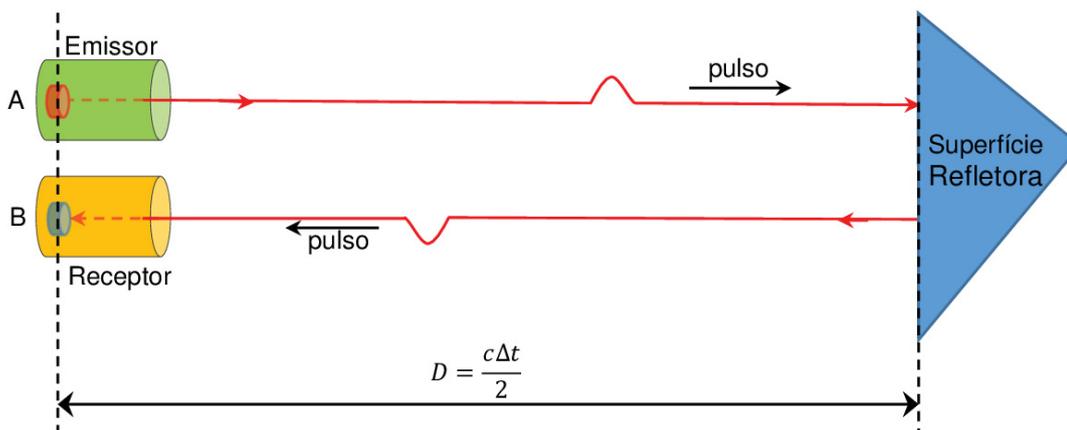
$$d' = c' \frac{(tr - te)}{2} \quad (5)$$

Onde:

- $d'$  é a distância eletrônica entre a estação e o alvo;
- $c'$  é velocidade da luz em um meio;
- $te$  é momento de saída, ou emissão, do pulso desde a porta A instante da emissão
- $tr$  é momento de retorno do pulso à porta B; instante do retorno.

Da equação (5), vê-se que a distância é diretamente dependente da velocidade da luz no meio. Como mencionado, o tempo de propagação é medido usando um sinal eletrônico aliado a técnicas de processamento. Embora apenas um único pulso seja necessário para obter uma distância, a confiabilidade sobre esta seria baixa. Com o intuito de melhorar a precisão da medida, um grande número de pulsos, geralmente na frequência de 20 Hz, é analisado durante cada medição para que se tenha então um valor confiável para a distância (Höglund e Large, 2005).

FIGURA 5 – REPRESENTAÇÃO DO MÉTODO POR PULSO



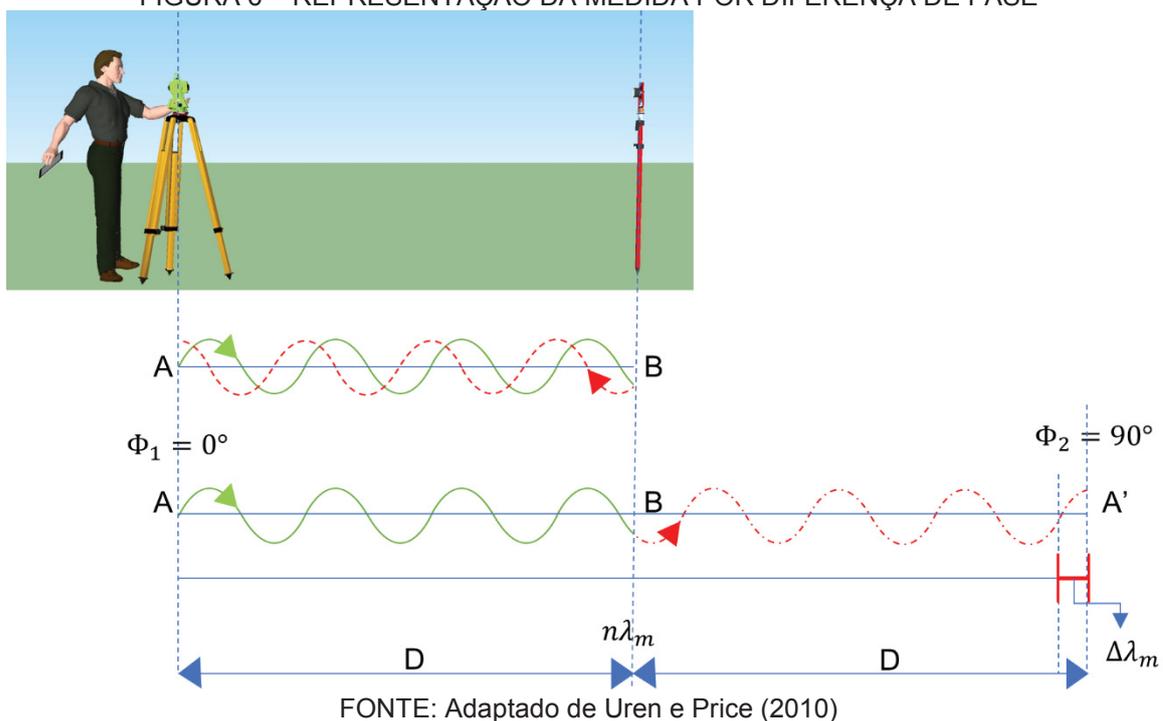
FONTE: Adaptado de RÜEGGER (1990)

A distância é fortemente dependente da qualidade da potência do sinal emitido. Ou seja, sinais mais fortes, como o laser, obtêm melhores resultados para este método. Assim, o método do pulso é amplamente indicado para a determinação de distâncias sem o uso de prismas (Höglund and Large, 2005). Segundo Rüeger (1996) este método é amplamente utilizado em outras aplicações nas ciências espaciais, tais como: Satellite Laser Ranging (SLR), Lunar Laser Ranging (LLR), Airborne Laser Terrain Pro filer, Laser Airborne Depth Sounder (LADS), dentre outras aplicações.

#### 2.2.2.1.2 Medida por Diferença de Fase

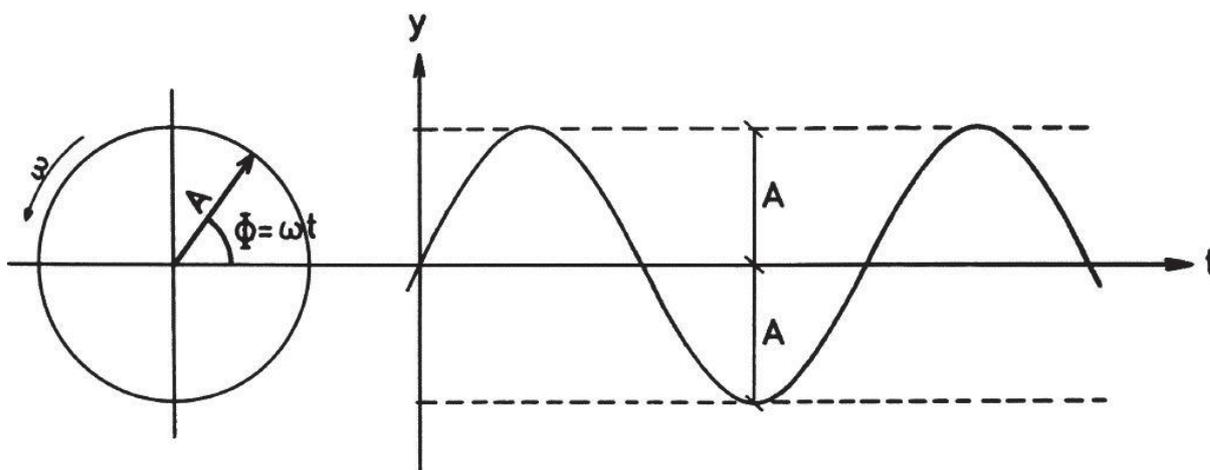
Este é o método utilizado na maioria dos MED. O método da medida por diferença de fase (MDF) se baseia na determinação da diferença entre a fase da onda eletromagnética no momento da emissão e no momento da recepção do sinal pelo instrumento (RÜEGGER 1996; FAGGION 2001). Como apresentado na FIGURA 6, a diferença de fase é tipicamente medida em graus, onde um ciclo completo é mede 360 graus.

FIGURA 6 – REPRESENTAÇÃO DA MEDIDA POR DIFERENÇA DE FASE



Uma onda eletromagnética é caracterizada, basicamente, por cinco elementos: sua amplitude ( $A$ ), velocidade angular ( $\omega$ ), sua frequência ( $f$ ), o ângulo de fase ( $\phi$ ) e o tempo de percurso do sinal ( $t$ ). Ainda, é possível correlacionar trigonometricamente estes elementos. Como mostra a FIGURA 7.

FIGURA 7 – CORRELAÇÃO TRIGONOMÉTRICA DOS ELEMENTOS DE UMA ONDA ELETROMAGNÉTICA



FONTE: RÜEGER (1996)

Matematicamente, este sinal eletromagnético pode ser reescrito em função das componentes trigonométricas do momento de emissão ( $Y_e$ ) e do momento de recepção ( $Y_r$ ) do sinal, como mostram as equações 6 e 10.

Sendo

$$Y_E = A \operatorname{sen}(\omega t) \quad (6)$$

mas, como:

$$\phi = \omega t \quad (7)$$

então:

$$Y_E = A \operatorname{sen}(\phi) \quad (8)$$

Seguindo o raciocínio semelhante:

$$Y_R = A \operatorname{sen}\omega(t + \Delta t) \quad (9)$$

$$Y_R = A \operatorname{sen}(\phi + \Delta\phi) \quad (10)$$

A distância pode ser obtida a partir da equação (5), no entanto, nesta técnica, não é possível de se obter o tempo de propagação  $\Delta t'$ , assim, em seu lugar, calcula-se a defasagem do sinal  $\Delta t$ , o que corresponde à quantidade de ciclos completos gerados, e acrescenta-se a porção deles no tempo de propagação do sinal. A relação entre o tempo de atraso e o tempo de propagação é dada pela equação (11):

$$\Delta t' = m t^* + \Delta t \quad (11)$$

Na equação,  $\Delta t'$  é o tempo de propagação;  $m$  é o número de ciclos completos (ambiguidades);  $t^*$  é o tempo necessário para um ciclo do sinal, e  $\Delta t$  é o tempo obtido na diferença de fase. No caso,  $\Delta t$  pode ser obtido como uma função da diferença da fase  $\Delta\phi$ , mediante a seguinte equação (RÜEGER, 1996):

$$\Delta t = \frac{\Delta\phi\lambda}{2\pi c} \quad (12)$$

em que  $\lambda$  é a modulação do comprimento da onda. O tempo de intervalo de um ciclo na modulação do comprimento (período) pode ser obtido da relação:

$$t^* = \frac{\lambda}{c} \quad (13)$$

Assim, substituindo na equação (4) com relação às equações (11) e (12), têm-se:

$$d = \frac{c}{2} (mt^* + \Delta t) \quad (14)$$

$$d = \frac{c}{2} \left( m \frac{\lambda}{c} + \frac{\Delta\phi\lambda}{2\pi c} \right) \quad (15)$$

$$d = m \frac{\lambda}{2} + \frac{\Delta\phi\lambda}{2\pi} \quad (16)$$

Na literatura, geralmente se substitui o termo  $\lambda/2$  por  $U$  ( $\lambda/2 = U$ ). Sendo este definido como o comprimento da unidade de um MED, ou seja, a escala com que o instrumento mede as distâncias. Chamando-se o segundo termo da equação de  $L$ , a qual representa uma fração da unidade de  $U$ , tem-se:

$$L = \frac{\Delta\phi}{2\pi} U \quad (17)$$

Deste modo, a obtenção da distância eletrônica por diferença de fase é dada pela equação fundamental:

$$d' = mU + L \quad (18)$$

No entanto, ressalta-se que a distância obtida no processo é uma distância eletrônica, ou pseudodistância, a qual necessita ser corrigida dos erros originados

das características locais como temperatura, pressão, umidade, dentre outros. Para um maior aprofundamento sobre estas correções, recomenda-se a leitura de Rüeger (1996), Faggion (2001) e Carvajal (2018).

#### 2.2.2.2 Medidas angulares eletrônicas

Os limbos dos teodolitos eletrônicos são cobertos com um revestimento não transparente com códigos específicos de espaçamento, podendo haver intervalos regulares (solução incremental) e irregulares (solução de código de barras). Um conjunto de fotodiodos é usado como um leitor em solução incremental e um CCD (dispositivo de carga acoplada) é aplicado como um leitor na solução de código de barras (LEVIN *et al.*, 2017).

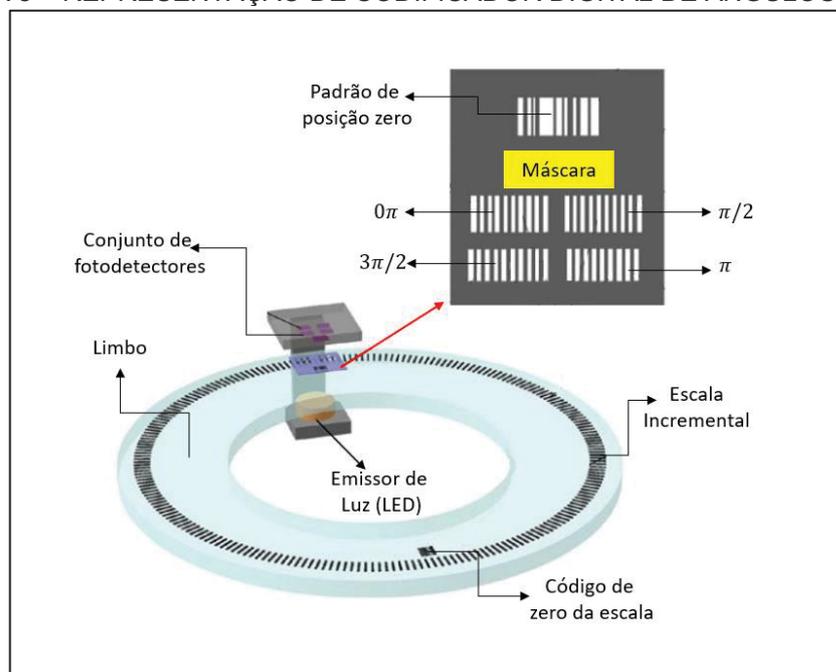
##### 2.2.2.2.1 Codificador Rotativo Incremental

Um sistema de medição incremental é um sistema de medição acumulativo. No processo de medição, o sistema incremental realiza o somatório de frações da quantidade angular medida. A luz emitida por um diodo é condensada por meio de uma lente condensadora para uma máscara com uma grade de fendas. No momento em que a grade se move, ocorre a modulação senoidal da luz de entrada do fotodetector. Para que seja possível determinar o sentido do giro, são necessários no mínimo dois canais, por isso, o sensor tem duas fendas deslocadas uma em relação à outra, com diferença de fase de noventa graus, assim como dois fotodetectores. Deste modo, quando a grade se move para uma direção, o sinal senoidal em uma das saídas dos fotodiodos avança e o sinal de saída do outro fotodiodo regride. Quando a grade se move na direção inversa, ocorre o inverso (LEVIN *et al.*, 2017).

Basicamente, neste sistema, tanto as direções horizontais quanto os ângulos verticais são medidos, principalmente, com a utilização de círculos de cristal (vidro), gravados com códigos binários (opaco/transparente), um diodo emissor de luz (LED) e fotodetectores. A luz emitida atravessa o limbo através das zonas claras e é barrada nas zonas escuras. O feixe sofre uma difração, se torna variável, é absorvido e convertido em sinais digitais pelo fotodetector, por sua vez, este os envia para um microprocessador. Finalmente, o sinal é convertido em uma saída

angular, podendo ser mostrada no visor do aparelho. A FIGURA 8 representa um sistema codificador de ângulos.

FIGURA 8 – REPRESENTAÇÃO DE CODIFICADOR DIGITAL DE ÂNGULOS BINÁRIO



FONTE: Adaptado de LEVIN et al. (2017)

A partir do número de pulsos contados, é possível determinar a magnitude do ângulo rotacionado. No entanto, devido ao fato de as estações totais serem equipamentos cuja finalidade, muitas vezes, é a determinação de medidas angulares na ordem de frações de segundo, apenas esta contagem não é suficiente. Por exemplo, se o número de traços radiais for 20.000, cada passo representa 2 minutos, medida inadequada para a finalidade geodésica. Ainda, a contagem é feita em um valor absoluto, ou seja, torna-se inviável detectar se o giro foi efetuado no sentido horário ou anti-horário. Estes problemas são sanados com a introdução de escalas secundárias e mais fotodetectores (GARCIA, 200?).

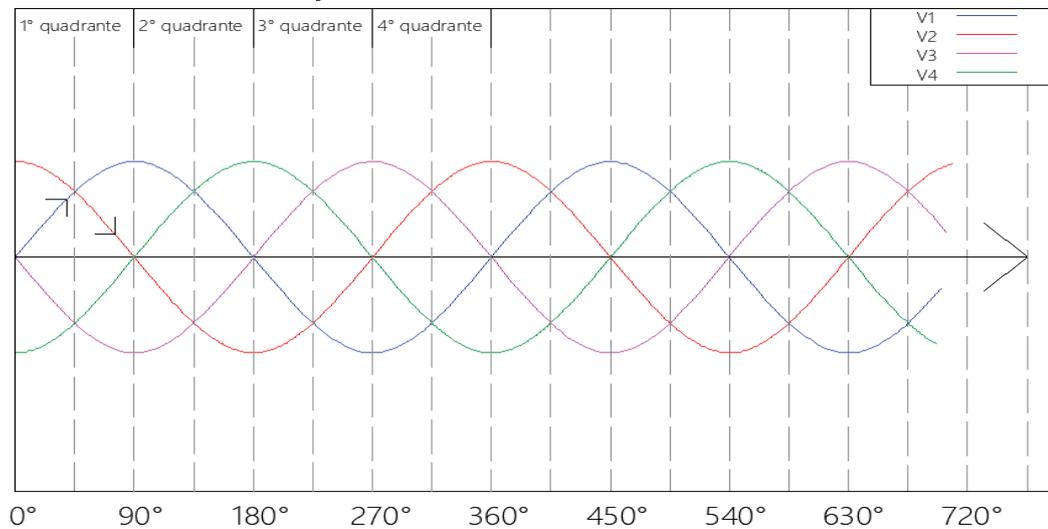
Inicialmente, para se obter o sentido de giro, necessita-se que o um segundo fotodetector seja implementado ao sistema, espaçado de  $90^\circ$  graus do primeiro no sentido horário. Como estes dispositivos interpretam o comportamento escuro/claro em um formato senoidal, o primeiro ( $V_1$ ) origina um sinal seno, já o segundo ( $V_2$ ) um sinal cosseno. Desta maneira, o sistema identifica qual dos dois sinais foi produzido primeiro. Caso  $V_1$  seja gerado primeiro, têm-se um giro no sentido horário, caso  $V_2$ , no sentido contrário, como vistos nas equações 19 e 20.

$$V_1 = A \times \text{sen}\varphi \quad (19)$$

$$V_2 = A \times \text{sen}(\varphi + 90) = A \times \text{cos}(\varphi) \quad (20)$$

O aumento da precisão na leitura angular é obtido por interpolação, como mostrado na FIGURA 9. Para tal, utilizam-se 4 fotodetectores, espaçados de 1/4 de volta ( $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$  e  $270^\circ$ ).

FIGURA 9 – INTERPOLAÇÃO PARA AUMENTO DA PRECISÃO NA LEITURA ANGULAR



FONTE: Adaptado de Garcia (200?)

Os sinais originam o seguinte sistema de equações:

$$V_1 = A \times \text{sen}(\varphi) \quad (21)$$

$$V_2 = A \times \text{sen}(\varphi + 90) = A \times \text{cos}(\varphi) \quad (22)$$

$$V_3 = A \times \text{sen}(\varphi + 180) = -A \times \text{sen}(\varphi) \quad (23)$$

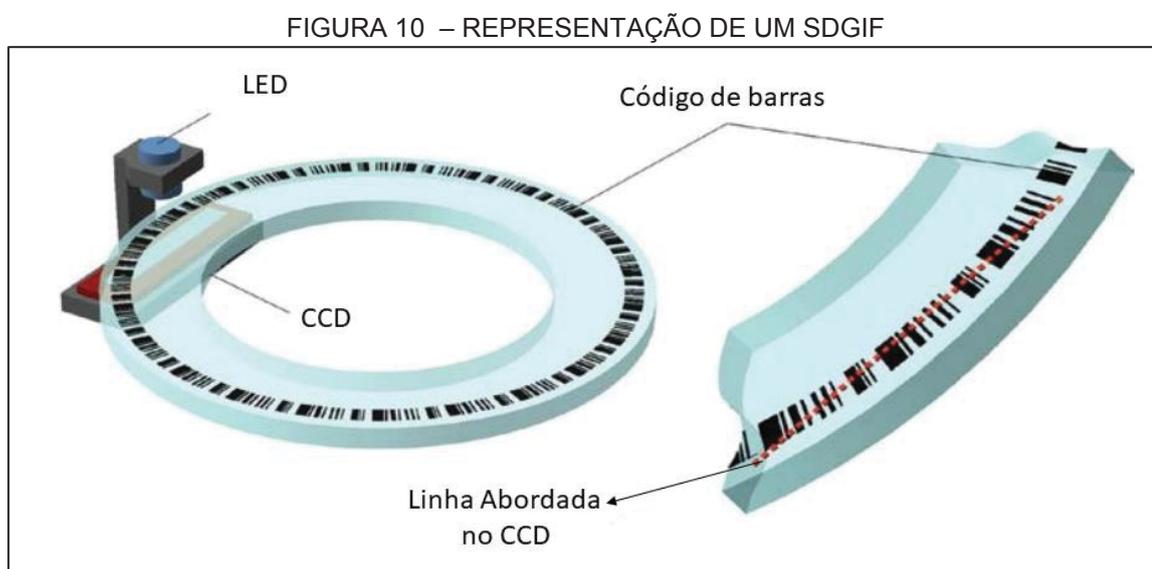
$$V_4 = A \times \text{sen}(\varphi + 270) = -A \times \text{cos}(\varphi) \quad (24)$$

Eletronicamente, a leitura angular é obtida pela equação (24)

$$\frac{V_1 - V_3}{V_2 - V_4} = \tan(\varphi) \quad (25)$$

### 2.2.2.2.2 Scanner Decodificador Giratório Incremental Fotoelétrico - SDGIF

Este sistema possui um limbo codificado que é lido por fotodetector, semelhante a um leitor de código de barras. As posições claras e escuras dos sensores fornecem um código binário que é traduzido em valor angular. Existem dois métodos: medição estática, em que o fotodetector é fixo, e a medição dinâmica em que este se move junto com a alidade do equipamento. A FIGURA 10 exemplifica este sistema (LEVIN et al., 2017).



FONTE: Adaptado de LEVIN et. al. (2017)

### 2.2.2.3 Reconhecimento Automático de Alvos

Para o funcionamento automatizado, uma ETR conta com um sistema de reconhecimento automático de alvos, para a marca Leica, ATR (*automatic target recognition*) capaz de localizar e rastrear prismas em tempo real, ou seja, durante o levantamento realizado. O nome do sistema varia entres as marcas dos equipamentos, no entanto, o princípio de funcionamento é o mesmo.

O ATR utiliza princípios do sensoriamento remoto. Basicamente, consiste em uma fonte que emite um feixe infravermelho (IR) em direção ao alvo a partir da luneta do equipamento. O raio atinge o prisma, reflete e retorna ao telescópio. Ao retornar, o feixe é direcionado por um filtro IR para um sensor específico CMOS cuja função é a determinação da posição angular em função do tamanho de seus pixels.

No sensor CMOS, que na ETR TS15 cada pixel possui uma resolução de aproximadamente um segundo de arco (LEICA, 2015), o raio infravermelho refletido aparece para o equipamento como um foco de luz, ou seja, o alvo é identificado pela sua reflectância, como mostrado na FIGURA 11a e mais precisamente no CMOS, como na FIGURA 11b (GRICK et al., 2016).

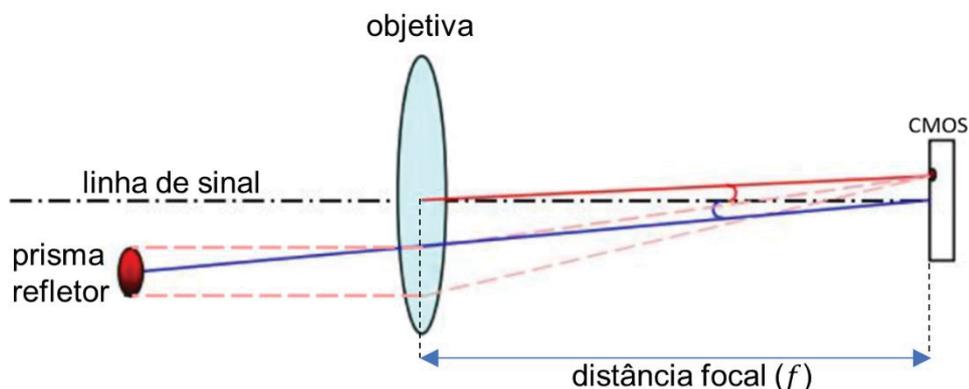


FONTE: Adaptado de LEICA (2020)

Em seguida, são utilizados algoritmos de aquisição e processamento digital de imagens para a localização do centro do foco de luz, e posterior determinação das coordenadas do centro do prisma, com precisão de subpixel. Com essas coordenadas, o ATR calcula os desvios do centro a partir do centro do eixo óptico. Combinando estas informações aos resultados dos decodificadores de ângulos, e ainda com os dos sensores de inclinação do equipamento, a direção horizontal e o ângulo vertical finais são obtidos (LEICA, 2015).

Como na maioria das tecnologias de medição por imagem digital, o tamanho do pixel é utilizado como a base de todo o processo. No sistema ATR, cada pixel do CMOS é referenciado a um sistema da imagem, de tal modo que cada um destes possui um exclusivo par de coordenadas  $(x, y)$ . De acordo com Leica (2007), a imagem formada é relacionada às informações angulares do objeto visado, no caso, prismas, facilitado pelo formato circular destes. A FIGURA 12, a seguir, apresenta a metodologia utilizada pelo sistema para a determinação da posição angular dos alvos.

FIGURA 12 – DETERMINAÇÃO DA POSIÇÃO ANGULAR DOS ALVOS POR ATR



FONTE: Adaptado de LEICA (2007)

Da figura, observa-se que o ângulo entre a linha de sinal (linha tracejada) e a linha do objeto (linha em azul) é igual ao ângulo entre a linha de sinal e a linha da imagem (em vermelho). Deste modo, a posição angular do objeto, referente à imagem no CMOS, é determinada a partir do ângulo entre a linha da imagem e a linha do sinal, bastando para tal o conhecimento da distância focal do equipamento e o tamanho do pixel no CMOS e o tipo de prisma utilizado, sendo esta última informação necessária para a determinação do afastamento (offset) do centro focal do prisma a partir do foco de luz. A transformação do espaço real para o espaço 2D, do equipamento, ocorre pela projeção das diferenças das medidas das direções horizontais e do ângulo zenital (LEICA, 2007).

Para a determinação do centro do prisma, inicialmente, o raio infravermelho é enviado e a posição do foco de luz é detectada no CMOS, onde o centro é obtido pela inserção de um *offset* baseado no modelo de prisma inserido no equipamento; em um próximo passo os desvios das direções verticais e horizontais, com relação à linha de visada são calculados internamente, obedecendo a um certo limite, dado pelo tamanho do CMOS. Caso o limite seja respeitado, os desvios são adicionados à direção medida. Caso extrapolados, a luneta do equipamento é reposicionada. Ao final, são adicionadas as correções oriundas das leituras do compensador de inclinação na direção do sinal de visada ( $t_{comp}$ ) e do compensador ortogonal a este  $l_{comp}$  (LIENHART, 2016). Deste modo, as leituras de ângulos, fornecidas pelo equipamento são dadas por:

$$\alpha = \alpha_{bruto} + ATR_{\alpha} + t_{comp} \quad (31)$$

$$Z = Z_{bruto} + ATR_Z + l_{comp} \quad (32)$$

Em que:

- $\alpha_{bruto}, Z_{bruto}$  são as medidas obtidas dos codificadores angulares
- $ATR_{\alpha}, ATR_Z$  são as correções oriundas do ATR
- $t_{comp}, l_{comp}$  são as correções advindas dos compensadores de inclinação

Deste modo, para a determinação da posição de um alvo, a ETR faz uso de 4 sistemas, sendo os três mencionados acima, acrescidos do EDM.

Leica (2007) destaca que durante a montagem a geometria do CMOS é cuidadosamente calibrada, de modo que os ângulos e direções medidos garantam precisão melhores que 1 segundo.

### 2.3 ANÁLISE DE SINAIS

A análise do comportamento dinâmico de uma estrutura se caracteriza, através de duas propriedades fundamentais: i) as frequências naturais da estrutura e; ii) modos naturais de vibração (DOEBLING, 1998).

As frequências naturais apontam a taxa de oscilação livre da estrutura. Esta frequência é função direta da rigidez, e inversa da massa do corpo estrutural, dada por um número real positivo, cuja unidade mais comum é o Hertz. Já os modos de vibração caracterizam como a estrutura vibra, e se relaciona a cada uma de suas frequências naturais. Ou seja, para cada frequência natural existe um modo de vibração específico, um perfil de vibração. (DOEBLING, 1998; ZOU, 2000).

Uma estrutura possui diversas frequências naturais pois ela pode vibrar livremente em diversas direções, sendo a primeira frequência a mais preponderante ao movimento oscilatório, e os demais modos de vibração insignificantes frente a este. As vibrações estruturais são caracterizadas como movimentos mecânicos repetitivos, periódicos ou aleatórios, com relação a uma posição do repouso (DOEBLING, 1998).

As frequências de vibração podem ser obtidas a partir da análise do espectro frequência/energia da estrutura, por detecção de picos. Ou seja, as

movimentações periódicas no domínio do tempo são transformadas para o domínio das frequências resultando em picos de energia para determinadas frequências. Este procedimento pode ser executado com a utilização da Transformada de Fourier Rápida (FFT), uma adaptação da clássica Transformada de Fourier (*Fourier Fast Transform* – FT) que demanda um menor consumo computacional.

A Transformada de Fourier consiste em um dos modelos matemáticos mais utilizados para análises espectrais de processos no domínio do tempo e frequência. A sua utilização permite representar o espectro do comportamento da estrutura no domínio do tempo, além filtrar informações para a análise do elemento medido (ARAUJO NETO, 2017). O modelo matemático elaborado por Fourier, disponível na biblioteca de algoritmos de *softwares* matemáticos, como o MatLab® e Microsoft Excel®, permite identificar periodicamente a amplitude e frequência comportamental de uma estrutura estudada.

A análise de Fourier clássica tem o seu marco inicial na física-matemática, onde foram produzidos estudos cuja finalidade era resolver equações diferenciais que envolviam calor e ondas eletromagnéticas. Ressaltando-se que o objetivo fundamental era a aproximação de uma função no domínio do tempo por uma combinação linear de componentes senoidais. Deste modo, FFT permite transformar uma função periódica em uma função reestruturada baseada em equações de seno e cosseno sem perder a sua essência da função original, como mostrado na equação (26), a seguir (MORETTIN, 2014).

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \{a_n \cos(\lambda_n t) + b_n \text{sen}(\lambda_n t)\} \quad (26)$$

sendo os coeficientes:

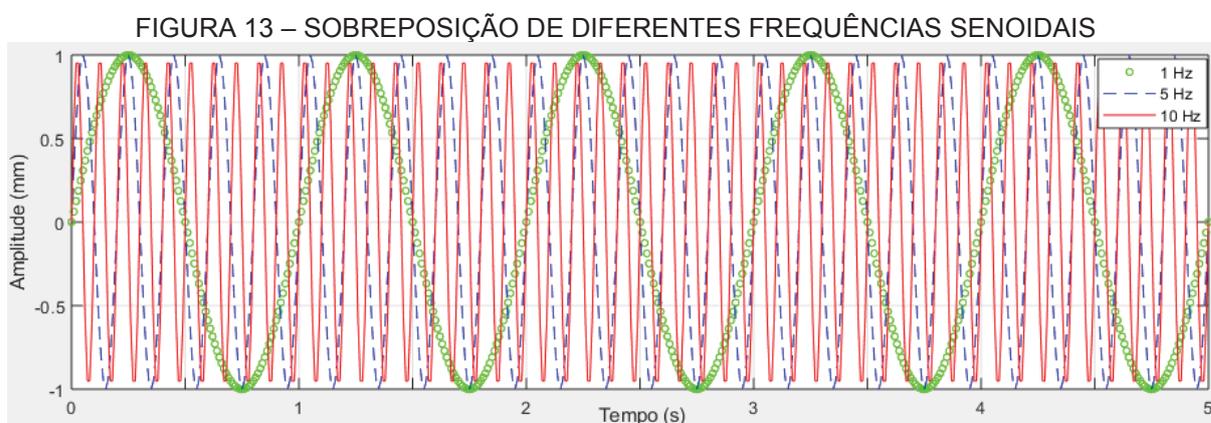
$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(\lambda_n t) dt, \quad n \geq 0 \quad (27)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} F(t) \sin(\lambda_n t) dt, \quad n \geq 1 \quad (28)$$

em que  $F(t)$  é a série temporal e  $\lambda$  é a frequência em que cada componente oscilatório

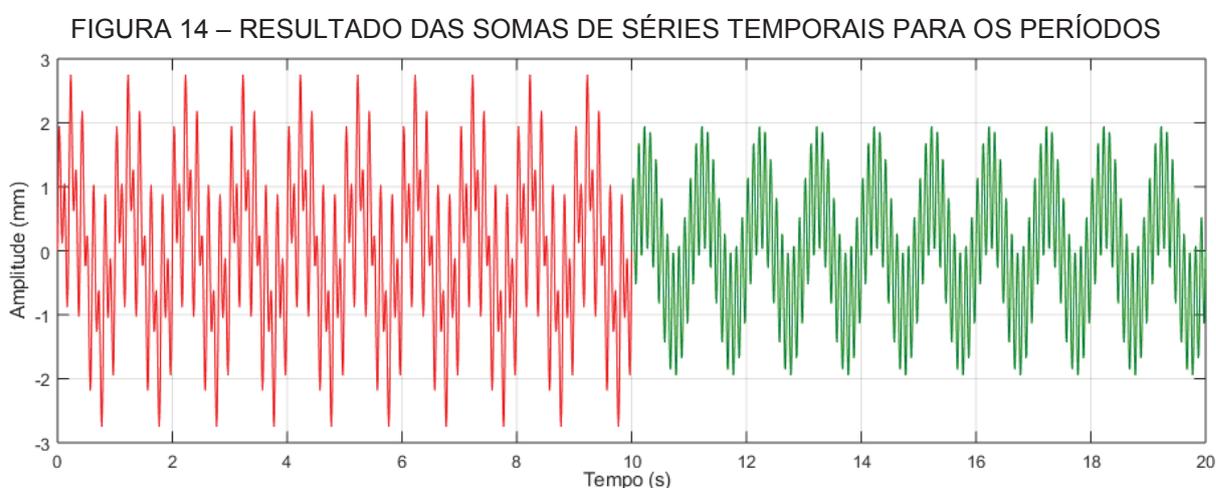
disposto no sinal é representado por diferentes frequências encontradas na série,  $T$  é o tamanho dos intervalos amostrais, e a exponencial  $e$  representa a transformação da série para o espaço das frequências.

