

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

ARTHUR LIMA DE CARVALHO

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NAS PROPRIEDADES
DINÂMICAS DE UM PÓRTICO PLANO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPINA GRANDE

2021

ARTHUR LIMA DE CARVALHO

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NAS PROPRIEDADES
DINÂMICAS DE UM PÓRTICO PLANO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, da Universidade Federal de Campina Grande.

Orientadora: Prof^ª Dr^ª. Marília Marcy Cabral de Araújo

CAMPINA GRANDE

2021

ARTHUR LIMA DE CARVALHO

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NAS PROPRIEDADES
DINÂMICAS DE UM PÓRTICO PLANO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, da Universidade Federal de Campina Grande.

Campina Grande, 20 de maio de 2021

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Dr^ª Marília Marcy Cabral de Araújo
Orientadora

Prof^ª. Dr^ª Izabelle Marie Trindade Bezerra
Examinadora interna

Eng. Sabrina Lima Fechine de Alencar
Examinadora externa

Dedico este trabalho à minha família, meus
amigos e meus professores, por tudo que
fazem e já fizeram por mim.

AGRADECIMENTOS

Certamente estes parágrafos não farão justiça à todas as pessoas e instituições que fizeram parte dessa importante etapa na minha vida. Desde já, peço desculpas a aqueles que não estão mencionados aqui, mas tenham certeza que fazem parte dos meus pensamentos e da minha eterna gratidão.

Agradeço primeiramente à Deus pelo presente da vida, por todas as lições aprendidas, por tudo que me foi dado e por todos os privilégios e bençãos que a vida me deu.

Agradeço à minha família, em especial ao meu pai Joelson, minha mãe Lilian e minha irmã Daniella, por todo o carinho, cuidado, amor e companheirismo que não me faltaram em momento algum. Devo tudo a vocês.

Agradeço à minha orientadora Profa. Dra. Marília Marcy Cabral de Araújo, por todo o aprendizado obtido e por toda a atenção e presteza dada durante essa jornada.

Agradeço aos professores e funcionários do curso de Bacharelado em Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande por toda ajuda, ensinamentos e atenção dados durante toda a minha formação.

Agradeço à Ourovel Construções e à Colinas Engenharia pelas oportunidades dadas que me ensinaram importantes lições não somente sobre engenharia, mas sobre ética, trabalho e profissionalismo. Em especial, agradeço à Anáiris Ramos, Ibysson Santa Cruz, João Batista, José Lopes, José Roberto, Rogério Paulino, Tairone Paz e Thiago Alves pelo aprendizado e pelas amizades formadas.

E por fim, mas não menos importante, gostaria de agradecer a todos os meus amigos. Acredito que tive muita sorte e privilégio na vida por todas as pessoas maravilhosas e únicas que tive a oportunidade de conhecer. A lista com o nome de todos é, graças à Deus, extensa, mas faço questão de citar alguns nomes. Obrigado à Beatriz Alves, Carlos Roberto, Eduarda Veiga, Iago Amorim, Iann Carvalho, Igor Souto, Kevin Klain, Letícia Marinho, Lincoln Maia, Luiz Felipe, Marcela Krau, Matheus Nóbrega, Pedro Henrique e Pedro Serpa pela amizade e por todos os momentos vividos juntos. Vocês são os melhores.

Aos demais que não foram citados, fica minha enorme gratidão por tudo e tenham certeza que guardo com carinho todos os momentos vividos e todas as lições aprendidas. Muito obrigado.

A confiança em si mesmo é o
primeiro segredo do sucesso.
(Ralph Waldo Emerson)

RESUMO

CARVALHO, Arthur L. **Influência da temperatura nas propriedades dinâmicas de um pórtico plano**. 2021. 48 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2021.

Segurança e integridade estrutural são fatores de grande relevância dentro do processo construtivo. Com a consolidada tendência de construções cada vez mais esbeltas e complexas, a importância do monitoramento de tais fatores evolui paulatinamente. Nesse contexto, a temperatura ganha destaque não apenas por seus efeitos danosos, mas também por dificultar sensivelmente o processo de monitoramento. Atualmente, há uma grande difusão de pesquisas com desenvolvimento de tecnologias acessórias a esse processo, como a aplicação de modelos numéricos baseados no método dos elementos finitos assistido por software, a exemplo do *Ansys Workbench*. Diante do exposto, este trabalho foi conduzido no sentido de realizar a análise das propriedades dinâmicas de um pórtico plano submetido a temperaturas entre 1°C e 40°C. Foi observada grande similaridade entre a variabilidade das frequências obtidas no estudo com as encontradas em trabalhos semelhantes, o que evidencia o potencial e praticidade do uso de modelos numéricos como ferramenta de avaliação da integridade estrutural.

Palavras-chave: *Integridade Estrutural; Temperatura; Modelos Numéricos; Pórtico Plano; Método dos Elementos Finitos.*

ABSTRACT

CARVALHO, Arthur L. **Influence of temperature on the dynamic properties of a flat gantry**. 2021. 48 pages. Undergraduate thesis (Bachelor's in Civil Engineering) – Federal University of Campina Grande. Campina Grande, 2021.

Safety and structural integrity are highly relevant factors in the construction process. With the consolidated trend of increasingly slim and complex constructions, the importance of monitoring such factors evolves in the same fashion. In this context, the temperature gains prominence not only for its harmful effects, but also because it significantly hinders the monitoring process. Currently, there is a wide dissemination of research with the development of assisting technologies for this process, such as the application of numerical models based on the finite element method assisted by software, such as the Ansys Workbench. Due to the foregoing, this work was carried out in order to develop the analysis of the dynamic properties of a flat frame under temperatures ranging from 1°C to 40°C. A great similarity was observed between the variability of the frequencies obtained in the study with those found in similar works, which highlights the potential and practicality of using numerical models as a tool for assessing structural integrity.

Keywords: *Structural Integrity; Temperature; Numerical Models; Flat Frame; Finite Element Method.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Perfil do pórtico ensaiado por Maia (2016)	16
Figura 2 – Organograma metodológico da realização do trabalho.....	16
Figura 3 – Elementos de uma malha	27
Figura 4 – Comparação de malhas para aproximação da representação de área.....	27
Figura 5 – Perfil e vista do pórtico ensaiado	28
Figura 6 – Modelo físico desenvolvido por Maia (2016).....	28
Figura 7 – Dimensões “b” e “c” dos elementos da estrutura.....	29
Figura 8 – Estrutura 2D e pontos fixos do pórtico	30
Figura 9 – Elementos e malha do modelo	30
Figura 10 – Modos de vibração obtidos por Maia (2016).....	32
Figura 11 – Modo de vibração para a primeira frequência.....	32
Figura 12 – Modo de vibração para a segunda frequência	33
Figura 13 – Gráfico do módulo de elasticidade do aço com a variação de temperatura	34
Figura 14 – Variação do módulo de elasticidade do aço em função da temperatura	36
Figura 15 – Gráfico do módulo de elasticidade do alumínio com a variação de temperatura ..	37
Figura 16 – Variação do módulo de elasticidade do alumínio em função da temperatura.....	38
Figura 17 – Variação da primeira frequência em função da temperatura	39
Figura 18 – Variação da segunda frequência em função da temperatura	40
Figura 19 – Variações das frequências naturais obtidas por Chen e Ma (2016)	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades físicas das partes do pórtico	29
Tabela 2 – Frequências naturais obtidas da estrutura	31
Tabela 3 – Comparação das frequências naturais no SAP2000 e ANSYS Workbench.....	31
Tabela 4 – Temperaturas de análise da estrutura.....	33
Tabela 5 – Módulo de elasticidade calculado do aço para cada valor de temperatura	35
Tabela 6 – Módulo de elasticidade calculado do alumínio para cada valor de temperatura	37
Tabela 7 – Frequências obtidas para as temperaturas da análise.....	39
Tabela 8 – Decréscimos da frequência em relação à temperatura.....	40

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

C	Matriz de amortecimento
E	Módulo de elasticidade
GPa	Giga Pascal (unidade de tensão)
Hz	Hertz (unidade de frequência)
I	Momento de Inércia
K	Matriz de rigidez
Kg	Quilograma (unidade de massa)
L	Comprimento
m	Metro (unidade de comprimento)
M	Matriz de massa
MEF	Método dos Elementos Finitos
RNA	Rede Neural Artificial
SHM	<i>Structural Health Monitoring</i>
t	Tempo
T	Temperatura
ν	Coefficiente de Poisson
ϵ	Deformao elástica
ΔE	Variacão do módulo de elasticidade
ΔT	Variacão de temperatura
$^{\circ}C$	Graus Celsius (unidade de temperatura)
ρ	Massa específica
σ	Tensão
ω	Frequência

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS.....	15
1.1.1 Objetivos Específicos.....	15
1.2 METODOLOGIA.....	15
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3. REFERENCIAL TEÓRICO	23
3.1 VIBRAÇÕES E FREQUÊNCIAS NATURAIS	23
3.2 CÁLCULO DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS	24
3.3 EFEITO DA TEMPERATURA SOBRE AS FREQUÊNCIAS NATURAIS	25
3.4 MÓDULO DE ELASTICIDADE	25
3.5 ANSYS WORKBENCH	26
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	28
4.1 ANÁLISE MODAL DO PÓRTICO ORIGINAL	28
4.2 OBTENÇÃO DAS PROPRIEDADES DA ESTRUTURA SUBMETIDAS A DIFERENTES TEMPERATURAS	33
4.2.1 Cálculo do Módulo de Elasticidade	34
4.2.1.1 <i>Cálculo do Módulo de Elasticidade do Aço (Pilares)</i>	34
4.2.1.2 <i>Cálculo do Módulo de Elasticidade do Alumínio (Vigas)</i>	36
4.3 ANÁLISE MODAL DO PÓRTICO EM DIFERENTES TEMPERATURAS.....	38
5. CONCLUSÃO.....	42
REFERÊNCIAS	43

1. INTRODUÇÃO

No campo da Engenharia Civil, em especial da construção civil, diversos fatores dividem as atenções não somente dos que atuam no processo construtivo, mas também daqueles que irão desfrutar dos benefícios daquela construção. Do conforto e ergonomia aos aspectos financeiros, um item se destaca como prioridade para todas as partes, a integridade estrutural.

Pode-se pensar em uma estrutura íntegra como sendo aquela que atende às funções ao qual foi projetada, suportando os carregamentos máximos dimensionados e apresentando um comportamento estável e previsível por toda sua vida útil (FREIRE *et al.*, 1994).

