

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANÁLISE ESTÁTICA E DINÂMICA DE ESTRUTURA METÁLICA TENSIONADA  
COM COBERTURA DE TELHAS ALTERNATIVAS

SAMUEL ANTÃO FERREIRA DO NASCIMENTO

MANAUS

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

SAMUEL ANTÃO FERREIRA DO NASCIMENTO

ANÁLISE ESTÁTICA E DINÂMICA DE ESTRUTURA METÁLICA TENSIONADA  
COM COBERTURA DE TELHAS ALTERNATIVAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração Materiais e Componentes de Construção.

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos

MANAUS  
2019

## Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

N244a	<p>Nascimento, Samuel Antão Ferreira do Análise estática e dinâmica de estrutura metálica tensionada com cobertura de telhas alternativas / Samuel Antão Ferreira do Nascimento. 2019 100 f.: il. color; 31 cm.</p> <p>Orientador: Raimundo Pereira de Vasconcelos Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas.</p> <p>1. Telha PET. 2. Método dos elementos finitos (MEF). 3. vibração livre. 4. estrutura metálica. 5. análise modal. I. Vasconcelos, Raimundo Pereira de II. Universidade Federal do Amazonas III. Título</p>
-------	--

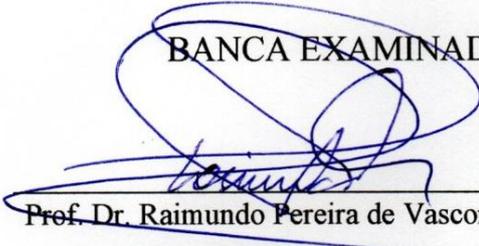
SAMUEL ANTÃO FERREIRA DO NASCIMENTO

ANÁLISE ESTÁTICA E DINÂMICA DE ESTRUTURA METÁLICA  
TENSIONADA COM COBERTURA DE TELHAS ALTERNATIVAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração Materiais e Componentes de Construção.

Aprovado em 15 de julho de 2019

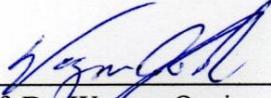
BANCA EXAMINADORA



---

Prof. Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos, Orientador.

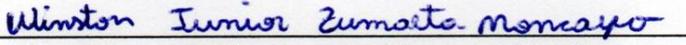
Universidade Federal do Amazonas



---

Prof. Dr. Wagner Queiroz Silva, Membro externo.

Universidade Federal do Amazonas



---

Prof. Dr. Winston Junior Zumaeta Moncayo, Membro externo.

Universidade Federal do Amazonas

*A Deus, a Jesus Cristo e a minha  
família em especial a minha  
maravilhosa mãe Creusa.*

## *AGRADECIMENTOS*

Primeiramente a Deus por tudo e a Jesus Cristo por iluminar meu caminho.

Ao professor Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos pelos valiosos ensinamentos desde a graduação até a conclusão desta dissertação com compreensão, paciência, disponibilidade, genialidade e excelente orientação.

A toda minha família em especial a minha maravilhosa mãe Creusa, meu pai Antão e minha irmã Deborah. Pelo apoio, incentivo, e amor necessário para concretizar esse trabalho com muita fé em Deus.

A todos os professores que fizeram parte da minha história no Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil da UFAM, que compartilharam seus conhecimentos e experiências, me engrandecendo como profissional e também como ser humano.

A todos os mestrandos e amigos do PPGEC que vivenciaram comigo superação, determinação, fé e esperança. Agradeço pela troca de ideias, palavras de alegria, e as altas risadas na sala dos pesquisadores. Seria injusto citar nomes de alguns e esquecer de outros, logo, me limito a dizer que agradeço a aqueles que fizeram parte nesse trecho da minha vida compartilhando comigo um sentimento de sincera amizade, respeito e solidariedade.

Ao professor Paulo Roberto Oliveira Martins do departamento de engenharia mecânica pela ajuda me auxiliando quanto ao aquisitor de dados e sensores que foram essências nesta dissertação juntamente com os técnicos Saymon e Wanderson, todos do departamento de engenharia mecânica.

Ao professor Dr. Arlindo Pires Lopes pela sua contribuição nesta dissertação me auxiliando em uma melhor compreensão do método dos elementos finitos.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudo que foi essencial para o andamento da pesquisa.

*“Seja forte e corajoso não  
fique desanimado nem tenha  
medo, porque Eu o Senhor teu  
Deus estarei contigo em qualquer  
lugar por onde andares.”*

Josué 1, 9.

## RESUMO

A presente pesquisa teve como objetivo analisar um protótipo de estrutura metálica tensionada constituída por terças de fios de aço CA-60 e cobertura de telhas alternativas feitas de polietileno tereftalato (PET). Este estudo envolveu o comportamento estático quanto a deformações e uma análise dinâmica quanto aos parâmetros modais. Sendo assim, foi realizado na análise estática a coleta de dados através de sensor de deslocamento LVDT, relógios comparadores e sistema de aquisição de dados. Foram estudados os efeitos de cargas pontuais sob a estrutura empregando-se massas de 1 kg, 2kg e 3kg. Por outro lado, na análise dinâmica a estrutura ficou submetida ao efeito de oscilação produzida pelo impacto de uma massa. Utilizou-se um sistema de aquisição de dados com três acelerômetros em pontos distintos e equidistantes onde foi obtido o espectro de Fourier das frequências. Para ambos os casos foi realizada uma análise numérica computacional através do MEF empregando o *software* comercial SAP2000. Logo, foram determinados o comportamento quanto a imposição de cargas na estrutura, frequências naturais e os modos de vibração pelo modelo numérico computacional, que foram comparados com os resultados obtidos na análise experimental. Os resultados mostraram uma boa correlação entre os obtidos no modelo numérico computacional e os respectivos experimentais.

***Palavras-chave:*** telhas, PET, estrutura metálica, MEF, vibração livre.

## ABSTRACT

The present research had as objective to analyze a prototype of tensioned metallic structure constituted by purlins of CA-60 steel wire and made roof tiles of polyethylene terephthalate (PET). This study involved static deformation behavior and a dynamic analysis of modal parameters. Therefore, a static data analysis was carried out through a LVDT displacement sensor, comparator clocks and data acquisition system. The effects of punctual loads under the structure were studied using masses of 1 kg, 2 kg and 3 kg. On the other hand, in the dynamic analysis the structure was subjected to the effect of free oscillation by impact of a mass. A data acquisition system with three accelerometers was used at different and equidistant points where the Fourier spectrum of the frequencies was obtained. For both cases, a computational numerical evaluation was performed through the FEM using SAP2000 *software*. Therefore, the behavior regarding the imposition of loads in the structure, natural frequencies and the vibration modes were determined by the computational numerical model, which were compared with the obtained results in the experimental analysis. The results showed a good correlation between those obtained in the computational numerical model and the respective experimental ones.

**Keywords:** tiles, PET, steel structure, FEM, free vibration.

## LISTA DE TABELAS

### ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DE DEFORMAÇÕES EM ESTRUTURA METÁLICA TENSIONADA COM TELHAS DE POLI(TEREFTALATO) DE ETILENO

Tabela 1: Dados para medição das deflexões.....	44
Tabela 2: Características dos materiais.....	45
Tabela 3: Deflexões produzidas por massa fixadas na estrutura da cobertura analisada.....	46
Tabela 4: P-valores dos testes de normalidade para os valores obtidos no presente trabalho.	47
Tabela 5: Resultados da análise numérica em terça na forma de barra.....	48
Tabela 6: Resultados da análise numérica de terça na forma de cabos.....	49

### ANÁLISE DE PARÂMETOS MODAIS EM ESTRUTURA METÁLICA TENSIONADA COM COBERTURA DE TELHAS PLÁSTICAS DE PET

Tabela 1: Características dos materiais empregados na análise.....	66
Tabela 2: Modos de vibração obtidos na análise numérica pelo SAP2000 para a cobertura do trabalho.....	67
Tabela 3: Comparação entre os métodos com erro padrão, correlação e proporcionalidade...	69
Tabela 4: Amplitudes e taxas de amortecimento.....	71

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tensoestrutura do Estádio Olímpico de Munique. Fonte: ARCHDAILY (2019) ..	15
Figura 2 - Estrutura metálica analisada no presente trabalho. ....	16
Figura 3 - Abraçadeiras de plástico. Fonte: GÓES (2015) adaptado. ....	17
Figura 4 - Telha PET que compõe a cobertura da estrutura analisada. ....	17
Figura 5 - Barras de aço de 4,2 mm de diâmetro que compõe a estrutura metálica da cobertura. ....	18
Figura 6 - Carregamentos com sacas de areia de 10 kg. Fonte: GÓES (2015). ....	19
Figura 7 - Torquímetro sendo utilizado para aplicação de tensionamento nas terças. Fonte: GÓES (2015). ....	19
Figura 8 – Esquematização da análise dinâmica. Fonte: Vasconcelos (2003) adaptado. ....	20
Figura 9 – Ponte de Tacoma Narrows (EUA) em 1940 entrando em colapso pelo efeito da ressonância. Fonte: UNIVERSITY LIBRARIES (2019). ....	22
Figura 10 – Relógios comparadores utilizados no experimento. ....	26
Figura 11 – Apoios magnéticos ....	27
Figura 12 - Sensor de deslocamento (LVDT) ....	27
Figura 13 – Aparelho de aquisição de dados. ....	28
Figura 14– A direita os mecanismos de fixação e a esquerda o mecanismo já acoplado. ....	29
Figura 15– Aparato de apoio modelo virtual na esquerda e a direita o modelo real ....	29
Figura 16– MMC no Laboratório de metrologia da UFAM. ....	30
Figura 17 – Acelerômetros empregados na análise experimental dinâmica. ....	30
Figura 18- Calibração do LVDT pela MMC no Laboratório de Metrologia da UFAM. ....	31
Figura 19 - (a) Acelerômetros e (b) plano inclinado. ....	32
Figura 20 - Processo para calibração dos acelerômetros ....	32
Figura 21 - Trecho analisado e viga de referência. ....	33
Figura 22 - Peso com mecanismo de fixação, apoios e relógios comparadores. ....	33
Figura 23 – Telha PET empregada na pesquisa. ....	36
Figura 24 – Esquematização e dimensões da telha PET. Fonte: Góes (2015) adaptado. ....	37

### ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DE DEFORMAÇÕES EM ESTRUTURA METÁLICA TENSIONADA COM TELHAS DE POLI(TEREFTALATO) DE ETILENO

Figura 1: Planta de elevação da estrutura metálica do modelo experimental. ....	41
Figura 2: Planta da estrutura da cobertura no nível dos fios de aço. ....	41
Figura 3: Estrutura analisada no presente trabalho. ....	42
Figura 4: Localização dos medidores de deformação e das cargas pontuais ....	43
Figura 5: Vista superior da estrutura com pontos da análise em modelo no SAP2000. ....	45
Figura 6: Curva de convergência. ....	53

ANÁLISE DE PARÂMETROS MODAIS EM ESTRUTURA METÁLICA TENSIONADA  
COM COBERTURA DE TELHAS PLÁSTICAS DE PET

Figura 1: Estrutura metálica com cobertura de telhas PET da pesquisa; (a) Vista frontal; (b) Vista posterior; (c) Vista inferior e (d) Vista lateral.....	63
Figura 2: Sistema de Aquisição de dados; (a) Aquisitor de dados e (b) Acelerômetros.....	64
Figura 3: Pontos enumerados e marcados dos acelerômetros na estrutura.....	65
Figura 4: Estrutura analisada empregando o SAP2000, a) sem discretização da cobertura e (b) com discretização.....	66
Figura 5: Espectros de Fourier em relação ao eixo vertical da cobertura.....	68
Figura 6: Sinais adquiridos dos três acelerômetros em resposta a vibração livre.....	71

## LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AC – Corrente alternada

cm – Centímetro

CA-25– Aço para concreto armado com tensão de escoamento de 250 Mpa

CA-50– Aço para concreto armado com tensão de escoamento de 500 Mpa

CA-60– Aço para concreto armado com tensão de escoamento de 600 Mpa

CD-ROM – Disco compacto com memoria apenas de leitura

DC – Corrente contínua

ELU – Estado limite ultimo

ELS – Estado limite de serviço

G – Força da gravidade

GHz – Giga-Hertz

HD – Disco Rígido

Hz – Hertz

kg – Quilo

kN – QuiloNewton

LVDT–Transformador Diferencial Variável Linear

m – Metro

MEF – Método dos elementos finitos

min – Minuto

mm – Milímetro

MMC – Maquina de medição por coordenadas

Mpa – Megapascal

N – Newton

PET – Polietileno tereftalato

PPGEC – Programa de pós-graduação em engenharia civil

$t$ –Tempo

RAM - Memória de acesso aleatório

S–Segundo

UFAM – Universidade Federal do Amazonas

V – Tensão

$\zeta$  – Fator de amortecimento

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1 A ESTRUTURA METÁLICA .....	16
1.2 AS TELHAS ALTERNATIVAS .....	17
1.3 OS FIOS DE AÇO .....	18
1.5 A ANÁLISE ESTÁTICA E DINÂMICA.....	19
1.6 CONCEITUAÇÃO BÁSICA PARA ANÁLISE DINÂMICA .....	20
1.6.1 Vibrações.....	20
1.6.2 Fator de amortecimento.....	21
1.6.3 Frequências naturais .....	21
1.6.4 Modos de vibração .....	22
1.7 FUNDAMENTOS BÁSICOS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF) PARA ANÁLISE ESTRUTURAL.....	22
1.8 JUSTIFICATIVA .....	23
1.9 OBJETIVOS .....	25
1.10 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	25
<b>2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....</b>	<b>26</b>
2.1 NORMATIZAÇÃO BRASILEIRA PERTINENTE .....	26
2.2 SELEÇÃO DE ACESSÓRIOS E EQUIPAMENTOS.....	26
2.2.1 Relógio comparadores.....	26
2.2.2 Suportes magnéticos.....	27
2.2.3 Sensor de deslocamento.....	27
2.2.4 Sistema de aquisição de dados.....	28
2.2.5 Pesos.....	28
2.2.6 Mecanismos de fixação.....	29
2.2.7 Aparato de apoio .....	29
2.2.8 Equipamento de medição por coordenadas.....	30
2.2.9 Acelerômetros .....	30
2.2.10 Computadores.....	31
2.3 CALIBRAGEM DO LVDT .....	31
2.4 CALIBRAÇÃO DOS ACELERÔMETROS .....	32
2.5 ENSAIO DE DEFORMAÇÕES .....	33
2.6 ESTATÍSTICA DOS DADOS DA ANÁLISE ESTÁTICA.....	34
2.6.1 Testes de normalidade.....	34
2.6.2 Correlação de dados da calibragem LVDT .....	35
2.6.3 Gráficos Boxplot .....	35
2.7 ENSAIO DE VIBRAÇÃO LIVRE .....	35

2.8 ESTATÍSTICA DOS DADOS NA ANÁLISE DINÂMICA.....	36
2.9 ANÁLISE NUMÉRICA: EQUIVALÊNCIA DE MOMENTO DE INÉRCIA E TEMPO DE PROCESSAMENTO .....	36
<b>3. ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DE DEFORMAÇÕES EM ESTRUTURA METÁLICA TENSIONADA COM TELHAS DE POLI (TEREFTALATO DE ETILENO) .....</b>	<b>38</b>
<b>4. ANÁLISE DE PARÂMETROS MODAIS EM ESTRUTURA METÁLICA TENSIONADA COM COBERTURA DE TELHAS PLÁSTICAS DE PET.....</b>	<b>59</b>
<b>5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....</b>	<b>77</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>78</b>
<b>APÊNDICE A – TESTES DE NORMALIDADE DA ANÁLISE ESTÁTICA .....</b>	<b>82</b>
<b>APÊNDICE B – GRÁFICOS BOXPLOT DA ANÁLISE ESTÁTICA.....</b>	<b>90</b>
<b>APÊNDICE C – CALIBRAÇÃO LVDT DA ANÁLISE ESTÁTICA.....</b>	<b>93</b>
<b>APÊNDICE D – CALIBRAÇÃO DOS ACELERÔMETROS DA ANÁLISE DINÂMICA.....</b>	<b>95</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A engenharia civil na busca da excelência em construções, procura promover a padronização, racionalização e modernização constante de suas obras, norteando uma mudança ascendente de tecnologia que abrange os métodos construtivos, maquinários e materiais. É notável essa retórica na indústria da construção civil com suas aspirações e adoções que promovem redução de gastos e padronização de processos de tal maneira a otimizar as estruturas com significativa leveza e esbelteza tornando-se um objetivo rotineiro para os profissionais que atuam na área, visto os requisitos da arquitetura contemporânea (SILVA; PRATA; ALBURQUERQUE, 2018; SANTOS; LEITE, 2018).

Esta evolução tecnológica implica também em um menor tempo de execução e menor volume de materiais com alternativas construtivas que se amparam no ponto de vista ambiental (MASS, 2017). Dentro deste contexto a indústria construtiva investe em sistemas pré-fabricados com novas tecnologias envolvendo materiais e formas alternativas de construção. Exemplo disso temos as chamadas tensoestruturas, que são utilizadas em coberturas (BIANCHI; TIBIRIÇA; COELHO, 2006). Estas se caracterizam por ter um estado de pré-tensão, onde suas barras ficam comprimidas enquanto os seus cabos permanecem tracionados levando assim a um equilíbrio interno que aumenta a rigidez proporcionando vencer grandes vãos (ASHWEAR; ERIKSSON, 2014; ZHANG; OHSAKI, 2015) (figura 1).



Figura 1 – Tensoestrutura do Estádio Olímpico de Munique. Fonte: ARCHDAILY (2019)

A aplicação deste tipo de sistema construtivo e de materiais inovadores tende a suprir necessidades econômicas, estruturais e até mesmo arquitetônicas levando a estruturas mais leves e flexíveis o que de fato se assemelha com a presente estrutura em análise (GÓES, 2015).

Por outro lado, dentre os materiais inovadores que fazem parte do presente estudo destaca-se os chamados reciclados cuja utilização vem se consolidando desde os anos 2000,

promovendo um instrumento importante para destinação de resíduos e conseqüentemente gerando sustentabilidade (ÂNGULO; ZORDAN; JOHN, 2001).

### 1.1 A estrutura metálica

A estrutura da presente pesquisa localiza-se dentro do campus da Universidade Federal do Amazonas precisamente na Faculdade de Tecnologia, tendo características peculiares que abrange materiais alternativos de construção (figura 2).

Tem como característica inerente a substituição das ditas terças de cobertura (ABCEM, 2010; NBR 14762, 2010) que são usualmente empregados na forma de barras ou cabos por fios de aço, além disso, a substituição de telhas convencionais de cerâmica por telhas fabricadas através do processo de reciclagem de garrafas PET.

Quanto ao modo alternativo de construção foi estabelecido um tensionamento nos fios de aço por tração dando a eles um aspecto retilíneo, proporcionando assim uma estrutura metálica com um comportamento quanto a flexão de pouca rigidez, denotando assim, grandes flechas modelando-se ao carregamento transversal (GÓES 2015). Logo, a estrutura em si se mostra bastante flexível assemelhando-se a uma tensoestrutura, visto que, é constituída por malha de fios de aço tensionados com pequenas espessuras e cobertura de telhas poliméricas (OLIVEIRA, 2003). Especificamente, parece-se a uma tensoestrutura leve, porém, como não é composto por cabos de aço não se pode definir com exatidão qual classificação de tensoestrutura dentre várias se assemelha mais (SILVA, 2006).



Figura 2 - Estrutura metálica analisada no presente trabalho.

Outra característica são os apoios de fixação das telhas que são acoplados diretamente nos fios de aço (figura 3.a) por meio de abraçadeiras de plástico (figura 3.b) levando a ligação entre as telhas e as terças metálicas.

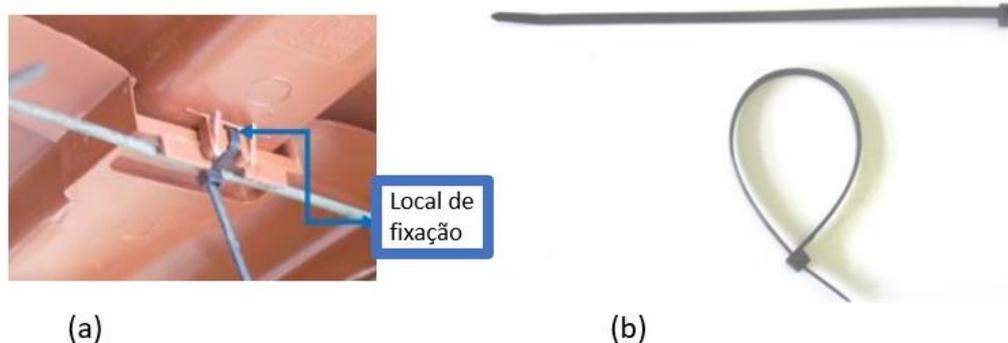


Figura 3 - Abraçadeiras de plástico. Fonte: GÓES (2015) adaptado.

## 1.2 As telhas alternativas

As telhas de perfil alternativo são de polietileno tereftalato sendo elementos constituintes da estrutura analisada (figura 4). Estes materiais são oriundos processo de reciclagem de garrafas PET.



Figura 4 - Telha PET que compõe a cobertura da estrutura analisada.

Estas telhas possuem característica peculiar, com um menor valor de densidade se comparado com telhas convencionais. Proporcionando assim maior leveza e consequentemente diminuição de gastos com menor quantidade de material no suporte ao telhamento. Sendo o peso por metro quadrado das telhas PET em massa menor que 6 kg e utilizando-se apenas de 1/3 do material de sustentação das telhas convencionais de cerâmica (TELHAS LEVE, 2013). A comparação na pesagem das telhas evidencia ainda mais esse contraste, onde a telha de

cerâmica pesa cerca de 2,4 kg enquanto a telha PET pesa 0,95 kg (SILVA; FRANCISCON; ROCHA, 2010).

Além disso, a telha PET possui um comportamento térmico característico que promove mudanças relevantes na expansibilidade e diminuição de suas dimensões, visto que, possui o coeficiente de dilatação térmica elevado como também possui uma resina que otimiza a resistência quanto a variação térmica (GÓES, 2015;).

Logo, essas telhas dispõem de uma maior durabilidade não ocorrendo trincas e nem ressecamento, potencializando a vida útil da cobertura. Promovendo assim, a preservação da natureza com a redução de resíduos de construção em solos e meios aquáticos.

### 1.3 Os fios de aço

A estrutura metálica analisada na presente pesquisa tem uma trama que é formada por terças constituídas de fios de aço CA-60 com 4,2 mm de diâmetro (figura 5) e perfis de apoio no formato “U” de chapa dobrada também de aço.

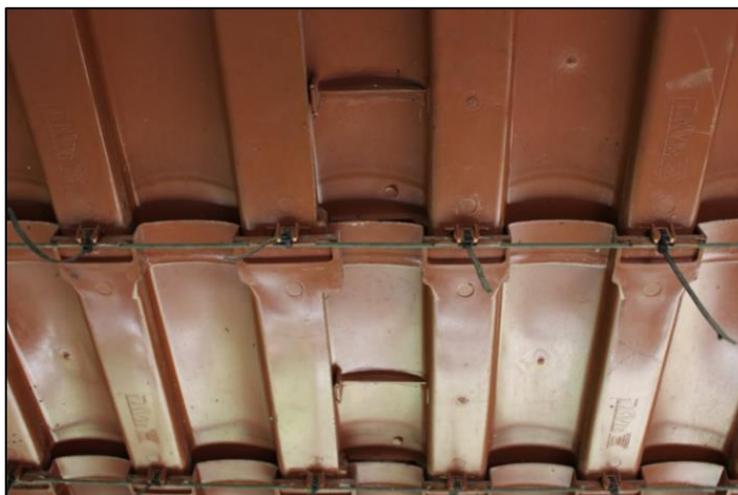


Figura 5 - Barras de aço de 4,2 mm de diâmetro que compõe a estrutura metálica da cobertura.

Sabe-se que os fios de aço no mercado têm as mais variadas dimensões de bitolas, promovendo diversas opções para o engenheiro civil trabalhar seja em projetos e ou na própria execução de suas obras, entretanto, deve-se salientar que por se tratar de fios de aço estes apresentam dimensões de diâmetro muito pequeno parecendo visualmente como cabos pela sua aparência e ainda por ter também um comportamento mais flexível.

Esta cobertura já foi analisada quanto a análise de deformações por GÓES (2015) onde foi comprovado que esta possui bastante flexibilidade. Os resultados mostraram que a deformação imposta através de sacas de areia com 10 Kg na cobertura (figura 6) representando sobrecarga ultrapassaram o Estado Limite de Serviço (ELS) denotando um comportamento flexível.



Figura 6 - Carregamentos com sacas de areia de 10 kg. Fonte: GÓES (2015).

Observa-se ainda que as terças da cobertura se caracterizam por fazerem parte de um sistema tensionado o qual segue um comportamento similar a um sistema de barras de aço em concreto protendido trabalhando assim como tirantes tracionados na cobertura (GÓES, 2015; PINHEIRO, 2018). Essa tração é obtida por meio dos parafusos de fixação em viga lateral que sob efeito de momento torçor aplicado por torquímetro de modelo GBR 3550-30 GEDORE (Figura 7), gera um alongamento de 4 mm nas barras de 4,2 mm resultando em forças longitudinais de 1,85 kN em cada barra (GÓES, 2015).



Figura 7 - Torquímetro sendo utilizado para aplicação de tensionamento nas terças. Fonte: GÓES (2015).

Logo, a ação da compressão e flexão se tornam de pequeno ou até mesmo de valor nulo, isso porque os fios de aços estão somente sob ação das cargas da cobertura de telhas plásticas, o que de fato leva a um efeito preponderante da tensão longitudinal em relação as barras de aço.

### 1.5 A análise estática e dinâmica

A análise estática se caracteriza por ter seus carregamentos constantes ao longo do tempo norteando condições de equilíbrio, compatibilidade entre deslocamentos e deformações, além do próprio comportamento dos materiais envolvidos na estrutura pesquisada atentando as reações de apoio, rotações, tensões e esforços internos embasando assim as condições básicas para uma análise estática estrutural (MARTHA, 2017).

Muitas vezes as cargas dinâmicas são transformadas em cargas estáticas equivalentes empregando-se uma aproximação de valores. Para um estudo mais completo são necessários conceitos envolvendo análise dinâmica, uma vez que, diversas ações externas como ações de sismo, vento, cargas moveis, dentre outros aspectos denotam essa abordagem pelos profissionais na área de estruturas (VITÓRIO, 2013; TESSARI, 2016).

Adentrando basicamente em uma análise dinâmica esta envolve também ações, tensões, deslocamentos, porém com velocidades não desprezíveis, tendo fatores variáveis ao decorrer do tempo, não ocorrendo somente um resultado como na análise estática, pois a estrutura vai se comportando pela ação vibratória ao longo do tempo e gerando diversos outros resultados (BRASIL; SILVA, 2015). Logo, a diferenciação da análise estática para análise dinâmica se dá que nesta última os carregamentos são variáveis ao passar do tempo tendo a ocorrência de forças por meio da aceleração (BRANDÃO, et al, 2016). Diante disto, deslocamentos, velocidades e acelerações podem ser obtidos através de equações resolvidas por método analítico, ou ainda, por meio de uma análise numérica com aplicação computacional, cujos resultados comparados com àqueles obtidos em uma análise experimental representam uma análise dinâmica mais completa (figura 8).

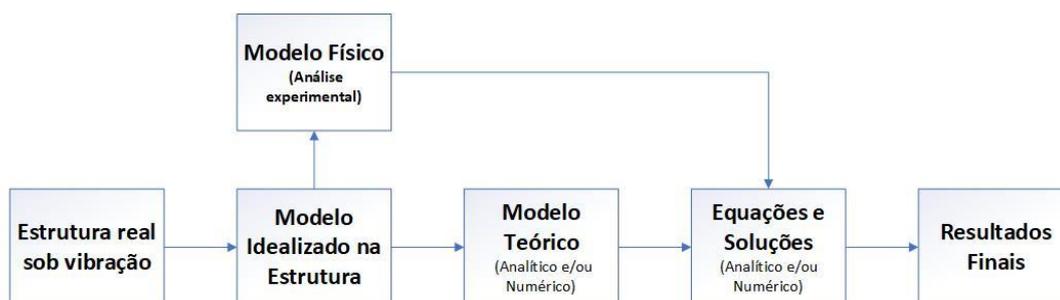


Figura 8 – Esquematização da análise dinâmica. Fonte: Vasconcelos (2003) adaptado.

## 1.6 Conceituação básica para análise dinâmica

A seguir alguns conceitos importantes para melhor fundamentação teórica sobre vibrações de maneira a complementar o que será exposto posteriormente em artigo científico.

### 1.6.1 Vibrações

As vibrações ou oscilações conceituam-se por serem fenômenos que acontecem através de movimentação repetitiva em um determinado intervalo de tempo (RAO, 2009). Dentro deste contexto um fenômeno vibratório ocorre através do armazenamento de energia seja de caráter cinético ou potencial ocorrendo uma transferência alternada destas energias, tendo em geral também um meio de dissipação, seja, em forma de som ou de calor pelo amortecimento relacionado à movimentação da estrutura.

Para se analisar esta movimentação deve-se fundamentar em três atributos, modos naturais de vibração, fatores de amortecimento e as frequências naturais. Dentre estes a frequência natural é um dos dados mais importantes quando se avalia a necessidade de se fazer ou não uma análise dinâmica em estrutura submetida a ação dinâmica e até mesmo verificar a distância relativa entre frequências (BRASIL; SILVA, 2015).

Por essa conjuntura as vibrações recebem uma classificação pelo modo em que são postas na análise dinâmica, dentre estas a vibração empregada nesta pesquisa a chamada vibração livre que possibilitou encontrar as características inerentes da estrutura. Este tipo de vibração ocorre através de uma perturbação inicial onde a estrutura ao decorrer do tempo volta ao repouso, não tendo influência de forças externas (RAO, 2009; SORIANO 2014).

### **1.6.2 Fator de amortecimento**

O fator, taxa, razão ou relação de amortecimento ( $\zeta$ ) é um valor adimensional definido pela relação entre a constante de amortecimento real ( $c$ ) e a constante de amortecimento crítica ( $c_{cr}$ ). Mensura a tendência de vibração de uma estrutura caracterizando a mesma quanto ao nível de amortecimento. Pode-se enquadrar através desse fator uma estrutura a determinado tipo de edificação (NBR 6123,1988). Além disso, pode-se classificar se o sistema trabalhado é subamortecido ( $\zeta < 1$ ), criticamente amortecido ( $\zeta = 1$ ), superamortecido ( $\zeta > 1$ ) ou sem amortecimento ( $\zeta = 0$ ). Na engenharia civil ganha-se maior destaque o sistema subamortecido ou sistema de vibração livre com amortecimento viscoso devido à grande parte das construções estarem inseridas nessa realidade. O termo viscoso denota os fluidos que interagem em edificações como o ar e a água.