Bolzan (2006) utiliza três séries temporais de funções senos em um intervalo de 16 segundos e frequências diferentes, 1, 5 e 10 Hz, conforme FIGURA 13, com a finalidade de ilustrar o procedimento da aplicação da FT de forma didática.



FONTE: Adaptado de Bolzan (2006)

No exemplo, Bolsan (2006) combina a soma das séries em duas etapas, como mostrado na a FIGURA 14, sendo o resultado similar aos conjuntos de funções no domínio do tempo encontrados na natureza.



FONTE: Adaptado de Bolzan (2006)

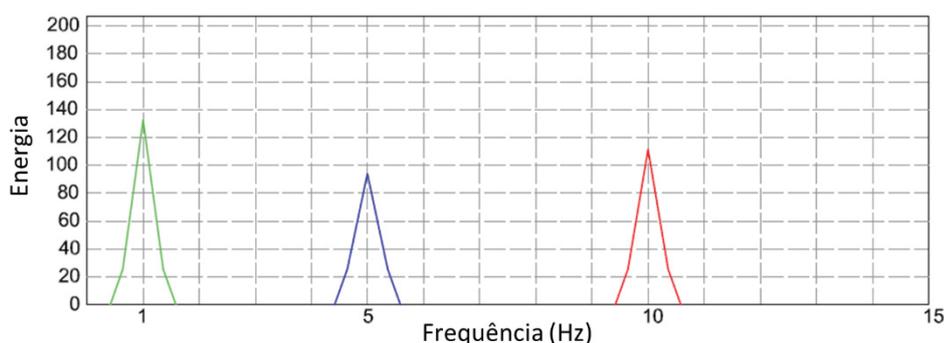
Na primeira etapa, entre 0 e 10 s, utiliza-se as três séries propostas; na segunda, entre 10 e 20 s, utiliza-se apenas as frequências de 1 e 10 Hz. Deste modo, para ilustrar, é possível perceber que no primeiro intervalo o gráfico apresenta comportamento mais desordenado, em comparação ao resultado do somatório da segunda metade da função resultante.

O desordenamento é uma característica peculiar à quantidade de funções temporais que originam a função resultante e a qualidade distintiva é pertinente.

Assim, ao se fazer uma analogia com as observações obtidas por GNSS, observa-se que o gráfico proveniente do processamento dos dados dispõe de erros inerentes ao sistema e da série que representa a movimentação dinâmica da estrutura. Deste modo, o conjunto de funções resultantes é apresentado de forma mais desordenada e de difícil percepção.

Segundo Morettin (2014), ao se aplicar a Transformada de Fourier na série temporal combinada por diferentes frequências, é possível identificar os picos do espectro de energia sobre suas respectivas frequências (FIGURA 15), o que demonstra a característica fundamental da FT. Ainda, nota-se que cada pico de frequência isolada apresenta diferentes níveis de energia no eixo das ordenadas, e que cada frequência apresenta seu comportamento de forma isolada. Essa característica contribui para o entendimento da resposta dinâmica de uma estrutura, devido ao fato de que uma mesma frequência pode apresentar diferentes intensidades em distintos intervalos de tempo.

FIGURA 15 – DISPOSIÇÃO DAS FREQUÊNCIAS E DOS ESPECTROS DE ENERGIA RESULTANTE APÓS A APLICAÇÃO DA TF

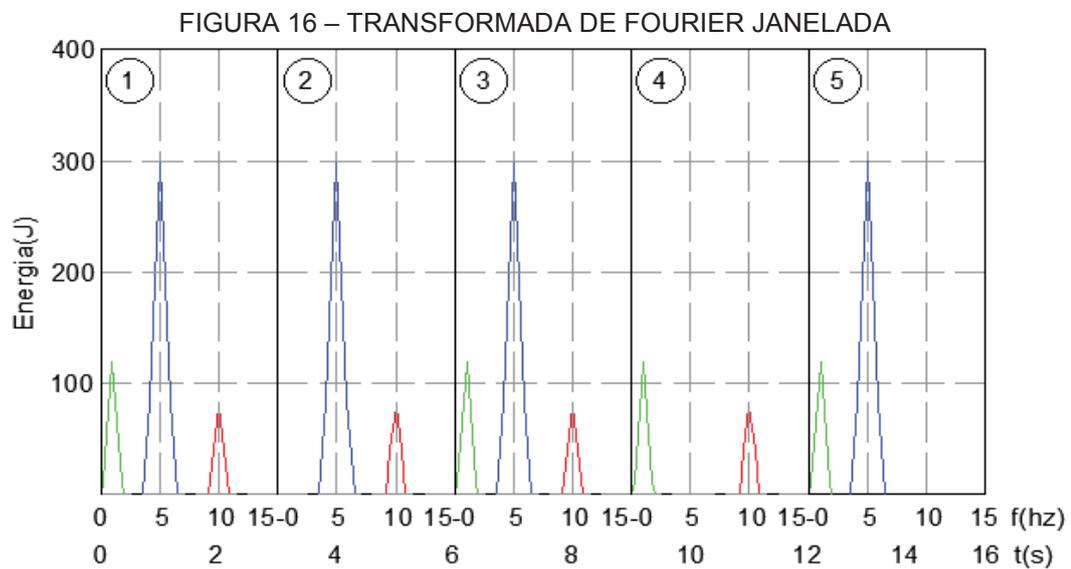


FONTE: Adaptado de Bolzan (2006)

No entanto, como visto na figura acima, ao se aplicar a FT, perde-se a característica temporal das respostas da estrutura. Essa peculiaridade é exatamente a principal limitação da transformação inicial proposta por Fourier. Essa limitação

impossibilita identificar o momento em que ocorreu o evento originador de tais frequências.

Uma solução para o problema da impossibilidade de posicionamento temporal dos eventos foi proposta por Gabor, em 1946, a chamada Transformada de Fourier Janelada. Esta proposta consiste em desmembrar os eventos em intervalos menores e, a partir destes aplicar a transformada de Fourier. Assim, a precisão temporal para as frequências fica condicionada ao tamanho dos intervalos, que possuem tamanho fixo, como mostrado na FIGURA 16 em que o intervalo de 15 segundos foi dividido em intervalos de 3 segundos, e aplicada a FT.



De maneira geral, os trabalhos dessa linha de pesquisa utilizam a Transformada Rápida de Fourier (FFT – Fast Fourier Transform), que se trata de um algoritmo especial de implementação da DFT para torná-la mais rápida no processamento. É pertinente que a FFT forneça resultados iguais a DFT, no entanto, em tempo reduzido e com menor poder computacional. O modelo matemático da DFT utilizado pelos softwares computacionais, por exemplo, o MatLab, é apresentado na equação (29), a seguir (WEEKS, 2012; ARAUJO NETO, 2017):

$$X[m] = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \left( \cos\left(\frac{2\pi nm}{N}\right) - j \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi nm}{N}\right) \right) \quad (29)$$

Em que,  $m = 0, \dots, N - 1$  e  $j$  representa o número complexo. Ainda, a equação anterior pode ser expressa com o uso da exponencial em vez de senoides, facilitando a análise, sendo expressa por:  $e^{-j2\pi nm/M}$ , e apresentado na equação (30).

$$X[m] = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \left( e^{-\frac{j2\pi nm}{M}} \right) \quad (30)$$

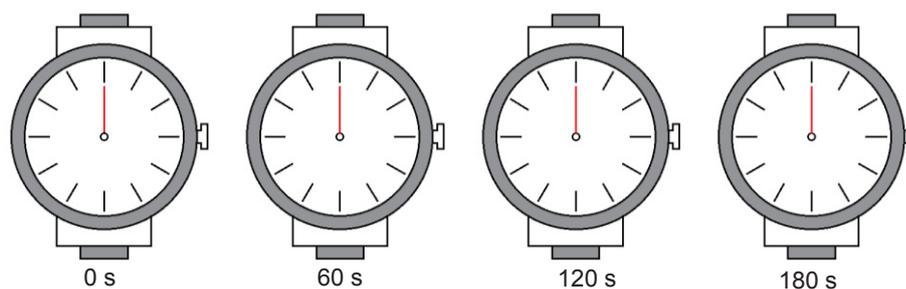
Seguindo o exposto, esta pesquisa utilizará a FFT como filtro passa banda, com a finalidade de identificar e quantificar os deslocamentos e amplitude máxima destes nos eixos da estrutura, tendo em vista que aqui interessa saber a escala de tempo em que ocorreu o valor máximo, pois o interesse imediato é o valor da variação da frequência a partir do deslocamento pico a pico da estrutura.

### 2.3.1 Efeito Aliasing

Um critério quantitativo para a coleta de sinais é fornecido pelo teorema da amostragem, ou Teorema de Nyquist, o qual afirma que, para a representação precisa de um sinal  $x(t)$  por suas amostras de tempo  $x(nT)$ , duas condições devem ser respeitadas: primeiro, o sinal  $x(t)$  deve ser limitado por banda, isto é, seu espectro de frequência deve ser limitado a conter frequências até alguma frequência máxima; e segundo, a taxa de amostragem  $f_s$  deve ser escolhida para ser pelo menos o dobro da frequência máxima  $f_{max}$  (ORFANIDIS, 2010). Caso a frequência de amostragem não seja suficientemente alta, ocorre a sobreposição do espectro (*aliasing*), impossibilitando recuperar o sinal original.

Para entendimento de maneira didática do teorema, pode-se imaginar avaliar o comportamento do ponteiro que marca os segundos em um relógio de pulso por meio de fotografias. Em um primeiro instante, imagina-se o caso em que as fotografias sejam tomadas a cada exatos 60 segundos (FIGURA 17). Sabe-se que este é o tempo necessário para que o ponteiro complete uma volta inteira. No entanto, ao analisar as fotografias, pode-se chegar, displicentemente, à conclusão de que o relógio esteja parado.

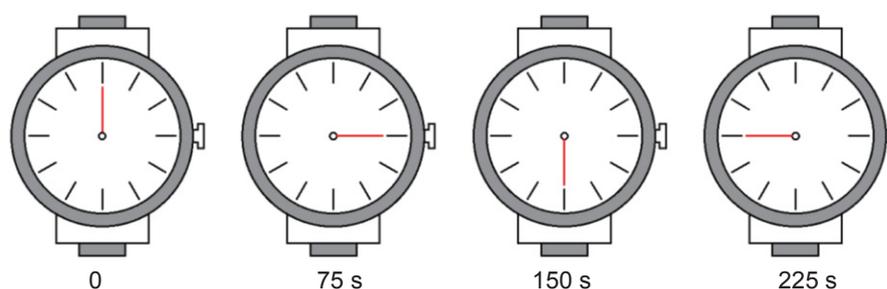
FIGURA 17 – EXEMPLO DO TEOREMA DA AMOSTRAGEM IMAGENS A CADA 60 SEGUNDOS



FONTE: O autor (2020).

Agora, imagina-se que uma fotografia seja tomada a cada 75 segundos (FIGURA 18). Durante este intervalo, o ponteiro de um relógio percorre uma volta completa mais um quarto de volta. No entanto, como as imagens apresentam um evento discreto, as fotografias induzirão o intérprete a crer que o ponteiro percorreu apenas um quarto de volta.

FIGURA 18 – EXEMPLO DO TEOREMA DE AMOSTRAGEM IMAGENS A CADA 75 SEGUNDOS



FONTE: O autor (2020).

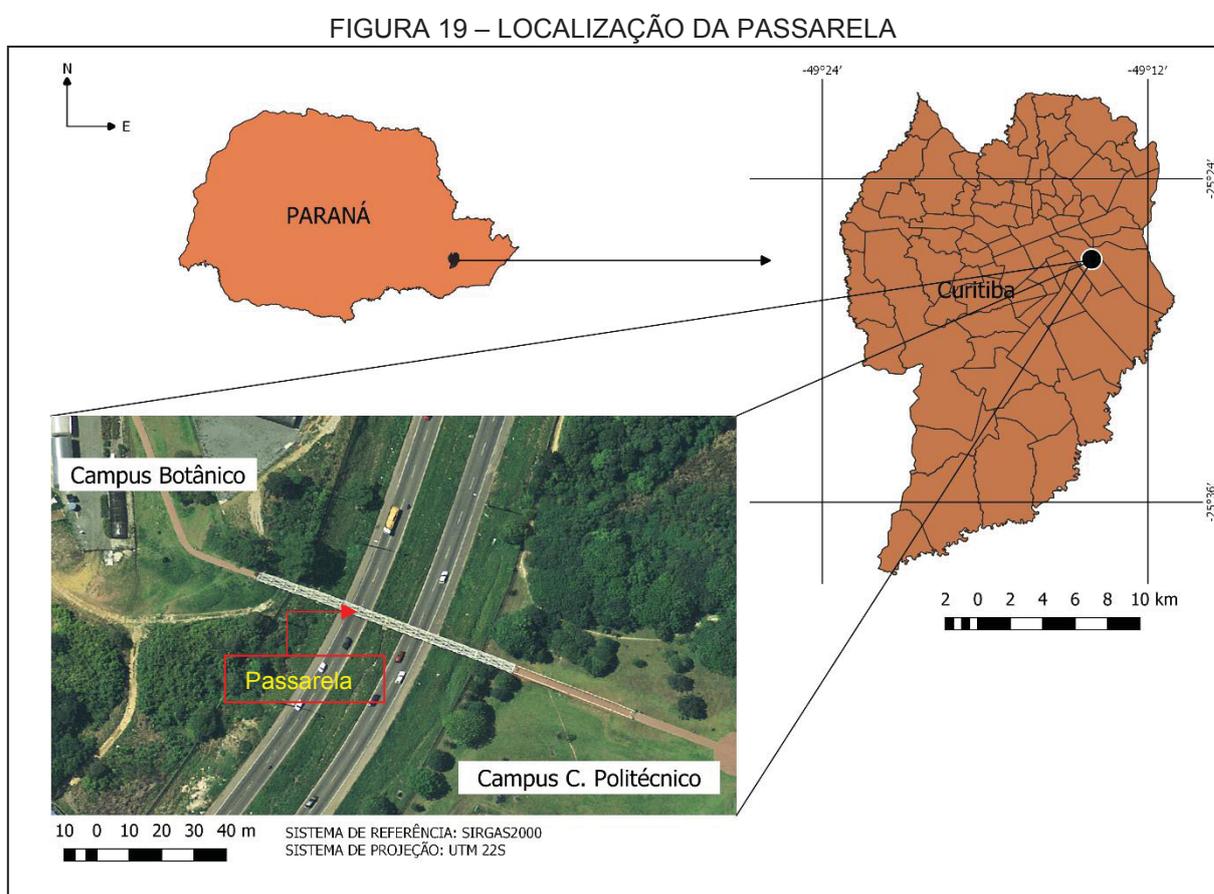
Ou seja, de acordo com o teorema da amostragem, para o caso do relógio, a frequência mínima de amostragem deveria ser de uma fotografia a cada 30 segundos, o dobro da frequência de uma volta do ponteiro.

Trazendo para o presente trabalho, de acordo com o teorema e com a capacidade máxima de rastreamento dos equipamentos GNSS, 20 Hz, e da ETR, cerca de 20 Hz, a frequência máxima de vibração detectável é de 10 Hz. O que, segundo os trabalhos abordados até aqui, é superior à frequência natural aproximada de vibração de grandes estruturas, tais como pontes e viadutos, variando de 4 a 8 Hz.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Os experimentos foram realizados em um ponto fixado sobre a estrutura da passarela metálica que liga os campi Centro Politécnico e Botânico, da Universidade Federal do Paraná, na Cidade de Curitiba. Utilizou-se o pilar P1000 sobre o Laboratório de Geodésia Espacial e Hidrografia – LAGEH, como ponto de base GNSS e ponto de orientação da ETR. A FIGURA 17 apresenta a localização dos experimentos.



##### 3.1.1 Características da passarela

A passarela em estudo (FIGURA 20) foi inaugurada no ano 2000, construída a partir de um convênio entre a UFPR e a prefeitura de Curitiba. A estrutura metálica

possui 89 m de comprimento, sendo sustentada por três pilares, destacados em vermelho, com fundação em concreto.

FIGURA 20 – IMAGEM DA PASSARELA MONITORADA



FONTE: O autor (2020)

## 3.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

### 3.2.1 Receptores GNSS

Para o rastreamento GNSS foram utilizados dois pares de receptores da marca Leica, sendo um destes do modelo GS16, com taxa de rastreamento máxima de 20 Hz, disponibilizado pela empresa Hexagon Leica Geosystems, sucursal Curitiba; o segundo par é do modelo GS15 (FIGURA 21), no qual foi necessária a realização de um upgrade, passando este de 5 Hz para 20 Hz de capacidade máxima de rastreamento, e cujas precisões segundo o fabricante são: horizontal de  $\pm(3 \text{ mm} + 0,5 \text{ ppm})$ ; vertical de  $\pm(1\text{mm} + 1,5 \text{ ppm})$ , para o modo estático. Este segundo par pertence ao Laboratório de Geodésia Aplicada a Engenharia – GEENG, da UFPR.

FIGURA 21 – GNSS GS15 UTILIZADO NO EXPERIMENTO



FONTE: O autor (2020).

### 3.2.2 Estação Total TS15

Utilizou-se uma Estação Total Robotizada (ETR) modelo Leica TS15 pertencente ao Laboratório de Geodésia Aplicada à Engenharia da UFPR. Este equipamento, segundo as especificações do fabricante, possui precisão angular de 1" e precisão linear de  $\pm(1\text{mm} + 1,5 \text{ ppm})$ , e precisão do ATR de 0,3 mgon. A FIGURA 22 ilustra tal equipamento (LEICA, 2015).

FIGURA 22 – ETR LEICA TS15 UTILIZADA NO EXPERIMENTO



FONTE: O autor (2020).

### 3.2.3 Prismas Refletores

Utilizaram-se prismas do modelo GPR111, da marca Leica, como mostrado na FIGURA 23. Estes prismas, quando utilizados com estações totais da mesma marca, possui sua constante igual a zero.

FIGURA 23 – PRISMAS REFLETORES UTILIZADOS NO EXPERIMENTO



FONTE: O autor (2020)

Observa-se que um dos prismas teve sua estrutura adaptada. Isto foi necessário para o prisma pudesse ser acoplado ao suporte específico (FIGURA 24) desenvolvida para a utilização de em conjunto a uma antena GNSS em um mesmo plano vertical, de maneira simultânea.

### 3.2.4 Suporte para prisma e antena GNSS

Para o monitoramento simultâneo da estrutura por duas técnicas distintas, GNSS e ETR, empregou-se um dispositivo (FIGURA 24) desenvolvido por Palazzo (2008) em pesquisas anteriores do GEENG-UFPR. Este equipamento possibilita que um prisma e uma antena GNSS sejam acoplados sobre o mesmo eixo vertical.

FIGURA 24 – SUPORTE PARA PRISMA E ANTENA GNSS



FONTE: O autor (2020).

### 3.2.5 Base Nivelante

O conjunto de instrumentos foi posicionado a um parafuso universal fixado na estrutura por meio de uma base nivelante. Como mostrado na FIGURA 25

FIGURA 25 – CONJUNTO SOBRE A BASE NIVELANTE



FONTE: O autor (2020).

Para a escolha do ponto de monitoramento, buscou-se o local da passarela que apresentasse maior propensão a vibrações. Para tanto, utilizou-se inicialmente o aplicativo *Best Vibrometer*®, gratuito, disponível na loja de aplicativos para celulares com sistema *Android*. Esse aplicativo possibilita a mensuração aproximada de vibrações a partir da movimentação dos sensores inerciais de um *smartphone*. Foram coletados pontos sobre os pilares de sustentação e também nos pontos médios dos vãos da passarela. Com o resultado destes experimentos, foi possível ao autor escolher um local no centro da passarela distante 27 m medidos a partir da entrada da passarela, no sentido Centro Politécnico para Setor de Ciências Sociais Aplicadas. Este local coincide aproximadamente com ponto médio entre os pilares de sustentação da passarela.

### 3.2.6 Sensor meteorológico

Para a determinação dos parâmetros de correção da primeira velocidade aplicados às observações obtidas do medidor eletrônico de distância, utilizou-se um sensor meteorológico da marca Extech modelo RHT10 (FIGURA 27).

FIGURA 26 – SENSOR METEOROLÓGICO UTILIZADO



FONTE: O autor (2020).

### 3.2.7 Laptop

Durante o levantamento, utilizou-se um laptop, marca Apple, modelo Macbook Pro, conectado à estação via cabo serial RS232.

## 3.3 PROTOCOLOS E SOFTWARES UTILIZADOS

Para o levantamento dos pontos com estação total, utilizou-se um script desenvolvido em ambiente *matlab* para o envio de comandos do computador para a estação, via protocolo Leica GeoCom®.

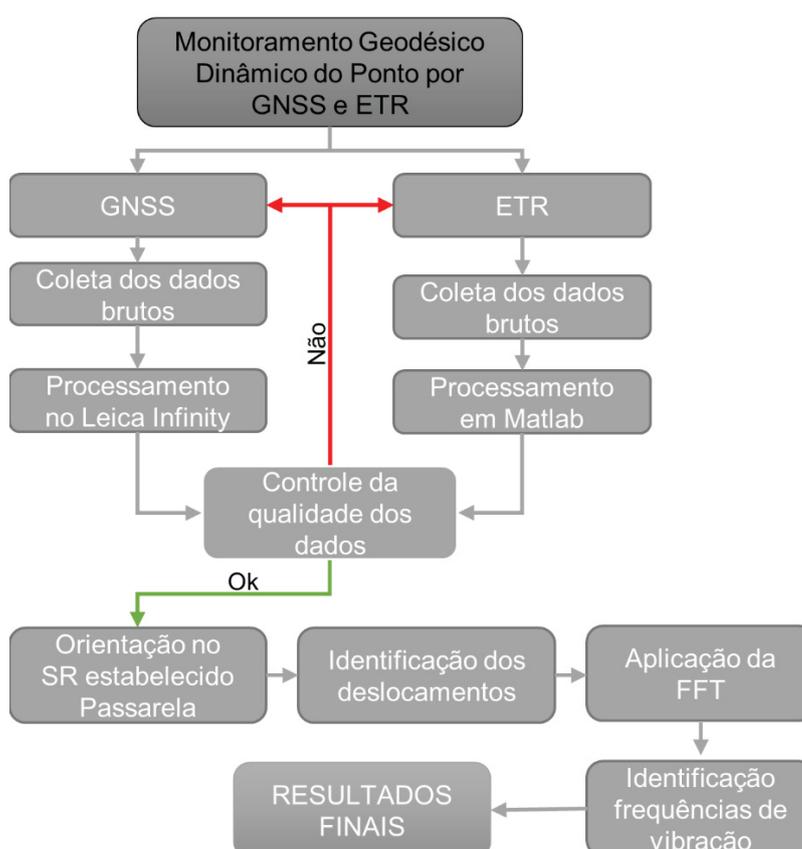
Os cálculos relativos ao processamento dos dados obtidos por ETR foram realizados utilizando-se de *softwares* desenvolvidos pelo autor em plataforma Excel e Matlab.

No processamento dos dados GNSS, utilizou-se o software Leica Infinity® versão 2.1, com licença *floating* pertencente à UFPR.

### 3.4 FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA EMPREGADA

Para que fossem alcançados os objetivos do trabalho, seguiu-se o seguinte fluxograma (FIGURA 28):

FIGURA 27 – FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA A SER EMPREGADA



FONTE: O autor (2020).

### 3.5 DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE REFERÊNCIA DA PASSARELA

A análise dos deslocamentos e frequências de vibração da estrutura foi realizada com relação ao eixo de caminhamento, ao eixo transversal e ao eixo vertical da passarela. Para tanto, adotou-se um sistema de referência cujos eixos coincidem com os eixos mencionados. Ainda, este sistema local possibilitou a compatibilização entre os dados obtidos com a ETR e os dados oriundos do levantamento GNSS.

A implementação do sistema local foi realizada com o levantamento com GNSS e com estação total de dois pontos em ambas as extremidades de entrada da estrutura, lado Politécnico e lado Botânico, de modo que a reta que passa por estes dois pontos é paralela ao eixo de caminhamento. Um terceiro ponto foi utilizado como estação de monitoramento, próximo ao LAGEH. Utilizou-se também o pilar P1000, sobre este laboratório, como ponto de orientação para a estação total e também como ponto da base GNSS para os levantamentos GNSS.

Os pontos citados foram levantados utilizando rastreadores GNSS, com rastreio aproximado de 2 horas por ponto. Tendo em vista que a linha de base, partindo da estação UFPR da Rede Brasileira de Monitoramento contínuo RBMC, é inferior a 400 metros para todos os pontos, que serão utilizados nesta pesquisa garantiu-se uma precisão submilimétrica para cada um destes. A TABELA 4, apresenta as coordenadas em SIRGAS2000, época 2000.4, dos pontos auxiliares utilizados no experimento.

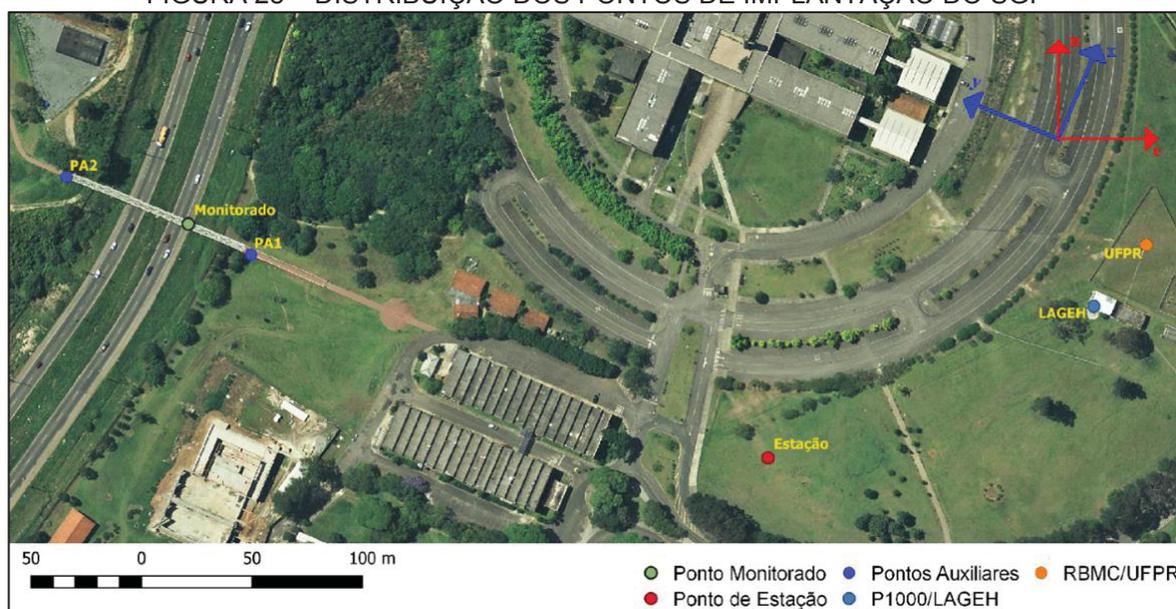
TABELA 4 - COORDENADAS EM SIRGAS2000, ÉPOCA 2000.4, DOS PONTOS AUXILIARES

	Latitude	Longitude	h (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
LAGEH	25°26'55.06"S	49°13'52.31"O	927.2583	3763726	-4365121.35	-2724431.256
Monitorado	25°26'54.06"S	49°14'06.96"O	914.8565	3763417	-4365390.2	-2724398.14
Estação	25°26'57.75"S	49°13'57.05"O	916.8912	3763596	-4365173.9	-2724501.456
PA1	25°26'54.45"S	49°14'05.99"O	912.4395	3763433	-4365366.89	-2724408.072
PA2	25°26'53.37"S	49°14'08.92"O	912.0743	3763380	-4365430.92	-2724377.853

FONTE: O autor (2020).

O processamento foi realizado no modo relativo estático, utilizando efemérides precisas. A FIGURA 29 esquematiza a distribuição dos pontos de implantação do sistema.

FIGURA 28 – DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE IMPLANTAÇÃO DO SGP



FONTE: O autor (2020).

No teste realizado, a distância inclinada entre o Ponto de Estação e o Ponto monitorado foi de 299,187 m, e a distância horizontal de 299,177 m, com ângulo zenital médio de 90°27'09".

Para que fosse possível determinar os deslocamentos dos pontos monitorados no sistema de referência da estrutura, inicialmente, fez-se necessária transformação entre os sistemas geodésico global para um sistema geodésico cartesiano local (SGCL) (Andrade, 2003), com origem arbitrada no Ponto de Estação.

A transformação de coordenadas no SGC para o SGCL, exige a aplicação de três rotações e uma translação, sendo convencionado o sentido anti-horário como positivo. Neste caso, ocorrerá uma transformação passiva, ou seja, o espaço permanece inalterado, e somente o sistema de referência é modificado (LUGNANI, 1987). As rotações nos três eixos são representadas a seguir:

$$R_x(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & \text{sen}(\alpha) \\ 0 & -\text{sen}(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix}$$

$$R_y(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & 0 & -\text{sen}(\alpha) \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen}(\alpha) & 0 & \cos(\alpha) \end{bmatrix}$$

$$R_z(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) & 0 \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Para a obtenção das coordenadas no SGCL, aplica-se o seguinte modelo:

$$\begin{bmatrix} e \\ n \\ u \end{bmatrix} = R_x(90^\circ - \varphi_0)R_z(90^\circ - \lambda_0) \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix}$$

que se expandindo, torna-se:

$$\begin{bmatrix} e \\ n \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin(\varphi_0) & \cos(\varphi_0) \\ 0 & -\cos(\varphi_0) & \sin(\varphi_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin(\lambda_0) & \cos(\lambda_0) & 0 \\ -\cos(\lambda_0) & -\sin(\lambda_0) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix}$$

em que:

$e, n, u$  – coordenadas no SGCL

$\varphi_0, \lambda_0$  – latitude e longitude geodésica do ponto origem do sistema

$X, Y, Z$  – coordenadas cartesianas geodésicas do ponto a ser transformado

$X_0, Y_0, Z_0$  – coordenadas cartesianas geodésicas do ponto origem do sistema

Por fim, para a transformação do SGCL para o sistema da estrutura, aqui, sistema da passarela SP, aplica-se o seguinte conjunto de equações:

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} = R^{-1} \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{bmatrix}$$

sendo:

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

e

$$\theta = \frac{y - y_0}{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}}$$

em que:

$x_P, y_P, z_P$  – coordenadas dos pontos no sistema da estrutura;

$e, n, u$  – coordenadas no SGCL do ponto a ser transformado;

$x_0, y_0, z_0$  – coordenadas no SGCL do ponto de origem do sistema;

$R$  – matriz de rotação entre o SGCL e o SP.

Adotou-se o ponto PA01 como origem do sistema local, resultando nas seguintes coordenadas no SGL (TABELA 5).

TABELA 5 - COORDENADAS DOS PONTOS NO SGL

Ponto	$e$ (m)	$n$ (m)	$u$ (m)
LAGEH	-382,261	18,780	14,807
Ponto monitorado	27,105	-12,002	2,417
Estação	-249,809	101,565	4,446
PA2	81,873	-33,238	-0,366

FONTE: O autor (2020).

O ângulo de rotação ( $\theta$ ) entre os sistemas SGL e SGP foi de  $67^\circ 54' 14.93''$ , positivo no sentido anti-horário. Com a finalidade de eliminar valores negativos para as coordenadas no SGP, foram somados 1000 m, 500 m e 100 m às coordenadas  $x$ ,  $y$  e  $z$  da origem, respectivamente, o que resultou nas seguintes coordenadas para os pontos no sistema da estrutura (TABELA 6).

TABELA 6 - COORDENADAS DOS PONTOS NO SGP

Ponto	$x$ (m)	$y$ (m)	$z$ (m)
LAGEH	1126,390	138,749	114,807
Monitorado	1000,925	529,629	102,417
Estação	999,861	230,334	104,446
PA1	1000,000	500,000	100,000
PA2	1000,000	588,363	99,634

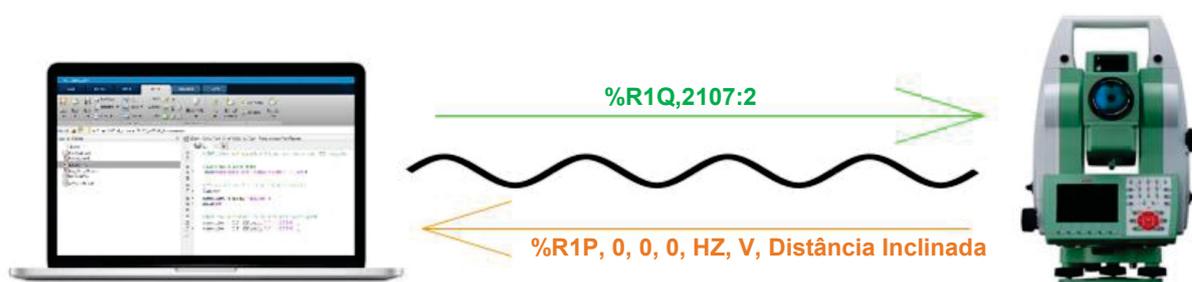
FONTE: O autor (2020).

### 3.6 MONITORAMENTO COM ETR

Como mencionado, neste estudo, utilizou-se utilizada uma estação total robotizada modelo TS15 da marca Leica Geosystems. Para o uso deste equipamento no monitoramento dinâmico de estruturas a altas taxas de rastreamento, faz-se necessária a utilização de um controlador externo, considerando o fato de em suas configurações originais o equipamento operar na frequência aproximada de 1 Hz quando em modo de rastreamento cinemático.

Os equipamentos Leica utilizam um protocolo de comunicação específico, o GeoCOM®. Este protocolo é responsável pela comunicação do equipamento com um computador, possibilitando o fluxo de informações via porta serial, por meio de um cabo RS232 ou por *bluetooth*. Segundo Carvajal (2018) o sistema opera baseado no conceito “servidor – usuário”, em que o intercâmbio de informações é caracterizado no formato ASCII. Basicamente, a comunicação entre o computador e a estação ocorre por meio do envio e recebimento de *streams*. Neste processo, as mensagens enviadas pelo computador são codificadas com as iniciais “%R1Q”, já as respostas, enviadas pelo equipamento, são codificadas com as iniciais “%R1P”. Para exemplificar, a FIGURA 30 apresenta o modelo de mensagens utilizado no envio e recebimento de uma mensagem para a aquisição de uma direção horizontal, ângulo zenital e distância inclinada.

