

ANÁLISE DA RESPOSTA DINÂMICA DE UMA ESTRUTURA DE PLACAS FOTOVOLTAICAS

ANALYSIS OF THE DYNAMIC RESPONSE OF PHOTOVOLTAIC MODULE STRUCTURES

Adryel Vinicius Guarnieri Pinto ¹

Vicente Bergamini Puglia ²

RESUMO

Os módulos fotovoltaicos são uma das tecnologias mais utilizadas e fornecem uma alternativa de energia renovável para a geração de eletricidade. Consequentemente, esses dispositivos foram estudados usando diferentes abordagens para determinar suas características dinâmicas. No entanto, ainda há uma falta de diretrizes dos códigos de prática que poderiam permitir que usuários e fabricantes escolhessem/recomendassem diferentes tipos de estruturas de módulos fotovoltaicos de acordo com a localização e as condições de operação. No sentido de elaborar uma abordagem inicial no estudo da resposta dinâmica da estrutura de painéis fotovoltaicos, foi proposto, a análise estrutural experimental e numérica por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF). O estudo teve como objetivo principal investigar o comportamento dinâmico dessas estruturas, com foco na identificação de frequências naturais de vibração e validação de modelos numéricos desenvolvidos no software ANSYS. A validação foi realizada por meio de uma análise experimental, utilizando acelerômetros piezoelétricos para captar dados de vibração, que foram processados com a Transformada Rápida de Fourier (FFT). Os resultados experimentais e numéricos apresentaram correlação próxima à 95%, comprovando a precisão e confiabilidade do modelo computacional empregado.

Palavras-chave: Método dos elementos finitos, Análise modal, Estruturas fotovoltaicas, Análise dinâmica, Análise experimental.

¹ Acadêmico de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa — UNIPAMPA, Campus Alegrete/RS. E-mail: adryelpinto.aluno@unipampa.edu.br

² Professor do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa — UNIPAMPA, Campus Alegrete/RS. E-mail: vicentepuglia@unipampa.edu.br

ABSTRACT

Photovoltaic modules are one of the most widely used technologies providing a renewable energy alternative for electricity generation. Furthermore, these devices have been studied using different approaches to determine their dynamic characteristics. Nevertheless, there's a void of code of practice guidelines that could allow users and manufacturers to choose or recommend different types of photovoltaic module structures according to the location and operating conditions. To develop an initial approach study of the dynamic response was proposed, experimental and numerical structural analysis using the Finite Element Method (FEM). The study aimed to investigate the dynamic behavior of these structures, focusing on identifying natural vibration frequencies and validating numerical models developed in ANSYS software. Validation was performed through an experimental analysis, using piezoelectric accelerometers to capture vibration data, which were processed with the Fast Fourier Transform (FFT). The experimental and numerical results showed a correlation close to 95%, proving the accuracy and reliability of the computational model employed.

Keywords: Finite element method, Modal analysis, Photovoltaic structures, Dynamic analysis, Experimental analysis.

1 INTRODUÇÃO

O trabalho a seguir apresenta um estudo de caso sobre estruturas metálicas de painéis fotovoltaicos, envolvendo sua calibração e modelagem utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF). A calibração teve como objetivo validar o método de elementos finitos, essencial para garantir a precisão das análises subsequentes, como a avaliação das tensões por von Mises e a otimização dos perfis metálicos da estrutura. Além disso, o estudo inclui uma análise da resposta dinâmica das estruturas sob diferentes condições de vento.

O estudo do fluxo sobre corpos inclinados, como estruturas de painéis fotovoltaicos (PF), Figura 1, é de grande interesse devido à vulnerabilidade desses elementos às cargas de vento, especialmente em instalações de grande porte, como usinas solares. Esses módulos são frequentemente instalados em áreas abertas para maximizar a captação de luz solar, o que os expõe diretamente às forças do vento. Pesquisas nessa área têm crescido, sendo classificadas como experimentais, computacionais ou híbridas, e variam de acordo com a forma de instalação, seja em telhados ou no solo. No caso de instalações terrestres, há ainda uma subdivisão entre sistemas isolados e aqueles que compõem parques fotovoltaicos (WITTEWER et al., 2022)

As estruturas metálicas possuem dimensões de 7 metros de comprimento, 2,4 metros de largura e 1,5 metros de altura. Ambas são compostas por três pilares principais, dispostos a uma distância de aproximadamente 3 metros entre si, que fornecem suporte à estrutura. Sobre esses pilares, estão fixados quatro perfis de alumínio, que servem de base para a instalação de 12 placas fotovoltaicas, cada uma com dimensões de cerca de 2,4 metros por 1,2 metros. A principal diferença entre as duas estruturas é que uma tem contraventamentos e a outra não, como pode ser observado na Figura 6a) e b).



Figura 1 – Painel fotovoltaico estudado.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Discretização espacial

De acordo com Bathe (1998), sistemas complexos de infinitos graus de liberdade podem ser representados por um sistema de equações diferenciais no domínio do tempo e do espaço, empregando técnicas de discretização. Essa abordagem, conhecida como método dos elementos finitos, permite simplificar o sistema de equações, transformando-o em um sistema algébrico de n graus de liberdade, mantendo a dependência diferencial com o tempo. É comum apresentar esse sistema de equações na forma matricial como a seguir:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = 0 \quad (1)$$

A matriz de massa do sistema pode ser representada como uma matriz diagonal quadrada de dimensões $n \times n$, onde n é o número de graus de liberdade do sistema. Essa matriz representa as propriedades de inércia do sistema e pode ser determinada colocando-se na diagonal principal os valores correspondentes a cada grau de liberdade.

A matriz de rigidez K também possui dimensão quadrada de $n \times n$, onde n é o número de GDL do sistema. Essa matriz representa a rigidez elástica do sistema. A matriz K é formada pelos elementos k_{ij} , que determinam o deslocamento unitário em j devido a uma força na direção i .

Nos sistemas com amortecimento, a matriz C pode ser obtida de maneira semelhante à matriz de rigidez. Nesse caso, ao invés de aplicar um deslocamento unitário, utiliza-se uma velocidade unitária para determinar a matriz C . O vetor de deslocamento apresenta uma dimensão $n \times 1$, e a solução é expressa pela equação a seguir:

$$\vec{u}(t) = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_n \end{bmatrix} \sin(\omega_{nn}t + \phi_n) \quad (2)$$

Através da derivada segunda em relação ao tempo da expressão, é encontrado o vetor da aceleração com sua dimensão $n \times 1$, conforme a seguinte expressão:

$$\vec{\ddot{u}}(t) = -\omega_m^2 \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_n \end{bmatrix} \sin(\omega_{nn}t + \phi_n) \quad (3)$$

Substituindo as equações (2) e (3) na equação do movimento (1):

$$-\omega_{nn}^2 M \vec{C}_n \sin(\omega_{nn}t + \phi_n) + K \vec{C}_n \sin(\omega_{nn}t + \phi_n) = \vec{0} \quad (4)$$