### **1.6.3 Frequências naturais**

As frequências de ressonância ou frequências naturais são características singulares de cada estrutura e são determinadas simplesmente pela massa e rigidez, porém, com o aumento da quantidade de graus de liberdade eleva-se a complexidade na obtenção destas frequências. Logo, é necessário empregar análise numérica ou experimental para observar por meio de picos espectrais os valores destas frequências. Estas frequências em si não são um problema e sim uma característica inerente de cada estrutura, entretanto, quando se tem uma frequência ocasionada por fatores externos bem próxima de uma dessas frequências naturais ocorre um fenômeno problemático conhecido como ressonância que amplifica a vibração gerando desconforto e até ao colapso da estrutura pelo aumento gradual de sua amplitude (figura 9).

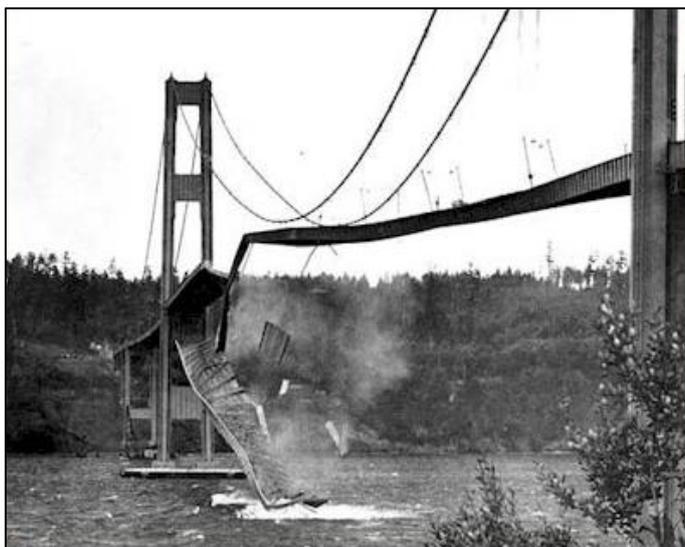


Figura 9 – Ponte de Tacoma Narrows (EUA) em 1940 entrando em colapso pelo efeito da ressonância.  
Fonte: UNIVERSITY LIBRARIES (2019).

#### **1.6.4 Modos de vibração**

Cada frequência natural tem uma maneira de vibrar na estrutura, gerando assim, respectivo modo de vibração. Define-se então as formas de vibração através das frequências naturais com os referentes graus de liberdade.

#### **1.7 Fundamentos básicos do método dos elementos finitos (MEF) para análise estrutural**

A ferramenta computacional que será empregada para análise estrutural tanto na análise estática quanto na dinâmica está baseada no MEF, logo, é necessário se ter uma fundamentação básica quanto esse tema dissertando como funciona o mesmo.

Para o devido entendimento do MEF é necessário entender o que é um sistema contínuo e um sistema discreto ou discretizado. Um sistema contínuo possui infinitos pontos, sendo possível obter uma solução fechada em termos de deformações, deslocamentos e tensões para ações tanto dinâmicas quanto estáticas por meio métodos analíticos clássicos. Entretanto, há certa limitação nas soluções, impossibilitando assim, respostas para situações mais complexas e realísticas.

As soluções desse tipo de sistema passam pelo diagrama de corpo livre e equilíbrio de um elemento da estrutura, ou seja, verificamos somente o elemento que nos interessa e ponderamos as condições de equilíbrio, podendo-se empregar infinitos elementos diferenciais (muito pequenos e genéricos) e entender o comportamento de um elemento como um todo (integral), limitando-se a problemas clássicos.

Já o sistema discreto se embasa no conceito de discretização de um sistema contínuo, sendo a divisão da estrutura em pequenas partes e unidas por pontos discretos ou pontos nodais

ou simplesmente nós. Assim, todo o sistema ou domínio é subdividido em número finito de elementos, criando subdomínios ou uma subdivisão no sistema contínuo inicial. Esses elementos passam a ser chamados de elementos finitos. Logo, é gerado um número finito de deslocamentos que são mensurados pela quantidade de nós, sendo chamados de deslocamentos nodais que são as incógnitas da análise estrutural do MEF. Desta forma com o sistema discretizado é possível trabalhar com estruturas complexas podendo-se empregar o método dos elementos finitos em qualquer condição de carregamento e forma, otimizando a precisão dos resultados (ALVES FILHO, 2018).

Contudo, observa-se que o sistema discreto é subdividido com certo número finito de elementos, logo, este torna-se apenas uma representação aproximada de um sistema contínuo. O modelo discreto não consegue uma resposta exata, pois, não estamos trabalhando com infinitos pontos, mas podemos obter uma boa aproximação sem a necessidade de diminuir os domínios de maneira exagerada, o que pode acarretar elementos extremamente pequenos e também diversos erros de arredondamento (truncamento) acumulados.

O conjunto dos pontos nodais é chamado de malha onde cada nó presente está ligado em função dos deslocamentos, sendo conectados diretamente ou indiretamente entre si (NASCIMENTO; SILVA, 2018).

Portanto, o MEF é fundamentado na divisão do domínio de um meio contínuo transformando em um sistema discreto limitado com certa quantidade de subdomínios. Estes subdomínios serão conectados entre si pelos pontos nodais através de seus contornos, levando a um comportamento similar ao meio contínuo real.

Essa discretização dos elementos estruturais que compõem o sistema será analisado por meio da ferramenta computacional que deverá buscar uma malha que permita alcançar uma resposta mais próxima daquela obtida na análise experimental.

## **1.8 Justificativa**

Os materiais e as tecnologias alternativas se apresentam com grande potencial de aplicação no setor industrial na realidade contemporânea mundial. Isso se apresenta pela busca de materiais e alternativas de construção que levam vantagem quanto ao custo e ao desempenho em comparação com edificações construídas convencionalmente.

Especificamente no Brasil, não é notável a consolidação de inovações tecnológicas na construção civil. Há uma certa resistência do próprio mercado diante de produtos inovadores. Seja pela escassez de especificações normativas, fato que dificulta a utilização e gera consequentemente insegurança, seja por metodologias que exijam mão de obra qualificada e

treinamento especializado, distanciando o alternativo da realidade brasileira. Logo, para se estabelecer parâmetros e melhores condições de ligação entre o meio acadêmico com o mercado consumidor os pesquisadores são indagados a criar muitas das vezes procedimentos metodológicos originais e únicos, visto a singularidade dos sistemas e materiais alternativos que são empregados, ademais, constantemente os estudiosos também seguem um paralelo com as prescrições normativas já consolidadas levando certas adaptações.

Adentrando estritamente em estruturas para cobertura verifica-se uma mudança nos sistemas construtivos com a percepção da sustentabilidade e uma melhor destinação dos resíduos da construção civil ocorrendo transformações também significativas nos sistemas construtivos. Muito disso se deve a evolução dos programas computacionais na área de engenharia que atuam de maneira corriqueira em simulações, dimensionamento e averiguações estruturais através de modelos numéricos. Denota-se assim uma maior confiabilidade na estabilidade global com rapidez nos resultados.

Dentro desse contexto a presente pesquisa buscou verificar características em uma estrutura alternativa constituída de materiais de concepção estrutural não usual. Onde a estrutura em análise difere-se das coberturas convencionais por possuir telhas de Polietileno tereftalato oriundas do processo de reciclagem de garrafas PET ao invés das convencionais telhas cerâmicas. Pode-se destacar que esta estrutura já foi pesquisada anteriormente, porém, focando na construção e análise estática da mesma, não adentrando em análise dinâmica o que despertou curiosidade quanto ao seu comportamento por ação vibratória, visto que, a mesma se mostra bastante flexível, logo, foi visado contribuir para uma análise mais ampla.

Além das telhas PET, foi empregado terças em forma de fios de aço também de caráter não usual, caracterizando a cobertura como leve o que facilita o manuseio e a padronização por meio da industrialização.

Verificando a concepção estrutural, a estrutura assemelha-se uma *tensegrity* enquadrando-se no padrão de cobertura utilizada em diversos países desenvolvidos como sistemas estruturais leves onde se tem uma cobertura de membrana com barras comprimidas e cabos tracionados. Este fato motivou a presente pesquisa quanto a caracterização da estrutura, visto que, não há uma membrana bem definida e sim um sistema de cobertura alternativo que ganha destaque pela sua leveza e que de fato leva a indagações quanto possíveis paralelismos e antagonismos. Sendo assim, foi objetivado estudar a conformação estrutural por meio de análise numérica e experimental caracterizando a estrutura e contribuindo paralelamente na caracterização de estruturas similares.

## 1.9 Objetivos

De acordo com todo esse contexto, o presente trabalho tem como objetivo geral estudar o comportamento estrutural estático e dinâmico de uma cobertura de telhas plásticas com estrutura metálica tensionada por fios de aço. Para isso, tem-se os seguintes objetivos específicos:

- Analisar o comportamento estrutural estático quanto a deformações impostas em estrutura de aço pré-tensionada através de análise experimental e análise numérica com modelos numéricos computacionais pelo programa comercial SAP2000
- Estudar o comportamento estrutural dinâmico da cobertura em vibração livre a partir de deformações iniciais impostas, comparando frequências naturais obtidas experimentalmente com as frequências obtidas em modelagem computacional pelo programa SAP2000.

## 1.10 Estrutura do trabalho

Diante dos pontos aqui salientados, esta dissertação é composta e ordenada em seu escopo por introdução, procedimentos metodológicos, análise estática em formato de artigo, análise dinâmica em formato de artigo, conclusões e sugestões e as referências bibliográficas.

No capítulo 1 foi mostrado uma introdução quanto aos assuntos abordados nesta dissertação, norteando desta maneira uma base teórica mais detalhada sobre os temas que são apresentados nos artigos científicos, além disso, destacam-se os objetivos gerais e específicos da pesquisa.

O capítulo 2 apresenta o detalhamento quanto aos procedimentos metodológicos do presente trabalho, destacando de maneira mais abrangente a metodologia e materiais que serão abordados sucintamente nos artigos científicos.

O capítulo 3 aborda o primeiro artigo com uma análise estática da estrutura, na qual é avaliado o comportamento especificamente de uma de suas terças sob ação de forças impostas, estudando suas deformações.

O capítulo 4 expõe o segundo artigo o qual objetiva determinar os parâmetros norteadores das características vibratórias da cobertura, a partir de um ensaio por vibração livre.

No capítulo 5 tem-se a apresentação das conclusões da pesquisa advindas dos artigos científicos por meio da observância quanto as características e especificidades de ambas as análises realizadas. Além disso, destaca-se as sugestões para trabalhos futuros.

## 2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O presente capítulo apresenta as normas pertinentes, metodologia e materiais utilizados, fazendo as devidas descrições para o melhor entendimento dos artigos subsequentes adentrando assim em pormenores técnicos das análises que não foram em sua totalidade exposto nos artigos 1 e 2.

### 2.1 Normatização brasileira pertinente

As principais normas brasileiras utilizadas nesta pesquisa envolvendo a estrutura metálica foram a NBR 14762 (ABNT, 2010) referente ao dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio, NBR 8800 (ABNT, 2008) de projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios e a NBR 6123 (ABNT, 1988) que envolve as forças devidas ao vento em edificações. Estas embasaram e englobaram alguns itens importantes como classificações e definições envolvendo deslocamento limite recomendado para perfis a frio, deslocamento máximo para barra de estrutura metálica e taxas de amortecimento.

### 2.2 Seleção de acessórios e equipamentos

A priori após a concepção de como seriam realizados os experimentos foram definidos os acessórios e equipamentos necessários para o ensaio no protótipo, os quais são descritos resumidamente a seguir.

#### 2.2.1 Relógio comparadores.

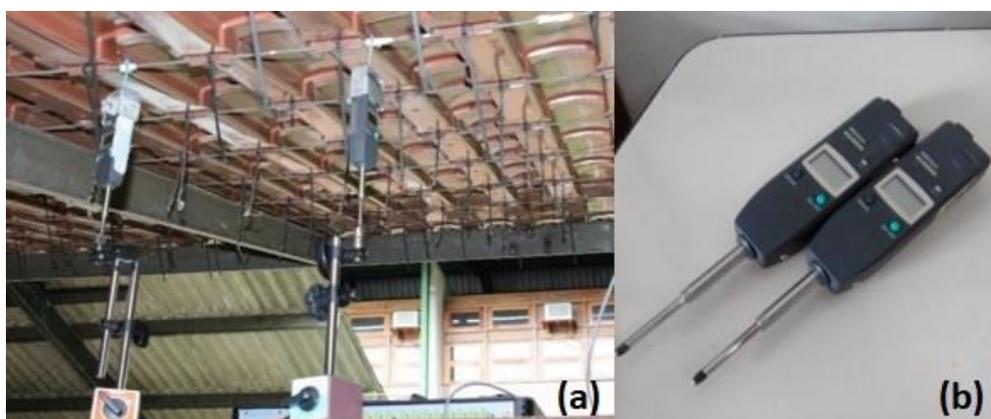


Figura 10 – Relógios comparadores utilizados no experimento

Os relógios comparadores são instrumentos de medição com alta sensibilidade e foram aplicados nas medidas verticais em terça da cobertura sob efeito de flexão (figura 10.a). Foram utilizados dois relógios modelo digital 575-121 marca Mitutoyo com capacidade de medição

de 25,4 mm e com precisão de 0,02 mm (MITUTOYO, 2018) (figura 10.b). Todos esses relógios foram cedidos pelo próprio PPGEC.

### 2.2.2 Suportes magnéticos

Os suportes foram utilizados nesse experimento como base para ponta da haste dos dois relógios comparadores, e como sustentação para o sensor LVDT. Foram utilizados três suportes magnéticos sendo cedidos pelo próprio programa de pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC) (figura 11).



Figura 11 – Apoios magnéticos

### 2.2.3 Sensor de deslocamento.

Para medir o deslocamento vertical na estrutura de cobertura foi utilizado o sensor de deslocamento variável, chamado também de LVDT (Linear Variable Differential Transformer). O sensor LVDT empregado é do modelo DTH-A-30, marca da fabricante Kyowa, com extensão máxima de até 30 mm (KYOWA, 2018) (figura 12). Esse Sensor foi disponibilizado também pelo próprio programa de pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC). Atualmente está cedido ao departamento de engenharia mecânica da UFAM se encontrando precisamente no laboratório de Sistemas Mecânicos e Controle.



Figura 12 - Sensor de deslocamento (LVDT)

### 2.2.4 Sistema de aquisição de dados.

O sistema de aquisição de dados empregado na pesquisa permite coletar dados como valores de temperatura, deslocamento e aceleração e força (LYNX, 2018) (Fig.13).



Figura 13 – Aparelho de aquisição de dados.

Integram esse sistema um condicionador de sinais que converte um sinal analógico em sinal digital (LYNX, 2018). Além disso há o conversor A/D que é responsável pela conversão de um impulso elétrico para valores numéricos equivalentes de dados. A última parte do sistema é o programa de aquisição de dados instalado no computador, o qual é responsável pelo controle do sistema, possibilitando por parte do usuário a parametrização, com comandos e monitoramento da aquisição.

Foi empregado assim o sistema de aquisição de dados modelo ADS2002 IP, com condicionador de sinais AL2161-VB, marca LYNX, utilizando o programa de aquisição de dados AqDados 7 destinado a calibração e coleta de dados e também o AqAnalysis 7 responsável pelo tratamento dos dados. Tanto o aquisitor de dados quanto os CD-ROMs de instalação dos *softwares* foram disponibilizados pelo PPGEC, entretanto, estão cedidos para o departamento de engenharia mecânica precisamente ao laboratório de Sistemas Mecânicos e Controle da UFAM sendo corriqueiramente utilizados em pesquisas envolvendo vibrações de máquinas.

### 2.2.5 Pesos

Foram utilizados três pesos na análise estática, um com valor em massa de 2 kg (17,6 N) e os outros dois com 1 kg (9,8 N), sendo todos empregados como cargas pontuais na estrutura. Os mesmos foram amarrados através de fitilhos de plástico com mecanismo de

fixação nos pontos em estudo. Já na análise dinâmica foi empregado todos os pesos simultaneamente com massa de 4 kg em ensaio de vibração livre. Esses pesos foram cedidos pelo laboratório de ensaio de materiais (LEM).

### 2.2.6 Mecanismos de fixação.

Os mecanismos criados por GÓES (2015) serviram como apoios de fixação aos pesos e relógios comparadores, os quais são mostrados na figura 14. Destacam-se pela facilidade de manuseio além da leveza.



Figura 14– A direita os mecanismos de fixação e a esquerda o mecanismo já acoplado

Estes mecanismos de fixação foram cedidos pelo programa de pós-graduação em engenharia civil (PPGEC).

### 2.2.7 Aparato de apoio

Foi projetada um aparato de madeira sob medida para que pudesse ser realizado o experimento, visto que, computador, sensor, aquisitor e relógios comparadores precisavam estar sobre uma superfície regular e que ficassem próximos aos pontos de aquisição de dados (figura 15):



Figura 15–Aparato de apoio modelo virtual na esquerda e a direita o modelo real

### 2.2.8 Equipamento de medição por coordenadas

Esse tipo de equipamento é empregado em diversas medições sendo largamente utilizado em empresas ligadas a metalurgia e engenharia mecânica objetivando controle dimensional de peças e a viabilidade técnica em processos de calibração de sensores (NORONHA, 2003). Sendo assim, foi utilizado uma máquina de medição por coordenadas (MMC) modelo OPTIV CLASSIC 3020 VM (figura 16) norteando o procedimento de calibração do sensor LVDT. Esta máquina de medição de coordenadas se encontra atualmente no laboratório de Metrologia da UFAM.



Figura 16– MMC no Laboratório de metrologia da UFAM

### 2.2.9 Acelerômetros

Foram utilizados três acelerômetros enumerados em 1, 2 e 3 sendo todos do modelo Model AS-1GA do fabricante KYOWA (figura 17). Estes sensores foram disponibilizados pelo próprio programa de pós-graduação de engenharia civil (PPGEC). Atualmente estão cedidos ao departamento de engenharia mecânica precisamente ao laboratório de Sistemas Mecânicos e Controle da UFAM. Caracterizam-se por uma saída nominal de 0.5 mV/V ou mais; tensão de excitação de 1 a 3V AC ou DC, resposta de Frequência de DC para 40 Hz a 23°C (Desvio de sensibilidade  $\pm 5\%$ ) e capacidade nominal de  $\pm 9.807 \text{ m/s}^2 (\pm 1G)$ .



Figura 17 – Acelerômetros empregados na análise experimental dinâmica.

### 2.2.10 Computadores

Foram utilizados dois computadores, sendo o primeiro um Notebook Acer Aspire R11, para medição em campo, tratamento de dados da análise experimental e estatística. Tendo como atributos ser de 11 polegadas e conter um processador Intel Pentium N3700, velocidade de processamento 1,6 GHz, 4GB de RAM e capacidade do HD de 500GB.

Foi empregado esse tipo de computador devido a facilidade em se trabalhar em campo através de sua leveza e tamanho reduzido com fácil portabilidade juntamente com a compatibilidade aos *softwares* trabalhados.

Já o segundo computador foi um Notebook Acer Aspire F15 empregado para fazer a análise numérica no *software* SAP2000. Logo, foi necessário melhores configurações para assim otimizar a análise. Este Notebook contém um processador Intel Core I7 7500U, velocidade de processamento de 2.7 GHz -3.5 GHz, 8GB de RAM e capacidade de HD de 1TB.

### 2.3 Calibragem do LVDT

O sensor LVDT foi calibrado com utilização de máquina de medição de coordenadas (MMC), modelo OPTIV CLASSIC 3020 VM, marca HEXAGON.

Sabe-se que o aquisitor recebe a informação do sensor LVDT e traduz em valores de tensão, os quais são repassados pela medição realizada na máquina de medição de coordenadas em escala milimétrica. Portanto, a princípio foi adotado o valor de 0 mm onde a ponta do LVDT que ficava encostada no aparelho sem nenhum movimento gerado pelo MMC e em seguida anotado o valor de respectiva de tensão mostrada no programa AqDados (figura 18).



Figura 18- Calibração do LVDT pela MMC no Laboratório de Metrologia da UFAM.

Esse processo foi repetido mais 24 vezes de maneira crescente de 1 em 1 mm com a movimentação da MMC anotando e gravando no banco de dados do *software* AqDados totalizando 25 leituras de deslocamento. Assim foi possível realizar uma correlação entre o índice de relações entre as variáveis de tensão e movimentação da máquina na ponta do sensor

em deslocamento. Estes valores se encontram no APÊNDICE C com a devida correlação entre tensão e deslocamento.

## 2.4 Calibração dos acelerômetros

A calibração dos três acelerômetros foi realizada por comparação através de um goniômetro (figura 19.a) onde este fez o papel de um plano inclinado de maneira a calibrar os sensores ao decorrer da mudança de angulação (figura 19.b). Essa metodologia de calibração para acelerômetros é consolidada no meio científico e utilizada rotineiramente no laboratório por isso a sua escolha (LÖTTERS, J. C. et al, 1998; NEZ, A. et al, 2016; YAMANE, L. S. et al, 2017). Tal procedimento de calibração foi realizado no laboratório de metrologia da UFAM onde foi disponibilizado um goniômetro. Os acelerômetros foram acoplados por cola adesiva instantânea de fabricante TREEBOND modelo Super Gel.

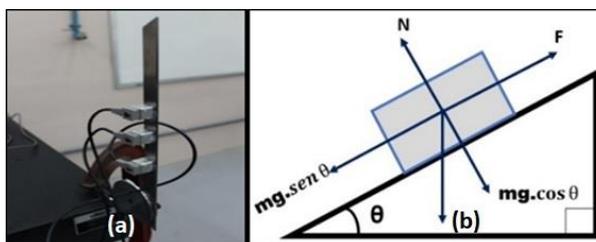


Figura 19 - (a) Acelerômetros e (b) plano inclinado.

As medições de angulação foram realizadas no intervalo de  $0^\circ$  há  $180^\circ$  medindo inicialmente  $0^\circ$  depois em intervalo de 5 em  $5^\circ$  até chegar ao  $180^\circ$  totalizando 38 medidas para cada acelerômetro, relacionando-os com a tensão (V) indicada na leitura do aquisitor de dados (figura 20). Os valores de aceleração foram verificados por relação trigonométrica do plano inclinado. Estas inclinações e suas tensões respectivas são mostradas no APÊNDICE D com a devida correlação.

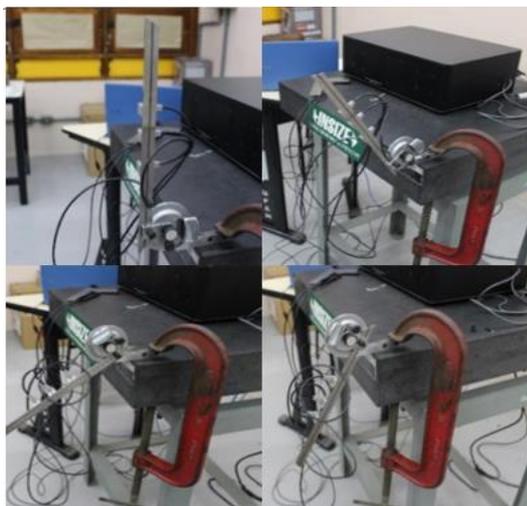


Figura 20 - Processo para calibração dos acelerômetros

## 2.5 Ensaio de deformações

O ensaio consistia em colocar cargas pontuais verticais sobre uma das terças coletando dados e observando comportamento quanto a imposição dessas cargas. O tempo de duração de cada ensaio foi estimado em 1 min, visto que, por volta desse intervalo de tempo notou-se em campo que na maioria dos casos estabilizava-se os valores de deflexão nos sensores de medição.

Os pesos e sensores foram fixados no fio de aço mediano da estrutura especificamente no vão central entre as duas vigas intermediárias tendo como referência para localização a viga da esquerda do vão central (figura 21). As distâncias de colocação dos pesos da esquerda para direita foram de 53,5 cm, 73,5 cm e 88 cm. O andamento do ensaio seguiu a mesma sequência.



Figura 21 - Trecho analisado e viga de referência.

Já os sensores foram posicionados no mesmo trecho seguindo da esquerda para direita distâncias de 33 cm, 66 cm e 99 cm, respectivamente (figura 22).



Figura 22 - Peso com mecanismo de fixação, apoios e relógios comparadores.

A escolha do trecho e a distância para colocação dos pesos e sensores foi norteadada pela necessidade em campo do manuseio dos equipamentos envolvidos. Logo, o ensaio começou zerando-se os relógios comparadores para medição, dando início a leitura do aquisitor de sinais. Sequencialmente foi colocado o peso de 9,8 N que a priori foi fixado no ponto de 53,5 cm, aguardando-se um período de aproximadamente 1 min, uma vez que, foi observado que por

volta dessa estimativa de tempo as medições dos relógios comparadores não apresentavam variações significativas muita das vezes não se alterando. Após este período foi realizada a leitura da deformação por meio do LVDT e aquisitor de sinais empregando o *software* AqDados 7, sendo em seguida processado pelo *software* AqAnalysis 7 e posteriormente pelo *software* Action Stat.

Este procedimento foi repetido mais 9 vezes, sendo realizado assim um total de 30 medições para o mesmo peso e a mesma localização. Foi dado seguimento com mais outros 10 testes, mas na posição em 73,5 cm e depois mais 10 testes na distância de 88 cm, totalizando-se 90 medições com massa de 1 kg.

Na sequência foi empregado o peso de 19,6 N referente a massa de 2kg, onde empregou-se o mesmo procedimento da massa de 1 kg, totalizando também 90 medições e mais 30 testes. Por fim, a medição de 27,4 N referente a massa de 3 Kg com mesmo procedimento experimental das demais cargas e mesma quantidade de medição, ou seja, mais 90 medições. Assim pode-se obter uma quantidade de 90 testes resultando em 270 medições de valores das deformações verticais (flechas).

## **2.6 Estatística dos dados da análise estática**

Esta etapa foi realizada empregando *software* Action Stat de maneira tal que foi disposto com a sequência de atividades: Testes de normalidade; Correlação de dados da calibragem LVDT; Gráficos *Boxplot* com média aritmética, mediana, mínimos e máximos.

### **2.6.1 Testes de normalidade**

Os testes de normalidade foram um indicativo para verificação se o conjunto de dados (valores de flechas) seguem uma distribuição normal. Esta forma de distribuição também chamada de gaussiana é uma distribuição constante que tem bastante relevância pois norteia que mesmo se os dados não sigam essa distribuição a média dos valores converge para essa distribuição normal dependendo da proporção de quantidade dados. Sendo assim, optou-se por 10 dados para cada análise envolvendo os testes de normalidade, totalizando assim 27 grupos, levando a 270 medições, envolvendo os 3 sensores. As técnicas adotadas nesta etapa foram:

- Teste de Anderson-Darling
- Teste de Kolmogorov-Smirnov
- Teste de Shapiro-Wilk
- Teste de Ryan-Join
- Papel de probabilidade

Os valores do teste de normalidade estão dispostos em sua totalidade no APÊNDICE A.

### **2.6.2 Correlação de dados da calibragem LVDT**

Teve como finalidade verificar o grau de relação entre variáveis que no caso na pesquisa se refere a tensão (V) e a medição em mm (L) da ponta do sensor através de deslocamento pelo equipamento de medição de coordenadas. Foi adotada a correlação de Pearson pois se além a medir o grau de associação entre duas variáveis quantitativas. Os dados encontrados se encontram no APÊNDICE C.

### **2.6.3 Gráficos Boxplot**

Foram gráficos que verificaram a distribuição dos dados, norteando uma análise quanto aos quartis, ou seja, dividindo a distribuição de dados em quatro partes, englobando a mediana (segundo quartil) e a observação quanto limites inferior e superior das medições. Assim pode-se comparar visualmente os 27 grupos de dados envolvidos, verificando mediana e média com maior clareza (APÊNDICE B).

## **2.7 Ensaio de vibração livre**

O ensaio de vibração livre consistiu em uma medição simultânea de caráter pontual, escolhendo-se pontos para medição dos sensores. Corresponde a um ensaio de uma fase, que é definido por se ter as medições ao mesmo tempo e apenas de uma vez, não havendo mudança de posição dos acelerômetros no decorrer do ensaio. Difere-se dos ensaios pontuais por fases que denotam além dos sensores fixos de referência também sensores volantes que mudam de posição a cada fase do ensaio, logo, cada mudança de posição dos sensores volantes é uma nova fase (ROCHA, 2015).

Além disso, o ensaio de vibração livre da presente pesquisa foi baseado em ensaios de mesmo perfil realizados em pontes e viadutos, tendo o objetivo de induzir uma resposta da estrutura pela ação de uma carga pontual de modo a caracterizar os modos de vibração, as frequências naturais e taxa de amortecimento.

O ensaio se inicia pela aplicação de uma massa que fica suspensa e liberada subitamente, deixando a estrutura vibrar livremente até entrar em repouso (CAETANO; CUNHA; MAGALHÃES, 2010). Um exemplo disto foi o ensaio realizado na ponte Vasco da Gama em Portugal onde foi utilizado uma barcaça de 60 toneladas com uma massa amarrada com cabos de aço que foram cortados para excitação impulsiva (CUNHA; CAETANO 2004; CAETANO; CUNHA; MAGALHÃES, 2010).

Na presente pesquisa foram utilizados fitilhos de plástico e peso de 4 kg de forma análoga a da ponte onde foi cortado o fitilho e deixado a estrutura vibrar para medição.

## 2.8 Estatística dos dados na análise dinâmica

Os dados abordados na análise dinâmica foram delimitados em verificar o grau de correlação da calibração dos acelerômetros através da correlação de Pearson (APÊNDICE D). Foi relacionado duas variáveis a aceleração gravitacional em  $m/s^2$  e a tensão (V) ao decorrer da mudança de angulação que se passou inicialmente em  $0^\circ$  depois de 5 em  $5^\circ$  até  $180^\circ$  pelos três acelerômetros. Obteve-se assim, as tensões as quais se relacionavam com os valores de componente da gravidade (G) através de plano inclinado, gerando 114 dados de aceleração e 114 dados de tensão.

## 2.9 Análise numérica: Equivalência de momento de inércia e tempo de processamento

No modelo numérico utilizado tanto pela abordagem estática quando na análise dinâmica foi compatibilizado para se enquadrar mais próximo ao modelo real da cobertura, porém, não tinha a possibilidade de projetar a telha com seu devido formato e características inerentes de encaixe e fixação no software SAP2000 (figura 23).



Figura 23 – Telha PET empregada na pesquisa.