Assim, o estudo da integridade estrutural engloba o conjunto de métodos e técnicas aplicadas para garantir a previsão do comportamento da estrutura. Mais conhecido como SHM (*Structural Health Monitoring*), o monitoramento da saúde estrutural, como descrito por Farrar (2007), se refere ao processo de implementar uma estratégia de identificação de danos em estruturas civis, mecânicas ou aeroespaciais.

Farrar e Worden (2007) falam ainda que o processo do SHM envolve a observação da estrutura ao longo do tempo, a partir de medições periódicas, a extração de dados obtidos a partir dessas medições e a análise estatística desses dados para determinar o atual estado de saúde do sistema.

Um dos fatores que interferem no SHM é o efeito da temperatura que, em construções civis, pode gerar o aparecimento de fissuras e trincas, bem como a contração ou dilatação indesejada de partes da construção. Além disso, o efeito da temperatura pode levar à alteração dos parâmetros modais (frequências naturais e modos de vibração) de maneira mais significativa do que a ocorrência de danos. Isso pode levar a falsas detecções de danos e conseqüentemente, um mau diagnóstico da integridade estrutural das construções, assim como apontado por Liu *et al.* (2016).

Soma-se à importância do SHM o grande número de obras sofrendo cada vez mais com processos de deterioração e desgaste, bem como o surgimento acelerado de obras maiores, mais leves, esbeltas e desafiadoras de um ponto de vista técnico.

Paulatinamente surgem técnicas e ferramentas que permitam acompanhar e estimar a integridade das estruturas. Nesse contexto, a análise modal surge como uma poderosa técnica para o acompanhamento das propriedades dinâmicas das estruturas.

A análise modal é a aplicação de técnicas numéricas, computacionais e/ou experimentais que buscam determinar os parâmetros modais de uma estrutura – frequência natural, modos de vibração e taxas de amortecimento.

A análise modal de uma estrutura também pode ser feita a partir da construção de modelos, ou seja, a partir da redução de estruturas complexas em estruturas mais simples, sem a perda das características importantes da estrutura original (REINHORN, CIMELLARO, 2008).

Existem dois métodos principais para realizar a análise modal de estruturas utilizando modelos, a partir de modelos numéricos ou modelos experimentais.

Para os modelos numéricos, é desenvolvido um modelo matemático para a estrutura a fim de determinar suas frequências. Os dados obtidos são comparados e a eficácia do modelo verificada. Já os modelos experimentais consistem na comparação do sinal medido na estrutura em momentos distintos (MAIO, 2011).

A análise a partir de modelos físicos baseia-se nas alterações dos parâmetros modais do sistema (frequência natural, modos de vibração e taxas de amortecimento). A análise das frequências naturais permite a detecção dos danos a partir da avaliação das diferenças entre as frequências da estrutura intacta e da estrutura excitada ou danificada. Já os modos de vibração permitem localizar os danos ao longo da estrutura.

Já a análise a partir de modelos numéricos computacionais se dá através do uso de *softwares* como ANSYS *Workbench*, SAP2000 e SolidWorks, que utilizam de uma técnica chamada método dos elementos finitos (MEF) para encontrar soluções aproximadas para problemas de modelagem.

Melo (2011) elenca as principais vantagens e desvantagens da construção de modelos numéricos. Dentre as vantagens, se destacam o custo de execução dos testes,

sendo os modelos experimentais mais onerosos, a maior rapidez para realização da simulação e a flexibilidade quanto a eventuais alterações de projeto.

Dentre as desvantagens, os modelos físicos destacam-se por poderem melhor retratar o comportamento de uma estrutura especialmente sob cargas complexas.

Um dos fatores que interferem na integridade estrutural é o efeito da temperatura que, em construções civis, pode gerar diversos efeitos indesejados, como o aparecimento de fissuras e trincas e a contração ou dilatação indesejada de partes da construção.

O efeito da temperatura pode também, levar à alteração dos parâmetros modais de maneira mais significativa do que a ocorrência de danos. Isso pode levar a falsas detecções de danos e conseqüentemente, um mau diagnóstico da integridade estrutural das construções, assim como apontado por Liu *et al.* (2016).

Um mau diagnóstico dos danos implica não somente na preocupação desnecessária com alterações inexistentes da estrutura, mas também pode levar a negligência de problemas reais que possam estar presentes, mas que estejam “disfarçados” devido à influência da temperatura nos parâmetros modais. Nesse contexto, é essencial o acompanhamento da influência da temperatura nos parâmetros modais afim de se evitar eventuais falhas de diagnóstico.

Tendo em vista os benefícios econômicos e humanos já mencionados e a relação entre as vantagens e desvantagens apresentados para os modelos numéricos, este trabalho tratará da análise modal de um pórtico plano submetido a variações de temperatura a partir da construção de um modelo numérico computacional.

O aumento das pesquisas a respeito da SHM e seu potencial benéfico tanto no sentido econômico como de preservação de vidas, bem como a importância do acompanhamento do efeito da temperatura, motivou a escolha do tema deste trabalho.

1.1. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento dos parâmetros modais de um pórtico submetido a variação de temperatura.

1.1.1. Objetivos Específicos

- Desenvolver um modelo numérico de pórtico plano;
- Analisar as propriedades dinâmicas desse pórtico, submetido a variação de temperatura.

1.2. METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido, basicamente, em três etapas:

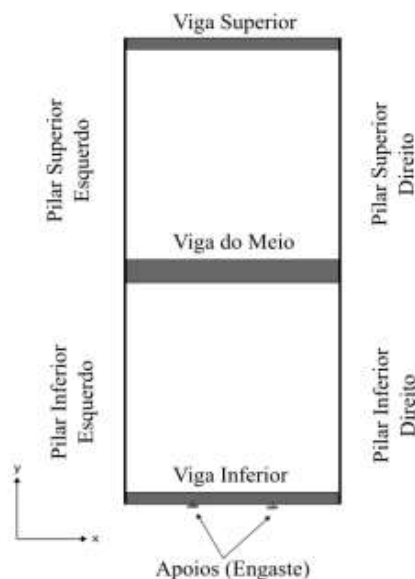
- 1) Estudo das propriedades dinâmicas: Foi feita revisão a respeito dos temas que englobam a análise realizada. Dentre estes, pode-se citar: frequências naturais, modos de vibração, influência da temperatura nos parâmetros modais, método dos elementos finitos, entre outros;
- 2) Modelagem numérica do pórtico plano com e sem variação de temperatura: A estrutura estudada foi modelada e seus parâmetros obtidos e comparados. Com o modelo validado, foi refeita a análise para diversos valores de temperatura;
- 3) Análise dos resultados: Os resultados obtidos na modelagem numérica foram então discutidos e comparados com outros trabalhos, afim de confirmar as conclusões alcançadas.

O início da modelagem numérica se deu com a criação de um modelo numérico de um pórtico plano a partir do uso do *software* ANSYS *Workbench* versão 20.2¹. Uma vez que o modelo foi validado, foram verificadas também, suas propriedades dinâmicas quando submetido à variação de temperatura.

A estrutura modelada foi baseada no modelo numérico de pórtico intacto do trabalho de Maia (2016). A Figura 1 representa o pórtico criado.

¹ Propriedade da *Ansys Inc.*

Figura 1 – Perfil do pórtico ensaiado por Maia (2016)

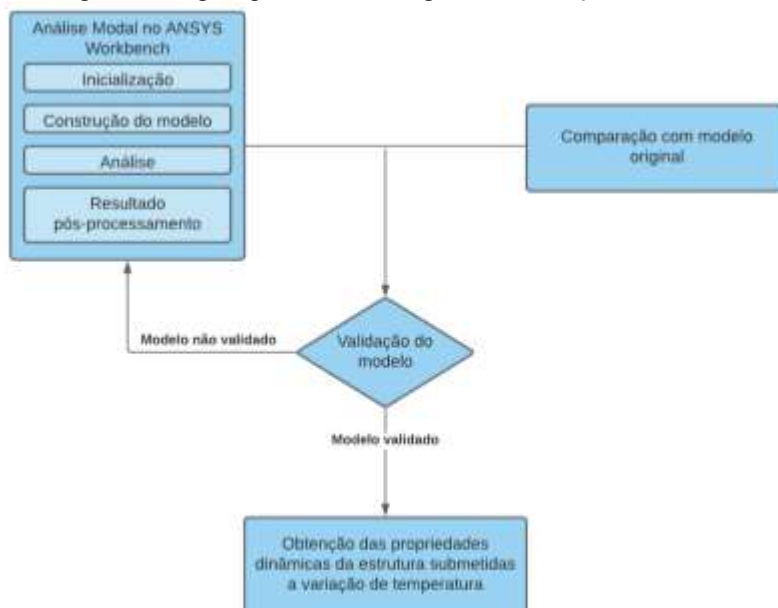


Fonte: Maia (2016)

As propriedades físicas e geométricas dos elementos do pórtico, bem como as propriedades dinâmicas obtidas, podem ser encontradas na seção 4.

O processo metodológico para a realização do trabalho encontra-se discriminado no organograma da Figura 2 a seguir:

Figura 2 - Organograma metodológico da realização do trabalho



Fonte: Autor

Assim, uma vez feita a análise numérica no ANSYS, os resultados são então comparados com os obtidos por Maia (2016). Estando os valores aproximados de forma satisfatória, o modelo é validado. Com o modelo validado, é simulada uma variação de temperatura entre 1°C e 40°C, de modo a obter as propriedades dinâmicas da estrutura sob tais condições.

A análise modal no ANSYS *Workbench* é formada por diversas etapas constituintes. São elas:

- **Inicialização:** Trata da definição da forma, tamanho e posição dos elementos a serem analisados na estrutura;
- **Construção do modelo:** Onde ocorre a associação das propriedades dos materiais a cada componente estrutural, a geração da malha de elementos finitos, a especificação dos tipos de carregamento e a definição do tipo de análise;
- **Análise:** Etapa da determinação do campo de deslocamentos, para assim estabelecer a distribuição das tensões na estrutura;
- **Resultado pós-processamento:** É a última etapa, onde são obtidos os resultados nos pontos de interesse, gerados os relatórios e obtidos os dados para finalizar a análise.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. Neste primeiro capítulo, foram delimitados o tema, os objetivos gerais e específicos e apresentada a metodologia para realização do trabalho.

No segundo capítulo é realizada revisão bibliográfica a respeito dos temas de SHM, análise modal, efeito da temperatura em estruturas e técnicas de localização e quantificação de danos a partir de frequências.