Sendo $\sin(\omega_{nn}t + \phi_n) \neq 0$ para todo o tempo, a equação (4) ficará de acordo com a expressão (5):

$$-\omega_{nn}^2 M \vec{C}_n + K \vec{C}_n = \vec{0} \quad (5)$$

Para obter uma solução não trivial, é necessário que o determinante da matriz de coeficientes seja igual a zero, conforme indicado na equação (6).

$$| -\omega_{nn}^2 M + K | = 0 \quad (6)$$

Multiplicando a equação (8) pela matriz inversa da massa M^{-1} , encontra-se a seguinte expressão:

$$| -\omega_{nn}^2 + D | = 0 \quad (7)$$

A matriz dinâmica D é definida como $D = M^{-1}K$, onde M é a matriz de massa e K é a matriz de rigidez. Além disso, o autovalor λ é dado por $\lambda = \omega_{nn}^2$, onde ω_{nn} representa a frequência natural do sistema. Ficando com a seguinte expressão:

$$|\lambda I - D| = 0 \quad (8)$$

Nota-se que para cada frequência natural \vec{C}_n há um vetor de vibração associado que define a forma de vibração do sistema nessa frequência. As frequências ω_{nn} são as frequências em que o sistema pode vibrar na ausência de excitação externa, e os modos de vibração correspondentes são os modos dinâmicos definidos pelas matrizes M e K .

O vetor associado a cada frequência natural contém informações sobre como o sistema irá se movimentar naquela frequência. Agrupando todos os modos de vibração em uma matriz modal Φ , obtém-se uma representação completa de como o sistema irá vibrar em suas frequências naturais. As frequências naturais são proporcionais aos autovetores e os modos de vibração estão representados nesses autovetores.

$$\Phi = [\vec{C}_1 \ \vec{C}_2 \ \dots \ \vec{C}_n] \quad (9)$$

2.2 Domínio da frequência

A Transformada Rápida de Fourier (FFT) é um algoritmo eficiente para calcular a Transformada de Fourier Discreta (DFT), que converte sinais no domínio do tempo para o domínio da frequência. Isso permite identificar as componentes de frequência presentes em um sinal. A FFT é amplamente utilizada para analisar sinais digitais, como vibrações, ruídos e variações de intensidade, de forma rápida e precisa (BAZAN, 2015).

A Transformada Rápida de Fourier é utilizada para determinar as frequências através de métodos numéricos. Todas as equacionamentos são baseados sobre a Transformada de Fourier Discreta (DFT), a qual é definida como:

$$F(j\Delta f) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n\Delta t) e^{-i(2\pi j\Delta f)(n\Delta t)} \quad (10)$$

Onde $j = 0, 1, 2, \dots, N - 1$.

No domínio do tempo N é o total de números de pontos dos dados discretos, T é o tempo total de amostragem, Δt é o tempo entre os pontos de dados e f_s é a frequência de amostragem, onde: $f_s = N/T$. O incremento de frequência Δf da DFT é análogo à frequência fundamental da *Série de Fourier*, a DFT fornece informações sobre

a contribuição relativa dos harmônicos de Δf , assim como os coeficientes da *Série de Fourier* fornecem informações sobre a contribuição relativa dos harmônicos da frequência fundamental.

Suas aplicações incluem engenharia mecânica, análise de vibrações, processamento de sinais em áudio e telecomunicações, além de diagnóstico de máquinas. Em ensaios dinâmicos, por exemplo, a FFT é usada para determinar frequências naturais e modos de vibração de estruturas, facilitando a identificação de problemas e o desenvolvimento de soluções mais eficazes.

2.3 Acelerômetros

Acelerômetros são dispositivos que medem a variação de velocidade de um objeto ou estrutura em movimento. Eles operam com uma massa interna que reage às mudanças de velocidade, produzindo um sinal elétrico correspondente.

Com essa informação, é possível monitorar vibrações, controlar movimentos e avaliar a estabilidade em diferentes contextos industriais e tecnológicos, fornecendo dados essenciais para compreender o comportamento dinâmico de sistemas.

O acelerômetro piezoelétrico é um transdutor autogerado, dispensando fonte de alimentação e componentes móveis, o que elimina o desgaste mecânico. Sua resposta de saída, proporcional à aceleração, permite integração para fornecer dados correspondentes à velocidade e ao deslocamento. Esses sensores suportam operação em faixas extremas de temperatura, porém, devido à sua alta impedância de saída, necessitam de cabos de baixo ruído e amplificadores de carga para condicionamento do sinal.

O elemento sensível consiste em um material piezoelétrico, geralmente uma cerâmica ferroelétrica polarizada artificialmente, que exibe o efeito piezoelétrico. Sob tensões mecânicas - tração, compressão ou cisalhamento - o material gera uma carga elétrica nas faces dos pólos, diretamente proporcional à força aplicada (BRÜEL; KJÆR, 2024).

A seguir as Figuras 2 e Figuras 3 exemplificam o funcionamento de um acelerômetro assim como o seu esquema físico.

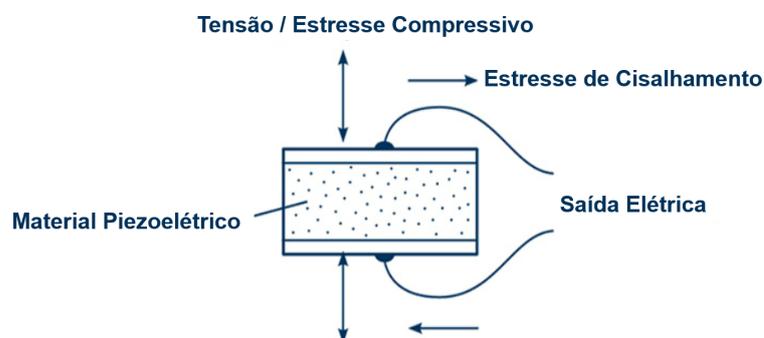


Figura 2 – Funcionamento básico de um acelerômetro.
[Adaptado de BRÜEL e KJÆR (2024)]

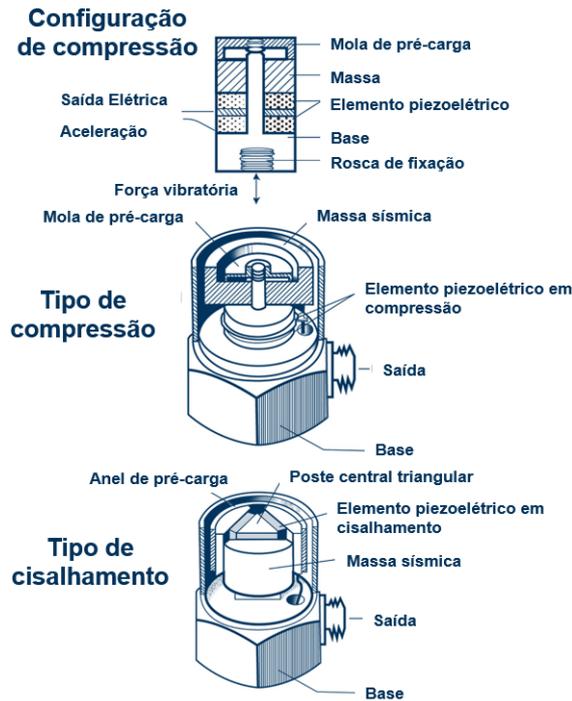


Figura 3 – Esquema físico de um acelerômetro piezoelétrico.
[Adaptado de BRÜEL e KJÆR (2024)]

