



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIAS E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL

BIANCA MUNIZ DE MIRANDA

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA LOCALIZAÇÃO DE DANOS
ESTRUTURAIS VIA MÉTODO DO ERRO RESIDUAL**

CAMPINA GRANDE – PB

2019

BIANCA MUNIZ DE MIRANDA

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA LOCALIZAÇÃO DE DANOS
ESTRUTURAIS VIA MÉTODO DO ERRO RESIDUAL**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação
apresentado à Unidade Acadêmica de
Engenharia Civil da Universidade Federal de
Campina Grande para encerramento do
componente curricular e conclusão da
graduação em Engenharia Civil

Orientadora: Prof. Dra. Marília Marcy Cabral
de Araújo - UFCG

CAMPINA GRANDE – PB

2019

É concedida à Universidade Federal de Campina Grande permissão para reproduzir cópias deste Trabalho de Conclusão de Curso e emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho acadêmico pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Bianca Muniz de Miranda

M672i Miranda, Bianca Muniz de.

Influência da temperatura na localização de danos estruturais via método do erro residual / Bianca Muniz de Miranda. – Campina Grande, 2019.

60 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2019.

"Orientação: Prof. Dra. Marília Marcy Cabral de Araújo".

Referências.

1. Estruturas - Detecção de Danos. 2. Método do Erro Residual (MER). 3. Propriedades Dinâmicas. 4. Variação de Temperatura. I. Araújo, Marília Marcy Cabral de. II. Título.

CDU 624.04(043)

BIANCA MUNIZ DE MIRANDA

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA LOCALIZAÇÃO DE DANOS
ESTRUTURAIS VIA MÉTODO DO ERRO RESIDUAL**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentado à Unidade Acadêmica de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheira Civil.

Aprovado em: ___ de _____ de ____.

BANCA EXAMINADORA

D.Sc. Marília Marcy Cabral de Araújo (UAEC/UFCG)

Orientadora

D.Sc Aline F. Nóbrega de Azerêdo (UAEC/UFCG)

Examinador Interno

Eng. Igor Antonio de Paiva Brandão

Examinador Externo

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por todo o auxílio quando precisei e quando nem sabia que precisava.

À todos os meus familiares que sempre me apoiaram e se alegraram com as minhas conquistas.

Minha eterna gratidão aos amigos que fiz durante esses cinco anos, em especial, Carol, Helton, Tiago, Renan e Pedro, que me mostraram que família vai muito além de sangue.

Ao meu namorado que me acalmou durante todos os dias difíceis e esteve comigo em todos os dias bons, acreditando mais em mim do que eu mesma.

À minha orientadora, Marília Marcy, por todo os ensinamentos e apoio quando eu precisei.

À todos os professores que de uma forma ou de outra contribuíram para a minha formação.

E a todos que de alguma forma contribuíram para esse trabalho e para minha trajetória acadêmica.

Aos meus irmãos Gabriel, Renata, Mariana e Vinícius.

RESUMO

A detecção de danos é de extrema importância para o prolongamento da vida útil da estrutura, pois a realização de uma inspeção fornece respostas sobre a integridade estrutural, norteando decisões sobre a necessidade de intervenções e/ou reparos. Nesse contexto, o Método do Erro Residual – MER (utilizado nesse trabalho) se apresenta como um método capaz de localizar os danos através de alterações, produzidas pelo dano, nas características dinâmicas da estrutura. Embora os parâmetros modais sejam sensíveis a danos estruturais, eles também apresentam sensibilidade a variáveis ambientais como a temperatura, podendo essa variação, causada por esses fatores, influenciar na atuação do método. Sendo assim, esse trabalho buscou estudar essa influência através da modelagem de vigas intactas e danificadas, utilizando para a modelagem o software *Ansys Student*, em cenários com e sem variação de temperatura, aplicando o MER através do *Matlab*. Com os resultados encontrados pôde-se observar que nos cenários sem a variação de temperatura o método foi capaz de detectar os danos enquanto que quando considerado a influência desse parâmetro, não foi mais possível detectar os danos, apenas visualizar a região onde ele se encontra.

Palavras Chave: Método do Erro Residual; Detecção de Danos; Propriedades Dinâmicas; Variação de Temperatura.

ABSTRACT

Damage detection is extremely important when it comes to extend the life of the structure, because conducting an inspection provides answers to structural integrity, guiding decisions about the need for interventions and / or repairs. In this context, the Residual Error Method - MER (used in this work) presents itself as a method capable of locating the damage through alterations, produced by the damage, in the dynamic characteristics of the structure. Although modal parameters are sensitive to structural damage, they also have sensitivity to environmental variables such as temperature, and this variation, caused by these factors, may influence the performance of the method. Therefore, this work sought to study this influence through the modeling of intact and damaged beams, using the Ansys Student software for modeling, in scenarios with and without temperature variation, applying the MER through Matlab. The results showed that in scenarios without temperature variation the method was able to detect the damage, while in scenarios that considered the influence of this parameter, it was no longer possible to detect the damage, just visualize the region where it is located.

Key Words: Residual Error Method; Damage Detection; Dynamic Characteristics; Temperature Variation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Características e origem das cargas dinâmicas típicas. (a) harmônica, (b) periódica, (c) impulsiva e (d) transiente.	19
Figura 02 - Frequências naturais e modos de vibração para uma viga engastada-livre	21
Figura 03 - Influência da temperatura sobre o módulo de elasticidade, em alguns metais.	26
Figura 04 - Fluxograma de uma análise estrutural no ANSYS.	28
Figura 05 – Fluxograma da metodologia.....	30
Figura 06 – Seção transversal da viga intacta	31
Figura 07 - Modelos danificados	32
Figura 08 – Modelagem da viga intacta	34
Figura 09 - Primeiro modo de vibração da viga intacta	35
Figura 10 - Segundo modo de vibração da viga intacta	35
Figura 11 - Terceiro modo de vibração da viga intacta.....	36
Figura 12 - Quarto modo de vibração da viga intacta	36
Figura 13 - Quinto modo de vibração da viga intacta	36
Figura 14 - Localização do dano no modelo V1 no cenário 01 – apenas temperatura de 15°C	45
Figura 15 - Localização do dano no modelo V1 no cenário 02 – apenas temperatura de 40°C	46
Figura 16 - Localização do dano no modelo V1.1 no cenário 03 – temperatura padrão.....	47
Figura 17 - Localização do dano no modelo V1.1 no cenário 04 – temperatura de 15°C	48
Figura 18 - Localização do dano no modelo V1.1 no cenário 05 – temperatura de 40°C	49
Figura 19 - Localização do dano no modelo V1.2 no cenário 6 – temperatura padrão.....	50
Figura 20 - Localização do dano no modelo V1.2 no cenário 07 – temperatura de 15°C	51
Figura 21 - Localização do dano no modelo V1.2 no cenário 08 – temperatura de 40°C	52

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01 – Variação da 1ª frequência natural	41
Gráfico 02 – Variação da 2ª frequência natural.....	42
Gráfico 03 – Variação da 3ª frequência natural.....	42
Gráfico 04 – Variação da 4ª frequência natural.....	43
Gráfico 05 – Variação da 5ª frequência natural.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 01– Propriedades da viga intacta	31
Tabela 02 – Resumo dos modelos danificados.....	32
Tabela 03 - Cenários de danos e temperaturas simulados na pesquisa	33
Tabela 04 – Frequências naturais da viga intacta	34
Tabela 05 – Comparativo entre as frequências numéricas e analíticas	35
Tabela 06 - Comparativo entre as propriedades geométricas das seções intactas e danificadas	36
Tabela 07 - Frequências naturais dos modelos.....	37
Tabela 08 - Variação das frequências naturais dos modelos danificados com relação ao modelo intacto	37
Tabela 09 - Módulo de Elasticidade do material para cada temperatura.....	38
Tabela 10 - Variação da frequência natural do Modelo V1 devido a variação de temperatura	38
Tabela 11 - Variação da frequência natural do modelo V1.1 devido a variação de temperatura	39
Tabela 12 - Variação da frequência natural do modelo V1.2 devido a variação de temperatura	39
Tabela 13 - Quantificação da variação da frequência em função da variação de temperatura (modelo V1).....	40
Tabela 14 - Quantificação da variação da frequência em função da variação de temperatura (modelo V1.1).....	40
Tabela 15 - Quantificação da variação da frequência em função da variação de temperatura (modelo V1.2).....	41
Tabela 16 - Resumo da localização de danos através do MER	54

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

MEF	Método dos Elementos Finitos
MER	Método do Erro Residual
A	Área da seção transversal
C	Matriz de amortecimento
E	Módulo de elasticidade longitudinal
E	Matriz de erros da equação de movimento da estrutura
$\vec{F}(t)$	Vetor de forças excitadoras do sistema.
I _x	Momento de inércia em torno do eixo X
I _y	Momento de inercia em torno do eixo Y
L	Comprimento do elemento
K'	Matriz de rigidez da estrutura danificada
K	Matriz de rigidez da estrutura
A'	Matriz diagonal com as frequências de vibração da estrutura danificada
A	Matriz diagonal com as frequências de vibração da estrutura
M'	Matriz de massa da estrutura danificada

M	Matriz de massa da estrutura
$\vec{\ddot{y}}(t)$	Vetor aceleração
$\vec{y}(t)$	Vetor deslocamento
$\vec{\dot{y}}(t)$	Vetor velocidade
ϕ	Matriz com os modos de vibração da estrutura
ϕ'	Matriz com os modos de vibração da estrutura danificada
ϕ	Modo de vibração
ω	Frequência natural de vibração

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 JUSTIFICATIVA.....	16
1.2 OBJETIVOS.....	16
1.2.1 Objetivo Geral.....	16
1.2.2 Objetivos Específicos:.....	17
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 DINÂMICA ESTRUTURAL.....	18
2.2 OBTENÇÃO DAS PROPRIEDADES DINÂMICAS.....	20
2.3 DANOS ESTRUTURAIS.....	22
2.4 MÉTODOS DE DETECÇÃO.....	22
2.5 MÉTODO DO ERRO RESIDUAL (MER).....	23
2.6 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA.....	25
2.7 FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS.....	26
2.7.1 Ansys.....	26
2.7.2 Matlab.....	28
3 METODOLOGIA	30
4 RESULTADOS E ANÁLISES	34
4.1 MODELAGEM E ANÁLISE DO MODELO INTACTO V1 (T = 22°C):.....	34
4.2 DEFINIÇÃO E ANÁLISE DOS MODELOS DANIFICADOS (T = 22°C):.....	36
4.3 VARIAÇÃO DA TEMPERATURA.....	38
4.3.1 Módulo de Elasticidade.....	38
4.3.2 Variação das Frequências:.....	38
4.4 LOCALIZAÇÃO DOS DANOS:.....	44

4.4.1 Modelo V1	44
4.2.2 Modelo V1.1.....	47
4.4.3 Modelo V1.2.....	50
4.4.4 Análise Geral sobre a Localização de Danos sobre Influência da Temperatura	53
5 CONCLUSÕES.....	55
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	56
REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

A vida útil e a durabilidade das estruturas dependem de diversos fatores, como projeto, execução, qualidade dos materiais utilizados e, principalmente, do plano de manutenção e inspeção de danos, como mostra Silva (2018). Portanto, a inspeção de uma estrutura fornecerá informações sobre a sua integridade, para que uma vez determinada as falhas, seja possível estudar a necessidade de reparos e reforços.

Sendo assim, a detecção de danos ou falhas é de extrema importância para o prolongamento da vida útil, como é defendido por Lottermann (2013). Esses danos, que podem ser pontuais ou generalizados, reduzem a resistência da estrutura, causam desconforto ao usuário e, em casos extremos, podem levar ao colapso e ruína do sistema.

Essas falhas podem ser provenientes de ações estáticas, como o peso próprio, ou ações dinâmicas, como o vento, atividades sísmicas e tráfego de veículos, que por definição, podem variar sua magnitude, direção e posição ao longo do tempo, como é indicado por Ferro *et al.* (2014). Portanto, o deslocamento, a velocidade e a aceleração da estrutura submetida a essas cargas também irão variar com o tempo.

Com a tendência de dimensionamento atual de estruturas cada vez mais leves e flexíveis, principalmente devido ao auxílio de ferramentas computacionais, de acordo com Curi (2015), elas acabam se tornando mais suscetíveis ao efeito dessas cargas dinâmicas devido a sua esbeltez, sendo necessária uma maior atenção nos possíveis danos causados por essas cargas.

A ocorrência desses danos pode gerar algumas consequências para o sistema, como a redução de inércia local, causado pela redução na seção transversal da peça, e a redução do modo de elasticidade, que pode ser provocado pela degradação do material, ocasionando uma perda de rigidez na estrutura, como afirma Cardoso (2005).

Ainda segundo Cardoso (2005), essa perda de rigidez provoca alterações nas características dinâmicas do sistema, como sua frequência natural, modo de vibração e amortecimento. A diferença entre esses parâmetros, no estado logo após construção (sem danos) e um tempo após construção (com possíveis danos), pode levar a indicação do local e/ou intensidade do dano.

Embora os parâmetros modais sejam sensíveis a danos estruturais, eles também apresentam sensibilidade com relação à variáveis ambientais, tais como: temperatura, umidade e vento. Esse fator pode vir a dificultar a detecção de danos, pois essas variações das características de vibração, geradas devido às variáveis ambientais, podem ser iguais ou até

mesmo maiores que as causadas pelos danos estruturais, camuflando assim os resultados (SOHN, 2006).

