

## **Análise experimental e numérica de deformações e características dinâmicas de estrutura metálica com telhas PET**

Samuel Antão Ferreira do Nascimento<sup>1</sup>, Lourival Paula de Góes<sup>2</sup>, Raimundo Pereira de Vasconcelos<sup>3</sup>.

### **RESUMO**

A presente pesquisa buscou fazer uma análise em uma estrutura metálica com telhas de politereftalato de etileno (PET), com relação a deformações impostas por carregamentos estáticos e parâmetros modais obtidos por meio de vibração livre. Foi observado o comportamento das barras de aço CA-60 de 4,2 mm pré-tracionadas que integram o sistema de terças da cobertura. Tanto as deformações quanto os parâmetros modais foram obtidos através de procedimento experimental, cujos valores foram comparados com uma análise de modelos numéricos empregando o programa SAP2000. Na análise experimental foram utilizados LVDTs conectados a um sistema de aquisição de dados, relógios comparadores e acelerômetros. Os resultados da análise numérica em termos de deformações apresentaram convergência com aqueles obtidos na análise experimental a medida em que os elementos estruturais foram discretizados em malhas com um número maior de elementos finitos. Empregando o modelo com a discretização que apresentou os resultados mais próximos daqueles obtidos na análise experimental foram encontrados os parâmetros modais em termos de frequências e modos de vibração à flexão, bem como a taxa de amortecimento, a qual foi de aproximadamente 1%. A estrutura se mostrou muito flexível e sensível tanto pela análise de deformações quanto pelos efeitos dinâmicos de vibração livre.

**Palavras-chave:** Estrutura metálica. MEF. Telhas PET. Análise modal. Vibração livre.

### **1 INTRODUÇÃO**

Observando um panorama geral, identifica-se que há uma tendência de inovações em técnicas construtivas com a utilização de materiais reciclados (NGUGI; KALULI; ABIERO-GARIY, 2017; PERERA et al., 2019) e sua aplicação de materiais compósitos (ALVES et al, 2015; FARIAS; GUILHON; SANTO, et al, 2016). Especificamente nas coberturas, nota-se diversas opções de novos materiais para fabricação de telhas (GAGGINO et al, 2018), onde a substituição dos materiais tradicionais de construção por materiais reciclados é uma solução sustentável que mitiga as preocupações com aterros sanitários e reduz a necessidade de material virgem (PERERA et al., 2019).

A reciclagem de resíduo plástico para o desenvolvimento de novos materiais parece ser uma das melhores soluções para livrar-se deste tipo de resíduo. Essa operação tem muitas vantagens

---

1 Mestrado em Engenharia Civil – UFAM [antaoleumas@gmail.com](mailto:antaoleumas@gmail.com)

2 Mestrado em Engenharia Civil – UFAM [lgoes@uea.edu.br](mailto:lgoes@uea.edu.br)

3 Doutor em Engenharia Civil – UFRJ, Professor do Departamento de Engenharia Civil da UFAM [vasconcelos@ufam.edu.br](mailto:vasconcelos@ufam.edu.br)

econômicas e ecológicas (GOUASMI et al., 2017). Porém, os argumentos de economia e de melhores propriedades podem, no caso de coberturas, esbarrar em problemas de possíveis deformações excessivas e de vibrações, ocasionados pela geometria e o próprio material constituinte, resultando em estruturas com menores taxas de amortecimento e rigidez/massa (HOLANDA et al, 2018).

A análise de vibrações na engenharia civil é notavelmente de suma importância, visto que, observa-se diversos problemas relacionados a ações vibratórias em edificações (RIBEIRO, 2018), tanto pela ação humana (LIPENER; BRASIL, 2016), quanto pela ação da própria natureza como nos abalos sísmicos (CRUZ; MIRANDA, 2018) e ventos (GÓMEZ; GEURTS; METRIKINE, 2018).

Os avanços tecnológico 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).

Especificamente nas estruturas metálicas (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 geraram vantagens, ocasionaram também desvantagens com relação aos fenômenos dinâmicos, aumentando consideravelmente a vulnerabilidade através da ação de seres humanos e podendo assim deflagrar efeitos maiores que os previstos na análise estática (CUNHA, et al, 2014).

### **1.1 Descrição da estrutura**

A estrutura em análise foi idealizada como sendo um sistema estrutural composto por uma cobertura com telhas plásticas de PET juntamente com uma estrutura metálica alternativa se apresentando desta maneira como modelo experimental (Figuras 1 a 3).

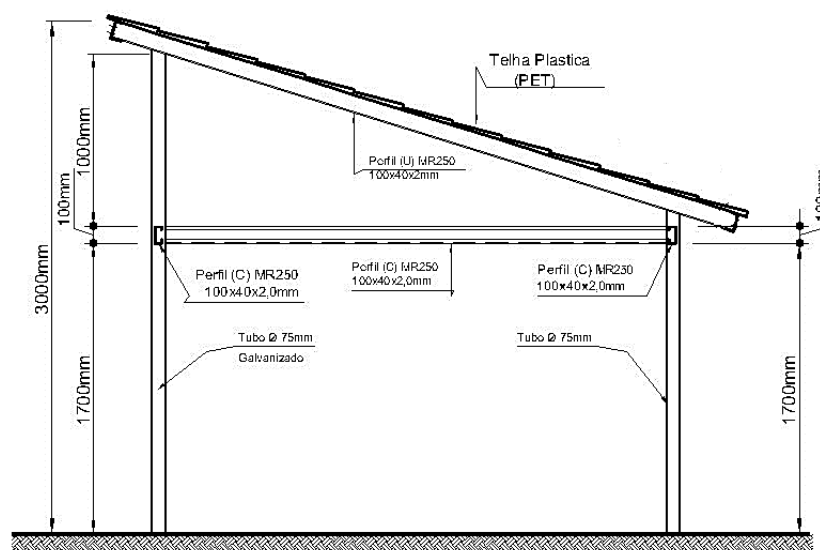


Figura 1 - Planta de elevação da estrutura metálica do modelo experimental.

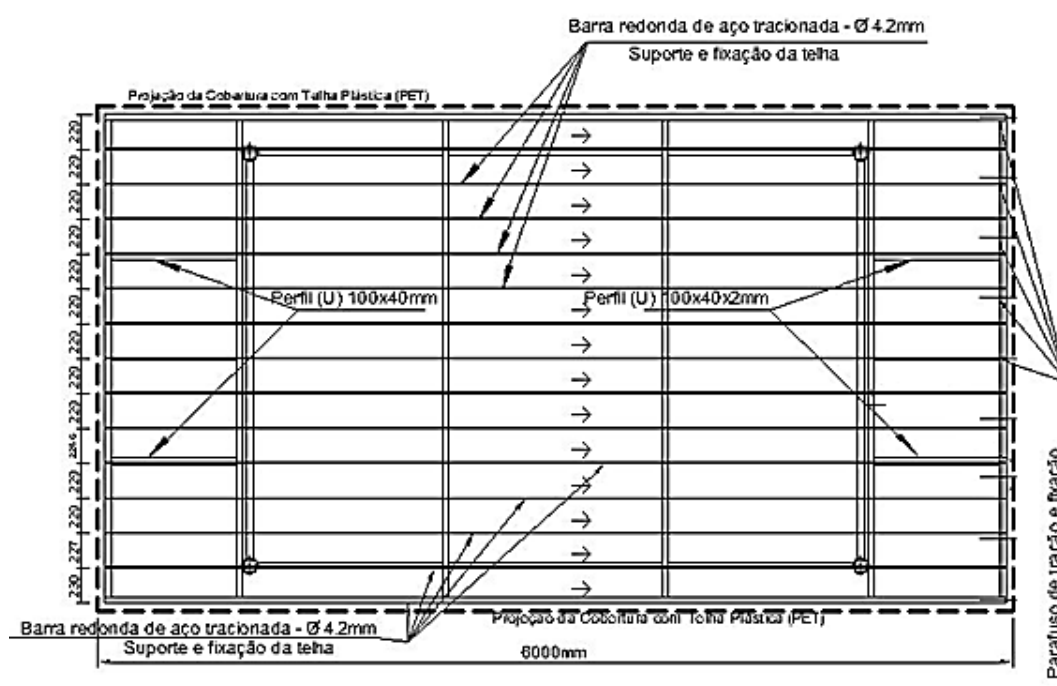


Figura 2 - Planta da estrutura da cobertura no nível dos fios de aço.