O terceiro capítulo trata do referencial teórico, uma revisão a respeito dos temas necessários para a compreensão clara e plena do trabalho. Nele foi apresentado o *software* ANSYS *Workbench*, bem como introduzidos os conceitos de vibração,

frequências naturais, amortecimento, módulo de elasticidade e demonstrado como calcular frequências e modos de vibração do ponto de vista da dinâmica das estruturas.

O quarto capítulo trata dos resultados e discussões, demonstrando como foi feita a construção do modelo no ANSYS *Workbench*, a obtenção das propriedades que variam com a temperatura e a análise modal da estrutura.

Finalmente, o quinto capítulo apresenta as conclusões finais e debate o cumprimento dos objetivos, bem como realiza sugestões para pesquisas futuras.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com a ascensão da importância das técnicas de monitoramento da integridade estrutural, sobretudo da análise modal, crescente também foi a importância dada na literatura a respeito do tema. Assim, buscando enriquecer a discussão a respeito do tema, foi realizada uma revisão bibliográfica visando não só contextualizar o tema tratado no trabalho, mas também apresentar o estado da arte do objeto de estudo.

Uma das primeiras tentativas de localizar danos em estruturas a partir das frequências naturais foi feita por Adams *et al.* (1978) em que o uso de frequências foi utilizado em uma variedade de objetos, como barras prismáticas retas, barras cunhadas e um virabrequim automotivo. Os resultados na localização dos danos obtidos em relação ao dano real foram dados como excelentes.

Cawley e Adams (1979) deram sequência aos trabalhos realizados e mostraram como medidas feitas em apenas um ponto da estrutura podem ser suficientes para detectar, localizar e quantificar danos. O trabalho usou-se da análise dos elementos finitos, já que esse método pode ser aplicado a qualquer estrutura. Os autores recomendam, no entanto, o uso conjunto de outras técnicas matemáticas a depender do tipo da estrutura.

Salawu (1997) fez uma análise da viabilidade de custos da implantação de um sistema de verificação da integridade estrutural a partir de frequências. O autor conclui que não só tais métodos são financeiramente viáveis, mas também que o uso das frequências naturais é útil para verificações de integridade de rotina, dada a sua facilidade de aplicação.

Trabalhos posteriores, como o de Lee e Chung (2000), fazem um contraponto quanto à natureza global do uso de frequências naturais para localização de danos em estruturas complexas, sugerindo que as frequências podem ser utilizadas em estruturas de geometria mais regular, mas não são eficazes no caso de estruturas mais complexas como pontes ou arcos, para um mesmo número de frequências.

Outros trabalhos focaram também na aplicação da análise modal a partir de modelos numéricos.

Silva (2018) desenvolveu um método, chamado DAS, para identificação e localização de danos para a estrutura de uma ponte biapoiada. Para tanto, comparou as respostas obtidas para o modelo numérico desenvolvido no SAP2000 com as frequências medidas num modelo experimental. O resultado obtido foi satisfatório para a localização de danos, tanto para a estrutura com um dano só, quanto com danos múltiplos.

Dobbro (2019) também realiza a comparação entre modelos experimentais e numéricos, porém, aplicada a uma estrutural real, no caso, uma passarela de concreto. O resultado é que os dados obtidos a partir do modelo numérico são similares aos obtidos através do método experimental, embora apresentem uma forma de curva diferente, devido à diferença de método.

Liu *et al.* (2016) buscou analisar a correlação entre as temperaturas (do ar, da superfície e média) com as frequências modais de uma laje e viga analisada a partir de um modelo numérico e experimental. Com os dados obtidos, foi feita uma regressão linear simples e múltipla que demonstraram que à medida que a temperatura aumenta, a frequência modal cai. Além disso, foi demonstrada a necessidade de se considerar a distribuição não uniforme da temperatura na estrutura.

Muitos trabalhos que envolvem análise modal e efeito da temperatura se dedicam a encontrar maneiras de contornar a interferência da temperatura no processo de detecção de dano. Gillich *et al.* (2019) propôs um método de implantação de coeficientes de eliminação do efeito da temperatura para cada modo de vibração. As simulações computacionais e o modelo experimental desenvolvido validaram o uso dos coeficientes para vigas.

Além da busca pela identificação da influência da temperatura nos parâmetros modais, outros estudos focaram também na avaliação dos danos causados pelo efeito da variação da temperatura ao longo do tempo. Kuba (2018) realizou um estudo a respeito de como os efeitos das mudanças climáticas representam um desafio para o futuro da engenharia. O autor demonstrou como os diversos efeitos adversos do

aquecimento global como o aumento do nível do mar, das concentrações de CO₂ e do aumento da temperatura influenciam nas propriedades físicas das estruturas.

Para o aumento das temperaturas médias anuais, Kuba (2018) diz que a variação da temperatura nas estruturas faz com que apareçam esforços de expansão e contração nas suas seções transversais, o que acarreta o surgimento de tensões não planejadas, que são um risco principalmente para estruturas feitas de materiais diferentes.

Outras técnicas mais modernas de SHM também vem sendo empregadas com o uso de tecnologias avançadas, como técnicas de processamento de imagem e técnicas de inteligência artificial a partir de aprendizado não supervisionado, como Redes Neurais Artificiais – RNA.

Maia (2016) utilizou RNAs para identificar alterações nas propriedades dinâmicas e localizar e quantificar possíveis danos estruturais, mesmo que de pequena escala. Para tanto, utiliza-se de modelos experimentais e numéricos como dados de entrada para o treinamento das RNAs.

Ainda com base do uso de redes neurais, Zhang *et al.* (2019) buscaram um método para dissociar os efeitos da temperatura nos parâmetros modais, tendo em vista que tais efeitos podem “mascarar” a presença de danos, de modo a prejudicar a análise da saúde estrutural. Seu trabalho iniciou com uma análise de séries temporais dos efeitos da temperatura em estruturas danificadas e intactas. Os dados obtidos de tais análises serviram de entrada para treinar as redes neurais artificiais. Os resultados mostraram que o método proposto foi capaz de detectar e localizar o dano nas estruturas através da previsão dos erros gerados pela variação da temperatura.

Feng, D. e Feng, M. (2017) tentaram avaliar técnicas de SHM diferentes, tendo buscado medir o potencial do uso de sensores visuais como ferramentas de custo-benefício competitivo para o monitoramento da saúde estrutural. Os resultados em laboratório, realizados em vigas bi apoiadas, demonstram alta precisão do uso de sensores visuais na detecção de dano. As frequências naturais identificadas apresentam forte semelhança com os valores obtidos através de acelerômetros.

Moughty (2017) faz uma revisão bibliográfica sobre os métodos de detecção de danos baseados em análise modal para a construção de pontes e os principais empecilhos da análise modal aplicada a tais estruturas.

O autor aponta que enquanto os métodos de análise modal se baseiam sob teorias bem estabelecidas, sua aplicação em casos reais de estruturas de pontes gerou resultados inconsistentes e sinalizou uma alta susceptibilidade a ruídos, especialmente vindos de fatores ambientais e operacionais.

Por fim, Kong, X., CAI e Kong, B. (2017) realizaram uma aprofundada revisão sobre o estado da arte do estudo de estruturas baseado em vibrações e aponta os principais desafios para pesquisas futuras na área:

- Para estruturas não lineares ou de comportamento não linear, o desenvolvimento de indicadores ou métodos de detecção só tem maior eficiência para a ocorrência de danos robustos;
- O efeito da vibração de fenômenos externos (tráfego, temperatura, etc.) precisa ser considerado, o que pode gerar incertezas nas medições das vibrações;
- O desenvolvimento de técnicas que possam levar em conta erros de modelagem e incertezas, tanto para modelos numéricos quanto experimentais;
- É desejável o desenvolvimento de modelos mais efetivos, indicadores de danos mais sensíveis e algoritmos mais otimizados para a detecção de danos.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Antes de adentrar diretamente no tema em estudo, é necessário o esclarecimento de alguns conceitos, formulações e teoremas. Com este fim, nesse capítulo serão abordados os temas de vibrações, frequências naturais, modos de vibração, amortecimento e o cálculo das frequências e modos de vibração do ponto de vista da dinâmica das estruturas.

3.1. VIBRAÇÕES E FREQUÊNCIAS NATURAIS

Primeiramente, precisamos esclarecer bem o conceito de vibração. A definição de Cismasiu (2010, p. 01) diz que: “Uma vibração mecânica é o movimento de uma partícula ou de um corpo que oscila em torno de uma posição de equilíbrio”.

Outro conceito fundamental diz respeito às frequências naturais, sendo definidas por Nóbrega e Hanai (2005) como:

As frequências naturais indicam a taxa de oscilação livre da estrutura, após cessada a força que provocou o seu movimento. Em palavras similares, representa o quanto a estrutura vibra quando não há força aplicada sobre ela. Esta frequência é função direta da rigidez, e inversa da massa da estrutura, sendo designada por um número real positivo, e cuja unidade mais comum é o Hertz (p. 02).

Assim, tem-se também os modos de vibração, ou seja, o padrão com que a estrutura vibra para cada frequência natural, sabendo que, ainda segundo Nóbrega e Hanai (2005), uma estrutura pode possuir diversas frequências naturais, uma vez que esta pode vibrar em diversas direções diferentes, após cessada a aplicação de uma força.

O fator responsável por fazer com que uma estrutura retorne ao repouso e sua frequência natural volte ao seu valor mínimo ou fundamental é o amortecimento, sendo essa a propriedade da estrutura em dissipar energia, neste caso, cinética.

3.2. CÁLCULO DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS

Para calcular as frequências e modos de vibração de um sistema, precisa-se partir da Equação geral do movimento, que dita o seu comportamento dinâmico em função do tempo.

Assim, para um sistema com N graus de liberdade, temos:

$$f(t) = M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) \quad (3.1)$$

Onde M, C e K correspondem, respectivamente, às matrizes de massa, amortecimento e rigidez, com dimensões N x N, sendo N o número de graus de liberdade do sistema. Os símbolos $\ddot{u}(t)$, $\dot{u}(t)$ e $u(t)$ são, respectivamente, os vetores da aceleração, velocidade e deslocamento em função do tempo t. Já $f(t)$ é também conhecido como o vetor de excitação e indica o vetor das forças que excitam o sistema no tempo t.

Considerando que quanto menor o fator de amortecimento, maior a semelhança de resultados em relação a sistemas não amortecidos, e que para obras civis de aço podem ser adotados valores de amortecimento crítico de 5% e 3% para obras de concreto, de acordo com SUDA *et. al.* (1996), pode-se então, considerar o valor da matriz de amortecimento C como sendo nulo.