Nesse contexto, a temperatura é um fator ambiental que pode modificar não só as características geométricas de uma estrutura, com os efeitos de contração e dilatação, como também seus parâmetros dinâmicos, sendo a variável ambiental que possui maior influência nessas características (Li *et al.*2010, apud SANTANA, 2018).

Dessa forma, como os métodos de identificação de danos são baseados na comparação entre parâmetros modais, buscou-se estudar a detecção e localização de danos estruturais, sob a influência desses efeitos externos, afim de entender e analisar como o Método do Erro Residual (GENOVESE, 2000; BRASILIANO, 2001; MARCY, 2013) se comporta dentro desses cenários.

1.1 JUSTIFICATIVA

A escolha do tema deste Trabalho de Conclusão de Curso foi motivada pela importância da detecção antecipada de danos estruturais, devido às possíveis implicações econômicas e sociais que podem se originar pela presença, não detectada, de uma falha em uma estrutura.

A análise modal se apresenta como uma opção viável para o estudo do estado de degradação da estrutura, devido suas respostas rápidas e as possibilidades de ensaios não destrutíveis. Sendo assim, estudar as possíveis interferências na aplicação desses métodos se torna de grande importância para a engenharia, uma vez que ele pode servir de guia nas decisões sobre reparos e manutenções, prolongando a vida útil e garantindo a segurança da estrutura.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 *Objetivo Geral*

Este trabalho tem como objetivo estudar a interferência da temperatura na detecção de danos estruturais, através da análise das propriedades dinâmicas, utilizando o Método do Erro Residual (MER) aplicado em diferentes cenários.

1.2.2 *Objetivos Específicos:*

- a) Desenvolver o modelo numérico das vigas utilizando o software Ansys-Student;
- b) Obter os parâmetros dinâmicos das vigas intactas e danificadas;
- c) Calcular os diferentes módulos de elasticidade para as diferentes temperaturas;
- d) Obter os parâmetros dinâmicos dos modelos em cada cenário de temperatura;
- e) Analisar a influência da temperatura nos parâmetros dinâmicos;
- f) Aplicar o Método do Erro Residual e comparar a atuação do método, em relação a localização de danos, nos diferentes cenários de temperatura.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Neste Trabalho de Conclusão de Curso encontram-se cinco capítulos que tratam sobre a identificação de danos em estruturas, particularmente em vigas, através de alterações nas suas características dinâmicas, considerando as vigas primeiramente sem danos e depois danificadas levando em consideração a interferência da variação de temperatura nessa identificação.

No Capítulo 1 constam as informações introdutórias a respeito do problema de danos em estruturas e a necessidade de identificá-los, além da justificativa e dos objetivos da pesquisa.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica que servirá de base para os resultados e suas respectivas análises. Nesse capítulo podem ser encontrados, por exemplo, conceitos referentes à dinâmica das estruturas, danos estruturais e detecção de danos.

O Capítulo 3 aborda a metodologia utilizada no trabalho, contendo a descrição do objeto de estudo e de cada etapa realizada na pesquisa.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos e as análises que foram realizadas a partir deles.

E, por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas em relação aos objetivos que foram determinados no Capítulo 1, quanto a interferência da temperatura nas propriedades dinâmicas e na localização de danos nos modelos de estruturas utilizados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo abordam-se os temas que fundamentam a pesquisa, abrangendo: o funcionamento dinâmico de um sistema e suas propriedades, onde serão descritas suas equações e as condições que foram feitas para sua utilização, conceitos que envolvem danos estruturais, Método do Erro Residual e as ferramentas computacionais que foram utilizadas na pesquisa.

2.1 DINÂMICA ESTRUTURAL

De maneira simplificada, a análise dinâmica pode ser definida como o estudo do deslocamento de um corpo em função do tempo. Lima e Santos (2008, apud SILVA, 2018, p.22), descrevem a dinâmica das estruturas da seguinte forma:

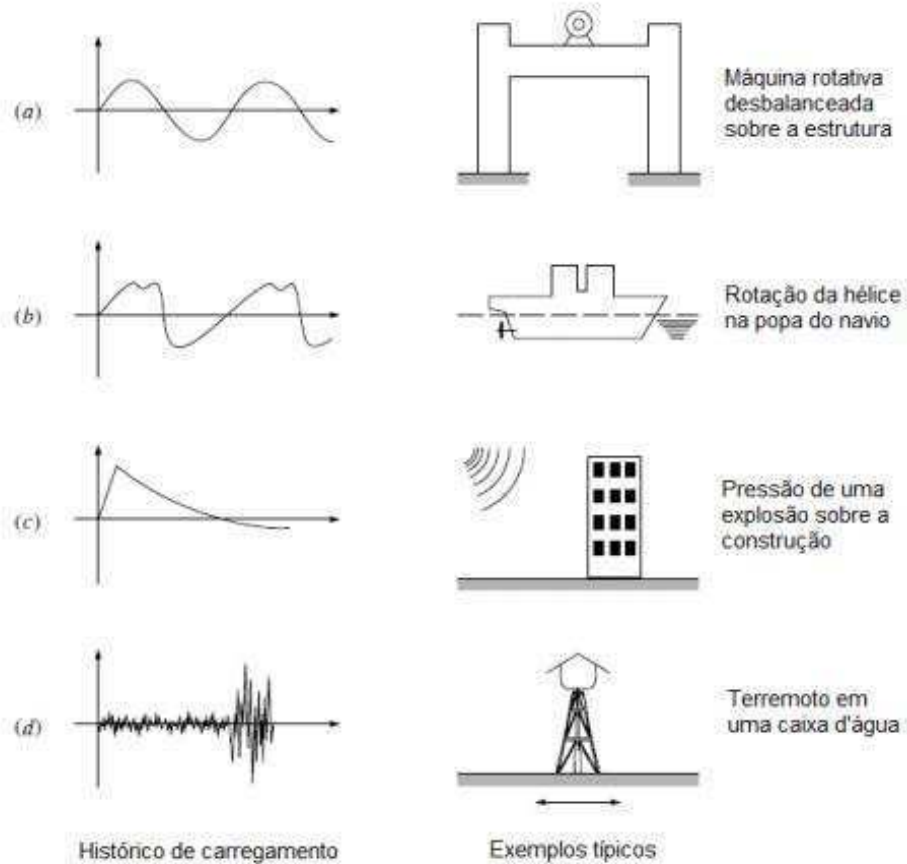
A dinâmica das estruturas tem por objetivo a determinação de deslocamentos, velocidades e acelerações de todos os elementos constituintes de uma estrutura submetida à cargas dinâmicas. Uma estrutura ao vibrar, ou apresentar movimento vibratório, desloca-se ou movimenta-se em torno de sua deformada estática (LIMA E SANTOS, 2008, apud SILVA, 2018, p.22).

Essas ações dinâmicas são caracterizadas por respostas que variam durante o tempo, podendo ter longa duração (vento, tráfego rodoviário, etc) ou curta duração (sismos, explosões, etc).

Dessa maneira, a resposta que será dada pela estrutura, à essas ações dinâmicas, irá depender de basicamente três fatores: da sua massa, da sua rigidez e de seu amortecimento. Quanto ao amortecedor, a estrutura pode possuir um mecanismo (interno ou externo) que seja capaz de dissipar a sua energia. Por sua vez, a rigidez da peça dependerá da sua geometria (seção transversal) e dos seus materiais (módulo de elasticidade e inércia).

De acordo com Clogh e Penzien (1993), essas ações podem gerar quatro tipos de vibrações: transientes, harmônicas, periódicas e impulsivas. Pode-se perceber analisando a Figura 01 que a carga é considerada harmônica quando sua variação no tempo pode ser representada por uma senóide, a periódica irá apresentar repetições em um período regular de tempo, a carga será transiente quando sua variação no tempo não apresentar periodicidade e a carga impulsiva, é uma transiente de duração muito curta.

Figura 01 - Características e origem das cargas dinâmicas típicas. (a) harmônica, (b) periódica, (c) impulsiva e (d) transiente.



Fonte: Clogh & Penzien (1993, apud Silva, 2018)

As falhas estruturais, discutidas anteriormente, podem levar a redução da seção transversal da peça gerando uma redução na sua inércia. Nesse caso, o módulo de elasticidade também pode sofrer variação, ele pode diminuir devido a ação de agentes que degradam os compósitos dos materiais. As alterações nessas características levam a perda de rigidez local da estrutura (CARDOSO, 2005).

Essa perda de rigidez causada pelo dano estrutural produz alterações nas características dinâmicas do sistema, como suas frequências, modos naturais de vibrações e seu fator de amortecimento (BOLINA *et al.*, 2014). Essa perda de rigidez afetará cada modo de vibração de forma diferente, possibilitando com isso a localização e quantificação do dano, através da análise das formas modais da estrutura. (ADAMS *et al.* 1978, apud CARDOSO, 2005).

2.2 OBTENÇÃO DAS PROPRIEDADES DINÂMICAS

Para se obter as propriedades dinâmicas de um sistema, ou seja, suas frequências naturais, modos naturais de vibração e razão de amortecimento, deve-se conhecer a equação que governa o seu comportamento dinâmico. Sendo assim, pode-se escrever a equação de movimento para um sistema de n graus de liberdade da seguinte forma (CLOUGH; PENZIEN, 1993):

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{y}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (2.1)$$

Onde:

M: matriz de massas;

C: matriz de amortecimento;

K: matriz de rigidez;

$\ddot{\mathbf{y}}(t)$: vetor aceleração;

$\dot{\mathbf{y}}(t)$: vetor velocidade;

$\mathbf{y}(t)$: vetor deslocamento;

$\mathbf{F}(t)$: vetor de forças excitadoras do sistema.

As matrizes de massa e rigidez são montadas com base nas propriedades dos materiais envolvidos no sistema e na sua geometria. A matriz de amortecimento, por sua vez, sendo uma análise mais complexa, geralmente, pode se expressar como uma combinação das matrizes de rigidez e massa. Nessas matrizes, o número de linhas e colunas correspondem à discretização adotada, ou seja, ao n números de graus de liberdade da estrutura.

Como para pequenos amortecimentos, sobretudo em estruturas civis (MARCY, 2017), a análise modal do sistema é bastante semelhante à análise do sistema em vibração livre não amortecida, neste estudo o amortecimento foi desconsiderado. Assim, a equação (2.1) pode ser reformulada como:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{y}(t) = 0 \quad (2.2)$$

A equação anterior tem solução do tipo:

$$\mathbf{y}(t) = \hat{y}\text{sen}(\omega t + \theta); \quad (2.3)$$

$$\ddot{\mathbf{y}}(t) = -\omega^2 \hat{y}\text{sen}(\omega t + \theta) = -\omega^2 \mathbf{y} \quad (2.4)$$

Onde \hat{y} representa a forma do sistema, que não varia com o tempo e θ é o ângulo de fase.

Ao substituir as equações (2.3) e (2.4) na equação (2.2):

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M})\hat{y} = \mathbf{0} \quad (2.5)$$

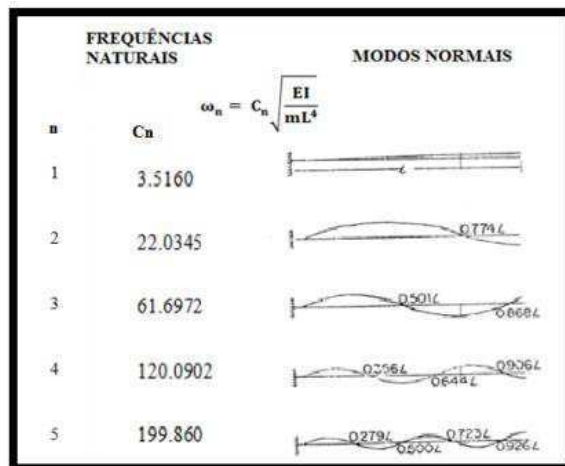
Como a equação (2.5) é homogênea linear, afim de se evitar a solução $y = 0$, o determinante da matriz entre parênteses deve ser nulo.

$$|(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M})|\hat{y} = \mathbf{0} \quad (2.6)$$

Sendo um polinômio característico de grau n , as n raízes encontradas correspondem ao quadrado das n frequências naturais (ω^2) e os n vetores associados a estas frequências (autovetores) correspondem ao modo de vibração (\hat{y}), respectivamente.

Como é proposto por Paz (1992), é possível se calcular as frequências naturais e os modos de vibração de uma viga, de maneira analítica, considerando suas respectivas condições de apoio. Na Figura 02 está demonstrada a equação para a viga engastada-livre, pois foi a condição de contorno adotada nessa pesquisa.

Figura 02 - Frequências naturais e modos de vibração para uma viga engastada-livre



Fonte: PAZ (1992)

Como já foi discutido e, agora demonstrado, as frequências e os modos de vibração são dependentes da rigidez estrutural, de modo que uma mudança na rigidez da estrutura irá mudar também esses seus parâmetro. Assim, monitorando a variação nesses parâmetros é possível avaliar de maneira indireta os danos.

Desse modo, análises numéricas e experimentais ligadas as propriedades dinâmicas da estrutura podem ser utilizadas como ferramentas para o fornecimento de recursos que irão possibilitar a avaliação da integridade da estrutura, podendo assim, estabelecer critérios para que sua utilização seja feita de maneira segura (RANGEL *et al.*, 2016).