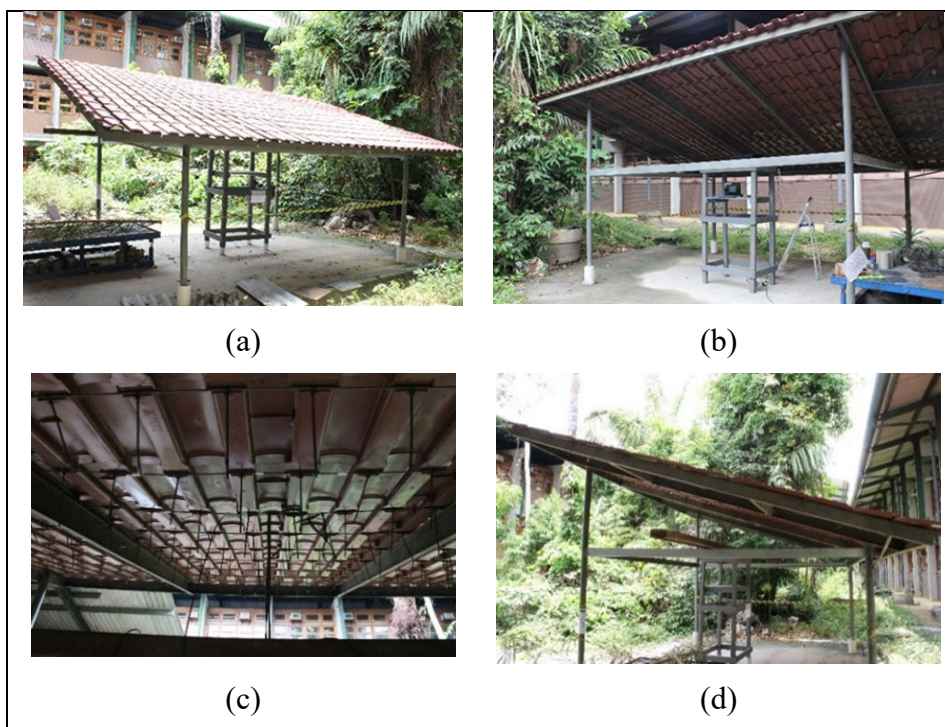


Figura 3 - Estrutura metálica com cobertura de telhas PET apresentando: (a) Vista frontal; (b) Vista posterior; (c) Vista inferior e (d) Vista lateral.

A estrutura analisada é definida como alternativa abrangendo materiais não usuais, cuja as características enquadram-se como um sistema de cobertura ecológica (FERREIRA; ANDRADE, 2009; TESKE; GONÇALVES; NAGALLI, 2015; SANTO et al, 2016). Pode-se definir ainda como uma tecnologia alternativa, uma vez que é composta por materiais alternativos, também sendo denominado como um sistema construtivo alternativo (FREIRE; BERALDO, 2003). 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 e no lugar das telhas convencionais de cerâmica ou fibrocimento foram utilizadas telhas poliméricas, oriundas do processo de reciclagem das garrafas de Polietileno Tereftalato (PET).

## 1.2 Análise de deformações

Tanto o aspecto construtivo da cobertura quanto a deformações ganha destaque pelas suas terças atuarem com uma pré-tensão imposta por meio de torquimetro, comportando-se com aspecto similar a uma tensoestrutura (OBATA; EGÍDIO, 2011; MEIRELLES; KISHI, 2014; RIMOLI, 2018). Sendo a tensoestrutura ou *tensegrity* constituída por cabos, barras e membranas que

trabalham de maneira mútua as tensões de compressão e tração, a cobertura com suas telhas PET faz o papel semelhante a uma membrana enquanto os fios de aço atuam de maneira similar aos cabos de aço, levando ao tensionamento dos elementos por meio da tração, conduzindo a um equilíbrio mútuo com as vigas comprimidas. (WANG, 2014; XU et al, 2018). Esse modelo estrutural somente se tornou viável devido ao baixo peso específico das telhas PET sobre a estrutura e pelo modo de sua disposição através de sua fixação por meio de presilhas aos fios de aço.

A diferenciação envolvendo cabos, barras e os elementos de fios de aço que compõem as terças entre a estrutura analisada e àquelas convencionalmente construídas está não somente pelo modo de fabricação e distinção de comportamento mecânico como também pela forma e ordenação de seus elementos constituintes. Entretanto, devido à escassez de informações desses tipos de elementos na literatura, quanto ao comportamento de fio de aço em coberturas tensionadas, decidiu-se verificar as deformações nesses elementos na estrutura sob a ação de carregamentos estáticos, observando a convergência de diferentes discretizações pelo método dos elementos finitos (MEF), por meio do programa comercial SAP2000 e a verificação quanto a flexibilidade da estrutura, pelos valores de deflexão, levando em consideração o estado limite de serviço preconizado pelas normas brasileiras NBR 8800 (ABNT, 2008) e NBR 14762 (ABNT, 2010).

### **1.3 Análise de vibrações**

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).

Diante desse contexto se fez necessário uma investigação quanto as especificidades da presente 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 quanto experimental de maneira a construir um modelo matemático que caracterize o comportamento dinâmico da estrutura em análise, por meio da identificação dos parâmetros modais, tais como frequências naturais, modos de vibração e taxas de amortecimento (STUTZ; TENENBAUM; CORREA, 2015). Esses parâmetros são em função da massa, amortecimento e rigidez da estrutura, cujas características singulares, podem levar, ao monitoramento e

detecção de possíveis danos estruturais, avaliando a integridade da estrutura (PARK; OH, 2018; RANGEL; RANGEL; STUTZ, 2016).

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

Inicialmente, verificou-se o comportamento estático da estrutura sujeita aos efeitos de cargas pontuais originárias da aplicação de pesos com massas de 1 kg, 2kg e 3kg, observando-se além dos valores de deformação e a natureza de flexibilidade do elemento estrutural, também o padrão e a significância dos valores coletados. Buscou-se desta maneira encontrar a convergência entre os dados experimentais e dados numéricos no decorrer da mudança de discretização do modelo, consequentemente, encontrando-se a melhor malha numérica para posterior análise de vibrações.

Foi utilizado nesta pesquisa o *softwares* SAP2000 versão 14.0.0, AqDados, AqAnalysis, além disso, sensor de deslocamento LVDT modelo DTH-A-30 do fabricante Kyowa, sistema de aquisição de dados ADS2002, dois relógios comparadores modelo 575-121, três acelerômetros modelo AS-1GA do fabricante KYOWA.

### **2.1. Características físicas da telha de PET**

Para a determinação das características físicas e mecânicas das telhas de PET necessárias a análise numérica foram determinados o módulo de elasticidade longitudinal e o coeficiente de Poisson por meio de ensaios de tração conforme a ASTM D 638-14, enquanto que a massa específica foi determinada de acordo com a ASTM D 792-13.