FIGURA 29 – REPRESENTAÇÃO DA COMUNICAÇÃO GEOCOM



FONTE: O autor (2020).

Por se tratar de um experimento que exige um fluxo de dados aproximadamente contínuo, ou seja, como o mínimo de interrupções possíveis, optou-se pela utilização um cabo serial modelo RS232 como caminho do fluxo de dados.

Deste modo, desenvolveu-se uma rotina em ambiente matlab para a coleta dos dados via estação total robotizada. Utilizou-se para tal o software Matlab versão 2017B.

Após a conexão do cabo em ambos os equipamentos, o procedimento de configuração se inicia com a abertura digital da porta serial do computador e do equipamento. Após este procedimento, se inicia a configuração geral da comunicação entre as máquinas, como, por exemplo, a configuração da taxa de transmissão de dados, ou *Baud Rate* (FIGURA 30).

FIGURA 30 – CONFIGURAÇÃO DA COMUNICAÇÃO LAPTOP/ETR

```
>> get(s)
ByteOrder = littleEndian
BytesAvailable = 0
BytesAvailableFcn =
BytesAvailableFcnCount = 48
BytesAvailableFcnMode = terminator
BytesToOutput = 0
ErrorFcn =
InputBufferSize = 512
Name = Serial-/dev/tty.usbserial
ObjectVisibility = on
OutputBufferSize = 512
OutputEmptyFcn =
RecordDetail = compact
RecordMode = overwrite
RecordName = record.txt
RecordStatus = off
Status = open
Tag =
Timeout = 5000
TimerFcn =
TimerPeriod = 1
TransferStatus = idle
Type = serial
UserData = []
ValuesReceived = 0
ValuesSent = 0
SERIAL specific properties:
BaudRate = 115200
BreakInterruptFcn =
DataBits = 8
DataTerminalReady = on
FlowControl = none
Parity = none
PinStatus = [1x1 struct]
PinStatusFcn =
Port = /dev/tty.usbserial
ReadAsyncMode = continuous
RequestToSend = on
StopBits = 1
Terminator = LF
```

FONTE: O autor (2020).

É necessário que o usuário atente para a correta configuração inicial do sistema, pois procedimentos indevidos nesta etapa implicarão em erros nas observações futuras. Por exemplo, o sistema deve funcionar de maneira que o equipamento envie respostas ao computador apenas após a geração de uma nova observação, visto acima na configuração de sincronização (*ReadAsyncMode*), que deve estar configurado como *continuous*, de modo contrário, observações duplicadas para épocas distintas poderão ocasionar erros de leituras.

Durante a configuração dos parâmetros de comunicação entre os aparelhos, realizaram-se alguns testes em laboratório (FIGURA 32.A) com a finalidade de averiguar o correto funcionamento do conjunto, utilizou-se um tripé industrial

(FIGURA 32.b) desenvolvido no projeto final de curso de Engenharia Cartográfica de Vinicius André Boese, projetado para absorver vibrações naturais advindas do solo. Além disto, os experimentos tiveram a finalidade de avaliar a frequência de trabalho da estação total robotizada, realizando apenas a leitura contínua de ângulos. Este procedimento, segundo o levantamento bibliográfico realizado até aqui, foi pioneiramente apresentado por Lienhart, Ehrhart e Grick (2016).

FIGURA 31 – TESTES REALIZADOS EM LABORATÓRIO



FONTE: O autor (2020).

Escolheu-se esta metodologia, ou seja, leitura contínua apenas dos ângulos, devido ao fato de, segundo estudos realizado por Palazzo (2008), Ehrhart e Lienhart (2015), dentre outros, as estações totais robotizadas apresentam uma diferença de tempo entre a obtenção dos ângulos e das distâncias medidas, o que implicaria na inserção de erros às observações.

O teste consistiu na configuração do sistema para a realização da coleta de 5000 leituras, um volume de dados suficiente para a análise da frequência amostral do equipamento. A qual se localizou predominantemente acima de 18 Hz, como apresentado na TABELA 7.

TABELA 7 – QUANTIDADE DE MEDIDAS POR FREQUÊNCIA

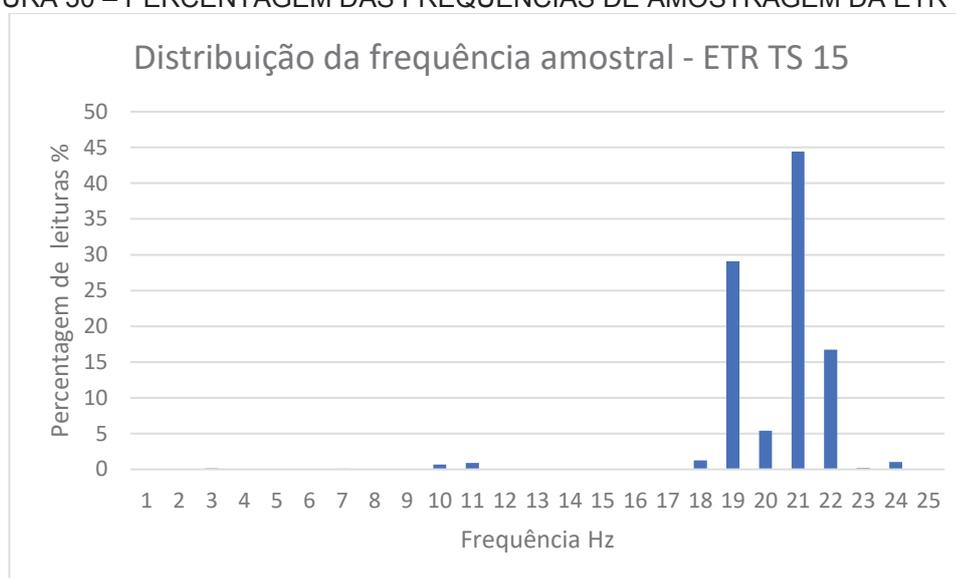
Frequência (Hz)	Quant. Intervalo Leituras
2 a 3	7
5 a 6	1
6 a 7	4

(continuação)

Frequência (Hz)	Quant. Intervalo Leituras
9 a 10	33
10 a 11	45
16 a 17	2
17 a 18	62
18 a 19	1455
19 a 20	270
20 a 21	2222
21 a 22	837
22 a 23	8
23 a 24	51
24 a 25	2

FONTE: O autor (2020).

FIGURA 30 – PERCENTAGEM DAS FREQUÊNCIAS DE AMOSTRAGEM DA ETR TS 15



FONTE: O autor (2020).

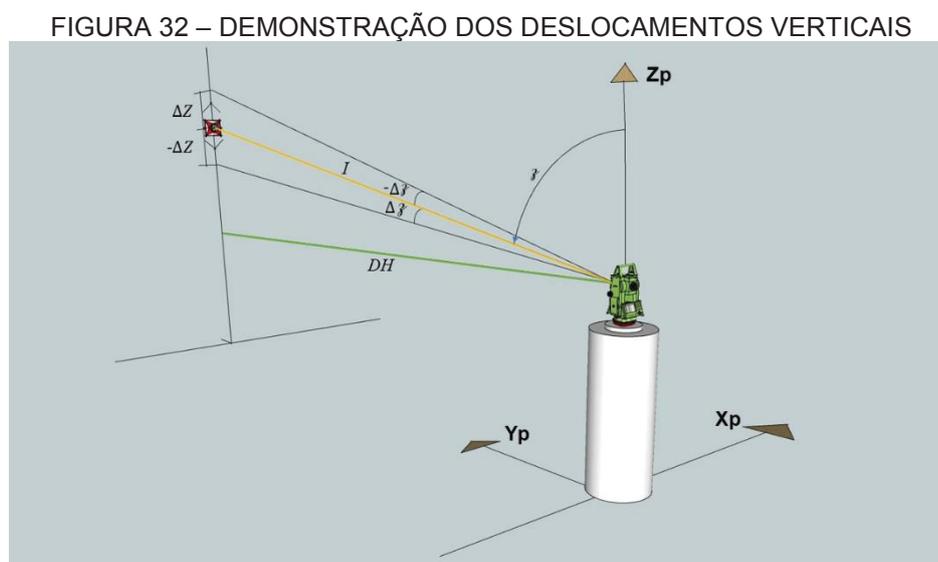
A TABELA 8 apresenta a disposição dos dados de uma amostra dos dados obtidos em laboratório. Da esquerda para a direita, o prefixo de resposta, %R1P, os zeros indicam que não houve erro na coleta, em seguida, têm-se as informações angulares e dos compensadores de inclinação.

TABELA 8 - AMOSTRA DE DADOS OBTIDOS DURANTE O TESTE EM LABORATÓRIO

			HZ (°)	V (°)	Acurácia (°)	Tempo (ms)	Inclinômetro Transversal (°)	Inclinômetro longitudinal (°)	Acurácia (°)	Tempo (ms)	
%R1P	0	00:00	3,3951071	1,5797538	0,000004712389	527889	0,000022719	0,0000227684	0,000003141593	527876	0
%R1P	0	00:00	3,3950974	1,5797636	0,000004712389	527893	0,000022719	0,0000227684	0,000003141593	527876	0
%R1P	0	00:00	3,3950829	1,5797631	0,000004712389	527899	0,000022650	0,0000223063	0,000003141593	527901	0
%R1P	0	00:00	3,3950925	1,5797535	0,000004712389	527904	0,000022650	0,0000223063	0,000003141593	527901	0
%R1P	0	00:00	3,3950925	1,5797535	0,000004712389	527908	0,000022650	0,0000223063	0,000003141593	527901	0

FONTE: O autor (2020).

Para os experimentos de campo, os cálculos dos deslocamentos verticais e transversais ao eixo de caminhamento da passarela foram realizados em função das variações do desnível entre a estação e o ponto monitorado, e em função da variação da direção horizontal, utilizando para este cálculo a média da distância horizontal medida no início e no final de cada série de leituras, a média do ângulo zenital, e a média da direção horizontal para cada experimento, como mostrado na FIGURA 31 e FIGURA 32.



FONTE: O autor (2020).

A equação seguinte equação foi implementada para a determinação dos deslocamentos verticais, ou seja, para cada uma das épocas coletadas.

$$\Delta H = \left[ \sum_{i=1}^n \frac{(DH/\tan(V))}{n} \right] - \frac{DH}{\tan(V)} \Big|_i^n \quad (33)$$

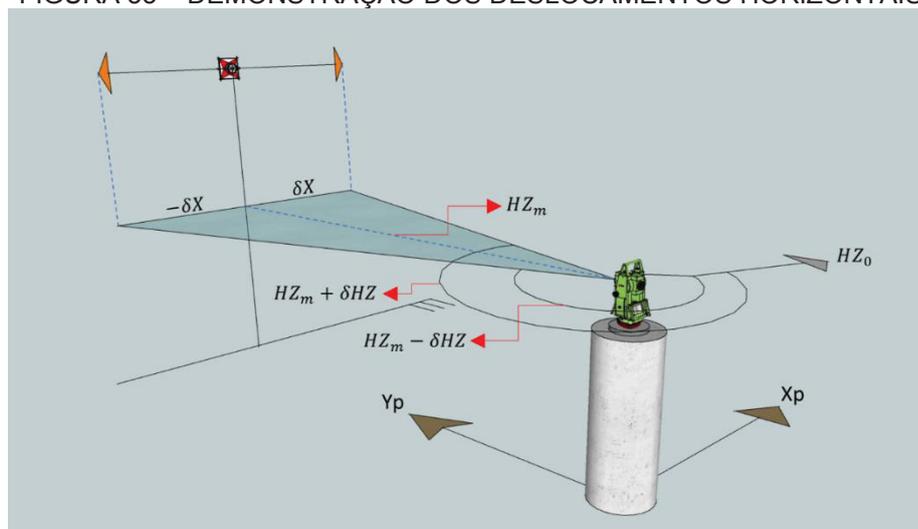
em que:

$\Delta Z$  – deslocamento vertical;

$DH$  – distância horizontal inicial;

$V$  – ângulo zenital.

FIGURA 33 – DEMONSTRAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS



FONTE: O autor (2020).

A equação seguinte foi implementada para a determinação dos deslocamentos transversais, sendo a direção de referência, linha tracejada, calculada pela média das direções medidas.

$$\delta X = \pm [\tan(\delta HZ)] \times DH \quad (34)$$

em que:

$\delta X$  – deslocamento transversal;

$DH$  – distância horizontal inicial, corrigida dos efeitos de curvatura e refração;

$\delta HZ_m$  – direção horizontal média;

$\delta HZ$  – variações da direção horizontal;

$HZ_0$  – direção de orientação.

Ressalta-se que esta metodologia possui a limitação da impossibilidade da determinação dos deslocamentos do sentido da linha de visada. Isso se deve ao fato de se trabalhar com a projeção dos pontos e não serem realizadas medidas contínuas das distâncias, ou seja, a distância entre o equipamento e o ponto, no sentido da linha de visada, é dado como constante. Deste modo, deve-se buscar uma configuração otimizada da posição do equipamento com relação à estrutura que se deseja monitorar. Aqui, o experimento foi conduzido de maneira a não considerar os deslocamentos longitudinais do ponto monitorado.

A análise da frequência de vibração a partir deste método considera a frequência amostral do equipamento, com base nas épocas geradas em cada

observação. A partir destes dados, aplica-se a transformação do domínio do tempo para o domínio das frequências e, com base nos resultados obtidos, analisa-se a frequência predominante e os deslocamentos máximos, referentes aos eventos.

O monitoramento do ponto foi realizado por eventos, em conjuntos de 512 observações. Este valor foi escolhido por dois motivos: primeiro, considerando a frequência amostral dos equipamentos, em torno de 20 Hz, o tempo de coleta resulta em aproximadamente 25 s, suficiente para a análise; e segundo, para que seja possível a aplicação da transformada de Fourier, o número de dados deve ser igual a uma potência de base 2.

Durante os experimentos, foram anotados o tempo, a quantidade de pessoas que estavam atravessando a passarela sob o ponto monitorado e os tipos de veículos passando sob a passarela.

Ressalta-se que anteriormente aos experimentos de campo foram realizados os procedimentos de verificação e retificação dos parâmetros angulares e calibração da componente linear do instrumento, tendo o equipamento apresentado como resultados precisões condizentes às informadas pelo fabricante. No que diz respeito aos parâmetros do MED do equipamento, estes foram calibrados por meio de experimentos realizados na base multipilar da UFPR, localizada na Fazenda Canguiri, e com posterior ajustamento em *softwares* desenvolvidos em projetos de pesquisa anteriores no GEENG (FAGGION, 2001; DA CRUZ, 2010). Os parâmetros angulares foram calibrados utilizando o procedimento descrito na NBR 13133, com experimentos realizados no GEENG/UFPR.

### 3.6.1 - Precisão das observações com ETR

As precisões dos pontos monitorados utilizando ETR são calculadas em função da propagação das covariâncias, decorrentes da precisão instrumental e da geometria dos experimentos, seguindo o formulário adaptado de Gemael et al. (2015, p. 48).

Para a precisão das variações verticais, tem-se:

$$\sigma_{\Delta Z} = \pm \sqrt{\cos^2(z)\sigma_{DI}^2 + (DI \operatorname{sen}(Z))^2 \sigma_Z^2} \quad (35)$$

em que  $\Delta Z$  são as variações verticais do ponto de estação para o ponto visado;  $DI$  é a distância inclinada e  $z$  é ângulo zenital médio de visada, e  $\sigma$  as respectivas precisões.

Para as variações transversais, têm-se:

$$\sigma_{\Delta x} = \pm \sqrt{(\text{sen}(HZ))^2 (\sigma_{DH})^2 + (DH \cos(HZ))^2 \left( \sigma_{Az_{A_i}} \frac{\pi}{648000} \right)^2} \quad (36)$$

em que:

$$\sigma_{DH} = \pm \sqrt{(\text{sen}(HZ))^2 \sigma_{DI}^2 + (DI \cos(z) kr)^2 \left( \sigma_z \frac{\pi}{648000} \right)^2} \quad (37)$$

sendo  $HZ$  o ângulo horizontal obtido das diferenças de direções horizontais entre o ponto de orientação e do ponto monitorado.

Para o presente trabalho, obteve-se 2 mm de precisão para as variações verticais e 1 mm para as variações transversais.

### 3.7 MONITORAMENTO UTILIZANDO GNSS

O levantamento GNSS, no modo relativo cinemático, pós-processado, foi realizado com a utilização de receptores GNSS com taxa de rastreamento de 20 Hz, já especificados nos tópicos referentes aos materiais deste trabalho. A estação base GNSS foi posicionada no pilar P1000, localizado sobre a estrutura do Laboratório de Geodésia Espacial e Hidrografia (LAGEH), da UFPR.

O processamento dos dados ocorreu em duas etapas. Inicialmente, a base foi processada no modo relativo estático com relação à estação UFPR da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), sistema de referência SIRGAS200, época 2000.4, pela necessidade de fixação das coordenadas da base com relação a um sistema de referência robusto. Ainda, a necessidade de implantação de uma base, mesmo possuindo uma estação de monitoramento contínuo nas proximidades do ponto monitorado, menos de 1 km de distância, se deve ao fato de o intervalo de operabilidade das estações RBMC ser 15 segundos. Ou seja, caso fosse realizado o processamento do GNSS sobre o ponto diretamente com relação à RBMC, o intervalo de processamento seguiria o mesmo intervalo desta, 15 segundos e não 20 Hz.

Após o processamento inicial, de posse das coordenadas da base, foi realizado um segundo processamento, agora na frequência máxima de operabilidade dos equipamentos, 20 Hz. A partir de então, foi possível determinar os deslocamentos aparentes da estrutura na frequência máxima de operação do equipamento, obedecendo os preceitos do Teorema de Nyquist, ou seja, até 10 Hz.

O levantamento foi realizado no modo relativo estático. Este modo foi escolhido devido ao fato de os equipamentos utilizados não permitirem a configuração direta no modo cinemático para operabilidade em altas taxas. Ou seja, posteriormente, foi realizada uma análise dos dados brutos oriundos do levantamento, seguindo-se com modificações do arquivo RINEX para o modo cinemático, possibilitando a avaliação época a época das coordenadas processadas.

Em seguida, prosseguiu-se com a verificação da análise das frequências com a aplicação da FFT utilizando a biblioteca de análise de dados do *software* Excel 2016.

Diferentemente do levantamento realizado com estação total, realizado de maneira discreta, ou seja, cada conjunto de leituras corresponde um evento independente. No monitoramento GNSS os equipamentos permanecem ligados durante todo o intervalo de rastreo, sendo os eventos identificados, inicialmente, pela anotação dos horários destes e, posteriormente, de maneira mais precisa, pela identificação destes na série temporal dos dados processados.

Os testes possibilitaram a verificação da disponibilidade de todas as épocas para o processamento GNSS, pois, em alguns casos, ainda que o equipamento opere a uma certa frequência, por exemplo, 20 Hz, no momento do processamento não são disponibilizadas todas as épocas. Ademais, buscou-se ainda verificar quais seriam as configurações adequadas do equipamento para a correta utilização no monitoramento dinâmico, tendo em vista ser um equipamento recém-importado à época. O equipamento possibilita duas configurações de rastreo: i) Estático + cinemático; e II) Estático.

Na primeira configuração, no momento do processamento o equipamento disponibilizado um arquivo misto, estático e cinemático, no entanto, o arquivo do intervalo de rastreo cinemático é referente apenas ao período entre a inicialização das configurações do equipamento até o momento em que se inicia o levantamento,

o pressionar do botão GO. Ademais, este arquivo não possibilita a conversão para cinemático puro.

Na segunda opção, obtêm-se um arquivo estático puro, o qual pode ser posteriormente modificado para cinemático através de modificações no cabeçalho do arquivo RINEX.

### 3.8 EXPERIMENTOS DE CAMPO

Os experimentos de campo foram realizados em duas etapas. Em um primeiro momento, o intuito foi observar as respostas da estrutura no ponto monitorado com relação aos esforços originados do cenário cotidiano da estrutura, ou seja, a passagem de pessoas sobre a estrutura e de veículos na Linha Verde concomitantemente. Em um segundo momento, buscou-se avaliar somente a influência dos veículos sobre as vibrações do ponto da estrutura, com medições realizadas com a passarela vazia.

#### 3.8.1 Primeiro experimento

O primeiro experimento foi realizado em uma terça-feira durante o período letivos, 11 horas da manhã, próximo ao horário de abertura dos restaurantes universitários, o que influenciou para um maior fluxo de pedestres atravessando entre os dois campi, além do fluxo de veículo trafegando na linha verde.

O intervalo entre a primeira e a última coleta de dados com ETR foi de aproximadamente 30 minutos, objetivando minimizar as variações das características ambientais.

Inicialmente, após a devida instalação e calagem do equipamento no ponto de estação, orientou-se a ETR utilizando um prisma fixado sobre o pilar P1000 (FIGURA 35), o mesmo que, em seguida, foi instalada a base GNSS. Realizaram-se então três séries angulares, em posição direta e inversa da luneta. Após este procedimento, o equipamento ficou em *standby*, enquanto ocorria a inicialização do GNSS.

FIGURA 34 – PRISMA DE ORIENTAÇÃO SOBRE O PILAR P1000



FONTE: O autor (2020).

Com relação ao GNSS, iniciou-se a base e o *rover* com 30 minutos de antecedência, como procedimento de inicialização, objetivando a estabilização e solução das ambiguidades anteriormente ao início do experimento. Na FIGURA 36, vê-se o receptor base instalado sobre o pilar P1000. O primeiro experimento foi realizado na data de 26 de fevereiro de 2019, utilizando para tal um par de receptores GS16 com taxa operação de 20 Hz. Os equipamentos GNSS foram disponibilizados pela empresa Hexagon Leica Geosystems.

FIGURA 35 – RECEPTOR GS16 INSTALADO SOBRE O PILA P1000



FONTE: O autor (2020).

Na FIGURA 37 observa-se o receptor *rover* instalado no ponto de monitoramento da passarela, sobre o suporte, em conjunto com o prisma GPR111.

FIGURA 36 – RECEPTOR ROVER INSTALADO NO PONTO DE MONITORAMENTO



FONTE: O autor (2020).

Com a ETR devidamente orientada, visou-se o prisma fixado sobre a estrutura, acionou-se o modo “rastreo travado” e iniciaram-se as medições, em blocos de 512 leituras, demandando aproximadamente 26 segundos por bloco, sendo anotadas as quantidades de pessoas que passavam sobre a passarela, assim como o horário de início e término das leituras, para posterior comparação aos resultados obtidos do GNSS. Para este primeiro experimento, foram coletados 10 blocos. A FIGURA 38 apresenta uma imagem tomada através da luneta do equipamento.

FIGURA 37 – IMAGEM TOMADA ATRAVÉS DA LUNETETA DURANTE UMA DAS COLETAS



FONTE: O autor (2020).

### 3.8.2 Segundo experimento

O segundo experimento foi realizado em um sábado, aproveitando um dos dias da semana com menor fluxo de alunos nos campi, o que possibilitou a realização dos levantamentos sem a presença de pessoas trafegando sobre a passarela. Tal fato possibilitou a análise dos movimentos do ponto monitorado apenas com relação ao fluxo de veículos trafegando na Linha Verde, rodovia sobre a qual a passarela transpassa.

Inicialmente, realizou-se uma vistoria na Linha Verde, a fim de verificar a ocorrência de buracos ou protuberâncias no asfalto, os quais poderiam implicar em maiores vibrações. No entanto, a pista se encontrava em perfeitas condições de uso.

Durante o experimento, uma pessoa ficou responsável por observar o fluxo de veículos na linha verde nas proximidades da passarela, a fim de informar ao operador da ETR o momento em que a estrutura estava prestes à chegada de veículos, para que se desse início à coleta de dados com a estação total. Como a rodovia possui semáforos, em geral, os veículos se apresentavam em grupos (FIGURA 39).

FIGURA 38 – GRUPO DE VEÍCULOS SE APROXIMANDO AO PONTO MONITORADO



FONTE: O autor (2020).

Foram então anotadas algumas características dos veículos do grupo, como tipo (caminhões, vans, automóveis, tratores, motocicletas), e o horário da coleta. A FIGURA 40 apresenta uma fotografia tomada em um destes momentos, quando um caminhão transportava uma perfuratriz.

FIGURA 39 – EXEMPLO DE UM DOS GRUPOS DE VEÍCULOS PRESENTES NO EXPERIMENTO



FONTE: O autor (2020).

Neste experimento foram coletados 10 blocos de leituras, também com 512 medições cada. Assim como no experimento anterior, a diferença entre a primeira e a última coleta de dados foi de aproximadamente 30 minutos, objetivando a redução das variações ambientais.

### 3.9 PARÂMETROS DE COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE FREQUÊNCIA

Os modos de vibração são características exclusivas de cada estrutura. A identificação destes parâmetros poderia ser realizada no projeto da estrutura, de posse do *as built*, por exemplo ou ainda obtidos via modelagem por elementos finitos. Na ausência de tais, no presente trabalho, utilizou-se os parâmetros disponibilizados pelo CEB – Comité Euro-International du Beton (1991) para carregamentos humanos, conforme a TABELA 9.

TABELA 9 - FAIXAS DE FREQUÊNCIAS FUNDAMENTAIS OS PRIMEIROS HARMÔNICOS DOS CARREGAMENTOS HUMANOS RECOMENDADOS PELO CEB

<b>Atividade</b>	<b>Frequência Fundamental (Hz)</b>
Andar	1,6 a 2,4
Correr	2,0 a 3,5
Saltar	1,8 a 3,4
Dançar Hard Rock	1,5 a 3,0
Dançar light rock	1,5 a 3,0
Movimento lateral do corpo	0,6
Aplaudir e mover o corpo de pé	1,6 a 2,4

FONTE: CEB (1991)

A TABELA 10, apresenta os resultados de frequência obtidos nos experimentos apresentados na revisão bibliográfica.

TABELA 10 - RESULTADOS DE FREQUÊNCIA OBTIDOS NOS EXPERIMENTOS APRESENTADOS NA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

<b>Autores</b>	<b>Ano</b>	<b>Freq. Hz</b>	<b>Estrutura</b>	<b>Frequência modal da estrutura (Hz)</b>
Roberts, Meng e Dodson	2001	10	Ponte Suspensa	> 5
Schaal e Larocca	2002	5	Passarela estaiada	0,25
Yu, Guo e Chengwu	2006	10 e 20	Ponte Estaiada	0,25
Meng, Dodson e Roberts	2007	20	Passarela	4,5
Bueno et al.	2008	20	Dispositivo	1
Larocca et al	2009	100	Dispositivo	0,05 a 1
Casciati e Fuggini	2009	20	Dispositivo	0,1 a 2
Larocca e Schaal	2010	20 e 100	Dispositivo/ponte	1
Yi, Li e Gu	2013	50 e 100	Ponte de Concreto Rígido	3 a 4
Moschas e Stiros	2015	100	Passarela Metálica	5
Araújo Neto	2017	100	Pontes de concreto	< 5

FONTE: O autor (2020).

## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

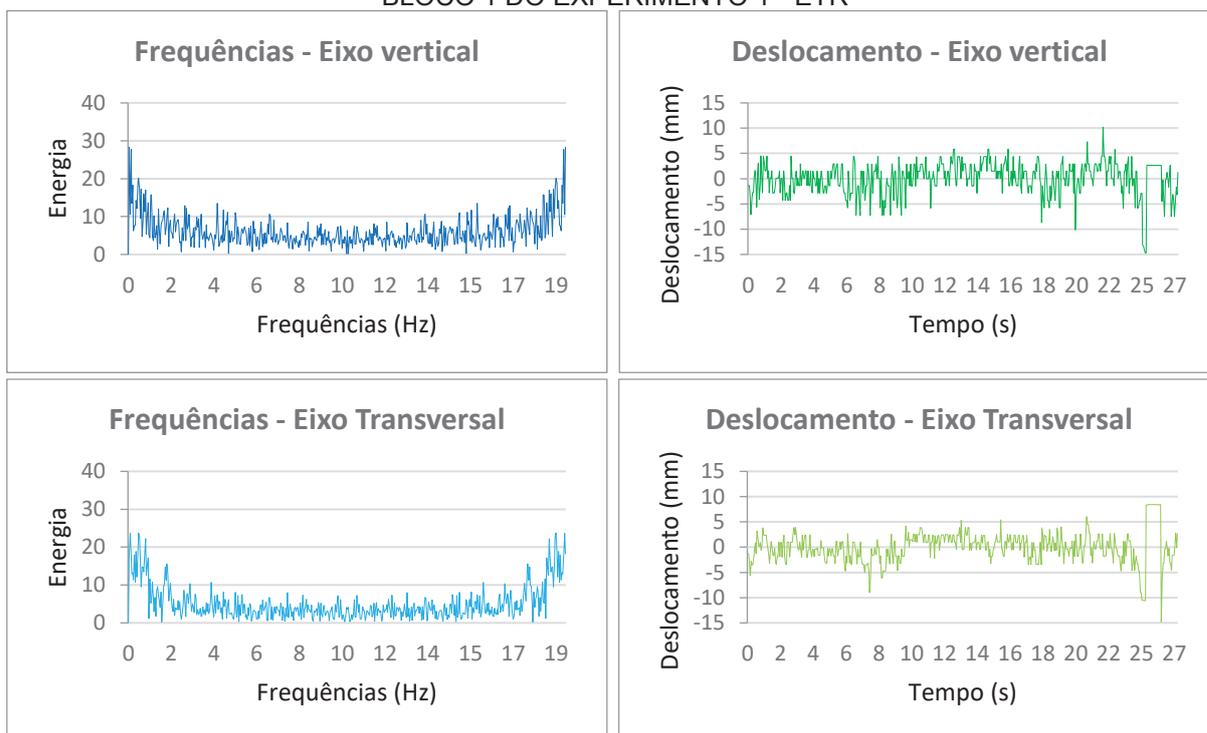
A seguir, apresentam-se gráficos referentes a 1 bloco do primeiro e 1 bloco do segundo experimento, assim como um conjunto de tabelas referentes a todos os experimentos. No Anexo A encontram-se os gráficos referentes a todos os blocos dos experimentos.

Com relação aos resultados obtidos com estação total, realizou-se um corte em 1,5 Hz, como um filtro passa-alta, ou seja, as frequências com magnitudes inferiores a este valor foram desconsideradas nas análises.

### 4.1 RESULTADOS DO BLOCO 1 DO EXPERIMENTO 1 COM ETR

Como mencionado, no experimento 1, a passarela esteve sujeita a ação de cargas móveis provocadas por pessoas e também pela influência do trânsito na Linha Verde.

FIGURA 40 – GRÁFICOS DOS RESULTADOS DE FREQUÊNCIAS E DESLOCAMENTOS PARA O BLOCO 1 DO EXPERIMENTO 1 - ETR

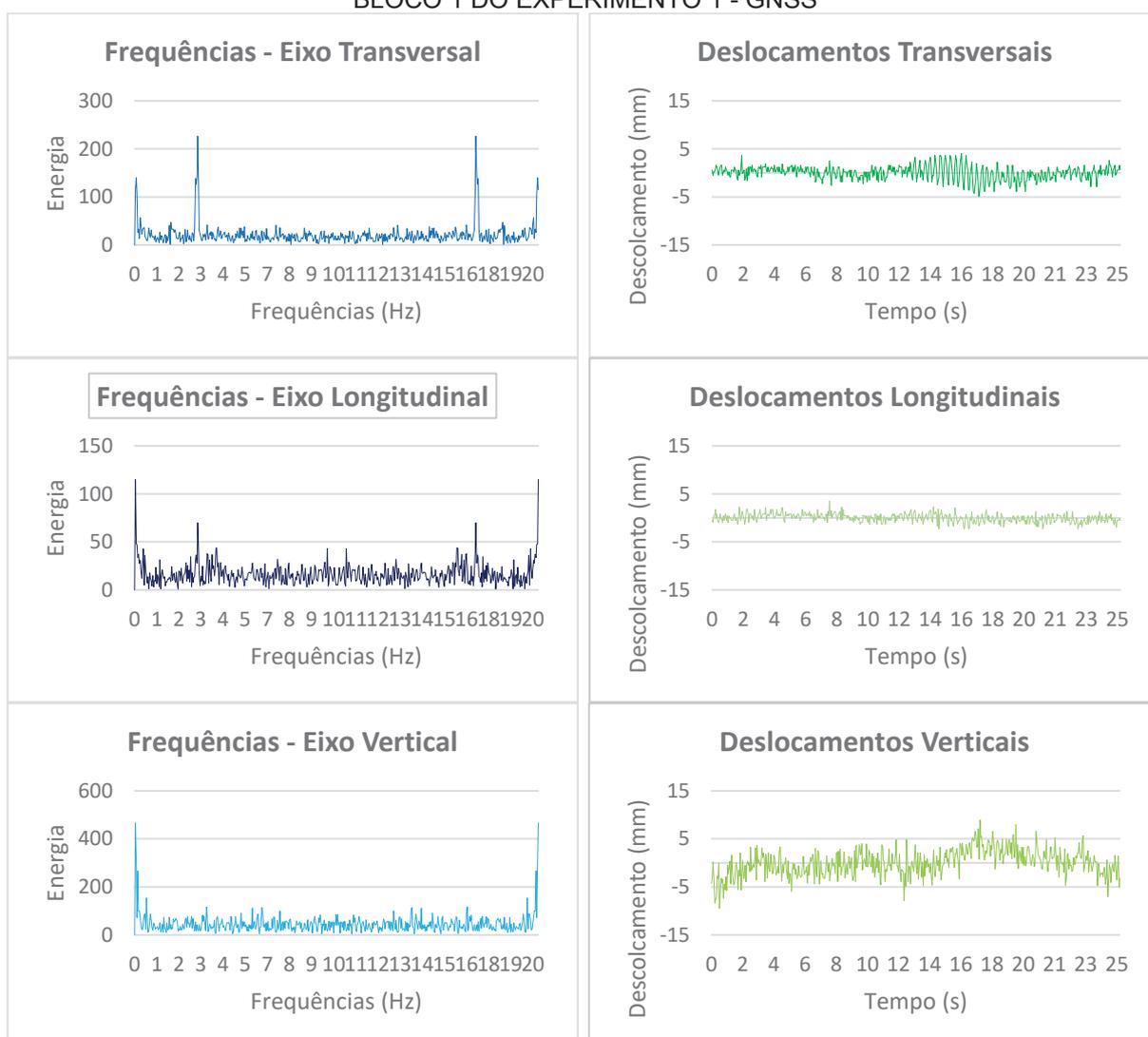


FONTE: O autor (2020).