2.3 DANOS ESTRUTURAIIS

As estruturas de engenharia estão constantemente sofrendo degradação devido a fatores como: falha durante a execução e concepção do projeto, esforços de trabalho para os quais a estrutura não foi projetada ou até mesmo os processos de degradação natural devido ao seu tempo de uso. Assim, ao longo da vida útil da estrutura é possível se detectar danos ou falhas que colocam em risco sua integridade (AMARAL *et al.* , 2016).

De maneira geral, podem ser utilizados dois conceitos distintos para descrever um dano estrutural. Para o conceito temporal, o dano poderá, gradualmente, acumular por períodos longos, como é o caso dos efeitos devido à fadiga ou corrosão. Para o conceito dimensional, os danos começam no nível do elemento e de acordo com a aplicação do carregamento poderá progredir até a falha completa da estrutura (ALVES, 2012).

Essa progressão de um dano até o colapso da estrutura pode acarretar um grande prejuízo material, além de perdas sociais e ambientais. Pode-se perceber então, a importância do monitoramento contínuo da estrutura, que além de evitar tragédias, contribui na redução dos custos de manutenção e reparo na estrutura, se o dano for detectado ainda em fase inicial (AMARAL *et al.*, 2016).

2.4 MÉTODOS DE DETECÇÃO

Segundo Rytter (1993, apud Alves, 2016) existe uma decomposição hierárquica amplamente aceita pela literatura para identificação de danos estruturais. Essa divisão ocorre em quatro níveis:

- Nível 1: detecção de dano;
- Nível 2: localização do dano;
- Nível 3: quantificação do dano;
- Nível 4: previsão da vida residual da estrutura.

Sendo assim, quanto maior o nível, maior será o conhecimento a respeito do dano e, geralmente, maior a complexidade do método. Aponta-se que os métodos de identificação de danos estruturais podem ser separados em duas grandes famílias (Alves 2016):

a) Métodos baseados em dados vibracionais (*Vibration Data Based Methods*):

São os métodos mais simples e apresentam a vantagem de não necessitarem da modelagem de um modelo numérico da estrutura que será monitorada. Dentro dessa abordagem pode-se enquadrar os métodos ditos não supervisionados, são aqueles que não necessitam uma pré identificação dos sinais registrados, e os supervisionados, que precisa de informações sobre os dados que serão utilizados. Os métodos não supervisionados atingem os níveis 1 e 2, enquanto os supervisionados podem atingir até o 3.

b) Métodos baseados em modelos (*Model Based Methods*):

Utilizam técnicas de atualização de modelos que permitem alcançar o nível 3 da escala Rytter. Estes métodos possuem a desvantagem da complexidade de se obter modelos numéricos confiáveis de estruturas complexas.

É importante ressaltar que qualquer um dos métodos (baseados em dados vibracionais ou baseados em modelos) podem trabalhar com os indicadores de danos modais.

2.5 MÉTODO DO ERRO RESIDUAL (MER)

O método do erro residual é uma técnica que permite localizar e quantificar danos numa estrutura (GENOVESE,2000 apud MARCY,2013). A primeira etapa, localização do dano, é então realizada avaliando o desequilíbrio existente na equação de movimento da estrutura, que é ocasionado pela existência do dano. A partir desse erro que foi detectado, pode-se então quantificar o dano, que consiste em minimizar esse erro na equação do movimento.

Esse método é baseado no conhecimento das características da estrutura tanto em perfeito estado quanto com suas regiões danificadas. Assim, inicialmente se faz necessário os cálculos dos modos e frequência de vibração.

A partir da equação de movimento de uma estrutura em vibração livre e não amortecida Equação (2.2), é possível obter-se as frequências naturais e seus modos de vibração Equação (2.6).

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{y}} + \mathbf{K}\dot{\mathbf{y}} = \vec{0} \quad (2.7)$$

$$\mathbf{K}\Phi - \Lambda\mathbf{M}\Phi = \mathbf{0} \quad (2.8)$$

Onde,

M: Matriz de massa global da estrutura;

K: Matriz de rigidez global da estrutura;

$\ddot{\mathbf{y}}$: Vetor aceleração;

$\dot{\mathbf{y}}$: Vetor deslocamento;

Φ: Matriz cujas colunas representam os modos de vibração da estrutura sem danos;

Λ: Matriz diagonal, na qual os valores são os autovalores (ω^2) da estrutura sem dano.

No caso de estruturas onde existem os danos, há também uma modificação da rigidez das regiões danificadas, o que ocasionará uma mudança nas suas frequências e modos. Desta maneira, a equação que governa seu movimento pode ser escrita como:

$$\mathbf{K}'\Phi' - \Lambda'\mathbf{M}'\Phi' = \mathbf{0} \quad (2.9)$$

Onde todos seus caracteres representam a versão danificada dos parâmetros da Equação (2.8) e as suas matrizes de rigidez e massa da estrutura são desconhecidas.

Considerando as afirmações feitas por Adams *et al.* (1978), Hearn e Tesla (1991), entre outros autores, é válida a suposição de que a matriz de massa se mantém inalterada, uma vez que com a presença do dano a perda de massa pode ser considerada insignificante.

A matriz de rigidez da estrutura danificada, que não é conhecida, sendo considerada na Equação (2.9) da matriz original (que corresponde à estrutura intacta) leva a um desequilíbrio chamado de erro residual.

$$\mathbf{E} = \mathbf{K}\Phi' - \Lambda'\mathbf{M}\Phi' \quad (2.10)$$

Onde,

Φ' : Matriz cujas colunas representam os modos de vibração da estrutura com danos;

Λ' : Matriz diagonal, na qual os valores são as frequências de vibração da estrutura com dano;

\mathbf{E} : Matriz cujos valores representam o erro na equação de movimento devido à presença do dano e suas colunas são os vetores de erros associados aos modos de vibração.

Uma vez que a matriz \mathbf{E} tem agrupada em suas colunas os vetores dos erros que estão associados aos modos de vibração, a localização do dano consistirá em observar o maior valor de cada coluna, que representa o local onde se encontra o dano.

Como mostrado anteriormente, esse método também permite a quantificação do dano, entretanto essa etapa não foi considerada neste trabalho.

2.6 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA

A variação da temperatura na estrutura é causada, em parte, pela grande variabilidade desse fator na atmosfera, por meio de insolação direta. Na estrutura, tal variação pode ser diferente dependendo do local em que a construção foi feita, das condições climáticas e dos números de elementos que compõem essa estrutura (SANTOS, 2004).

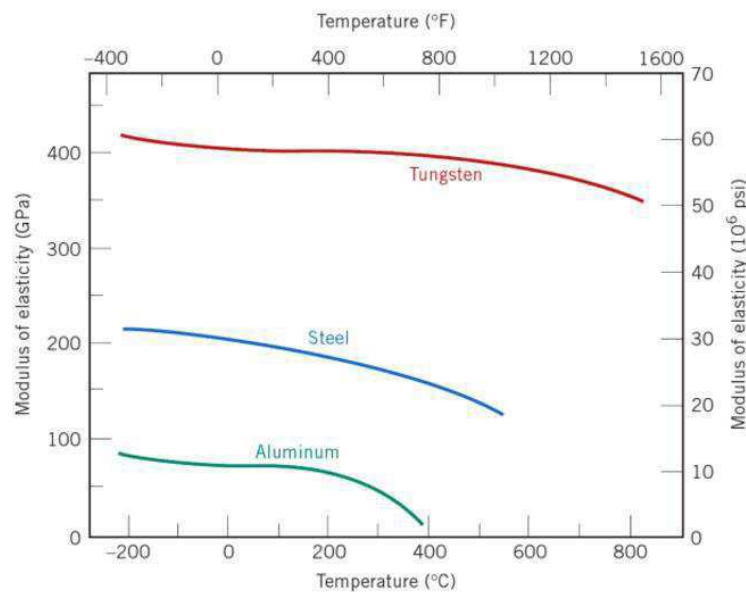
A expansão térmica global de um sólido é uma consequência da mudança na separação média de seus átomos ou moléculas que os constituem. Esta expansão térmica é devido a excitação da energia interna de um sólido que é associado a energia cinética e energia potencial das vibrações dos átomos entorno da sua posição de equilíbrio (ROCHA, 2017).

À medida em que a temperatura do sólido aumenta, a separação média entre os átomos também aumenta, juntamente com suas deformações, e com isso maiores serão os módulos

de elasticidade, podendo alterar, até mesmo, o grau de linearidade da relação tensão x deformação da estrutura (ROCHA, 2017).

O gráfico de módulo de elasticidade x temperatura (Figura 03) resulta no comportamento do aço ao ser submetido à diversas temperaturas levando em conta os parâmetros propostos por Callister e Rethwish (2009), os quais serão utilizados como parâmetros neste trabalho.

Figura 03 - Influência da temperatura sobre o módulo de elasticidade, em alguns Metais.



Fonte: Callister e Rethwish (2009)

Neste contexto, sendo a temperatura um fator que altera as frequências naturais de vibração, é necessário quantificar essa variação a fim de implementar em métodos de detecção de danos o conhecimento prévio desse comportamento para que os efeitos da temperatura não se sobreponha aos efeitos dos danos em sí.

2.7 FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

2.7.1 Ansys

O ANSYS é um software que utiliza o método dos elementos finitos (MEF) para desenvolvimento e estudos de modelos numéricos em diversos campos científicos. Nessa ferramenta, é possível, por exemplo, a modelagem de sistemas estruturais e problemas

dinâmicos modais e transientes. Os programas que estão disponíveis para as análises estruturais são: *ANSYS/Multiphysics*, *ANSYS/Mechanical*, *ANSYS/Structural* e *ANSYS/Professional* (Abreu, 2016).

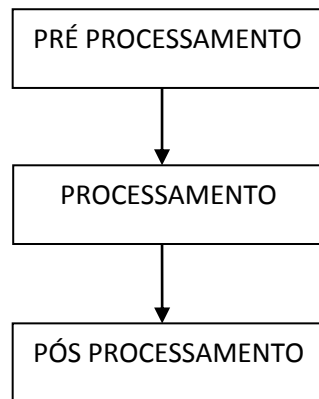
Dentro dos problemas estruturais, o ANSYS permite sete tipo de análises de estruturas, que são:

- Análise estática: utilizada para determinar deslocamentos, deformações e tensões, sob a condição de cargas estáticas atuantes;
- Análise de Flambagem: usada para calcular as cargas de flambagem e determinar a forma do modo de flambagem;
- Análise modal: usada para calcular as frequências naturais e modos de vibração de uma estrutura. Há diferentes métodos disponíveis para extração dos modos de vibração;
- Análise harmônica: usada para determinar a resposta de uma estrutura a cargas harmônicas variáveis no tempo;
- Análise dinâmica transiente: usada para determinar a resposta de uma estrutura às cargas arbitrariamente variáveis no tempo.
- Análise espectral: trata-se uma extensão da análise modal, usada para calcular tensões e deformações devidas a um espectro de resposta ou uma contribuição de PSD (vibrações aleatórias).

Como já foi mencionado, neste trabalho serão utilizados os parâmetros modais da estrutura, para a detecção de seus danos. Sendo assim, a análise que será feita no ANSYS, corresponde a análise modal descrita anteriormente.

Em análises estruturais, no pré-processamento, define-se todas as variáveis de entrada, tipo de elemento, geometria do problema, malha de elementos finitos, as condições de contorno e cargas atuantes. No processamento, determina-se qual o tipo de solução a ser empregada, quais os cenários de carga e restrições, e como o carregamento deve ser aplicado. Finalmente, no pós-processamento, obtêm-se os resultados de acordo com os objetivos da análise, que podem ser calculados por nó, por elemento ou por incremento de carga. Esse esquema é resumido na Figura 04.

Figura 04 - Fluxograma de uma análise estrutural no ANSYS.



Fonte: Adaptado de Abreu (2016)

2.7.2 Matlab

O MATLAB é um software de alto desempenho, desenvolvido pela MatWorks destinado a fazer cálculos com matrizes (Matlab = MATrix LABoratory), que pode funcionar como uma calculadora ou como uma linguagem de programação científica, seja ela pascal, C, FORTRAN, etc (MEDEIROS, 2014).

Foi criado no fim dos anos 1970 por Cleve Moler, então presidente do departamento de ciências da computação da Universidade do Novo México. O Software se popularizou devido ao seu ambiente de trabalho ser de fácil utilização, pois os comandos utilizados são mais próximos da forma que escrevemos manualmente as expressões algébricas (MARCHETTO, 2016).

Como é um software de alto nível voltado para cálculo numérico, ele permite a solução de problemas de caráter numérico de uma maneira simplificada em comparação a outras linguagens de programação.

Segundo a definição de Matsumoto (2002), o MATLAB “[...] é um ambiente de computação técnico-científica para o desenvolvimento de sistemas [...]”. Nele é possível se trabalhar desde as operações mais simples, ou simulações, executar comandos em sequências de maneira a automatizar o cálculo de equações, em suas mais diversificadas maneiras de resolução.