O programa permite, porém, a criação da cobertura em forma de placa, nesse sentido houve uma equivalência de momento de inércia para transformar o perfil da telha em um perfil retangular com determinada altura. Foi encontrado a priori o centro de gravidade da telha em relação ao eixo da abcissa e posteriormente a altura com igualdade entre o momento de inércia retangular e o momento de inércia do perfil de uma telha, onde, o comprimento do retângulo era o mesmo da telha, resultando assim em uma altura aproximadamente de 2,1 cm (figura 24).

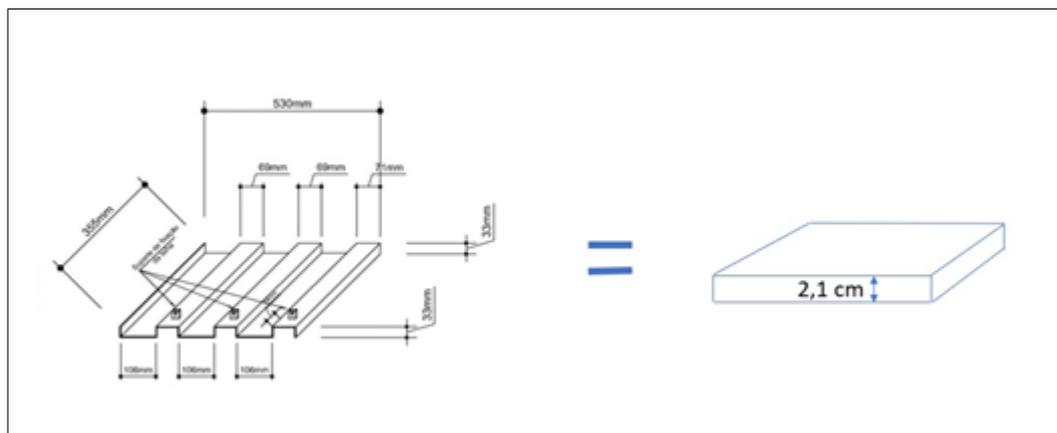


Figura 24 – Esquematização e dimensões da telha PET. Fonte: Góes (2015) adaptado.

Acima a esquematização de igualdade entre os momentos de inércia e as devidas dimensões da telha, vale ressaltar ainda a espessura da telha que é de 3 mm e o seu momento de inércia que é de  $433728,021 \text{ mm}^4$ .

Quanto ao tempo de processamento da análise numérica, tanto estática quanto a dinâmica foram breves, por volta de 1 min, ou seja, após clicar para o processamento dos dados o programa SAP2000 mostrava os resultados em torno desse tempo.

### **3. Análise experimental e numérica de deformações em estrutura metálica tensionada com telhas de poli (tereftalato de etileno)**

Samuel Antão Ferreira do Nascimento <sup>1\*</sup>, Raimundo Pereira de Vasconcelos <sup>2</sup>.  
Universidade Federal do Amazonas, Faculdade de tecnologia, programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC) <sup>(1)(2)</sup>, Departamento de Engenharia civil, Av. General Rodrigo Octavio Jordão Ramos, 1200, 69067-005, Coroado I, Manaus, AM.  
antaoleumas@gmail.com\*

**Resumo:** A presente pesquisa buscou fazer uma análise quanto a deformações em uma cobertura alternativa com telhas de poli (tereftalato de etileno). Foi verificado precisamente o desempenho de barras de aço CA-60 de 4,2 mm que integram em forma de terças a cobertura tensionada. Propõem-se verificar as deformações tanto por procedimento experimental quanto pelo método dos elementos finitos (MEF) com diferentes discretizações. Experimentalmente foi realizado uma análise por meio de sensor de deslocamento LVDT, sistema de aquisição de dados ADS2002 e relógios comparadores fazendo testes de normalidade aos valores de deflexão. Já por análise numérica foi empregado quatro modelos virtuais no *software* comercial SAP2000. Foi aplicado em ambas as análises cargas pontuais de 1 kg, 2kg e 3kg no vão mediano da terça central e os deslocamentos foram medidos em três pontos distintos deste elemento. Os resultados da análise numérica apresentaram convergência com àqueles obtidos na análise experimental a medida em que os elementos estruturais foram discretizados em malha com um número maior de elementos finitos. Tanto a análise experimental quanto a numérica demonstraram que a estrutura apresentou um alto grau de flexibilidade.

**Palavras-chave:** Estrutura metálica, MEF, telhas, PET

**Abstract:** The present research sought to make an analysis regarding deformations in an alternative roofing with poly (ethylene terephthalate) tiles. Precisely verified performance of 4,2 mm CA-60 steel bars that integrate in form of purlins the tensioned roofing. It is proposed to verify the deformations both by experimental procedure and by the finite element method (FEM) with different discretizations. Experimental analysis was performed by means of the LVDT displacement sensor, ADS2002 data acquisition system and comparator watches making normal tests of the deflection values. By numerical analysis, four virtual models were used in SAP2000 commercial software. It was applied in both analyzes punctual loads of 1 kg, 2 kg and 3 kg on the middle span of the central and displacements on three distinct points of this element were measured. The results of numerical analysis showed convergence with those obtained in experimental analysis when the structural elements were discretized in mesh with large number of finite elements. Both the experimental and numerical analysis demonstrated that the structure showed a high degree of flexibility.

**Keywords:** steel structure, FEM, tiles, PET

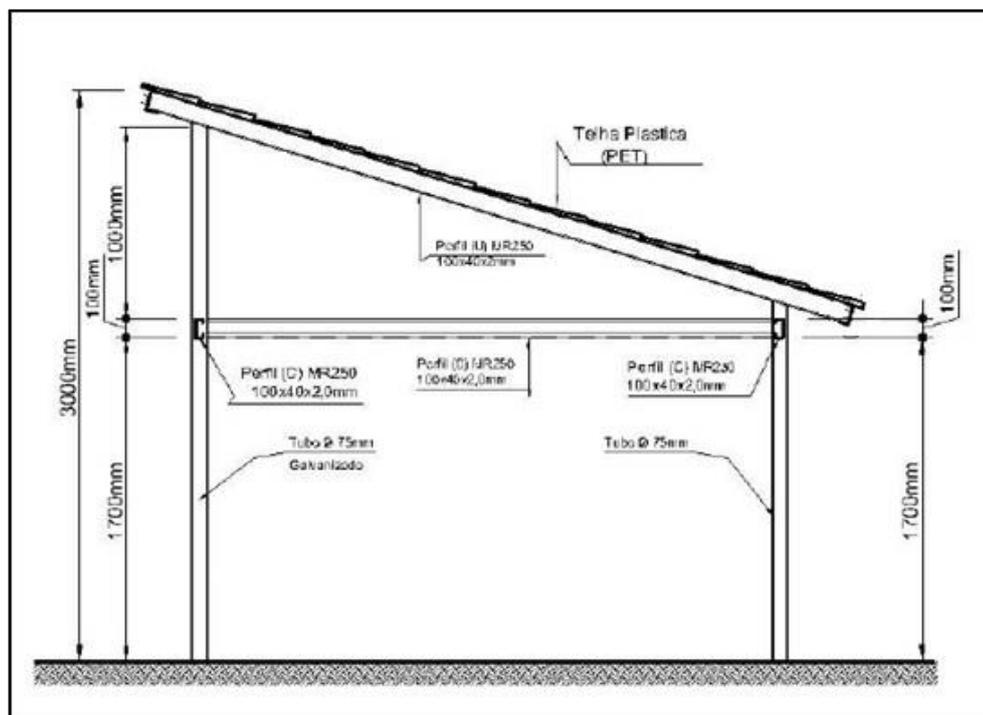
## 1.INTRODUÇÃO

A estrutura analisada no presente trabalho é definida como alternativa haja vista que abrange materiais alternativos e suas características construtivas são não usuais, individualizando-se assim como um sistema de cobertura ecológica. (FERREIRA, 2009; ALMEIDA et al, 2013; TESKE; NAGALLI, 2015; SANTO et al, 2016). Observa-se que ao invés de se utilizar os convencionais cabos de aço, vigas metálicas ou perfis metálicos para se fazer as terças foi empregado fios de aço de 4,2 mm, o que reforça o aspecto alternativo da construção (VIEIRA, 2009; AIMI, 2015). Além disso, as telhas são de caráter alternativo, sendo chamadas de telhas PET, compondo a cobertura, as quais são oriundas do processo de reciclagem das garrafas PET, apresentando menor peso específico que as ditas convencionais de cerâmica (GÓES, 2015).

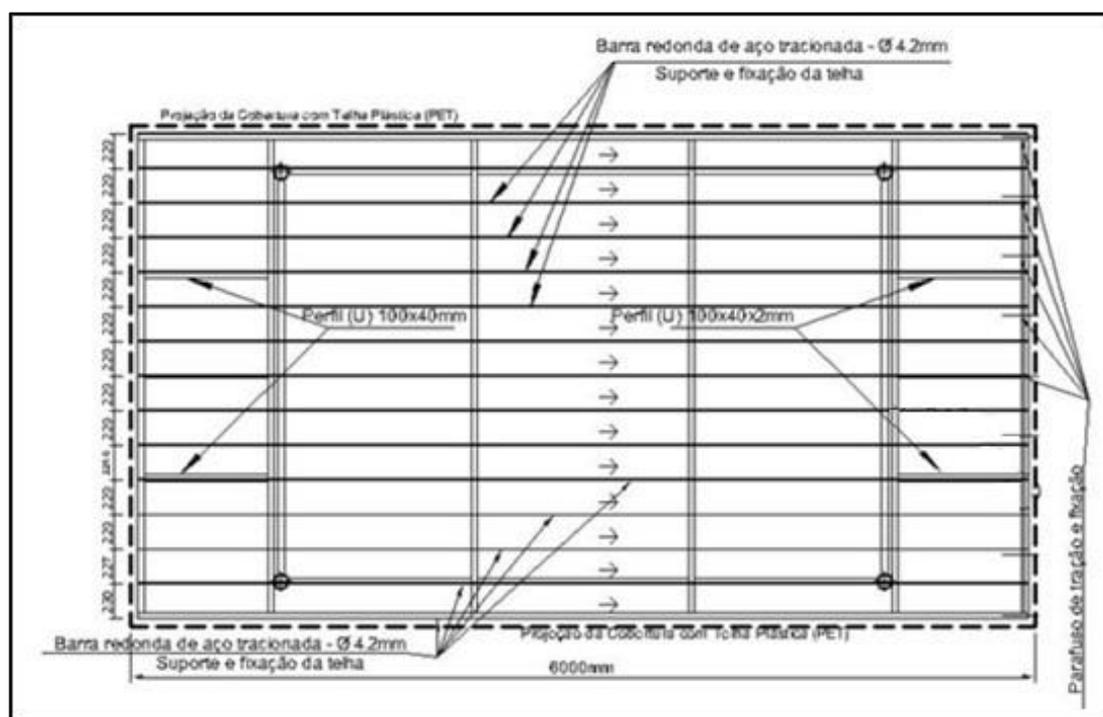
O modo de construção da cobertura ganha destaque pelas suas terças atuarem com uma pré-tensão por meio de torquimetro comportando-se com aspecto similar a uma tensoestrutura (OBATA; ALONSO, 2011; MEIRELLES; KISHI, 2014; RIMOLI, 2018). A tensoestrutura ou *tensegrity* basicamente é constituída por cabos, barras e membranas trabalhando de maneira mutua as tensões de compressão e tração, logo, as telhas PET fazem o papel semelhante a membrana enquanto em paralelo aos cabos de aço tem-se os fios de aço que levam ao tensionamento dos elementos por meio da tração, norteando assim, um equilíbrio com as vigas comprimidas. (WANG, 2014; XU et al, 2018).

Adentrando ainda mais nas especificidades da estrutura esta é composta por dispositivos de fixação de plástico denominados de presilhas ou abraçadeiras que ligam as telhas diretamente nos fios de aço sendo distribuídos ao decorrer do sentido longitudinal da cobertura. Logo, o modelo estrutural somente se torna viável devido ao baixo peso específico das telhas PET sobre a estrutura e pelo modo de sua disposição através das presilhas acopladas nos fios de aço. Ressalvam-se ainda os perfis de aço constituintes da estrutura onde se tem tubos galvanizados como pilares da cobertura com diâmetros de 75 mm e altura dentre aproximadamente 2 m e 3 m (figura 1). Ademais, Vigas de perfil U 100x40 mm, vigas formato “U” de chapa dobrada 100x40x2, barras de contraventamento e os fios de aço de 4,2 mm CA 60 (figuras 2 e 3).

A estrutura tem extensão tem 6 m de comprimento e aproximadamente 4 m de largura. Suas terças ficam equidistantes entre si formando a “trama” da cobertura. Além disso, tem-se o efeito da pré-tensão nas terças no canto a direita (figura 2) através de torquimetro em parafusos, deixando-as tensionadas e a esquerda por meio de solda a fixação das mesmas.



**Figura 1** - Planta de elevação da estrutura metálica do modelo experimental. Fonte: Góes (2015). Adaptado



**Figura 2** - Planta da estrutura da cobertura no nível dos fios de aço. Fonte: Góes (2015). Adaptado



**Figura 3** – Estrutura analisada no presente trabalho.

### **1.1 Análise de deformação em fio de aço**

É notável a diferenciação envolvendo cabos, barras e os fios de aço que compõem as terças da estrutura seja pelo modo de fabricação ou distinção de comportamento mecânico como também pela forma e ordenação de seus elementos constituintes (AGUIAR, 1999; FERRONI JÚNIOR, 2015). Entretanto, com a escassez de elementos na literatura quanto ao comportamento de fio de aço em coberturas tensionadas, decidiu-se verificar as deformações desses elementos na estrutura, observando a convergência de diferentes discretizações pelo método dos elementos finitos através do SAP2000 e a verificação quanto a flexibilidade da estrutura pelos valores de deflexão em contraste ao estado limite de serviço preconizado pela NBR 8800 e NBR 14762 que denotam os deslocamentos máximos.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

A metodologia desta pesquisa abrange análise numérica e experimental levando a um estudo de comportamento da estrutura sujeita aos efeitos de cargas pontuais originárias da aplicação de pesos em massas de 1 kg, 2kg e 3kg, verificando-se os valores de deformação e a natureza de flexibilidade do elemento estrutural como também padrão e significância dos valores coletados.

### **2.1. Análise experimental**

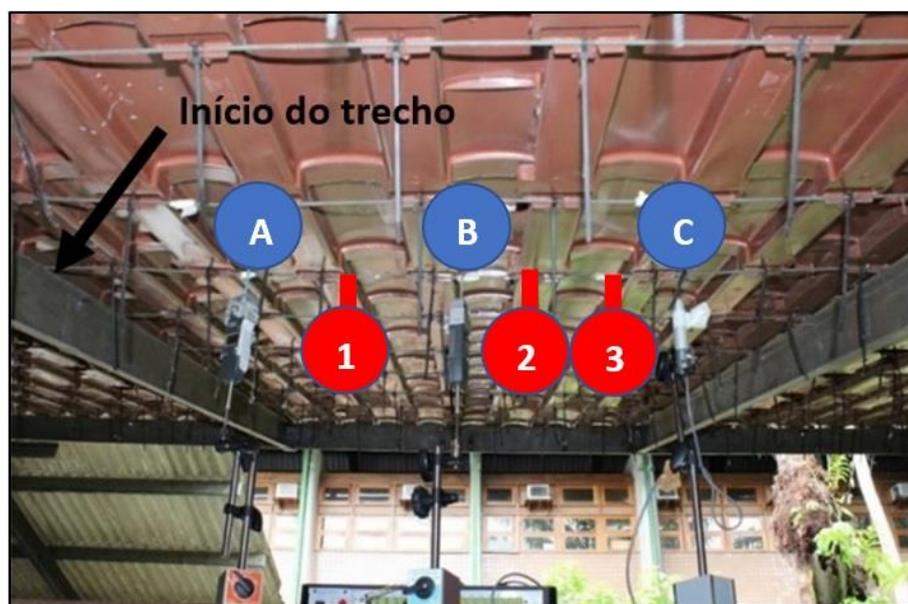
Foi realizada experimentalmente a análise com sensor de deslocamento LVDT modelo DTH-A-30 do fabricante Kyowa (KYOWA, 2018) e sistema de aquisição de dados ADS2002 (LYNX, 2018) juntamente com dois relógios comparadores modelo 575-121 (MITUTOYO,

2018), para medição de deflexões. Essas medições foram realizadas por etapas no vão da barra central da cobertura, precisamente na região mediana cujo o comprimento é de 132 cm, logo, estabeleceu-se os pontos de maneira a dividir o vão em 4 partes equidistantes, sendo os pontos localizados da esquerda para direita com referência a viga perpendicular de início do trecho (figura 4). A escolha de se adotar somente um vão para medição foi com o objetivo de melhor manuseio dos sensores, computador e do próprio aquisitor dados, fato também que norteou a localização dos pesos.

Sendo assim, o primeiro sensor foi estabelecido a 33 cm de distância da viga transversal a seção de análise sendo denominado de ponto “A”. Em seguida o ponto “B” com o segundo sensor localizando-se a 66 cm e por fim o terceiro sensor no ponto “C” em 99 cm. (Figura 4).

Caracterizou-se assim a medição, com a definição da localização dos sensores; seguidamente a colocação dos mecanismos de fixação ligando aos relógios comparadores os quais ficaram pendurados no fio de aço central, tendo como base os apoios magnéticos. Já por outro lado o LVDT ficou fixado por um apoio magnético com sua ponta encostada no fio sendo suscetível a qualquer movimento.

Além disso, foi estabelecido mais três pontos no vão central onde foram empregadas massas sendo colocadas da esquerda para direita em 53,5 cm, 73,5 cm e 88 cm. Estas posições empregadas foram nomeadas respectivamente em “1”, “2” e “3” (figura 4). Portanto, os pontos indicados com letras A (33 cm), B (66cm) e C (99 cm) são as localizações de visualizações e análise das deflexões enquanto os pontos enumerados 1(53,5 cm),2(73,5 cm) e 3(88 cm) a posição das massas inseridas.



**Figura 4** - Localização dos medidores de deformação e das cargas pontuais.

Foi realizado etapas quanto a colocação dessas massas sendo a primeira destas com uso de 1 kg a segunda com 2 kg e por fim a de 3 kg. Foram realizados 90 testes com tempo estimado de 1 min para cada medição e contendo 3 amostras distintas, obtendo-se 270 respostas de deflexão em mm. São especificados melhor o passo a passo quanto a estes testes na tabela 1.

**Tabela 1** - Dados para medição das deflexões

1 kg											
Posição	1			2				3			
Sensor	A	B	C	Sensor	A	B	C	Sensor	A	B	C
Teste 1 até 10	Amostra 1 (mm)	Amostra 2 (mm)	Amostra 3 (mm)	Teste 11 até 20	Amostra 4 (mm)	Amostra 5 (mm)	Amostra 6 (mm)	Teste 21 até 30	Amostra 7 (mm)	Amostra 8 (mm)	Amostra 9 (mm)
2 kg											
Posição	1			2				3			
Sensor	A	B	C	Sensor	A	B	C	Sensor	A	B	C
Teste 31 até 40	Amostra 10 (mm)	Amostra 11 (mm)	Amostra 12 (mm)	Teste 41 até 50	Amostra 13 (mm)	Amostra 14 (mm)	Amostra 15 (mm)	Teste 51 até 60	Amostra 16 (mm)	Amostra 17 (mm)	Amostra 18 (mm)
3 kg											
Posição	1			2				3			
Sensor	A	B	C	Sensor	A	B	C	Sensor	A	B	C
Teste 61 até 70	Amostra 19 (mm)	Amostra 20 (mm)	Amostra 21 (mm)	Teste 71 até 80	Amostra 22 (mm)	Amostra 23 (mm)	Amostra 24 (mm)	Teste 81 até 90	Amostra 25 (mm)	Amostra 26 (mm)	Amostra 27 (mm)

Com a quantidade de dados obtidas foi realizada uma análise estatística por meio do teste de normalidade para os valores das deflexões. Buscou-se, portanto, uma padronização dos dados de maneira a se ter também maior segurança quanto ao modelamento dos dados na distribuição normal e nas médias dos valores encontrados. Para os testes de normalidade utilizou-se o *software* Action Stat sendo realizados os testes de Anderson – Darling, Kolmogorov – Smirnov, Shapiro – Wilk, Ryan – Joiner e papel de probabilidade (ÖZTUNA; ELHAN; TÜCCAR, 2006; RAZALI; WAH, 2011; LOPES M; BRANCO; SOARES, 2013; KALA; VALEŠ; JÖNSSON, 2017; PORTAL ACTION, 2018).

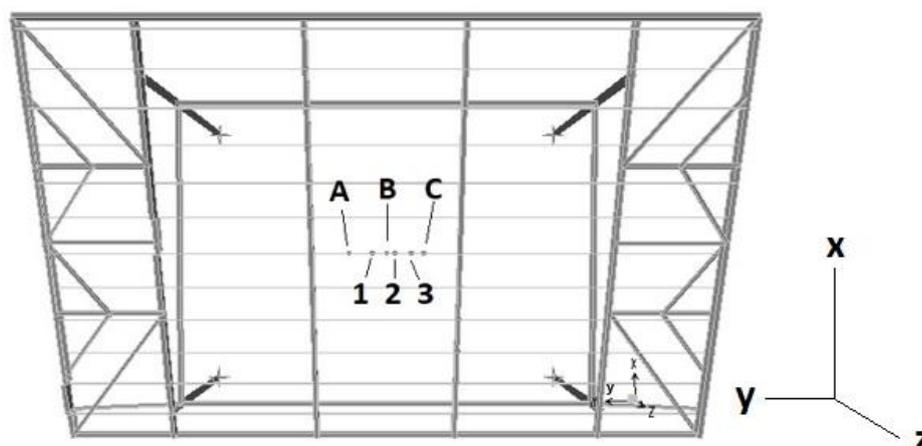
Logo, foi verificado o grau de significância dos P-valores que definem o grau de normalidade dos dados (FERREIRA; PATINO, 2015; IOANNIDIS, 2018).

## 2.2. Análise numérica

Para a análise numérica foi empregado um modelo virtual no *software* comercial SAP2000, versão 14.0.0, onde foi projetada toda estrutura metálica, mas retirando as telhas e incluindo quatro discretizações. Não houve a inserção da cobertura, visto que, a análise experimental teve sua medição com as terças já deformadas pelas telhas e pelo peso próprio. Logo, a análise envolveu as cargas pontuais e a força longitudinal do fio de aço.

Todas as terças foram inseridas como barras com diâmetro de 4,2 mm (*Type Straight Frame*). Os demais elementos da estrutura foram empregados como vigas e pilares (*Type Straight Frame*) tendo a geometria dos elementos indicadas por Góes (2015) pelas figuras 1 e 2 (CSI - *Computers & Structures Inc*, 2011; CSI - *Computers & Structures Inc*, 2018). Foi

incluso o efeito das cargas pontuais do estudo estabelecendo os seis pontos do trecho em análise da terça central sendo os primeiros pontos A(33 cm), B (66 cm) e C (99 cm) simulando os pontos dos medidores de deflexão da análise experimental e os pontos de inserção dos pesos, 1 (53,5 cm), 2 (73,5 cm) e 3 (88 cm) (figura 5).



**Figura 5** - Vista superior da estrutura com pontos da análise em modelo no SAP2000.

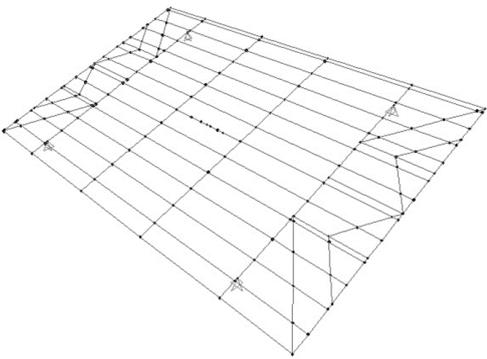
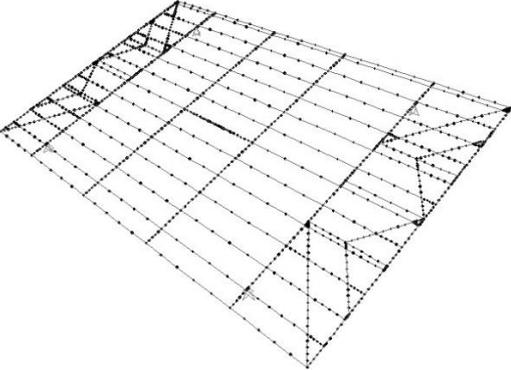
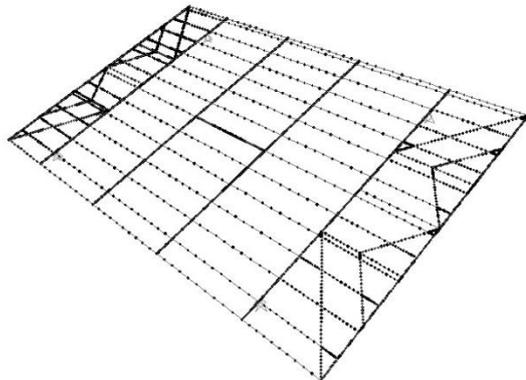
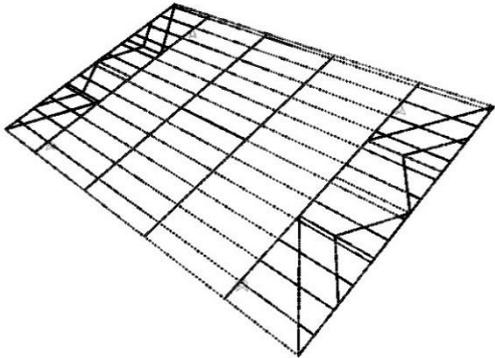
Efetuuou-se a inserção de força 1,85 kN tensionando o eixo longitudinal das terças. O material envolvido na estrutura foi somente o aço da estrutura metálica (tabela 2) já que a cobertura de plástico não foi inserida, entretanto, foi inclusa mesmo assim as informações da cobertura de plástico para qualquer eventual comparação e questionamento da cobertura leve.

**Tabela 2** – Característica do material

Material	Modulo de elasticidade (GPa)	Massa Específica (KN/m <sup>3</sup> )	Coefficiente de Poisson
Aço	200	77	0,30
Plástico	2,4	13,4	0,21

Além de haver a inclusão de nós nos pontos de visualização e de carregamento respectivamente A, B, C, 1, 2 e 3 foi realizada a inserção de nós nas interseções de cada elemento o que foi definido como a discretização inicial (Quadro 1) servindo de base para as demais discretizações estudadas na presente pesquisa. Logo, cada elemento constituinte da estrutura ficou delimitado entre 2 nós. Após isso ocorreu a divisão de cada elemento já delineado em 5 elementos e 6 nós (Quadro 1). A terceira discretização foi com a divisão de 10, ou seja, 11 nós e 10 divisões igualitárias em cada elemento sendo nomeada de discretização 10 (Quadro 1). E por fim a quarta discretização com 25 divisões totalizando 26 nós em cada elemento definido na discretização inicial. Entretanto, para análise da curva de convergência dos elementos finitos foi incluso ainda mais discretizações como a de 15, 20, 30 e 35.

**Quadro 1** – Discretizações da pesquisa com respectivas divisões

Discretização inicial	Discretização 5 com 5 divisões
	
Discretização 10 com 10 divisões	Discretização 25 com 25 divisões
	

Observa-se que o trecho do vão central onde contém os pontos A, B, C, 1, 2 e 3 é o que mais recebeu divisões, visto que, na discretização inicial haviam estes 6 nós e, portanto, quando houve a subdivisão dos elementos foi gerado uma maior quantidade de nós o que otimizou a convergência de dados no referido trecho chegando a 175 elementos para o trecho central.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados e discutidos os resultados obtidos tanto para a análise experimental quanto a numérica.

#### 3.1 Análise experimental

As deflexões advindas da análise experimental envolveram 3 posições com 3 massas diferentes empregadas totalizando 9 configurações, conforme as massas e suas localizações, cujos resultados em termos de deslocamento são apresentados na tabela 3.

**Tabela 3** –Deflexões produzidas por massas fixadas na estrutura da cobertura analisada.

1 kg											
Posição	1			2			3				
Ponto	A	B	C	Ponto	A	B	C	Ponto	A	B	C
Teste 1 até 10	Amostra 1 (mm)	Amostra 2 (mm)	Amostra 3 (mm)	Teste 11 até 20	Amostra 4 (mm)	Amostra 5 (mm)	Amostra 6 (mm)	Teste 21 até 30	Amostra 7 (mm)	Amostra 8 (mm)	Amostra 9 (mm)
Média	0,837	0,923	0,374	Média	0,489	1,002	0,749	Média	0,285	0,638	1,100
Desvio padrão	0,053	0,045	0,024	Desvio padrão	0,030	0,039	0,037	Desvio padrão	0,013	0,046	0,047
2 kg											
Posição	1			2			3				
Ponto	A	B	C	Ponto	A	B	C	Ponto	A	B	C
Teste 31 até 40	Amostra 10 (mm)	Amostra 11 (mm)	Amostra 12 (mm)	Teste 41 até 50	Amostra 13 (mm)	Amostra 14 (mm)	Amostra 15 (mm)	Teste 51 até 60	Amostra 16 (mm)	Amostra 17 (mm)	Amostra 18 (mm)
Média	2,072	2,169	0,926	Média	1,111	2,465	1,758	Média	0,600	1,710	2,853
Desvio padrão	0,220	0,239	0,065	Desvio padrão	0,084	0,194	0,165	Desvio padrão	0,078	0,148	0,196
3 kg											
Posição	1			2			3				
Ponto	A	B	C	Ponto	A	B	C	Ponto	A	B	C
Teste 61 até 70	Amostra 19 (mm)	Amostra 20 (mm)	Amostra 21 (mm)	Teste 71 até 80	Amostra 22 (mm)	Amostra 23 (mm)	Amostra 24 (mm)	Teste 81 até 90	Amostra 25 (mm)	Amostra 26 (mm)	Amostra 27 (mm)
Média	3,426	3,742	1,486	Média	1,684	3,923	2,848	Média	0,766	2,577	4,508
Desvio padrão	0,268	0,226	0,093	Desvio padrão	0,186	0,419	0,277	Desvio padrão	0,167	0,145	0,187

Verificando a normatização pertinente brasileira quanto ao deslocamento excessivo em terças as normas NBR 8800 (2008) e NBR 14762 (2010) estabelecem que a deformação vertical limite deverá ser de  $L/180$ , onde  $L$  é o vão do elemento analisado. Com isso, obteve-se uma flecha de 7,33 mm para o estado limite de serviço, sendo acima do maior valor experimental de 4,508 mm isso somente com 3 kg, conforme observado da tabela 3, o que de fato mostra que a estrutura apresenta alta flexibilidade, uma vez que se trata de uma força de baixa intensidade (30 N). Ressalta-se ainda que a medição foi iniciada já com o efeito das cargas telhamento sobre a terça, ou seja, os valores das deformações vieram das cargas pontuais e da longitudinal. Logo, o efeito do momento torçor acrescentou resistência quanto a flexão a terça, delineando uma característica de um tirante pela tração imposta, podendo ter ocorrido pequenas alterações ao decorrer do tempo, seja pela fluência do aço ou perda de sustentação do fio, além disso, acarretando um efeito de compressão nas vigas transversais (AGUIAR, 1999; CASTANHEIRA, 2004; MENDES, 2010; BRANDÃO, 2012; MELO, 2013; SILVA; MOREIRA; VALE, 2014; DUARTE, 2015; SOUZA et al, 2016; ARAÚJO et al, 2017; DEBASTIANI; GARDINI, 2017; CORTEZ et al, 2017; LIMA, 2018).