### **2.2. Análise experimental estática de deformações**

A 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 2 a). A escolha de se adotar somente um vão para medição foi feita com o objetivo de melhor manuseio dos sensores, computador e do próprio aquisitor de dados, fato também que norteou a localização dos pesos. Sendo assim, o primeiro sensor foi fixado a 33 cm de distância da viga transversal na seção de análise (viga referencial, Figura 4.a), 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” a 99

cm. (Figura 4.b). Além disso, foram estabelecidos mais três pontos no vão central, sendo colocadas massas, da esquerda para direita, em 53,5 cm, 73,5 cm e 88 cm em relação a viga referencial. Estas posições empregadas foram nomeadas respectivamente em “1”, “2” e “3” (Figura 4.b).

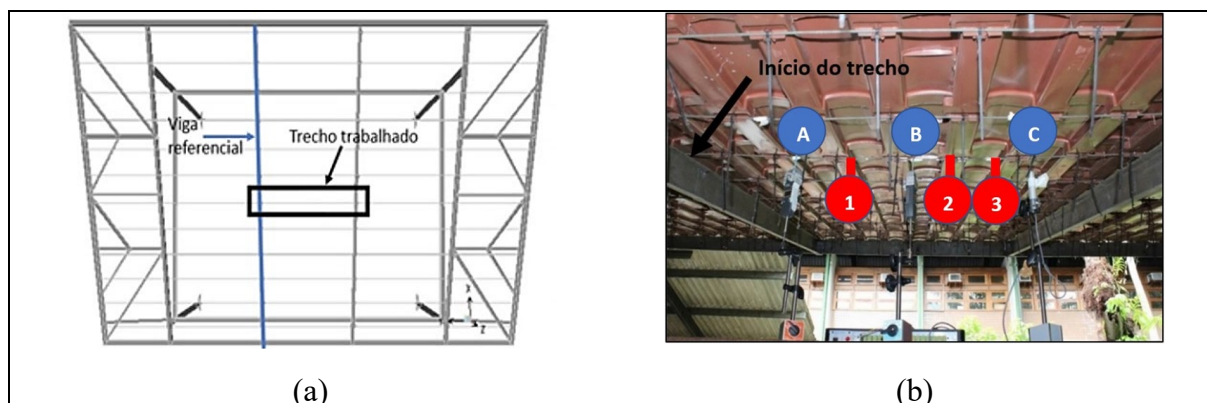


Figura 4 - (a) Viga referencial e trecho trabalhado. (b) Localização dos medidores de deformação e das cargas.

Após a definição da localização dos sensores e das massas, foram colocados os mecanismos de fixação dos relógios comparadores, os quais ficaram pendurados no fio de aço central, tendo como base os apoios magnéticos. Por outro lado, o LVDT foi fixado por um apoio magnético com sua ponta encostada no fio de aço, de modo a ficar suscetível a qualquer movimento.

### 2.3. Análise numérica estática de deformações

No modelo numérico para a análise estática das deformações levou-se em consideração somente a estrutura metálica. Não houve a inserção da cobertura com as telhas, visto que na análise experimental tendo em vista que as medições foram realizadas com as terças já deformadas pelas pelo peso próprio das telhas e da própria estrutura, logo, a análise envolveu tão somente as cargas pontuais e a força longitudinal do fio de aço. Deve-se ressaltar que também já havia uma força de 1,85 kN tensionando o eixo longitudinal das terças advinda do pré-tensionamento destas.

Todas as terças foram analisadas como barras com diâmetro de 4,2 mm, enquanto que para os demais elementos da estrutura foram empregados vigas e pilares de acordo com os perfis

empregados na confecção da estrutura (*Type Straight Frame* no SAP2000). Foi considerado o efeito das cargas pontuais no estudo, estabelecendo-se seis pontos localizados no trecho da terça central, sendo os primeiros pontos A(33 cm), B (66 cm) e C (99 cm) para simular os pontos de medição de deflexão da análise experimental e os pontos 1 (53,5 cm), 2 (73,5 cm) e 3 (88 cm), de inserção dos pesos (figura 5).

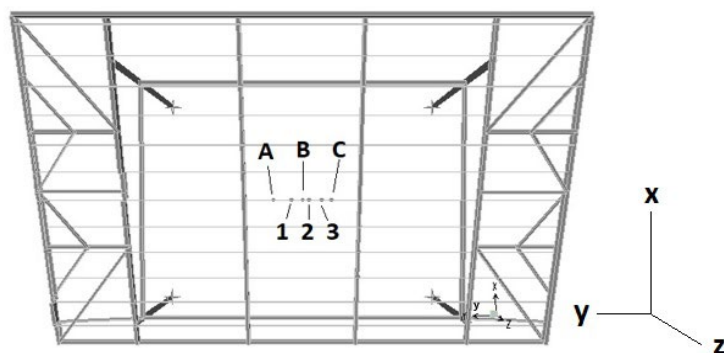
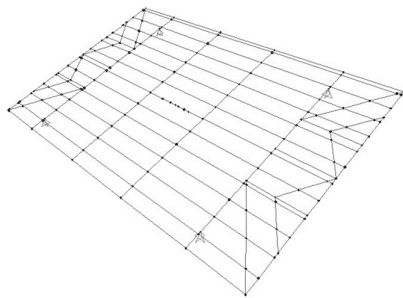
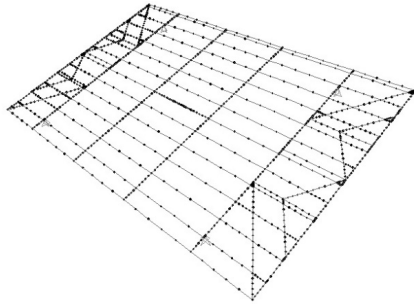
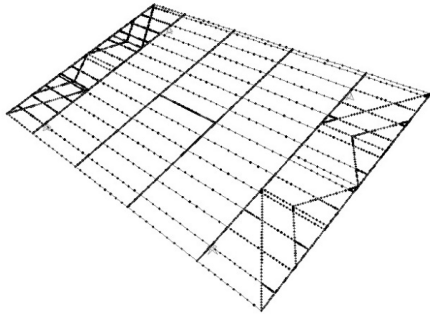
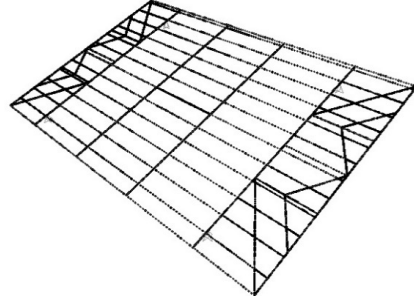


Figura 5 - Vista superior da estrutura com pontos da análise em modelo no SAP2000.

Além da inclusão de nós nos pontos de visualização e de carregamento A, B, C, e 1, 2 e 3, respectivamente, foi realizada a inserção de nós nas interseções de cada elemento, onde está malha de elementos resultante foi definida como 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. Em seguida cada foi dividido em outros 5 elementos de mesmo comprimento e 6 nós, configurando-se na chamada de discretização 5 (Quadro 1). A terceira discretização constituiu-se da divisão de cada elemento da discretização inicial em outros 10 de mesmo comprimento e 11 nós, sendo nomeada de discretização 10 (Quadro 1). Para a quarta discretização, fez-se 25 divisões de mesmo tamanho e 26 nós em cada elemento definido na discretização inicial, sendo designada com discretização 25 (Quadro 1). Além disso, para análise da curva de convergência dos elementos finitos foi incluindo ainda as discretizações com 15, 20, 30 e 35 divisões de cada elemento da malha inicial

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 foi o que apresentou mais divisões.