O software possui mais de 500 funções (matemáticas, estatísticas e técnicas) que utilizam Álgebra Linear e operações com matrizes, análise de Fourier, estatística e soluções de equações diferenciais. (HUNT et al., 2001 apud MEDEIROS, 2014)

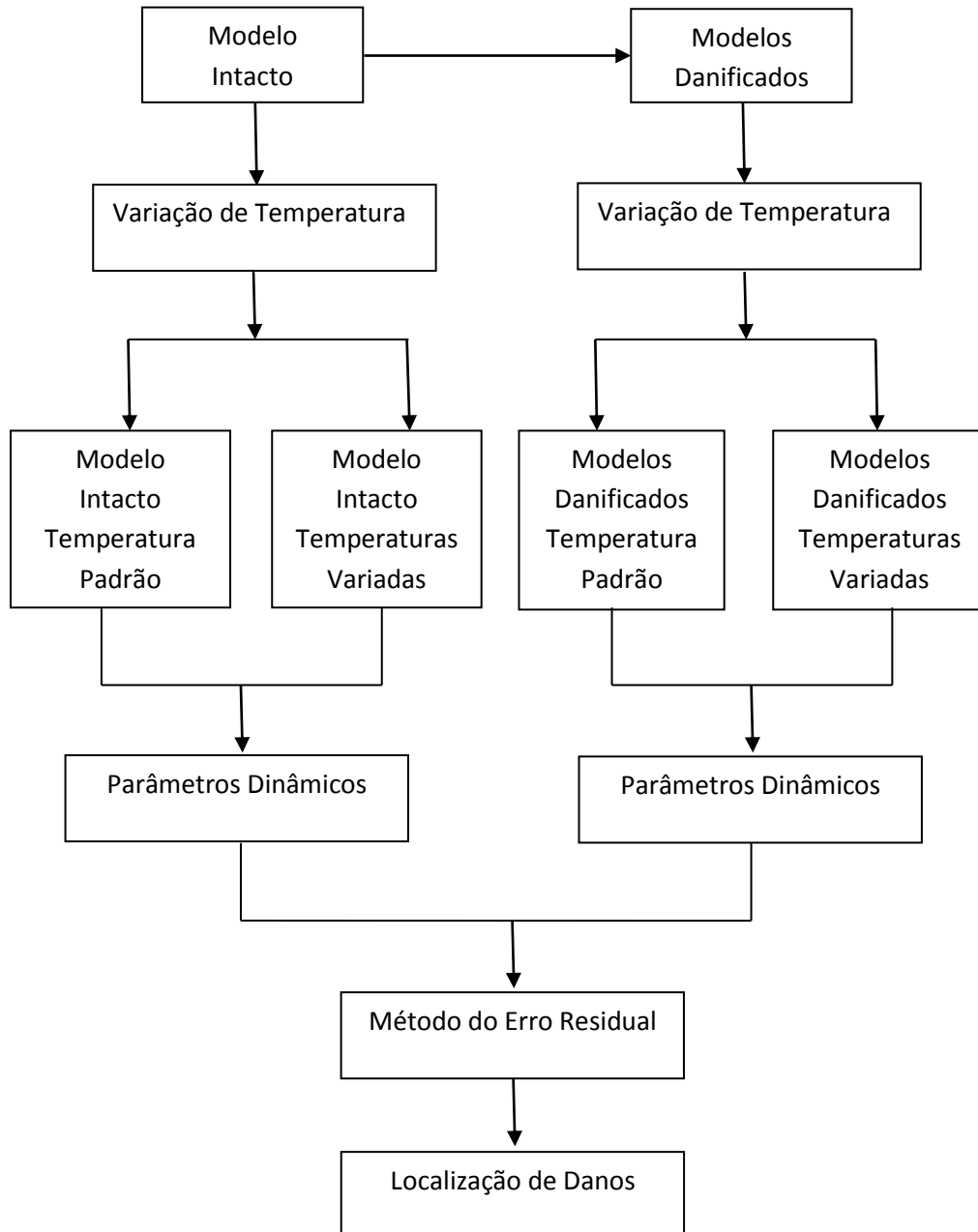
As principais utilidades do MATLAB são:

- cálculos matemáticos;
- desenvolvimento de algoritmos;
- modelagem, simulação e confecção de protótipos;
- análise, simulação e confecção de dados;
- gráficos científicos e de engenharia;
- desenvolvimento de aplicações, incluindo a elaboração de interfaces gráficas com o usuário.

3 METODOLOGIA

Para um melhor entendimento das etapas realizadas na pesquisa, que serão detalhadas posteriormente, foi montado o fluxograma apresentado na Figura 05 contendo todas as fases do trabalho.

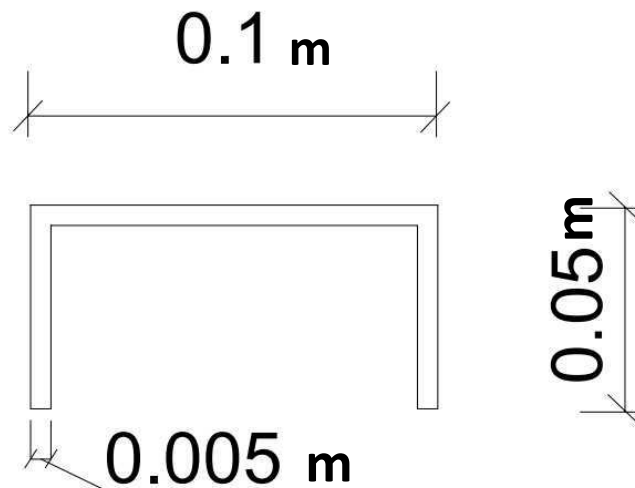
Figura 05 – Fluxograma da metodologia



Fonte: Autoria Própria (2019)

O objeto de estudo escolhido para este trabalho foi uma viga metálica, cujas propriedades físicas e geométricas, na temperatura padrão, estão descritas na Tabela 01 e sua seção transversal intacta ilustrada na Figura 06, com as medidas em metro. Essa viga foi modelada no software *Ansys Student*, na plataforma *Workbench*, considerando a condição de apoio engastada-livre.

Figura 06 – Seção transversal da viga intacta



Fonte: Autoria Própria (2019)

Tabela 01– Propriedades da viga intacta

Área da seção transversal (A) (m ²)	0,00095
Inércia I _x (m ⁴)	$2,25 * 10^{-7}$
Inércia I _y (m ⁴)	$1,43 * 10^{-6}$
Módulo de Elasticidade (E) (N/m ²)	$2,00 * 10^{11}$
Coefficiente de Poisson (ν)	0,30
Comprimento do Vão (L) (m)	7

Fonte: Autoria Própria (2019)

Para garantir a validade do modelo, foram calculadas as frequências naturais, a partir das equações apresentadas na Figura 02, de maneira analítica e comparada com o resultado fornecido pelo software.

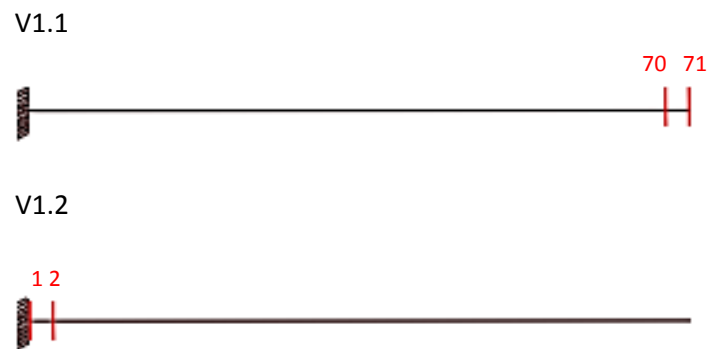
Em seguida, para a simulação dos danos, foi feita uma redução de área na seção transversal de alguns elementos escolhidos, gerando assim mais dois modelos de vigas. Na Tabela 02 é possível encontrar um resumo de cada modelo e seu elemento danificado e na Figura 07 uma ilustração de cada modelo.

Tabela 02 – Resumo dos modelos danificados

Modelo	Posição do Elemento Danificado	Porcentagem Reduzida
V1	-	-
V1.1	70	5%
V1.2	1	5%

Fonte: Autoria Própria (2019)

Figura 07 - Modelos danificados



Fonte: Autoria Própria (2019)

Para a simulação da variação da temperatura, primeiramente foi estabelecida a temperatura padrão de 22°C e em seguida foram calculados, através dos critérios apresentados na Figura 03, os módulos de Elasticidade do aço para cada cenário escolhido. Foi definido que para essa simulação, seriam testadas as temperaturas de 15°C e 40°C.

Após a modelagem de todas as vigas, intactas e danificadas, em todos os cenários de temperatura, utilizando a ferramenta de análise modal disponível no *Ansys* foi possível obter os parâmetros modais necessários para a próxima etapa de localização de danos.

Por último, utilizando o *Matlab*, as propriedades dinâmicas da estrutura intacta e de cada um dos seus modelos danificados foram comparadas por meio do Método do Erro Residual, proposto por Genovese (2000), de modo a localizar as zonas que apresentaram perdas da integridade estrutural.

Na Tabela 03 estão descritos todos os cenários de danos e temperaturas que foram simulados nessa pesquisa.

Tabela 03 - Cenários de danos e temperaturas simulados na pesquisa

Cenário	Modelo Danificado	Local do Dano	Temperatura Modelo Intacto	Temperatura Modelo Danificado
01	V1 com temperatura	Sem presença de dano	Padrão (22°C)	15°C
02	V1 com temperatura	Sem presença de dano	Padrão (22°C)	40°C
03	V1.1	Elemento 70	Padrão (22°C)	Padrão (22°C)
04	V1.1	Elemento 70	Padrão (22°C)	15°C
05	V1.1	Elemento 70	Padrão (22°C)	40°C
06	V1.2	Elemento 01	Padrão (22°C)	Padrão (22°C)
07	V1.2	Elemento 01	Padrão (22°C)	15°C
08	V1.2	Elemento 01	Padrão (22°C)	40°C

Fonte: Autoria Própria (2019)

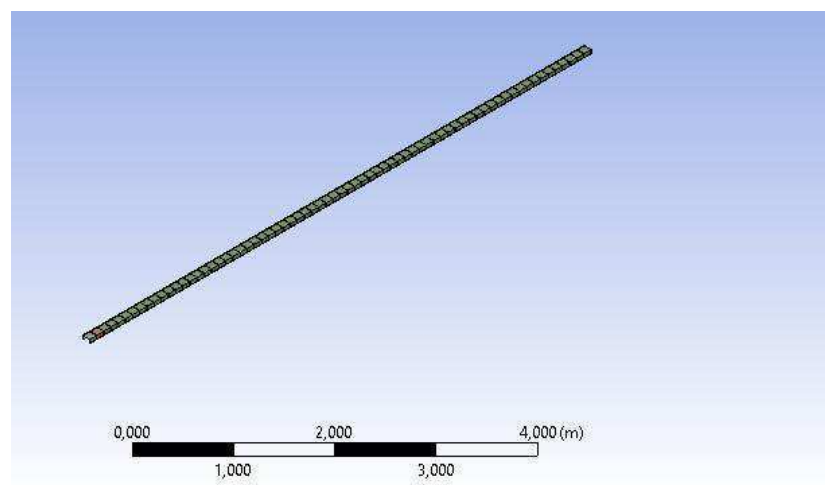
4 RESULTADOS E ANÁLISES

Nesse capítulo, serão expostos e posteriormente analisados os resultados obtidos durante essa pesquisa.

4.1 MODELAGEM E ANÁLISE DO MODELO INTACTO V1 (T = 22°C):

A viga intacta, apresentada no Capítulo 3, foi modelada na plataforma *Workbench* e pode ser observada na Figura 08.

Figura 08 – Modelagem da viga intacta



Fonte: Autoria Própria (2019)

Na Tabela 04, estão apresentadas as 5 frequências naturais obtidas no Ansys para a viga em questão. Pode-se observar que as frequências variaram entre aproximadamente 0,9 Hz e 50 Hz.

Tabela 04 – Frequências naturais da viga intacta

Frequência Natural (Hz)	Modelo V1
1 ^a	0,887
2 ^a	5,558
3 ^a	15,557
4 ^a	30,467
5 ^a	50,328

Fonte: Autoria Própria (2019)

Na Tabela 05, está listado um comparativo entre as frequências obtidas pelo software, os resultados analíticos (obtidos através da equação exposta na Figura 02) e seus respectivos erros.

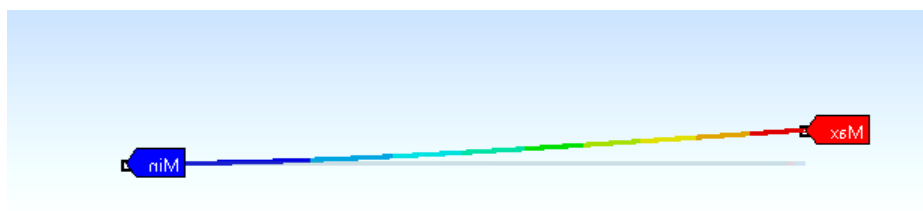
Tabela 05 – Comparativo entre as frequências numéricas e analíticas

Frequência Natural (Hz)	Resultado Numérico	Resultado Analítico	Erro (%)
1 ^a	0,887	0,887	0,000
2 ^a	5,558	5,560	0,036
3 ^a	15,557	15,567	0,064
4 ^a	30,467	30,300	0,550
5 ^a	50,328	50,427	0,200

Fonte: Autoria Própria (2019)

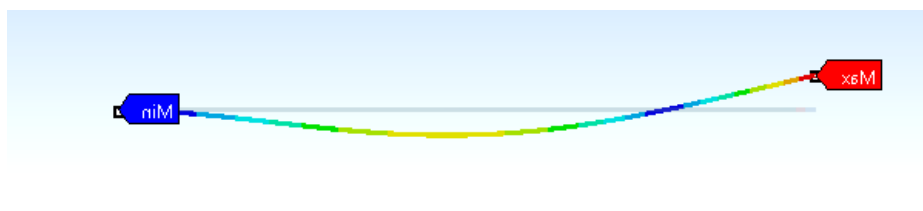
Uma vez que o maior erro foi de 0,55%, o modelo foi considerado representativo. Assim, também foram obtidos os cinco modos de vibração, referente às cinco frequências (Figura 09 a Figura 13). Nas imagens é possível se observar além do padrão deformado, os pontos de máximo e mínimo deslocamento.