Já os desvios-padrões obtidos estiveram abaixo de 0,5 e próximos de 0 mostrando um indicio que a dispersão dos dados das amostras em relação a média é mais próxima da homogeneidade. Verificando cada amostra com o percentual do desvio padrão em relação

média é obtido o maior desvio padrão relativo um pouco acima de 20 % referente a amostra 25 com valor de 21,80 % mostrando em um panorama geral que são homogêneas (SILVA, 2011).

Além disso, destacam-se os P-valores que se mostraram dentro da distribuição normal, isto é, com patamares acima do nível de significância tradicionalmente adotado de 5% ou 0,05 o que gera um nível significância característico a normalidade (tabela 4). (LOUREIRO; GAMEIRO, 2011; WASSERSTEIN; LAZAR, 2016; MIOT, 2017)

**Tabela 4** – P-valores dos testes de normalidade para os valores obtidos no presente trabalho.

Amostra	Testes de normalidade				
	Anderson - Darling	Kolmogorov - Smirnov	Shapiro - Wilk	Ryan - Joiner	Papel de probabilidade
	P-Valor	P-Valor	P-Valor	P-Valor	P-Valor
1	0,1969	0,1569	0,1827	0,1603	0,2
2	0,1547	0,1536	0,2708	0,1614	0,15
3	0,4407	0,522	0,5233	0,3116	0,44
4	0,8302	0,7054	0,8238	0,7797	0,83
5	0,2307	0,2302	0,18	0,235	0,23
6	0,4852	0,7212	0,4063	0,4259	0,49
7	0,1112	0,4623	0,0607	0,1366	0,11
8	0,0652	0,0647	0,116	0,1557	0,065
9	0,1032	0,1692	0,1096	0,0703	0,1
10	0,2168	0,1762	0,2681	0,2738	0,22
11	0,1897	0,3211	0,1953	0,258	0,19
12	0,8475	0,7358	0,9286	0,9236	0,85
13	0,6911	0,8754	0,6214	0,7446	0,69
14	0,3136	0,7083	0,2476	0,3848	0,31
15	0,3582	0,6469	0,2521	0,404	0,36
16	0,3638	0,2034	0,418	0,4867	0,36
17	0,1537	0,1301	0,2042	0,2794	0,15
18	0,4851	0,617	0,3828	0,5072	0,49
19	0,8608	0,6371	0,949	0,8761	0,86
20	0,4798	0,427	0,5047	0,4348	0,48
21	0,254	0,384	0,2419	0,3197	0,25
22	0,4102	0,7443	0,3173	0,4654	0,41
23	0,342	0,496	0,3108	0,3585	0,34
24	0,4251	0,2138	0,4045	0,4775	0,43
25	0,1272	0,244	0,1466	0,1977	0,13
26	0,2771	0,6916	0,203	0,1333	0,28
27	0,1639	0,391	0,2168	0,2049	0,16

Logo, por meio desta distribuição de normalidade ocorreu uma convergência dos dados podendo-se trabalhar melhor na média aritmética dos mesmos, observando ainda ocorrência de um padrão na variação dos dados (PAES, 2008; SOUZA, et al, 2018).

### 3.2 Análise numérica: Discretização inicial

Conforme a tabela 5, observa-se que os valores obtidos na discretização inicial foram bem distantes daqueles obtidos na análise experimental, chegando a uma escala em metro, o que difere totalmente das medições experimentais, porém, o comportamento seguiu um padrão de deformação onde ao decorrer da mudança de carregamento e posicionamento alteravam-se as deflexões da terça, portanto, não ficando com valores constante.

**Tabela 5** - Resultados da análise numérica com a discretização inicial.

1 kg											
Posição	1			2				3			
Ponto	A	B	C	Ponto	A	B	C	Ponto	A	B	C
Deflexão (m)	0,49	0,58	0,51	Deflexão (m)	0,46	0,60	0,54	Deflexão (m)	0,43	0,55	0,57
2 kg											
Posição	1			2				3			
Ponto	A	B	C	Ponto	A	B	C	Ponto	A	B	C
Deflexão (m)	0,97	1,15	1,02	Deflexão (m)	0,92	1,19	1,07	Deflexão (m)	0,85	1,10	1,14
3 kg											
Posição	1			2				3			
Ponto	A	B	C	Ponto	A	B	C	Ponto	A	B	C
Deflexão (m)	1,46	1,73	1,52	Deflexão (m)	1,38	1,79	1,6	Deflexão (m)	1,28	1,65	1,71

### 3.3 Análise numérica: Discretização 5

Por outro lado, a modelagem com 5 subdivisões levou há deflexões com valores bem menores ocorrendo uma transição entre uma ordem de grandeza em metro (m) para uma em centímetro (cm), todavia, ainda distante das medições experimentais que estão em sua totalidade em milímetros. O fato é que com apenas uma simples mudança no domínio inicial para um subdomínio com 5 divisões levou há uma maior quantidade de elementos finitos limitados pelos pontos nodais. A divisão das peças constituintes da estrutura metálica em uma malha com mais elementos possibilitou uma melhoria no resultado, entretanto, ainda que fora da ordem de grandeza dos deslocamentos obtidos da análise experimental. Esse conjunto de pontos otimizou a modelagem inicial refinando a malha 1D (vigas, terças) (LOTTI, et al, 2006; ALVES, 2008; NEVES, 2010; BARAZETTI, et al, 2015; NASCIMENTO; SILVA, 2018; RIBEIRO; BATISTA, 2019).

**Tabela 6** - Resultados da análise numérica com a discretização 5

1 kg											
Posição	1			2				3			
Ponto	A	B	C	Ponto	A	B	C	Ponto	A	B	C
Deflexão (cm)	1,97	2,33	2,05	Deflexão (cm)	1,86	2,41	2,16	Deflexão (cm)	1,71	2,22	2,31
2 kg											
Posição	1			2				3			
Ponto	A	B	C	Ponto	A	B	C	Ponto	A	B	C
Deflexão (cm)	3,95	4,67	4,09	Deflexão (cm)	3,71	4,82	4,33	Deflexão (cm)	3,42	4,45	4,61
3 kg											
Posição	1			2				3			
Ponto	A	B	C	Ponto	A	B	C	Ponto	A	B	C
Deflexão (cm)	5,92	7,00	6,14	Deflexão (cm)	5,57	7,24	6,49	Deflexão (cm)	5,11	6,67	6,92

Percebe-se a que a discretização inicial e com 5 divisões ultrapassou o ELS de 7,33 mm.

### 3.4 Análise numérica: Discretização 10

A partir de uma discretização mais refinada com a divisão do domínio inicial por 10 subdomínios houve finalmente a mudança de ordem de grandeza, diminuindo ainda mais a diferença entre os valores obtidos na análise numérica em relação a experimental, agora em milímetros, conforme observado na tabela 7. Entretanto, na maioria dos casos os valores ficaram acima do estado limite de serviço preconizado pelas normas pertinentes NBR 8800 e NBR 14762 o que na análise experimental não ocorreu. Todavia, a diferença percentual entre valores da análise numérica em relação a experimental ainda é significativa, sendo a menor diferença de 74,91 %, obtida para a massa de 3 kg na posição 3 no ponto C.

**Tabela 7** - Resultados da análise numérica com a discretização 10

1 kg											
Posição	1			2			3				
Ponto	A	B	C	Ponto	A	B	C	Ponto	A	B	C
Deflexão (mm)	5,14	6,08	5,24	Deflexão (mm)	4,79	6,29	5,59	Deflexão (mm)	4,39	5,77	5,99
2 kg											
Posição	1			2			3				
Ponto	A	B	C	Ponto	A	B	C	Ponto	A	B	C
Deflexão (mm)	10,27	12,16	10,47	Deflexão (mm)	9,57	12,58	11,17	Deflexão (mm)	8,77	11,53	11,98
3 kg											
Posição	1			2			3				
Ponto	A	B	C	Ponto	A	B	C	Ponto	A	B	C
Deflexão (mm)	15,41	18,25	15,70	Deflexão (mm)	14,36	18,88	16,76	Deflexão (mm)	13,16	17,3	17,97

### 3.5 Análise numérica: Discretização 25

Finalmente com a utilização de 25 divisões em cada elemento inicial houve uma convergência com os valores experimentais onde a malha resultante da discretização do domínio inicial apresentou resultados em termos de deslocamento que se equiparou as deflexões em escala e valores daqueles obtidos na análise experimental (tabela 8).

**Tabela 8** - Resultados em mm da análise numérica com a discretização 25

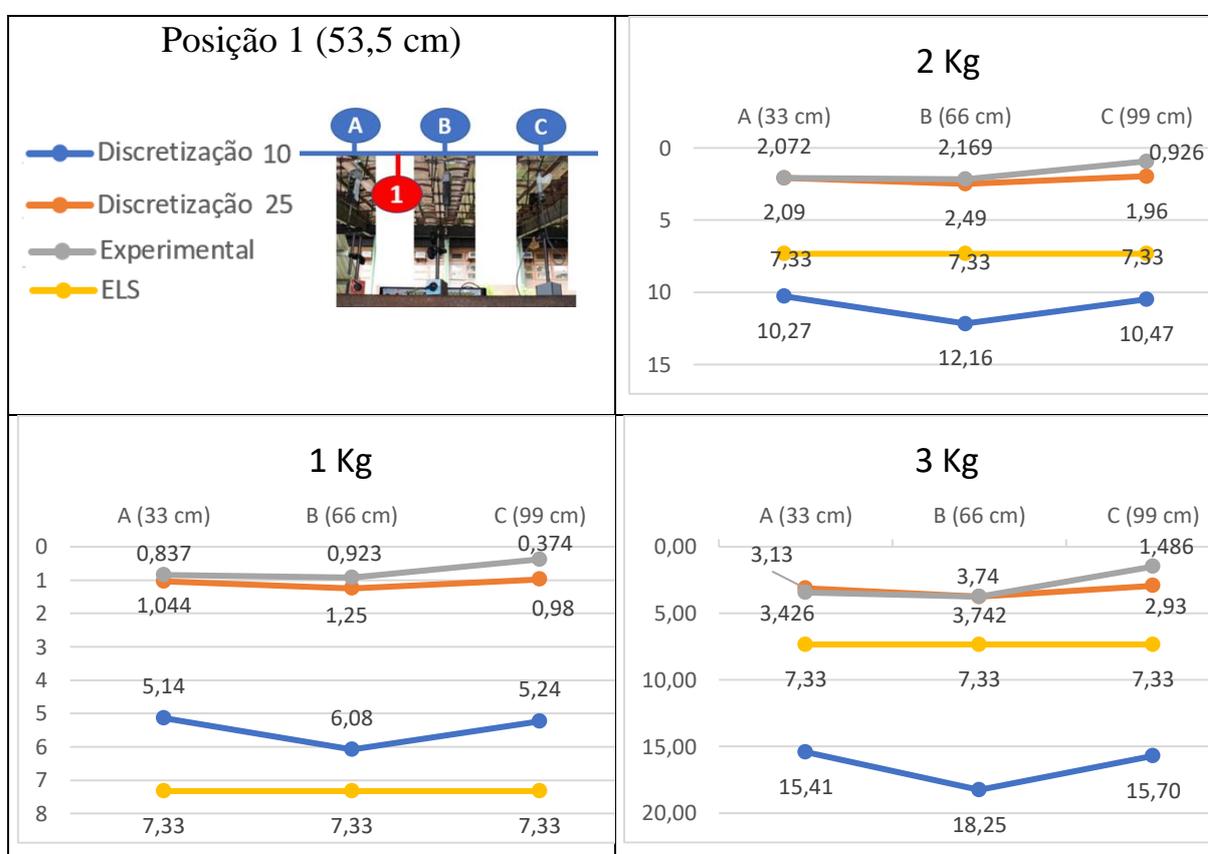
1 kg											
Posição	1			2			3				
Ponto	A	B	C	Ponto	A	B	C	Ponto	A	B	C
Deflexão (mm)	1,04	1,25	0,98	Deflexão (mm)	0,928	1,30	1,10	Deflexão (mm)	0,82	1,15	1,20
2 kg											
Posição	1			2			3				
Ponto	A	B	C	Ponto	A	B	C	Ponto	A	B	C
Deflexão (mm)	2,09	2,49	1,96	Deflexão (mm)	1,85	2,60	2,19	Deflexão (mm)	1,64	2,30	2,40
3 kg											
Posição	1			2			3				
Ponto	A	B	C	Ponto	A	B	C	Ponto	A	B	C
Deflexão (mm)	3,13	3,74	2,93	Deflexão (mm)	2,78	3,9	3,28	Deflexão (mm)	2,46	3,45	3,60

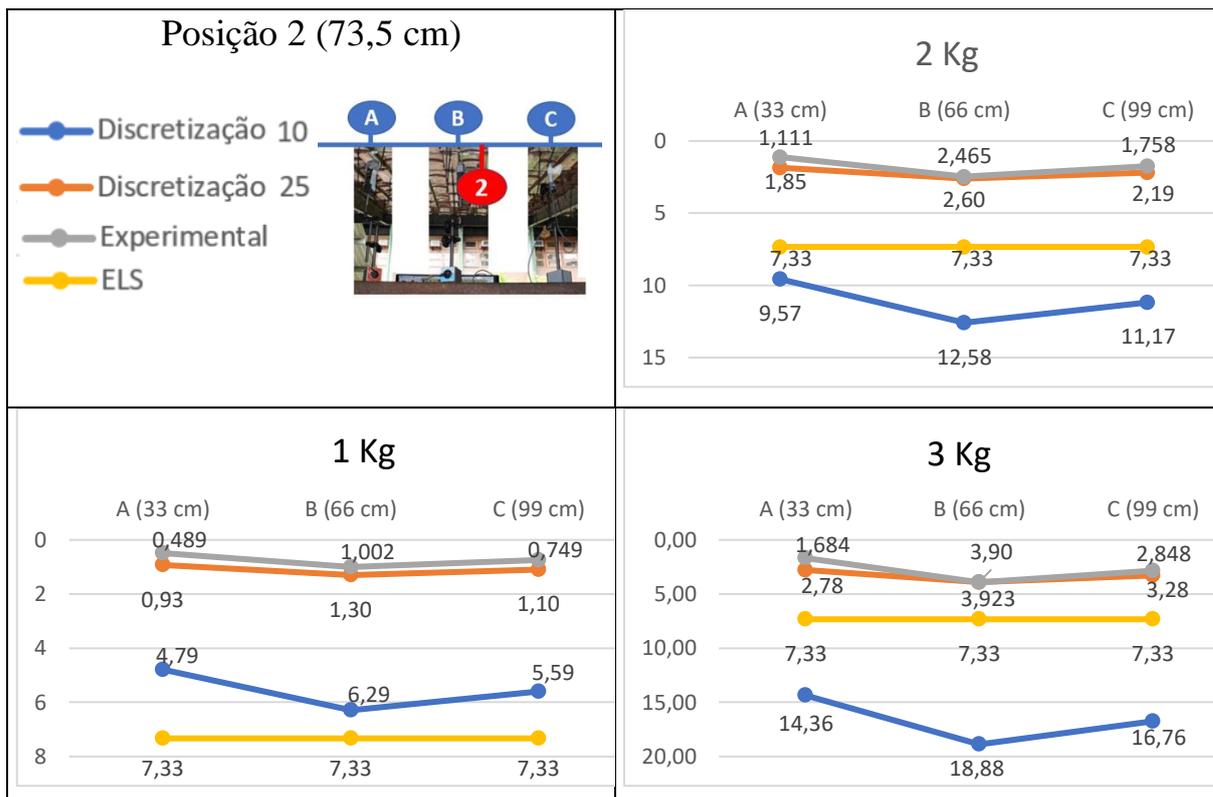
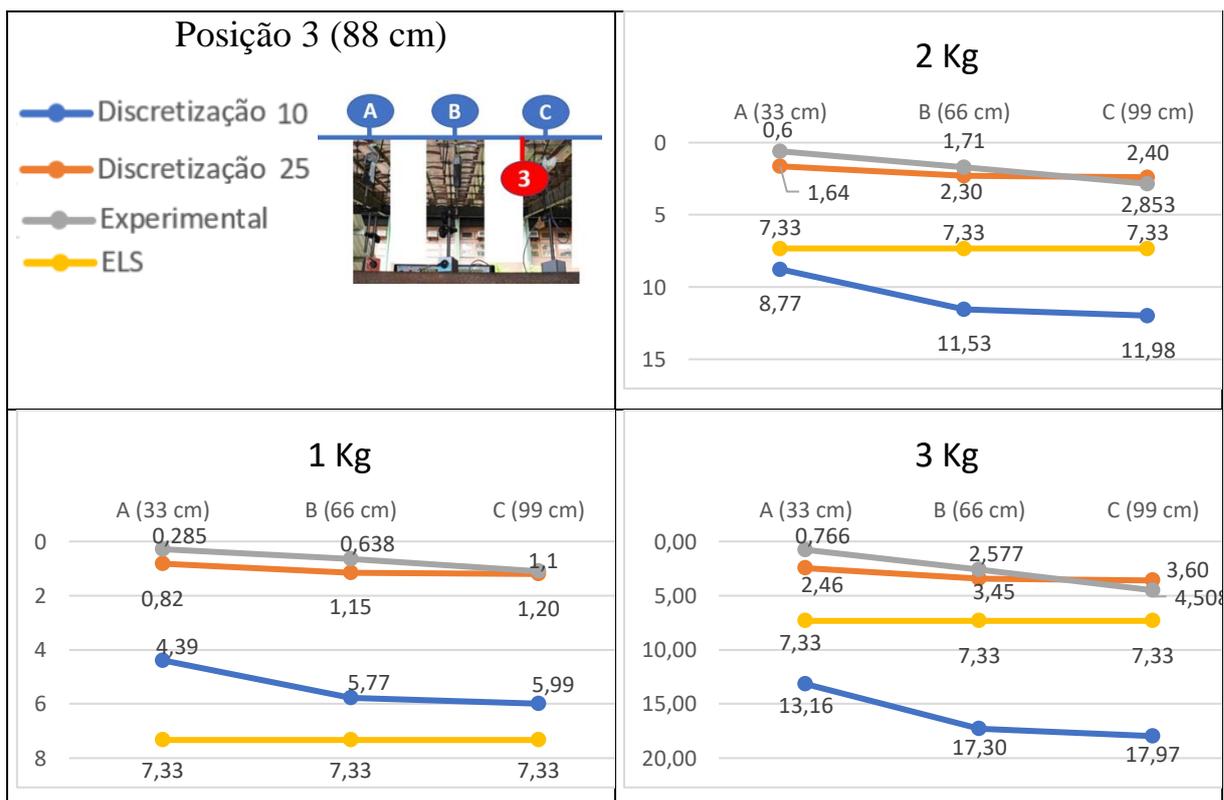
Deve-se enfatizar que o trecho do vão central na terça mediana nessa modelagem alcançou 175 divisões, ou seja, 175 subdomínios sendo esta a região onde houve o maior refinamento da malha inicial de discretização.

### 3.6 Avaliação comparativa

Os resultados mostraram que o refinamento na discretização por MEF possibilitou que estes pudessem convergir para valores mais próximos daqueles experimentais. Fazendo-se uma comparação de valores através de gráficos, excluindo as discretizações inicial e 5, as quais apresentaram valores com ordem de grandeza muito superior, é possível verificar nos gráficos do Quadro 2 a 4 que a medida em que há o refinamento da malha com o número maior de elementos finitos os deslocamentos nos nós A, B e C obtidos na análise computacional converge para aqueles observados na análise experimental, com destaque para o ponto central B, o qual apresentou as menores diferenças para todas as posições de aplicação da massa.

**Quadro 2** – Resultados em mm do carregamento de 1kg, 2kg e 3 kg na posição 1

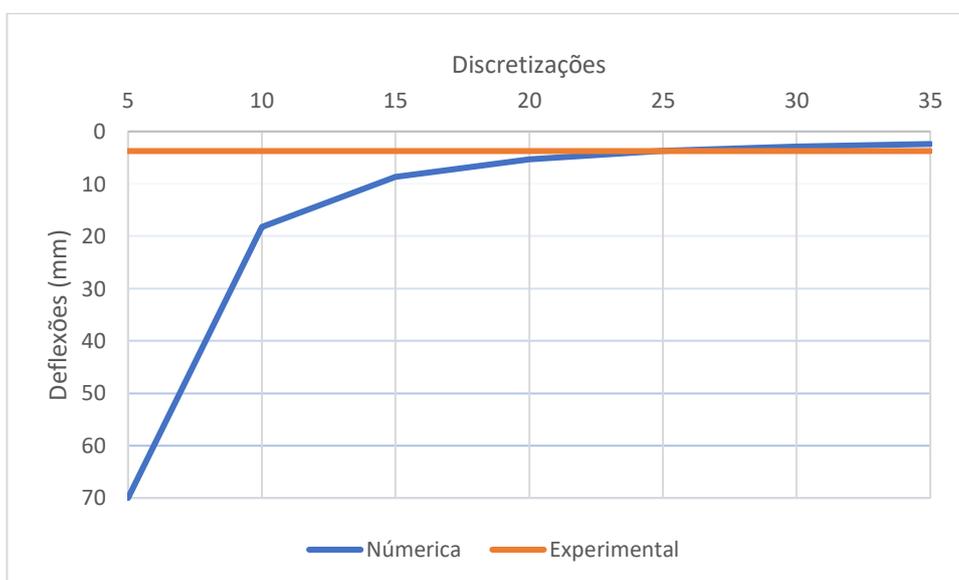


**Quadro 3** - Resultados em mm do carregamento de 1kg, 2kg e 3 kg na posição 2**Quadro 4** - Resultados em mm do carregamento de 1kg, 2kg e 3 kg na posição 3

É possível observar no quadro 4 com maior clareza como a terça se deformou através da mudança de localização do carregamento, ficando em maior evidencia pela linha experimental na qual a posição de 88 cm da massa ficou próxima do ponto de leitura C de 99 cm, diminuindo a deformação nos demais pontos de leitura de dados.

### 3.7 Análise de convergência numérica

Para esta análise foi utilizada uma curva de convergência representando a variação do deslocamento vertical com relação as discretizações (FILHO; PROENÇA; PASCHOALINI, 2014; GARCIA et al, 2016; NETO; ARACAYO, 2018). As divisões englobaram além das discretizações 5,10 e 25 também as discretizações 15, 20, 30 e 35 norteando otimizar a análise para uma melhor configuração da curva. Foi estabelecido para esse estudo o ponto B, posição 1 de carregamento e peso de 3 kg que foi a configuração de ponto de observação, posição e localização de carregamento que ocorreu a melhor convergência entre análise experimental. (figura 6).



**Figura 6** - Curva de convergência.

Verificando a análise numérica pelo SAP2000 nota-se que o resultado numérico tende a convergir para o resultado experimental. Ao decorrer que se refina a malha de elementos finitos há uma significativa proximidade entre os resultados sendo na discretização 25 a convergência das análises.

### Conclusões

Os valores obtidos da análise experimental apresentaram uma padronização dos dados seguindo uma distribuição normal com a obtenção de P-valores acima de 0,05 pelos testes de normalidade e homogeneidade através dos desvios padrões. Diante deste contexto pode-se trabalhar com maior confiabilidade as médias aritméticas para convergência dos dados.

A abordagem de elementos finitos (MEF) mostrou por meio da análise numérica realizada pelo SAP2000, quanto ao comportamento estático em termos de deslocamentos, que pela discretização com malha de 25 divisões as deformações encontradas ficaram próximas aos resultados experimentais, enquanto que para as discretizações inicial, 5 e 10 os valores foram bem superiores aos valores experimentais. Na análise numérica através da curva de convergência nota-se a tendência de uma melhor configuração entre a discretização 25 e a experimental, ressaltando ainda a convergência entre os dados numéricos através das discretizações 15, 20, 30 e 35. Isso de fato mostra a importância de uma discretização adequada e do próprio MEF na modelagem da estrutura, destacando-se esse método de grande valia para a obtenção de resultados que tenham convergência com aqueles apresentados na estrutura real.

Com relação a análise experimental foi obtido deflexões entre 0,285 mm e 4,508 mm o que mostra a flexibilidade da estrutura, uma vez que com apenas 3 kg foi possível chegar próximo do ELS da estrutura. Esse ponto merece ênfase porque é possível notar que se não fosse uma cobertura leve como das telhas PET a estrutura não seria capaz de comportar telhas de fibrocimento ou até mesmo de cerâmica, as quais possuem massa específica bem superior, logo, ultrapassando facilmente o ELS. Por isso a importância do tensionamento para criar resistência flexão e manter a estrutura com maior rigidez.

Portanto, o fio de aço CA 60 de 4,2 mm como é flexível, torna toda trama na qual está inserida a cobertura a esse mesmo comportamento, entretanto, com certa rigidez através do pré-tensionamento. Mostra-se então um desempenho peculiar da estrutura com o seu caráter alternativo não só pelos materiais não usuais utilizados, mas pelo seu comportamento similar a uma tensoestrutura. Mesmo o fato de se ter um modelo alternativo de construção envolvendo materiais não convencionais não impossibilitou de se observar semelhanças com outros modelos estruturais, denotando a flexibilidade do sistema estrutural com a obtenção de deflexões mesmo com ação da força longitudinal.

## **Referências**

AGUIAR, Elizabeth Oshima. **Contribuição ao estudo de estruturas de cabos para coberturas de grandes áreas livres, considerando as não linearidades física e geométrica**. 1999. Tese de Doutorado, Universidade de Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 1999.

AIMI, Tainara. **Subsídios para projeto de estruturas de aço protendidas**. 2015. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias), Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2015.

ALMEIDA, Igor Santos et al. Reciclagem de garrafas PET para fabricação de telhas. **Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT**, v. 1, n. 3, p. 83-90, 2013.

ALVES, João Augusto Moreira. **Determinação de armaduras em elementos laminares (paredes) carregadas no seu próprio plano**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto 2008.

ARAÚJO, Daniel Lima et al. Strength evaluation of concrete corbels cast in a different stage from the column. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 10, n. 2, p. 509-546, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio**. NBR 14762, Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Projeto de Estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**, NBR 8800, Rio de Janeiro, 2008

BARAZETTI, L, et al. BIM from laser clouds and finite element analysis: Combining structural analysis and geometric complexity, **Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.**, XL-5/W4, 345-350, <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W4-345-2015>, 2015.

BRANDÃO, A. L. R. **Calibração do coeficiente de ponderação da resistência em barras e ligações de perfis formados a frio**. Tese de Doutorado, 2012. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto: 2012.

CASTANHEIRA, A. M. **Avaliação da confiabilidade de vigas metálicas dimensionadas pela NBR 8800**. 2004. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil). Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2004

CORTEZ, Lucas Azevedo da Rocha et al. Uso das estruturas de aço no Brasil. **Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT-ALAGOAS**, v. 4, n. 2, p. 217, 2017.

CSI - COMPUTERS & STRUCTURES INC. Introductory Tutorial for SAP2000. Berkeley, CSI. p. 62, 2011.

CSI - COMPUTERS & STRUCTURES INC. SAP2000 Watch and Learn. Disponível: <<https://www.csiamerica.com/products/sap2000/watch-and-learn> > Acesso em 26 de novembro de 2018

DEBASTIANI, Rodrigo; GARDINI, Luiz Fernando. Projeto de Edificação em Estrutura Metálica destinada a Estacionamento Vertical Automatizado. **Ignis: Periódico Científico de Arquitetura e Urbanismo, Engenharias e Tecnologia da Informação**, v. 6, n. 1, p. 88-107, 2017.

DUARTE, Luis Miguel Capela. **Análise comparativa de estruturas em madeira com tirantes e estruturas metálicas**. 2015. Dissertação (Mestrado em engenharia civil). Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2015

FERREIRA, Edsandra Magalhães. **Gestão da Qualidade na reciclagem de PET para transformação em cobertura ecológica em indústria na cidade de Manaus-AM**. 2009.

Dissertação de Mestrado. Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2009.

FERREIRA, Juliana Carvalho; PATINO, Cecilia Maria. O que realmente significa o valor-p?. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, v. 41, n. 5, p. 485-485, 2015.

FERRONI JUNIOR, José Geraldo. **Considerações sobre a análise de segunda ordem de estais utilizados em torres metálicas e flares**. 2015. Trabalho de Graduação em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

FILHO, F. H, PROENÇA, M. S, PASCHOALINI, A. T, **Estudo da convergência de malha no estado plano de tensões utilizando o elemento finito isoparamétrico quadrilateral de quatro nós**. XXVIII Congresso de Iniciação Científica da UNESP. 2014. Brasil

GARCIA, Pedro Henrique et al. Determinação da resistência característica à compressão de agregados leves em concretos de agregados leves usando simulações de elementos finitos. **Mecânica Computacional**, v. 34, n. 49, p. 3309, 2016.

GÓES, Lourival Paula de et al. **Estudo do Comportamento Estático de Estrutura Metálica Tracionada para Cobertura com Telhas Plásticas de Pet**. 2015. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2015.

IOANNIDIS, John PA. The proposal to lower p value thresholds to. 005. **Jama**, v. 319, n. 14, p. 1429-1430, 2018.

KALA, Zdeněk; VALEŠ, Jan; JÖNSSON, Jeppe. Random fields of initial out of straightness leading to column buckling. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 23, n. 7, p. 902-913, 2017.

KYOWA. **DTH-A Displacement Transducer**. Disponível em: < <http://www.kyowa-ei.com/eng/product/category/sensors/dth-a/index.html> > Acesso em: 26 de novembro de 2018

LIMA, Miguel Ângelo Araújo. **Implementação numérica do modelo de bielas e tirantes via MEF: aplicação em blocos de fundação, consolos curtos, vigas-parede e sapatas rígidas**. 2018. Dissertação (Mestrado de Engenharia Civil). Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2018.

LOPES, Manuela de Mesquita; BRANCO, Verônica Teixeira Franco Castelo; SOARES, Jorge Barbosa. Utilização dos testes estatísticos de Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk para verificação da normalidade para materiais de pavimentação. **Transportes**, v. 21, n. 1, p. 59-66, 2013.