2.4 Referências acadêmicas

A seguir são apresentados alguns temas fundamentais para a compreensão deste trabalho. O trabalho de Puglia (2009) aborda a análise estrutural de torres estaiadas treliçadas, com ênfase nos efeitos dinâmicos do vento e nas respostas estruturais. Foi estudada uma torre instrumentada, cujos sensores permitiram monitorar velocidades de vento e determinar frequências naturais de vibração. O estudo incluiu a calibração de modelos numéricos com diferentes níveis de complexidade, utilizando dados experimentais obtidos por meio de acelerômetros e anemômetros, além da comparação com análises modais numéricas.

Adicionalmente, Puglia (2009) realizou uma análise de um elemento da torre submetido à compressão, considerando não linearidades físicas e geométricas. As imperfeições geométricas foram digitalizadas com tecnologia tridimensional para garantir maior precisão no modelo. O carregamento devido ao vento foi modelado com base em espectros de excitação clássicos e em registros reais de tempestades. Os resultados contribuem para o entendimento das interações entre fatores dinâmicos e estruturais, evidenciando a importância da calibração numérica e da consideração das incertezas de modelo no comportamento global e local de torres esbeltas.

O trabalho de Almeida e Souza (2022) apresentou uma análise da frequência fundamental de pisos mistos de aço e concreto, comparando procedimentos analíticos e modelagem numérica. A investigação utilizou 36 estruturas distintas, incluindo lajes maciças e mistas, modeladas numericamente no software *SAP2000* e avaliadas segundo os métodos analíticos descritos nos manuais SCI (2009) e AISC (2016). Os resultados obtidos destacaram a proximidade dos valores calculados analiticamente com os valores numéricos, especialmente quando o incremento de rigidez proporcionado pelos perfis metálicos é significativo.

A pesquisa também evidencia que a frequência fundamental, sendo a propriedade modal mais relevante para o controle de vibrações, é fortemente influenciada pela rigidez dos elementos estruturais, com os perfis metálicos desempenhando um papel mais decisivo do que a espessura das lajes de concreto. A aplicação dos métodos analíticos demonstrou ser uma ferramenta eficiente e segura para prever o comportamento dinâmico de pavimentos mistos nas fases iniciais de projeto, complementando o uso de ferramentas de modelagem numérica.

O trabalho de Castilho e Silva (2022) realizou uma análise dinâmica da interação de painéis de concreto pré-moldados com a estrutura principal em diferentes zonas sísmicas, conforme definido pela ABNT NBR 15421:2006. Foi modelada uma estrutura de dois pavimentos com e sem fechamento por painéis, analisando dois tipos de ligação viga-pilar: articulada e rígida. Utilizou-se o software ANSYS para conduzir análises modais e espectrais, avaliando os efeitos dinâmicos nas estruturas simuladas.

Os resultados indicam que a inclusão dos painéis de fechamento aumenta significativamente a rigidez da estrutura principal, reduzindo o período fundamental em aproximadamente 15%. Por outro lado, o sistema de fechamento também resultou em maiores tensões concentradas nas ligações estruturais, especialmente no caso das ligações rígidas. Além disso, a análise revelou que os deslocamentos são significativamente menores na estrutura com fechamento, enquanto os valores máximos de deslocamento e tensão aumentam de forma expressiva com a intensificação das zonas sísmicas, destacando a importância do correto dimensionamento das ligações entre os elementos estruturais.

O trabalho de Wittwer et al. (2022) aborda os efeitos do vento em módulos fotovoltaicos por meio de experimentos em túnel de vento e simulações numéricas utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF). A pesquisa se concentra em módulos isolados e em arranjos, analisando diferentes ângulos de inclinação e direções do vento. Foram observados impactos críticos nos componentes estruturais, especialmente no suporte central, devido a forças aerodinâmicas mais intensas em painéis na borda de arranjos. Os dados experimentais e computacionais destacam a importância de considerar os efeitos do vento no projeto estrutural de painéis fotovoltaicos, garantindo segurança e durabilidade.

Os resultados mostram que painéis inclinados em 20° apresentam as maiores forças aerodinâmicas, com valores críticos em direções de vento específicas (como 0° e 180°). Em arranjos, o efeito de sombreamento reduz a carga nos painéis centrais e protegidos, mas exige atenção aos painéis na borda, mais vulneráveis a ventos frontais. As análises estruturais indicaram que os suportes centrais e dispositivos de conexão são os mais críticos, demandando reforço no design para evitar falhas por carga dinâmica ou fadiga. O estudo sugere que o alinhamento correto dos módulos, associado a análises numéricas e experimentais, pode melhorar a confiabilidade estrutural.

Nestorovic e Patalong (2016) propõem uma metodologia para a identificação experimental de parâmetros modais em estruturas complexas, como o funil de entrada de um tomógrafo de ressonância magnética (MRT). Utilizando funções de resposta em frequência (FRF) e diferentes algoritmos de identificação modal — como o complexo exponencial, o método de mínimos quadrados e o polirreferência no domínio da frequência —, os autores implementaram e validaram um ambiente gráfico em MATLAB para realizar análises independentes. A pesquisa compara os métodos por meio de diagramas de estabilização e tabelas, destacando a eficácia em capturar frequências naturais, coeficientes de amortecimento e modos de vibração.

Os resultados indicam que o método proposto se destaca na identificação de parâ-

metros em uma ampla faixa de frequências, mesmo para estruturas altamente amortecidas ou com ruídos de medição. A abordagem experimental complementa modelos numéricos, fornecendo maior precisão para análises estruturais críticas, como a redução de ruídos e vibrações em equipamentos médicos. A solução é especialmente relevante para aplicações acadêmicas e industriais, oferecendo uma alternativa econômica e eficiente em relação às ferramentas comerciais.

No trabalho de Kilikevičius, Čereška e Kilikevičienė (2016) é investigado como cargas dinâmicas externas afetam a integridade estrutural de módulos fotovoltaicos. Por meio de uma abordagem experimental e analítica, os autores avaliam o comportamento mecânico desses módulos sob diferentes condições de carregamento dinâmico, como vibrações e impactos. A pesquisa destaca a importância de compreender a interação entre as cargas externas e os materiais constituintes dos módulos, especialmente devido à crescente instalação de sistemas fotovoltaicos em ambientes suscetíveis a intempéries e vibrações, como telhados e estruturas móveis.