Figura 09 - Primeiro modo de vibração da viga intacta

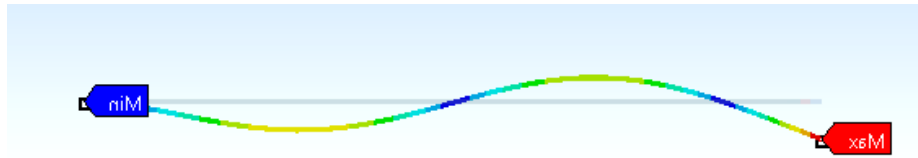


Fonte: Autoria Própria (2019)

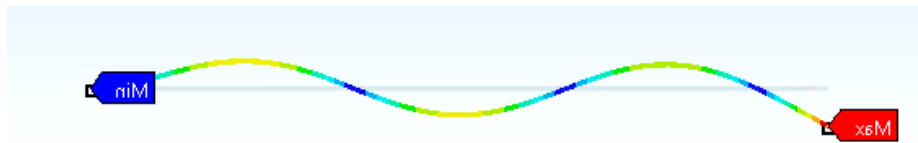
Figura 10 - Segundo modo de vibração da viga intacta



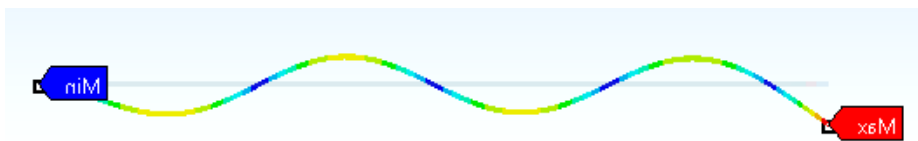
Fonte: Autoria Própria (2019)

Figura 11 - Terceiro modo de vibração da viga intacta

Fonte: Aatoria Própria (2019)

Figura 12 - Quarto modo de vibração da viga intacta

Fonte: Aatoria Própria (2019)

Figura 13 - Quinto modo de vibração da viga intacta

Fonte: Aatoria Própria (2019)

4.2 DEFINIÇÃO E ANÁLISE DOS MODELOS DANIFICADOS (T = 22°C):

Uma vez definido o dano de 5% para as simulações, foram então modeladas as seções transversais danificadas dos elementos escolhidos. Pode-se observar na Tabela 06 um comparativo entre as propriedades geométricas das seções intactas e danificadas.

Tabela 06 - Comparativo entre as propriedades geométricas das seções intactas e danificadas

Propriedade Geométrica	Seção Intacta	Seção Danificada	Redução (%)
Área (m ²)	0,00095	0,0009025	5
I _x (m ⁴)	2,25 * 10 ⁻⁷	1,70 * 10 ⁻⁷	24,4
I _y (m ⁴)	1,43 * 10 ⁻⁶	1,33 * 10 ⁻⁶	7

Fonte: Aatoria Própria (2019)

Da mesma maneira da viga intacta, também foram obtidas as frequências naturais para os modelos danificados, os respectivos resultados se encontram na Tabela 07.

Tabela 07- Frequências naturais dos modelos.

Frequências (Hz)	V1	V1.1	V1.2
1 ^a	0,887	0,888	0,879
2 ^a	5,558	5,565	5,515
3 ^a	15,557	15,576	15,434
4 ^a	30,467	30,504	30,241
5 ^a	50,328	50,386	49,977

Fonte: Autoria Própria (2019)

Na Tabela 08, estão apresentadas as variações de frequência (em porcentagem) de cada modelo danificado com relação ao modelo intacto.

Tabela 08 - Variação das frequências naturais dos modelos danificados com relação ao modelo intacto

Frequências (Hz)	V1.1	V1.2
1 ^a	0,303%	-0,714%
2 ^a	0,326%	-0,575%
3 ^a	0,329%	-0,586%
4 ^a	0,322%	-0,543%
5 ^a	0,317%	-0,498%

Fonte: Autoria Própria (2019)

Pode-se perceber que apesar dos danos serem da mesma intensidade, as frequências não variaram de maneira igual para os dois modelos, o que indica que a posição do dano, além da sua magnitude, influencia no quanto esses valores irão variar. Nesse caso, os resultados do modelo V1.2, foram os que sofreram uma maior mudança em relação ao modelo V1.

Isso pode ser explicado devido ao fato do modelo V1.2 ser danificado próximo ao apoio, que por sua vez é um elemento bastante significativo na rigidez da estrutura, possuindo assim grande influência sobre os parâmetros dinâmicos.

4.3 VARIAÇÃO DA TEMPERATURA:

4.3.1 *Módulo de Elasticidade:*

Para simular a variação de temperatura, foram utilizados os critérios apresentados na Figura 03 e calculados os Módulos de Elasticidade (E) para cada temperatura desejada. Na Tabela 09 estão descritos os valores calculados de E para cada cenário.

Tabela 09 - Módulo de Elasticidade do material para cada temperatura

Temperatura	Módulo de Elasticidade (Pa)
15°C	2,0436E+11
Padrão (22°C)	2,0000E+11
40°C	1,9735 E+11

Fonte: Autoria Própria (2019)

Pode-se perceber que à medida que a temperatura aumenta o valor do Módulo de Elasticidade diminui, o que reflete na rigidez da peça, uma vez que quanto menos rígido é o material menor é o seu módulo de elasticidade. Dessa maneira, pode-se indicar que à medida que a temperatura aumenta, a rigidez dos modelos diminui.

4.3.2 *Variação das Frequências:*

Através da variação no valor do módulo de Elasticidade, foi possível de se obter as novas frequências naturais de cada modelo em cada cenário de temperatura. Na Tabela 10 pode-se observar a variação dos parâmetros dinâmicos da viga intacta variada a temperatura.

Tabela 10 - Variação da frequência natural do Modelo V1 devido a variação de temperatura

Frequências (Hz)	15°C	Padrão (22°C)	40°C
1ª	0,888	0,887	0,878
2ª	5,564	5,558	5,504
3ª	15,573	15,557	15,405
4ª	30,500	30,467	30,170
5ª	50,382	50,328	49,836

Fonte: Autoria Própria (2019)

Para os modelos danificados V1.1 e V1.2, a variação das frequências encontram-se nas Tabelas 11 e 12, respectivamente.

Tabela 11 - Variação da frequência natural do modelo V1.1 devido a variação de temperatura

Frequências (Hz)	15°C	Padrão (22°C)	40°C
1ª	0,8893	0,888	0,882
2ª	5,5714	5,565	5,528
3ª	15,593	15,576	15,473
4ª	30,538	30,504	30,301
5ª	50,441	50,386	50,051

Fonte: Autoria Própria (2019)

Tabela 12 - Variação da frequência natural do modelo V1.2 devido a variação de temperatura

Frequências (Hz)	15°C	Padrão (22°C)	40°C
1ª	0,880	0,879	0,873
2ª	5,518	5,515	5,475
3ª	15,451	15,434	15,331
4ª	30,274	30,241	30,04
5ª	50,031	49,977	49,644

Fonte: Autoria Própria (2019)

Analisando as Tabelas 10, 11 e 12 pode-se perceber que, em comparação com a temperatura padrão, uma redução de temperatura significou um aumento nos valores das frequências naturais, enquanto que um aumento de temperatura levava a uma redução nos valores das frequências.

Como discutido no item 4.3.1, o aumento da temperatura significa a redução da rigidez do material e como a frequência natural é diretamente proporcional a rigidez, esse aumento de temperatura também implica na redução dos valores de frequência.

O contrário também pode ser observado, quando se compara os resultados em 22°C e em 15°C nota-se um aumento nos valores de frequência devido ao aumento de rigidez sofrido pelo modelo.

Nas Tabelas 13, 14, e 15 estão apresentadas as quantificações dessa variação nas frequências de cada modelo, para cada cenário de temperatura em relação a temperatura padrão.

Tabela 13 - Quantificação da variação da frequência em função da variação de temperatura (modelo V1)

Frequências (Hz)	15°C	40°C
1 ^a	0,113%	-0,791%
2 ^a	0,108%	-0,775%
3 ^a	0,103%	-0,773%
4 ^a	0,108%	-0,776%
5 ^a	0,107%	-0,778%

Fonte: Autoria Própria (2019)

Tabela 14 - Quantificação da variação da frequência em função da variação de temperatura (modelo V1.1)

Frequências (Hz)	15°C	40°C
1 ^a	0,146%	0,516%
2 ^a	0,115%	0,474%
3 ^a	0,109%	0,465%
4 ^a	0,111%	0,469%
5 ^a	0,109%	0,468%

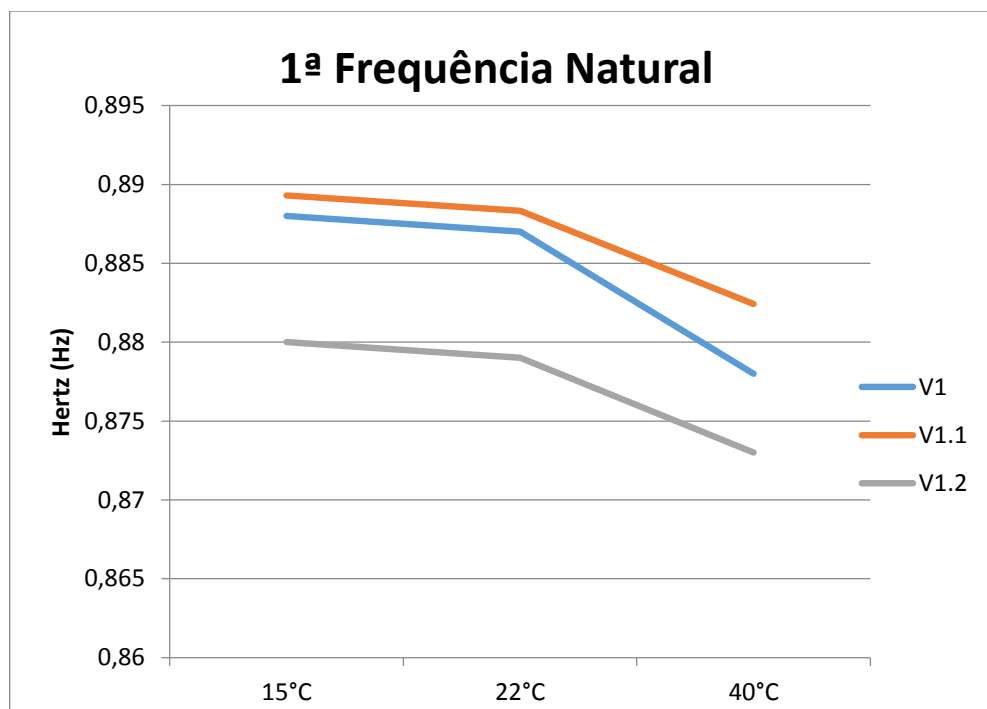
Fonte: Autoria Própria (2019)

Tabela 15 - Quantificação da variação da frequência em função da variação de temperatura (modelo V1.2)

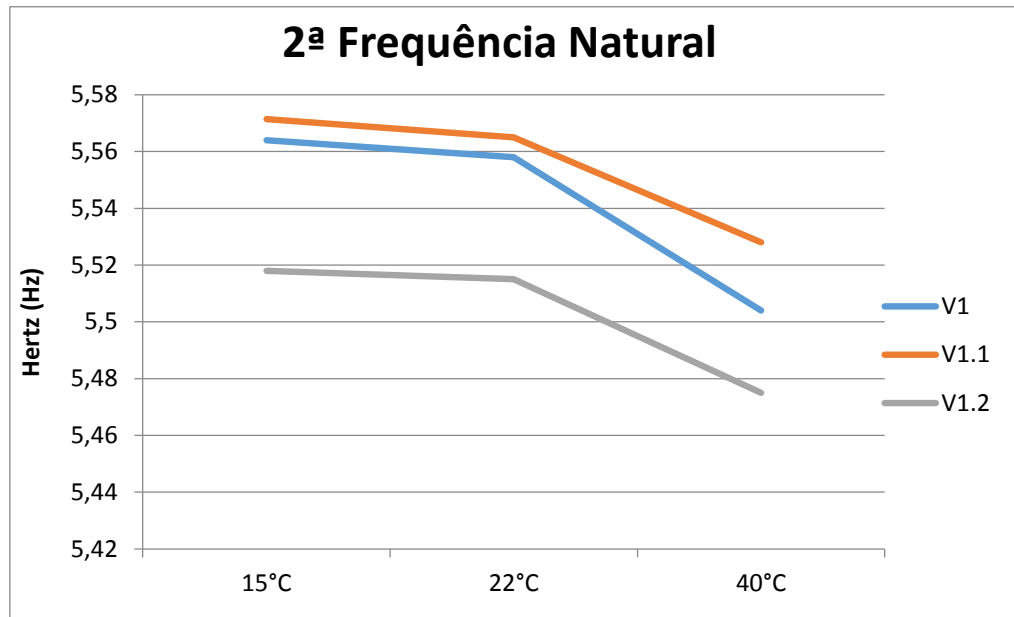
Frequências (Hz)	15°C	40°C
1ª	0,114%	0,458%
2ª	0,054%	0,457%
3ª	0,110%	0,470%
4ª	0,109%	0,469%
5ª	0,108%	0,467%