LOUREIRO, Luís Manuel de Jesus; GAMEIRO, Manuel Gonçalves Henriques. Interpretação crítica dos resultados estatísticos: para lá da significância estatística. **Revista de Enfermagem Referência**, n. 3, p. 151-162, 2011.

LOTTI, Raquel S. et al. Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos. **Revista Dental Press de ortodontia e ortopedia facial**, v. 11, n. 2, p. 35-43, 2006.

LYNX. **ADS2002**. Disponível em: <[http://wwwlynxtec.com.br/prod\\_ads200.htm](http://wwwlynxtec.com.br/prod_ads200.htm) > Acesso em: 26 de novembro de 2018

MEIRELLES, Célia Regina Moretti; KISHI, Sunao. Grandes Coberturas na Arquitetura Contemporânea: Estudos de Caso do Sony Center e do Mercado de Santa Caterina. **Cadernos de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo**, v. 13, n. 2, p. 19, 2014.

MELO, P.R. **Pré-dimensionamento de estruturas de madeira, de aço e de concreto para auxílio à concepção de projetos arquitetônicos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

MENDES, Fernando Borges. **O uso de ferramenta computacional na avaliação e dimensionamento de cortina atirantada**. 2010. Dissertação (mestrado em geotecnia), Escola de Minas NUGEO, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

MIOT, Hélio Amante. Avaliação da normalidade dos dados em estudos clínicos e experimentais. **Jornal Vascular Brasileiro**, v. 16, n. 2, p. 88, 2017.

MITUTOYO. **ABSOLUTE Digimatic Indicator ID-U Series 575-with Slim and Simple Design**. Disponível em: <<https://ecatalog.mitutoyo.com/ABSOLUTE-Digimatic-Indicator-ID-U-Series-575-with-Slim-and-Simple-Design-C1203.aspx>> Acesso em: 26 de novembro de 2018

NASCIMENTO, Anne Caroline de Paula; SILVA, Agnaldo Antônio Moreira Teodoro. Aplicação do método dos elementos finitos para estudo de problemas de interação fluido estrutura em engenharia civil. **RECIEC-Revista Científica de Engenharia Civil**, v. 1, n. 02, p. 49-62, 2018.

NETO, W; ARACAYO, L. A. S. Estudo da Convergência de Malha Hexaédrica. Estudo de Caso: Estrutura de contraforte D38 - Usina hidrelétrica de Itaipu (UHI). **The Academic Society Journal**, p. 224-231, 2018.

NEVES, Luís. **Comparação de modelos de grelha e de elementos finitos de laje na modelação de estruturas de edifícios de betão armado**. 2010. Dissertação (Mestre em engenharia militar). Academia Militar; Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2010.

OBATA, Sasquia Hizuru; EGÍDIO, Carlos Alonso. Mobilidade das arquiteturas têxteis e tensoestruturas. **Exacta**, v. 9, n. 1, 2011.

ÖZTUNA, Derya; ELHAN, Atilla Halil; TÜCCAR, Ersöz. Investigation of four different normality tests in terms of type 1 error rate and power under different distributions. **Turkish Journal of Medical Sciences**, v. 36, n. 3, p. 171-176, 2006.

PAES, Ângela Tavares. Por dentro da estatística. **Einstein: Educ. Contin. Saúde**, v. 7, p. 3-4, 2009.

PORTAL ACTION. **Testes de Normalidade**. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/manual-estatistica-basica/testes-de-normalidade>> Acesso em 26 de novembro de 2018

RAZALI, Nornadiah Mohd; WAH, Yap Bee. Power Comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling Tests. **Journal of Statistical Modeling and Analytics Vol**, v. 2, n. 1, p. 21-33, 2011.

RIBEIRO, Simone Pimentel; BATISTA, Tauana de Oliveira. Modelagem computacional de perfil metálico tipo U enrijecido via MEF (Método dos Elementos Finitos). **Anais do Seminário Científico da FACIG**, n. 4, 2019.

RIMOLI, Julian J. A reduced-order model for the dynamic and post-buckling behavior of tensegrity structures. **Mechanics of Materials**, v. 116, p. 146-157, 2018.

SANTO, Laisa et al. Casa experimental–Cobertura. **Anais do EVINCI-UniBrasil**, v. 2, n. 1, p. 237-237, 2016.

SILVA, Anderson Rodrigo da et al. Avaliação do coeficiente de variação experimental para caracteres de frutos de pimenteiras. **Revista Ceres**, v. 58, n. 2, p. 168-171, 2011.

SILVA, Ricardo José Carvalho; MOREIRA, José Fabiano Araújo; VALE, Rodrigo Farias. Análise do modelo de bielas e tirantes para vigas de concreto armado com furo. **Essential-Revista de Cultura, Ciência e Tecnologia da UVA**, v. 15, n. 2, 2014.

SOUZA, Robert Schiaveto et al. Avaliação do Coeficiente de Retorno Esgoto/Água numa Rede de Esgoto Sanitário. **ARGAMASSA-Revista das Engenharias, Arquitetura e Urbanismo, Geografia, Gestão, Decisão e Memória**, n. 001, p. 6-14, 2018.

SOUZA, Victor Barbosa et al. Análise de Falha da Estrutura Metálica do Centro Poliesportivo da Cidade de Barão do Monte Alto-MG. **REINPEC-Revista Interdisciplinar Pensamento Científico**, v. 2, n. 2, 2016.

TESKE, S.; GONÇALVES, P. F. A.; NAGALLI, A. Desenvolvimento de modelo conceitual de telha ecológica a partir de resíduos de PET e gesso da construção. **Cerâmica**, v. 61, n. 358, p. 190-198, 2015.

VIEIRA, Rodrigo Cuberos. **Estudo comparativo entre terças de aço, convencionais em vigas, em treliças planas e em treliças multiplanares**. 2009. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

WANG, Binbing. **Free-standing tension structures: from tensegrity systems to cable-strut systems**. CRC Press, 2014.

WASSERSTEIN, Ronald L.; LAZAR, Nicole A. The ASA's Statement on p-Values: Context, Process, and Purpose. **The American Statistician**, v. 70, n. 2, p. 129-133, 2016.

XU, Xian et al. Topology Optimization of Tensegrity Structures Considering Buckling Constraints. **Journal of Structural Engineering**, v. 144, n. 10, p. 04018173, 2018.

#### **4. Análise de parâmetros modais em estrutura metálica tensionada com cobertura de telhas plásticas de PET**

Samuel Antão Ferreira do Nascimento <sup>1\*</sup>, Raimundo Pereira de Vasconcelos <sup>2</sup>,  
Universidade Federal do Amazonas, Faculdade de tecnologia, programa de Pós-graduação em  
Engenharia Civil (PPGEC) <sup>(1)(2)</sup>, Av. General Rodrigo Octavio Jordão Ramos, 1200, 69067-005,  
Coroado I, Manaus, AM.  
antaoleumas@gmail.com\*

**Resumo:** A pesquisa apresentada neste artigo procurou determinar os parâmetros modais de uma estrutura metálica de cobertura com telhas plásticas de PET e terças formadas por fios de aço pré-tensionados, através de vibração livre. Foram realizadas uma análise numérica com modelagem através do programa SAP2000 e uma análise experimental onde os parâmetros obtidos foram comparados. Os resultados mostram que os parâmetros obtidos pela análise numérica, em termos de frequências e modos naturais de vibração à flexão, apresentam valores muito próximos àqueles obtidos pela análise experimental, demonstrando que o modelo numérico descreve de forma correta o comportamento dinâmico da estrutura em vibração livre. Além disso, a taxa de amortecimento para estrutura analisada, de aproximadamente 1%, obtida na análise experimental mostra que a estrutura é muito flexível e sensível aos efeitos dinâmicos de vibração.

**Palavras-chave:** análise modal, vibração livre, estrutura metálica, PET, telhas

**Abstract:** The research presented in this article sought to determine the modal parameters of a metallic covering structure with plastic PET tiles and terranes formed by pretensioned steel wires through free vibration. A numerical analysis was carried out with modeling through the SAP2000 program and an experimental analysis where the obtained parameters were compared. The results show that the parameters obtained by the numerical analysis, in terms of frequencies and natural modes of vibration to the flexion, present values very close to those obtained by the experimental analysis, demonstrating that the numerical model correctly describes the dynamic behavior of the structure in free vibration. In addition, the damping rate for analyzed structure, of approximately 1%, obtained in the experimental analysis shows that the structure is very flexible and sensitive to the dynamic effects of vibration.

**Keywords:** modal analysis, free vibration, metallic structure, PET, tiles

## 1. INTRODUÇÃO

O estudo de vibrações na engenharia civil se apresenta de suma importância diante da realidade contemporânea, visto que, problemas relacionados a ações vibratórias se fazem presente em diversas edificações (RIBEIRO, 2018), tanto pela ação humana (LIPENER, 2018), quanto pela ação da própria natureza como nos abalos sísmicos (CRUZ; MIRANDA, 2018) e ventos (GÓMEZ; GEURTS; METRIKINE, 2018). Avanços recentes geraram estruturas com resistência mais elevada, maior leveza, aumento na flexibilidade e menores seções (RIBEIRO, 2018), entretanto, com uma maior suscetibilidade ao fenômeno de vibração (ROSSATO; MIGUEL, 2017).

É possível ainda observar o padrão sobressalente de inovações em técnicas construtivas com a utilização de materiais reciclados (NGUGI; KALULI; ABIERO-GARIY, 2017) e aplicação de materiais compósitos (ALVES et al, 2015; FARIAS; GUILHON; SANTOS, 2016). Delineando a respeito especificadamente nas coberturas nota-se diversas opções de novos materiais para fabricação de telhas (OLIVEIRA, 2017; GAGGINO et al, 2018) objetivando um menor impacto ambiental quando comparado com materiais já consagrados no mercado (SCHELB, 2016).

Porém, o argumento de economia e de melhores propriedades esbarram no problema de vibrações excessivas devido a aspectos como a geometria e o próprio material constituinte promoverem estruturas com menores taxas de amortecimento (HOLANDA et al, 2018).

No caso específico das estruturas metálicas isso não se mostra diferente (PEREIRA; NEVES, 2006), o avanço tecnológico e o aumento relevante de pesquisas levaram ao melhoramento do aço, sendo adotados perfis metálicos com menor peso e delineando assim um relevante valor atrativo, oferecendo um melhoramento no aspecto da economicidade. Em contrapartida a esbeltez e a leveza constituída pelos perfis com menor dimensão que geram vantagens, ocasionam também desvantagens com relação aos fenômenos dinâmicos, aumentando a vulnerabilidade pela ação dos ventos e podendo assim deflagrar efeitos maiores que os previstos na análise estática realizada durante o dimensionamento (PINHO; MORARES, 2014).

Diante disso, no projeto de estruturas, deve-se levar em conta a determinação das deformações, dos deslocamentos e das tensões internas dadas as suas características geométricas, materiais, físicas e sobretudo observar atentamente as ações que são impostas sobre a estrutura com suas reações de apoio, delimitando assim esses fatores para o devido dimensionamento (MARTHA, 2017). Porém, no Brasil as estruturas em sua maioria são

dimensionadas observando apenas o aspecto estático deixando de lado a variação de amplitude ocasionada por vibrações que é orientada pela análise dinâmica. (BEREZOSKI; PENNER; MOREIRA, 2017).

### 1.1 Descrição da estrutura

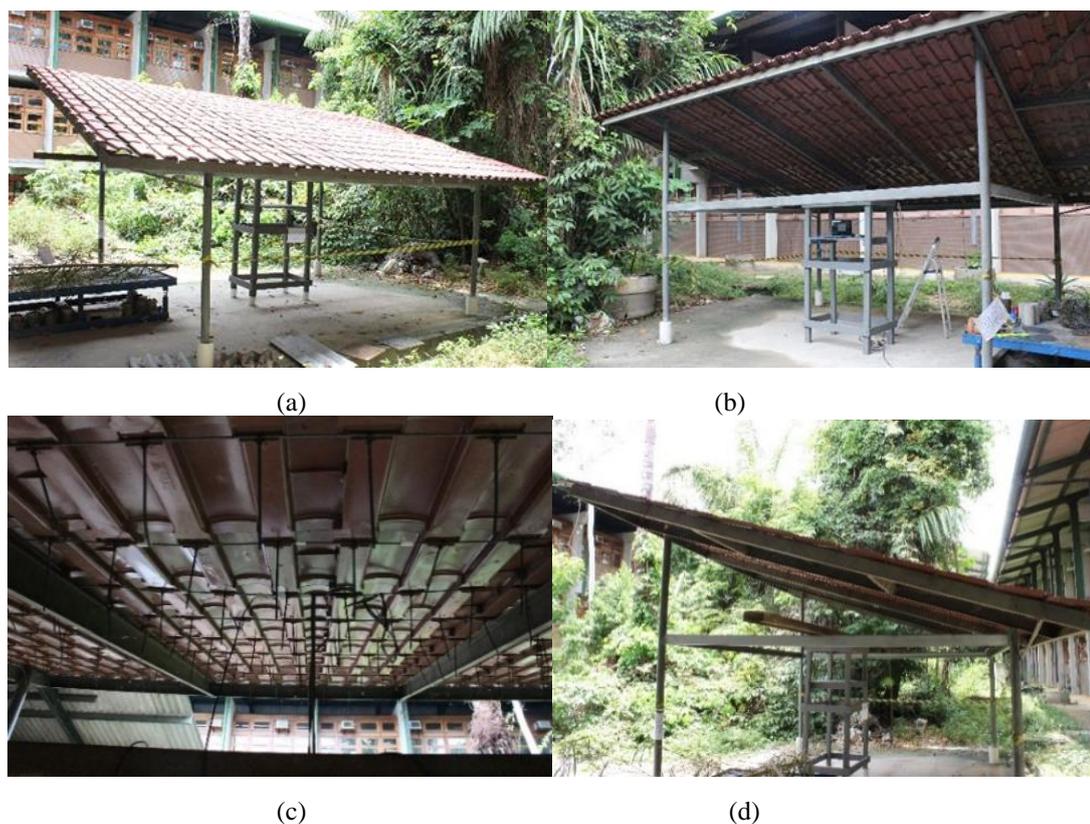
A estrutura em análise foi idealizada por GÓES (2015) sendo um sistema estrutural composto por uma cobertura com telhas plásticas de PET se apresentando como modelo experimental (protótipo).

Caracteriza-se por ter bastante flexibilidade o que denota grandes deformações, apresentando-se de forma semelhante as estruturas “tensegrity” (GÓES, 2015) as quais trabalham de forma integrada entre elementos rígidos e flexíveis. Estes elementos utilizam-se de forças conjuntas de compressão e tração ao mesmo tempo, sendo auto tensionados (SILVA; FARBIARZ, 2016). Podendo-se definir como uma tecnologia alternativa, devido há envolver em sua integridade materiais alternativos e um sistema construtivo alternativo (FREIRE; BERALDO, 2003).

Este sistema estrutural alternativo pode ser dividido em dois subsistemas. O primeiro constituído pela estrutura metálica em si envolvendo estrutura de apoio, com perfis de aço e com a devida característica alternativa utilizando terças com fios de aço de 4,2 mm ao invés de cabos (GÓES,2015). Onde estes fios de aço tiveram um “pré-alongamento”, sendo tracionados com o emprego de forças axiais de valor 1,85 kN. Esse comportamento singular das terças se mostra como um tirante e além disso, pelo fato de ser um fio de aço, seu comportamento mecânico apresenta desprezível resistência a flexão (SÁLES, et al, 2015).

O segundo subsistema é advindo do telhamento (GÓES,2015), já não é ligado a estrutura metálica em si, mas é integrado pelas Telhas plásticas de PET que são materiais alternativos que substituem as telhas de amianto nocivas à saúde (HENRIQUES, et al 2015; BRUM, 2016). Estas telhas de plástico de Polietileno Tereftalato (PET) para cobertura são produzidas pelo processo de reciclagem na qual transforma os materiais das garrafas PET já utilizadas em novos produtos levando o material a retroceder à cadeia produtiva e favorecendo assim o meio ambiente (ALMEIDA et al, 2013).

Esta cobertura em análise é mostrada na figura 1, onde pode ser vista em perspectiva frontal na figura 1.a, em perspectiva posterior na figura 1.b, internamente com os detalhes dos fios de aço constituintes e das telhas na figura 1.c e em vista lateral na figura 1.d, caracterizando-se como uma cobertura ecológica pelo fato de se ter telhas plásticas integradas, se apresentando bastante leves quando comparadas com as telhas tradicionais de cerâmica (FERREIRA, 2009).



**Figura 1.** Estrutura metálica com cobertura de telhas PET da pesquisa; (a) Vista frontal; (b) Vista posterior; (c) Vista inferior e (d) Vista lateral.

## 1.2 Análise modal

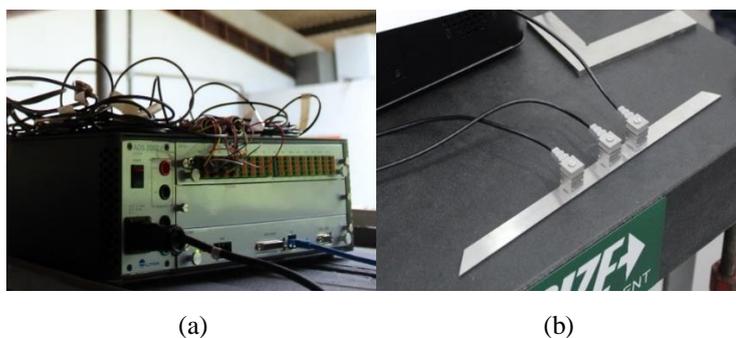
Diante desse contexto se fez necessário uma investigação quanto as especificidades da estrutura, principalmente em relação a característica dinâmica por meio da análise modal (BRANDÃO, et al, 2018). Esta análise conceitua-se por trabalhar tanto no aspecto teórico como experimental de maneira a construir um modelo matemático que caracterize o comportamento dinâmico da estrutura em análise (NÓBREGA; HANAI, 2005) por meio da identificação dos parâmetros modais, tais como as frequências naturais, modos de vibração e taxas de amortecimento (STUTZ; TENENBAUM; CORREA, 2015). Esses parâmetros são função da massa, amortecimento e rigidez da estrutura, cujas características singulares podem levar a uma avaliação e detecção de possíveis danos estruturais (PARK; OH, 2018). Além disso, pode-se averiguar o efeito dinâmico no decorrer do tempo com devido monitoramento para uma satisfatória avaliação quanto a integridade da estrutura. (I.C.S.S RANGEL; L.S. RANGEL; STUTZ, 2016).

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foi adotada uma metodologia envolvendo uma análise experimental e uma análise numérica com intuito de se fazer as comparações entre as frequências naturais, tratando-se de uma abordagem muito utilizada em diversas pesquisas para monitoramento de vibrações em obras civis como em lajes (ALLAHYARI et al, 2018), passarelas (VEGA; ROITMAN; NAGLUTA, 2017; SILVA; DEBONA, 2017), estádios (CAETANO; CUNHA; MAGALHÃES, 2010), estruturas metálicas (CASTELLARO et al, 2016) dentre outras construções. Além disso, foi utilizada uma abordagem analítica de modo a dar um embasamento teórico necessário tanto para o entendimento do ensaio de vibração quanto para inserção de dados na análise numérica. (SARDINHA; VELOSO; AMADOR, 2006; BRANDÃO et al, 2016).

### 2.1 Análise experimental

Foi utilizado um sistema aquisição de dados modelo ADS2002 da empresa LYNX (figura 2.a) sendo empregados os *softwares* AqDados e AqAnalysis. Além disso, para medição de vibração foi utilizado três acelerômetros modelo piezométricos (figura 2.b)

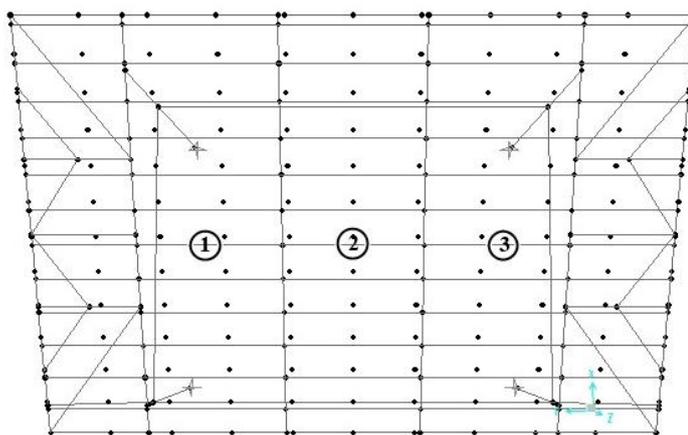


**Figura 2.** Sistema de Aquisição de dados; (a) Aquisitor de dados e (b) Acelerômetros

O processamento de dados foi realizado por meio da transformada rápida de Fourier, resultando no espectro de Fourier, do qual foram obtidas as frequências naturais pelo sinal em análise da estrutura (ALEXANDRE, 2018; AOYAMA, et al, 2018; BRANDÃO, et al, 2018). Com o espectro de Fourier verifica-se a proporção das frequências geradas pela captação do sinal analógico dos acelerômetros. A vibração incitada no ensaio dinâmico leva a caracterização da série de pontos das frequências pelo sistema de aquisição de dados (MARTINS, et al, 2016). Já a taxa de amortecimento foi obtida através do método de decremento logarítmico que representa a taxa na qual a amplitude de uma vibração amortecida livre decresce exponencialmente (CORREIA, 2017). É adquirida através da razão de duas amplitudes

subsequentes relacionando assim a diferença de deslocamentos em períodos distintos (SILVA, 2017).

Dentro desse contexto a priori o método experimental iniciou com abordagem quanto aos pontos os quais deveriam ficar os três acelerômetros na estrutura para o ensaio de vibração livre. Foi adotado a terça central da cobertura para análise tendo em vista uma observância quanto a flexão da mesma no eixo vertical. Além disso, os pontos onde ficaram os acelerômetros eram equidistantes enumerados nas partes centrais dos vãos do fio de aço conforme figura 3 que mostra uma vista superior da estrutura.



**Figura 3.** Pontos enumerados e marcados dos acelerômetros na estrutura.

A escolha desses pontos objetivou uma visão global do comportamento dinâmico da estrutura, além de uma melhor descrição dos parâmetros particulares da mesma, sendo bastante singular em cada pesquisa, seja pela geometria (DEBONA; SOUZA JUNIOR; SILVA, 2017; CAO; LIU; CHEN, 2018), material e modo em que vai ser realizado o ensaio (GARCIA et al, 2018).

O ensaio de vibração livre ocorreu pela aplicação de uma força impulsiva através de uma massa de 4 kg pendurada próximo ao acelerômetro 2. Esta massa ficou suspensa a aproximadamente 60 cm do chão e amarrada por um fitilho de plástico em forma de uma alça. Em seguida houve o corte de uma dessas alças do fitilho na região mediana do mesmo e a massa subitamente despencou induzindo uma vibração livre na estrutura. Este ensaio se baseou em ensaios da mesma natureza, mas em pontes e passarelas onde se utilizam desta mesma metodologia, mudando apenas a proporção da massa e dando lugar a cabo de aço para carregar massas mais avantajadas (MAGALHÃES et al, 2010; CAETANO; CUNHA; MAGALHÃES, 2010). Ocorreu assim uma medição simultânea dos acelerômetros nos três pontos sendo caracterizado por ser um ensaio pontual de uma fase, portanto, com dados lidos ao mesmo

tempo em todos os medidores de vibração não se alterando a posição dos sensores ao decorrer do ensaio (ROCHA, 2015).

## 2.2 Análise numérica

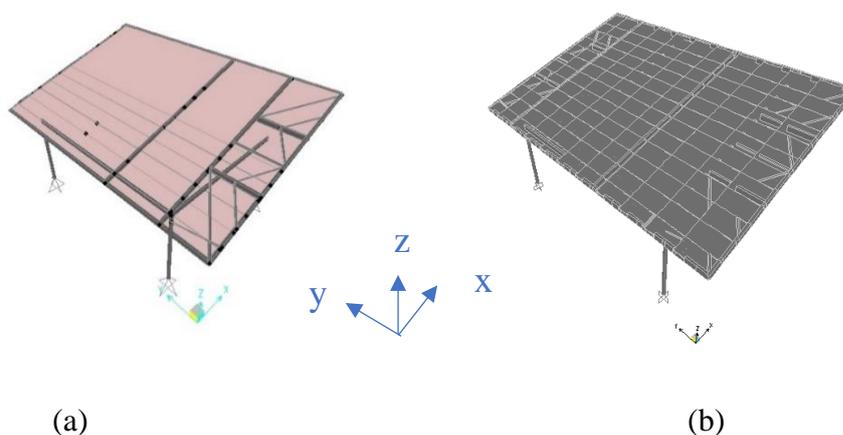
Foi construído um modelo 3D da estrutura empregando o *software* comercial SAP2000, versão 14.0.0, conforme figura 4.a, com características dos materiais apresentadas na tabela 1.

*Tabela 1– Características dos materiais empregados na análise*

Material	Modulo de elasticidade (GPa)	Massa Específica (KN/m <sup>3</sup> )	Coefficiente de Poisson
Aço	200	77	0,30
Plástico	2,4	13,4	0,21

Especificamente no caso das telhas se fez uma equivalência de momento de inércia para assim considerar a sua especificidade de formato em um elemento de placa uniforme que se representa de forma mais precisa as características físicas e geométricas das telhas PET da cobertura.

Na cobertura foi empregado o elemento de casca (*shell element*) o qual foi discretizado em uma malha de 11x12 em relação aos eixos x e y com espessura de 2,1 cm, conforme figura 4.b. A divisão da cobertura se deu objetivando uma aproximação com as dimensões das telhas. Foi estabelecido assim valores resultantes com maior exatidão, tendo em vista a observância da divisão das telhas na cobertura e promovendo assim a descontinuidade entre elas. Ademais, toda a estrutura metálica incluindo as terças foram projetados como elementos de barra (*frame element*).



**Figura 4.** Estrutura analisada empregando o SAP2000, a) sem discretização da cobertura e (b) com discretização.

Na análise dinâmica foram observados os cinco primeiros modos de vibração, porém, apenas os primeiros modos a flexão no eixo vertical foram analisados a fundo, visto que, no ensaio de vibração livre, experimentalmente foram excitados somente os modos de vibração à flexão. Logo, as frequências naturais encontradas numericamente se restringiram na comparação com a experimental aos modos de vibração a flexão no eixo vertical.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A tabela 2 a seguir mostra os primeiros cinco modos de vibração e suas respectivas frequências e períodos. Na tabela 2 os valores em negrito dizem respeito aos modos relacionados a flexão vertical.

O modo 1 já se vê relacionado ao deslocamento vertical pela flexão. Enquanto o modo 2 ocorre uma movimentação em relação ao eixo horizontal da estrutura levando a flexão horizontal. No modo 3 é notado novamente um modo ligado a flexão vertical correlacionado ao eixo z, além disso, uma relação à torção no eixo y. O modo 4 obtém-se um modo associado tanto a flexão horizontal quanto a torção alusiva ao eixo z. E por fim o modo 5 que denota torção no eixo y com flexão vertical no eixo z. Verifica-se então, que as três primeiras frequências naturais associadas à flexão para análise comparativa relacionam-se aos modos 1, 3 e 5 que, conforme já mencionado, são destacados em negrito na tabela 2.

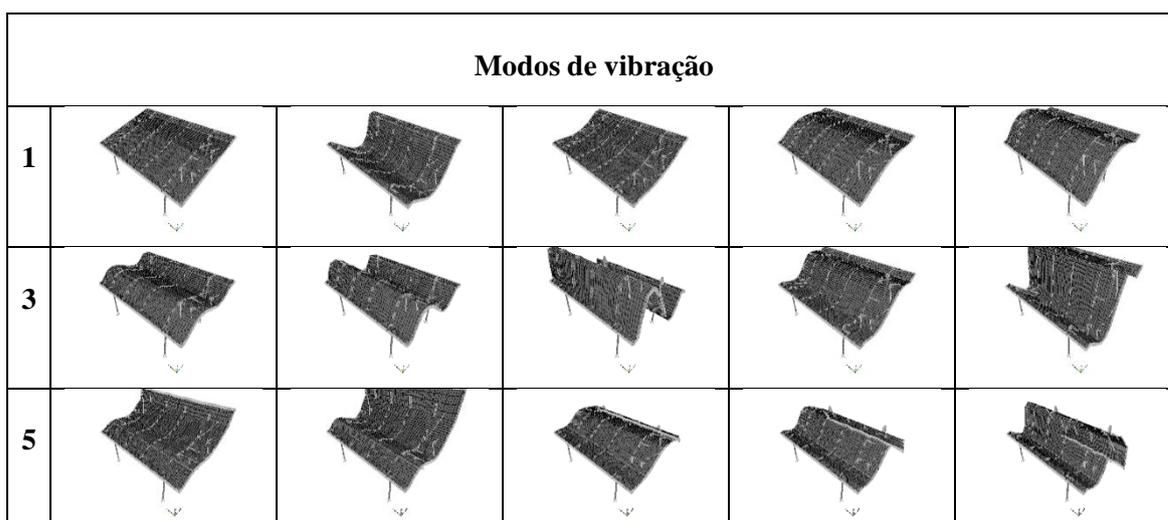
*Tabela 2 – Modos de vibração obtidos na análise numérica pelo SAP2000 para a cobertura do trabalho.*

Modo de vibração		Frequência (Hz)	Período (s)
1		<b>4,043</b>	<b>0,24733</b>
2		4,665	0,21434
3		<b>7,951</b>	<b>0,12577</b>
4		8,583	0,11651
5		<b>10,041</b>	<b>0,09959</b>

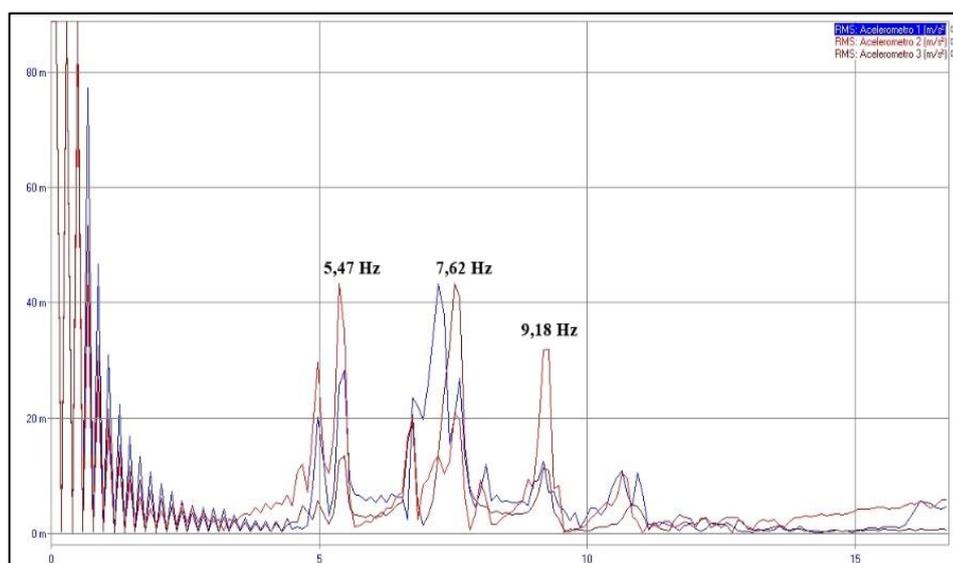
Foi observado que as frequências dos dois primeiros modos estão na faixa de 0 até 5 Hz na qual as estruturas civis estão mais sujeitas a ação do vento (AMADOR, 2007). Observa-se também esta vulnerabilidade característica similar em torres metálicas (PINHO; MORAES, 2014; ROCHA; SILVA; BRASIL, 2016).