Assim, é obtida a Equação (3.2):

$$f(t) = M\ddot{u}(t) + Ku(t) \quad (3.2)$$

Para sistemas lineares como o dado acima, a solução das equações do movimento, de acordo com Carvalho (2002), pode ser representada por:

$$u(t) = \hat{u} \cos(\omega t) \quad (3.3)$$

Em que \hat{u} representa a amplitude para cada frequência ω .

Substituindo a Equação (3.3) na Equação (3.2), tem-se que:

$$u(t) = \hat{u} \cos(K - \omega^2 M) \quad (3.4)$$

A Equação (3.4) é um problema de autovalor e autovetor que fornece n resultados para o autovalor das frequências ω e autovetores correspondentes \hat{u} .

3.3. EFEITO DA TEMPERATURA SOBRE AS FREQUÊNCIAS NATURAIS

A temperatura pode ser definida como a medida da agitação das partículas que compõem um corpo (JONES, 2019). Sendo assim, é uma característica inerente a qualquer objeto e com estruturas civis não é diferente.

O efeito observado da temperatura sobre as frequências naturais de uma estrutura segue uma ordem proporcionalmente inversa. À medida que a temperatura aumenta, as frequências naturais diminuem. Isso se deve principalmente ao efeito da temperatura sobre o módulo de elasticidade, tendo em vista que é um dos principais fatores determinantes para a frequência natural de uma estrutura.

Tal efeito da temperatura sobre as frequências naturais já foi observado em diversos trabalhos, como o caso de Liu *et al.* (2016) e Chen e Ma (2016).

A seção seguinte descreve mais detalhadamente como a temperatura afeta os valores do módulo de elasticidade.

3.4. MÓDULO DE ELASTICIDADE

O módulo de elasticidade, também conhecido como módulo de Young, é a medida da resistência de um material à deformação elástica. Podendo ser definida pela fórmula:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.5)$$

Em que:

σ = Tensão aplicada

ε = Deformação elástica do objeto

Materiais com baixo módulo de elasticidade são mais maleáveis, diminuindo sua seção transversal quando esticados. Já materiais com maior módulo de elasticidade apresentam maior resistência à deformação (JONES e ASHBY, 2019, p.31).

Por sua natureza, o módulo de elasticidade varia com a temperatura. O aumento da temperatura em algum material aumenta a vibração dos átomos na estrutura cristalina o que aumenta a distância atômica, reduzindo a força das ligações (PERSSON, MUELLER e CHAI, 2008, p.4).

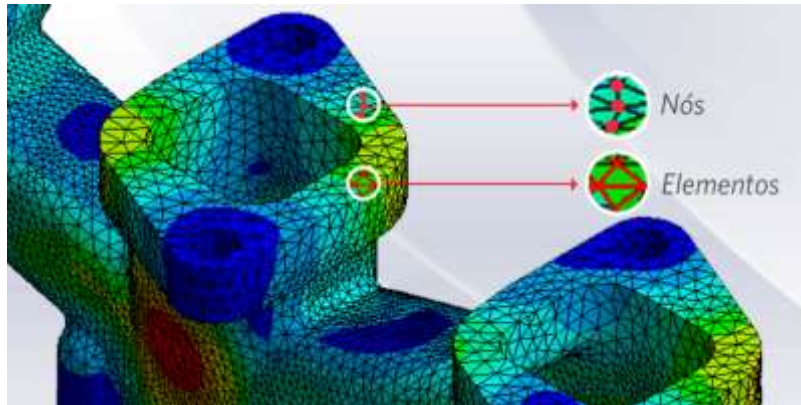
Similarmente, o contrário também se aplica. Um decréscimo na temperatura reduz a vibração dos átomos, encurtando a distância atômica e aumentando a força das ligações.

3.5.ANSYS WORKBENCH

O ANSYS *Workbench* é um *software* desenvolvido pela empresa norte americana Ansys Inc., utilizado para simular modelos computacionais de estruturas, máquinas e equipamentos para realizar análises modais, térmicas, comportamento de fluidos, transferência de massa e calor, etc.

A análise feita neste trabalho utilizou do método dos elementos finitos (MEF) que é um procedimento numérico que divide o domínio, do problema real em subdomínios para a determinação de soluções aproximadas de problemas de valores de contorno de equações diferenciais, com a conversão do modelo contínuo um modelo discreto, com número finito de graus de liberdade O método dos elementos finitos divide a estrutura em partes menores chamadas de elementos finitos. Os elementos da estrutura em estudo são divididos em nós (pontos) e elementos (áreas) que formam uma malha (*mesh*). A análise é resolvida para cada elemento que constitui a malha e o resultado final é estimado para o domínio total do objeto em análise. Na Figura 3 a seguir, estão demonstrados os elementos constituintes de uma malha.

Figura 3 – Elementos de uma malha

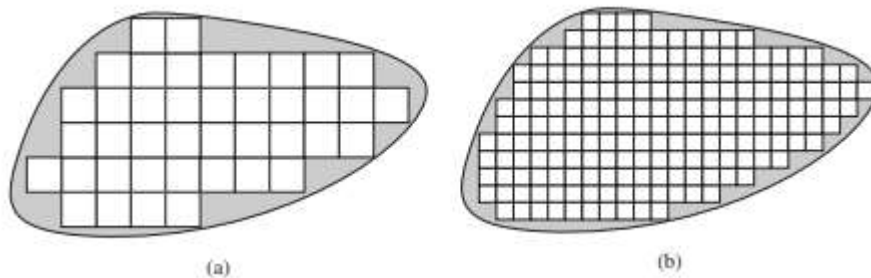


Fonte: www.esss.co²

A qualidade e acurácia da análise depende diretamente da densidade e distribuição da malha. Quanto mais densa a malha, mais aproximado será o resultado do valor verdadeiro, ao custo de mais poder computacional.

A imagem a seguir ilustra bem esse efeito. Na Figura 4 (a) percebe-se que o pouco refinamento da malha torna a análise pouco satisfatória para representar o conjunto total do espaço do elemento, especialmente quando comparado à malha da Figura 4 (b).

Figura 4 – Comparação de malhas para aproximação da representação de área



Fonte: Hutton (2004, p.4)³

Com o uso da ferramenta ANSYS a partir do MEF, foi feita a análise das frequências naturais e dos modos de vibração da estrutura em estudo sob condições normais e, posteriormente, sob efeito da temperatura.

² Disponível em: < <https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>>. Acesso em 24 de abril de 2011.

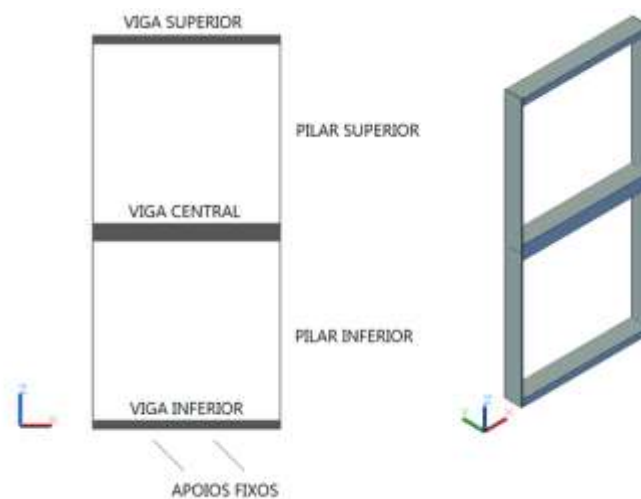
³ Disponível em: < <https://tinyurl.com/4zd5yh4u/>>. Acesso em 24 de abril de 2011.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. ANÁLISE MODAL DO PÓRTICO ORIGINAL

A análise modal foi iniciada com a modelagem da estrutura. Como já dito, o pórtico modelado foi baseado no trabalho de Maia (2016). Assim, o modelo segue a configuração apresentada na Figura 5.

Figura 5 – Perfil e vista do pórtico ensaiado



Fonte: Autor

Maia (2016) também desenvolveu um modelo físico para o pórtico (Figura 6).

Figura 6 – Modelo físico desenvolvido por Maia (2016)



Fonte: Maia (2016)

Trata-se de uma estrutura formada por 4 pilares de aço e 3 vigas de alumínio, com dois suportes fixos localizados a 6 e 13 cm do canto inferior esquerdo, a fim de simular uma situação de engastamento.

As propriedades físicas da estrutura também foram obtidas a partir do trabalho de Maia (2016), estando estas discriminadas na Tabela 1.

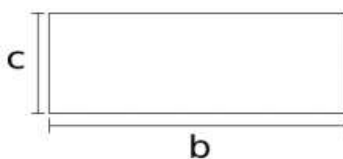
Tabela 1 – Propriedades físicas das partes do pórtico

Propriedades Físicas	Pilares Inferiores	Pilares Superiores	Viga Inferior	Viga Central	Viga Superior
Massa específica (Kg/m ³) - ρ	7900	7900	2700	2700	2700
Módulo de elasticidade (Gpa) - E	220	220	70,36	70,36	70,36
Coefficiente de Poisson - ν	0,3	0,3	0,33	0,33	0,33
Comprimento (m) - L	0,2	0,2	0,189	0,189	0,189
Área da seção transversal (m ²)	$3,727 \times 10^{-5}$	$3,727 \times 10^{-5}$	$2,412 \times 10^{-4}$	$4,822 \times 10^{-4}$	$2,411 \times 10^{-4}$
Momento de inércia (m ⁴) - I	$6,529 \times 10^{-12}$	$6,529 \times 10^{-12}$	$1,828 \times 10^{-9}$	$1,415 \times 10^{-8}$	$1,82 \times 10^{-9}$
Dimensão “b” do elemento (m)	0,0257	0,0257	0,0254	0,0254	0,0253
Dimensão “c” do elemento (m)	$1,43 \times 10^{-3}$	$1,43 \times 10^{-3}$	$9,52 \times 10^{-3}$	0,019	$9,52 \times 10^{-3}$

Fonte: Maia (2016, p. 61)

As dimensões “b” e “c” do elemento são demonstradas na Figura seguinte e se referem, respectivamente, à maior e menor dimensão da seção transversal de cada elemento da figura.