#### 2.4. Análise experimental dinâmica de vibrações

A análise experimental dinâmica se iniciou com a localização dos pontos nos 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 que esta foi empregada na análise estática das deformações quanto a flexão. Os pontos onde ficaram os acelerômetros eram equidistantes, sendo enumerados conforme a figura 6, que mostra uma vista superior da estrutura. A escolha desses pontos teve como objetivo obter uma visão global do comportamento dinâmico da estrutura.

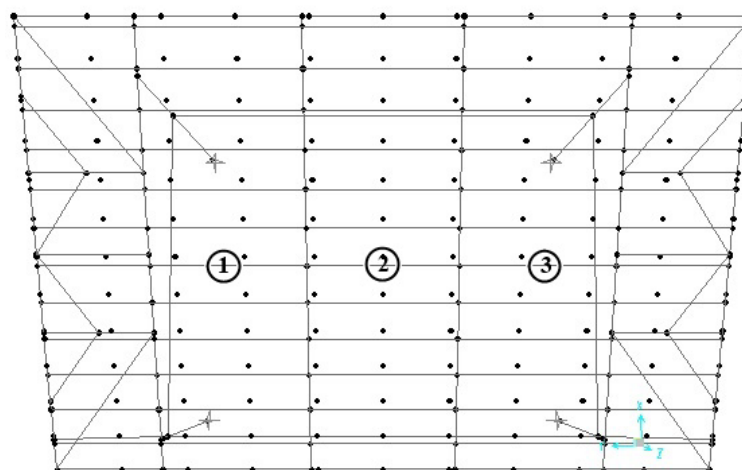


Figura 6 - Pontos enumerados e marcados dos acelerômetros na estrutura.

Para o ensaio de vibração livre foi aplicada 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, depois do corte de uma dessas alças do fitilho na região mediana do mesmo, a massa subitamente despencou, induzindo uma vibração livre na estrutura. Este ensaio se baseou em ensaios de mesma natureza, mas realizados em pontes e passarelas, onde se utilizam o mesmo procedimento, mudando apenas a proporção da massa e dando lugar a um cabo de aço para suportar valores de carga mais elevados (MAGALHÃES et al, 2010; CAETANO; CUNHA; MAGALHÃES, 2010). Deste modo, foi possível obter uma medição simultânea dos acelerômetros nos três pontos.

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 (CONCEIÇÃO JR, et al, 2016; AOYAMA, et al, 2018; BRANDÃO, et al, 2018). Com o espectro de Fourier verificou-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. 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 (PEREIRA, et al, 2012).

## 2.5. Análise numérica dinâmica de vibrações

Para a análise numérica quanto as vibrações, foi construído um modelo 3D da estrutura empregando o *software* comercial SAP2000, baseado na discretização com menor quantidade de elementos possível, a qual apresentou a melhor convergência de resultados com o modelo experimental na análise estática de deformações (Figura 7).

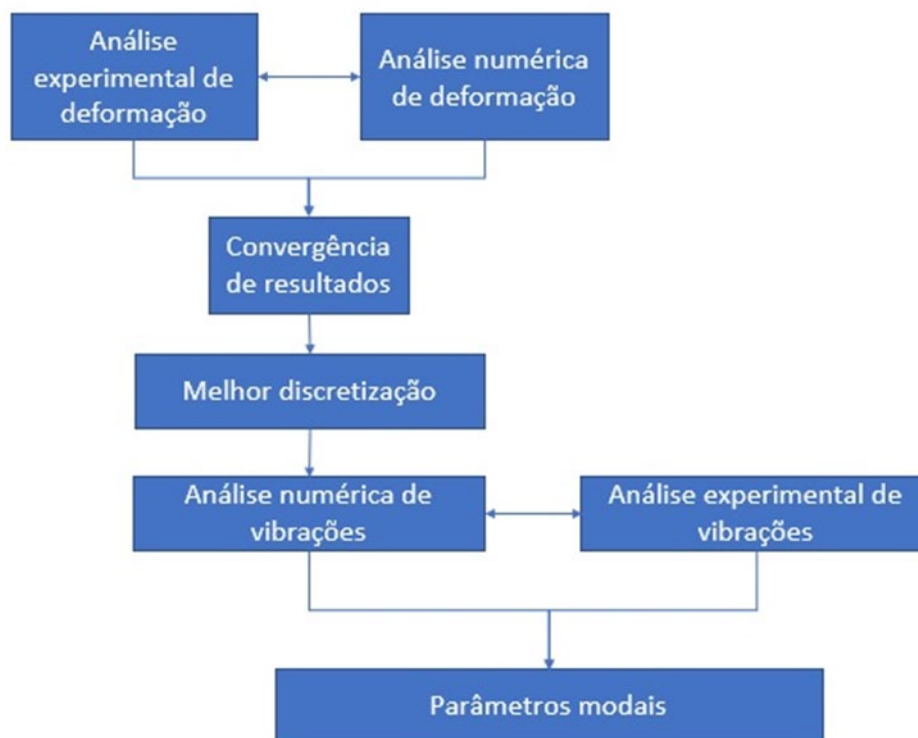


Figura 7 - Fluxograma da análise estrutural realizada no protótipo de cobertura com telhas PET.

No modelo foram inclusos tanto os elementos de aço já trabalhados na análise estática de deformação quanto os elementos poliméricos (telhas) como materiais constituintes da estrutura, visto que, a análise experimental dinâmica envolveu a estrutura como um todo. A Tabela 1 mostra as características dos materiais empregados.

Tabela 1– Características dos materiais empregados na análise.

| Material     | Modulo de elasticidade<br>(GPa) | Massa Especifica<br>(KN/m³) | Coefficiente de<br>Poisson |
|--------------|---------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Aço          | 200                             | 77                          | 0,30                       |
| Plástico (*) | 2,4                             | 13,4                        | 0,21                       |

(\*) De acordo com o item 2.1.

Para simplificar o modelo das telhas, fez-se uma equivalência de momento de inércia e de massa, entre a telha de PET empregada na cobertura e uma placa de seção uniforme equivalente, levando em consideração a sua especificidade de formato, de modo a representar de forma mais precisa as características físicas e geométricas das telhas de PET da cobertura.

Nesta análise foram observados os primeiros modos de vibração, porém, apenas os primeiros modos a flexão no eixo vertical foram considerados, 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 à flexão no eixo vertical.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

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

#### 3.1 Análise de deformações

As deflexões obtidas da análise experimental considerando a aplicação em três posições ao longo do vão central da terça de cobertura de três massas de valores diferentes totalizaram 9 configurações diferentes, as quais são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – 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<br>1 - 10  | Amostra<br>1 (mm)  | Amostra<br>2 (mm)  | Amostra<br>3 (mm)  | Teste<br>11 - 20 | Amostra<br>4 (mm)  | Amostra<br>5 (mm)  | Amostra<br>6 (mm)  | Teste<br>21 - 30 | Amostra<br>7 (mm)  | Amostra<br>8 (mm)  | Amostra<br>9 (mm)  |
| Média            | 0,837              | 0,923              | 0,374              | Média            | 0,489              | 1,002              | 0,749              | Média            | 0,285              | 0,638              | 1,100              |
| Desvio<br>padrão | 0,053              | 0,045              | 0,024              | Desvio<br>padrão | 0,030              | 0,039              | 0,037              | Desvio<br>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<br>31 - 40 | Amostra<br>10 (mm) | Amostra<br>11 (mm) | Amostra<br>12 (mm) | Teste<br>41 - 50 | Amostra<br>13 (mm) | Amostra<br>14 (mm) | Amostra<br>15 (mm) | Teste<br>51 - 60 | Amostra<br>16 (mm) | Amostra<br>17 (mm) | Amostra<br>18 (mm) |
| Média            | 2,072              | 2,169              | 0,926              | Média            | 1,111              | 2,465              | 1,758              | Média            | 0,600              | 1,710              | 2,853              |
| Desvio<br>padrão | 0,220              | 0,239              | 0,065              | Desvio<br>padrão | 0,084              | 0,194              | 0,165              | Desvio<br>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 - 70 | Amostra 19 (mm) | Amostra 20 (mm) | Amostra 21 (mm) | Teste 71 - 80 | Amostra 22 (mm) | Amostra 23 (mm) | Amostra 24 (mm) | Teste 81 - 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           |

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. Muito embora a maior deflexão medida tenha sido de 4,508 mm, na posição 3, ponto C e massa de 3kg, menor do que 7,33 mm, deflexão máxima para o estado limite de serviço estabelecido pelas normas, deve-se observar que tal deflexão de fato mostra que a estrutura apresenta alta flexibilidade, uma vez que se trata de uma força pontual aplicada de baixa intensidade (30 N).