Fonte: Autoria Própria (2019)

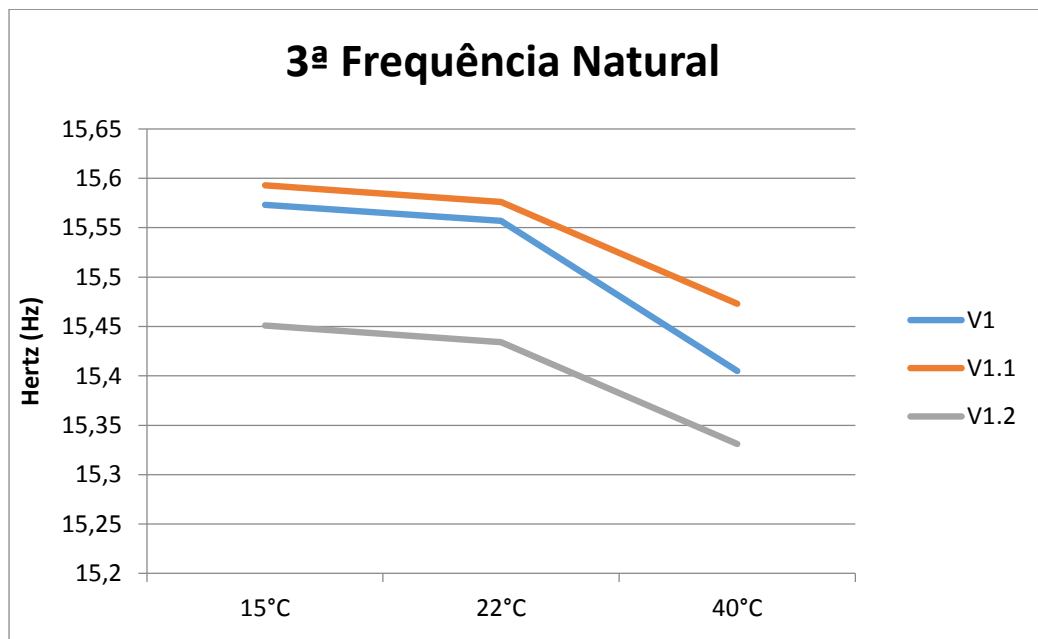
Com esses dados, foram gerados cinco gráficos (cada um referente a uma respectiva frequência natural) onde é possível visualizar o comportamento dos parâmetros diante da variação de temperatura. Esses resultados podem ser visualizados nos Gráficos 01, 02, 03, 04 e 05.

Gráfico 01 - Variação da 1ª frequência natural

Fonte: Autoria Própria (2019)

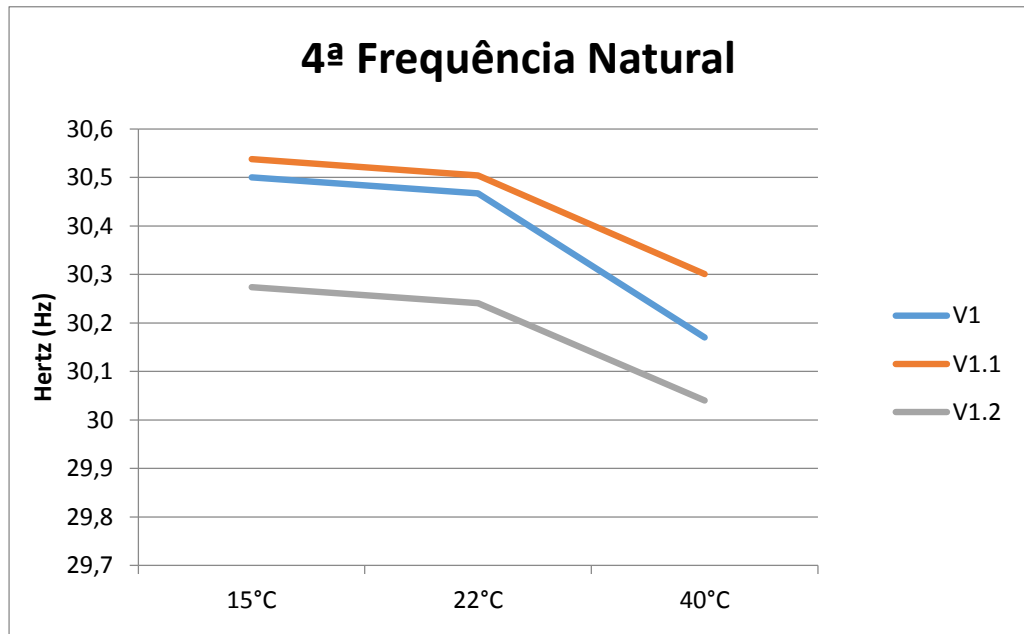
Gráfico 02 - Variação da 2ª frequência natural

Fonte: Autoria Própria (2019)

Gráfico 03 - Variação da 3ª frequência natural

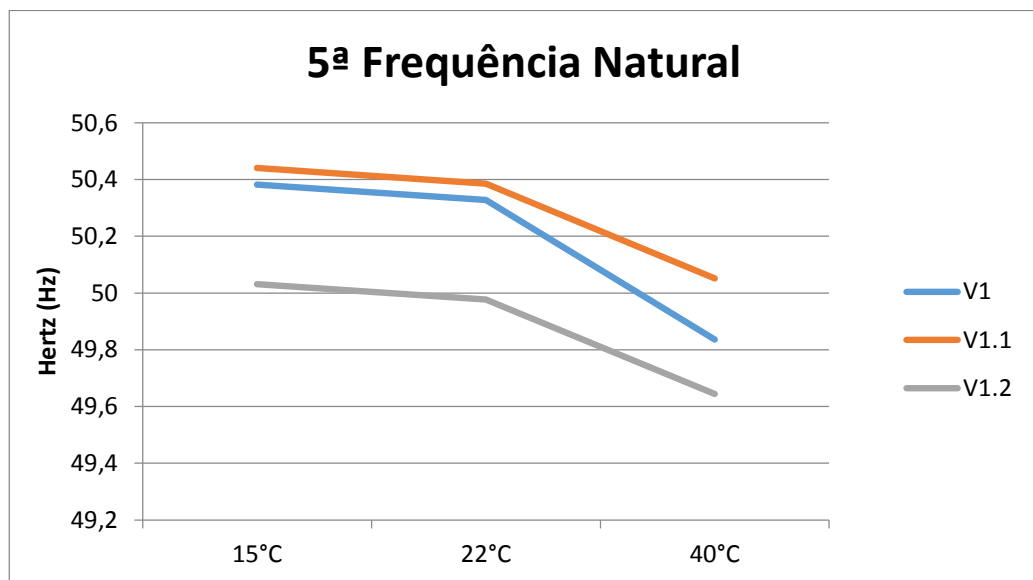
Fonte: Autoria Própria (2019)

Gráfico 04 - Variação da 4ª frequência natural



Fonte: Autoria Própria (2019)

Gráfico 05 - Variação da 5ª frequência natural



Fonte: Autoria Própria (2019)

Analisando as tabelas e os gráficos mostrados anteriormente, pode-se perceber que, com relação a aumento e redução de frequência, de acordo com a temperatura, todos os modelos se comportaram com uma mesma tendência, a medida que a temperatura aumenta a frequência tende a diminuir.

Com relação a quantificação dessa variação dos parâmetros, as mesmas variações de temperatura afetaram de maneira diferente o modelo intacto do modelo danificado. Na variação menor, redução de 7°C, essa diferença, embora existente, é pequena. Entretanto, quando se analisa a variação maior de temperatura (aumento de 18°C) é notória que essa diferença aumenta consideravelmente.

Já no modelo V1 a diferença dos parâmetros na temperatura padrão para a temperatura de 15°C foi de aproximadamente 0,1%, nos modelos danificados foi em torno de 0,11%. Quando comparado com os resultados referentes à temperatura de 40°C essas variações foram respectivamente de 0,7% e 0,5%. Ou seja, a presença de danos na estrutura faz com que a temperatura influencie de maneira diferente nos parâmetros modais.

Além disso, pode-se notar que, além de variar de maneira diferente com relação a intacta, entre os modelos danificados a variação também não foi igual. Isso pode ser observado nos gráficos uma vez que as retas de cada modelo não possuem a mesma inclinação para a mesma variação de temperatura, indicando assim que a posição do dano também influencia na variação de frequências devido à ação de temperatura.

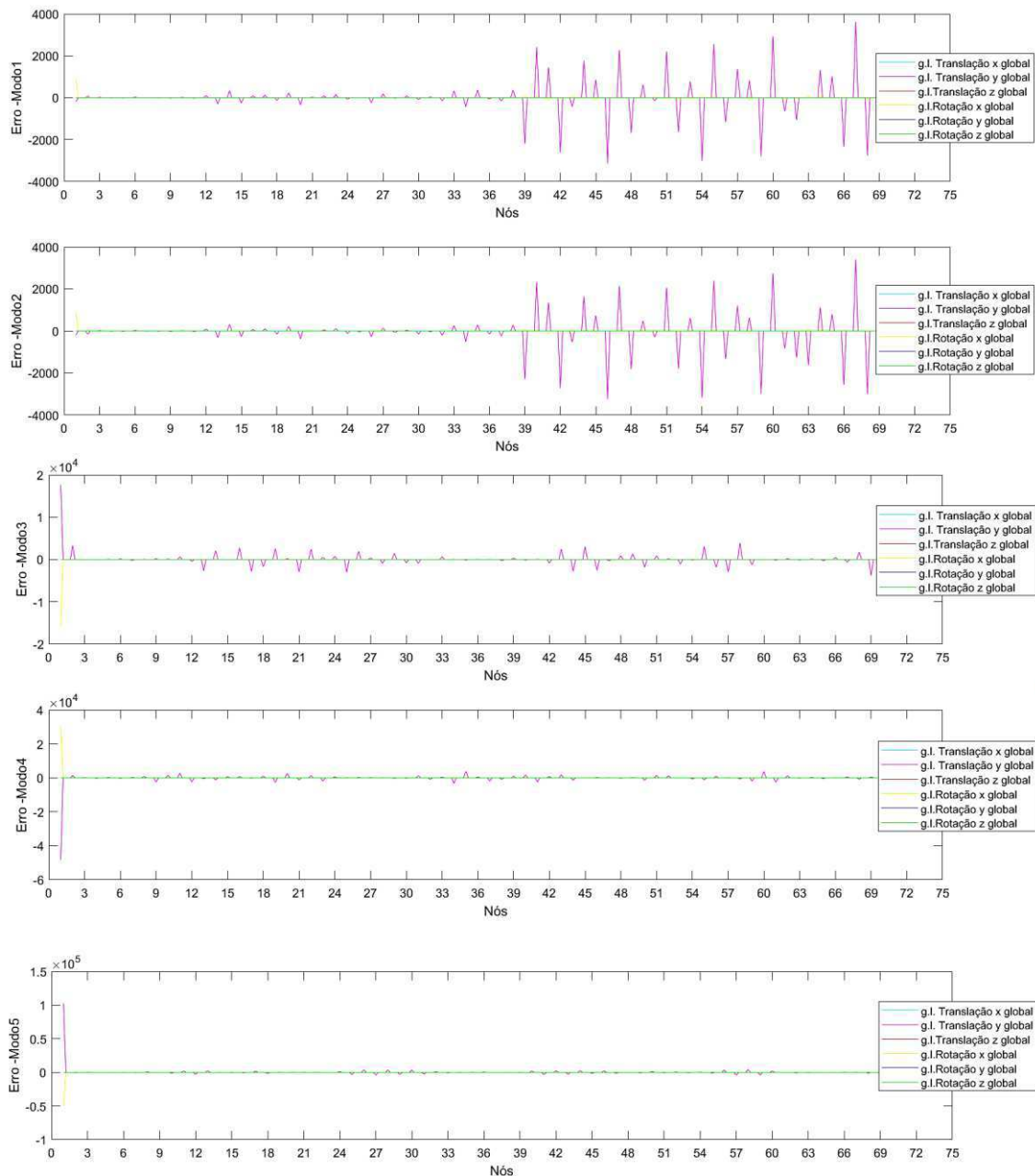
4.4 LOCALIZAÇÃO DOS DANOS:

4.4.1 *Modelo V1*

Para a localização dos danos, primeiramente foi considerado o cenário 1 (Tabela 03), onde a viga intacta na temperatura padrão foi comparada com a viga intacta na temperatura de 15°C, de maneira avaliar como apenas a temperatura influenciaria na detecção de danos através do MER.

Os resultados para essa primeira situação encontram-se na Figura 14.