## 4.2 GRÁFICOS DOS RESULTADOS DO BLOCO 1 DO EXPERIMENTO 1 COM GNSS

No experimento 1, a passarela esteve sujeita a ação de cargas móveis provocadas por pessoas e também pela influência do trânsito na Linha Verde.

FIGURA 41 – GRÁFICOS DOS RESULTADOS DE FREQUÊNCIAS E DESLOCAMENTOS PARA O BLOCO 1 DO EXPERIMENTO 1 - GNSS

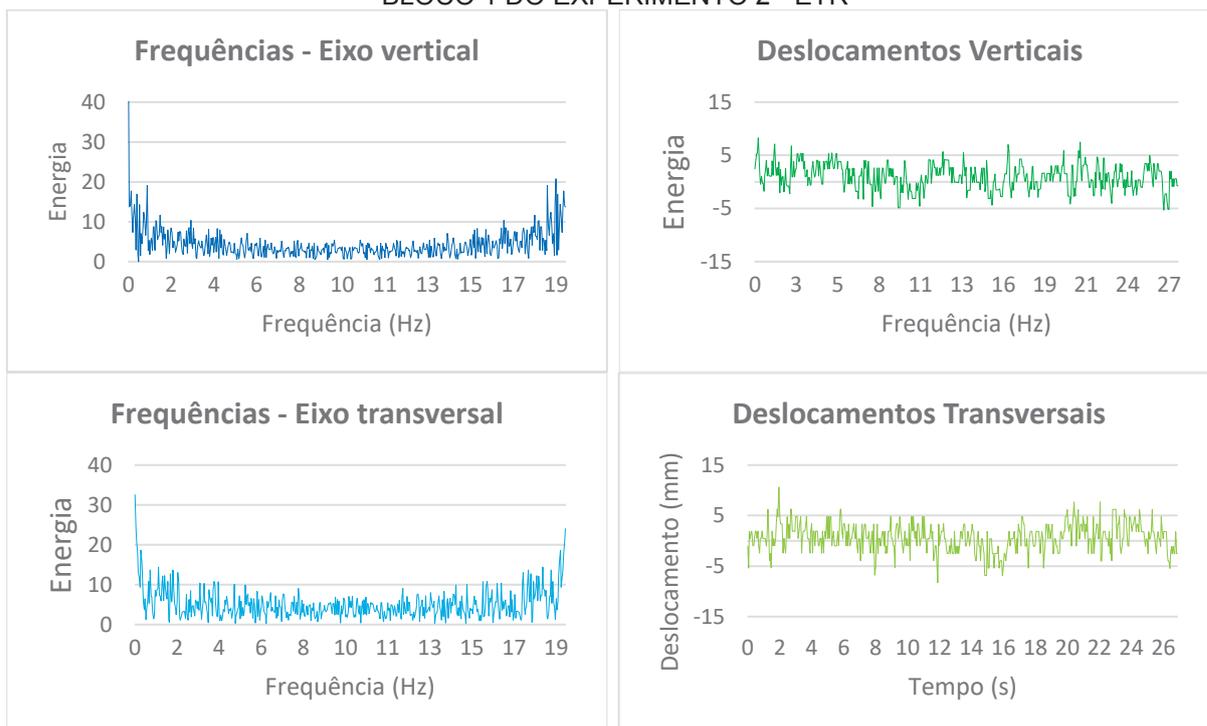


FONTE: O autor (2020).

### 4.3 RESULTADOS DO BLOCO 1 DO EXPERIMENTO 2 COM ETR

Como mencionado, no experimento 2, a passarela esteve sujeita a ação de cargas móveis provocadas apenas pela influência do trânsito na Linha Verde.

FIGURA 42 – GRÁFICOS DOS RESULTADOS DE FREQUÊNCIAS E DESLOCAMENTOS PARA O BLOCO 1 DO EXPERIMENTO 2 - ETR

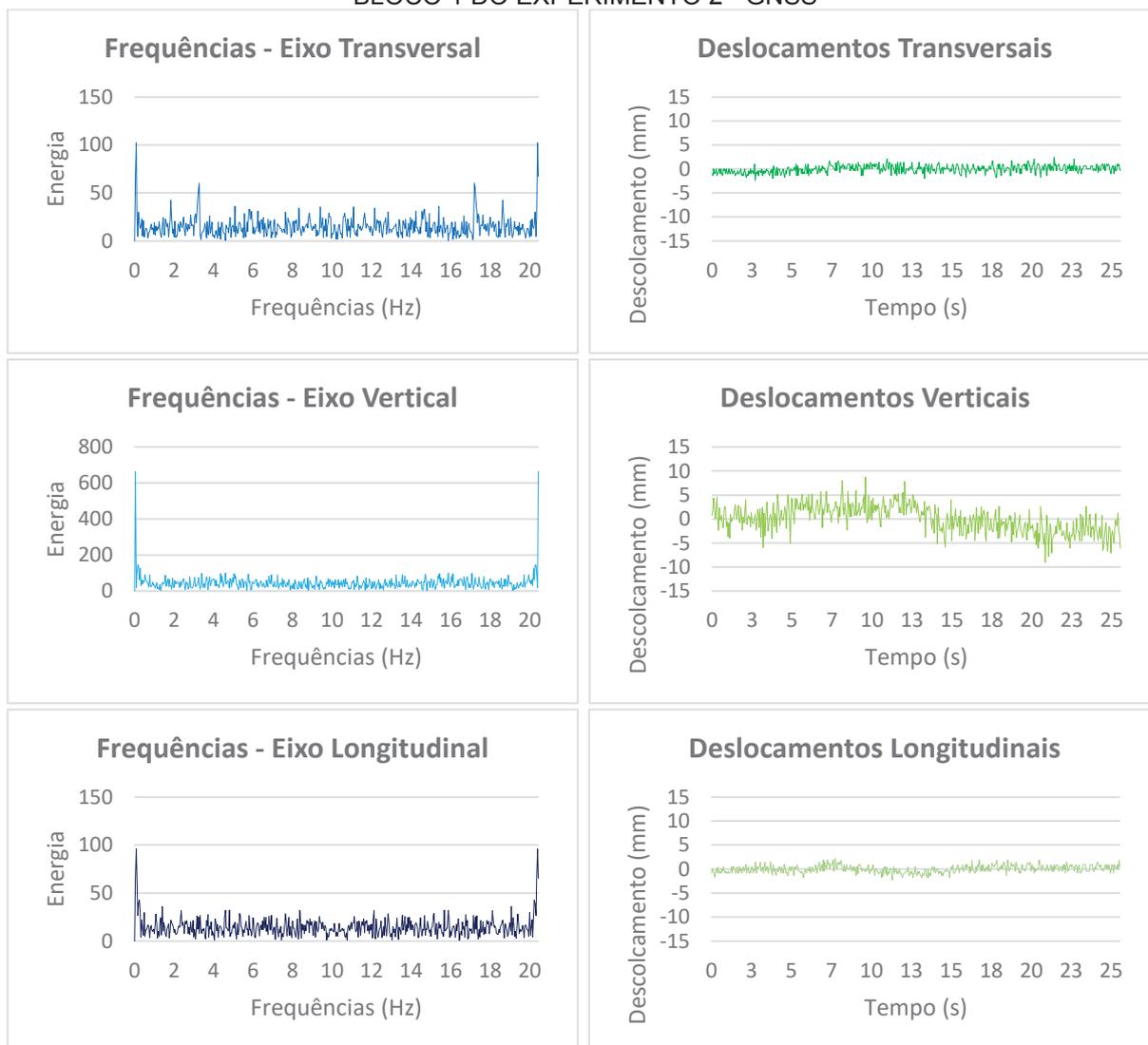


FONTE: O autor (2020).

#### 4.4 RESULTADOS DO BLOCO 1 DO EXPERIMENTO 2 COM GNSS

Como mencionado, neste experimento, a passarela esteve sujeita a ação de cargas móveis provocadas apenas pela influência do trânsito na Linha Verde.

FIGURA 43 – GRÁFICOS DOS RESULTADOS DE FREQUÊNCIAS E DESLOCAMENTOS PARA O BLOCO 1 DO EXPERIMENTO 2 - GNSS



FONTE: O autor (2020).

#### 4.5 RESUMO DOS RESULTADOS DO PRIMEIRO E SEGUNDO EXPERIMENTOS

A TABELA 11 apresenta os resultados referentes a todos os blocos do primeiro experimento com ETR. O sinal de negativo (-) indica que o deslocamento foi para a esquerda do observador ou para baixo.

TABELA 11 – RESULTADOS DO PRIMEIRO EXPERIMENTO COM ETR

	Quant. pessoas	Deslocamento máximos		Vetor deslocamento 2D (mm)	Frequências (Hz)	
		Transv.	Vert.		Transv.	Vert.
Bloco 1	6	-14,8	-14,7	20,9	3,8	4,0
Bloco 2	13	9,2	-17,7	19,9	2,8	4,1
Bloco 3	10	-9,6	8,6	12,9	2,6	2,9
Bloco 4	9	-8,7	-19,5	21,4	3	2,2
Bloco 5	12	8,5	8,0	11,7	2,8	3,0
Bloco 6	8	6,8	9,5	11,7	2,3	4,0
Bloco 7	4	-8,7	-11,5	14,4	3,4	5,3
Bloco 8	13	7,2	-12,4	14,3	2,3	2,5
Bloco 9	9	7,3	11,7	13,8	4,3	3,9
Bloco 10	11	-9,2	13,0	15,9	3,1	3,7

FONTE: O autor (2020).

Observando-se os resultados da tabela 11, verifica-se que o maior vetor deslocamento 2D encontra-se no primeiro bloco, quando a passarela esteve sujeita à passagem de 6 pessoas, no entanto, este é o bloco cujo equipamento perdeu a visualização do prisma por alguns instantes, o que acabou por introduzir observações errôneas no resultado de deslocamentos. Ainda sobre os deslocamentos do ponto monitorado, verifica-se que estes não se dão de maneira proporcional à quantidade de pessoas passando sobre o ponto. Em alguns dos blocos, quantidades menores de pessoas produziram deslocamentos maiores. Este fato pode ser possivelmente originado por não se ter salientado para o peso dos indivíduos.

Com relação às frequências de vibração, analisando-se a primeira frequência de cada um dos 10 blocos deste primeiro experimento para estação total, a frequência média no eixo transversal foi de 3,0 Hz e para o eixo vertical de 3,6 Hz.

A TABELA 12 apresenta os resultados referentes a todos os blocos do primeiro experimento com GNSS.

TABELA 12 – RESULTADOS DO PRIMEIRO EXPERIMENTO COM GNSS

	Quant. pessoas	Deslocamentos			Vetor deslocamento 3D (mm)	Frequências (Hz)		
		x (mm)	y	z		x	y	z
Bloco 1	6	-4,9	3,5	-9,5	11,2	3,1	3,1	3,6
Bloco 2	13	-2,1	2,3	-8,6	9,1	3,1	4,3	4,5
Bloco 3	10	-2,9	2,1	-7,1	8,0	1,8	3,4	3,4
Bloco 4	9	2,2	2,0	7,5	8,1	3,2	3,2	2,7
Bloco 5	12	-2,5	-2,0	5,8	6,6	5,2	4,1	3,1

(continuação)

	Quant. pessoas	Deslocamentos			Vetor deslocamento 3D (mm)	Frequências (Hz)		
		x (mm)	y	z		x	y	z
Bloco 6	8	-3,0	2,8	-7,6	8,6	3,1	6,1	3,8
Bloco 7	4	2,5	-2,9	8,0	8,8	3,2	4,1	7,8
Bloco 8	13	-2,4	-2,3	9,1	9,7	3,0	3,6	2,5
Bloco 9	9	3,1	-3,5	-12,1	12,9	4,3	5,0	3,4
Bloco 10	11	-4,3	-3,0	-10,0	11,2	5,1	6,0	6,9

FONTE: O autor (2020).

Observando-se os resultados da tabela 12, verifica-se que o maior vetor deslocamento 3D encontra-se no nono bloco, quando a passarela esteve sujeita à passagem de 9 pessoas. Como mencionado anteriormente, verifica-se que os deslocamentos não se dão de maneira proporcional à quantidade de pessoas passando sobre o ponto.

Analisando-se a primeira frequência de cada um dos 10 blocos deste primeiro experimento para estação GNSS, a frequência média no eixo transversal foi de 3,5 Hz, para o eixo longitudinal de 4,3 Hz e para o eixo vertical de 4,2 Hz.

A TABELA 13 apresenta os resultados referentes a todos os blocos do primeiro experimento com ETR.

TABELA 13 – RESULTADOS DO SEGUNDO EXPERIMENTO COM ETR

	Quant. pessoas	DX Máximo (mm)	Dz máximo (mm)	Vetor deslocamento 2D (mm)	Frequências (Hz)	
					Transv.	Vert.
Bloco 1	-	10,6	8,3	13,5	3,6	2,7
Bloco 2	-	-9,9	-10,6	14,5	6,1	3,9
Bloco 3	-	-10,6	11,8	15,8	3,4	3,1
Bloco 4	-	8,9	-10,9	14,0	5,7	3
Bloco 5	-	8,8	-9,9	13,2	5,4	3,1
Bloco 6	-	10,4	-8,4	13,4	4,0	6,1
Bloco 7	-	-10,4	-10,0	14,4	3,9	2,8
Bloco 8	-	11,6	-8,4	14,3	3,1	2,3
Bloco 9	-	-11,2	-8,5	14,0	2,5	2,5
Bloco 10	-	8,3	-8,3	11,7	3,2	4,6

FONTE: O autor (2020).

Observando-se os resultados da tabela 13, verifica-se que o maior vetor deslocamento 2D encontra-se no sétimo bloco.

Com relação às frequências de vibração, analisando-se a primeira frequência de cada um dos 10 blocos a frequência média no eixo transversal foi de 4,1 Hz e para o eixo vertical de 4,2 Hz.

A TABELA 14 apresenta os resultados referentes a todos os blocos do segundo experimento com GNSS.

TABELA 14 – RESULTADOS DO SEGUNDO EXPERIMENTO COM GNSS

	Quant. pessoas	Dx máximo (mm)	Dy máximo (mm)	Dz máximo (mm)	Vetor deslocamento 3D (mm)	Frequências (Hz)		
						x	y	z
Bloco 1	-	2,4	2,3	9,1	9,7	3,2	4,7	4,5
Bloco 2	-	3,3	3,2	7,3	8,7	4,5	5,0	5,7
Bloco 3	-	2,1	3,7	10,4	11,3	3,2	3,9	4,6
Bloco 4	-	2,9	2,2	8,8	9,5	3,1	4,1	4,8
Bloco 5	-	3,3	3,1	10,8	11,7	2,9	4,8	5,1
Bloco 6	-	3,5	3,0	10,2	11,2	3,0	3,4	6,4
Bloco 7	-	3,1	2,3	9,2	10,0	3,2	3,2	6,7
Bloco 8	-	3,3	2,8	8,3	9,4	3,1	6,3	5,1
Bloco 9	-	4,2	3,0	10,0	11,3	6,9	3,6	6,9
Bloco 10	-	4,8	3,4	8,5	10,3	3,2	3,2	3,2

FONTE: O autor (2020).

Observando-se os resultados da tabela 14, verifica-se que o maior vetor deslocamento 3D encontra-se no sexto bloco. De modo geral, os deslocamentos máximos detectados se aproximam dos detectados com a ETR. Com difer

Com relação às frequências de vibração, analisando-se a primeira frequência de cada um dos 10 blocos deste primeiro experimento para o GNSS, a frequência média no eixo transversal foi de 3,5 Hz, para o eixo longitudinal de 4,3 Hz e para o eixo vertical de 4,2 Hz.

A TABELA 15 apresenta as diferenças dos deslocamentos máximos e das frequências de vibração entre GNSS e ETR para os dois experimentos.

TABELA 15 - DIFERENÇAS DOS DESLOCAMENTOS MÁXIMOS E DAS FREQUÊNCIAS DE VIBRAÇÃO ENTRE GNSS E ETR PARA OS DOIS EXPERIMENTOS

Blocos	Primeiro Experimento				Segundo Experimento			
	Dif. deslocamentos (mm)		Dif. frequência (Hz)		Dif. deslocamentos (mm)		Dif. frequência (Hz)	
	x	z	x	z	x	z	x	z
Bloco 1	9,9	5,2	-0,7	-0,4	-8,2	-17,3	-0,4	0,9
Bloco 2	7,1	9,1	0,3	0,4	13,1	3,3	-1,6	-0,4
Bloco 3	6,7	1,5	-0,8	0,5	12,7	-1,4	-0,2	1,2
Bloco 4	-6,5	27,0	0,2	0,5	-11,7	19,7	-2,6	-0,9

(continuação)

Blocos	Primeiro Experimento				Segundo Experimento			
	Dif. deslocamentos (mm)		Dif. frequência (Hz)		Dif. deslocamentos (mm)		Dif. frequência (Hz)	
	x	z	x	z	x	z	x	z
Bloco 5	6,0	13,9	2,4	0,1	-5,5	-0,9	-2,5	-0,3
Bloco 6	3,8	1,9	0,8	-0,2	-6,9	18,6	-1,1	2,3
Bloco 7	11,2	19,5	-0,2	2,5	13,5	0,8	-0,7	2,8
Bloco 8	4,80	21,4	0,7	0,0	-14,9	16,7	0,0	2,0
Bloco 9	10,4	-0,4	0,0	-0,5	6,9	-1,5	4,4	4,4
Bloco 10	4,9	3,1	2,0	3,2	-3,5	16,8	-0,1	-0,1

FONTE: O autor (2020).

Comparando-se os valores de frequências de vibração obtidas com GNSS, verifica-se que estas de apresentam de maneira bastante aproximada às obtidas com estação total robotizada, não diferindo mais do que 1 Hz em grande maioria, com uma discrepância maior apenas no bloco 9.

Já com relação aos deslocamentos máximos, os valores encontrados diferem em totalidade mais do que 2 mm, sendo os deslocamentos detectados por ETR maiores que os encontrados com GNSS.

## 5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta apresentada neste trabalho avaliou o desempenho de métodos e equipamentos geodésicos aplicados ao monitoramento dinâmico de estruturas, com o desenvolvimento e aplicação de uma metodologia que possibilitou o incremento na velocidade de obtenção de dados para estações totais robotizadas, utilizando também equipamentos GNSS com frequência de 20 Hz processados no modo relativo cinemático, a fim de se comparar os resultados obtidos de ambos.

A técnica intitulada Leitura Contínua de Direções apresentou um ganho significativo na velocidade de obtenção de dados, quando comparados à taxa amostral utilizando o método convencional de rastreamento cinemático. Enquanto no método tradicional, para o mesmo equipamento, a taxa de amostragem situa-se em torno de 6 a 10 Hz, ao se utilizar a LCD as frequências evoluíram para em torno de 18 a 22 Hz, predominantemente. No entanto, apesar de apresentar um ganho considerável na velocidade de aquisição de dados, a metodologia implementada ainda apresenta intervalos variados de coleta, o que dificulta a implementação direta da FFT.

A implementação do sistema de referência da passarela possibilitou a comparação dos resultados advindos do levantamento GNSS e da ETR no mesmo sistema de eixos, proporcionando uma análise mais fidedigna em ambas as metodologias. No entanto, salienta-se que existe a dificuldade da perfeita sincronização temporal entre os dados obtidos, o que tornou os experimentos baseados nas comparações de resposta do ponto da estrutura para determinados eventos, mas desconsiderando a assincronia das observações dentro do evento. Além disso, a implementação do sistema possibilitou a análise do comportamento da estrutura no ponto monitorado nos sentidos longitudinal, transversal e vertical ao eixo de caminhamento desta.

Foram realizadas dois conjuntos de experimentos em campo. No primeiro conjunto, a estrutura esteve sujeita a ações tanto de pessoas trafegando sobre a estrutura assim como à passagem de veículos sob a estrutura, simulando o cotidiano da estrutura. No segundo, apenas sujeita à passagem de veículos. Dos experimentos, verificou-se que as frequências de vibração da estrutura se dispuseram de maneira bem próxima, em ambos os casos e para ambas os métodos utilizados.

Com relação às características da estrutura escolhida, obtiveram-se deslocamentos máximos menores que 2 cm para todos os conjuntos de dados, analisando-se tanto os resultados da estação total robotizada quanto para o GNSS.

Analisando-se todos gráficos referentes resultados do GNSS e da ETR, é possível observar que existe uma maior sensibilidade de detecção de deslocamentos com o uso da ETR do que com GNSS, com picos mais perceptíveis.

Com relação à ETR, tendo como base a propagação da covariância calculada para a determinação das posições do ponto, 2 mm para vertical e 1 mm para transversal, pode-se afirmar que a metodologia foi capaz de detectar movimentações em todos os experimentos.

No que diz respeito à detecção de frequências de vibração, os resultados advindos do GNSS apresentaram uma disposição de picos de frequência em torno de 3,5 Hz para praticamente todos os experimentos, sendo possível a detecção de um pico específico para a primeira frequência de vibração na grande parte dos casos.

Para a análise das frequências com a utilização da ETR fez-se necessária a implementação de uma filtragem dos sinais, com um filtro passa alta, em 1,5 Hz. Fez-se necessária a filtragem devido à alta presença de ruídos entre 0 e 1,5 Hz.

Com relação aos dois experimentos, verificou-se que os deslocamentos foram superiores quando a passarela esteve sujeita às ações conjuntas dos esforços advindos de pessoas e veículos, quando os deslocamentos máximos foram de 19,5 mm para o eixo vertical e 9,6 mm para o eixo transversal, para a estação total.

Já para as frequências de vibração, os dois experimentos apresentaram similaridade, com praticamente as mesmas frequências de vibração, tanto quando a estrutura esteve sujeita a ações de pessoas e veículos, assim como quando sujeita a ação somente de veículos sob esta. Ainda, as respostas de frequência obtidas condizem com as esperadas, tendo como base o CEB (1991). Com frequências fundamentais em torno de 3,54 Hz, e com os resultados apresentados nos experimentos da revisão bibliográfica (TABELA 10).

Os dados relativos aos deslocamentos divergiram em aproximadamente 1 cm entre os métodos, no entanto os de frequência foram praticamente semelhantes, com diferenças inferiores a 0,5 Hz para a grande maioria dos casos.

Deste modo, com base nos resultados deste trabalho pode-se concluir que é possível a verificação do comportamento dinâmico de pontos de estruturas através

do uso de técnicas e equipamentos e geodésicas como ETR e GNSS, em complemento às técnicas e instrumentais já utilizadas para tal finalidade, mas sempre visando a melhoria continuada dos métodos empregados.

### 5.1 RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como visto, o presente trabalho apresenta uma análise do comportamento dinâmico pontual de uma estrutura por técnicas geodésicas. Assim, como recomendação de trabalhos futuros indica-se o uso de técnicas que possibilitem uma análise global dos corpos monitorados, por exemplo, com o uso de radar interferométrico terrestre.

Uma outra recomendação é que se trabalhe com a integração instrumental, e não mais com a comparação, aproveitando o que cada equipamento pode oferecer de melhoria, tanto posicional quanto a respeito da praticidade de levantamento e processamento dos dados.

Recomenda-se ainda a aplicação da LCD em outras estruturas, em que o deslocamento esperado possua maior magnitude a fim de verificar a eficiência da técnica. Por exemplo, pode-se buscar utilizar a LCD como alternativa no monitoramento das diversas pontes presentes no estado do Paraná.

Uma última recomendação é que seja medida a velocidade do vento durante os trabalhos a fim de verificar sua influência sobre o comportamento da estrutura.

## REFERÊNCIAS

ANDRADE, J.B. **Fotogrametria** - Jose Bittencourt de Andrade. Curitiba; SBEE,2003; 2.ed.

ARAÚJO NETO, J. O. **Uso do gps no monitoramento dinâmico da infraestrutura de transportes: pontes rodoviárias em concreto**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

ASSIS, W. S. **Sistemas computacionais de apoio à monitoração de estruturas de Engenharia Civil**. 2007. 265 p. Tese - Doutorado em Engenharia de Estruturas – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

BAYOUD, F. A. Leica's Pinpoint EDM Technology with Modified Signal Processing and Novel Opt mechanical Features. **XXIII FIG Congress**, Monique, Alemanha, 2006.

BOLZAN, M. J. A. Transformada em Ondeleita: Uma necessidade. Revista Brasileira de Ensino de Física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 28, n. 4, p. 563-567, set. 2006.

BUENO, R. F. **Monitoração, por GPS, de deslocamentos em estruturas com carga dinâmica**. 2007. 155 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

BUENO, R. F; *et al.* Aplicação da transformada de Fourier e em ondaleta às séries temporais de diferenças de altitude, determinadas por GPS, acoplado a shaker na base USP. **Boletim de Ciências Geodésicas Curitiba**, v. 14, n. 4, p. 557-570, out.-dez. 2008.

CARVAJAL; F. A. C.; **Automação da Correção da Primeira Velocidade em Medidas Eletrônicas de Distância com Base em Rede de Observação de Parâmetros Ambientais Multi-Estações**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

CASCIATI, F; FUGGINI, C. **Engineering vibration monitoring by GPS: long duration records**. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, Pequim, v. 8, n. 3, p. 459-467, set. 2009.

CEB. **Comité Euro International du Beton Vibration Problems in Structures**. Practical Guidelines. Bullitin d'information, n. 209. 1991

CHAVES, J. C. **Uso da tecnologia GPS na monitoração de deformação: sistemas, etapas e experimentos**. 2001. 212 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

COSSER, E; ROBERTS, G. W; MENG, X; DODSON A. H. Measuring the Dynamic Deformation of Bridges Using a Total Station. In: **11th FIG Symposium on Deformation Measurements**. Santorini, Grécia, 2003.

DA CRUZ, W. **Impacto Causado pela Evolução dos Medidores Eletrônicos de Distância no Processo de Calibração**. 2010. 81 f. (Mestrado em Ciências Geodésicas) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

DOEBLING, S. W., FARRAR, C. R. E PRIME, M. B. A summary Review of Vibration Based Damage Identification Methods. **The Shock and Vibration Digest**, 30(2), 1998. 91-105.

EHRHART, M; LIENHART, W. Monitoring of civil engineering structures using a state-of-the-art image assisted total station. **Journal of Applied Geodesy**, 9(3), 2015. pp. 174-182.

ESA. European Space Agency. **GLONASS: Future and Evolution**. Disponível em: <[http://www.navipedia.net/index.php/GLONASS\\_Future\\_and\\_Evolutions](http://www.navipedia.net/index.php/GLONASS_Future_and_Evolutions)> Acesso em: 16 de maio de 2019.

FAGGION, P. L. **Obtenção dos elementos de calibração e certificação de medidores eletrônicos de distância em campo e laboratório**. Tese de Doutorado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2001. 134f.

FIG, International Federation of Surveyors. Models and Terminology for the Analysis of Geodetic Monitoring Observations. **Official Report of the Ad-Hoc Committee of FIG Working Group 6.1**. 2020. Disponível em: <<https://www.fig.net/resources/publications/figpub/pub25/figpub25.asp>> Acesso em: 29 de fev. de 20.

GARCIA, J. **La Estación Total**. Escola Politécnica Superior de Lugo. Universidade de Santiago. 2017? Disponível em: <[http://webspersoais.usc.es/export9/sites/persoais/persoais/joseantonio.pardinas/modules/DOC\\_COMUN/Estacion\\_Total.pdf?fbclid=IwAR34FJ7Qz7jIPDnvJ6LV\\_fx771QugXiQyPMLRI9inW\\_W6M8ykBprqnLnCCE](http://webspersoais.usc.es/export9/sites/persoais/persoais/joseantonio.pardinas/modules/DOC_COMUN/Estacion_Total.pdf?fbclid=IwAR34FJ7Qz7jIPDnvJ6LV_fx771QugXiQyPMLRI9inW_W6M8ykBprqnLnCCE)> Acesso em: 03 de abril de 2019.

HOFMANN-WELLENHOF, B; LICHTENEGGER, H; WASLE, E. **GNSS—global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more**. Springer Science & Business Media, 2008.

HÖGLUND, R; LARGE P. **Direct reflex EDM technology for the surveyor and civil engineer**. Trimble survey. Colorado, USA, 2005.

JERKE, A. **Análise do Monitoramento Geodésico da Barragem da Usina Hidrelétrica Mauá com Equipamentos de Diferentes Precisões e Diferentes Softwares de Processamento**. 101 p. Dissertação – Mestrado em Ciências Geodésicas - Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

KALOOP, M. R; LI, H. Sensitivity and analysis GPS signals base bridge damage using GPS observations and wavelet transform. **Measurement**. v. 44, n. 5, p. 927-937, jun. 2011.

KRUEGER, C.P. **Geodésia por Satélites**. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

LAROCCA, A. P. C; SCHAAL, R. E; BARBOSA, A. C. B. Improving detection of low frequency vibrations using high rate data and filtering techniques in time series of GPS baseline. In: **International Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation**, 22nd., 2009, Savannah, USA, Sept. 2009, v. 1, p. 1867-1875.

LAROCCA, Ana P. C. **O uso do GPS como instrumento de controle de deslocamentos dinâmicos de obras civis – aplicação na área de transportes**. 2004. 203 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

LEICA. Leica Captivate. **How-to videos on robotic total stations (Part 2/3): Automatic target aiming and automatic target locking**. Leica Geosystems. Acessível em: <<http://blog.hexagongeosystems.com/leica-captivate-how-to-videos-automatic-target-aiming-and-automatic-target-locking/>> Acesso em: 10 de maio de 2019

LEICA. Leica Geosystems. **Bridge Surveys**. Acessível em: <<http://www.leicageosystems.com/civil/application/bridge.html>> Acesso em: 17 de abril de 2019.

LEICA. Leica Geosystems. **Leica TPS1200+. White Paper**. Suíça, 2007. Disponível em: < [https://issuu.com/aanton/docs/tps1200\\_\\_whitepaper\\_en](https://issuu.com/aanton/docs/tps1200__whitepaper_en)> Acesso em 30 de agosto de 2019.

LEICA. Leica Geosystems. **TCA1800, TCA2003 e TC2003**. Suíça, 2004. Disponível em: <<https://www.prismarit.fi/userData/prismarit-oy-voima-f1311c/TCA2003.pdf>> Acesso em: 16 de maio de 2019.

LEICA. Leica Geosystems. **TS15 User Manual**. Suíça, 2015. Disponível em: <<https://surveyequipment.com/assets/index/download/id/844/>> Acesso em 04 de junho de 2019.

LEICK, A. **GPS Satellite Surveying**. 3rd ed. New York: John Willey & Sons, 2004. 464 p.

LEVIN, E; NADOLINETS, N; AKHMEDOV. **Surveying Instruments and Technology**. New York, 2017. 253p.

LIENHART, W; EHRHART, M; GRICK, M. High Frequent Total Station Measurements for the Monitoring of Bridge Vibrations. **4th Joint International Symposium on Deformation Monitoring**. Vienna, 20016.

MENG X; DODSON A. H; ROBERTS G. W. Detecting bridge dynamics with GPS and triaxial accelerometers. **Eng Struct**, v. 29, n. 11, p. 3178 – 3184, nov. 2007.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. 2 ed. São Paulo, Editora UNESP, 2008.

MORETTIN, P. A. **Ondas e Ondaletas: Da Análise de Fourier à Análise de Ondaletas de Séries Temporais**. 2ed. São Paulo: Editora USP, 2014. 556 p.

MOSCHAS F; STIROS S. C. Three-dimensional dynamic deflections and natural frequencies of a stiff footbridge based on measurements of collocated sensors. **Struct Control Health Monit.**, v. 21, n. 1, p. 23–42, fev. 2014.

PALAZZO, D. R. **Uso de Uma ETR Associada a um Sistema Geodésico de Referência Para o Monitoramento Dinâmico de Pontes**. Tese de Doutorado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2008 134f.

PALAZZO, D. R; FRIEDMANN, R. M. P; NADAL, C. A; SANTOS FILHO, M. L; VEIGA, L. A. K; FAGGION, P. L. Dynamic Monitoring of Structures Using A Robotic Total Station. TS 78 – **Survey Control and Monitoring of Buildings**. In: XXIII FIG Congress. Munich, Germany, outubro, 2006.

PALAZZO, D. R; SANTOS FILHO, M. L; MOREIRA, A. R. A Utilização de Técnicas Geodésicas no Monitoramento de Estruturas Pré-Moldadas. **Primeiro encontro nacional de pesquisa, projeto, produção em estruturas de concreto pré-moldado**. Engenharia de Estruturas - SET - EESC – USP. 2005 SETEncontrado em: <[http://www.set.eesc.usp.br/1enpppcpm/cd/conteudo/trab\\_pdf/139.pdf](http://www.set.eesc.usp.br/1enpppcpm/cd/conteudo/trab_pdf/139.pdf)> Pesquisado em: 25 de março de 2019.

RADOVANOVIC R. S; TESKEY, W.F. **Dynamic Monitoring of Deforming Structures: Gps Versus Robotic Tacheometry Systems**. Department of Geomatics Engineering - University of Calgary Calgary, 2001.

REDA, A; BEDADA, B. **Accuracy Analysis and Calibration of Total Station Based on the Reflectorless Distance Measurement**. School of Architecture and the Built Environment - Royal Institute of Technology. Stockholm, 2012.

ROBERTS, G. W; MENG, X.; DODSON, A. H. 2001. The Use of Kinematic GPS and Triaxial Accelerometers to Monitoring the Deflections of Large Bridges. In: **10th FIG Symposium on Deformation Measurements**. California, USA, 19-22 March 2001.

ROBERTS, G. W; MENG, X; DODSON, A. H. Integrating a Global Positioning System and Accelerometers to Monitor the Deflection of Bridges. **Journal of Surveying Engineering (ASCE)**, v. 130, n. 2, p. 65-72, 2004.

RÜEGER, J. M. **Electronic Distance Measurement: An Introduction**. Springer, 1996.

SCHAAL, R. E; LAROCCA, A. P. C. **A Methodology for monitoring vertical dynamic sub-centimeter displacements with GPS**. GPS Solutions. 2002.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: foundations, methods and applications**. 2nd ed. Berlin: Walter de Grynther, 2003. 589 p.

THOMPSON, A.; TAYLOR, B. N. **Guide for the Use of the International System of Units (SI)**. National Institute of Standards and Technology Special Publication 811 (2008 Edition). National Institute of Standards and Technology / U.S. Department of Commerce, 2008.

UREN, J.; PRICE, W. F. **Surveying for Engineers**. Palgrave Macmillan, 2010.

VEIGA, L. A. K; ZANETTI, M. A. Z; FAGGION, P. L. **Fundamentos de topografia**. Engenharia Cartográfica e de Agrimensura. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

VEIGA, L. A. K. **Topografia Automatizada**. Curso de Especialização Em Geotecnologias – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006. 61f.