Já os desvios-padrões obtidos estiveram abaixo de 0,5 e próximos de 0 mostrando 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, que está um pouco acima de 20%, referente a amostra 25 com valor de 21,80%, mostrando em um panorama geral que as medições são homogêneas (SILVA, 2011).

Além disso, destaca-se que os P-valores 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 3). (SILVA; CALLADO, A. A; CALLADO, A. L, 2016; WASSERSTEIN; LAZAR, 2016; ALMEIDA et al, 2019).

Logo, por meio desta distribuição de normalidade observa-se uma convergência dos dados a uma curva normal, podendo-se trabalhar melhor na média aritmética dos mesmos, observando ainda ocorrência de um padrão na variação dos dados.

Deste modo, os valores obtidos da análise experimental de deformação 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.

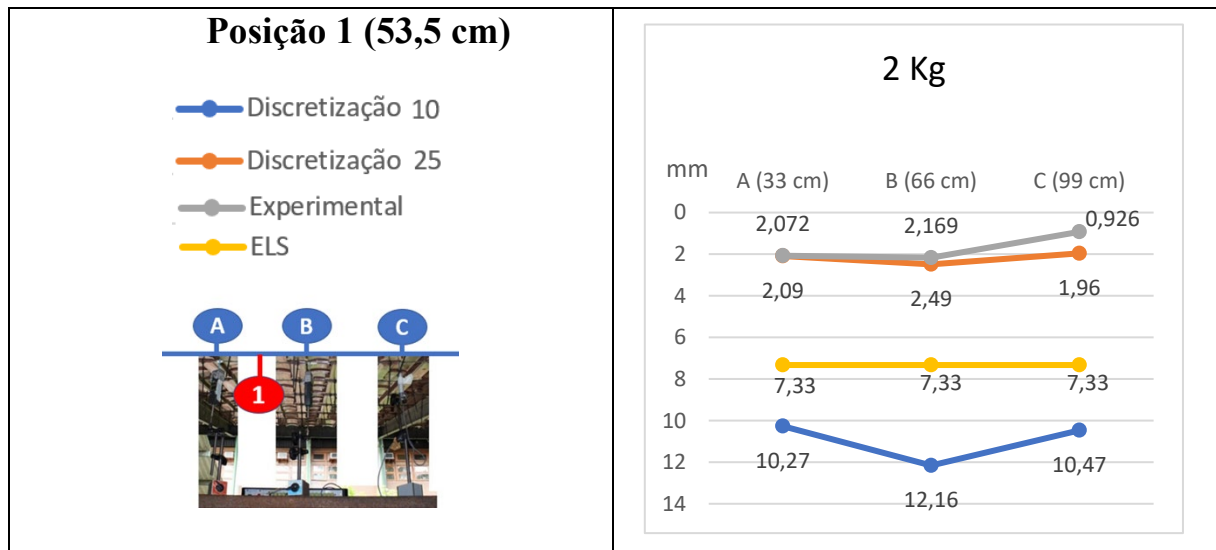
Tabela 3 – P-valores dos testes de normalidade para os valores obtidos no presente trabalho.

| 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                   |

### 3.1.1 Avaliação comparativa

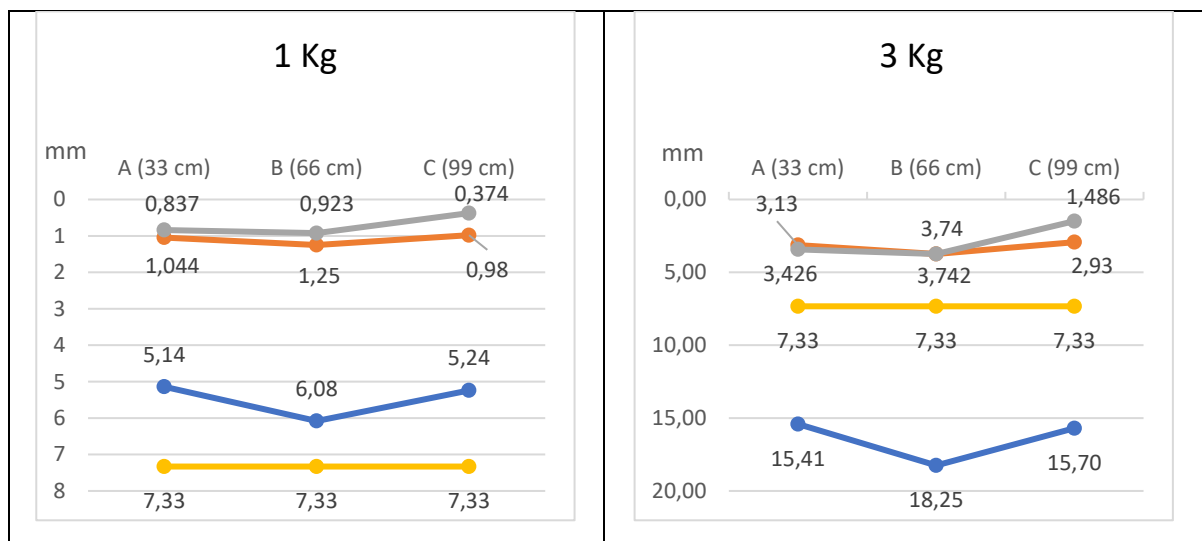
Os resultados mostraram que o refinamento na discretização por MEF possibilitou que os resultados obtidos na análise numérica pudessem convergir para valores mais próximos daqueles experimentais. Fazendo-se uma comparação de valores por meio de gráficos, excluindo as discretizações inicial e 5, as quais apresentaram valores com ordem de grandeza muito superiores aos experimentais, é possível verificar nos gráficos do Quadro 2 a 4 que a medida em que há o refinamento da malha com um número maior de elementos finitos, os deslocamentos nos nós A, B e C obtidos na análise numérica-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