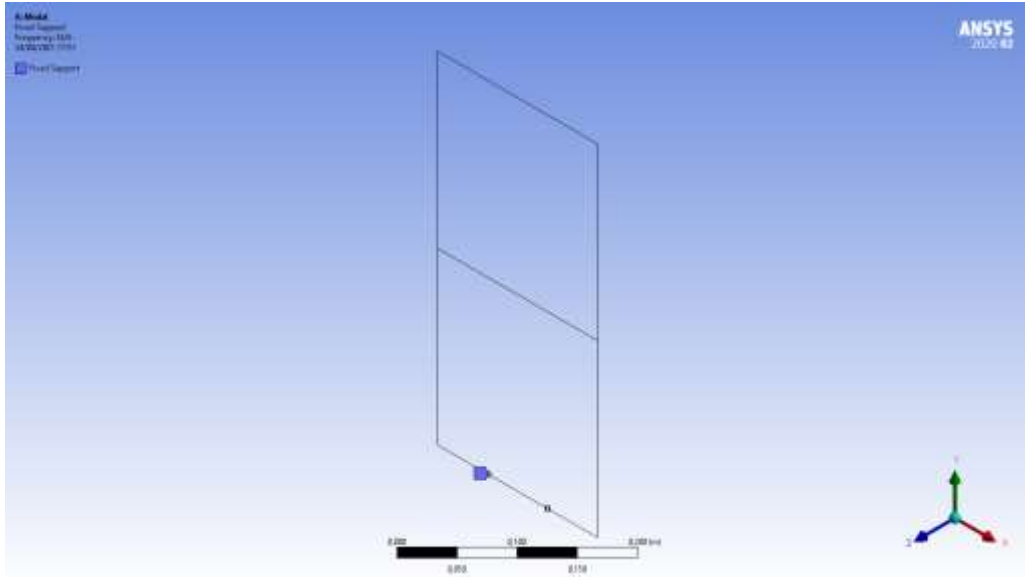
Figura 7 – Dimensões “b” e “c” dos elementos da estrutura



Fonte: Maia (2016, p. 62)

A modelagem foi iniciada com a criação de um modelo 2D da estrutura e adição dos pontos fixos na viga inferior, como demonstrado na Figura 8.

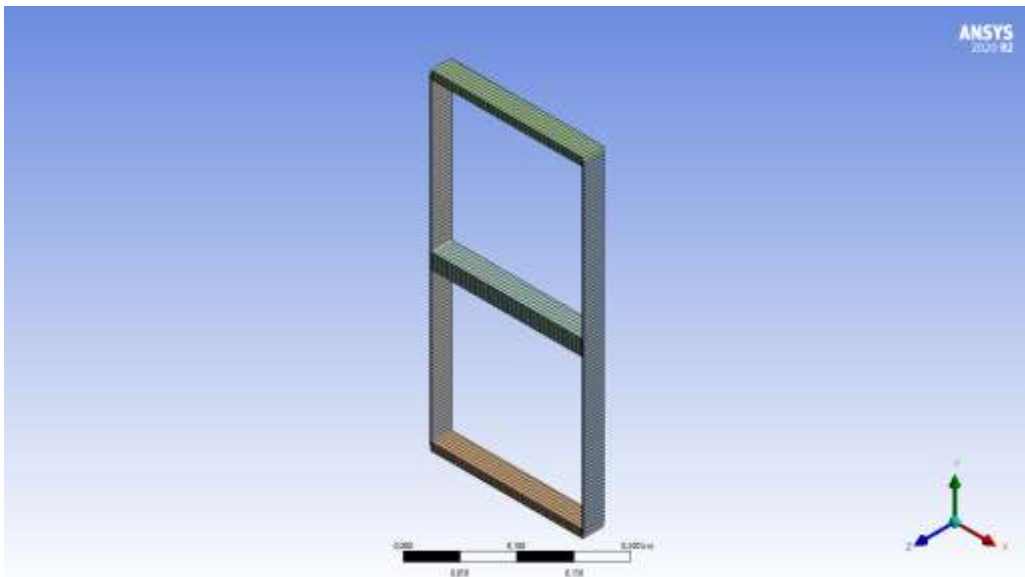
Figura 8 – Estrutura 2D e pontos fixos do pórtico



Fonte: Autor

Continuando a modelagem, foi inserida uma seção transversal à estrutura 2D criada, gerando os elementos de pilar, de viga e a malha. A imagem a seguir demonstra a malha criada, do tipo hexaédrica, com 627 nós e 314 elementos.

Figura 9 – Elementos e malha do modelo



Fonte: Autor

Terminada a modelagem, foram associadas as propriedades físicas de cada componente da estrutura, a partir dos dados obtidos na Tabela 1. Uma vez associadas

as propriedades a cada elemento do pórtico, foram obtidas as frequências naturais, conforme apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Frequências naturais obtidas da estrutura

Ordem	Frequência (Hz)
1°	13,016 Hz
2°	33,777 Hz

Fonte: Autor

Comparando-se os valores obtidos com os de Maia (2016), observa-se grande similaridade entre ambos, com erros percentuais abaixo de 1%. Assim, pode-se verificar que as frequências obtidas são representativas do modelo construído.

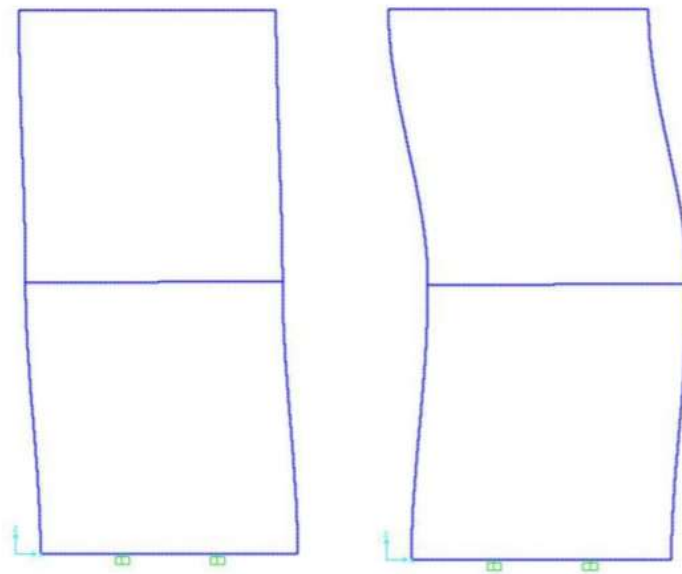
Tabela 3 – Comparação das frequências naturais no SAP2000 e ANSYS *Workbench*

Ordem da frequência	SAP2000	ANSYS <i>Workbench</i>	Erro (%)
1°	13,118 Hz	13,016 Hz	0,78
2°	33,812 Hz	33,777 Hz	0,10

Fonte: Autor

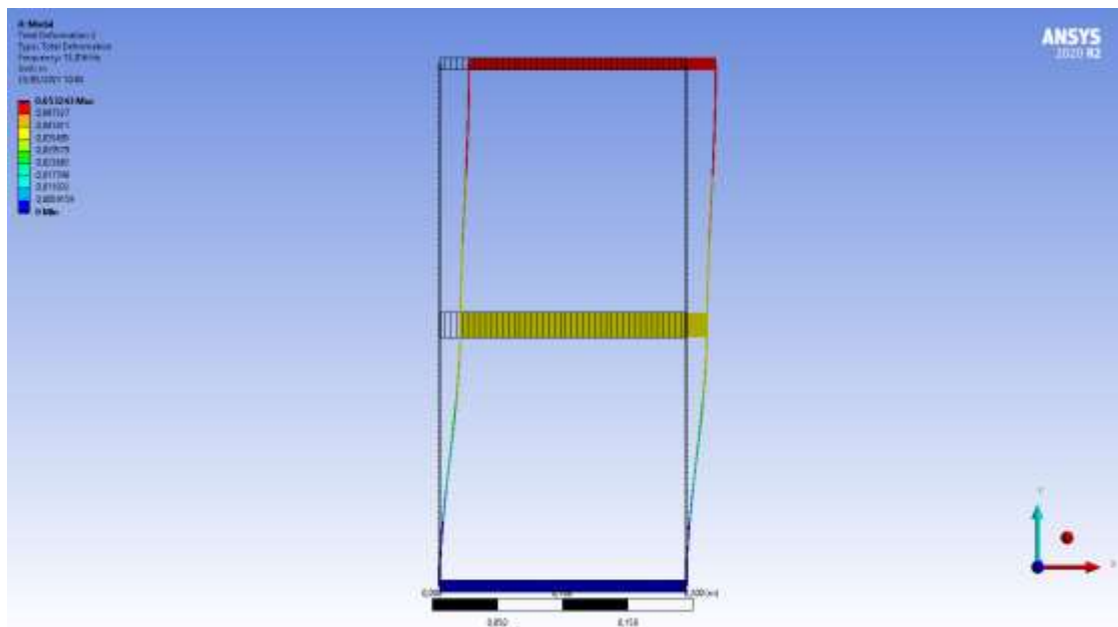
Por fim, foram gerados os modos de vibração para as duas primeiras frequências naturais. Observando a geometria, nota-se também, grande similaridade ao trabalho de Maia (2016). As Figuras 10, 11 e 12 demonstram os modos de vibração obtidos por Maia (2016) e os modos de vibração para a primeira e segunda frequência natural, respectivamente.

Figura 10 – Modos de vibração obtidos por Maia (2016)



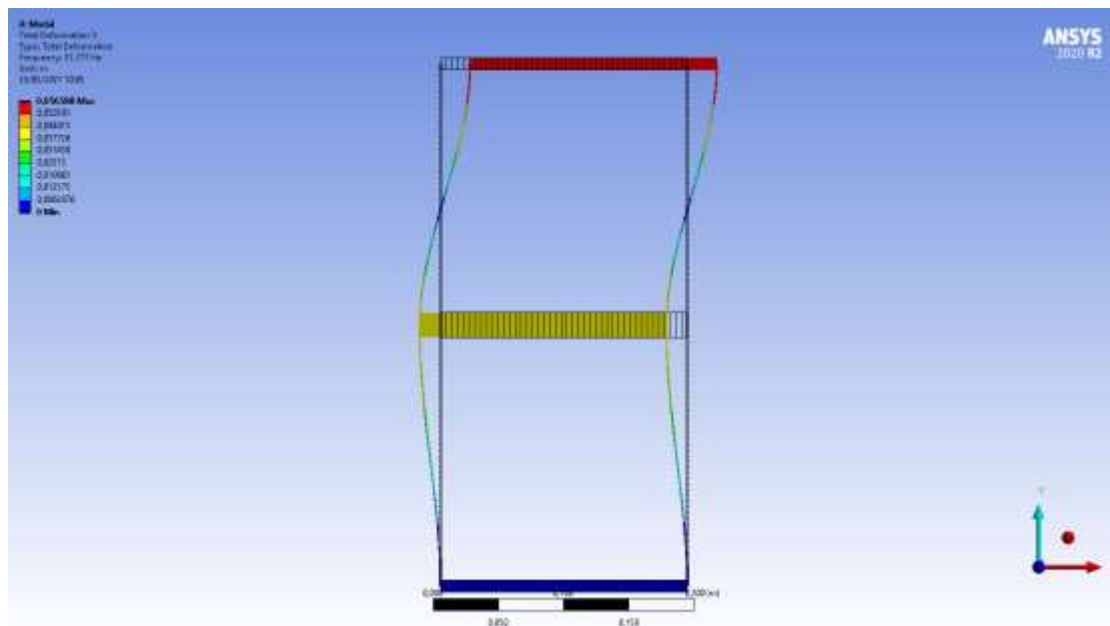
Fonte: Maia (2016)

Figura 11 – Modo de vibração para a primeira frequência



Fonte: Autor

Figura 12 – Modo de vibração para a segunda frequência



Fonte: Autor

4.2. OBTENÇÃO DAS PROPRIEDADES DA ESTRUTURA SUBMETIDAS A DIFERENTES TEMPERATURAS

Tendo sido concluída a primeira parte da análise, buscou-se refazer a análise adequando a uma variação de temperatura. A faixa de temperatura analisada foi de 1°C a 40°C, usando valores múltiplos de 5. Tais valores foram escolhidos por representarem uma faixa de temperatura ambiente comum no planeta, mesmo que em localizações geográficas distintas.