WISEU, T; ALMEIDA, A. B. **Plano de Emergência Interno de Barragens**. 5º Congresso da Água, Lisboa, 2000.

WATSON, G.A. Computing Helmert transformations. **Journal of Computational and Applied Mathematics**. vol. 197, 2, pp. 387-394, (2006). Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377042705006862?via%3Dihub>> Acesso: 16/04/2007

WEEKS, M. Processamento de sinais utilizando MATLAB e Wavelets. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 413 p.

Xu Chang, X; Qunge, H. Dynamic Structural Monitoring Using the Kinematic Positioning of a Robotic Total Station. **The Ninth International Conference on Electronic Measurement & Instruments**. 2009

YI, T; LI, H; GU, M. Experimental assessment of high-rate GPS receivers for deformation monitoring of bridge. In: **Measurement**, v. 46, n.1, p. 420-432, jan. 2013.

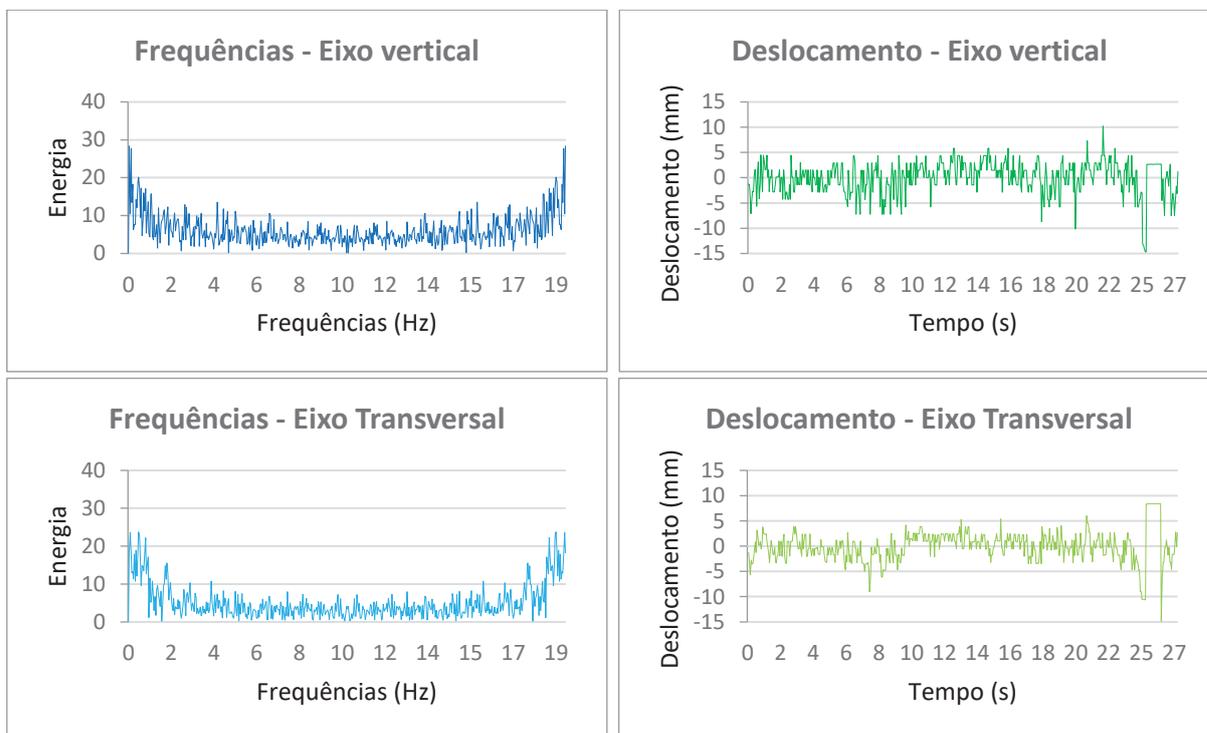
YU, M.; GUO, H; CHENGWU, Z. Application of wavelet analysis to GPS deformation monitoring. In: **Position, Location, and Navigation Symposium**, 1nd., 2006, San Diego, USA. ION. San Diego: IEEE, 2006.

Zou, Y., Tong, L. e Steven, G. P., Vibraton-Based Model-Dependent Damage (Delamination) Identification and Health Monitoring for Composite Structures – A Review. **Journal of Sound and Vibration**, 230(2). 2000. 357-378.

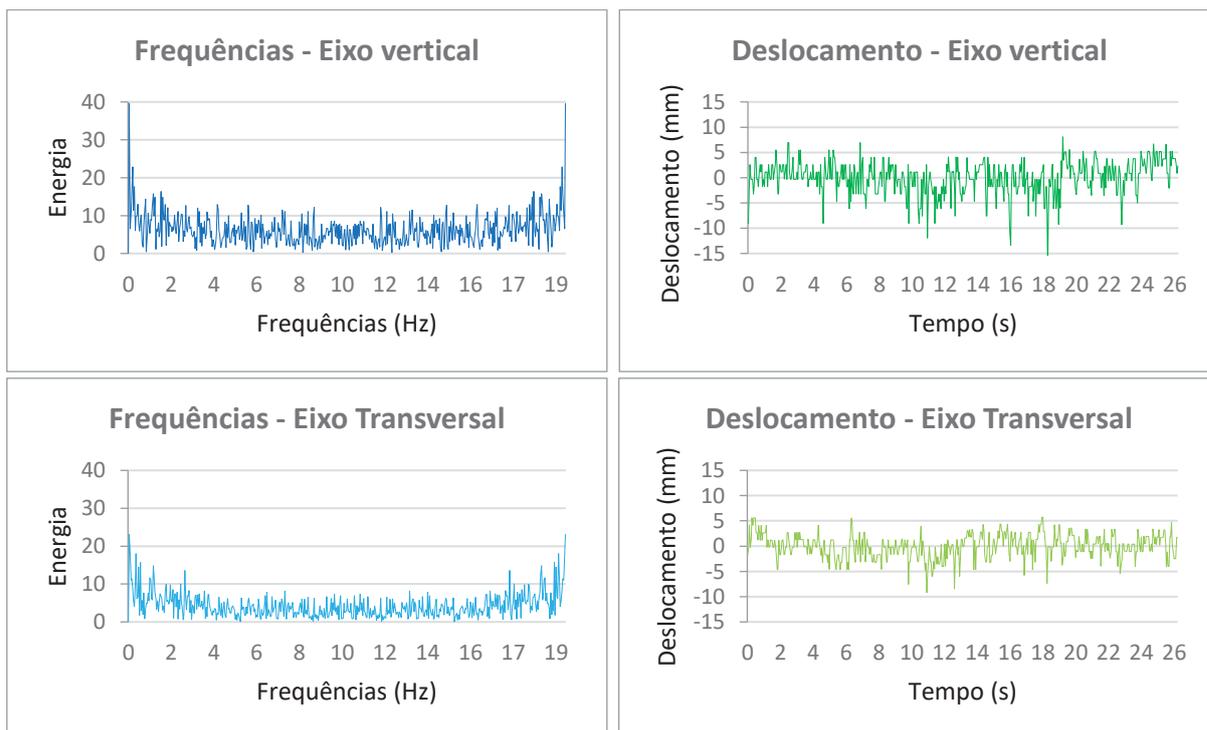
## ANEXO 1 - RESULTADOS OBTIDOS DOS EXPERIMENTOS

### RESULTADOS EXPERIMENTO 1 – ETR

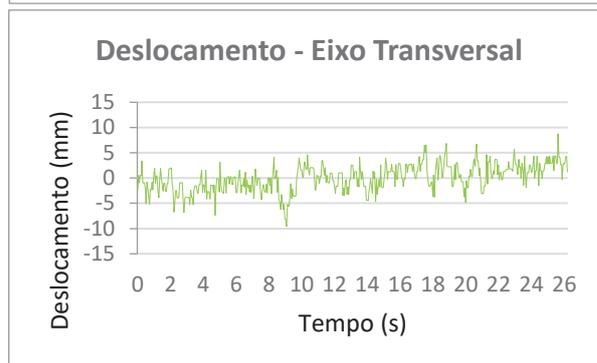
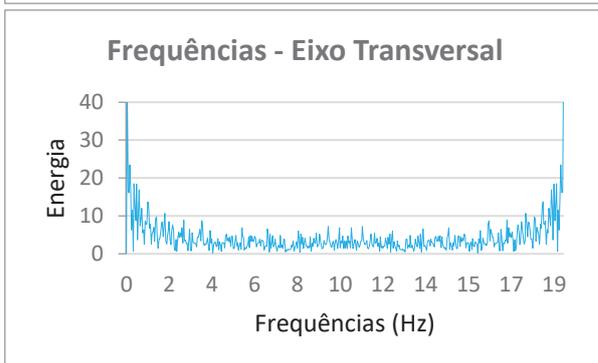
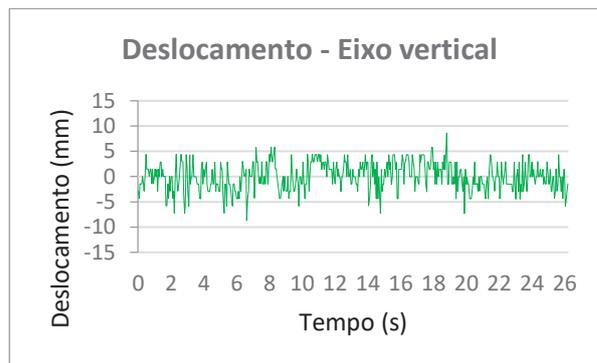
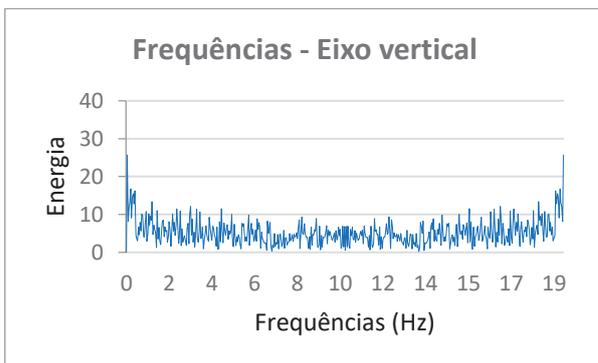
#### Bloco 1.1



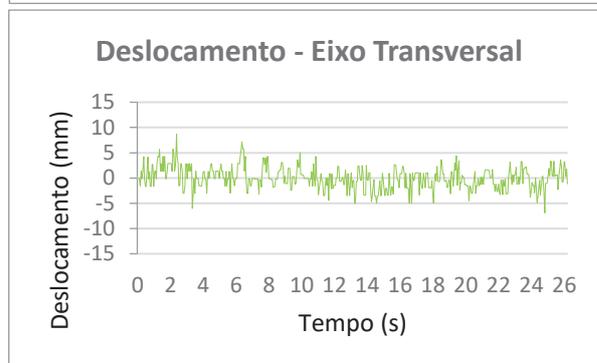
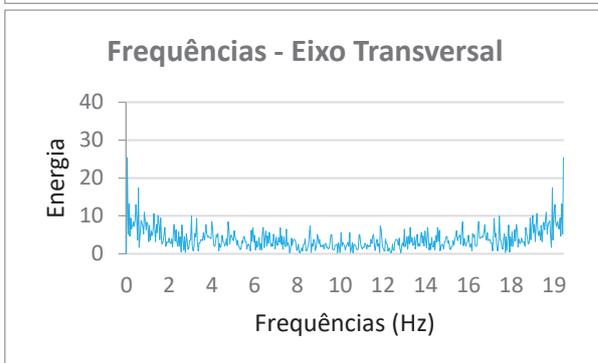
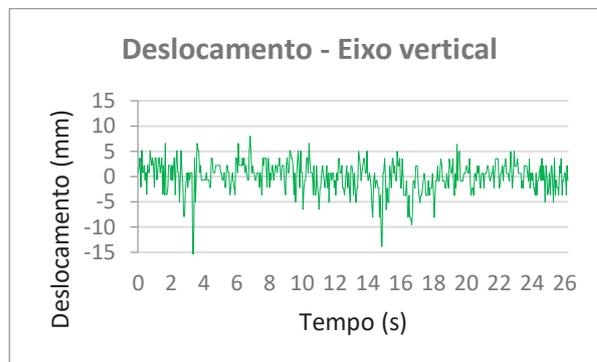
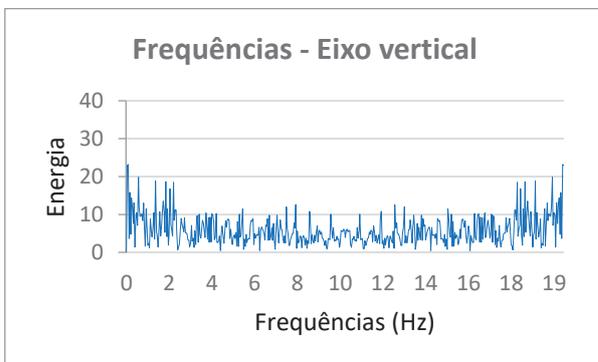
#### Bloco 1.2



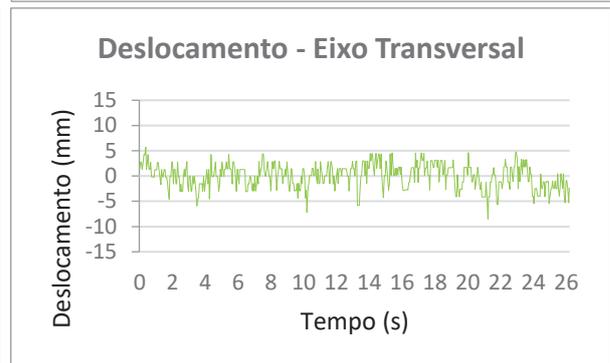
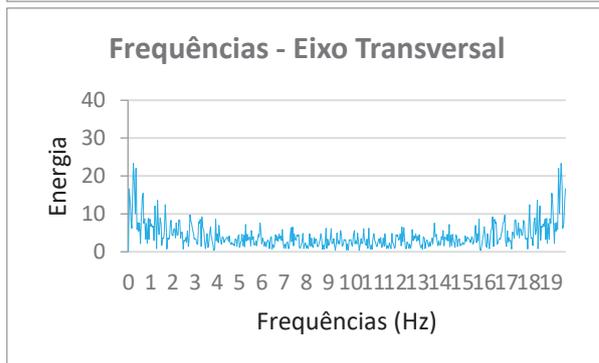
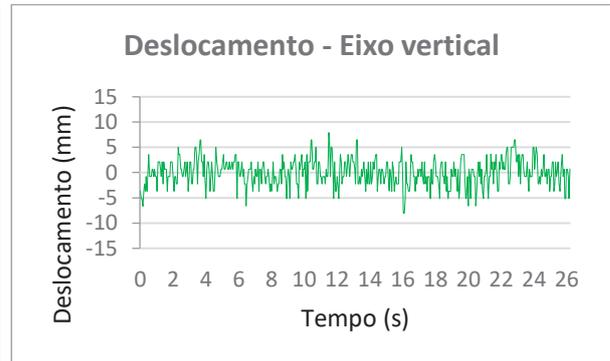
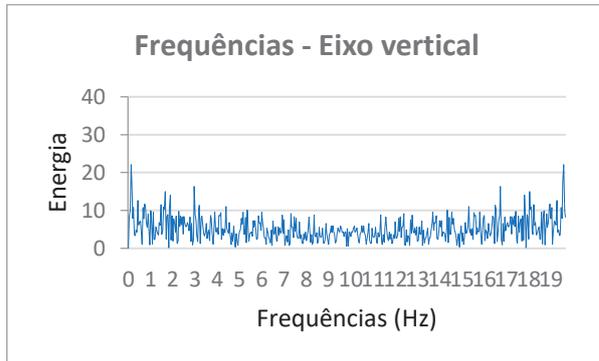
## Bloco 1.3



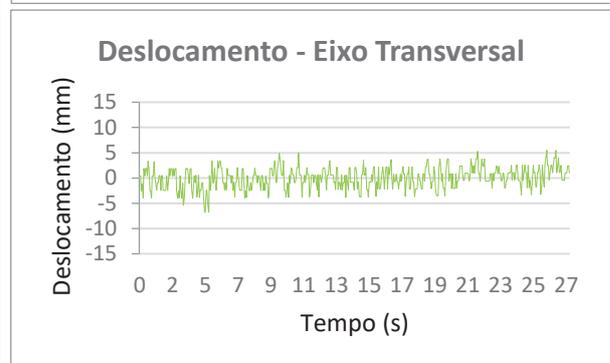
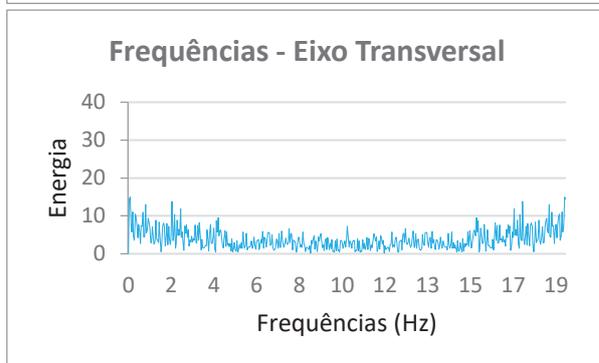
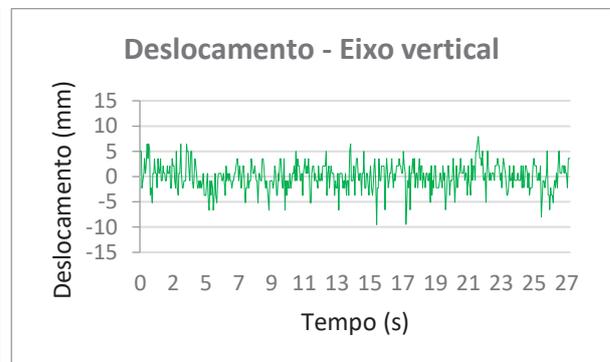
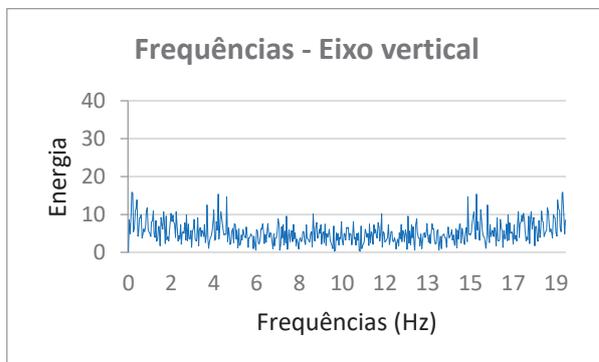
## Bloco 1.4



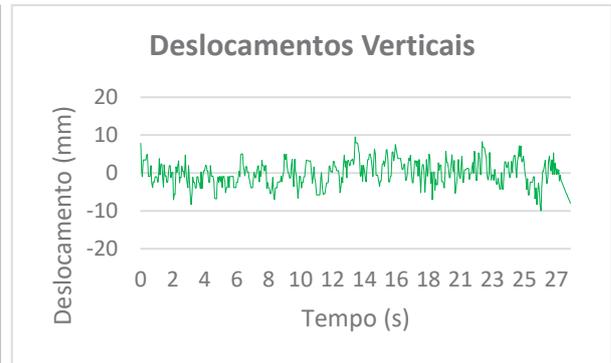
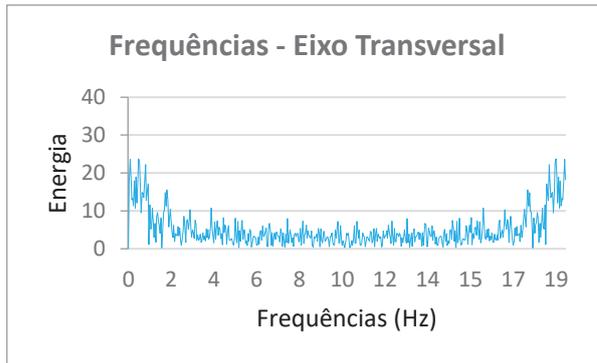
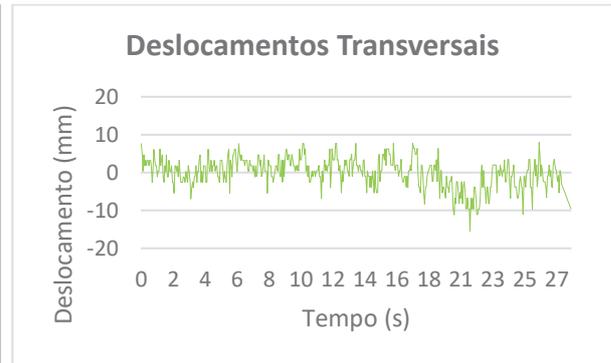
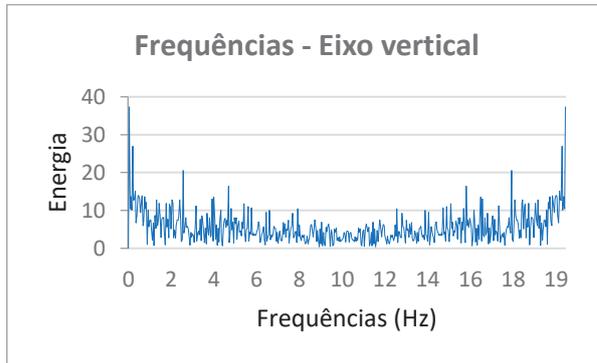
## Bloco 1.5



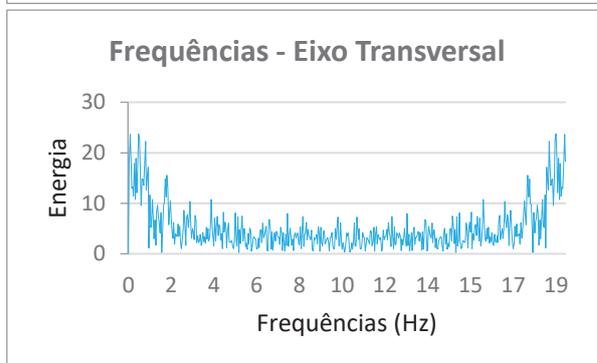
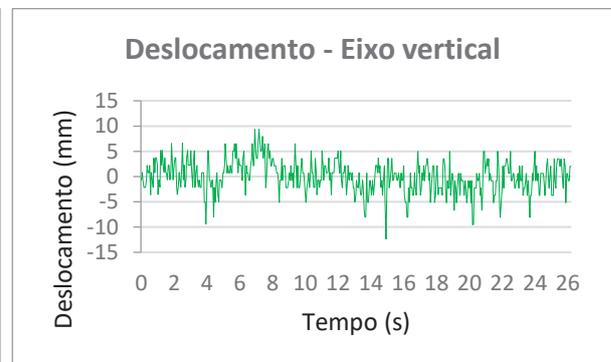
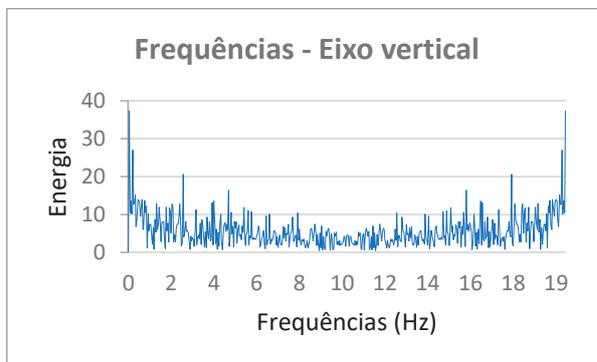
## Bloco 1.6



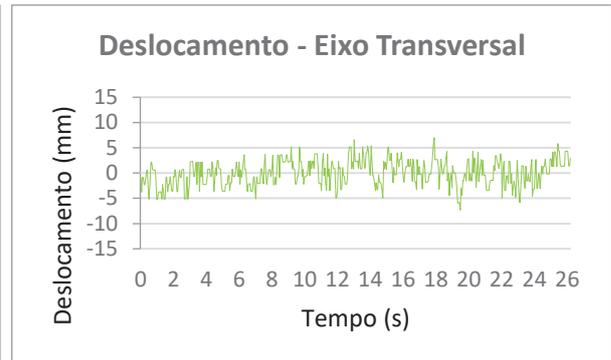
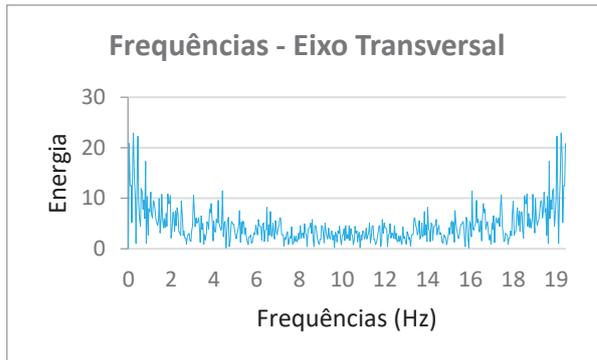
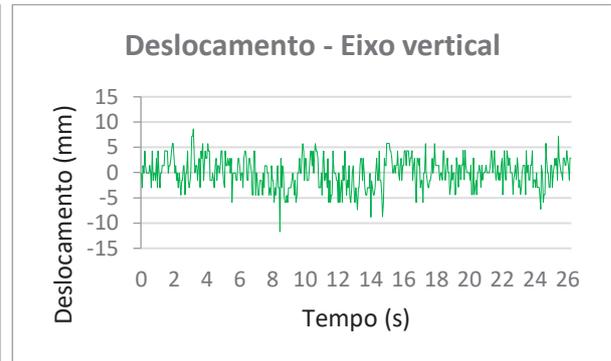
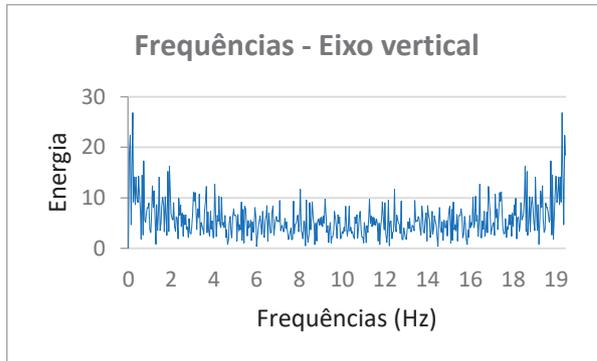
## Bloco 1.7



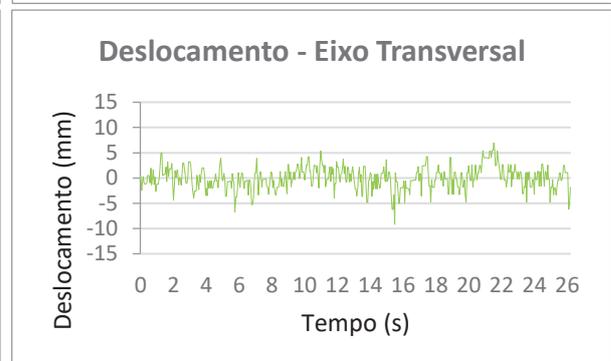
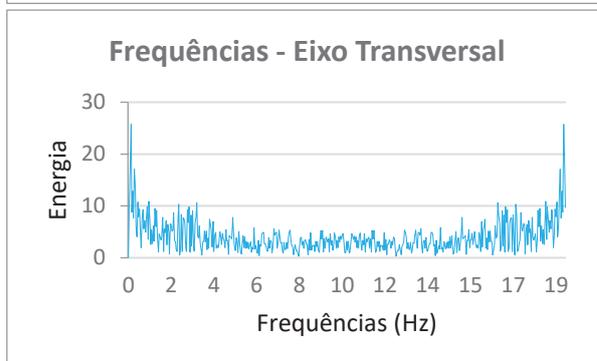
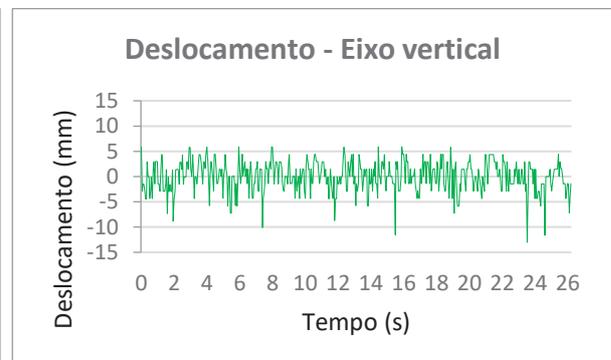
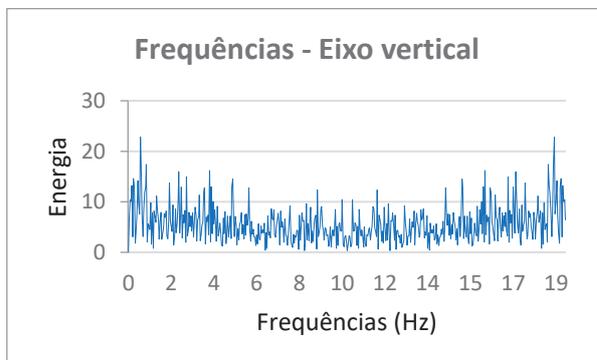
## Bloco 1.8



## Bloco 1.9

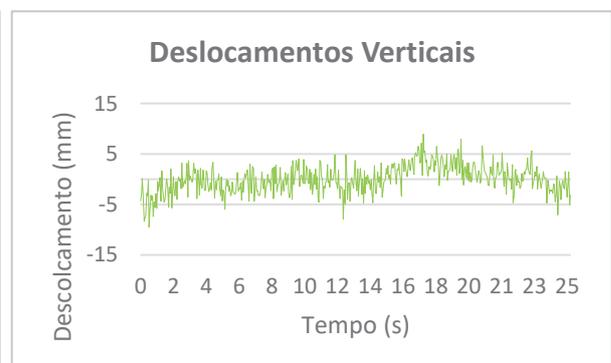
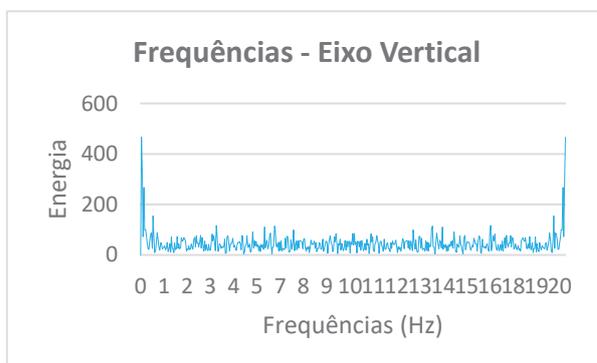
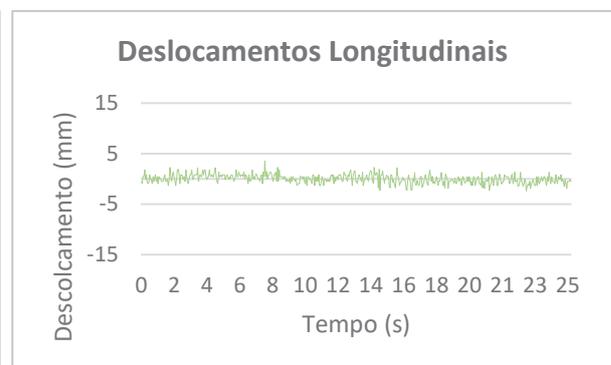
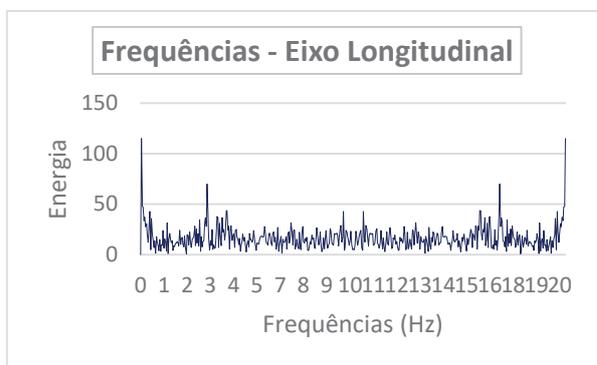
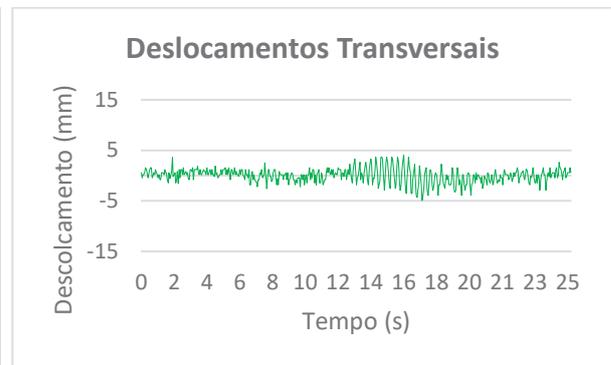
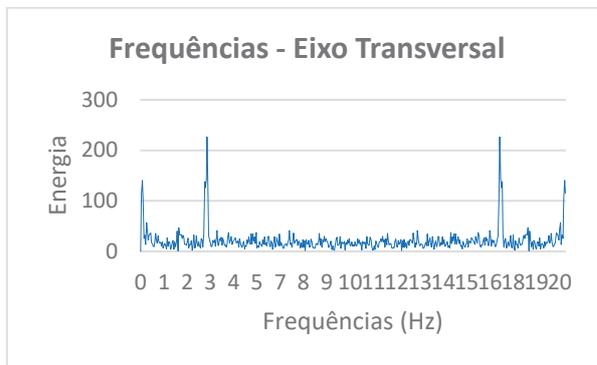