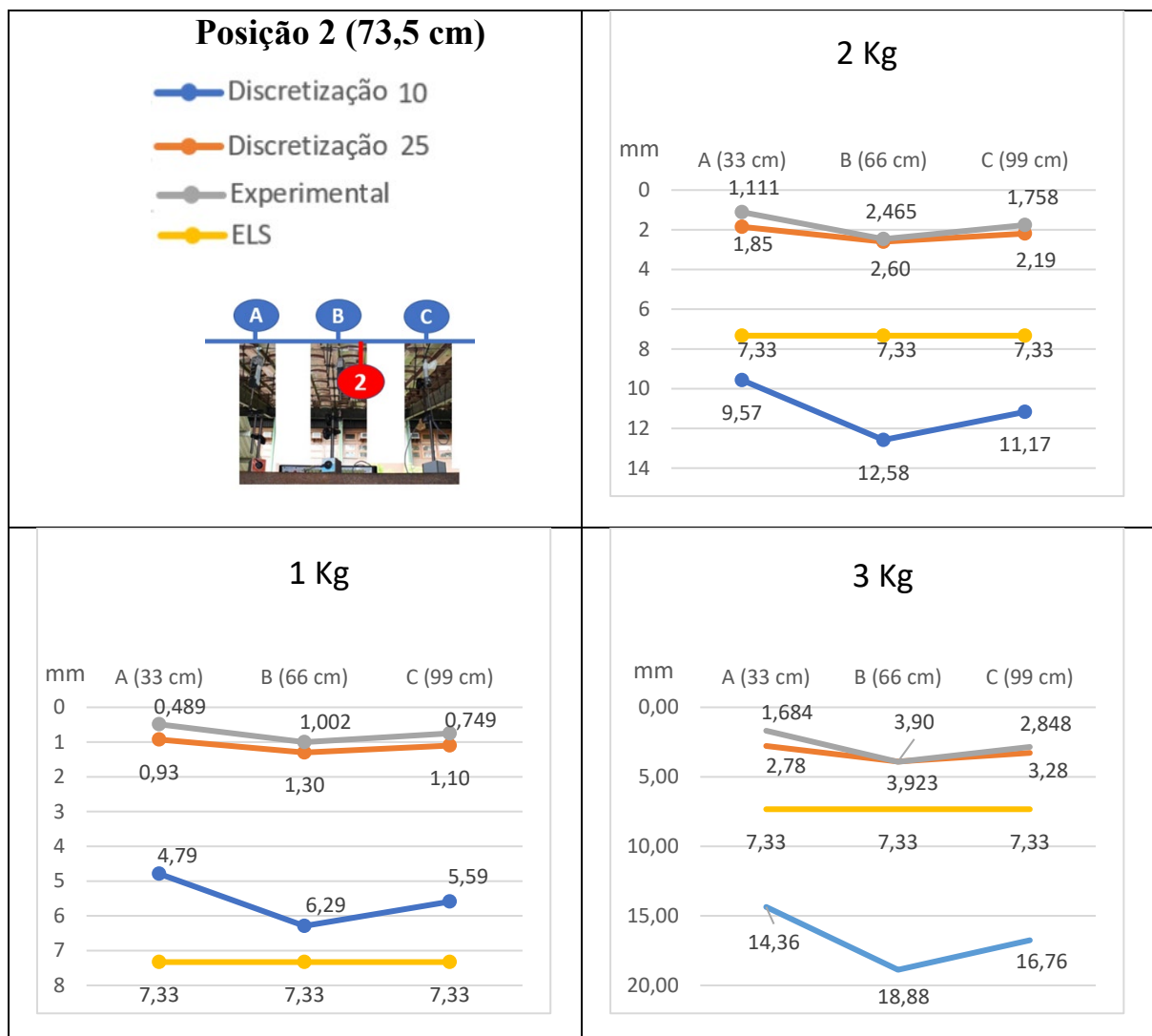


Continua

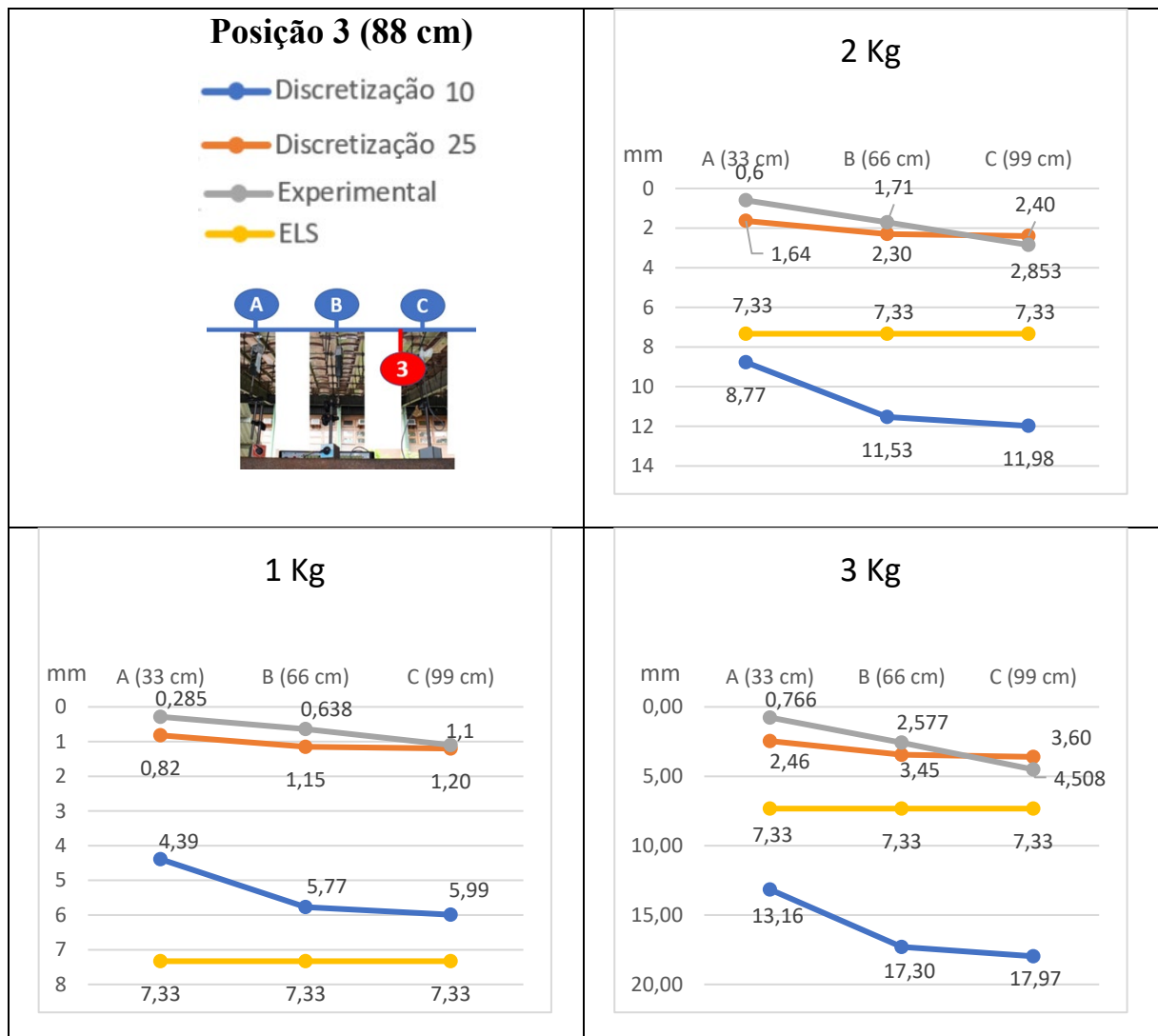
Quadro 2 – Resultados em mm do carregamento de 1kg, 2kg e 3 kg na posição 1



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 a medida que foi alterada a localização do carregamento, ficando mais evidente ao ser observado o gráfico para a posição 3 da massa, onde a deflexão obtida no modelo numérico ficou próxima daquela do ponto C medida na análise experimental.

### 3.1.2 Análise de convergência numérica

Para esta análise foi utilizada uma curva de convergência representando a variação do deslocamento vertical com relação as discretizações (MORAES, 2015; GARCIA et al, 2016; NETO; ARACAYO, 2018). As divisões englobaram além das discretizações 5, 10 e 25,

também as de 15, 20, 30 e 35 elementos, com o propósito de 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 do ponto de observação, posição e localização de carregamento em que ocorreu a melhor convergência com o valor obtido na análise experimental (figura 8).