Por padrão, a análise no ANSYS e no SAP2000 é feita a uma temperatura de 22°C. Desta forma, o valor de 22°C é um dos valores de temperatura analisados, visto que foi parte da análise original. Assim, as temperaturas da análise foram as seguintes:

Tabela 4 – Temperaturas de análise da estrutura

Temperatura				
1° C	5° C	10° C	15° C	20° C
22° C	25° C	30° C	35° C	40° C

Fonte: Autor

Com a variação de temperatura, ocorre também a mudança nas características físicas que compõem o material da estrutura. Dentre as propriedades físicas inseridas na análise inicial, apenas o módulo de elasticidade apresentará variação significativa, tendo em vista que as demais características são diretamente dependentes da geometria da estrutura, que não varia de forma significativa.

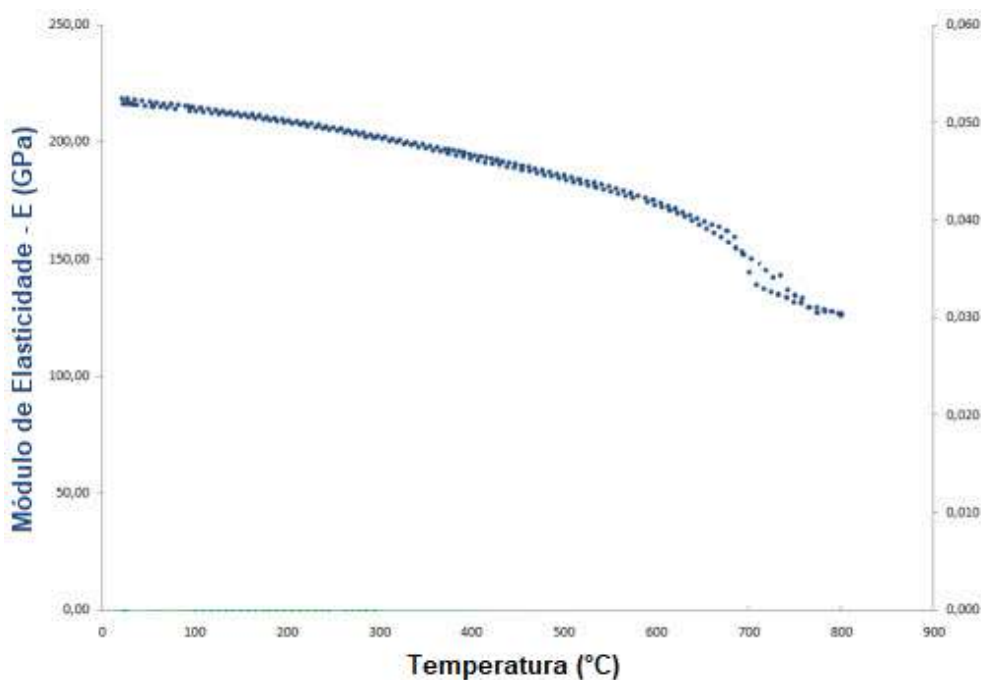
4.2.1. Cálculo do Módulo de Elasticidade

A obtenção de cada valor do módulo de elasticidade (E) foi obtido calculando a taxa de decréscimo de E com o aumento da temperatura (T). Observando a forma das curvas das Figuras 13 e 14, foi assumida a linearidade do gráfico dos 22°C aos 100°C.

4.2.1.1 Cálculo do Módulo de Elasticidade do Aço (Pilares)

A Figura X demonstra os valores do módulo de elasticidade do aço para cada temperatura dos 20° C aos 800°C.

Figura 13 – Gráfico do módulo de elasticidade do aço com a variação de temperatura



Fonte: Adaptado de IMCE (2020)⁴

4 Disponível em: <<https://www.imce.net/products/rfda-ht650>>. Acesso em 01 de maio de 2011.

Tendo-se os valores do módulo de elasticidade para 22°C e 100°C, o valor da taxa de decréscimo com o aumento da temperatura ($\frac{\Delta E}{\Delta T}$) foi calculado a partir da diferença entre os valores máximos e mínimos de E e T.

$$T1 = 22^\circ \text{ C}$$

$$T2 = 100^\circ \text{ C}$$

$$E(T1) = 220 \text{ Gpa}$$

$$E(T2) = 215 \text{ Gpa}$$

$$\frac{\Delta E}{\Delta T} = \frac{E(T2)-E(T1)}{T2-T1} = \frac{215-220}{100-22} = \frac{-5}{78} = -0,0641 \text{ Gpa}/^\circ\text{C} \quad (4.1)$$

Assim, tem-se que para um aumento de 1°C, o módulo de elasticidade diminui em 0,0641 Gpa. A Tabela 5 a seguir mostra os valores do módulo de elasticidade do aço para cada temperatura.

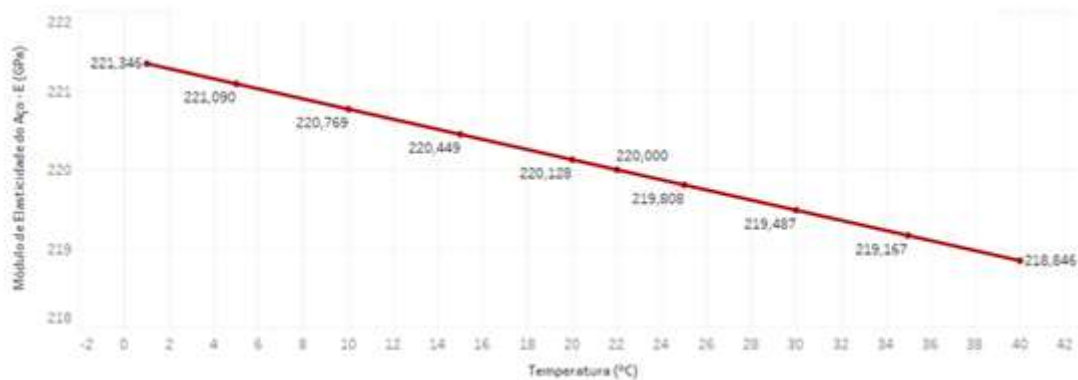
Tabela 5 – Módulo de elasticidade calculado do aço para cada valor de temperatura

Material	Temperatura	Módulo de Elasticidade - E (Gpa)
Aço	1° C	221,3461
	5° C	221,0897
	10° C	220,7692
	15° C	220,4487
	20° C	220,1282
	22° C	220,000
	25° C	219,8077
	30° C	219,4872
	35° C	219,1667
	40° C	218,8462

Fonte: Autor

Com os valores calculados do módulo de elasticidade do aço, foi traçado o gráfico da variação do módulo de elasticidade em função da temperatura, com o auxílio do *software* de visualização Tableau Desktop⁵.

Figura 14 – Variação do módulo de elasticidade do aço em função da temperatura



Fonte: Autor

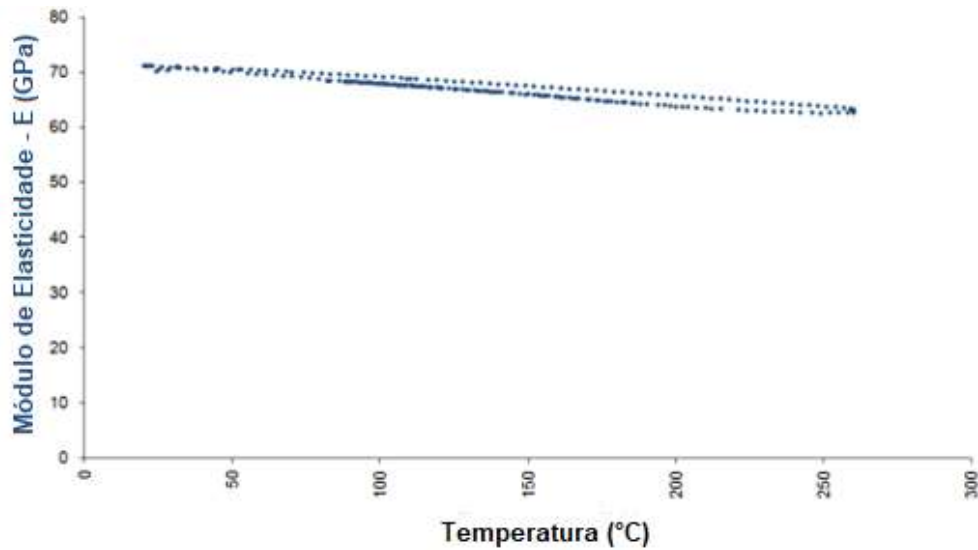
4.2.1.2. Cálculo do Módulo de Elasticidade do Alumínio (Vigas)

Analogamente ao aço, o módulo de elasticidade do alumínio foi calculado a partir dos pontos notáveis da reta e assumindo um comportamento linear na faixa de temperatura entre 22°C e 100°C.

A Figura 15 demonstra os valores do módulo de elasticidade do alumínio para cada temperatura dos 20° C aos 300°C.