## Bloco 1.10

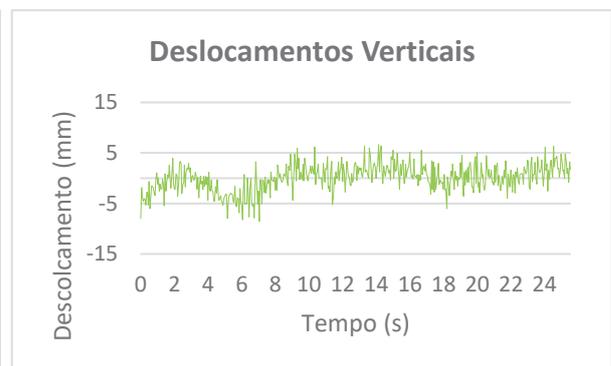
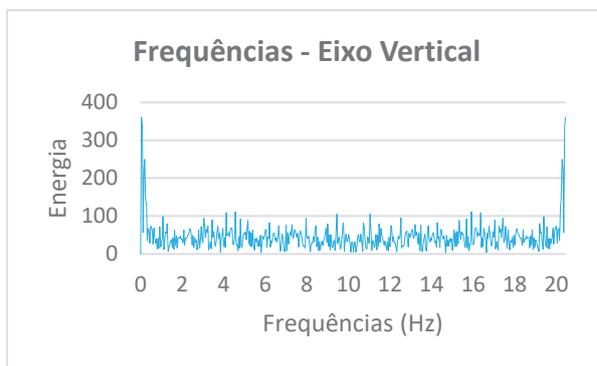
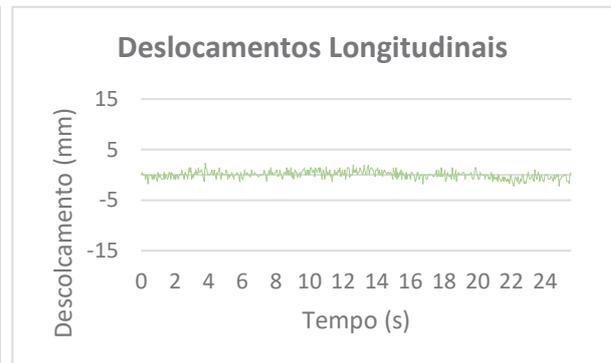
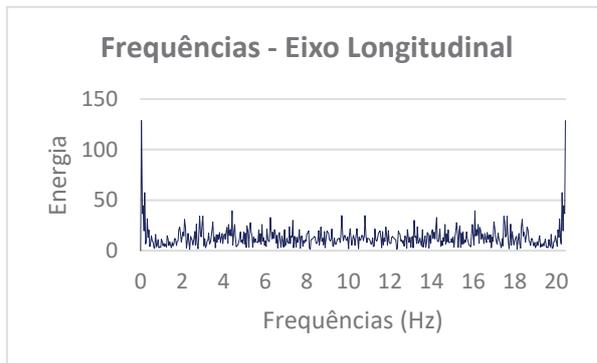
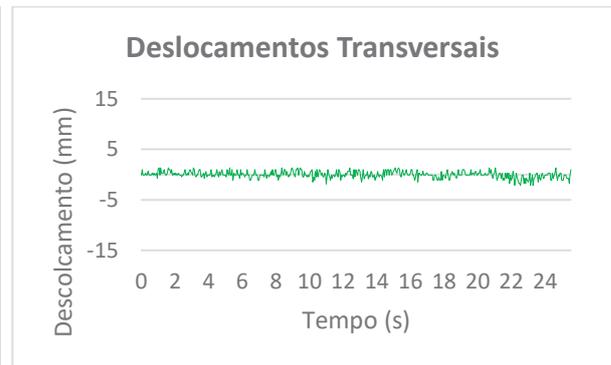
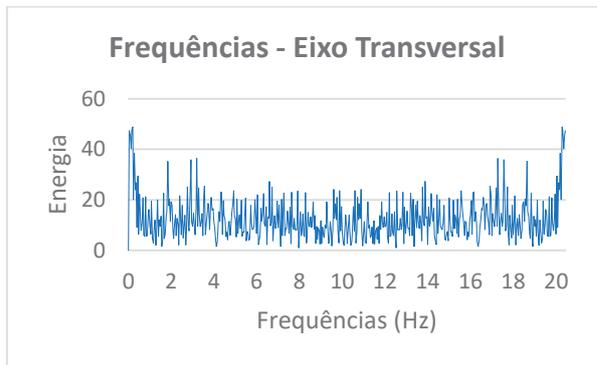


## RESULTADOS EXPERIMENTO 1 – GNSS

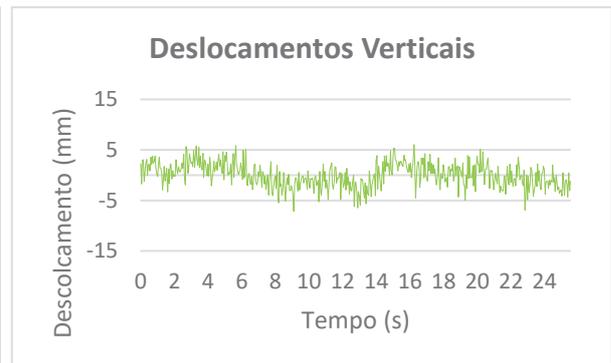
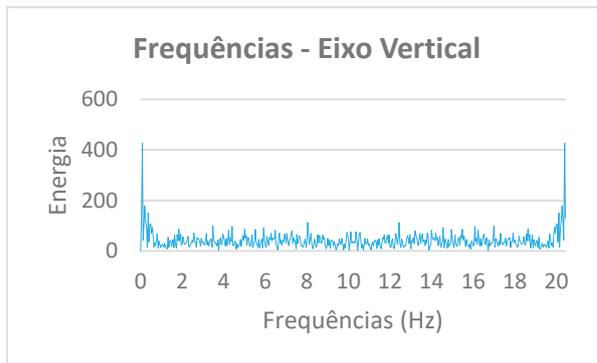
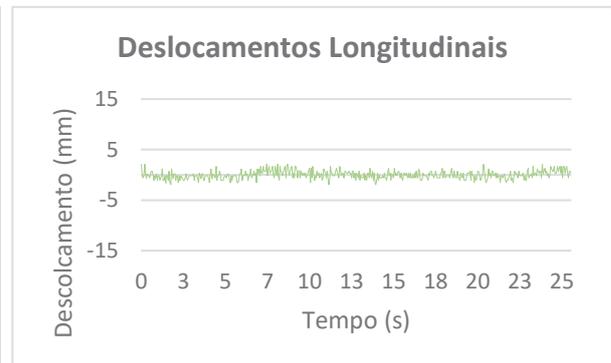
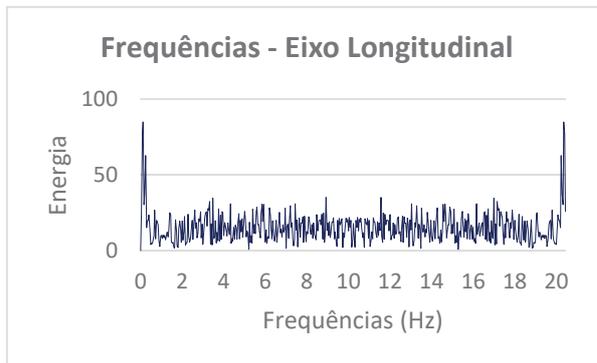
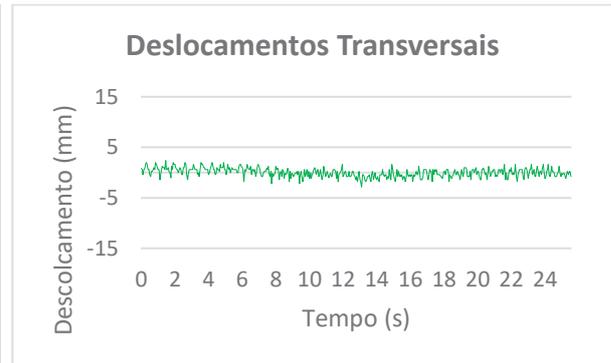
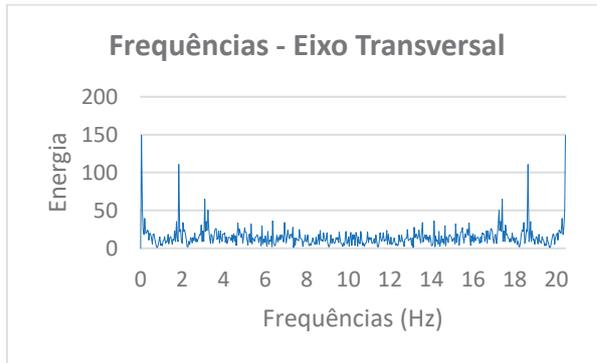
## Bloco 1.1



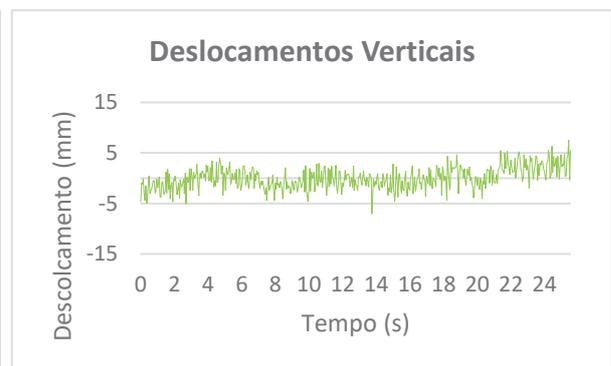
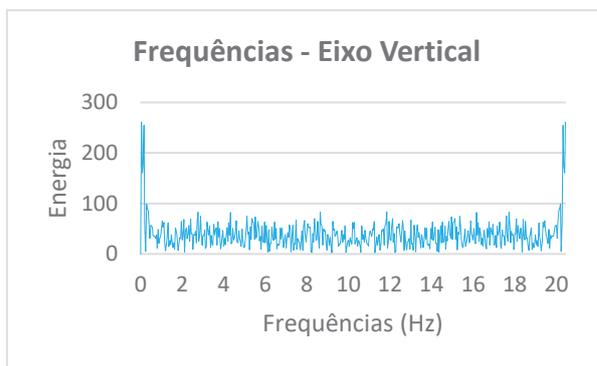
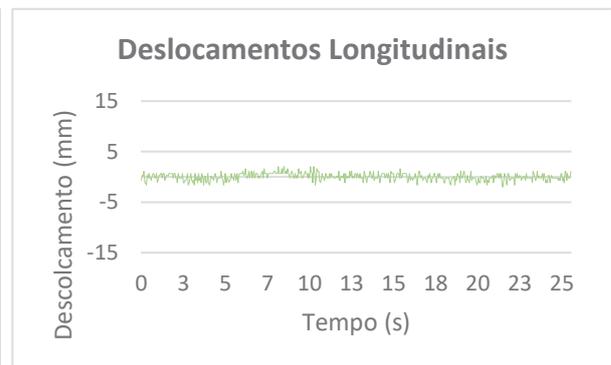
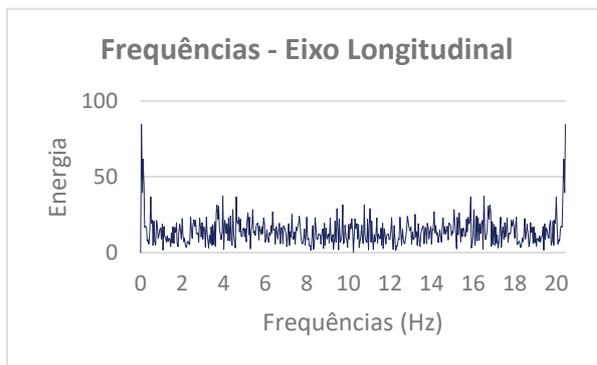
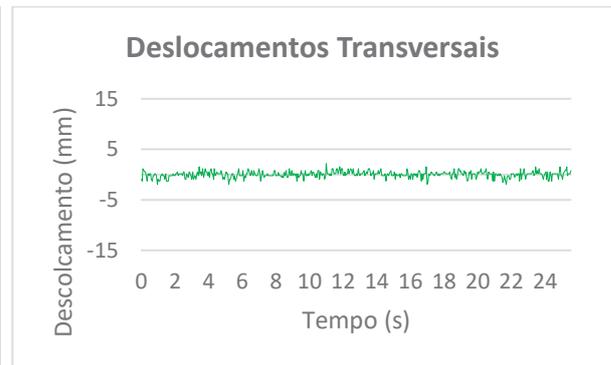
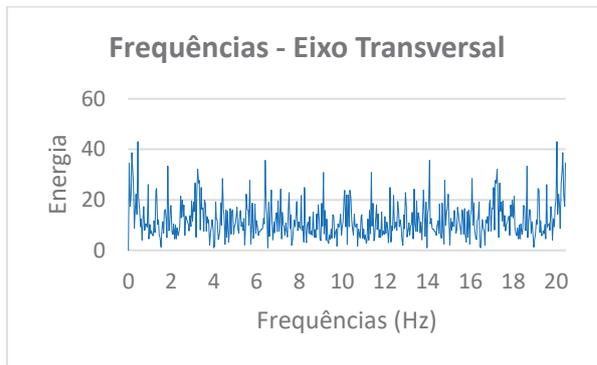
## Bloco 1.2



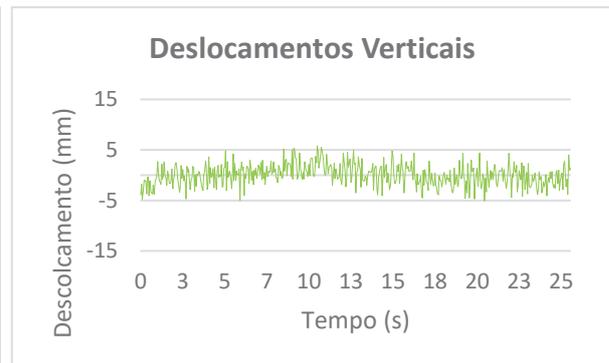
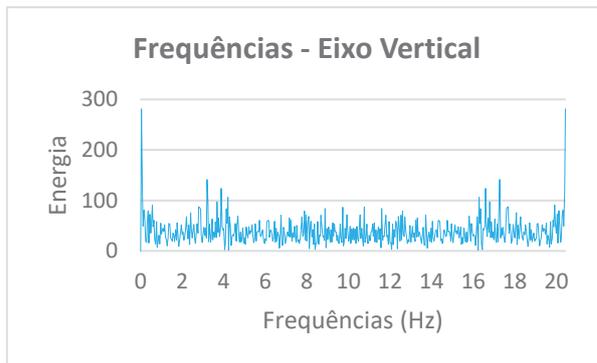
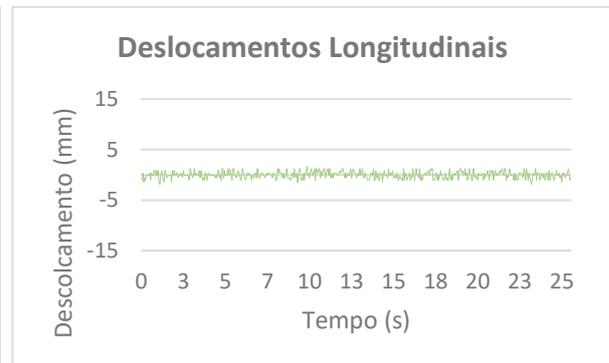
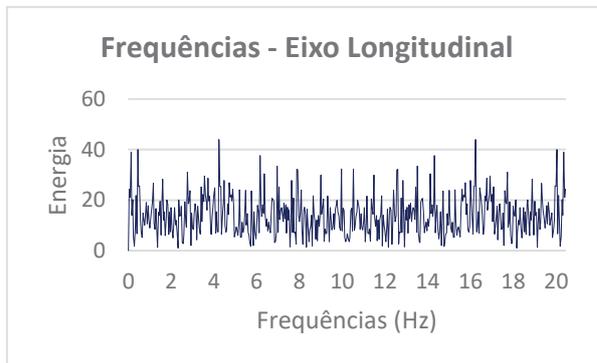
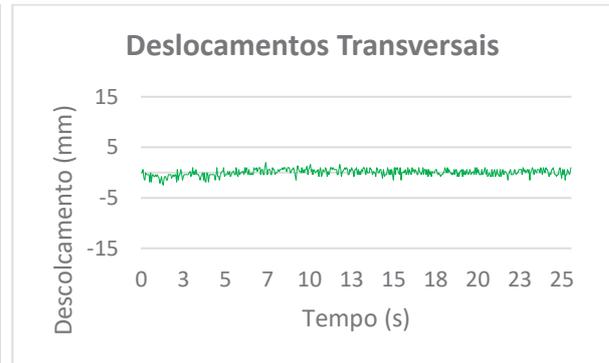
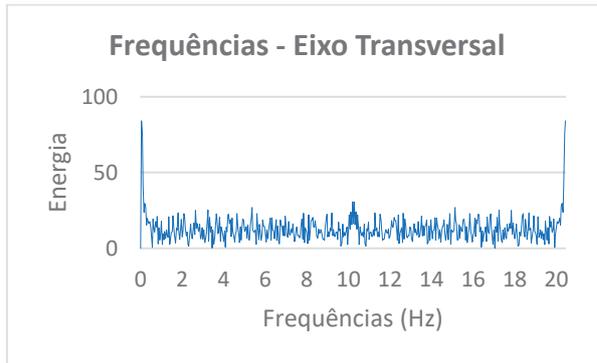
## Bloco 1.3



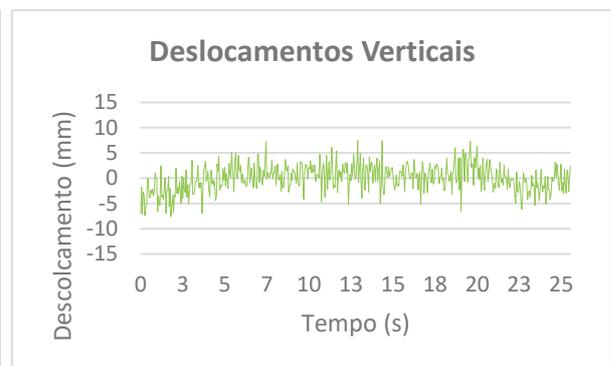
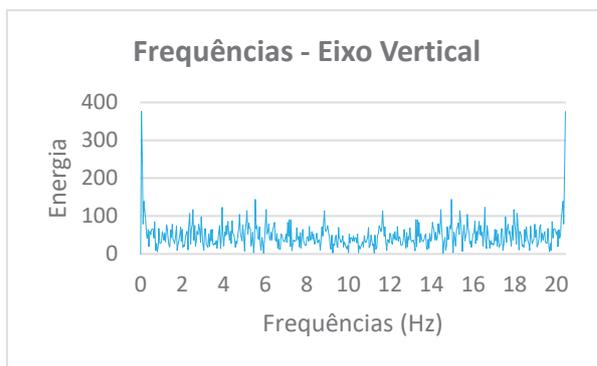
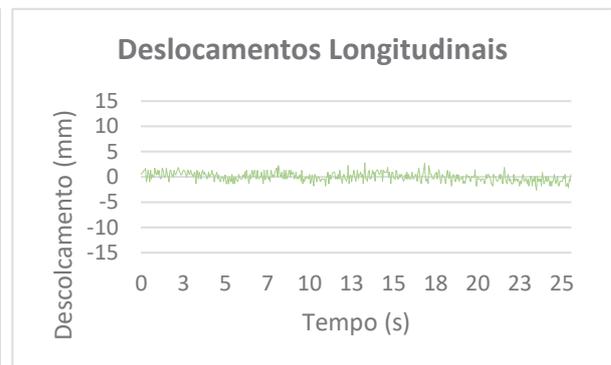
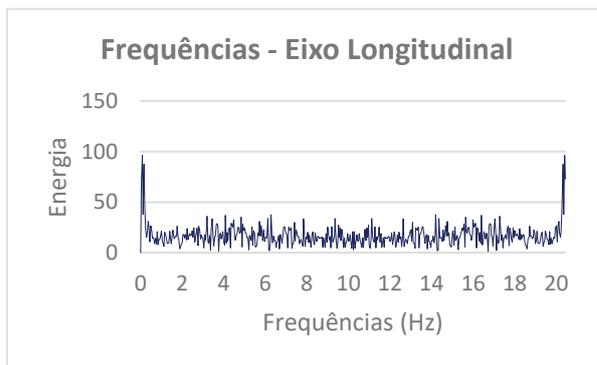
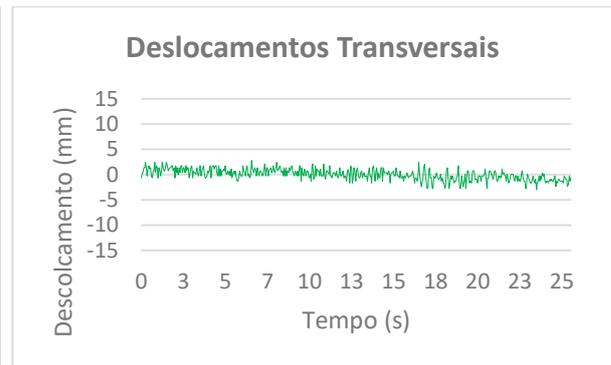
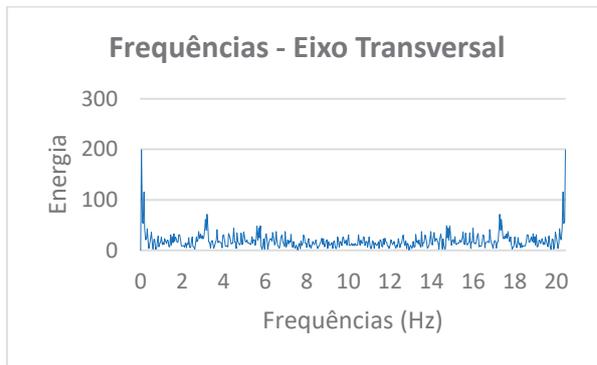
## Bloco 1.4



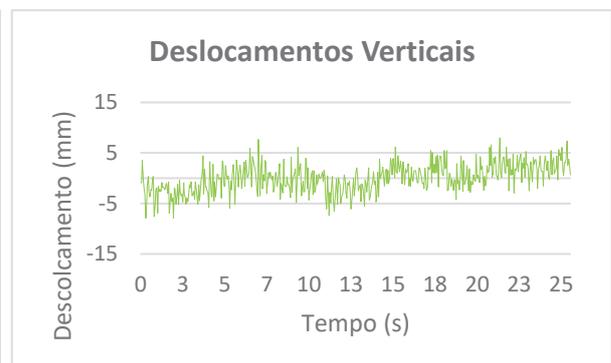
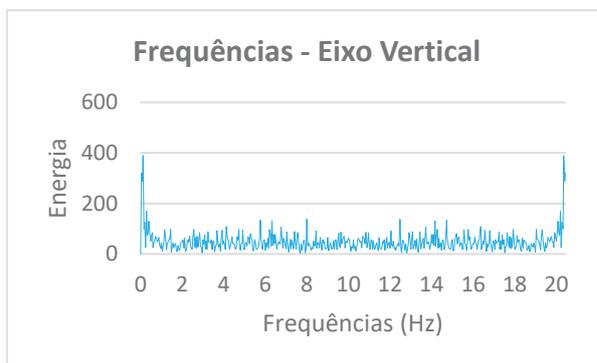
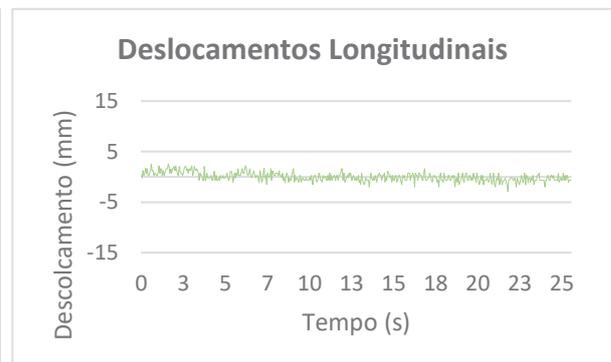
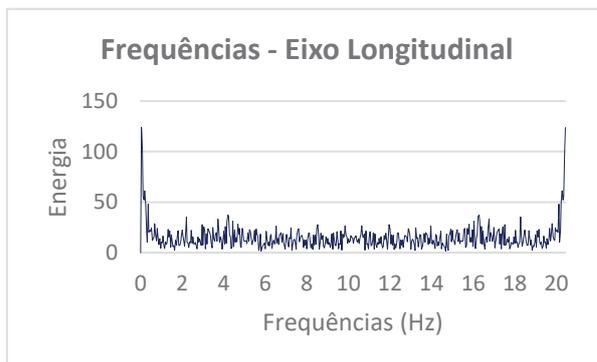
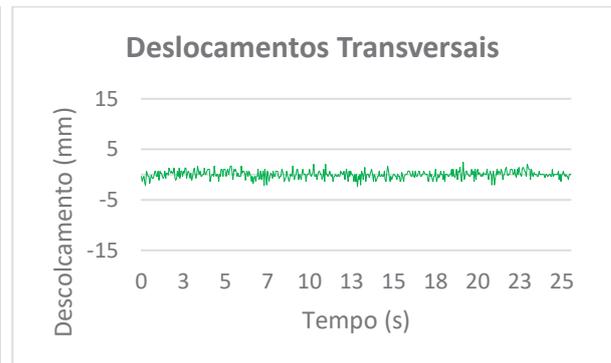
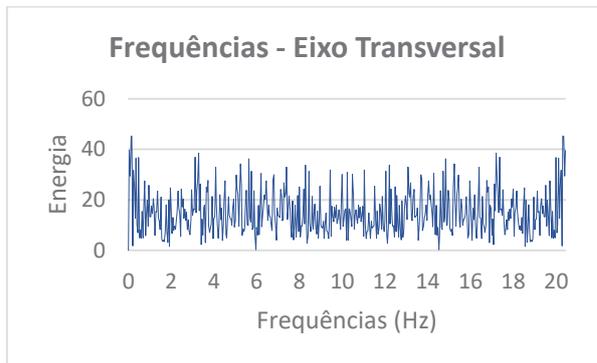
## Blco 1.5



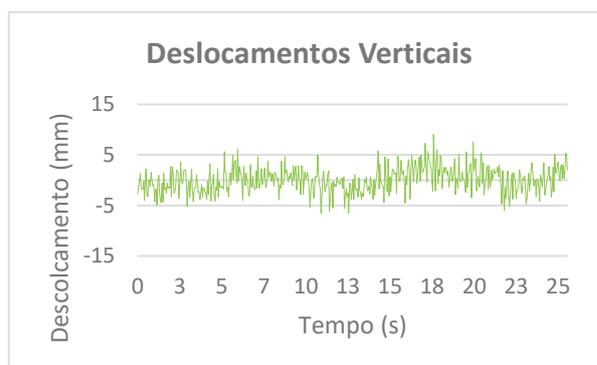
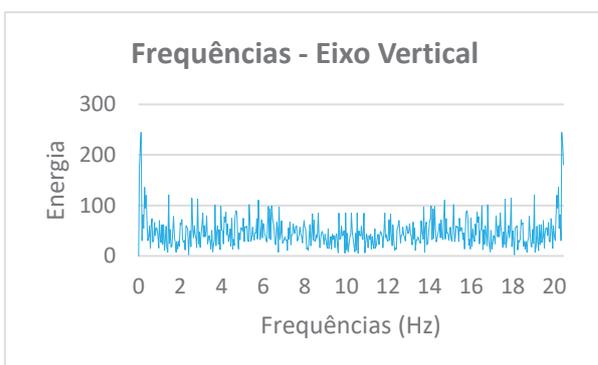
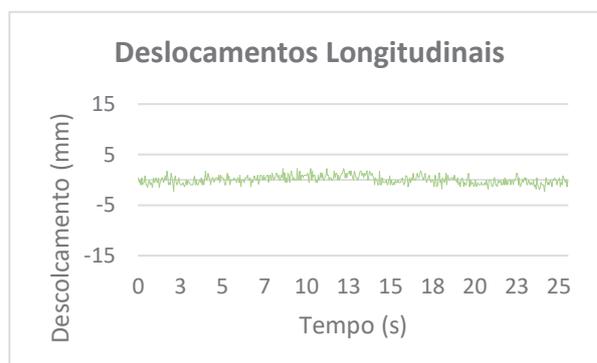
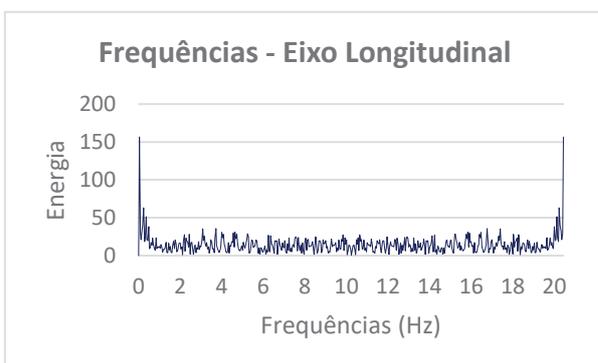
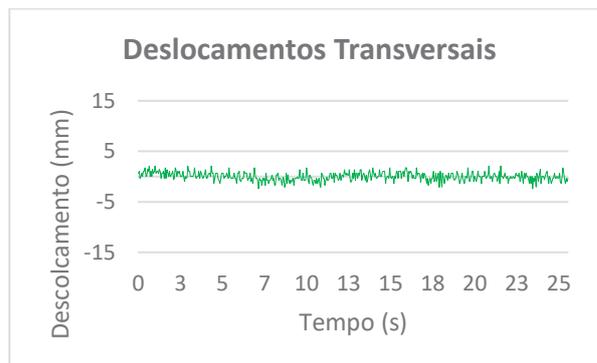
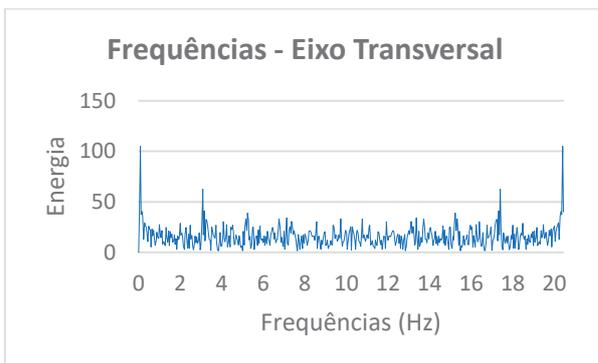
## Bloco 1.6



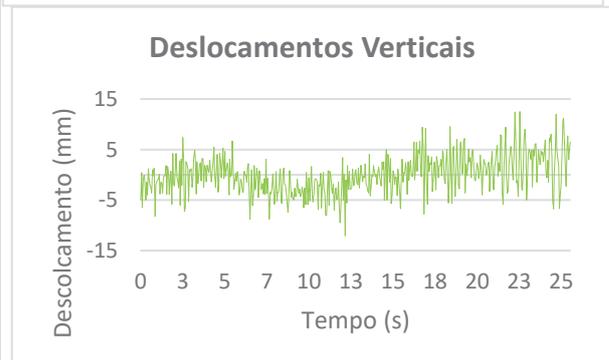
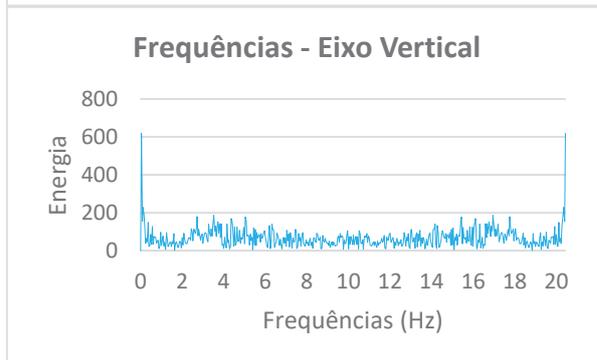
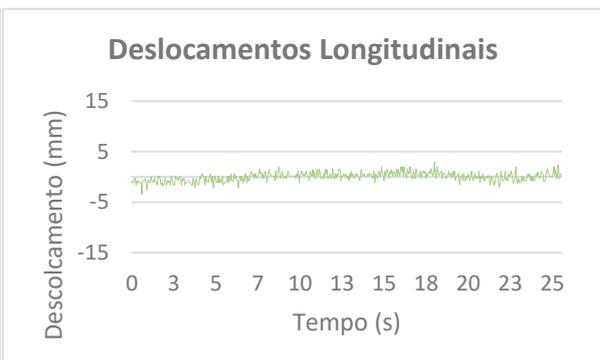
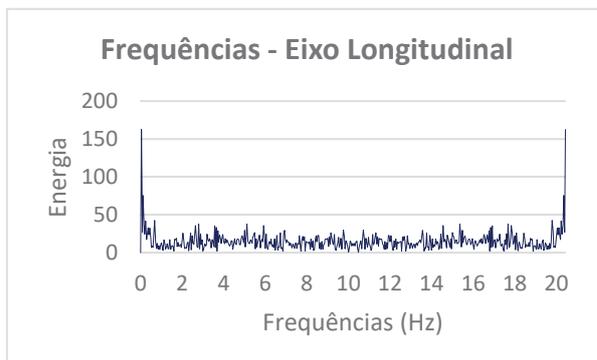
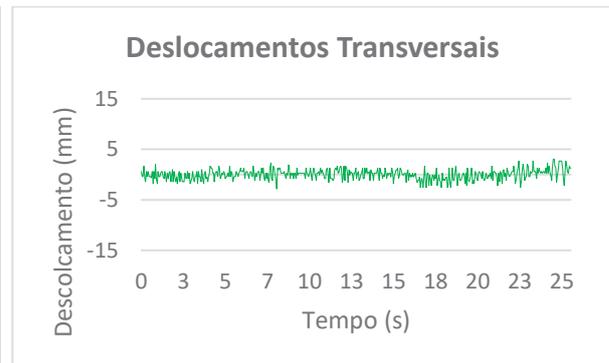
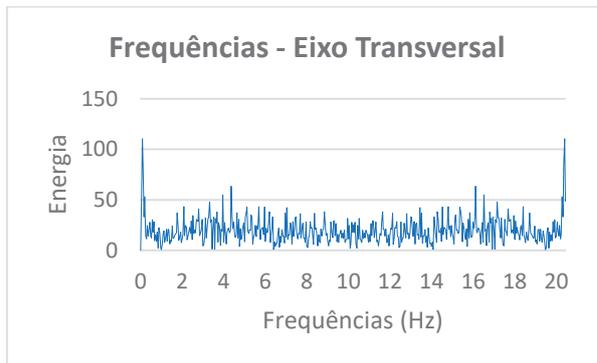
## Bloco 1.7