Para melhor visualizar a movimentação dos modos de flexão vertical, o quadro 1 apresenta uma sequência de cinco quadros da esquerda para direita, mostrando as formas de vibração de cada modo.

**Quadro 1 – Modos 1, 3, e 5 de vibração**



Pela análise experimental os espectros de Fourier são mostrados na figura 5. Eles são evidenciados por seus picos, os quais foram obtidos pelo método de detecção de pico (PP- Peak picking) onde no eixo horizontal estão representadas as frequências e no eixo vertical as amplitudes das mesmas. Desta maneira foi observado os espectros de Fourier dos três acelerômetros sobrepostos e verificado os maiores picos e a ligação entre eles (figura 5).



**Figura 5.** Espectros de Fourier em relação ao eixo vertical da cobertura.

As primeiras frequências naturais de flexão da estrutura analisada ficaram na faixa entre 5 Hz e 10 Hz. Deste modo, a primeira frequência natural de flexão resultou em 5,47 Hz, já para a segunda foi obtido com o valor de 7,62 Hz, e a terceira frequência natural se apresentou com pico bem definido no valor de 9,18 Hz.-Houve uma significativa diferença entre as frequências obtidas experimentalmente e as àquelas obtidas numericamente pelo SAP2000, sendo adotado uma abordagem comparativa específica envolvendo erro padrão, coeficiente de correlação e fator de proporcionalidade (SARDINHA; VELOSO; AMADOR, 2006). A comparação destas frequências é mostrada na tabela 3 juntamente com os valores de erro relativo percentual entre ambas as análises, além da correlação dos dados, propiciando verificação quanto ao coeficiente de correlação de Pearson e o fator de proporcionalidade onde ambos valores são otimizados quanto mais se aproximam de 1. Através do erro relativo verifica-se a semelhança das frequências seguido da correlação de dados que define o grau de relacionamento entre as amostras e por fim o fator de proporcionalidade que mede a proporção entre as variáveis (SARDINHA; VELOSO; AMADOR, 2006).

*Tabela 3 - Comparação entre os métodos com erro padrão, correlação e proporcionalidade.*

<b>Modo de vibração flexão vertical</b>	<b>Frequência Experimental (Hz)</b>	<b>Frequência SAP2000 (Hz)</b>	<b>Erro (%)</b>	<b>Correlação de dados</b>	<b>Fator de Proporcionalidade</b>
<b>1</b>	5,47	4,04	26,14		
<b>2</b>	7,62	7,95	4,33	0,99	1,01
<b>3</b>	9,18	10,04	9,37		

As frequências apresentaram erros padrões significativos, com patamares entre 4,33% até 26,14%. Sendo sugerido sempre compatibilizar o modelo no *software* de acordo com o ensaio em campo (BRANDÃO et al, 2018). Isso foi realizado através da discretização e especificidade da descontinuidade levando a estes patamares.

Fazendo-se uma comparação com erros encontrados na pesquisa de Sardinha, Veloso, Amador (2006) os valores aqui deparados são em sua somatória de proporção menor, visto que, na análise numérica destes a ausência de elementos de casca em segmentos da estrutura levou há mais de 30% de erro padrão, entretanto, também obtiveram boa proporcionalidade e correlação de dados sendo utilizados os mesmos *softwares* de aquisição de dados e de modelagem do presente trabalho. Já em pesquisa realizada por Almeida (2014) com o mesmo *software* e com uma edificação diferenciada dos padrões contemporâneos notou-se erros também acima de 30% das frequências com seus respectivos modos de vibração sugerindo-se

que a dificuldade de especificidades de material são uma realidade para estruturas não convencionais. Logo, deve-se calibrar o modelo para compatibilizar os valores delineados experimentalmente, buscando desta maneira, atualizar seus parâmetros para melhor aproveitamento dos resultados. Portanto, objetivando um melhor ajuste entre as análises experimentais e numéricas (ALMEIDA, 2014).

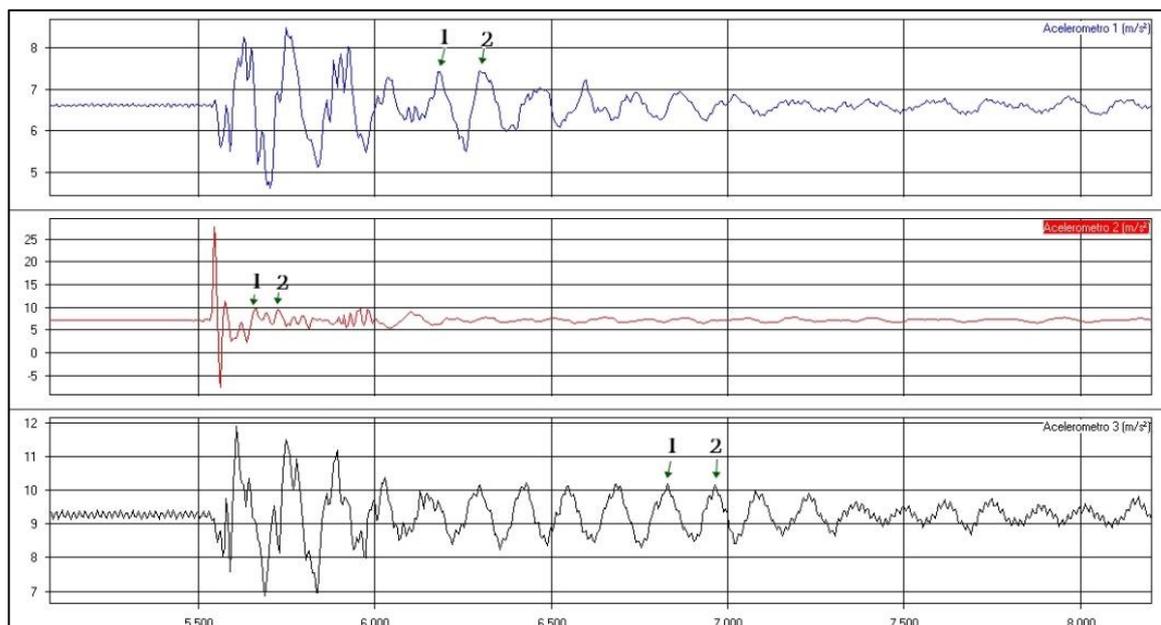
O fato é que o modelo construído de elementos finitos é baseado em simplificações e deduções que naturalmente geram erros. Estes geralmente devido à ausência de uma discretização mais refinada e com dificuldade de transpor características peculiares da estrutura como geometrias, materiais dentre outras propriedades de maneira fiel ao real (RIBEIRO; CALÇADA; DELGADO, 2012). Um desses fatos pode ser descrito pela descontinuidade, onde a alteração de nós de maneira sutil dá forma as telhas e suas divisões na cobertura modificando deliberadamente resultados de modos, frequências e períodos da estrutura.

Logo, sugere-se que o maior erro significativo de 26,14% ocorreu pela análise numérica, visto que, houve um complemento na análise experimental paralelamente ao presente artigo com ensaio de mesma natureza, porém com massas de 1 kg, 2 kg e 3kg e foi obtido os mesmos valores de frequências realçando assim as frequências naturais da estrutura. Pode-se perceber que o maior erro significativo coincide com o modo de vibração que deflagra apenas modo de flexão vertical fugindo um pouco da análise experimental que se mostrava pela ação da flexão e torção dos fios de aço. Já os menores erros se destacaram em modos de vibração onde ocorreu esse conjunto flexão vertical e a torção na cobertura, ficando os valores menores que 10% o que mostra uma coerência.

Quanto a correlação de dados obteve-se valor ótimo próximo de 1 o mesmo se deu com o fator de proporcionalidade que também se apresentou de maneira positiva ficando também próximo de 1. Portanto, os valores de frequência experimentais e numéricos tem uma forte correlação e boa proporcionalidade dos dados.

Já a taxa de amortecimento foi caracterizada por ser de baixo valor o que caracteriza uma boa detecção de resultados pelo decremento logarítmico conforme figura 6 onde sua detecção é otimizada em médios e baixos valores de amortecimento (PEREIRA; NEVES, 2006).

Os valores marcados e apresentados na figura 6 são as amplitudes empregadas pelo método de decremento logarítmico onde os valores de 1 são as amplitudes iniciais ( $X_1$ ) e os valores 2 são as amplitudes sucessivas ( $X_2$ ) decorrentes do procedimento. Nota-se que o amortecimento vai reduzindo as frequências levando há um aumento do período onde o fator de amortecimento indica este decaimento da oscilação (SORIANO, 2014).



**Figura 6.** Sinais adquiridos dos três acelerômetros em resposta a vibração livre.

Logo, os valores de amortecimento foram considerados muito pequenos (tabela 4) ficando bastante próximos dos valores da razão de amortecimento crítico que são peculiares as estruturas aço que constam na tabela 19 da NBR 6123 (ABNT, 1988). Foi encontrado também até mesmo taxas menores que 1% sugerido para estruturas metálicas pela NBR 6123 (ABNT, 1988) que esclarece quanto a ação dos ventos em edificações.

Foram observados os fatores de amortecimento em cada leitura dos acelerômetros e em seguida calculado uma média aritmética destes valores que foi considerado o fator de amortecimento da estrutura conforme tabela 4.

**Tabela 4 - Amplitudes e taxas de amortecimento**

Acelerômetros	X1 (cm)	X2 (cm)	$\zeta = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{X1}{X2}$
1	0,561	0,521	0,0117
2	2,34	2,25	$6,2422 \times 10^{-3}$
3	0,834	0,776	0,0114
<b>Fator de amortecimento da estrutura por média aritmética (<math>\zeta</math>)=</b>			$9,78 \times 10^{-3}$

Demonstra-se assim uma característica impar quanto a um comportamento de fato desta estrutura de aço ser flexível obtendo-se um fator de amortecimento pela média aritmética abaixo de 1% e atingindo assim patamares segundo a NBR 6123 (ABNT,1988) entre a razão de amortecimento crítico de edifícios em estrutura de aço soldada e a razão de amortecimento crítico de estruturas de chaminés e torres de aço. Isso mostra um padrão quanto a uma estrutura metálica com suscetibilidade a efeitos vibratórios pela ação de agentes externos como o vento.

#### 4. CONCLUSÕES

A presente pesquisa verificou os parâmetros modais da estrutura alternativa observando as particularidades da mesma. Dentre estas a alta flexibilidade salientada pelo baixo valor de taxa de amortecimento com 0,98% ficando um pouco abaixo do sugerido pela tabela 19 da NBR 6123 (ABNT, 1988) de 1% para estruturas metálicas. Logo, a suscetibilidade para vibrações se mostra ainda maior do que em estrutura de aço.

Destaca-se ainda que os materiais envolvidos como as telhas de PET, modo de construção e componentes estruturais como fios de aço se mostraram relevantes para os resultados. Influência disto foi notado também pelas baixas frequências encontradas numericamente pela leveza e pouca rigidez da estrutura demonstrada nos primeiros modos de vibração.

Já nos modos de flexão vertical notou-se na abordagem comparativa entre o ensaio experimental e a análise numérica tendo erros significativos de até 26,14% o que pode ter sido ocasionado pela influência da discretização e devido ao respectivo modo de vibração demonstrar ação apenas de flexão vertical não demonstrando ação de torção o que difere dos demais modos com menor proporção de erros. Estes se caracterizam por terem erros abaixo de 10% e seus modos serem tanto de flexão vertical quanto de torção no mesmo eixo y dos fios de aço. Sendo assim, apresentando-se mais próximo da realidade e maior coerência.

Constatou-se ainda que o fator de proporcionalidade e o coeficiente de correlação tiveram valores próximos de 1 o que leva a dizer que estatisticamente as frequências encontradas apresentam boa correlação.

Diante de tudo isso, foi possível verificar a importância dos parâmetros modais na caracterização da estrutura. Observando particularidades, como regiões e pontos de maior influência ao fenômeno de vibração através da análise numérica. Por outro lado, encontrando os valores das taxas de amortecimento pela análise experimental demonstrando assim a sensibilidade da estrutura de aço com cobertura de telhas PET a vibração.

#### REFERÊNCIAS

ALEXANDRE, Felipe Aparecido. **Monitoramento do fenômeno de queima no processo de retificação de aços por meio de sinais de vibração e análise de tempo e frequência**. 2017. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2018.

ALLAHYARI, Hamed et al. Experimental measurement of dynamic properties of composite slabs from frequency response. **Measurement**, v. 114, p. 150-161, 2018.

ALMEIDA, Igor Santos et al. Reciclagem de garrafas PET para fabricação de telhas. **Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT**, v. 1, n. 3, p. 83-90, 2013.

ALMEIDA, Susana Maria Matias de. **Avaliação experimental do comportamento dinâmico de um edifício do século XIX: aplicação à calibração de modelos numéricos**. 2014. Tese de Doutorado. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2014.

ALVES, Aguinaldo Lenine et al. Estudo das propriedades mecânicas de compósitos obtidos através da incorporação do PET triturado em microconcreto endurecido. **Revista Engenharia e Construção Civil**, v. 2, n. 1, 2015.

AMADOR, Sandro Diord Rescinho. **Programa computacional com interface gráfica para identificação estocástica de parâmetros modais de estruturas civis: aplicação em pontes e torres de linha de transmissão**. 2007. Dissertação de mestrado, Centro tecnológico, Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

AOYAMA, Tadayoshi et al. Vibration Sensing of a Bridge Model Using a Multithread Active Vision System. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, v. 23, n. 1, p. 179-189, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Forças Devidas ao Vento em Edificações**, NBR 6123, Rio de Janeiro: ABNT, 1988.

BEREZOSKI, Kely Camoli; PENNER, Elisabeth; MOREIRA, Amacin Rodrigues. Análise do Conforto Humano Perante as Vibrações de Estádios de Futebol. **RETEC-Revista de Tecnologias**, v. 10, n. 2, 2017.

BRANDÃO, F. et al. Caracterização dinâmica de uma edificação histórica do século XIX. **Revista IBRACON de estruturas e materiais**, 2018.V. 11, n. 7, p. 52 – 75, 2018

BRANDÃO, F. et al. Caracterização Dinâmica de um Edifício Histórico do Século XIX Construído em Alvenaria de Tijolos Maciços. **Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções – CBPAT**. 2016.

BRUM, Sileno Corrêa et al. Amianto: a bioética entre o custo e a toxicidade. **Revista Eletrônica Teccen**, v. 9, n. 1, p. 52-56, 2016.

CAETANO, E.; CUNHA, A.; MAGALHÃES, F. Novas perspectivas na análise do comportamento dinâmico de estruturas. **Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões**, v. 18, p. 23-34, 2010.

CAO, Liang; LIU, Jiepeng; CHEN, Y. Frank. Vibration performance of arch prestressed concrete truss girder under impulse excitation. **Engineering Structures**, v. 165, p. 386-395, 2018.

CASTELLARO, Silvia et al. Dynamic characterization of the Eiffel tower. **Engineering Structures**, v. 126, p. 628-640, 2016.

CORREIA, D. S. Q. **Análise modal de Bombas de Cavidades Progressivas**. Dissertação de Mestrado. 2017. Instituto de Matemática/Escola politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2017.

CRUZ, C.; MIRANDA, E. First Mode Damping Ratios Inferred from the Seismic Response of Buildings. Eleventh U.S. **National Conference on Earthquake Engineering**, 2018.

DEBONA, Gilvan Lunz; SOUZA JUNIOR, Pedro Vieira; SILVA, José Guilherme Santos. Modelagem numérica e experimental do caminhar humano sobre passarelas de pedestres. **Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia-RIPE**, v. 2, n. 2, p. 26-45, 2017.

FARIAS, Jamerson Araújo; GUILHON, David; SANTOS, Denílson Moreira. **Avaliação de Compósito Obtido de Resíduos da Construção Civil e PET**. Blucher Design Proceedings, v. 2, n. 9, p. 4226-4240, 2016.

FERREIRA, Edsandra Magalhães. **Gestão da Qualidade na reciclagem de PET para transformação em cobertura ecológica em indústria na cidade de Manaus-AM**. 2009. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2009.

FREIRE, Wesley Jorge; BERALDO, Antonio Ludovico. **Tecnologias e materiais alternativos de construção**. Editora UNICAMP, 2003.

GAGGINO, Rosana et al. The Comprehensive Comparison of Thermal and Physical-Mechanical Properties of the Recycled Rubber and Plastic Roofing Tiles versus Roofing Tiles Made with Different Traditional Materials. **Advances in Civil Engineering**, v. 2018, 2018.

GARCIA, Cristobal et al. The effect of nylon nanofibers on the dynamic behaviour and the delamination resistance of GFRP composites. In: **MATEC Web of Conferences**. EDP Sciences, 2018.

GÓES, Lourival Paula de et al. **Estudo do Comportamento Estático de Estrutura Metálica Tracionada para Cobertura com Telhas Plásticas de Pet. 2015**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, 2015.

GÓMEZ, S. S.; GEURTS, C. P. W.; METRIKINE, A. On the importance of soil damping for tall buildings loaded by wind. **Engineering Structures**, v. 163, p. 426-435, 2018.

HENRIQUES, J. D. de O.; RAMBALDUCCI, R. G.; PIN, T. C.; FRECHIANI, V. V.; PUGET, F. P.; Avaliação da Viabilidade Técnica de Produção de Telha de Fibrocimento Usando Fibras Alternativas, p. 9417-9424. In: **Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química - COBEQ 2014**. BlucherChemicalEngineeringProceedings, v.1, n.2. São Paulo: Blucher, 2015.

HOLANDA, R.V et al. Attenuation of sound radiation in concrete structure through the reduction of mechanical vibration. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 11, n. 1, p. 95-114, 2018.

LIPENER, Patrícia Almeida. **Considerações sobre variações livres em pontes**. 2018 Tese de Doutorado. Escola politécnica de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018

MAGALHÃES, Filipe et al. Damping estimation using free decays and ambient vibration tests. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 24, n. 5, p. 1274-1290, 2010.

MARTHA, L. F. **Análise de estruturas: conceitos e métodos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

MARTINS, Mauro Lucio et al. Estudo da aplicação da FFT (Fast Fourier Transform) em análise da condição de máquinas rotativas. In: **CILAMCE 2016-XXXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering**. 2016.

NGUGI, Hannah Nyambara; KALULI, James Wambua; ABIERO-GARIY, Zachary. Use of Expanded Polystyrene Technology and Materials Recycling for Building Construction in Kenya. **American Journal of Engineering and Technology Management**, v. 2, n. 5, p. 64-71, 2017.

NÓBREGA, PGB da; HANAI, JB de. A Análise Modal na Avaliação de Estruturas de Concreto Pré-moldado. **1º. Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto pré-moldado**. São Carlos, 2005.

OLIVEIRA, Mesaque Silva. **Desenvolvimento e caracterização de telhas cimentícias reforçadas com tecido de fibras vegetais da Amazônia**. 2017. Dissertação de mestrado. Faculdade de tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, 2017.

PARK, Hyo Seon; OH, Byung Kwan. Damage detection of building structures under ambient excitation through the analysis of the relationship between the modal participation ratio and story stiffness. **Journal of Sound and Vibration**, v. 418, p. 122-143, 2018.

PEREIRA, Cristiano Caria Guimarães; NEVES, Francisco de Assis das. Conforto humano e limites de percepção para vibrações verticais. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 59, n. 3, p. 271-278, 2006.

PINHO, Felipe Gonçalves; MORAES, Lucas Cuellar. **Vibrações Induzidas pelo Vento em Estruturas Metálicas: Uma abordagem Via Elementos Finitos**. 2014. Trabalho de conclusão de curso (Monografia). Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

PINHO, Felipe Gonçalves; MORAES, Lucas Cuellar. **Vibrações Induzidas pelo Vento em Estruturas Metálicas: Uma abordagem Via Elementos Finitos**. 2014. Trabalho de conclusão de curso (Monografia). Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

RANGEL, Isabela CSS; RANGEL, Luciano S.; STUTZ, Leonardo T. Identificação de danos estruturais a partir de um Modelo de Superfície de Resposta. **TEMA (São Carlos)**, v. 17, n. 3, p. 267-282, 2016.

RIBEIRO, Diogo; CALÇADA, Rui; DELGADO, Raimundo. **Calibração do modelo numérico da ponte ferroviária de São Lourenço com base em parâmetros modais**. Lisboa: RPEE, p. 45-57, 2012.

RIBEIRO, Priscilla Izabel et al. Uma revisão sobre vibrações em sistemas de piso em aço induzidas por carregamentos oriundos de atividades humanas. **Revista Sul-americana de Engenharia Estrutural**, v. 15, n. 1, 2018

ROCHA, Denis Cressembene; SILVA, Marcelo Araujo; BRASIL, Reyolando M.L.R.F. Otimização de torres metálicas para suporte de geradores eólicos. **Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia-RIPE**, v. 2, n. 20, 2016

ROCHA, Sara Pinto da. **Observação do comportamento dinâmico de estruturas de engenharia civil**. 2015. Tese de Doutorado. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Lisboa, 2015.

ROSSATO, Luciana V.; MIGUEL, Letícia FF Miguel; MIGUEL, Leandro FF. Estimativa de Razão de Massas Ideal de Amortecedor de Massa Sintonizada para Controle de Vibrações em Estruturas. **Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia-RIPE**, v. 2, n. 13, p. 1-12, 2017.

SÁLES, José Jairo; NETO, Jorge Munaiar; MALITE, Maximiliano; DIAS, Antônio Alves. **Sistemas Estruturais**. 2ª Ed. Rio de Janeiro: Elsevier. 2015.

SARDINHA, Israel Baltazar; VELOSO, L. A. C. M.; AMADOR, Sandro Diord Rescinho. Monitoração de estruturas para identificação de parâmetros modais. In: **Proceedings of the XXVII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE)**. 2006.

SCHELB, Cristina Galvão. **Avaliação de tipologias construtivas nos critérios de sustentabilidade: estudo de casos–telhas**. 2016. Dissertação de mestrado. Universidade de Brasília. Brasília, 2016.

SILVA, Irwing Aguiar Ribeiro; DEBONA, Gilvan L. Lunz; DA SILVA, José Guilherme Santos. Avaliação de Projeto sobre o Estado Limite de Serviço de Passarelas Submetidas à ação Dinâmica do Caminhar dos Pedestres. **Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia-RIPE**, v. 2, n. 2, p. 182-201, 2017.

SILVA, Julia Teles; FARBIARZ, Jackeline Lima. **O Pensamento de Buckminster Fuller e o Lild, PUC-RIO**. Blucher Design Proceedings, v. 2, n. 9, p. 1999-2010, 2016.

SILVA, M. F. E. **Sorção de água em compósitos de poliéster reforçados com fibras de sisal tratadas com líquidos iônicos**. 2017. Dissertação de Mestrado, Instituto de Matemática/Escola politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2017.

SORIANO, Humberto. **Introdução à dinâmica das estruturas**. 1. ed. - Rio de Janeiro. Elsevier Brasil, 2014.

STUTZ, L. T.; TENENBAUM, R. A.; CORREA, R. A. P. The Differential Evolution method applied to continuum damage identification via flexibility matrix. **Journal of sound and vibration**, v. 345, p. 86-102, 2015.

VEGA, Dianelys; ROITMAN, Ney; MAGLUTA, Carlos. Comportamento dinâmico de passarela sob cargas induzidas por pedestres andando. **Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia-RIPE**, v. 2, n. 15, p. 1-22, 2017

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Inicialmente o presente estudo avaliou por meio de análise estática a estrutura quanto ao seu comportamento por deformações, objetivando, estudar precisamente o comportamento de suas terças através da ação de cargas pontuais. Obteve-se assim resultados experimentais com padrão de variação dentro da normalidade, gerando dados sem grande discrepância na análise experimental e bem característicos no decorrer da mudança da discretização da malha pela análise numérica. Foram obtidos valores na análise numérica muito próximos àqueles da análise experimental quando foi empregado o modelo de discretização 25, o qual empregou uma divisão de 25 elementos para cada elemento da discretização inicial. Por outro lado, para as demais discretizações com menor número de elementos foram obtidos valores bem distantes daqueles da análise experimental, mostrando a importância do emprego de uma malha mais refinada. Pode-se dizer ainda que os fios da estrutura apresentaram comportamento semelhante a um cabo de uma tensoestrutura, devida a sua alta flexibilidade. Portanto, a cobertura se mostrou bastante flexível, onde mesmo sob efeito da pré-tensão e carga pontuais de baixa intensidade, apareceram deflexões próximas ao estado-limite de serviço de deslocamentos excessivos, preconizado pela normatização brasileira.

Já pela análise dinâmica, verificou-se o desempenho da estrutura submetida ao efeito de vibração livre, onde o estudo mostrou valores de taxas de amortecimento em média um pouco abaixo de 1%, caracterizando a estrutura como flexível e suscetível a vibrações, porém, ainda enquadrando-se como uma estrutura metálica. Já pelo aspecto das frequências naturais, pode-se verificar alguns erros significativos entre os valores obtidos com análise experimental e os do modelo numérico, sendo mais o notável para o primeiro modo de vibração à flexão, muito provavelmente devido à alta flexibilidade da estrutura, o que não foi representada no modelo de modo mais eficiente, de tal modo que possibilitasse a obtenção de resultados que descrevessem de forma mais precisa o comportamento dinâmico.

Diante dos resultados obtidos das análises realizadas por modelagem numérica e procedimentos experimentais sugere-se para estudos futuros fazer uma análise numérica não linear envolvendo cabos no lugar dos fios. Podendo-se ainda comparar modelos convencionais com telhas de fibrocimento ou cerâmica e terças de perfis comerciais de aço com a estrutura alternativa, podendo assim, verificar o grau de diferenciação dos materiais alternativos com uma cobertura convencional. Além disso, pode-se analisar a estrutura sob ação de vibração forçada simulando uma vibração constante na cobertura e verificando seu comportamento e também um estudo térmico quanto a sensação térmica de uma cobertura convencional e a cobertura alternativa.

## REFERÊNCIAS

ABCEM -Associação Brasileira da Construção Metálica. **Execução de Estruturas de Aço - Práticas recomendadas**. Dezembro 2010.

ARCHDAILY. **Cobertura do Estádio Olímpico de Munique de 1972**. Cortesia de **Wikimedia**. Disponível em:<<https://www.archdaily.com.br/br/763568/frei-otto-premio-pritzker-2015/54ff5a93e58ece05b4000171>> Acesso em: 23 de julho de 2019.

ÂNGULO, S. C.; ZORDAN, S.E.; JOHN, V. M., “Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem de Resíduos na Construção Civil”. **In: IV Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na construção civil - materiais reciclados e suas aplicações**. CT206 - IBRACON. São Paulo - SP. 2001

ASHWEAR, Nasseradeen; ERIKSSON, Anders. Natural frequencies describe the pre-stress in tensegrity structures. **Computers&Structures**, v. 138, p. 162-171, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio**. NBR 14762, Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Forças Devidas ao Vento em Edificações**, NBR 6123, Rio de Janeiro: ABNT, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Projeto de Estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**, NBR 8800, Rio de Janeiro, 2008

BIANCHI, Giselly M.; TIBIRIÇÁ, Antônio CG; COELHO, Luiz H. **Estruturas de Membrana Tensionadas**. Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, v. 11, 2006.

BRANDÃO, F. et al. Caracterização Dinâmica de um Edifício Histórico do Século XIX Construído em Alvenaria de Tijolos Maciços. **Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções – CBPAT**.2016.

BRASIL, Reyolando M. L. R. F.; SILVA, Marcelo Araújo. **Introdução à dinâmica das Estruturas**. 2.ed. São Paulo: Blucher, 2015.

CAETANO, E.; CUNHA, A.; MAGALHÃES, F. Novas perspectivas na análise do comportamento dinâmico de estruturas. **Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões**, v. 18, p. 23-34, 2010.

CUNHA, A.; CAETANO, Elsa. Reanálise dos ensaios dinâmicos da Ponte Vasco da Gama com base no Método de Identificação Estocástica por Sub-Espaços. In: **Actas do 6º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica–SÍSMICA**. 2004.

GOÉS, Lourival Paula de et al. **Estudo do Comportamento Estático de Estrutura Metálica Tracionada para Cobertura com Telhas Plásticas de Pet**. 2015. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, 2015.

KYOWA. **DTH-A Displacement Transducer**. Disponível em: < <http://www.kyowa-ei.com/eng/product/category/sensors/dth-a/index.html>> Acesso em: 26 de novembro de 2018

LÖTTERS, J. C. et al. Procedure for in-use calibration of triaxial accelerometers in medical applications. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 68, n. 1-3, p. 221-228, 1998.

LYNX. **ADS2002**. Disponível em: <[http://wwwlynxtec.com.br/prod\\_ads200.htm](http://wwwlynxtec.com.br/prod_ads200.htm)> Acesso em: 26 de novembro de 2018.

MARTHA, L. F. **Análise de estruturas: conceitos e métodos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

MASS, Bárbara Holzmann. **Resíduos de construção civil na obra de uma edificação e seus impactos estudo de caso de uma residência em Light Steel Framing e simulação de uma em alvenaria**. 2017. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2017.

MITUTOYO. **ABSOLUTE Digimatic Indicator ID-U Series 575-with Slim and Simple Design**. Disponível em: <<https://ecatalog.mitutoyo.com/ABSOLUTE-Digimatic-Indicator-ID-U-Series-575-with-Slim-and-Simple-Design-C1203.aspx>> Acesso em: 26 de novembro de 2018.

NASCIMENTO, Anne Caroline de Paula; SILVA, Agnaldo Antônio Moreira Teodoro. Aplicação do método dos elementos finitos para estudo de problemas de interação fluido estrutura em engenharia civil. **RECIEC-Revista Científica de Engenharia Civil**, v. 1, n. 02, p. 49-62, 2018.

NEZ, A. et al. Comparison of calibration methods for accelerometers used in human motion analysis. **Medical engineering & physics**, v. 38, n. 11, p. 1289-1299, 2016.