Os resultados mostram que a resistência estrutural dos módulos pode ser significativamente comprometida por cargas dinâmicas repetitivas, levando a danos acumulativos e à redução da vida útil dos sistemas. O estudo também sugere melhorias no design estrutural dos módulos e na seleção de materiais para aumentar a durabilidade e a eficiência. Assim, o trabalho contribui para o desenvolvimento de soluções mais robustas para a geração de energia solar, considerando os desafios estruturais impostos pelas condições reais de operação.

O trabalho de Barros e Araújo (2015) apresenta um estudo sobre o comportamento dinâmico de uma torre eólica tubular de aço sujeita à ação de cargas de vento. O estudo considera diferentes modelagens para a carga da turbina: como peso concentrado ou como massa distribuída no topo da torre. A análise foi realizada utilizando o software ABAQUS, que usa o método dos elementos finitos, e incluiu dois tipos de pulsos de vento: um retangular, simulando o pior cenário de rajada, e outro triangular, representando pulsos sucessivos.

Os resultados mostraram que os deslocamentos dinâmicos no topo da torre são muito maiores do que os deslocamentos obtidos em análises estáticas tradicionais. Além disso, os pulsos sucessivos tiveram efeitos mais prejudiciais, principalmente quando o peso da turbina é considerado diretamente na análise. O estudo enfatiza a importância de considerar os efeitos dinâmicos em torres eólicas, já que a análise apenas estática pode subestimar as vibrações e deslocamentos, afetando a segurança e o desempenho estrutural dessas torres.

Neste estudo Schwarz e Richardson (1999) apresentam um panorama abrangente sobre análise modal experimental, um método que utiliza parâmetros modais para entender vibrações em estruturas mecânicas. O artigo destaca o uso de funções de resposta em frequência (FRFs) medidas com analisadores FFT para estimar frequência natural, amortecimento e modos de vibração. Diferentes técnicas de excitação, como testes de impacto e excitadores, são discutidas, assim como métodos de ajuste de curva (curve fitting) para obtenção de parâmetros modais.

O estudo mostra como modos de vibração podem amplificar respostas estruturais quando excitados em frequências naturais, ilustrando a relevância de identificar e mitigar essas condições. A análise modal experimental se consolidou como uma ferramenta essencial para resolver problemas de vibração, otimizando o desempenho e a durabilidade de máquinas e estruturas.

3 METODOLOGIA

O ANSYS é um software de simulação computacional de alta precisão, projetado para realizar análises de elementos finitos na área das engenharias. O software possui a sua própria linguagem de programação chamada APDL (*ANSYS Parametric Design Language*), que possibilita aos usuários personalizar e automatizar simulações. Foi utilizado o APDL no estudo desenvolvido nas estruturas metálicas para criar modelos personalizados, realizar análises avançadas e automatizar processos de simulação. Isso permitiu uma abordagem mais precisa e eficiente na análise do comportamento estrutural, contribuindo para o aprimoramento do projeto e a garantia de sua integridade sob diferentes condições de carga e ambiente(Ansys, Inc., 2024).

No estudo realizado os perfis metálicos foram modelados no software SolidWorks, e implementados à biblioteca de elementos do ANSYS. As Figura 4a), b), d), e) e f), mostram perfis comerciais de aço A36. Esses perfis são responsáveis por formarem a estrutura. A Figura 4c) é um perfil personalizado de uma liga de alumínio 6061 T6, responsável pela fixação dos painéis fotovoltaicos à estrutura. As propriedades mecânicas dos perfis são apresentados na Tabela 1.

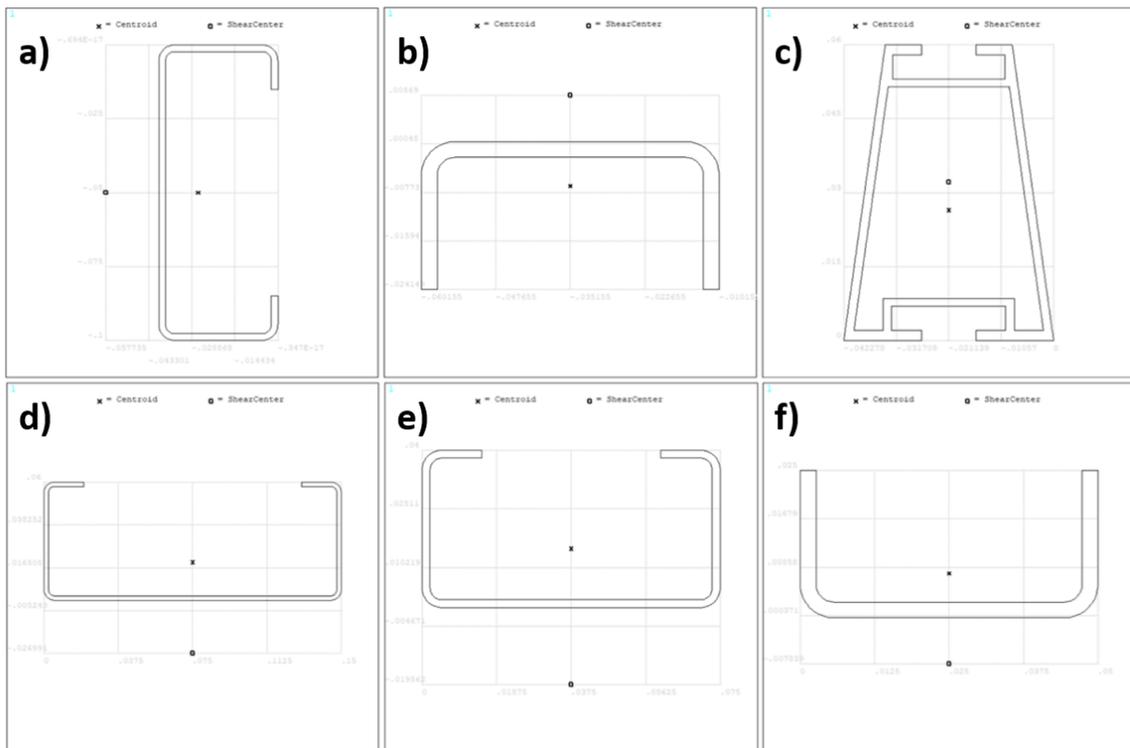


Figura 4 – Perfis personalizados adicionados à biblioteca do ANSYS.

A análise modal visa compreender o comportamento de uma estrutura sujeita a uma excitação. Esta abordagem permite identificar as frequências naturais de vibração do sistema proposto, utilizando uma análise do modelo durante a vibração livre. Sob tais condições, as equações que descrevem o comportamento dinâmico tendem a se apresentar de forma mais simplificada.