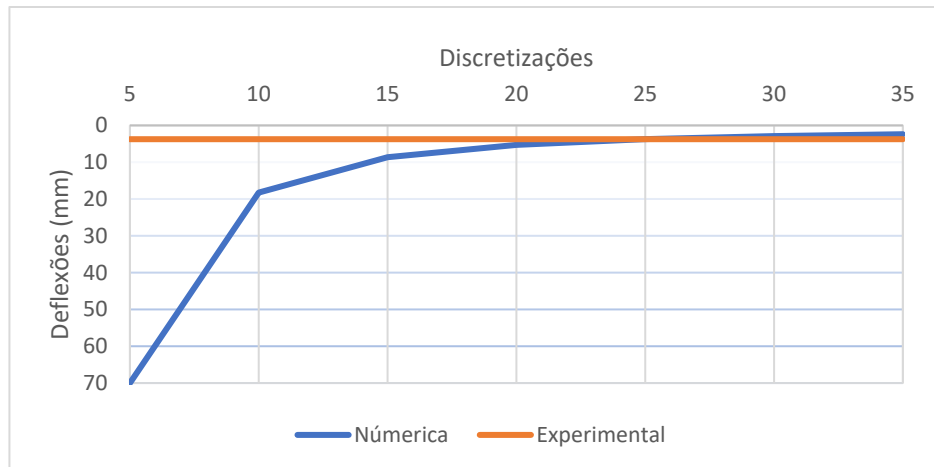


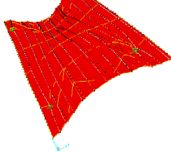
Figura 8 - Curva de convergência.

Verificando a análise numérica pelo SAP2000 nota-se que o resultado numérico obtido a partir da discretização 20 converge para o experimental, sendo o melhor resultado para a discretização 25.

### 3.2 Análise de vibrações

A Tabela 4 a seguir mostra os primeiros três modos de vibração à flexão e suas respectivas frequências.

Tabela 4 - Modos de vibração obtidos na análise numérica pelo SAP2000

| Modos de vibração à flexão |                                                                                     | Frequência (Hz) |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| 1                          |  | 6,04            |
| 2                          |  | 9,71            |

|   |                                                                                   |       |
|---|-----------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 3 |  | 12,14 |
|---|-----------------------------------------------------------------------------------|-------|

Da análise experimental foram obtidos os espectros de Fourier mostrados na Figura 9. Eles são evidenciados por seus picos, os quais foram obtidos pelo método de detecção de pico (PP- *Peak picking*). Desta maneira foi observado os espectros de Fourier dos três acelerômetros sobrepostos e verificado os maiores picos e a ligação entre eles (Figura 9).

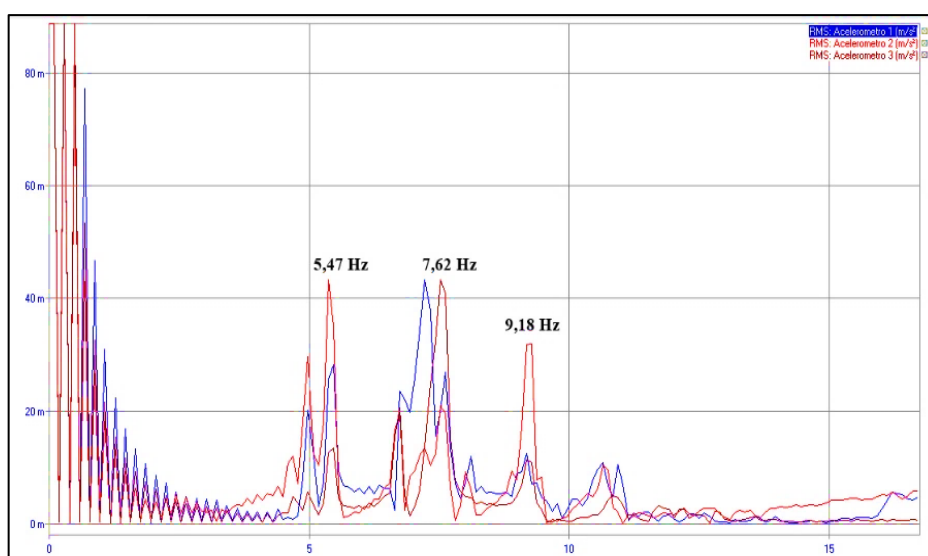


Figura 9 - Espectros de Fourier em relação ao eixo vertical da cobertura.

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 valor de 7,62 Hz, a terceira frequência natural apresentou um 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 5 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 5 - 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>                                | <b>5,47</b>                         | <b>6,04</b>                    | <b>10,42</b>    | <b>0,99</b>                | <b>0,80</b>                       |
| <b>2</b>                                | <b>7,62</b>                         | <b>9,71</b>                    | <b>27,43</b>    |                            |                                   |
| <b>3</b>                                | <b>9,18</b>                         | <b>12,14</b>                   | <b>32,24</b>    |                            |                                   |

As frequências apresentaram erros padrões significativos, com patamares entre 10,42% até 32,24%.

O fato é que o modelo em elementos finitos é baseado em simplificações e deduções que naturalmente geram erros. Tais erros ocorrem devido à ausência de uma discretização mais refinada e com certa dificuldade de transpor características peculiares da estrutura como geometrias, materiais dentre outras propriedades de maneira fiel ao real (RIBEIRO; CALÇADA; DELGADO, 2012).

O menor erro significativo se deu na frequência fundamental à flexão o que de fato otimizou a análise, visto que, para este tipo de estrutura, a frequência de maior relevância é a do primeiro modo de vibração. Pode-se perceber que os erros significativos vão aumentando à medida em que se observa-se modos maiores de vibração.

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

Os pontos indicados na figura 10 são aquelas para os quais foram determinadas as amplitudes empregadas pelo método de decremento logarítmico, onde os valores de 1 são as amplitudes iniciais (X1) e os valores 2 são as amplitudes sucessivas (X2).

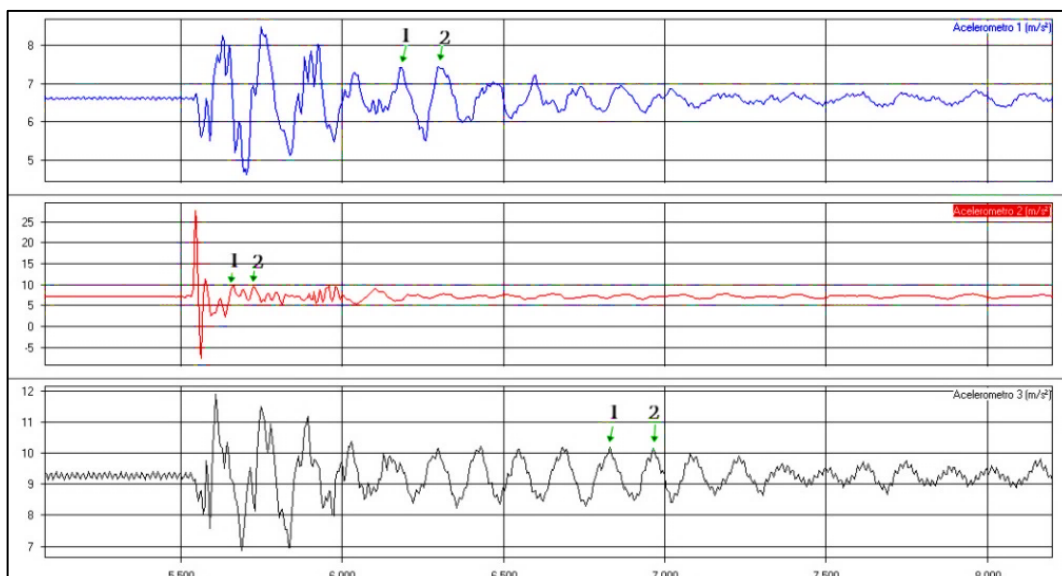


Figura 10 - Sinais adquiridos dos três acelerômetros em resposta a vibração livre.