NORONHA, Jose Leonardo. **Aplicação da máquina de medir por coordenadas na calibração de medidas materializadas**. 2003. Tese de doutorado, Centro Tecnológico,

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

OLIVEIRA, V. M. B. **Análise e Projeto de Tenso-Estruturas Têxteis para Coberturas**. 2003. Tese de Doutorado. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.

PINHEIRO, Luís Henrique Bueno. **Reforço de pontes em concreto armado por protensão externa**. 2018. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2018.

RAO, Singiresu S. **Vibrações mecânicas**. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

ROCHA, Sara Pinto da. **Observação do comportamento dinâmico de estruturas de engenharia civil**. 2015. Tese de Doutorado. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. 2015  
SÁLES, José Jairo; NETO, Jorge Munaiar; MALITE, Maximiliano; DIAS, Antônio Alves. **Sistemas Estruturais**. 2.ed. Rio de Janeiro: Elsevier. 2015.

SANTOS, Mario Esmeraldo; LEITE, Eduardo César Cordeiro. Análise dos efeitos dinâmicos introduzidos por atividades humanas em lajes nervuradas unidirecionais de concreto. **Revista Tecnologia**, v. 39, n. 1, 2018.

SILVA, C.A.B. **Modelo computacional para análise da tensoestrutura de cobertura do Centro Comunitário da Universidade de Brasília**. 2006. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

SILVA, Leonardo José Dias; FRANCISCON, Maria Silvia Capelletto; ROCHA, Rodolfo Cavaliere. Utilização de telhas de PET reciclado na construção civil. **Revista Ciências do Ambiente On-Line**, v. 6, n. 1, 2010.

SILVA, Gildemir; PRATA, Bruno; ALBUQUERQUE, Augusto. Análise da eficiência dos sistemas estruturais para edifícios em concreto. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 1, p. 313-325, 2018.

SORIANO, Humberto. **Introdução à dinâmica das estruturas**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2014.

TELHAS LEVE. **Manaus usa telhas de garrafa PET para cobertura de abrigos**. 2013. Disponível em: < <http://www.telhasleve.com.br/garrafas-pet/>> Acesso em 19 mar.2019.

TESSARI, R. K. **Projeto baseado em desempenho de torres metálicas sujeitas à ação do vento**. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2016.

UNIVERSITY LIBRARIES. **Tacoma Narrows Bridge: The Collapse**. Disponível em: <[www.lib.washington.edu/specialcollections/collections/exhibits/tnb/collapse](http://www.lib.washington.edu/specialcollections/collections/exhibits/tnb/collapse)>. Acesso em 24 de julho de 2019.

VASCONCELOS, R, P. Dinâmica de estruturas. (s.l: s.n), 2003. 157 páginas. Apostila.

VITÓRIO, J. A. P. **Um Estudo Comparativo sobre métodos de alargamento de pontes rodoviárias de concreto armado com a utilização das normas brasileiras e Eurocódigos**. (Tese de Doutorado), Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2013.

YAMANE, L. S. et al. Instrumentation of a didactic rotating machine bench for fault detection based on frequency domain analysis. **In: Proceedings of the 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2017)**. 2017

ZHANG, Jingyao; OHSAKI, Makoto. **Tensegrity structures: form, stability, and symmetry**. Tokyo: Springer, 2015.

## APÊNDICE A – Testes de normalidade da análise estática

A tabela 1 amostra os respectivos pesos e localizações também orientando quanto a numeração das amostras e testes do primeiro artigo. Foram 90 testes e 27 amostras com o tamanho de cada amostra de 10 dados. Os resultados dos testes de normalidade seguiram esta mesma organização da tabela 1 conforme número de amostra na qual é ligada ao sensor, valor de peso e respectiva localização.

Tabela 1 - Resultados de deflexões pelo método experimental

Peso de 1kg em 53,5 cm				Peso de 1kg em 73,5 cm				Peso de 1kg em 88 cm			
Teste	Sensor 1 em 33 cm	Sensor 2 em 66 cm	Sensor 3 em 99 cm	Teste	Sensor 1 em 33 cm	Sensor 2 em 66 cm	Sensor 3 em 99 cm	Teste	Sensor 1 em 33 cm	Sensor 2 em 66 cm	Sensor 3 em 99 cm
	Deflexão (mm)				Deflexão (mm)				Deflexão (mm)		
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3		Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6		Amostra 7	Amostra 8	Amostra 9
1	0,95	1,02	0,36	11	0,53	1,06	0,762	21	0,29	0,68	1,08
2	0,82	0,86	0,3736	12	0,51	0,98	0,792	22	0,3	0,67	1,078
3	0,84	0,91	0,4009	13	0,49	0,96	0,7109	23	0,3	0,61	1,10869
4	0,89	0,94	0,369	14	0,47	0,98	0,70755	24	0,3	0,67	1,078
5	0,82	0,91	0,365	15	0,49	0,96	0,82061	25	0,27	0,71	1,0442
6	0,79	0,9	0,37254	16	0,48	1,01	0,72406	26	0,28	0,67	1,20753
7	0,79	0,89	0,323	17	0,46	1,01	0,763	27	0,27	0,6	1,1432
8	0,87	0,97	0,384	18	0,43	0,97	0,717	28	0,28	0,58	1,089
9	0,82	0,92	0,385	19	0,51	1,07	0,748	29	0,29	0,6	1,10598
10	0,78	0,91	0,409	20	0,52	1,02	0,747	30	0,27	0,59	1,062
Média	0,837	0,923	0,374	Média	0,489	1,002	0,749	Média	0,285	0,638	1,100
Desvio padrão	0,053	0,045	0,024	Desvio padrão	0,030	0,039	0,037	Desvio padrão	0,013	0,046	0,047
Peso de 2 kg em 53,5 cm				Peso de 2kg em 73,5 cm				Peso de 2 kg em 88 cm			
Teste	Sensor 1 em 33 cm	Sensor 2 em 66 cm	Sensor 3 em 99 cm	Teste	Sensor 1 em 33 cm	Sensor 2 em 66 cm	Sensor 3 em 99 cm	Teste	Sensor 1 em 33 cm	Sensor 2 em 66 cm	Sensor 3 em 99 cm
	Deflexão (mm)				Deflexão (mm)				Deflexão (mm)		
	Amostra 10	Amostra 11	Amostra 12		Amostra 13	Amostra 14	Amostra 15		Amostra 16	Amostra 17	Amostra 18
31	2,05	2,14	0,93107	41	1,22	2,73	1,922	51	0,67	1,81	2,95
32	2,06	2,17	0,965	42	1,18	2,54	1,7201	52	0,58	1,86	3,0228
33	2,31	2,48	0,97	43	1,09	2,39	1,74	53	0,67	1,9	3,0733
34	2,48	2,58	1,033	44	1,22	2,75	2,003	54	0,68	1,81	2,9351
35	1,81	1,9	0,819	45	1,14	2,57	1,963	55	0,47	1,76	3,07
36	2,3	2,41	0,997	46	1,03	2,26	1,571	56	0,59	1,57	2,698
37	1,88	1,94	0,877	47	1,09	2,35	1,64	57	0,57	1,49	2,5192
38	1,98	2,06	0,877	48	1,03	2,26	1,568	58	0,51	1,59	2,771
39	1,95	2,02	0,901	49	0,97	2,23	1,6065	59	0,56	1,54	2,606
40	1,9	1,99	0,8938	50	1,14	2,57	1,843	60	0,7	1,77	2,885
Média	2,072	2,169	0,926	Média	1,111	2,465	1,758	Média	0,600	1,710	2,853
Desvio padrão	0,220	0,239	0,065	Desvio padrão	0,084	0,194	0,165	Desvio padrão	0,078	0,148	0,196
Peso de 3 kg em 53,5 cm				Peso de 3kg em 73,5 cm				Peso de 3 Kg em 88 cm			
Teste	Sensor 1 em 33 cm	Sensor 2 em 66 cm	Sensor 3 em 99 cm	Teste	Sensor 1 em 33 cm	Sensor 2 em 66 cm	Sensor 3 em 99 cm	Teste	Sensor 1 em 33 cm	Sensor 2 em 66 cm	Sensor 3 em 99 cm
	Deflexão (mm)				Deflexão (mm)				Deflexão (mm)		
	Amostra 19	Amostra 20	Amostra 21		Amostra 22	Amostra 23	Amostra 24		Amostra 25	Amostra 26	Amostra 27
61	3,47	3,83	1,329	71	1,47	3,9	2,948	81	0,81	2,52	4,5124
62	3,92	4,18	1,592	72	1,56	3,95	2,842	82	0,96	2,91	4,8466
63	3,74	3,87	1,569	73	1,91	4,22	3,028	83	0,84	2,6	4,477
64	3,16	3,55	1,507	74	1,66	3,72	2,691	84	0,94	2,63	4,563
65	3	3,45	1,439	75	1,77	3,73	2,675	85	0,86	2,54	4,37
66	3,45	3,82	1,5597	76	1,98	4,69	3,33	86	0,86	2,56	4,38
67	3,32	3,66	1,413	77	1,86	4,48	3,215	87	0,53	2,5	4,482
68	3,42	3,75	1,565	78	1,5	3,56	2,557	88	0,6	2,42	4,387
69	3,52	3,87	1,519	79	1,49	3,45	2,5175	89	0,77	2,68	4,797
70	3,26	3,44	1,364	80	1,64	3,53	2,6741	90	0,49	2,41	4,26
Média	3,426	3,742	1,486	Média	1,684	3,923	2,84776	Média	0,766	2,577	4,5075
Desvio padrão	0,268	0,226	0,093	Desvio padrão	0,186	0,419	0,277	Desvio padrão	0,167	0,145	0,187

Foi empregado o *software* ActionStat gerando resultados que foram agrupados nos quadros a seguir com respectivos gráficos de papel de probabilidade norteando os *p*-valores e testes de Anderson - Darling, Kolmogorov-Smirnov, Shapiro -Wilk por fim o teste de Ryan-Joinera.

Quadro 1 - Resultados dos testes de normalidade das amostras 1,2,3 e 4.

Testes de Normalidade			
Amostra 1		Amostra 2	
Testes	P-valor	Testes	P-valor
Anderson - Darling	0,1969	Anderson - Darling	0,1547
Kolmogorov - Smirnov	0,1569	Kolmogorov - Smirnov	0,1536
Shapiro - Wilk	0,1827	Shapiro - Wilk	0,2708
Ryan - Joiner	0,1603	Ryan - Joiner	0,1614
Amostra 3		Amostra 4	
Testes	P-valor	Testes	P-valor
Anderson - Darling	0,4407	Anderson - Darling	0,8302
Kolmogorov - Smirnov	0,522	Kolmogorov - Smirnov	0,7054
Shapiro - Wilk	0,5233	Shapiro - Wilk	0,8238
Ryan - Joiner	0,3116	Ryan - Joiner	0,7797

Quadro 2 - Resultados dos testes de normalidade das amostras 5,6,7 e 8.

Testes de Normalidade			
Amostra 5		Amostra 6	
Testes	P-valor	Testes	P-valor
Anderson - Darling	0,2307	Anderson - Darling	0,4852
Kolmogorov - Smirnov	0,2302	Kolmogorov - Smirnov	0,7212
Shapiro - Wilk	0,18	Shapiro - Wilk	0,4063
Ryan - Joiner	0,235	Ryan - Joiner	0,4259

Amostra 5		Amostra 6	

Amostra 7		Amostra 8	
Testes	P-valor	Testes	P-valor
Anderson - Darling	0,1112	Anderson - Darling	0,0652
Kolmogorov - Smirnov	0,4623	Kolmogorov - Smirnov	0,0647
Shapiro - Wilk	0,0607	Shapiro - Wilk	0,116
Ryan - Joiner	0,1366	Ryan - Joiner	0,1557

Amostra 7		Amostra 8	

Quadro 3 - Resultados dos testes de normalidade das amostras 9,10,11 e 12.

Testes de Normalidade			
Amostra 9		Amostra 10	
Testes	P-valor	Testes	P-valor
Anderson - Darling	0,1032	Anderson - Darling	0,2168
Kolmogorov - Smirnov	0,1692	Kolmogorov - Smirnov	0,1762
Shapiro - Wilk	0,1096	Shapiro - Wilk	0,2681
Ryan - Joiner	0,0703	Ryan - Joiner	0,2738

Amostra 11		Amostra 12	
Testes	P-valor	Testes	P-valor
Anderson - Darling	0,1897	Anderson - Darling	0,8475
Kolmogorov - Smirnov	0,3211	Kolmogorov - Smirnov	0,7358
Shapiro - Wilk	0,1953	Shapiro - Wilk	0,9286
Ryan - Joiner	0,258	Ryan - Joiner	0,9236

Papel de Probabilidade

AD = 0.57  
P-valor = 0.1

Amostra

Papel de Probabilidade

AD = 0.45  
P-valor = 0.22

Amostra

Papel de Probabilidade

AD = 0.47  
P-valor = 0.19

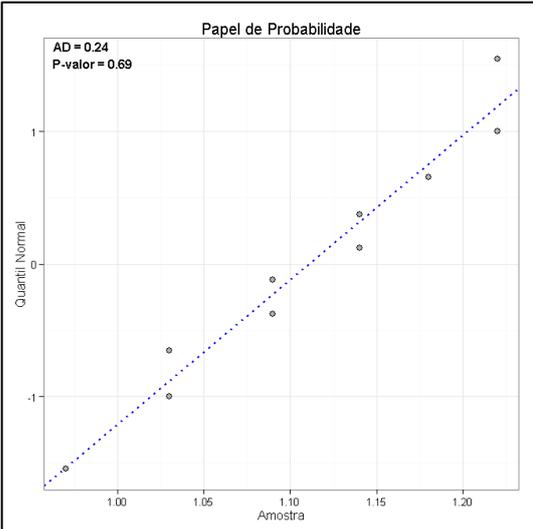
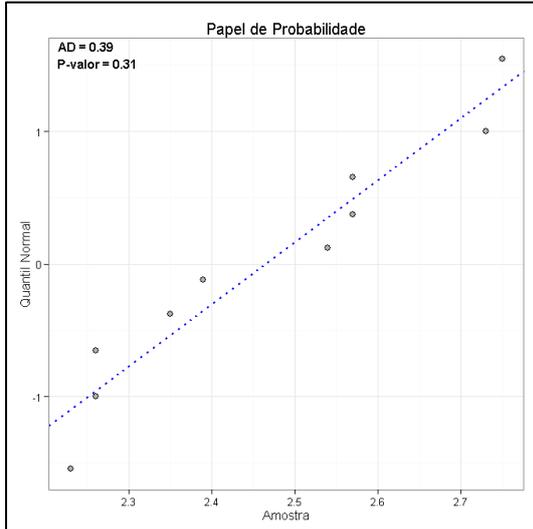
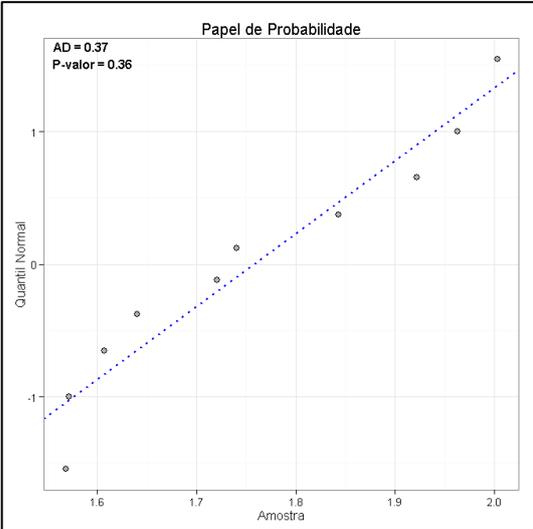
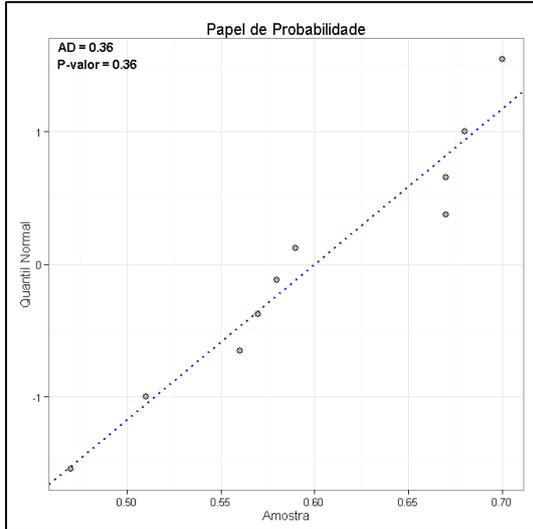
Amostra

Papel de Probabilidade

AD = 0.2  
P-valor = 0.85

Amostra

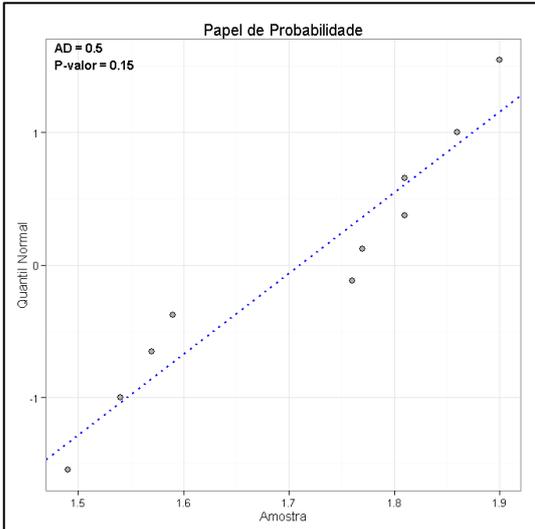
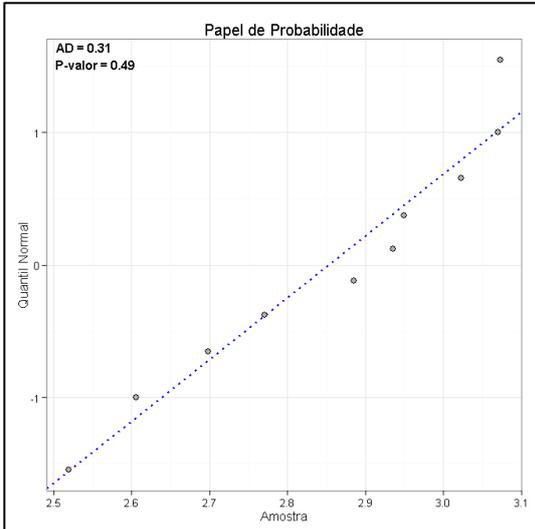
Quadro 4 - Resultados dos testes de normalidade das amostras 13,14,15 e 16.

Testes de Normalidade			
Amostra 13		Amostra 14	
Testes	P-valor	Testes	P-valor
Anderson - Darling	0,6911	Anderson - Darling	0,3136
Kolmogorov - Smirnov	0,8754	Kolmogorov - Smirnov	0,7083
Shapiro - Wilk	0,6214	Shapiro - Wilk	0,2476
Ryan - Joiner	0,7446	Ryan - Joiner	0,3848
			
Amostra 15		Amostra 16	
Testes	P-valor	Testes	P-valor
Anderson - Darling	0,3582	Anderson - Darling	0,3638
Kolmogorov - Smirnov	0,6469	Kolmogorov - Smirnov	0,2034
Shapiro - Wilk	0,2521	Shapiro - Wilk	0,418
Ryan - Joiner	0,404	Ryan - Joiner	0,4867
			

Quadro 5 - Resultados dos testes de normalidade das amostras 17,18,19 e 20.

Testes de Normalidade			
Amostra 17		Amostra 18	
Testes	P-valor	Testes	P-valor
Anderson - Darling	0,1537	Anderson - Darling	0,4851
Kolmogorov - Smirnov	0,1301	Kolmogorov - Smirnov	0,617
Shapiro - Wilk	0,2042	Shapiro - Wilk	0,3828
Ryan - Joiner	0,2794	Ryan - Joiner	0,5072

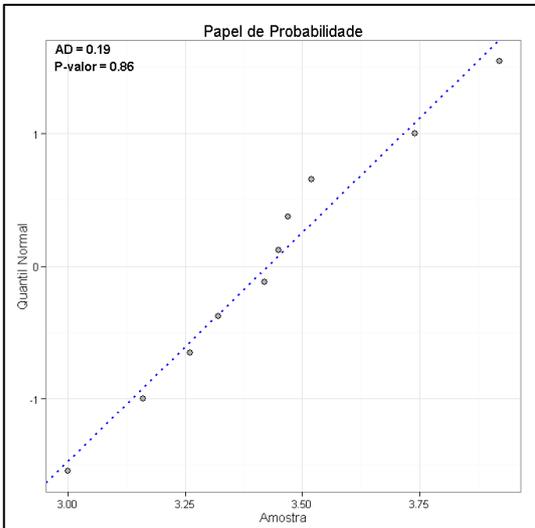
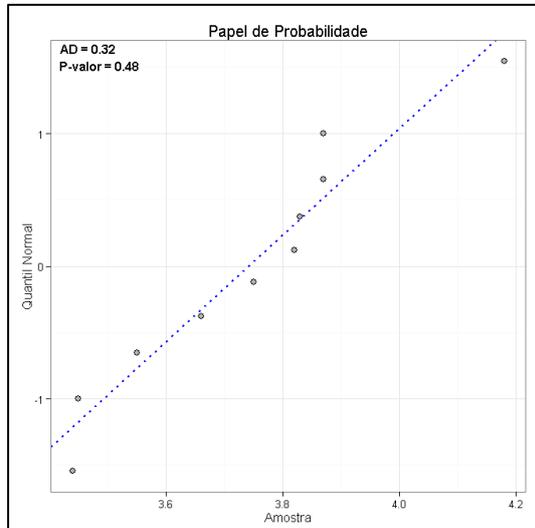
  

Amostra 17		Amostra 18	
			

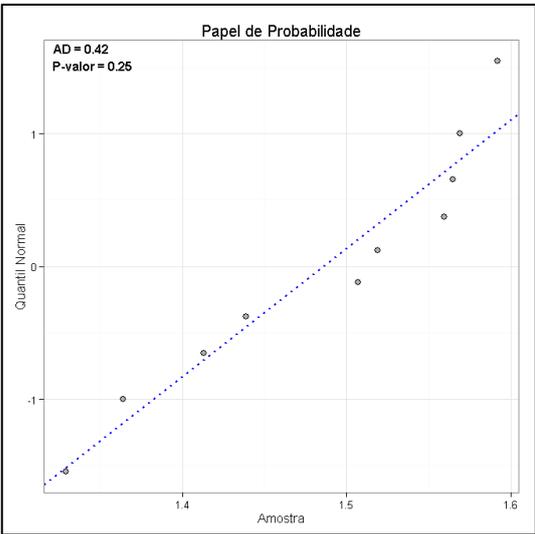
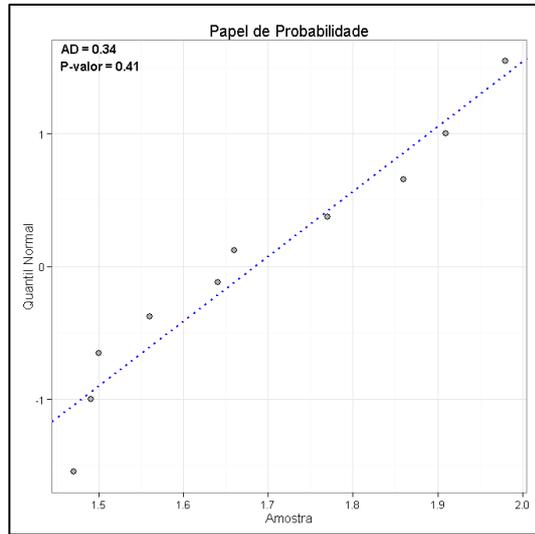
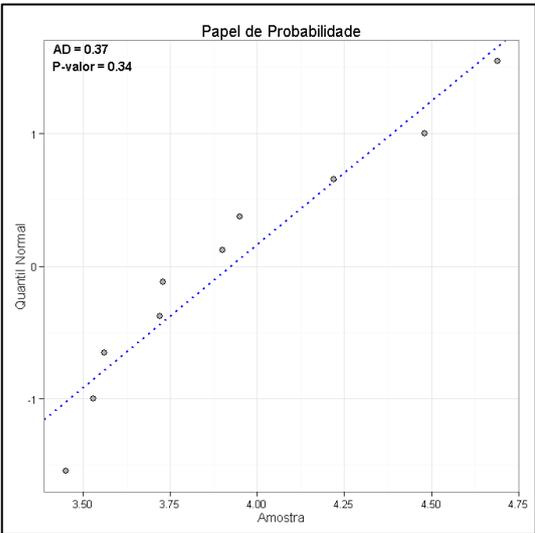
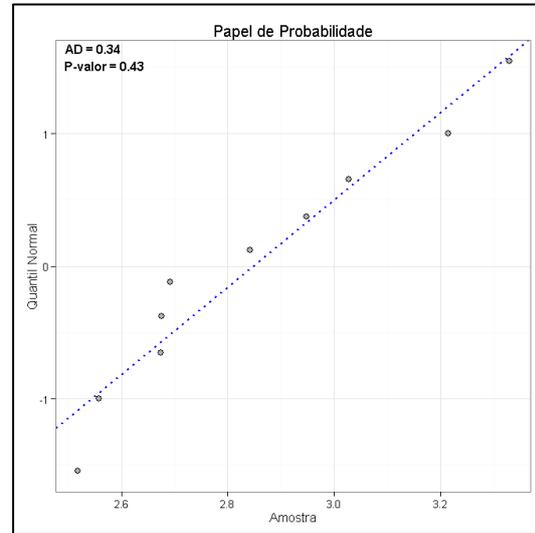
  

Amostra 19		Amostra 20	
Testes	P-valor	Testes	P-valor
Anderson - Darling	0,8608	Anderson - Darling	0,4798
Kolmogorov - Smirnov	0,6371	Kolmogorov - Smirnov	0,427
Shapiro - Wilk	0,949	Shapiro - Wilk	0,5047
Ryan - Joiner	0,8761	Ryan - Joiner	0,4348

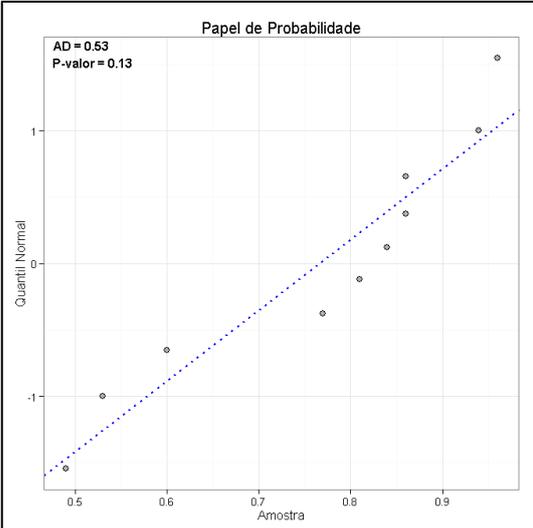
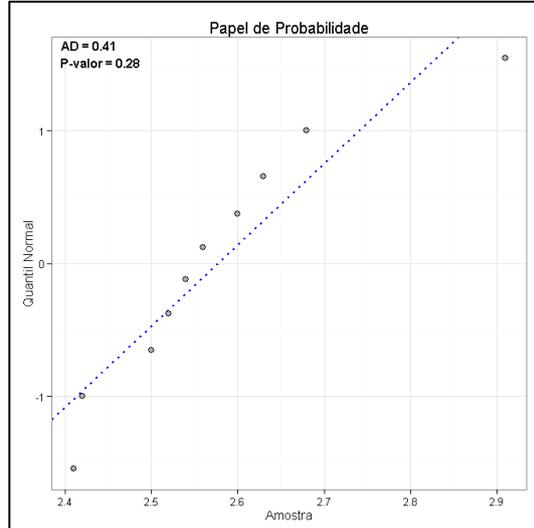
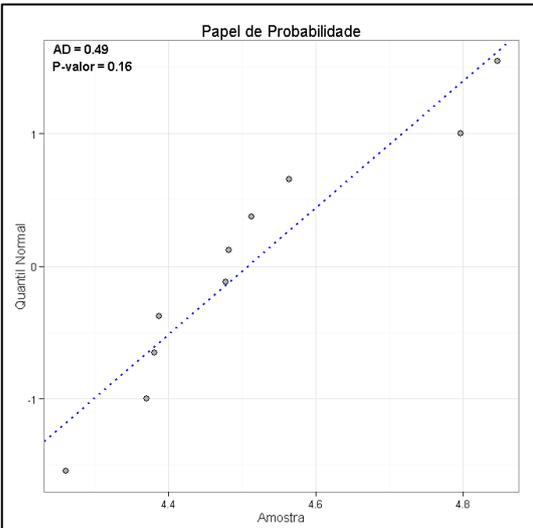
  

Amostra 19		Amostra 20	
			

Quadro 6 - Resultados dos testes de normalidade das amostras 21,22,23 e 24

Testes de Normalidade			
Amostra 21		Amostra 22	
Testes	P-valor	Testes	P-valor
Anderson - Darling	0,254	Anderson - Darling	0,4102
Kolmogorov - Smirnov	0,384	Kolmogorov - Smirnov	0,7443
Shapiro - Wilk	0,2419	Shapiro - Wilk	0,3173
Ryan - Joiner	0,3197	Ryan - Joiner	0,4654
			
Amostra 23		Amostra 24	
Testes	P-valor	Testes	P-valor
Anderson - Darling	0,342	Anderson - Darling	0,4251
Kolmogorov - Smirnov	0,496	Kolmogorov - Smirnov	0,2138
Shapiro - Wilk	0,3108	Shapiro - Wilk	0,4045
Ryan - Joiner	0,3585	Ryan - Joiner	0,4775
			

Quadro 7 - Resultados dos testes de normalidade das amostras 25,26 e 27.

Testes de Normalidade			
Amostra 25		Amostra 26	
Testes	P-valor	Testes	P-valor
Anderson - Darling	0,1272	Anderson - Darling	0,2771
Kolmogorov - Smirnov	0,244	Kolmogorov - Smirnov	0,6916
Shapiro - Wilk	0,1466	Shapiro - Wilk	0,203
Ryan - Joiner	0,1977	Ryan - Joiner	0,1333
			
Amostra 27			
Testes	P-valor	<h2>Testes de normalidade</h2>	
Anderson - Darling	0,1639		
Kolmogorov - Smirnov	0,391		
Shapiro - Wilk	0,2168		
Ryan - Joiner	0,2049		
			

## APÊNDICE B – Gráficos Boxplot da análise estática

Os gráficos de caixa em sequência juntamente com seus resumos descritivos constituíram uma apreciação quanto a mediana, média, mínimo e máximo dos dados sendo mostrados em quadros por peso e ordem de amostras com respectivas posições.