Esse tipo de análise numérica envolve o cálculo computacional dos parâmetros modais da estrutura. Softwares de Engenharia Assistida por Computador (CAE) que realizam essa análise por meio de modelos baseados em elementos finitos. Por outro lado, a

análise modal experimental concentra-se na determinação das frequências naturais, fatores de amortecimento e formas modais por meio de testes de vibração. Conforme destacado por Rao (2008), essa abordagem permite obter dados a partir de sinais medidos no domínio do tempo ou da frequência.

Foram utilizados acelerômetros piezoelétricos, dispositivos sensoriais usados para a medição de aceleração e vibração em diversas áreas. Através do efeito piezoelétrico, esses sensores convertem movimento mecânico em sinais elétricos, destacando-se pela sua sensibilidade e resposta rápida. Com uma taxa de aquisição de até $10kHz$, esses acelerômetros oferecem uma resolução temporal elevada, sendo ideais para aplicações que envolvem análise de vibrações de baixa à alta frequência, monitoramento de impactos e detecção de eventos transitórios.

Para a captação dos sinais, foram escolhidos três pontos em cada estrutura para fixá-los, os quais foram chamados de P1, P2 e P3. Esses pontos foram determinados levando em consideração fatores como a geometria da estrutura e as propriedades específicas das vibrações esperadas em cada local.

Para conseguir perturbar as estruturas, foram feitos três tipos de excitação, desferindo um golpe com o punho cerrado em um dos cantos da estrutura, impulsionando com ambas mãos em um dos perfis de alumínio e por último aplicando impacto em uma das extremidades da estrutura usando um martelo.

A seguir a Figura 5a) mostra o acelerômetro, 5b) o sistema de aquisição de dados e 5c) uma das posições escolhidas para a fixação dos acelerômetros às estruturas. A Figura 6 apresenta os pontos escolhidos para a instalação dos acelerômetros. Esses pontos foram elencados após uma inspeção visual na estrutura e verificados as regiões com maior deslocamento.

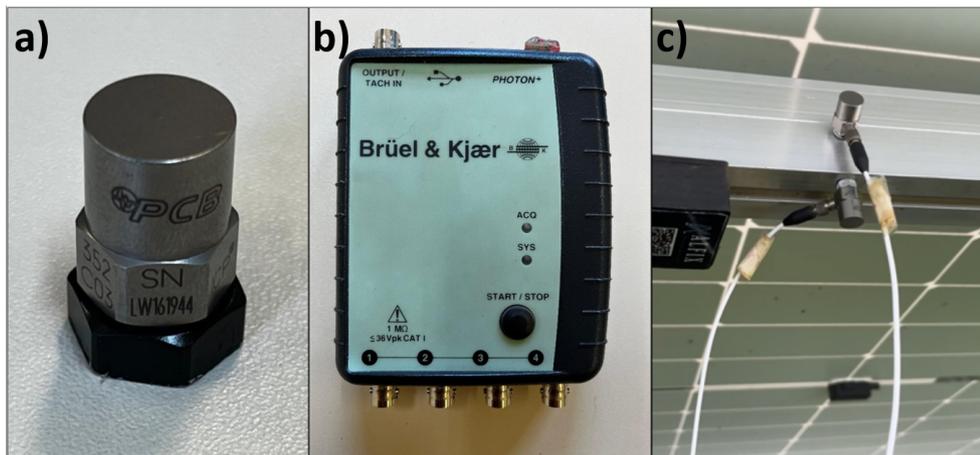


Figura 5 – a)acelerômetro; b)sistema de aquisição de dados; c)acelerômetros fixados a estrutura.

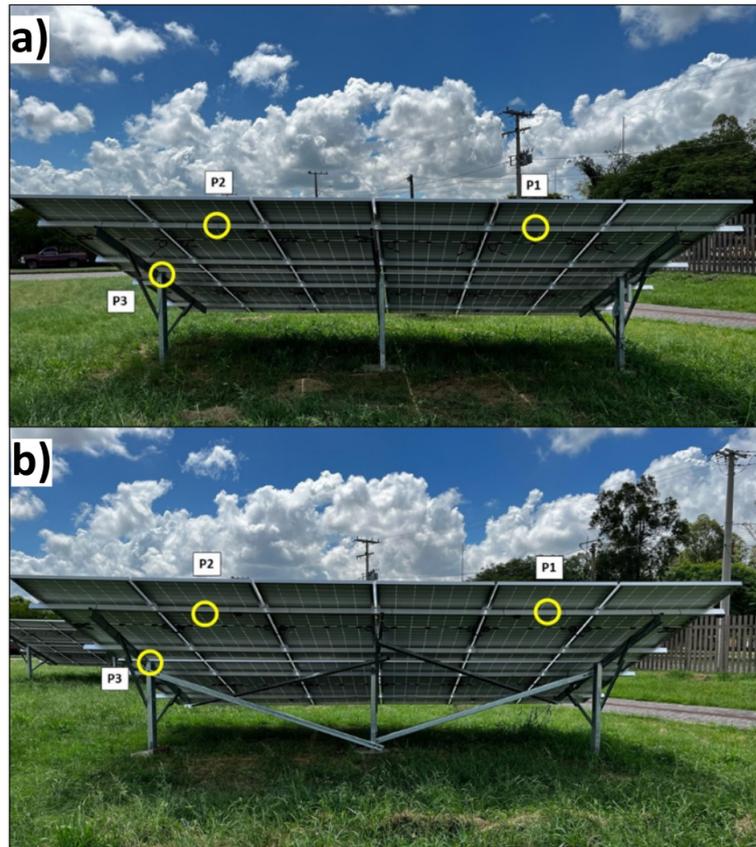


Figura 6 – Pontos de fixação dos acelerômetros nas estruturas a) com contraventamento e b) sem contraventamento.

Na Figura 7 é apresentada a estrutura modelada em elementos finitos. Para modelagem das placas fotovoltaicas, foi considerada como elemento rígido, totalizando 10 placas. Os perfis da estrutura foram definidos em aço e alumínio, sendo que, cada perfil foi definido anteriormente, Figura 4, e inseridos no modelo em APDL. Os elementos utilizados no *script* foram *Beam* 189 e *Shell* 281, maiores detalhes podem ser consultados no *Help do ANSYS*.

Propriedades mecânicas			
Material	E (N/m^2)	ν	ρ (kg/m^3)
Perfis Aço A36	2,07E+11	0,26	7830
Perfis Alumínio 6061 T6	6,89E+10	0,33	2700
Placas Fotovoltaicas	2,50E+22	0,33	317,76

Tabela 1 – Propriedades mecânicas utilizadas no modelo.