⁵ Propriedade de *Tableau Inc.*

Figura 15 – Gráfico do módulo de elasticidade do alumínio com a variação de temperatura



Fonte: Adaptado de IMCE (2020)⁶

Assim, tem-se que:

$$T1 = 22^{\circ} \text{ C}$$

$$T2 = 100^{\circ} \text{ C}$$

$$E(T1) = 70,36 \text{ Gpa}$$

$$E(T2) = 68 \text{ Gpa}$$

$$\frac{\Delta E}{\Delta T} = \frac{E(T2) - E(T1)}{T2 - T1} = \frac{70,36 - 68}{100 - 22} = \frac{-2,36}{78} = -0,03 \text{ Gpa}/^{\circ} \text{ C} \quad (4.2)$$

A Tabela 6 apresenta os valores do módulo de elasticidade para as temperaturas de interesse.

Tabela 6 – Módulo de elasticidade calculado do alumínio para cada valor de temperatura

Material	Temperatura	Módulo de Elasticidade - E (Gpa)
Alumínio	1° C	70,99
	5° C	70,87
	10° C	70,72
	15° C	70,57

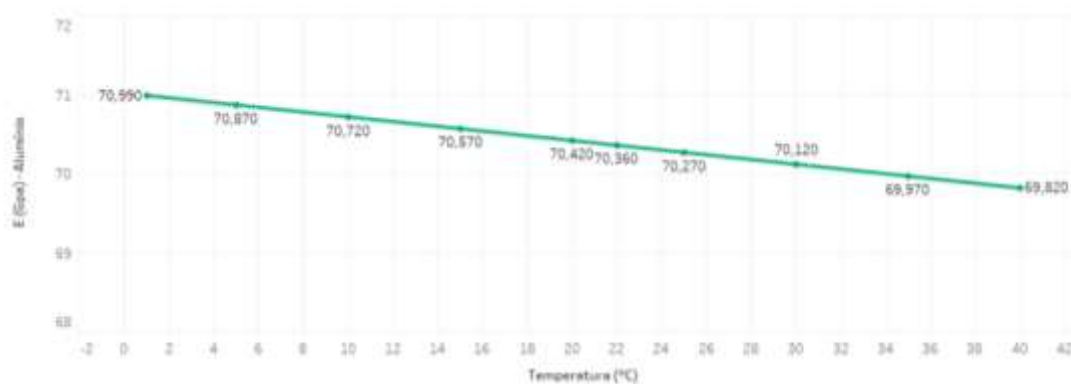
⁶ Disponível em: <<https://www.imce.net/products/rfda-ht650>>. Acesso em 01 de maio de 2011.

Alumínio	20° C	70,42
	22° C	70,36
	25° C	70,27
	30° C	70,12
	35° C	69,97
	40° C	69,82

Fonte: Autor

Similarmente ao que foi feito para o aço, foi desenhado o gráfico da variação do módulo de elasticidade do alumínio em função da temperatura, demonstrado na Figura 16.

Figura 16 – Variação do módulo de elasticidade do alumínio em função da temperatura



Fonte: Autor

4.3. ANÁLISE MODAL DO PÓRTICO EM DIFERENTES TEMPERATURAS

Com toda a estrutura inicial já pronta e obtidos os valores necessários da temperatura e do módulo de elasticidade, bastou alterar as propriedades dos elementos no Ansys *Workbench* para que se pudesse ser realizada a análise modal nas novas condições estabelecidas. A Tabela 7 demonstra os resultados das frequências naturais obtidas para cada temperatura.

Tabela 7 – Frequências obtidas para as temperaturas da análise

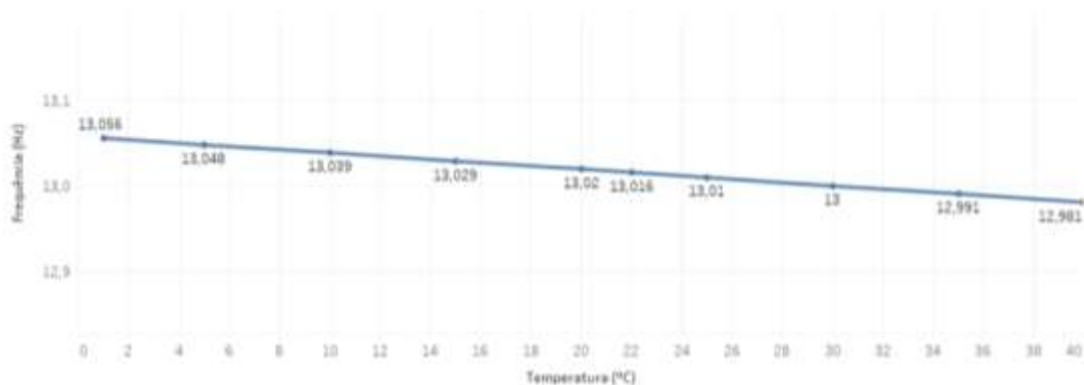
Temperatura	1° frequência	2° frequência
1 °C	13,056	33,881
5 °C	13,048	33,861
10 °C	13,039	33,836
15 °C	13,029	33,812
20 °C	13,020	33,787
22 °C	13,016	33,777
25 °C	13,010	33,762
30 °C	13,000	33,738
35 °C	12,991	33,713
40 °C	12,981	33,688

Fonte: Autor

Como já dito, por padrão o ANSYS *Workbench* utiliza a temperatura de 22°C para realizar a análise. Por este motivo, as frequências obtidas para a temperatura de 22°C são iguais aos da primeira análise.

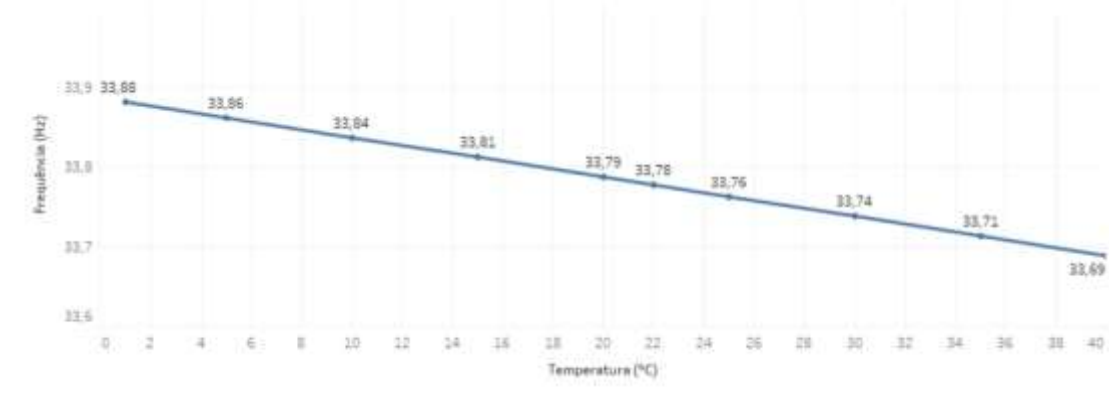
Para facilitar a visualização, também foram traçados os gráficos da variação das frequências em função da temperatura, como mostrado nas Figuras 17 e 18, a seguir.

Figura 17 – Variação da primeira frequência em função da temperatura



Fonte: Autor

Figura 18 – Variação da segunda frequência em função da temperatura



Fonte: Autor

Terminada a análise, foi calculado o decréscimo numérico e percentual para cada frequência a partir da diferença das frequências obtidas entre 1°C e 40°C. Além disso, foi calculado o decréscimo da frequência em Hz por °C a partir da diferença das frequências máxima e mínima, dividido pelo intervalo de temperatura de 39°C.

Tabela 8 – Decréscimos da frequência em relação à temperatura

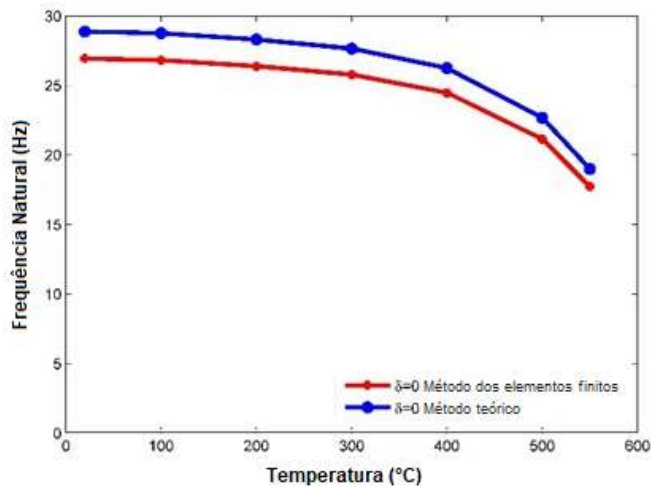
	1° frequência	2° frequência	3° frequência
Decréscimo	0,0750	0,1930	1,1000
Decréscimo Percentual (%)	0,5744	0,5696	0,5727
Decréscimo por °C	0,0019	0,0049	0,0282

Fonte: Autor

A observação do decréscimo das frequências naturais da estrutura condiz com o que foi constatado por Liu *et al.* (2016), que observou que à medida que a temperatura aumenta, a frequência modal cai. Além disso, tais taxas de decréscimo são condizentes com os decréscimos verificados em outros trabalhos, como o de Chen e Ma (2016), onde foi feita a análise das frequências naturais da seção de corte de uma viga de aço.

Embora Chen e Ma (2016) terem analisado uma estrutura diferente da tratada neste trabalho, é possível observar, a partir da Figura 19, o quanto a frequência natural diminui sob o efeito da temperatura e verificar a semelhança com os resultados aqui obtidos.

Figura 19 – Variações das frequências naturais obtidas por Chen e Ma (2016)



Fonte: Adaptado de Chen e Ma (2016).

Observa-se pelo gráfico que existe pouca variação da frequência natural na faixa entre 0°C a 100°C, assim como ocorrido neste trabalho para a faixa analisada entre 1°C e 40°C, em que houve um decréscimo de apenas 0,075 Gpa para a variação de temperatura de 39°C.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizada a análise modal de um pórtico plano constituído sob condições variáveis de temperatura, a partir da construção de um modelo numérico.

A análise foi iniciada com a modelagem da estrutura no *software* ANSYS *Workbench*, onde foi criada a geometria da estrutura, especificadas as propriedades e gerados os resultados. As frequências naturais e modos de vibração obtidos guardam forte similaridade com o trabalho de Maia (2016), tendo erros de 0,78% para a primeira frequência e 0,1 % para a segunda frequência.

Ademais, foram calculados os valores do módulo de elasticidade e refeita a análise sob dez diferentes temperaturas, variando entre 1°C e 40°C. Os resultados obtidos mostraram o decréscimo da frequência natural da estrutura com o aumento da temperatura, como observado em outras obras.