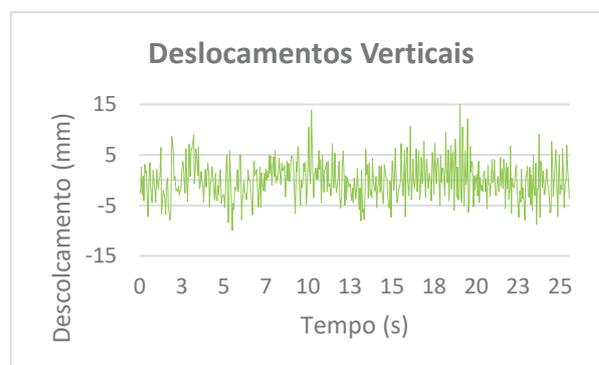
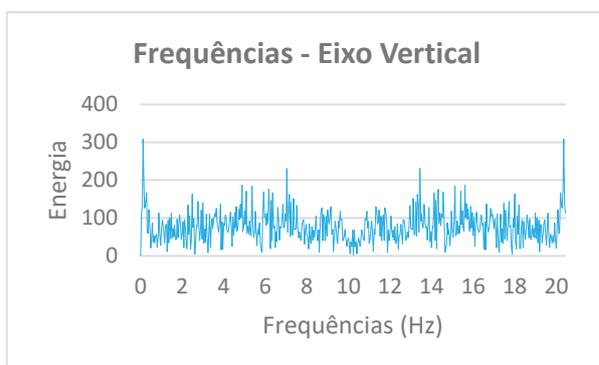
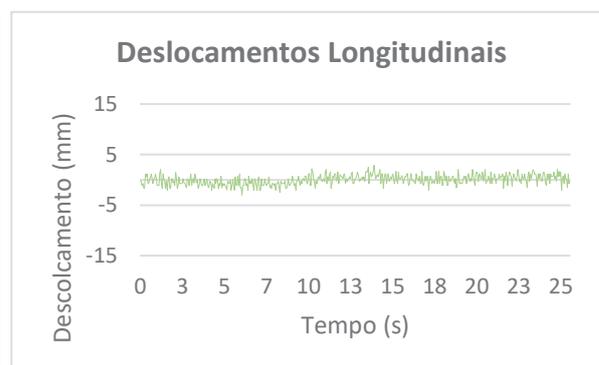
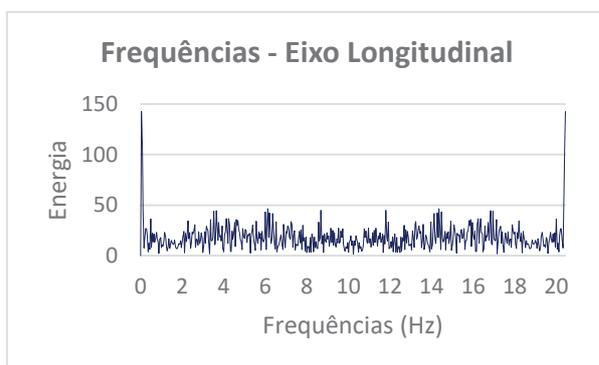
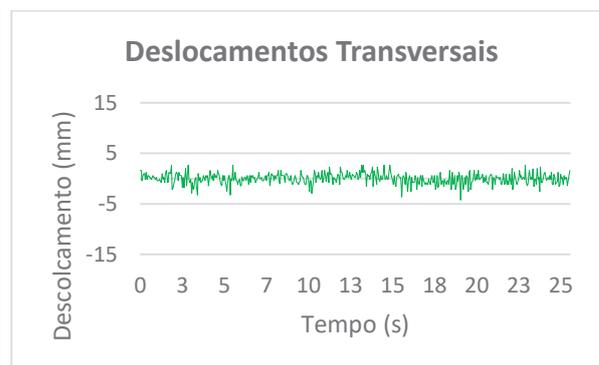
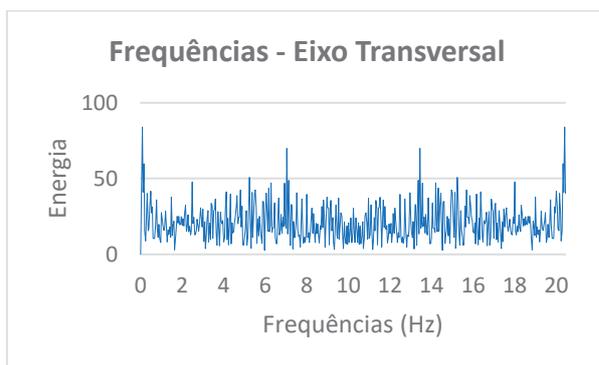
## Bloco 1.8



## Bloco 1.9

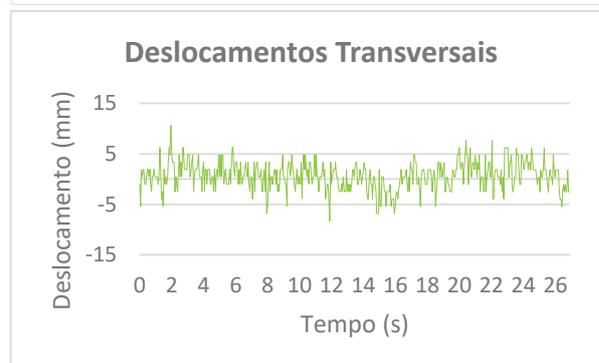
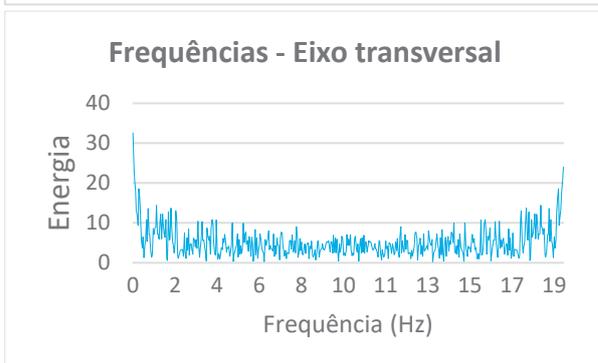
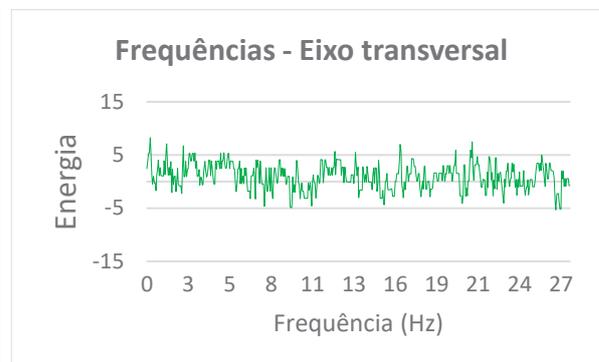
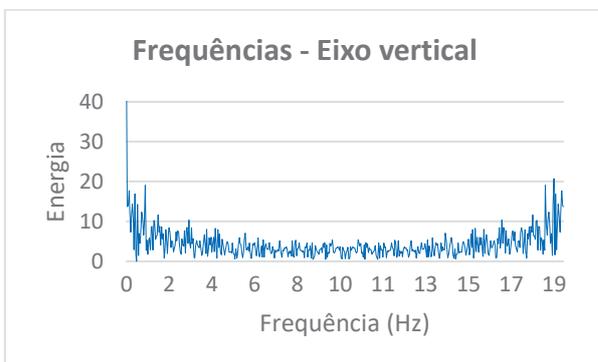


## Bloco 1.10

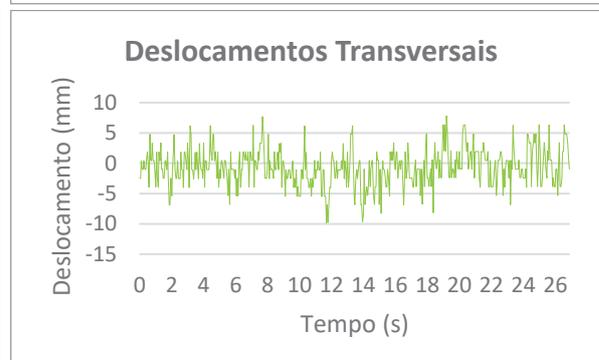
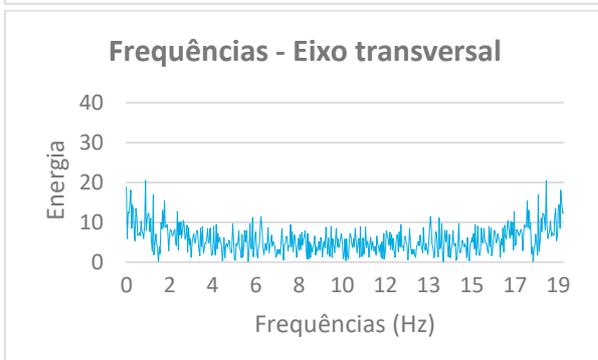
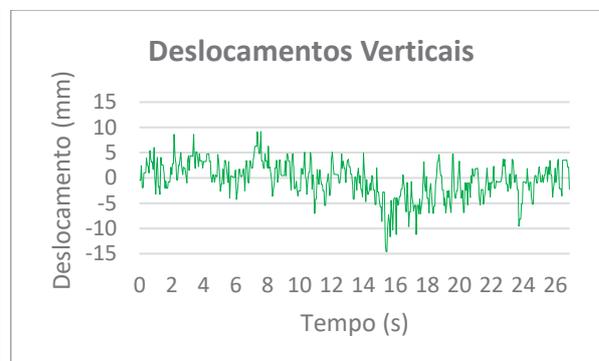
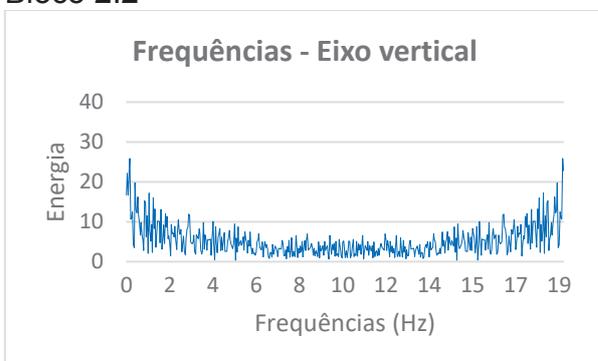


## RESULTADOS EXPERIMENTO 2 – ETR

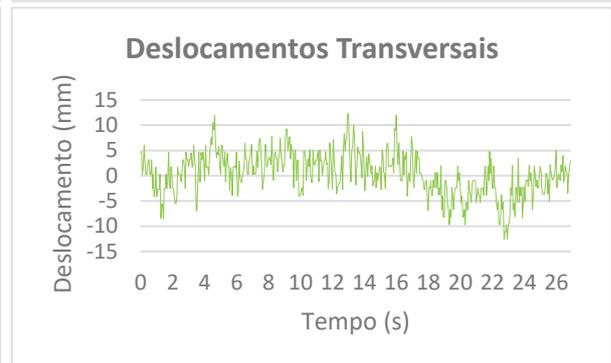
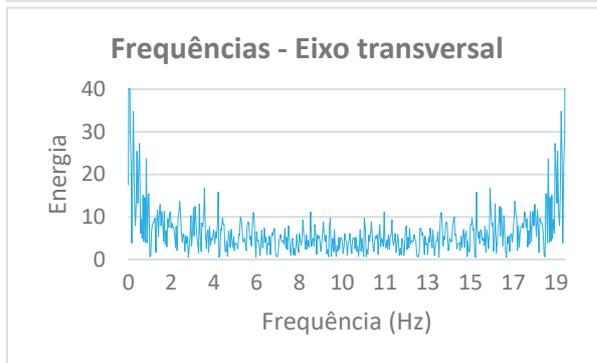
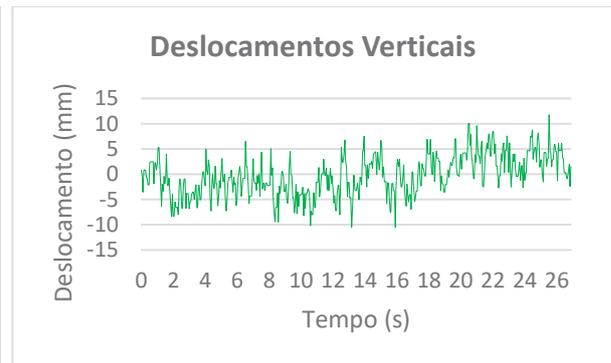
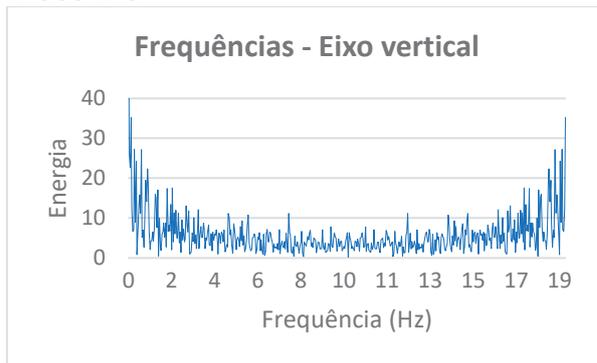
## Bloco 2.1



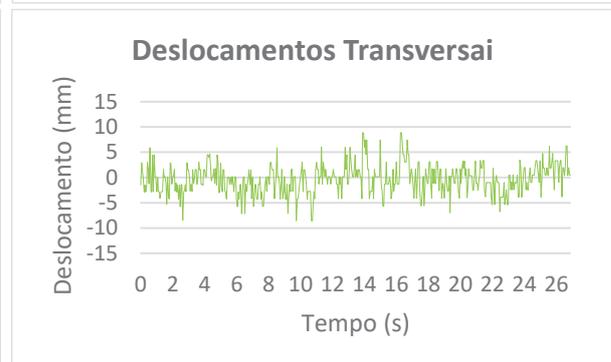
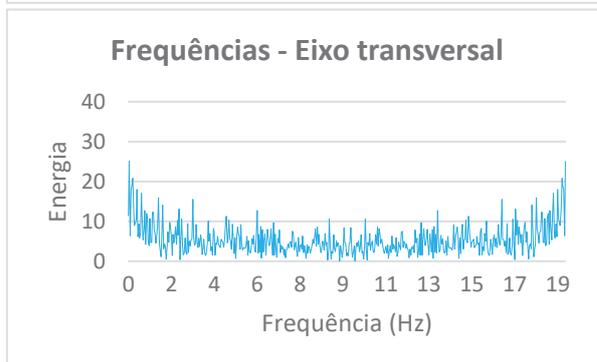
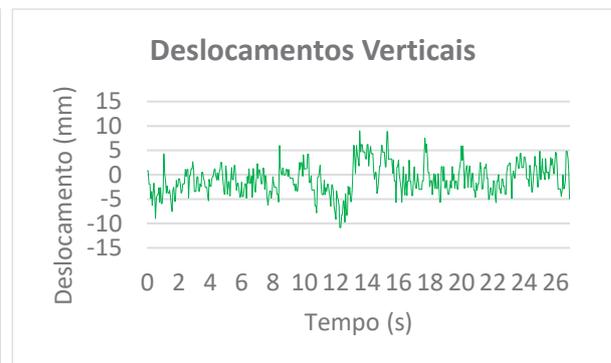
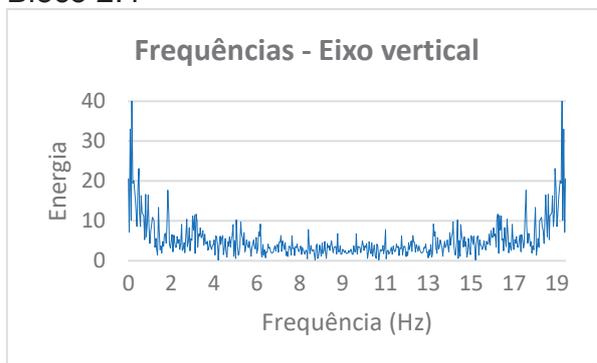
## Bloco 2.2



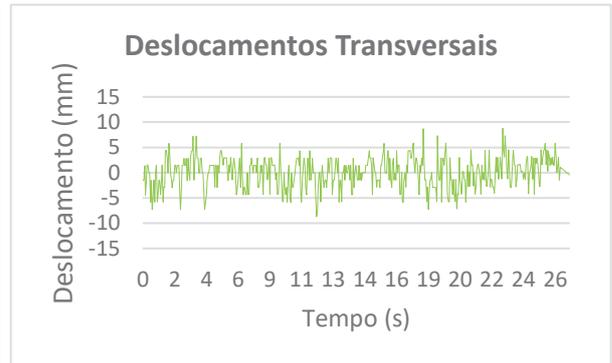
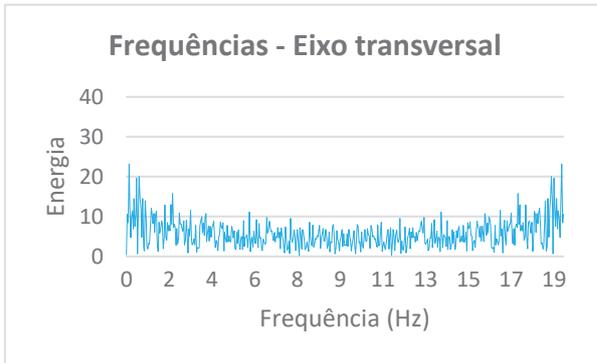
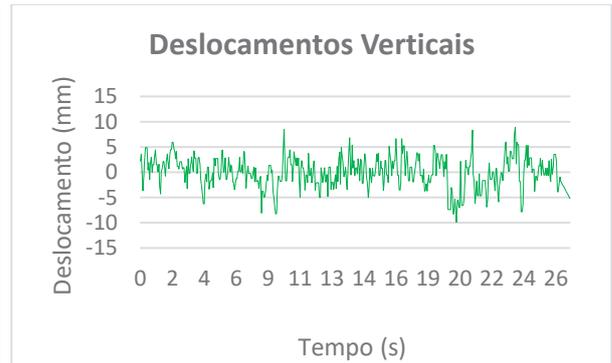
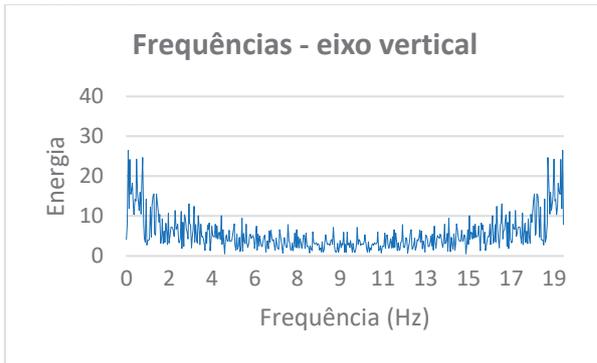
## Bloco 2.3



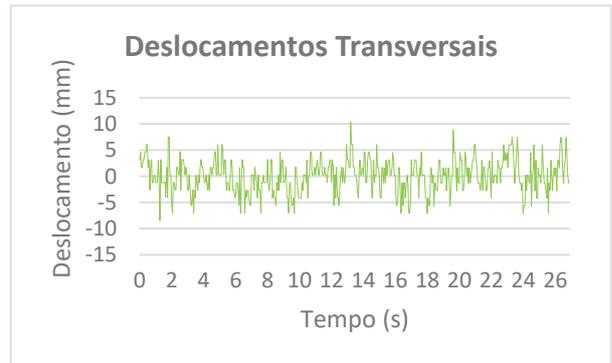
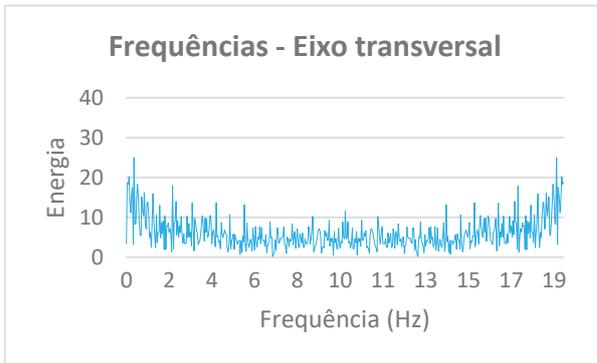
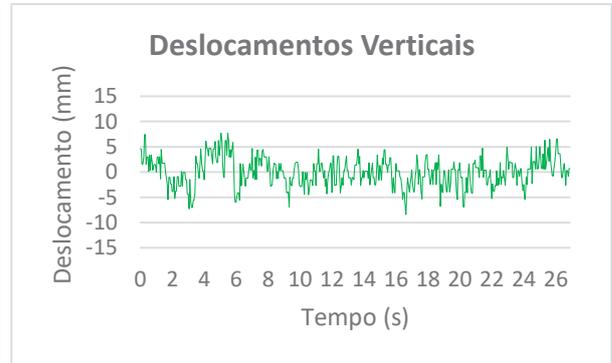
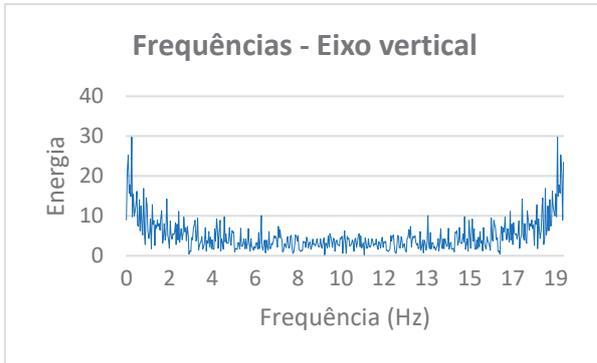
## Bloco 2.4



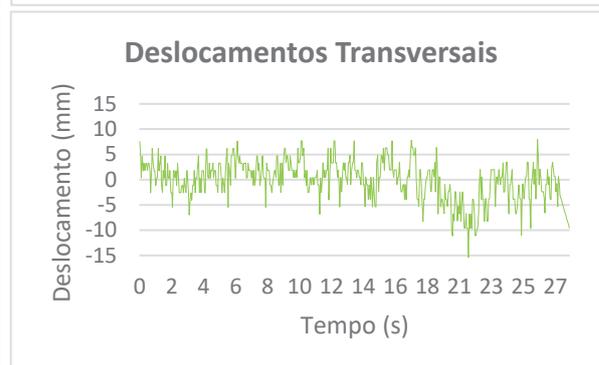
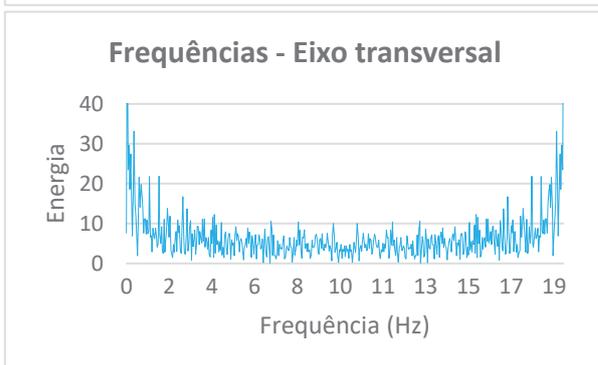
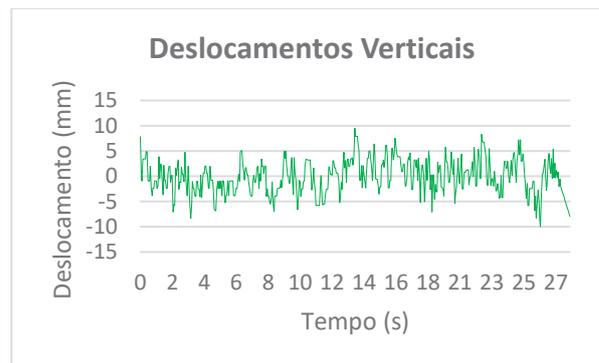
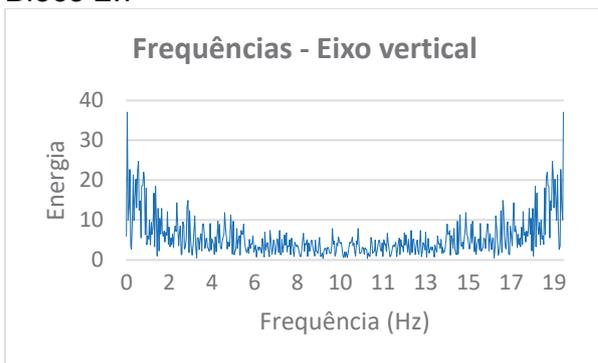
Bloco 2.5



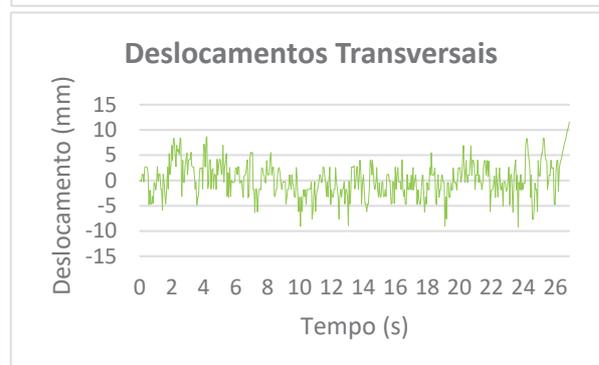
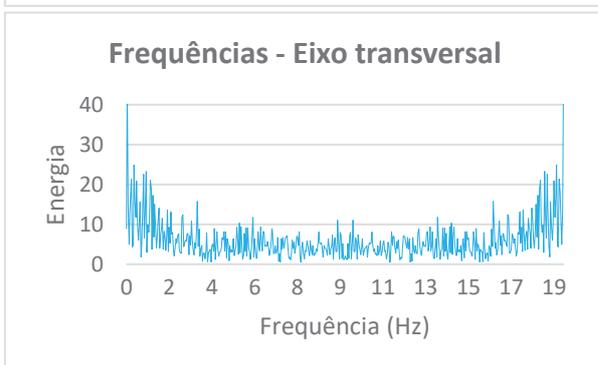
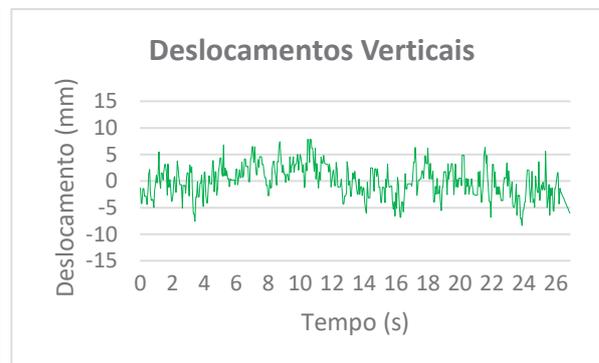
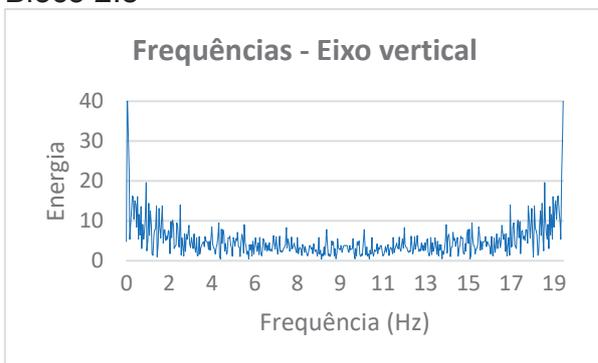
Bloco 2.6



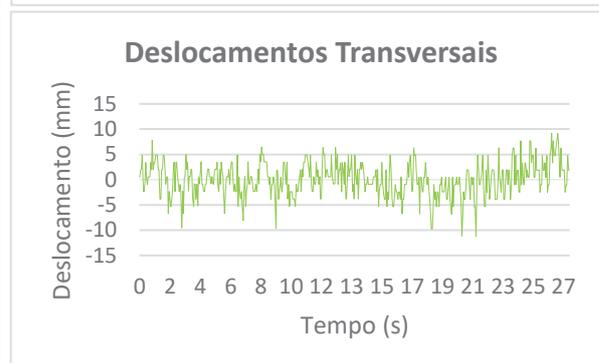
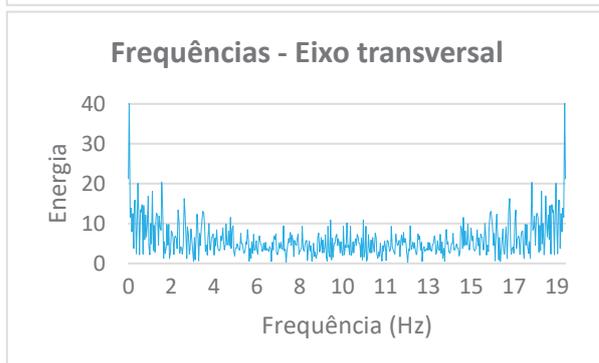
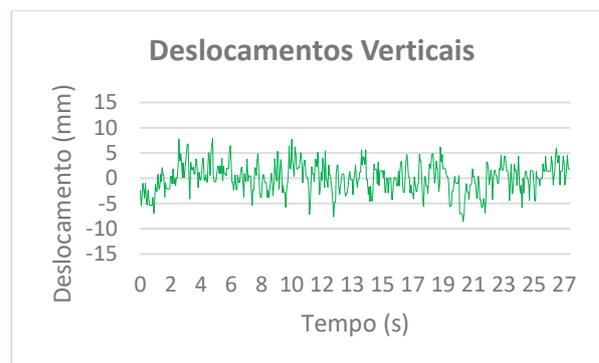
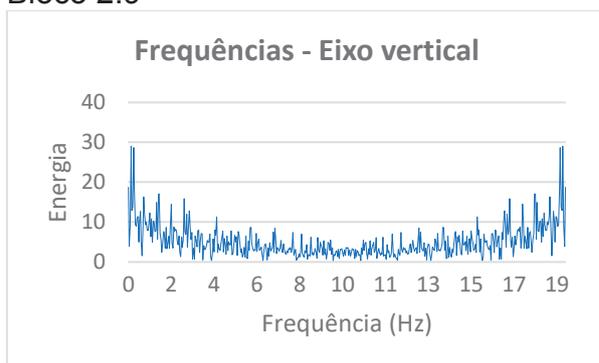
## Bloco 2.7



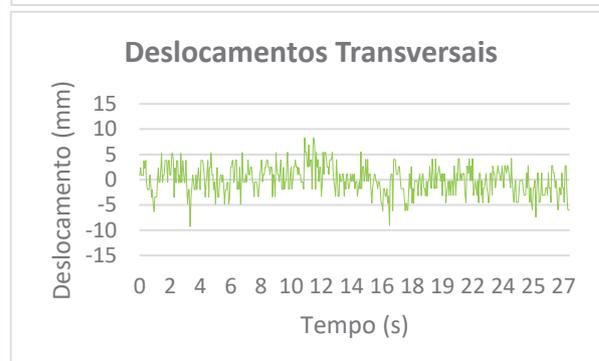
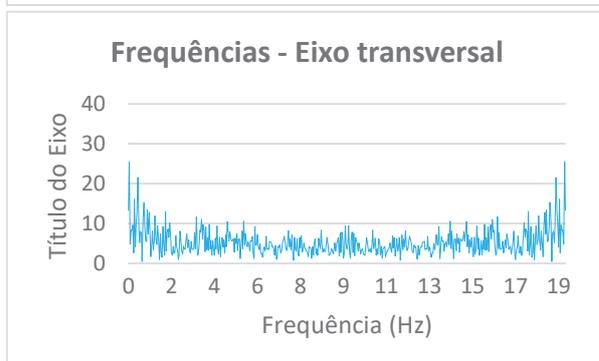
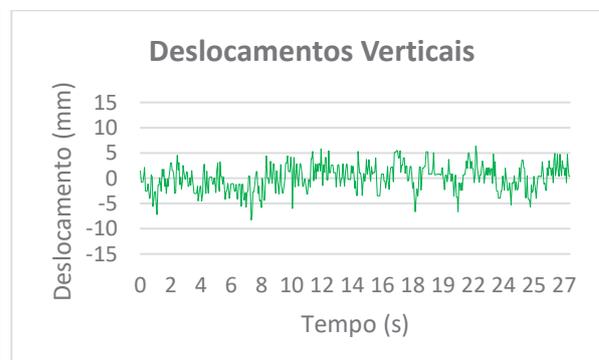
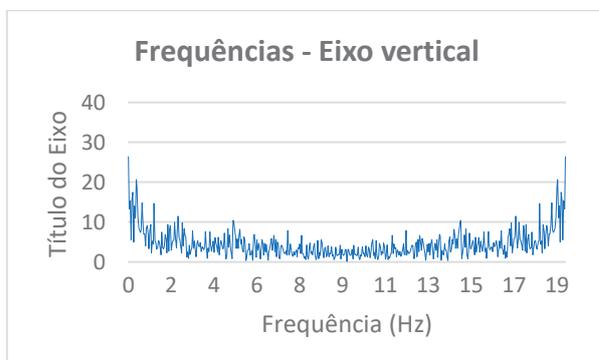
## Bloco 2.8



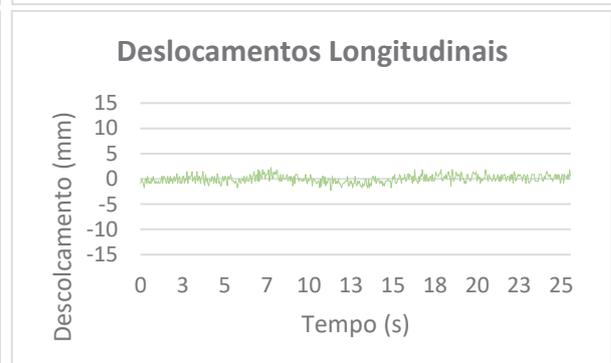
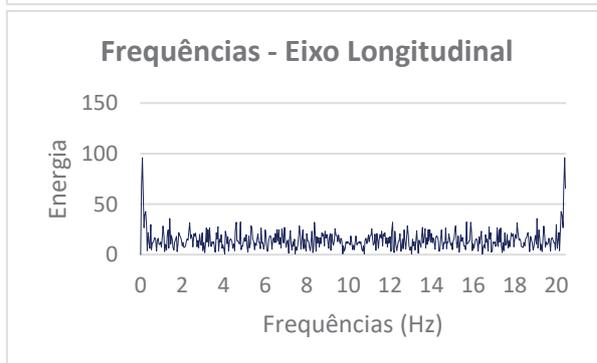
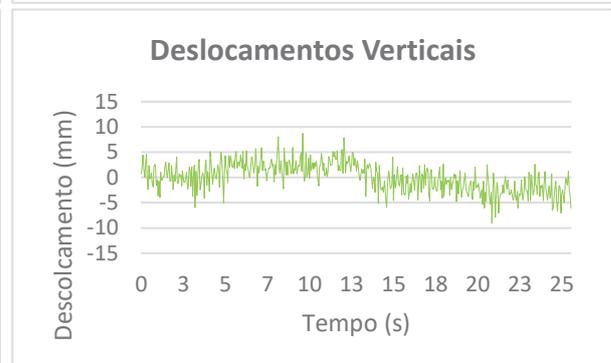
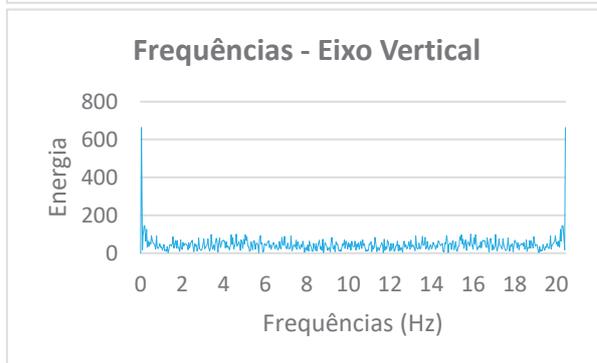
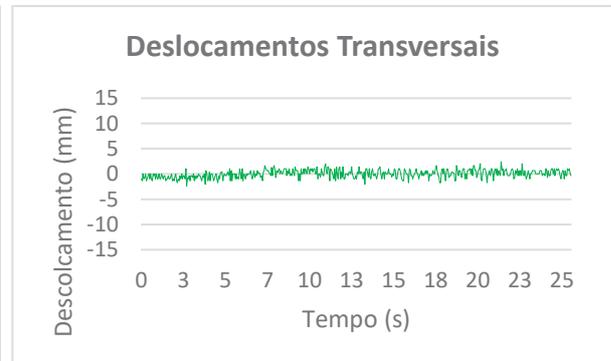
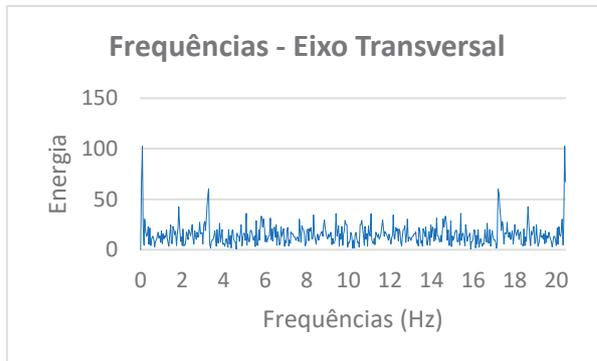
## Bloco 2.9