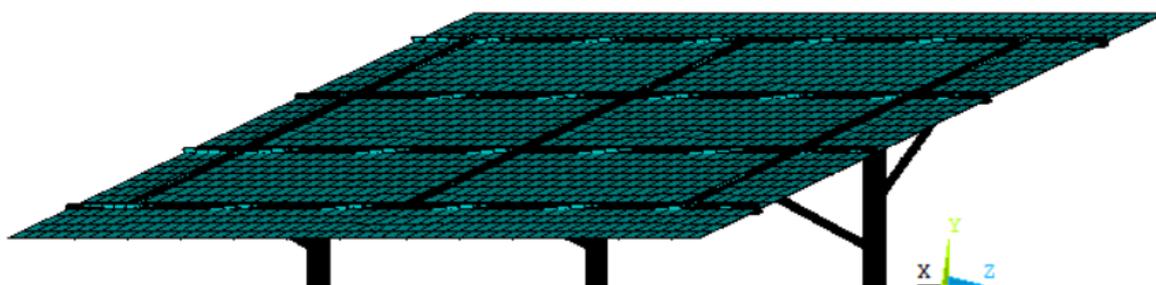


Figura 7 – Estrutura modelada em ANSYS.

4 RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados gerados para cada uma das aplicações propostas na Metodologia. Para determinar as frequências naturais nas estruturas, foram realizadas 32 aquisições de sinais utilizando os acelerômetros. Em seguida, os sinais foram submetidos há um tratamento de dados usando o *MatLab*, onde foi aplicada a transformada rápida de Fourier (FFT) para extrair as frequências de interesse. Nas Figuras 8 e 9 são apresentados a resposta da estrutura no domínio da frequência obtidos no ponto *P2*, esse ponto foi o que melhor representou a resposta da estrutura. Os pontos com maior amplitude representam as frequências de maior interesse contidas no sinal.

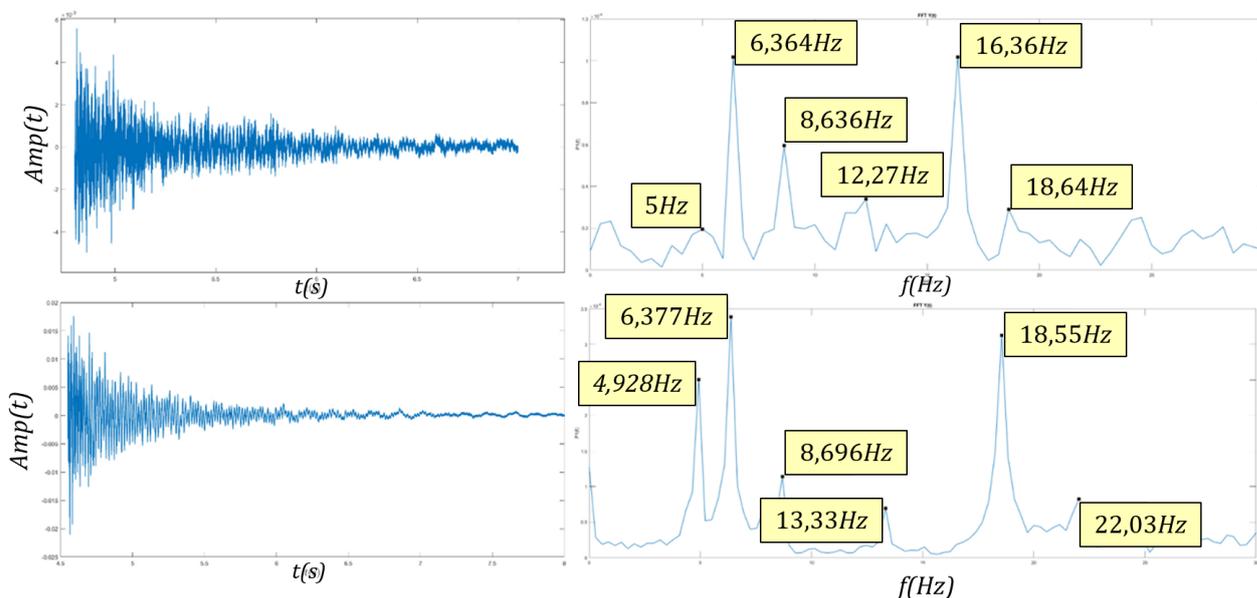


Figura 8 – Sinais de amplitude e FFT's. Estrutura sem contraventamento, ponto P2.

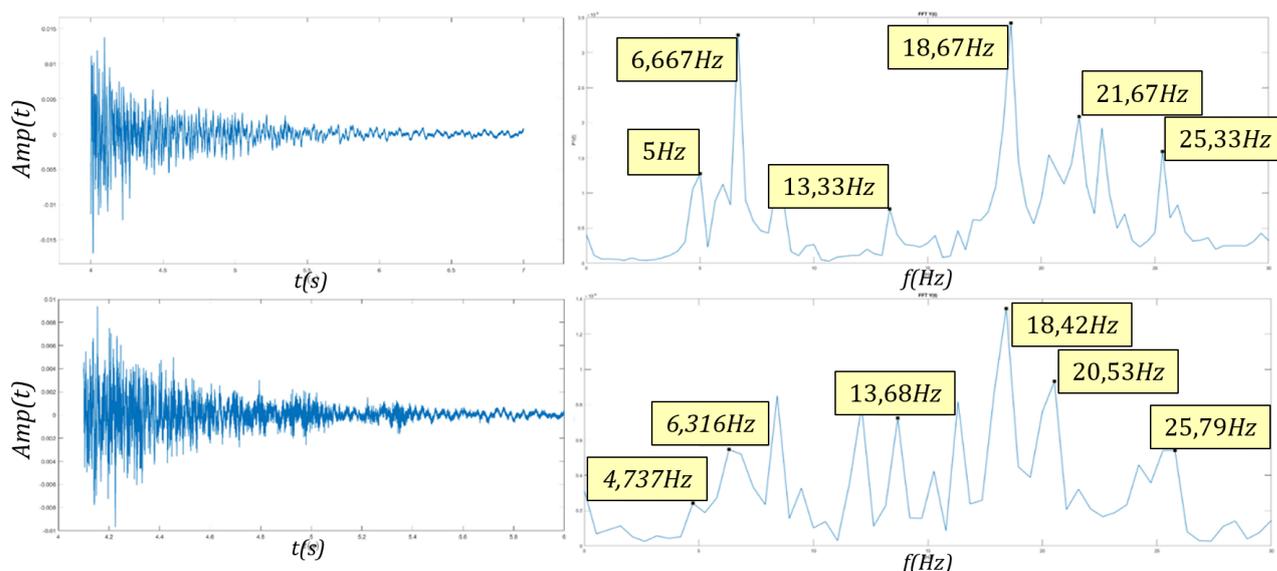


Figura 9 – Sinais de amplitude e FFT's. Estrutura com contraventamento, ponto P2.

O FFT foi realizado após retirar a parte transitória do sinal, efetuando o corte durante a fase de vibração livre. Essa medida foi feita para reduzir os ruídos presentes na análise. A seguir as Figuras 10 e 11 mostram as formas modais obtidas em elementos finitos. Vale destacar que a análise modal foi realizada levando em consideração a massa das placas voltaicas, por questão de melhor visualização as mesmas foram retiradas para a apresentação nas figuras. Foram selecionadas as quatro primeiras frequências, tanto para a estrutura sem contraventamento quanto a com contraventamento.