Figura 14 - Localização do dano no modelo V1 no cenário 01 – apenas temperatura de 15°C

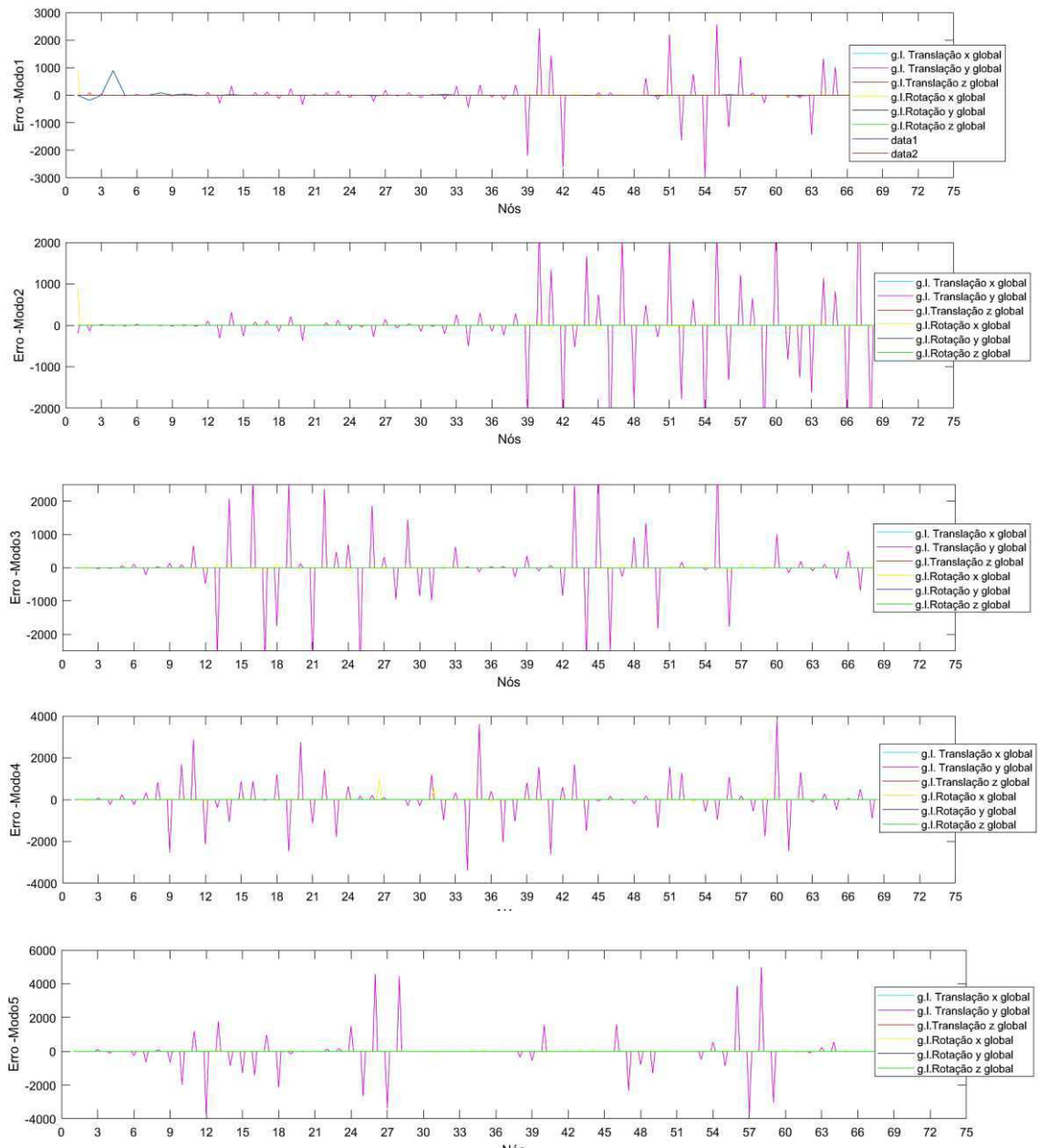


Fonte: Autoria Própria (2019)

Como esperado, uma vez que a viga não possui seção danificada, o método não apresentou um pico definido (simbolizando o erro) ou uma constância nos gráficos apresentados para cada modo de vibração, alguns apresentando mais picos que outros. As perturbações visíveis foram geradas devido apenas a diferença de temperatura entre a viga intacta e a viga “modificada pelo efeito da temperatura”.

No cenário 02 (Tabela 03), foi utilizada a viga intacta na temperatura padrão e a viga intacta na temperatura de 40°C, seus resultados encontram-se na Figura 15.

Figura 15 - Localização do dano no modelo V1 no cenário 02 – apenas temperatura de 40°C



Fonte: Autoria Própria (2019)

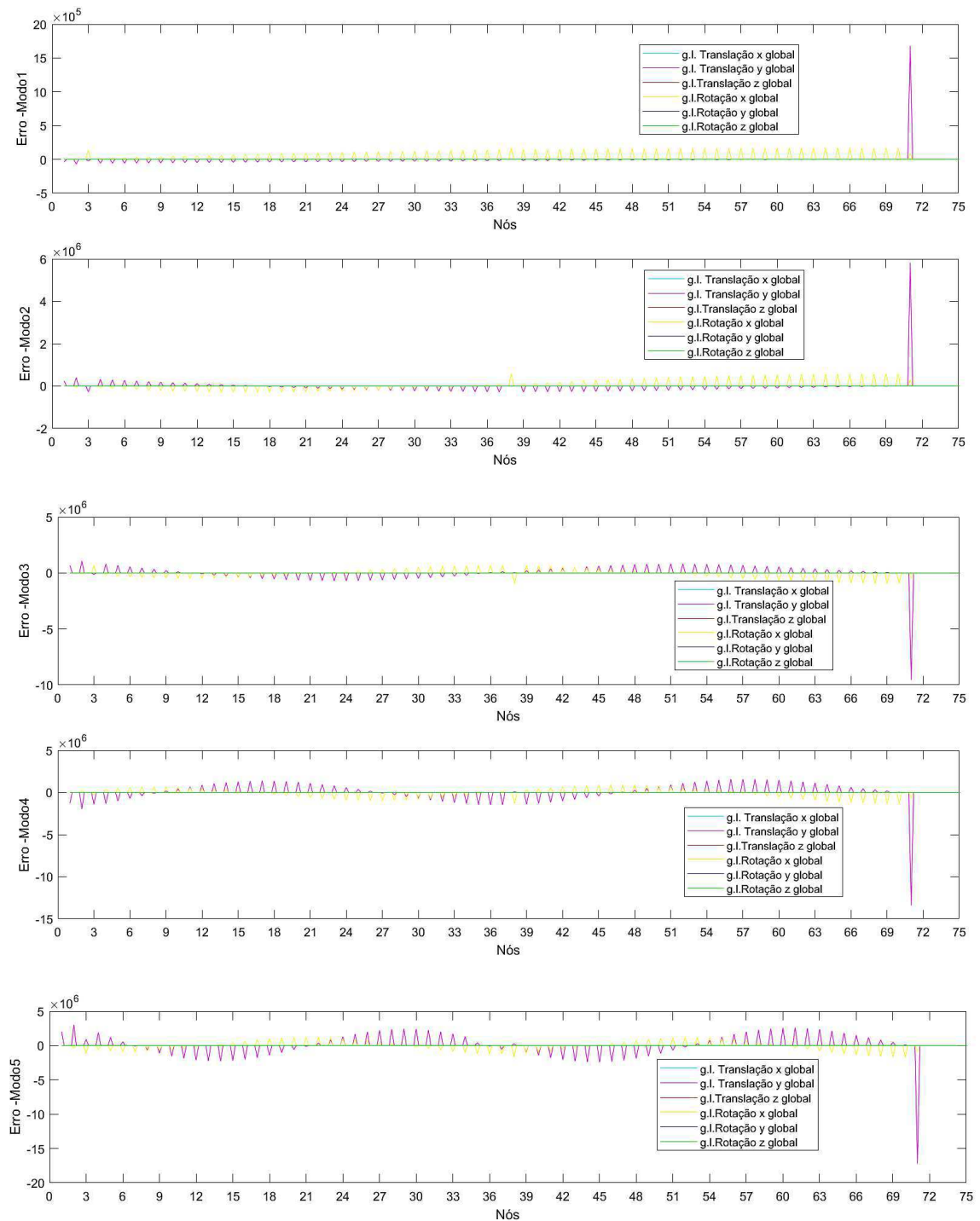
Assim como no cenário anterior, o MER não apresentou um pico definido como também não apresentou uma constância no resultado para os cinco modos de vibração. Pode-se perceber que nesse cenário as perturbações devido a temperatura são mais visíveis e mais numerosas do que anteriormente.

Isso se explica porque no primeiro caso a variação nos parâmetros modais foi de aproximadamente 0,1% enquanto que no segundo caso a variação foi de aproximadamente 0,8%, como foi apresentado na Tabela 13.

4.4.2 Modelo V1.1

Para esse modelo de viga, com o dano localizado entre os nós 70 e 71, o MER foi aplicado em três cenários de temperatura. No primeiro deles, cenário 03 (Tabela 03), foram consideradas as vigas intactas e danificadas na mesma temperatura, nesse caso foi utilizada a temperatura de 22°C. Os resultados referentes a esse cenário se encontram na Figura 16.

Figura 16 - Localização do dano no modelo V1.1 no cenário 03 – temperatura padrão

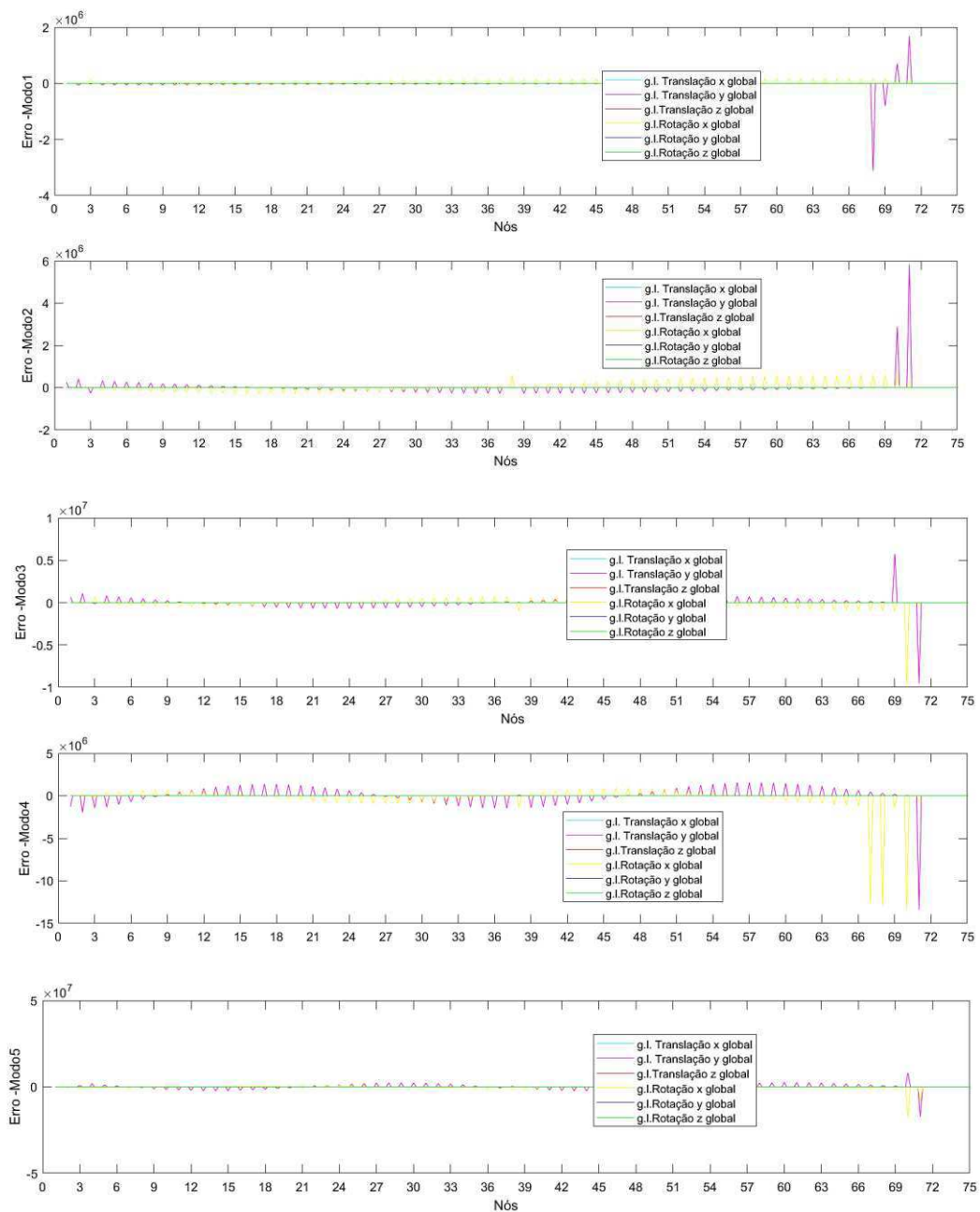


Fonte: Autoria Própria (2019)

Nesse cenário, diferente do ocorrido com o modelo anterior, existe um pico bem definido na região danificada, entre os nós 70 e 71, para todos os modos de vibração. Sendo assim, sem considerar a influência da temperatura, o MER foi capaz de detectar de maneira precisa a região danificada. Nota-se que as alterações mais significativas ocorrem nos graus de liberdade correspondentes à translação global em y.

Em seguida, no cenário 04 (Tabela 03), além do dano também foi considerado que o modelo danificado estava na temperatura de 15°C, seus resultados encontram-se na Figura 17.