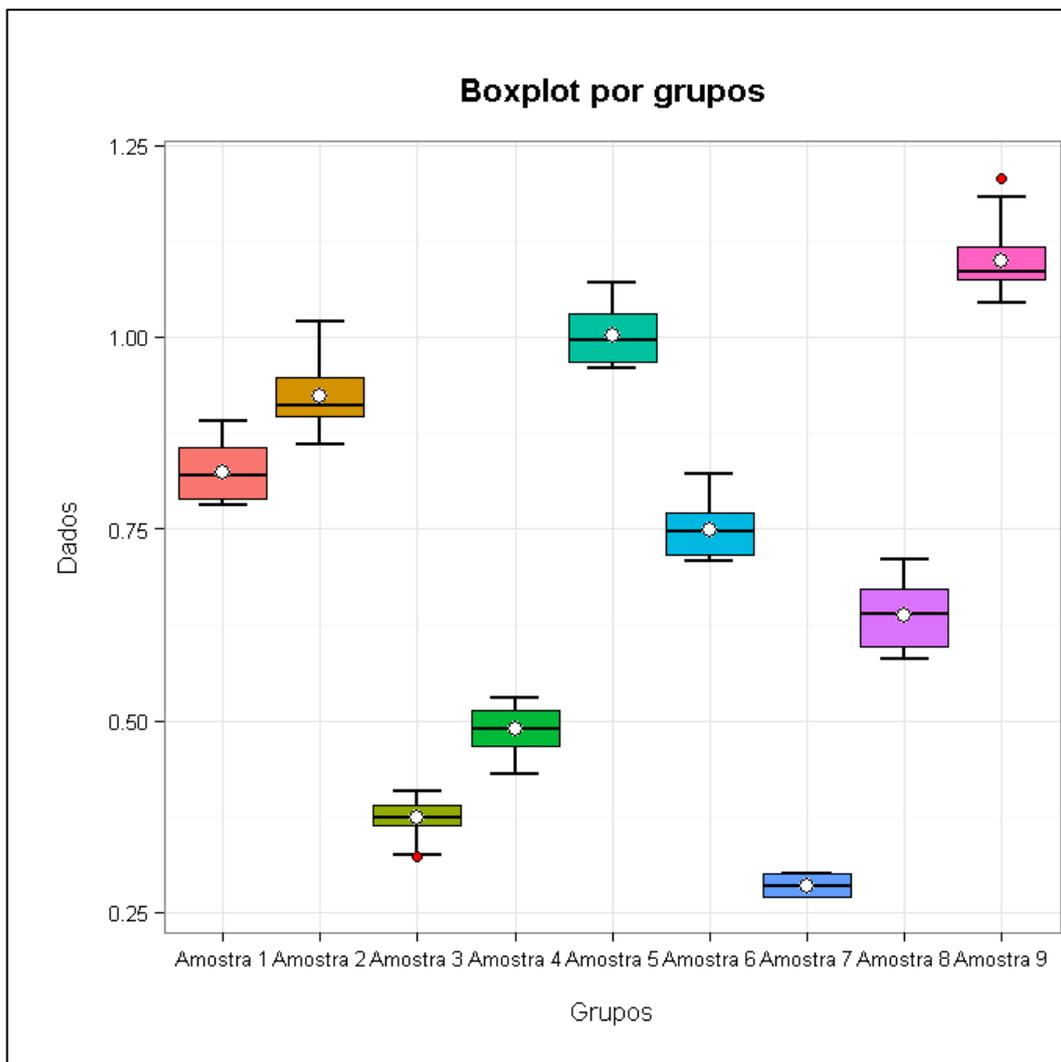


Figura 1b – Gráfico boxplot das amostras de dados com efeito de carga pontual de 1kg.

*Tabela 1b - Resumo descritivo de dados do boxplot da figura 1b.*

Grupos	Amostra 1 (mm)	Amostra 2 (mm)	Amostra 3 (mm)	Amostra 4 (mm)	Amostra 5 (mm)	Amostra 6 (mm)	Amostra 7 (mm)	Amostra 8 (mm)	Amostra 9 (mm)
<b>Mínimo</b>	0,78	0,86	0,323	0,43	0,96	0,70755	0,27	0,58	1,0442
<b>Média</b>	0,8244	0,923	0,374204	0,489	1,002	0,749212	0,285	0,638	1,09966
<b>Mediana</b>	0,82	0,91	0,37307	0,49	0,995	0,7475	0,285	0,64	1,0845
<b>Máximo</b>	0,89	1,02	0,409	0,53	1,07	0,82061	0,3	0,71	1,20753

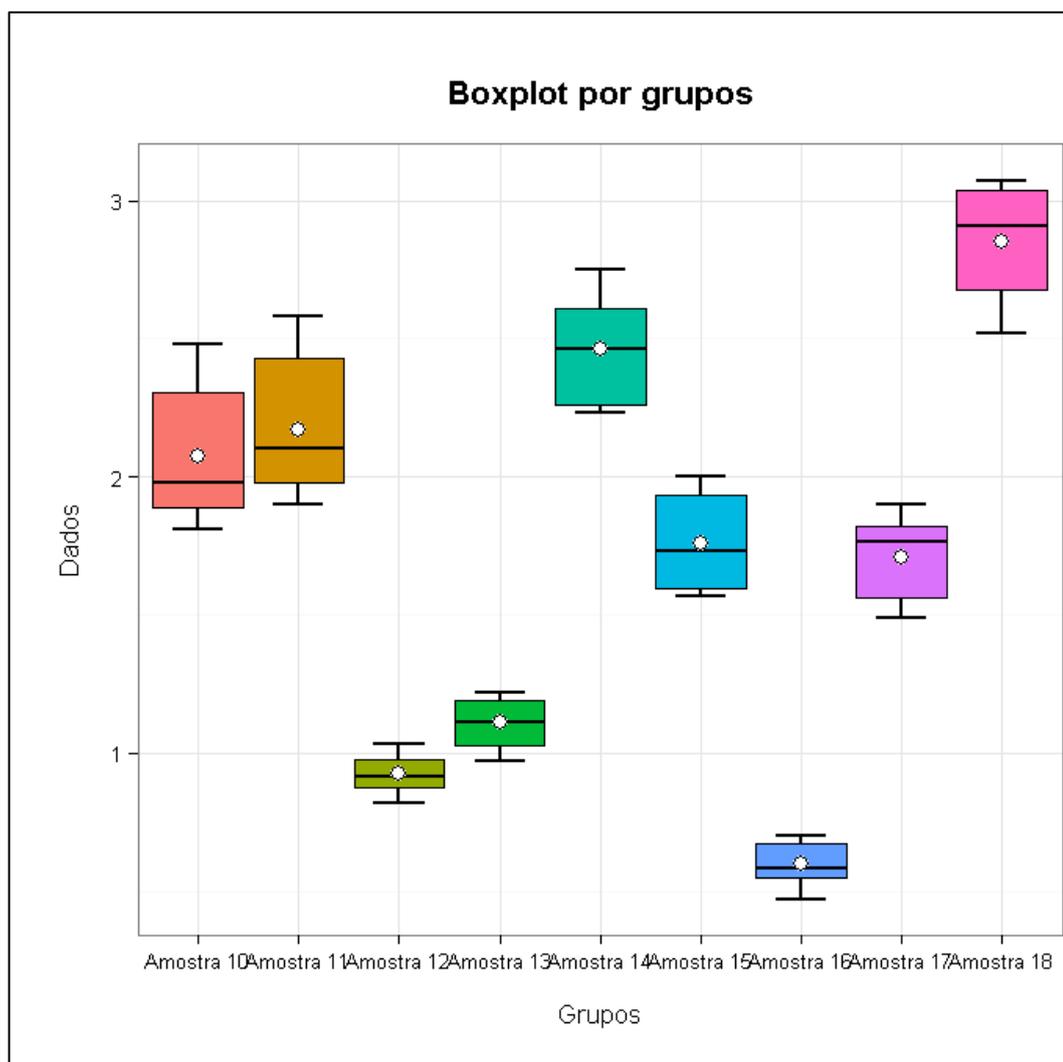


Figura 2b – Gráfico boxplot das amostras de dados com efeito de carga pontual de 2 kg.

*Tabela 2b –Resumo descritivo de dados do boxplot da figura 2b.*

Grupos	Amostra 10 (mm)	Amostra 11 (mm)	Amostra 12 (mm)	Amostra 13 (mm)	Amostra 14 (mm)	Amostra 15 (mm)	Amostra 16 (mm)	Amostra 17 (mm)	Amostra 18 (mm)
<b>Mínimo</b>	1,81	1,9	0,819	0,97	2,23	1,568	0,47	1,49	2,5192
<b>Média</b>	2,07444	2,169	0,926387	1,111	2,465	1,75766	0,6	1,71	2,85304
<b>Mediana</b>	1,98	2,1	0,916035	1,115	2,465	1,73005	0,585	1,765	2,91005
<b>Máximo</b>	2,48	2,58	1,033	1,22	2,75	2,003	0,7	1,9	3,0733

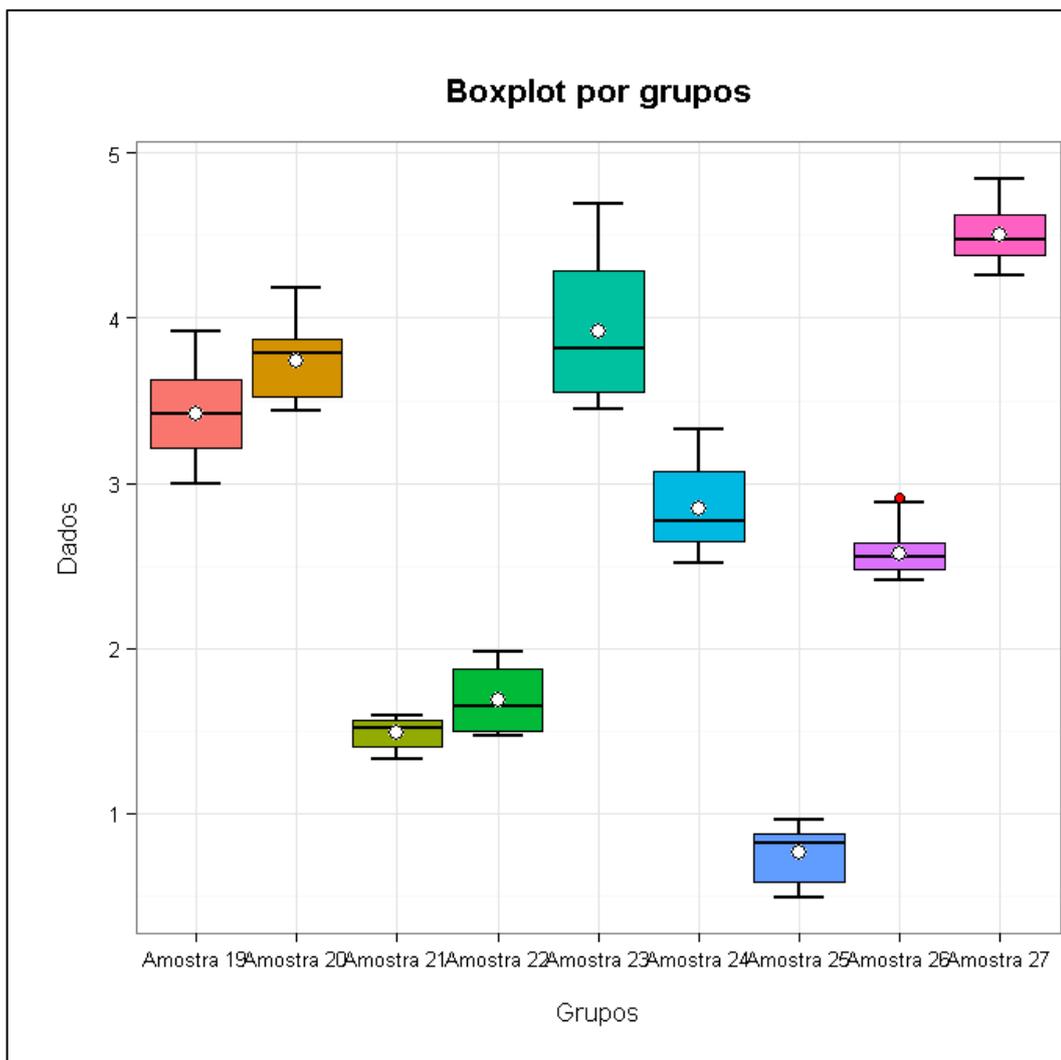


Figura 3b – Gráfico boxplot das amostras com o efeito de carga pontual de 3 kg.

*Tabela 3b - Resumo descritivo de dados do boxplot da figura 3b.*

Grupos	Amostra 19 (mm)	Amostra 20 (mm)	Amostra 21 (mm)	Amostra 22 (mm)	Amostra 23 (mm)	Amostra 24 (mm)	Amostra 25 (mm)	Amostra 26 (mm)	Amostra 27 (mm)
<b>Mínimo</b>	3	3,44	1,329	1,47	3,45	2,5175	0,49	2,41	4,26
<b>Média</b>	3,42111	3,742	1,48567	1,684	3,923	2,84776	0,766	2,577	4,5075
<b>Mediana</b>	3,42	3,785	1,513	1,65	3,815	2,7665	0,825	2,55	4,4795
<b>Máximo</b>	3,92	4,18	1,592	1,98	4,69	3,33	0,96	2,91	4,8466

## APÊNDICE C – Calibração LVDT da análise estática

Os valores resultantes da calibração do LVDT seguem a seguir na tabela 1c.

*Tabela 1c - Dados de calibração do LVDT*

Teste	Tensão (V)	Deslocamento (mm)
1	0,0269	0
2	0,2283	1
3	0,4327	2
4	0,6390	3
5	0,8447	4
6	1,0495	5
7	1,2543	6
8	1,4603	7
9	1,6644	8
10	1,8701	9
11	2,0752	10
12	2,2803	11
13	2,4857	12
14	2,6898	13
15	2,8937	14
16	3,1003	15
17	3,3069	16
18	3,5117	17
19	3,7177	18
20	3,9218	19
21	4,1263	20
22	4,3317	21
23	4,5380	22
24	4,7250	23
25	4,7305	24

Com esses valores adotando a correlação de Pearson concebida pela equação 1c encontra-se a matriz de correlação (tabela 2c).

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1c)$$

*Tabela 2c- matriz correlação*

	Tensão (V)	Deslocamento (mm)
Tensão (V)	1	0,999634951
Deslocamento (mm)	0,999634951	1

Através da leitura da matriz de correlação de dados. Verifica-se uma correlação positiva com o valor de 0,999634951, podendo ser traduzida em porcentagem como uma correlação de 99,96 % sendo considerada uma correlação muito forte entre os valores de tensão e os deslocamentos. Outra matriz a ser analisada é de P-valores que se mostra na tabela 3c a seguir.

Tabela 3c - Matriz de P-valores

	Tensão (V)	Deslocamento (mm)
Tensão (V)	1	$1,39 \times 10^{-37}$
Deslocamento (mm)	$1,39 \times 10^{-37}$	1

Esta matriz confirma a correlação, pois P-valor de  $1,39 \times 10^{-37}$  é muito menor que o nível de significância sugerido de 5% por literatura já consagrada. Vale ressaltar se p-valor for igual ou menor a este nível de significância, demonstra que existe uma correlação expressiva entre as variáveis. O gráfico abaixo mostra uma complementação quanto esta afirmativa.

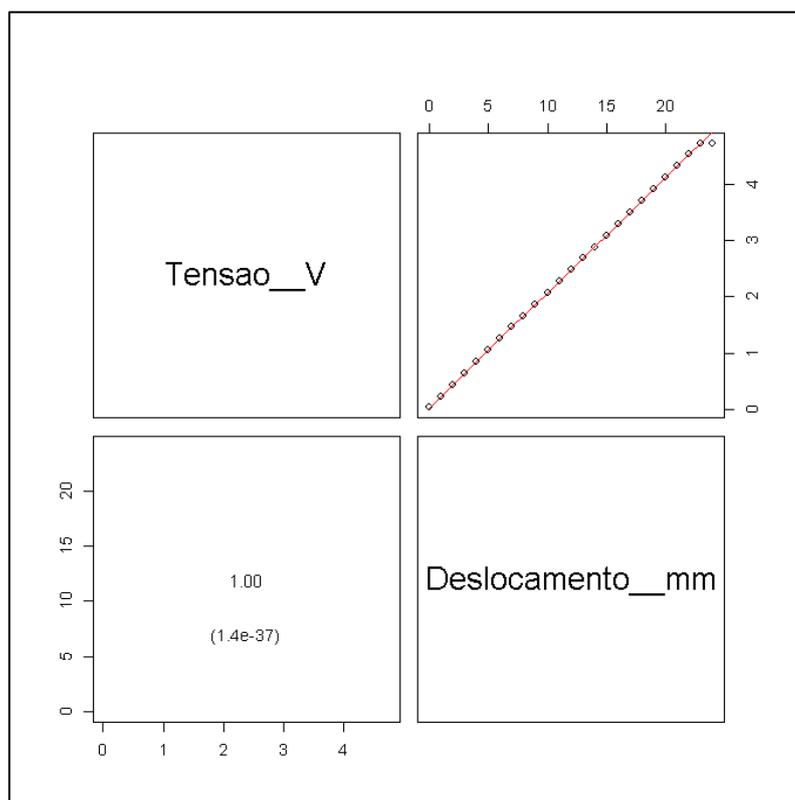


Figura 1c - Gráfico de correlação de dados.

Verifica-se que as duas variáveis possuem uma associação linear positiva entre elas mesmas. Portanto, quanto mais se aumenta o valor de deslocamento mais se eleva também valor de tensão, mostrando efetivamente a correlação de dados.

Vale ressaltar ainda que foi adotado também a correlação de Pearson na abordagem de calibração dos acelerômetros 1, 2 e 3 sendo mostrada de maneira subsequente no APÊNDICE D do presente trabalho.

## APÊNDICE D – Calibração dos acelerômetros da análise dinâmica

A seguir os valores da calibragem dos acelerômetros 1, 2 e 3 respectivamente.

*Tabela 1d - Dados de calibração acelerômetro 1*

Teste	Tensão (V)	Aceleração (m/s <sup>2</sup> )
1	-0,0159	0
2	0,6436	9,81
3	0,64	9,773
4	0,6332	9,661
5	0,6216	9,476
6	0,6046	9,218
7	0,582	8,89
8	0,5554	8,496
9	0,5246	8,036
10	0,4895	7,515
11	0,4507	6,937
12	0,4083	6,306
13	0,3607	5,627
14	0,311	4,905
15	0,2585	4,146
16	0,2048	3,355
17	0,1505	2,539
18	0,0909	1,703
19	0,0327	0,855
20	-0,0259	0
21	-0,0845	-0,855
22	-0,1434	-1,703
23	-0,2011	-2,539
24	-0,2567	-3,355
25	-0,3122	-4,146
26	-0,365	-4,905
27	-0,4163	-5,627
28	-0,4639	-6,306
29	-0,5078	-6,937
30	-0,5481	-7,515
31	-0,5847	-8,036
32	-0,6171	-8,496
33	-0,6448	-8,89
34	-0,6693	-9,218
35	-0,6873	-9,476
36	-0,7019	-9,661
37	-0,7101	-9,773
38	-0,7132	-9,81

Foi empregado 38 testes em cada um dos três acelerômetros justificando por serem medidas de 5° em 5° graus e dois valores dos extremos de 0° e 180°.

Adotando o procedimento de calibragem obtém-se a correlação de Pearson pela equação 1c da calibragem LVDT encontrando sua matriz de correlação (tabela 2d).

**Tabela 2d - Matriz de correlação do acelerômetro 1**

	Tensão (V)	Aceleração(m/s <sup>2</sup> )
Tensão (V)	1	0,999967584
Aceleração (m/s <sup>2</sup> )	0,999967584	1

Verifica-se uma correlação excelente de 99,99 %. Em seguida novamente a análise de P-valor pela matriz de P-valores.

**Tabela 3d - Matriz de P-valores**

	Tensão (V)	Aceleração (m/s <sup>2</sup> )
Tensão (V)	1	$5,4 \times 10^{-77}$
Aceleração (m/s <sup>2</sup> )	$5,4 \times 10^{-77}$	1

O P-valor se mostra ainda menor que o primeiro caso tendo um p-valor de  $5,4 \times 10^{-77}$  muito menor que o 5% estabelecido como valor limite ficando dentro dos padrões norteadores. Assim obteve-se bons resultados, tanto que o gráfico abaixo de correlação de dados expressou linearidade dos dados, confirmando as indagações.

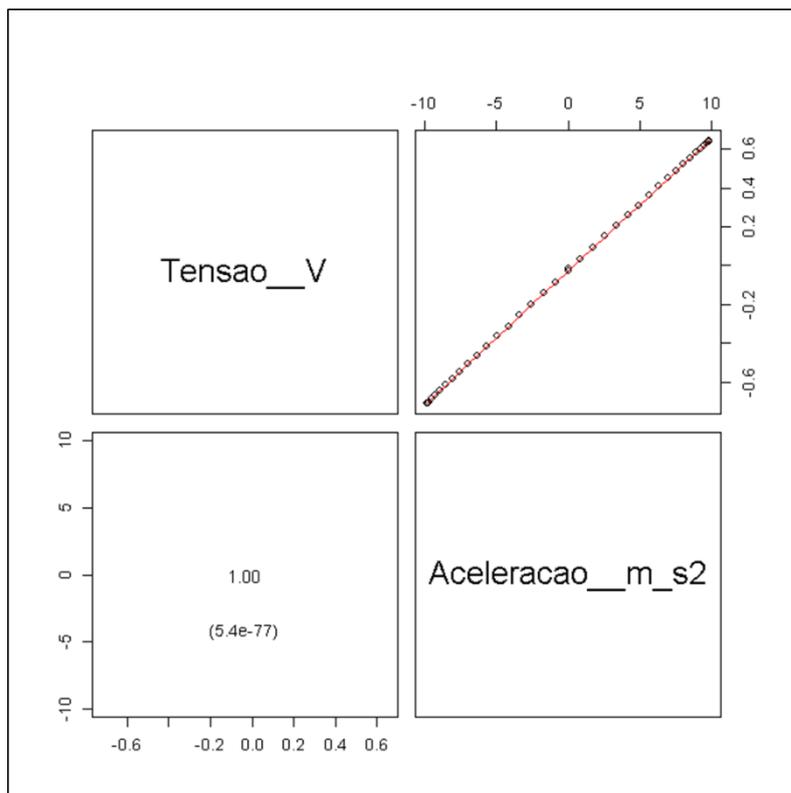


Figura 1d - Gráfico de correlação de dados.

**Tabela 4d- Dados de calibração do acelerômetro 2**

Teste	Tensão (V)	Aceleração (m/s <sup>2</sup> )
1	-0,0006	0
2	0,6726	9,81
3	0,6708	9,773
4	0,6644	9,661
5	0,6528	9,476
6	0,6357	9,218
7	0,614	8,89
8	0,5875	8,496
9	0,556	8,036
10	0,5215	7,515
11	0,4816	6,937
12	0,4398	6,306
13	0,3918	5,627
14	0,3415	4,905
15	0,2887	4,146
16	0,2341	3,355
17	0,1782	2,539
18	0,1187	1,703
19	0,0598	0,855
20	0	0
21	-0,0598	-0,855
22	-0,1196	-1,703
23	-0,1791	-2,539
24	-0,2353	-3,355
25	-0,2917	-4,146
26	-0,3455	-4,905
27	-0,3979	-5,627
28	-0,4465	-6,306
29	-0,4913	-6,937
30	-0,5334	-7,515
31	-0,5707	-8,036
32	-0,6039	-8,496
33	-0,6323	-8,89
34	-0,6573	-9,218
35	-0,6763	-9,476
36	-0,6906	-9,661
37	-0,6995	-9,773
38	-0,7028	-9,81

**Tabela 5d- Matriz de correlação do acelerômetro 2**

	Tensão (V)	Aceração(m/s <sup>2</sup> )
Tensão (V)	1	0,99994542
Aceração (m/s <sup>2</sup> )	0,99994542	1

**Tabela 6d - Matriz de P-valores**

	Tensão (V)	Aceração (m/s <sup>2</sup> )
Tensão (V)	1	6,4 x10 <sup>-73</sup>
Aceração (m/s <sup>2</sup> )	6,4 x10 <sup>-73</sup>	1

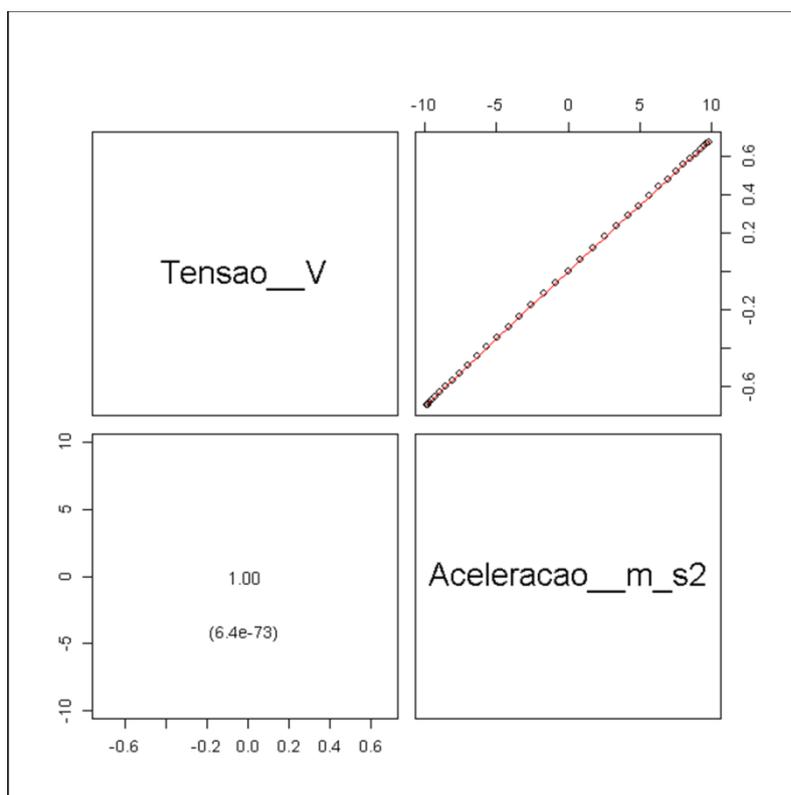


Figura 2d - Gráfico de correlação de dados.

Os valores encontrados foram de fator de correlação com 99,99% sendo caracterizado como correlação muito forte mais o p-valor  $6,4 \times 10^{-73}$  abaixo de 5% e o fator a linearidade da figura 2d comprovando a boa correlação dos dados calibrados estabelecendo assim medidas seguras pelos sensores em campo.

*Tabela 7d - Dados da calibração do acelerômetro 3*

<b>Teste</b>	<b>Tensão (V)</b>	<b>Aceleração (m/s<sup>2</sup>)</b>
1	-0,0003	0
2	0,6583	9,81
3	0,6564	9,773
4	0,6491	9,661
5	0,6369	9,476
6	0,6201	9,218
7	0,5981	8,89
8	0,5722	8,496
9	0,5408	8,036
10	0,5069	7,515
11	0,4684	6,937
12	0,4266	6,306
13	0,3799	5,627
14	0,3302	4,905
15	0,2789	4,146
16	0,2261	3,355
17	0,1724	2,539
18	0,1147	1,703
19	0,0574	0,855
20	-0,0003	0
21	-0,0574	-0,855
22	-0,1154	-1,703
23	-0,1721	-2,539
24	-0,2258	-3,355
25	-0,2795	-4,146
26	-0,3308	-4,905
27	-0,3812	-5,627
28	-0,4263	-6,306
29	-0,4688	-6,937
30	-0,5087	-7,515
31	-0,5435	-8,036
32	-0,5743	-8,496
33	-0,6012	-8,89
34	-0,6244	-9,218
35	-0,6415	-9,476
36	-0,6543	-9,661
37	-0,6616	-9,773
38	-0,6641	-9,81

**Tabela 8d -Matriz de correlação do acelerômetro 3**

	Tensão (V)	Aceleração(m/s <sup>2</sup> )
Tensão (V)	1	0,999997016
Aceleração (m/s <sup>2</sup> )	0,999997016	1

**Tabela 9d - Matriz de P-valores**

	Tensão (V)	Aceleração (m/s <sup>2</sup> )
Tensão (V)	1	$1,2 \times 10^{-95}$
Aceleração (m/s <sup>2</sup> )	$1,2 \times 10^{-95}$	1

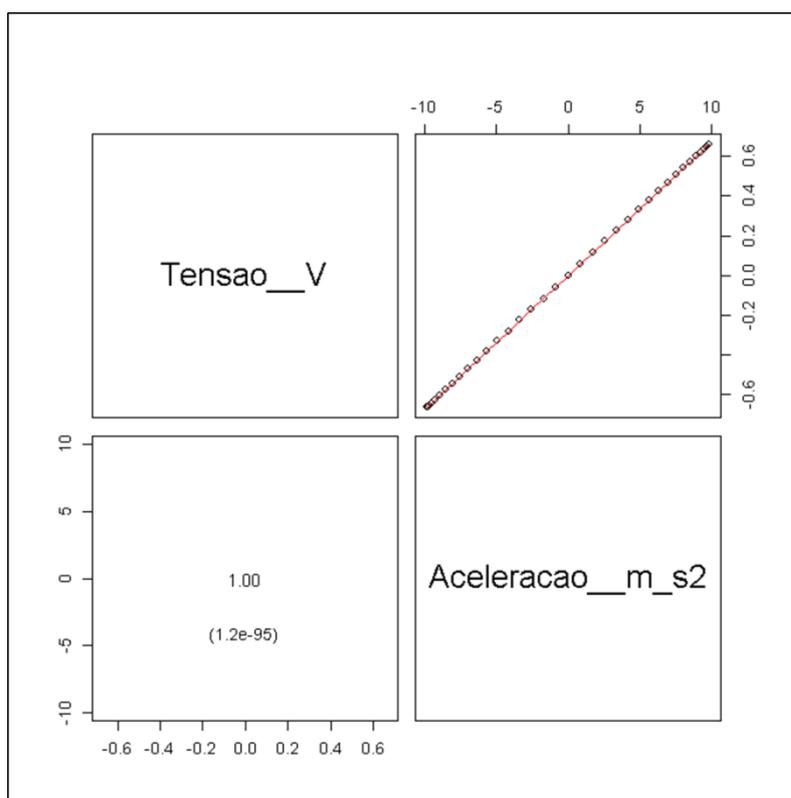


Figura 3d - Gráfico de correlação de dados.

Os valores de correlação entre os acelerômetro 2 e 3 se equivaleram com fator de correlação de Pearson novamente de 99,99% praticamente 100 % caracterizando-se muito forte já o valor de p-valor obteve na proporção de  $1,2 \times 10^{-75}$  dentro dos padrões abaixo de 5% e a figura 3d denota novamente a linearidade comprovando uma boa correlação dos dados calibrados estabelecendo também medidas seguras para medição pelos sensores em campo.