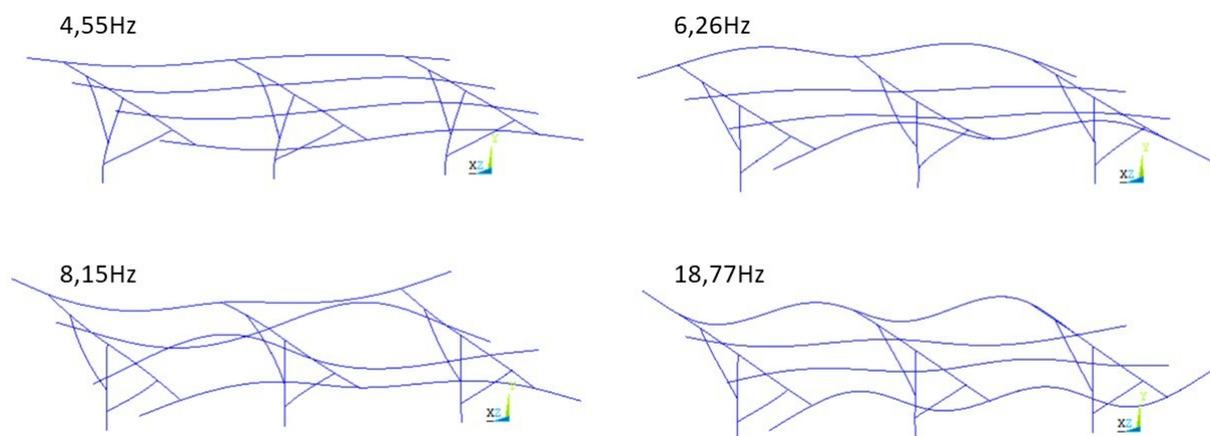


Figura 10 – Primeiros quatro frequências obtidas no ANSYS. Estrutura sem contraventamento.

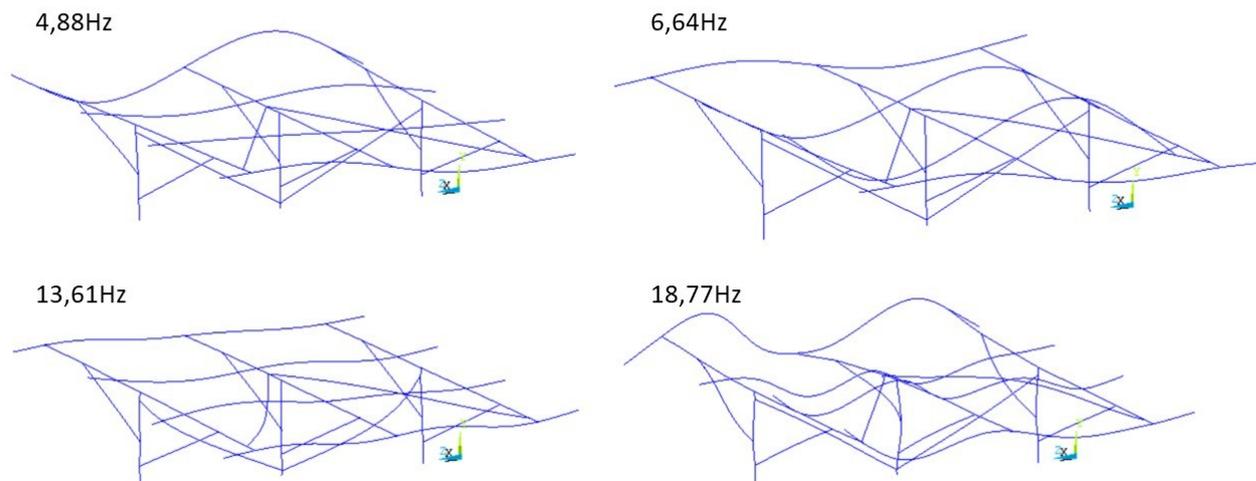


Figura 11 – Primeiros quatro frequências obtidas no ANSYS. Estrutura com contraventamento.

A Tabela 2 mostra uma comparação dos resultados obtidos entre os modelos de elementos finitos e experimentais, os resultados apresentaram uma correlação próximas de 95%. Essa comparação foi realizada para as principais frequências, a seguir é apresentado uma correlação de Pearson para os 10 primeiros modos de vibração.

Estrutura Sem Contraventamento		Estrutura Com Contraventamento	
Frequências Numéricas [Hz]	Frequências Experimentais [Hz]	Frequências Numéricas [Hz]	Frequências Experimentais [Hz]
4,55	4,36	4,88	4,64
6,26	6,36	6,65	6,88
8,15	7,82	13,61	13,28
18,63	18,6	18,77	18,88

Tabela 2 – Resultados obtidos entre os modelos experimentais e numéricos.

Para comparar as frequências encontradas de forma experimental com as de forma numérica, foi adotada uma correlação de Pearson, que é uma medida estatística que avalia a relação linear entre duas variáveis quantitativas. Quanto mais próximo o valor absoluto estiver de 1, mais forte é a relação linear entre as variáveis.

A seguir as Figuras 12 e 13 apresentam os gráficos de correlação das frequências das estruturas sem e com contraventamento.

Correlação Estrutura Sem Contraventamento

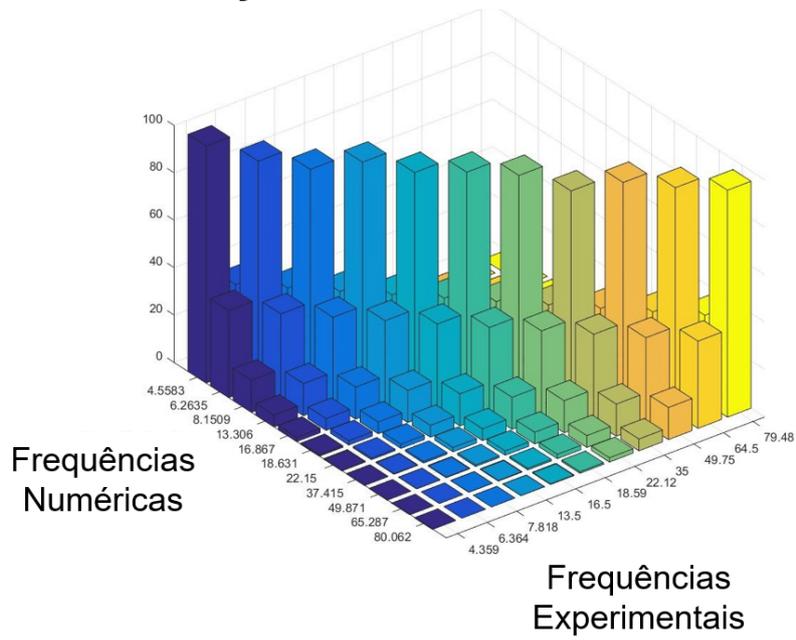


Figura 12 – Gráfico de Correlação Estrutura Sem Contraventamento.