Foram calculadas as taxas de amortecimento em cada leitura dos acelerômetros e em seguida calculada a média aritmética destes valores que foi considerada a taxa de amortecimento da estrutura conforme apresentado na tabela 6.

Tabela 6 - 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                                     |
| Fator de amortecimento da estrutura por média aritmética ( $\zeta$ )= |         |         | $9,78 \times 10^{-3}$                      |

Dos valores apresentados na tabela 6, observa-se que a taxa de amortecimento é aproximadamente igual a 1%, abaixo dos valores comumente indicados como limite inferior para estruturas de aço.

## CONCLUSÃO

Foram obtidos valores de deflexões significativos para cargas pontuais de pequena magnitude, próximos ao ELS da estrutura, o que mostrou o quanto esta é flexível. Deve-se enfatizar que se não fosse uma cobertura leve, no presente estudo composta por telhas PET com baixa massa específica, a estrutura com certeza apresentaria deformações que estariam acima do ELS. Nesse

ponto ressalta-se a importância do tensionamento das longarinas para criar resistência à flexão do conjunto (estrutura + cobertura) de modo a proporcionar maior rigidez.

A abordagem empregando o método dos 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 com um número menor de divisões foram obtidos valores bem superiores aos experimentais. Observando-se a curva de convergência nota-se que o resultado numérico converge para o experimental também a partir da discretização com 25 divisões. Isso de fato mostra a importância de uma discretização adequada do MEF na modelagem da estrutura, destacando-se que esse método é de grande valia para a obtenção de resultados convergentes com aqueles apresentados na estrutura real.

Com relação a análise dinâmica, por meio de ensaio de vibração livre, verificou-se que a estrutura apresentou baixo valor para a taxa de amortecimento (0,98%) ficando um pouco abaixo do limite inferior de 1% comumente indicado para estruturas metálicas.

A frequência fundamental à flexão foi a que apresentou menor erro entre a análise numérica e experimental, próxima de 10,5%, porém, modos superiores foram observados erros significativos de até 32,24%, ocasionados provavelmente pela dificuldade de inclusão de todas as especificidades da estrutura e dos elementos que compõem o conjunto (estrutura + cobertura) em um modelo numérico.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Lígini R.R de et al. Analysis of fluviometric trends in the hydrographic region of Calha Norte-PA. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing* v. 9, n. 2, p. 88-98, 2019.

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.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. ASTM D638 – 14, West Conshohocken, PA, USA, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement. ASTM D792 – 13, West Conshohocken, PA, USA, 2014.

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. 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
- 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.
- 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.
- CONCEIÇÃO JR, et al. Estimação espectral do sinal de vibração para o monitoramento do desgaste do dressador de ponta única. Matéria (Rio de Janeiro), v. 21, n. 4, p. 827-840, 2016.
- CRUZ, Cristian; MIRANDA, Eduardo. First mode damping ratios inferred from the seismic response of buildings. In: 11th US national conference on earthquake engineering, Los Angeles, California. 2018.
- CUNHA, A. et al. Vibration control and monitoring on the new footbridge over the Ave River in Santo Tirso. In: Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics, EUROLYN 2014 Porto, Portugal, 2014
- 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; ANDRADE, João Bosco Ladislau de. Gestão da Qualidade na reciclagem de PET para transformação em cobertura ecológica em indústria na cidade de Manaus-AM. In: 25º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Anais eletrônicos de congresso ABES. Recife, 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, 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.
- 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.

GOUASMI, M. T.; BENOSMAN, A. S.; TAIBI, H. Development of materials based on PET-siliceous sand composite aggregates. *Journal of Building Materials and Structures*, v. 4, p. 58-76, 2017.

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; BRASIL, Reyolando MLRF. Vibration problems on design of grid bridges and viaducts and their maintenance. *Maintenance, Monitoring, Safety, Risk and Resilience of Bridges and Bridge Networks*, p. 166, 2016.

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.

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.

MORAES, Ademir José. O Método dos Elementos Finitos e a Engenharia Civil. *Revista Especialize On-line Ipog, Goiânia*, v. 01, n. 10, dez. 2015.

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.

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.

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

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, A. H. A. et al. Algoritmo para determinação do amortecimento de materiais cerâmicos pela técnica das frequências naturais de vibração via excitação por impulso. *Cerâmica*, v. 58, n. 346, p. 229-237, 2012.

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

PERERA, Sahan; ARULRAJAH, Arul; WONG, Yan Choy; HORPIBULSUK, Suksun; MAGHOOL, Farshid. Utilizing recycled PET blends with demolition wastes as construction materials. *Construction and Building Materials*, v. 221, pag. 200-209, 2019.

RANGEL, Isabela C.S.S; 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. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas. Série II*, n. 12, 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

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.

ROSSATO, Luciara 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.

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

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)*. Guarapiri. 2006.

SILVA, Aline Romão da; CALLADO, Antônio André Cunha; CALLADO, Aldo Leonardo Cunha. Análise das relações entre o uso de indicadores de desempenho e fatores contingenciais de empresas do setor da construção civil. In: *Anais do Congresso Brasileiro de Custos-ABC*. Porto de Galinhas, 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.

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.

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.

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.

## ABSTRACT EXTENDED

The present research sought to carry out an analysis in a metal structure with polyethylene terephthalate (PET) tiles, in relation to deformations imposed by static loads and modal parameters obtained through free vibration. The behavior of the pre-tensioned CA-60 steel bars of 4.2 mm that integrate the system of purlins of the roof was observed. Both the deformations and the modal parameters were obtained through an experimental procedure, whose values were compared with an analysis of numerical models using the SAP2000 program. In the experimental analysis, LVDTs connected to a data acquisition system, dial indicators and accelerometers were used. The results of the numerical analysis in terms of deformations showed convergence with those obtained in the experimental analysis as the structural elements were discretized in meshes with a greater number of finite elements. Using the model with the discretization that presented the results closest to those obtained in the experimental analysis, the modal parameters were found in terms of frequencies and modes of flexural vibration, as well as the damping rate, which was approximately 1%. The structure proved to be very flexible and sensitive both for the analysis of deformations and for the dynamic effects of free vibration.

**Keywords:** *Metal structure. FEM. PET tiles. Modal analysis. Free vibration.*

## CONCLUSION

Significant deflection values were obtained for small point loads, close to the ELS of the structure, which showed how flexible it is. It should be emphasized that if it were not a light covering, in the present study composed of PET tiles with low specific mass, the structure would certainly present deformations that would be above the ELS. At this point, it is emphasized the importance of tensioning the stringers to create flexural strength of the assembly (structure + cover) in order to provide greater rigidity.

The approach using the finite element method (FEM) showed by means of the numerical analysis carried out by SAP2000, regarding the static behavior in terms of displacements, that by the discretization with a mesh of 25 divisions, the deformations found were close to the experimental results, whereas for the discretizations with a smaller number of divisions were obtained values much higher than the experimental ones. Observing the convergence curve, it can be seen that the numerical result converges to the experimental one also from the

discretization with 25 divisions. This in fact shows the importance of an adequate discretization of the MEF in the modeling of the structure, highlighting that this method is of great value for obtaining results that converge with those presented in the real structure.

Regarding the dynamic analysis, through the free vibration test, it was found that the structure presented a low value for the damping rate (0.98%), being slightly below the lower limit of 1% commonly indicated for metal structures.

The flexural fundamental frequency was the one with the lowest error between the numerical and experimental analysis, close to 10.5%, however, for higher modes, significant errors of up to 32.24% were observed, probably caused by the difficulty inclusion of all the specifics of the structure and the elements that make up the set (structure + cover) in a numerical model.