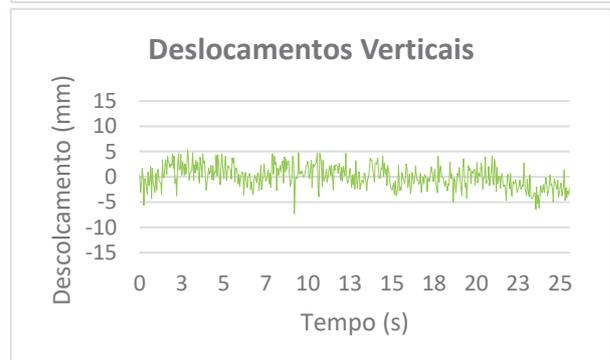
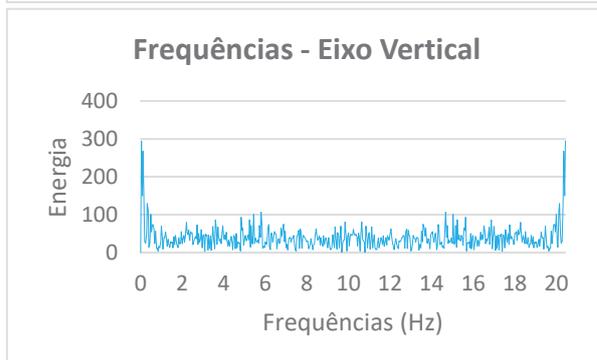
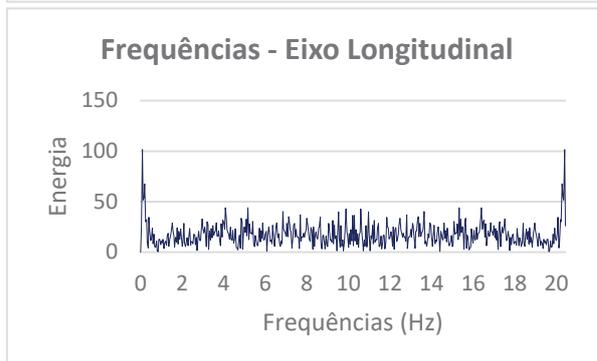
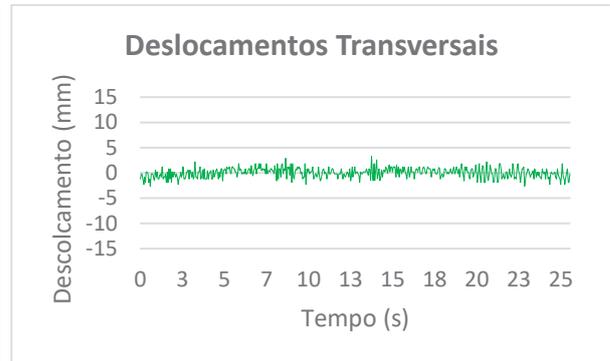
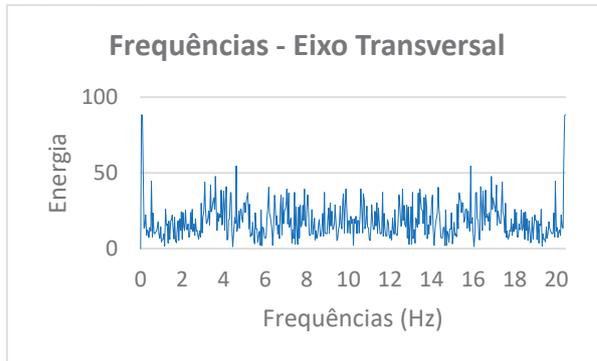
## Bloco 2.10



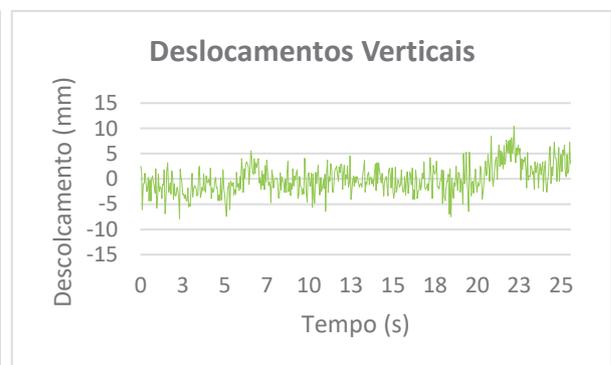
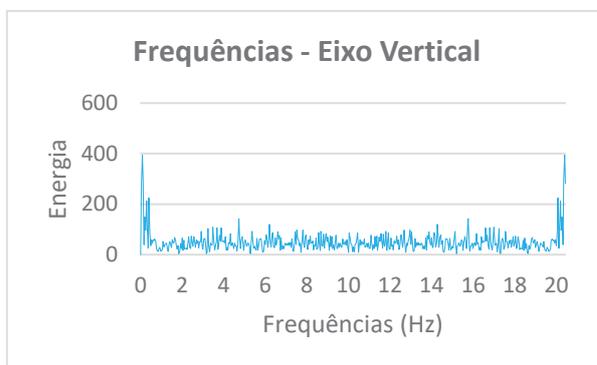
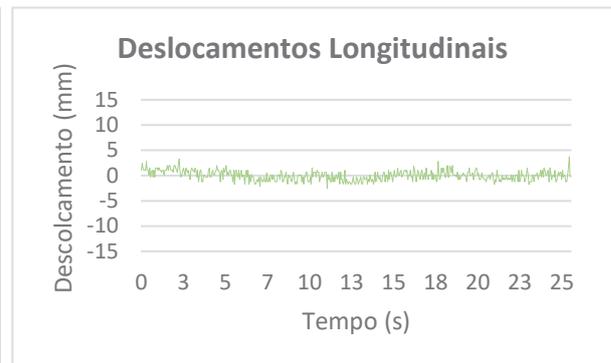
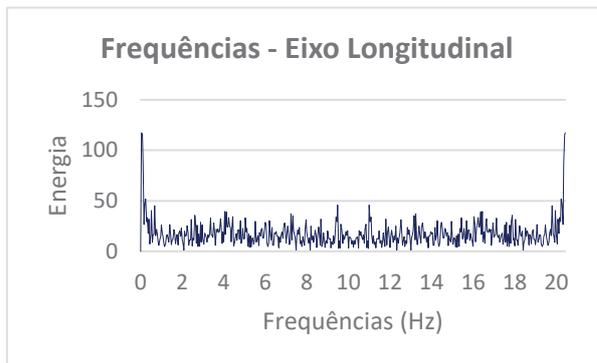
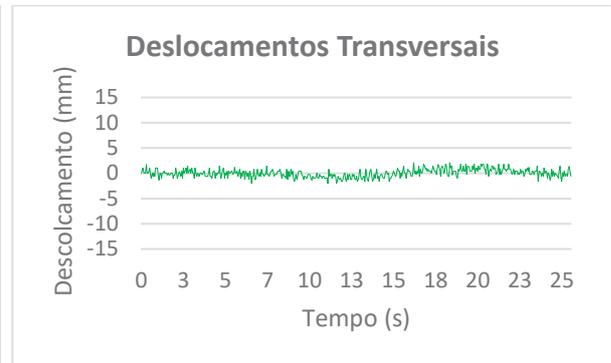
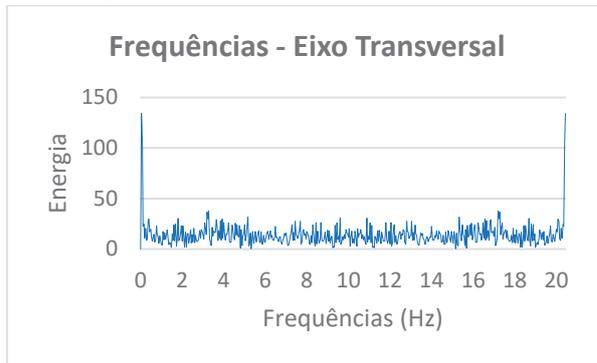
## RESULTADOS EXPERIMENTO 2 – GNSS Bloco 2.1



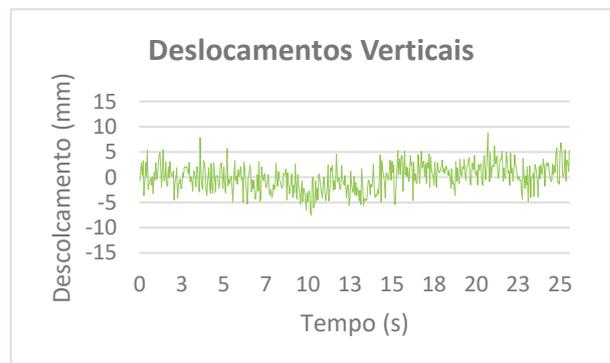
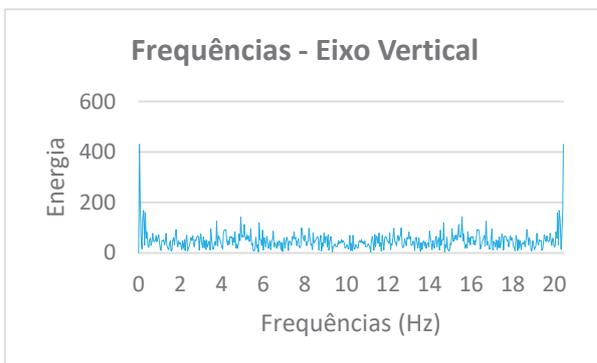
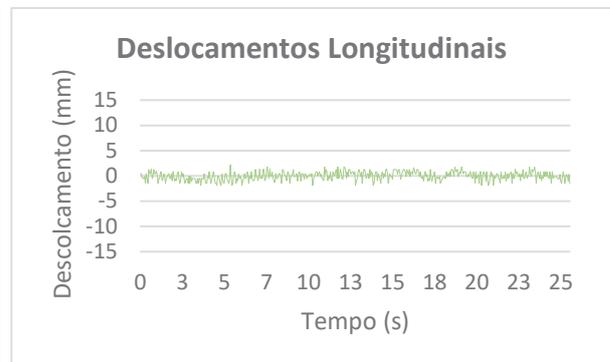
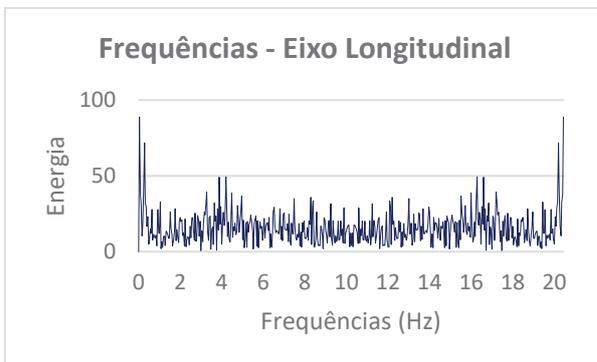
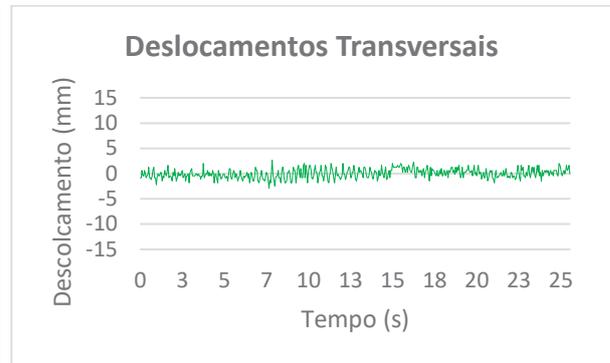
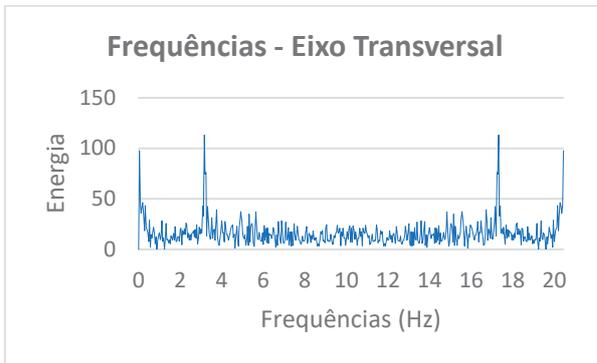
## Bloco 2.2



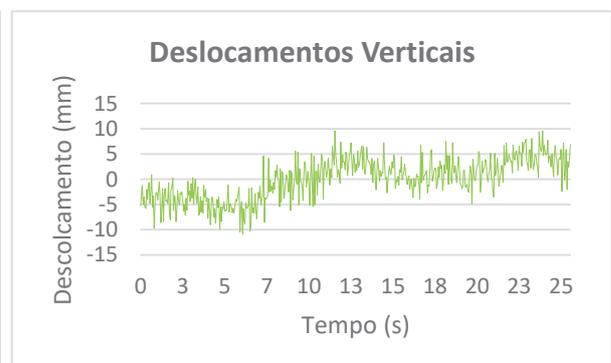
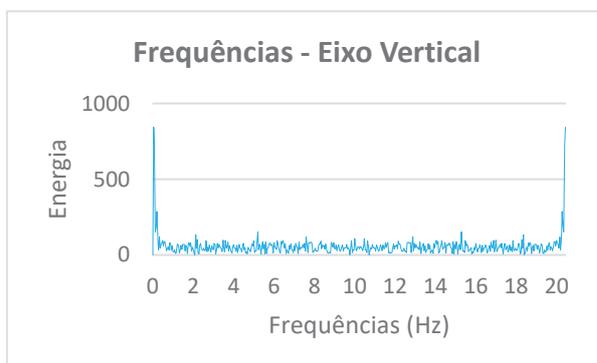
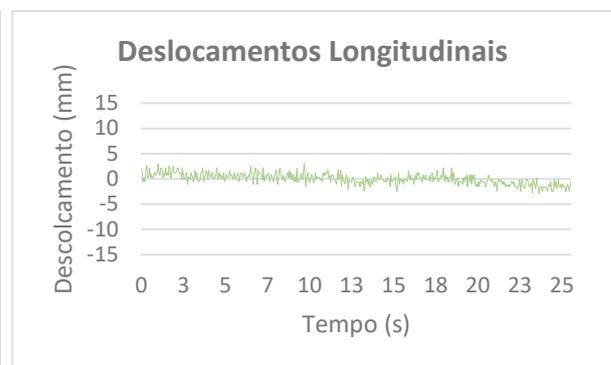
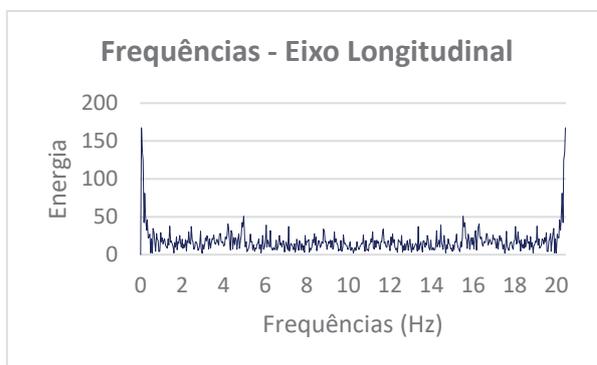
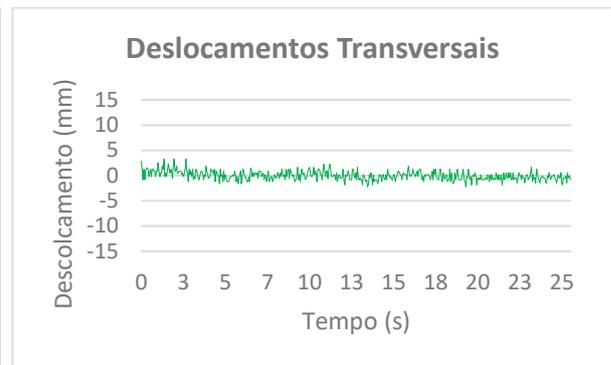
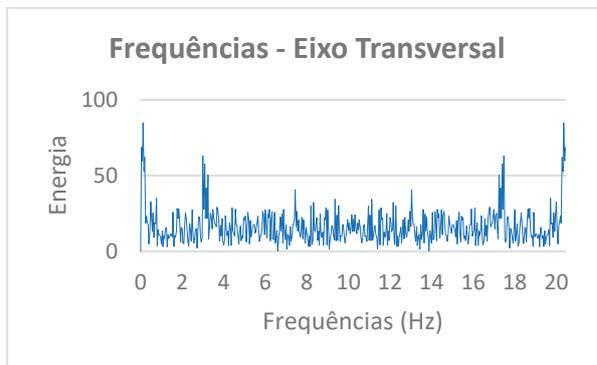
## Bloco 2.3



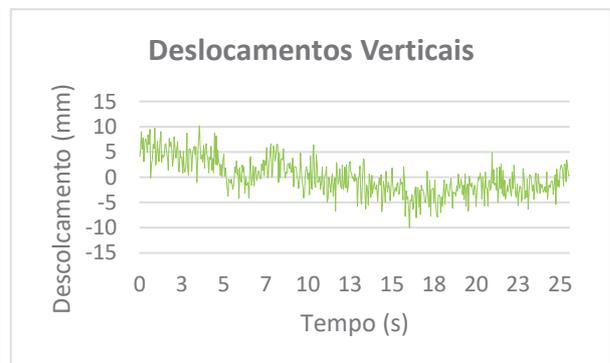
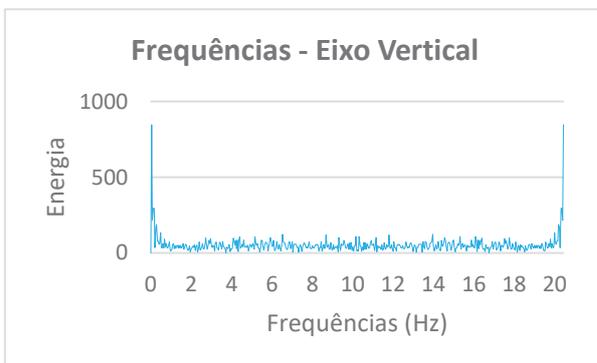
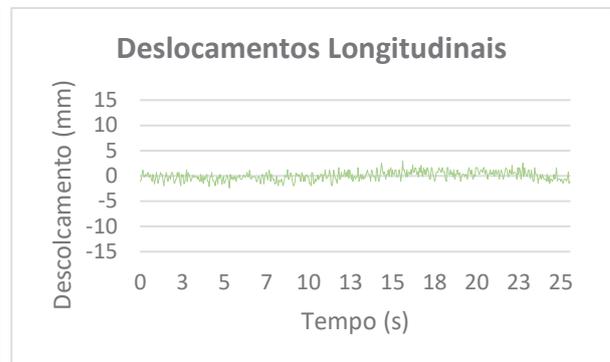
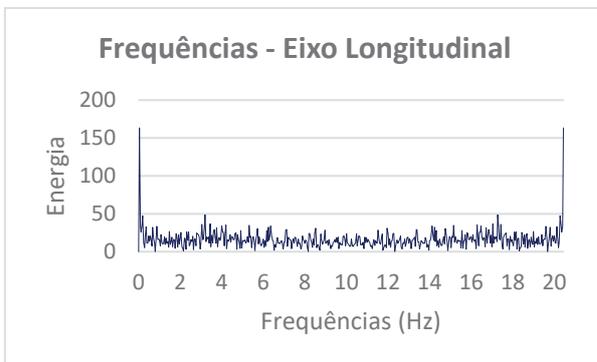
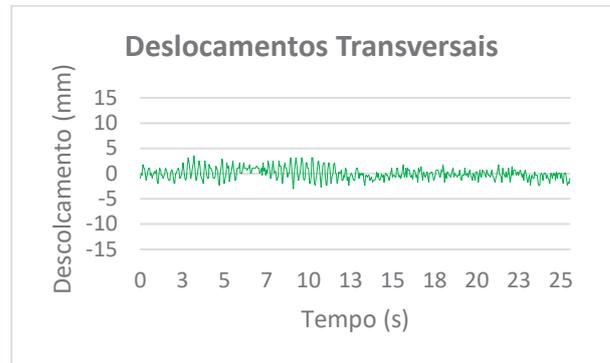
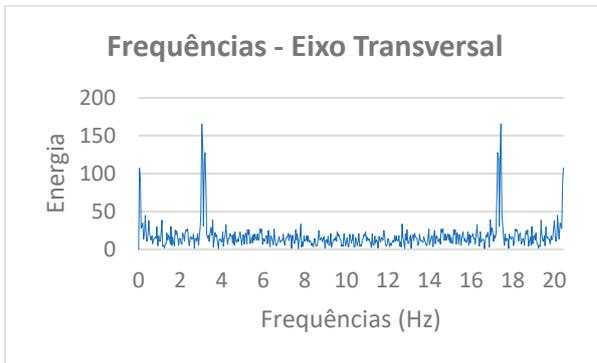
## Bloco 2.4



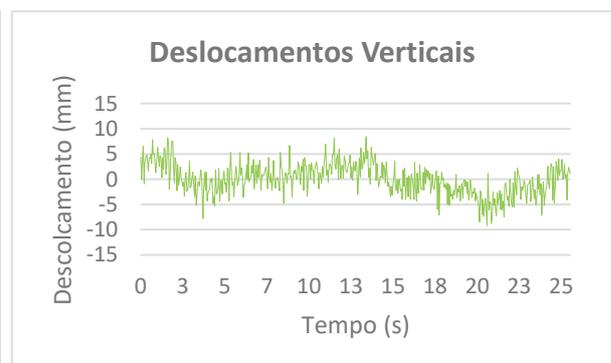
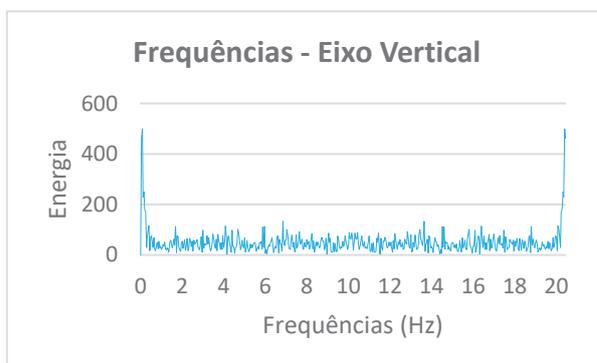
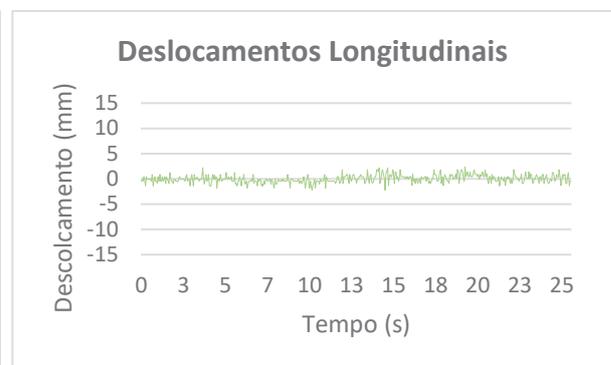
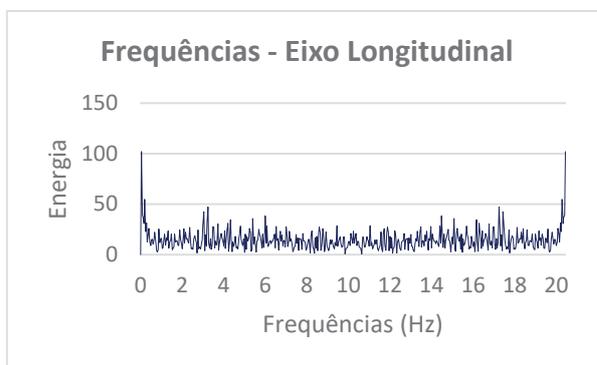
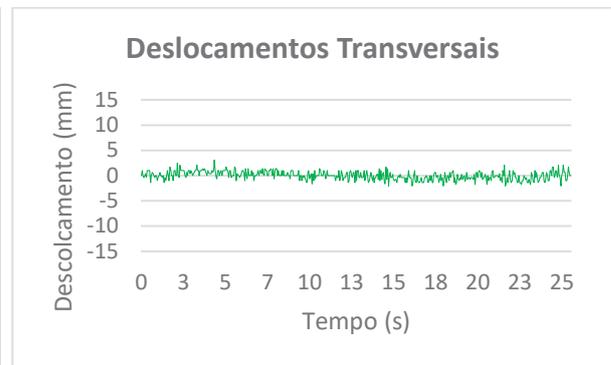
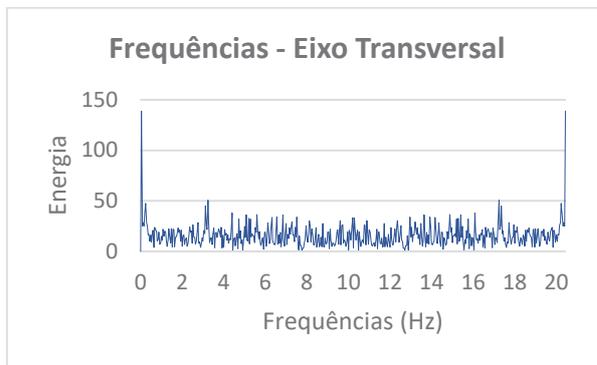
## Bloco 2.5



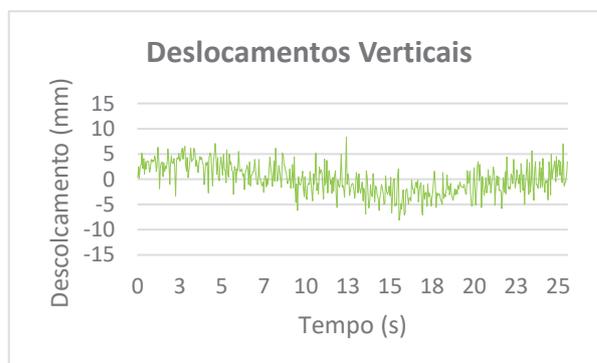
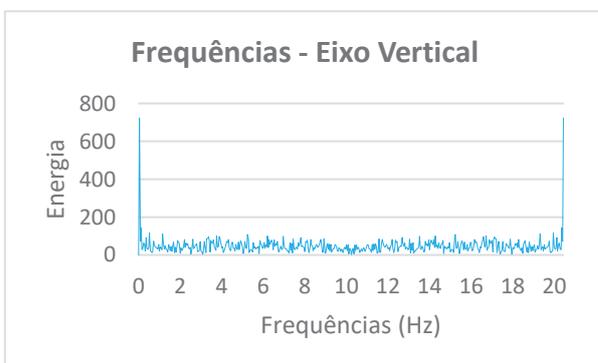
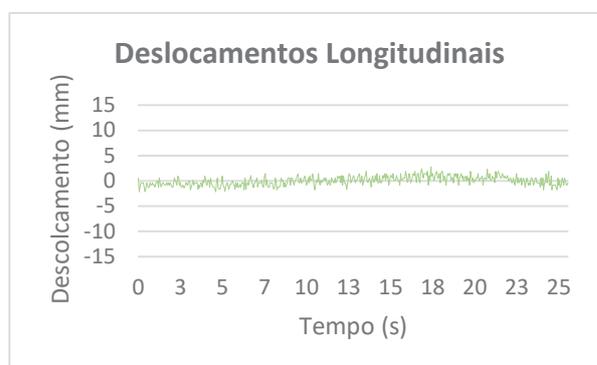
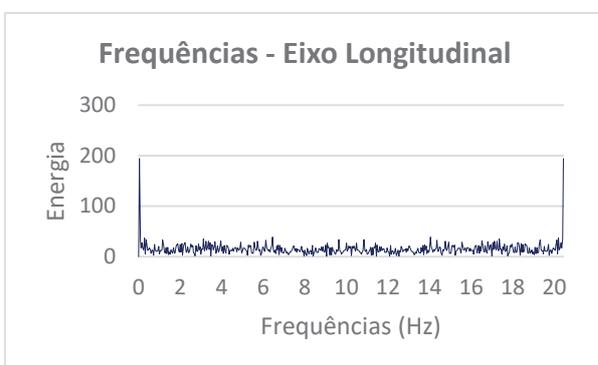
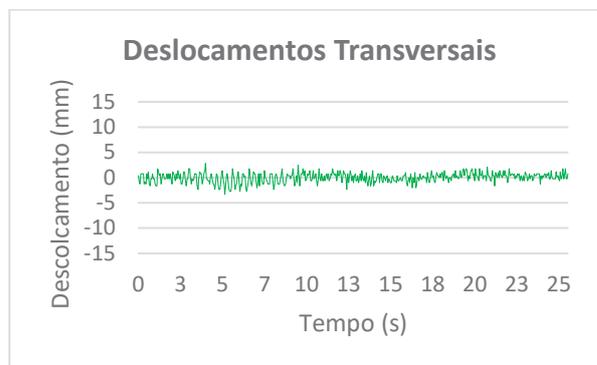
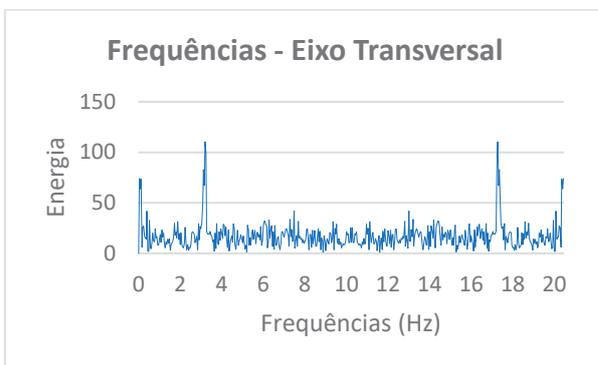
## Bloco 2.6



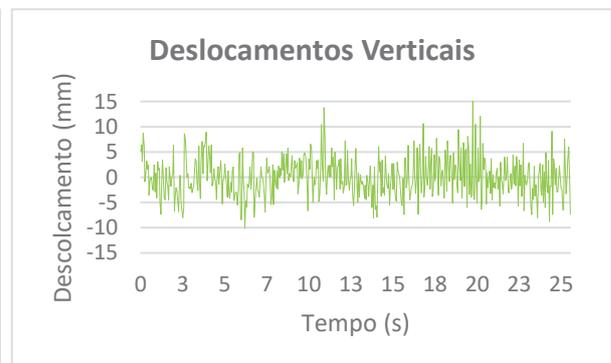
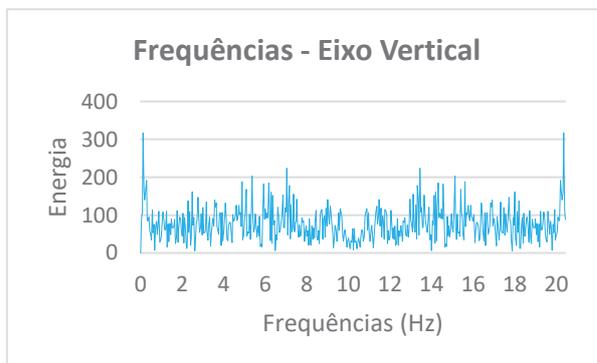
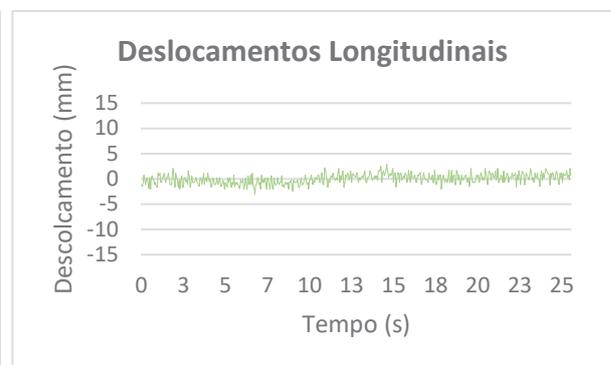
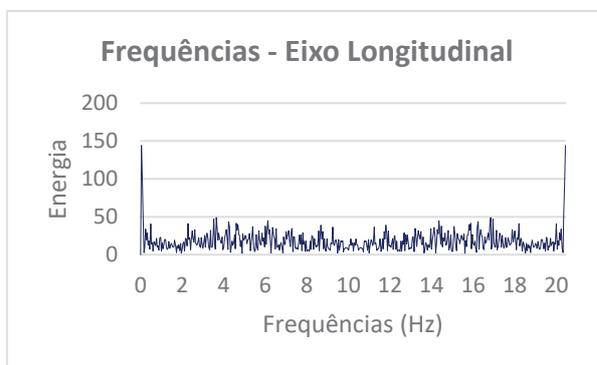
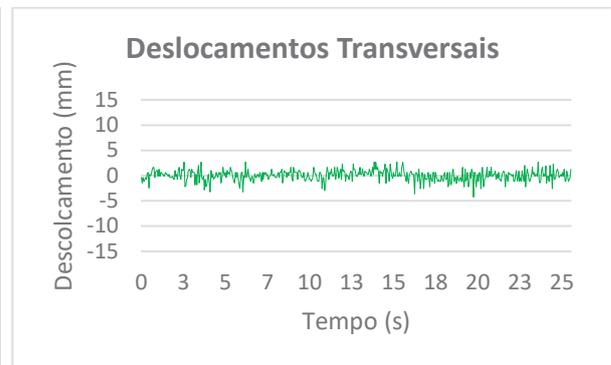
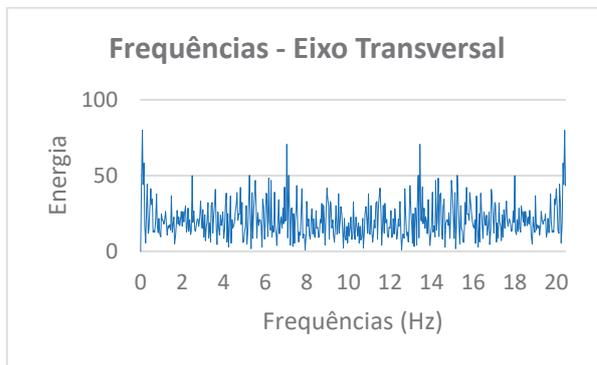
## Bloco 2.7



## Bloco 2.8



## Bloco 2.9



## Bloco 2.10