Correlação Estrutura Com Contraventamento

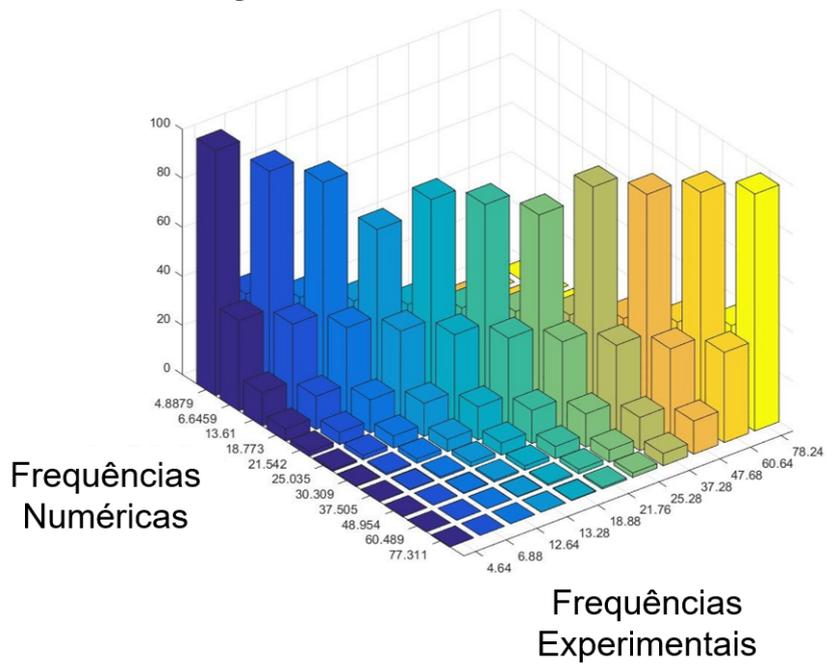


Figura 13 – Gráfico de Correlação Estrutura Com Contraventamento.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta uma análise de calibração dinâmica entre modelo experimental e numérico. Para o estudo proposto, foram utilizados os recursos disponíveis do programa computacional ANSYS. Inicialmente foi efetuado uma análise modal e posteriormente uma análise experimental com a determinação as frequências naturais utilizando acelerômetros a fim de verificar o efeito da resposta no domínio da frequência das estruturas analisadas. Pode-se concluir que, da análise modal foi observado uma correlação próximo há 95% entre as respostas numérica e experimentais. Sobre a análise do espectro de resposta pode-se concluir que:

- Foi realizado uma análise experimental, e obtido a resposta no domínio da frequência, utilizando os acelerômetros descritos acima, onde foram obtidas as 10 primeiras frequências fundamentais. A estrutura com contraventamento apresentou frequências que variaram de $4,64Hz$ até $78,24Hz$, enquanto que a estrutura sem contraventamento variou de $4,36Hz$ até $79,48Hz$. A pequena diferença das frequências naturais obtidas entre ambas estruturas, sugere um estudo mais aprofundado sobre a melhor tipo de estrutura;
- A comparação entre os resultados numéricos e experimentais, permitiu a validação do modelo em ANSYS, isso permite que outros estudos possam ser realizados sob o modelo, como por exemplo a otimização dos perfis da estrutura, e a análise das tensões no regime linear elástico;

6 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para futuros trabalhos, indica-se:

- Análise das tensões;
- Desenvolvimento de um modelo equivalente;
- Implementação do LS-DYNA em APDL;
- Desenvolvimento de um padrão de excitação baseado em dados anemométricos;
- Análise da resposta dinâmica, com diferentes excitações.

Referências

- ALMEIDA, M. M. d.; SOUZA, A. S. C. d. Frequência fundamental de pisos mistos de aço e concreto: processos analíticos e numérico. *Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural*, Universidade de Passo Fundo, v. 19, n. 1, p. 30–50, jan./abr. 2022. Disponível em: <<http://seer.upf.br/index.php/rsae/article/view/12275>>. Citado na página 7.
- Ansys, Inc. *Ansys Mechanical APDL: Capabilities and Applications*. [S.l.], 2024. Disponível em: <https://ansyshelp.ansys.com/public/Views/Secured/corp/v242/en/ans_vm/Hlp_V_CH1.html>. Acesso em: 8 nov. 2024. Citado na página 10.
- BARROS, P. S. B.; ARAÚJO, T. D. P. de. Análise dinâmica de uma torre eólica aplicando o método dos elementos finitos. In: DUMONT, N. A. (Ed.). *Proceedings of the XXXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE 2015)*. Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 2015. p. 1–15. Citado na página 9.
- BATHE, K. J. *Finite Element Procedures in Engineering*. [S.l.]: Prentice-Hall, 1998. Citado na página 4.
- BAZAN, H. W. D. *Um Modelo de Estaca para Análise de Vibrações*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Rio de Janeiro, Brasil, 2015. Certificação Digital N° 1221646/CA. Citado na página 5.
- BRÜEL; KJÆR. *Piezoelectric Accelerometers*. 2024. Accessed: 2024-11-12. Disponível em: <<https://www.bksv.com/pt/knowledge/blog/vibration/piezoelectric-accelerometers>>. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 7.
- CASTILHO, V. C.; SILVA, R. N. F. Análise dinâmica da interação de painéis de concreto pré-moldados com a estrutura principal, em diferentes zonas sísmicas. *Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural*, Universidade de Passo Fundo, v. 19, n. 3, p. 46–65, set./dez. 2022. Disponível em: <<http://seer.upf.br/index.php/rsae/article/view/13674>>. Citado na página 8.
- KILIKEVIČIUS, A.; ČEREŠKA, A.; KILIKEVIČIENĖ, K. Analysis of external dynamic loads influence to photovoltaic module structural performance. *Engineering Failure Analysis*, Elsevier, v. 66, p. 445–454, 2016. Citado na página 9.
- NESTOROVIC, M. T. T.; PATALONG, M. Identification of modal parameters for complex structures by experimental modal analysis approach. *Advances in Mechanical Engineering*, SAGE Publications, v. 8, n. 5, p. 1–16, 2016. Citado na página 8.
- PUGLIA, V. B. *ANÁLISE DE ALGUNS ASPECTOS NO ESTUDO DE TORRES ESTAIADAS*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/27261/000764038.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 5 nov. 2024. Citado na página 7.
- RAO, S. S. *Mechanical Vibrations*. [S.l.]: Pearson-Prentice Hall, 2008. Citado na página 11.

SCHWARZ, B. J.; RICHARDSON, M. H. Experimental modal analysis. In: *CSI Reliability Week*. Orlando, FL, USA: Vibrant Technology, Inc., 1999. Citado na página 9.

WITTWER, A. R. et al. Wind loading and its effects on photovoltaic modules: An experimental–computational study to assess the stress on structures. *Solar Energy*, v. 240, p. 315–328, 2022. Accessed: 2024-11-05. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.04.061>>. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 8.