Estruturas danificadas apresentam diferentes frequências e modos de vibração do que estruturas intactas. A identificação do dano, porém, pode ser prejudicada pelo efeito da temperatura, que também altera seus parâmetros modais, sem necessariamente causar dano. Assim, quantificar o efeito da temperatura sobre os parâmetros modais é essencial para garantir a correta verificação da integridade da estrutura.

A análise modal encontra diversas aplicações no campo da SHM, tanto em estruturas civis, como em peças mecânicas e máquinas. Além disso, apresenta-se como ferramenta imprescindível no monitoramento e no processo de criação e modelagem de máquinas e peças. O uso de modelos numéricos destaca-se dentre as diversas formas de análise modal devido à precisão, praticidade e flexibilidade diante de eventuais alterações de projeto, sem mencionar o custo reduzido.

Essa experiência suscita o desenvolvimento de trabalhos futuros, como a criação de um modelo físico da estrutura estudada, a avaliação do efeito de vibrações externas sobre as frequências naturais e o estudo dos efeitos da exposição prolongada de estruturas a temperaturas extremas.

REFERÊNCIAS

- 1 ADAMS, R. D.; CAWLEY, P.; PYE, C. J.; STONE, B. J. **A Vibration Technique for Non-Destructively Assessing the Integrity of Structures**. Journal of Mechanical Engineering Science, [S.L.], v. 20, n. 2, p. 93-100, abr. 1978. SAGE Publications. http://dx.doi.org/10.1243/jmes_jour_1978_020_016_02. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/239061699_A_Vibration_Technique_for_Non-Destructively_Assessing_the_Integrity_of_Structures. Acesso em: Abril de 2021.
- 2 CARVALHO, F. W. L. **Procedimento Experimental Para Avaliação Do Fator De Amortecimento Em Estruturas**. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/PASA-89DGZ6/1/124.pdf>. Acesso em: Novembro de 2020.
- 3 CAWLEY, P; ADAMS, R D. **The location of defects in structures from measurements of natural frequencies**. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, [S.L.], v. 14, n. 2, p. 49-57, 1 abr. 1979. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1243/03093247v142049>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/243771980_The_Location_of_Defects_in_Structures_From_Measurements_of_Natural_Frequencies. Acesso em: Outubro de 2020.
- 4 CISMASIU, Cornélio. **Apontamentos De Vibrações Mecânicas**. 2010. Disponível em: <http://www.terra.com.br/virtualbooks/freebook/port/Lport2/navionegreiro.htm>. Acesso em: Novembro de 2020.
- 5 DOBBRO, G. G. R. **Determinação das frequências naturais de passarela de concreto: análise modal operacional e método dos elementos finitos**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2018-11-19. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/192212>. Acesso em: Dezembro de 2020.
- 6 FARRAR, Charles R; WORDEN, Keith. **An introduction to structural health monitoring**. Philosophical Transactions of The Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, [S.L.], v. 365, n. 1851, p. 303-315, 12 Dez. 2006. The Royal Society. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2006.1928>. Disponível em: <http://doi.org/10.1098/rsta.2006.1928>. Acesso em: Dezembro de 2020.

7 FENG Dongming, FENG Maria Q. **Experimental validation of cost-effective vision-based structural health monitoring, Mechanical Systems and Signal Processing**, Volume 88, 2017, Pages 199-211, ISSN 0888-3270. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.11.021>. Acesso em: Dezembro de 2020.

8 FREIRE, J.L.F., Castro, J., Otegui, J.L., Manfredi, C., “**Aspectos Gerais da Avaliação de Integridade e Extensão de Vida de Estruturas e Equipamentos Industriais**”, ABCM/DT-PROMAI-001.0/96. Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/11885/11885_5.PDF. Acesso em: Agosto de 2020.

9 GILLICH, Gilbert-Rainer; FURDUI, Horia; WAHAB, Magd Abdel; KORKA, Zoltan-Iosif. **A robust damage detection method based on multi-modal analysis in variable temperature conditions**. Mechanical Systems and Signal Processing, [S.L.], v. 115, p. 361-379, Jan. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.05.037>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0888327018302966>. Acesso em: Fevereiro de 2021.

10 JONES, Andrew Zimmerman. “**Temperature Definition in Science.**” ThoughtCo, Aug. 26, 2020. Disponível em: [thoughtco.com/temperature-definition-in-science-2699014](https://www.thoughtco.com/temperature-definition-in-science-2699014). Acesso em: Abril de 2021.

11 JONES, David R.H.; ASHBY, Michael F. **Elastic Moduli**. **Engineering Materials 1**, [S.L.], p. 31-47, 2019. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-08-102051-7.00003-8>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081020517000038>. Acesso em: Maio de 2021.

12 KONG, X.; CAI, C. S.; KONG, B. **Damage Detection Based on Transmissibility of a Vehicle and Bridge Coupled System**. Journal of Engineering Mechanics, [S.L.], v. 141, n. 1, p. 04014102, Jan. 2015. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)em.1943-7889.0000821](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)em.1943-7889.0000821). Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/270435474_Damage_Detection_Based_on_Transmissibility_of_a_Vehicle_and_Bridge_Coupled_System. Acesso em: Março de 2021.

- 13 KUBA, Michal. **Impact of Climate Changes on Civil Engineering Structures**. Research Gate. Zagreb, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/324477074_IMPACT_OF_CLIMATE_CHANGES_ON_CIVIL_ENGINEERING_STRUCTURES. Acesso em: Maio de 2021.
- 14 LEE, Young-Shin; CHUNG, Myung-Jee. **A study on crack detection using eigenfrequency test data**. Computers & Structures, [S.L.], v. 77, n. 3, p. 327-342, jun. 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0045-7949\(99\)00194-7](http://dx.doi.org/10.1016/s0045-7949(99)00194-7). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045794999001947>. Acesso em: Fevereiro de 2021.
- 15 LIU, Hanbing; WANG, Xianqiang; JIAO, Yubo. **Effect of Temperature Variation on Modal Frequency of Reinforced Concrete Slab and Beam in Cold Regions**. Shock and Vibration, [S.L.], v. 2016, p. 1-17, 2016. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/4792786>. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/sv/2016/4792786/#copyright>. Acesso em: Abril de 2021.
- 16 CHEN, Guoping; MA, Yijiang. **Modal analysis of a rectangular variable cross-section beam with multiple cracks under different temperatures**. Journal of Vibroengineering, [S.L.], v. 18, n. 5, p. 3078-3088, 15 ago. 2016. JVE International Ltd. <http://dx.doi.org/10.21595/jve.2016.16676>. Disponível em: <https://www.jvejournals.com/article/16676#references>. Acesso em: Maio de 2021.
- 17 MAIA, R. **Detecção de Dano Estrutural em Estruturas Planas Utilizando Redes Neurais**. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM025A/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2016, 94p. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/23222>. Acesso em: Abril de 2020.
- 18 MAIO, C. **Técnicas Para Monitoramento da Integridade Estrutural Usando Sensores e Atuadores Piezoelétricos**. São Carlos, 2011. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18149/tde12052011213014/publico/carlosmaio.pdf>. Acesso em: Novembro de 2020.
- 19 TICONA MELO, Ladislao Roger. **Monitoração de modelos físicos reduzidos para investigação do comportamento de estruturas em escala real**. [S. l.]: Universidade de São Paulo, Agencia USP de Gestão da Informação Acadêmica (AGUIA), [s. d.]. DOI 10.11606/d.3.2011.tde-31102011-120001. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.11606/D.3.2011.tde-31102011-120001>. Acesso em: Dezembro de 2020.

- 20 MOUGHTY, J.J.; CASAS, J.R. **Vibration Based Damage Detection Techniques for Small to Medium Span Bridges: A Review and Case Study**. In Proceedings of the 8th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM 2016), Bilbao, Spain, 5–8 July 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/322343537_Vibration_Based_Damage_Detection_Techniques_for_Small_to_Medium_Span_Bridges_A_Review_and_Case_Study. Acesso em: Dezembro de 2020.
- 21 NÓBREGA, P.G.B.; HANAI, J.B. **A Análise Modal na Avaliação de Estruturas de Concreto Pré-moldado**. São Carlos, 2005. Disponível em: http://www.set.eesc.usp.br/1enpppcpm/cd/conteudo/trab_pdf/132.pdf. Acesso em: Novembro de 2020.
- 22 PERSSON, Malin; MUELLER, Martin; and CHAI, Guocai, "**Modulus of Elasticity and Its Influence on the Performance of Flapper Valve Materials**" (2008). International Compressor Engineering Conference. Paper 1937. Disponível em: <http://docs.lib.purdue.edu/icec/193>. Acesso em: Abril de 2021.
- 23 REINHORN, Andrei. & CIMELLARO, G. & SOONG. **Optimal integrated design of controlled structures**. *Journal of Structural Engineering*. 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/228422469_Optimal_integrated_design_of_controlled_structures. Acesso em: Fevereiro de 2021.
- 24 SALAWU, O.s. **Detection of structural damage through changes in frequency: a review**. *Engineering Structures*, [S.L.], v. 19, n. 9, p. 718-723, set. 1997. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0141-0296\(96\)00149-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0141-0296(96)00149-6). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029696001496>. Acesso em: Fevereiro de 2021.
- 25 SILVA, Rodrigo Lopes. **Identificação e localização de danos em estruturas de concreto por meio de análise modal, experimental e numérica**. 2018. 1 recurso online (175 p.). Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, SP. Disponível em: <<http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/331759>>. Acesso em: Fevereiro de 2021.

26 SUDA, Kenichi; SATAKE, Naoki; ONO, Junichiro; SASAKI, Atsushi. **Damping properties of buildings in Japan**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, [S.L.], v. 59, n. 2-3, p. 383-392, mar. 1996. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105\(96\)00018-9](http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105(96)00018-9). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0167610596000189>. Acesso em: Novembro de 2020.

27 ZHANG, Haiyang; GÜL, Mustafa; KOSTIC, Branislav. **Eliminating Temperature Effects in Damage Detection for Civil Infrastructure Using Time Series Analysis and Autoassociative Neural Networks**. Journal of Aerospace Engineering, [S.L.], v. 32, n. 2, p. 04019001, mar. 2019. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)as.1943-5525.0000987](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)as.1943-5525.0000987). Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/330352211_Eliminating_Temperature_Effects_in_Damage_Detection_for_Civil_Infrastructure_Using_Time_Series_Analysis_and_Autoassociative_Neural_Networks. Acesso em: Março de 2021.