Figura 17 - Localização do dano no modelo V1.1 no cenário 04 – temperatura de 15°C

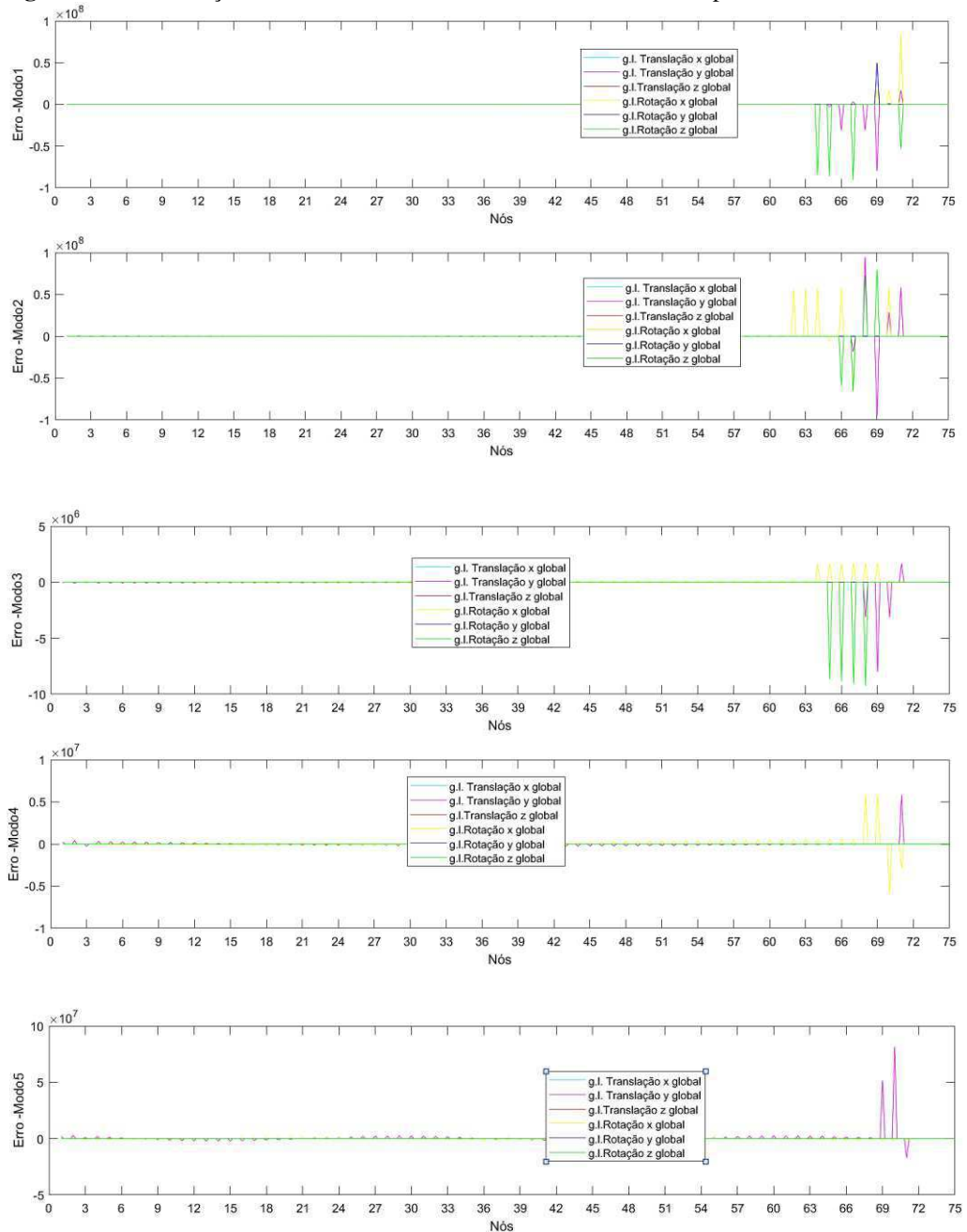


Fonte: Autoria Própria (2019)

Nesse caso já não existe mais a definição exata do pico que indicaria o dano no elemento 70, devido a variação de temperatura aplicada. Apesar disso, ainda é possível identificar a região onde o dano se encontra nos cinco modos de vibração. Nesse cenário, além das alterações na translação global em y também houveram alterações significativas nos graus de liberdades referentes à rotação global em x.

Para o cenário 05 (Tabela 03), foi considerada a viga danificada com 40°C e seus resultados podem ser observados na Figura 18.

Figura 18 - Localização do dano no modelo V1.1 no cenário 05 – temperatura de 40°C



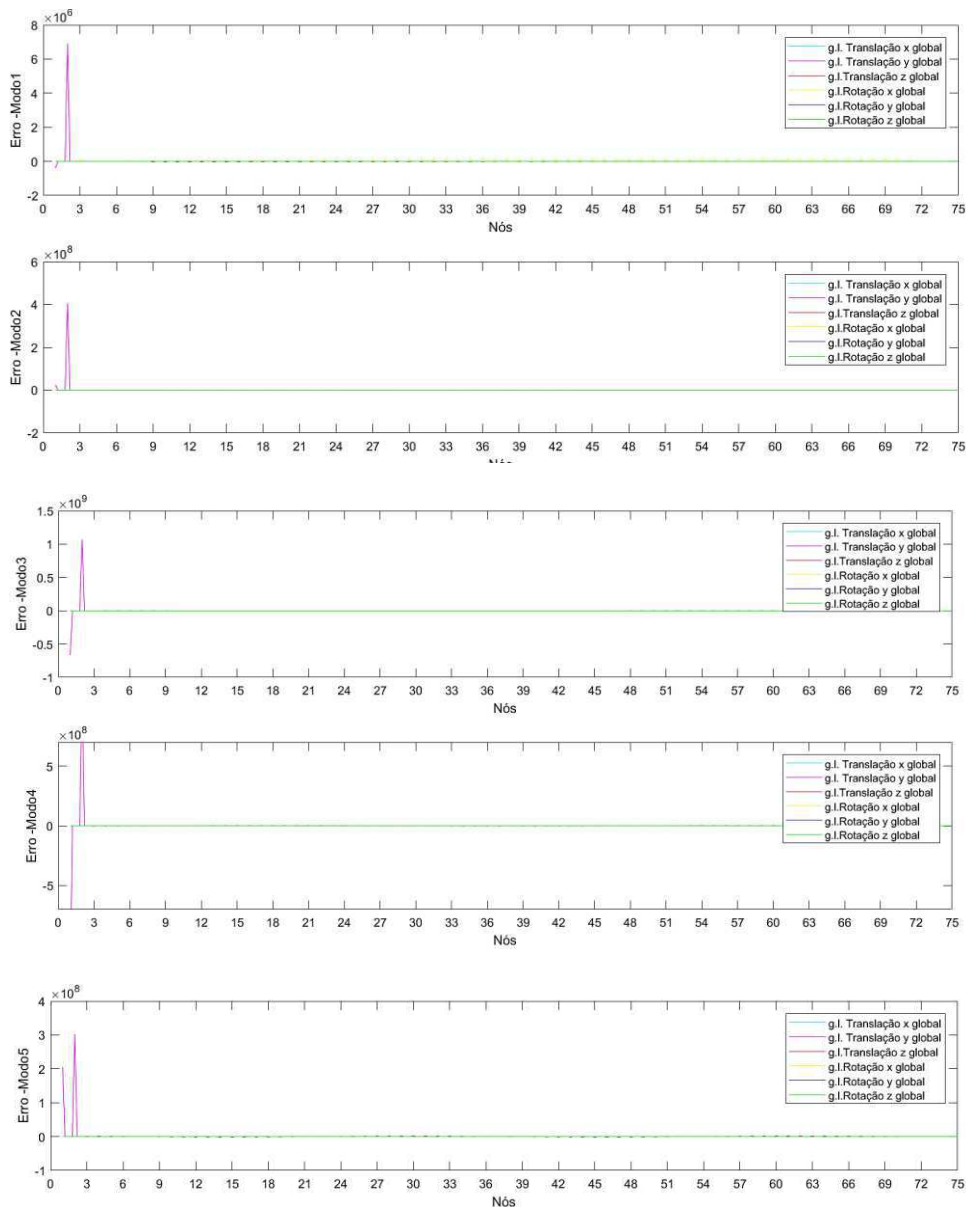
Fonte: Autoria Própria (2019)

Assim como no cenário anterior, também não foi possível localizar o dano com precisão sendo visível apenas a região onde ele se encontra. Devido a variação de temperatura ser de uma magnitude maior, os gráficos apresentam uma perturbação mais expressiva que anteriormente. Além disso, nesse cenário as alterações referentes aos graus de liberdade foram em relação a translação global em y e a rotação global nos eixos x, y e z.

4.4.3 Modelo V1.2

Para o modelo V1.2, com o dano entre os nós 1 e 2, foi primeiramente aplicado o MER apenas na temperatura padrão, cenário 06 (Tabela 03) e os resultados podem ser observados na Figura 19.

Figura 19 - Localização do dano no modelo V1.2 no cenário 6 – temperatura padrão

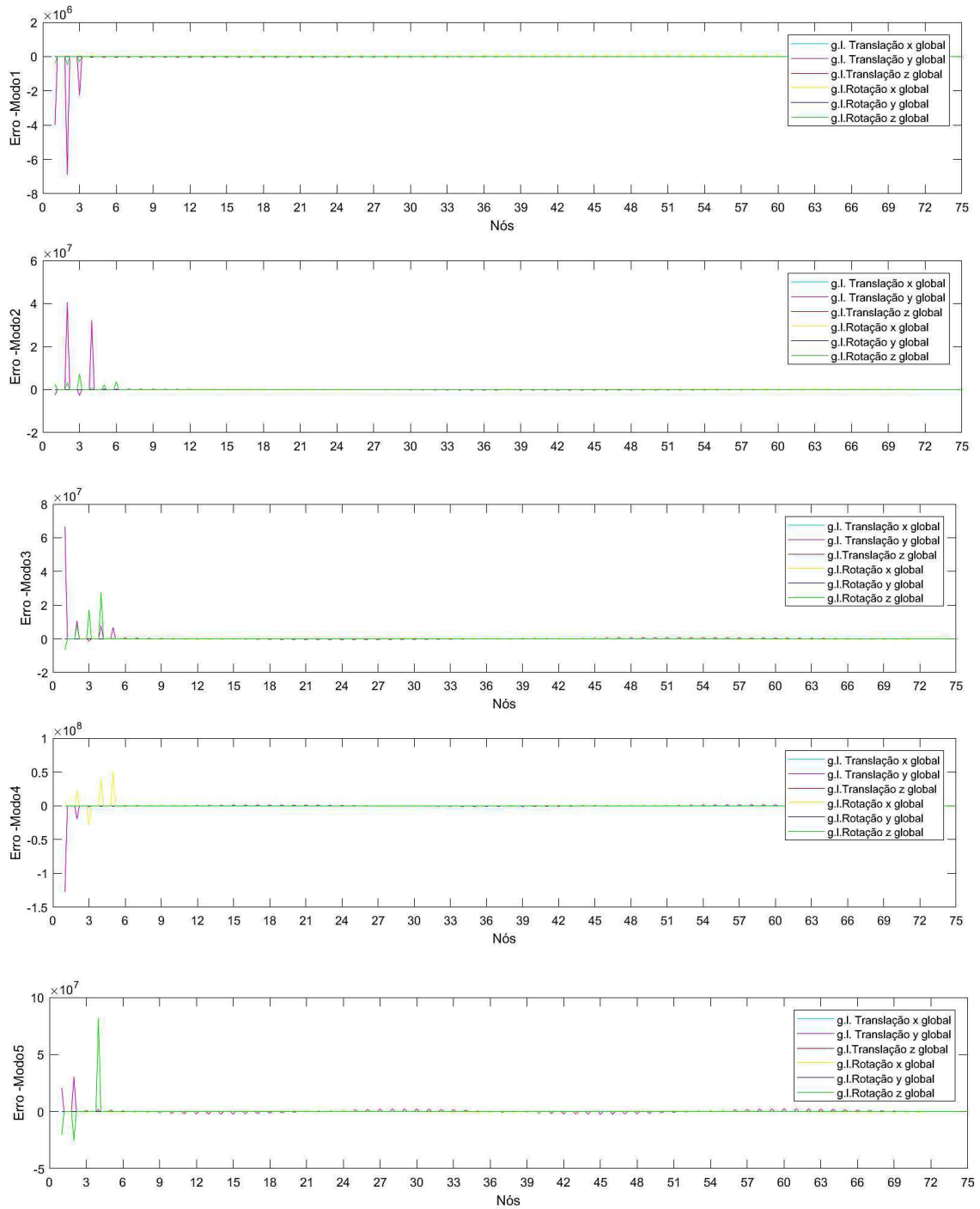


Fonte: Autoria Própria (2019)

Sem considerar a influência da temperatura, através do MER, novamente foi possível detectar os nós danificados (01 e 02) com picos bem definidos, com as alterações referentes aos graus de liberdade apresentadas na translação global no eixo y.

Ao se considerar a viga danificada na temperatura de 15°C ,cenário 07 (Tabela 03), os resultados obtidos pelo MER se encontram na Figura 20.

Figura 20 - Localização do dano no modelo V1.2 no cenário 07 – temperatura de 15°C

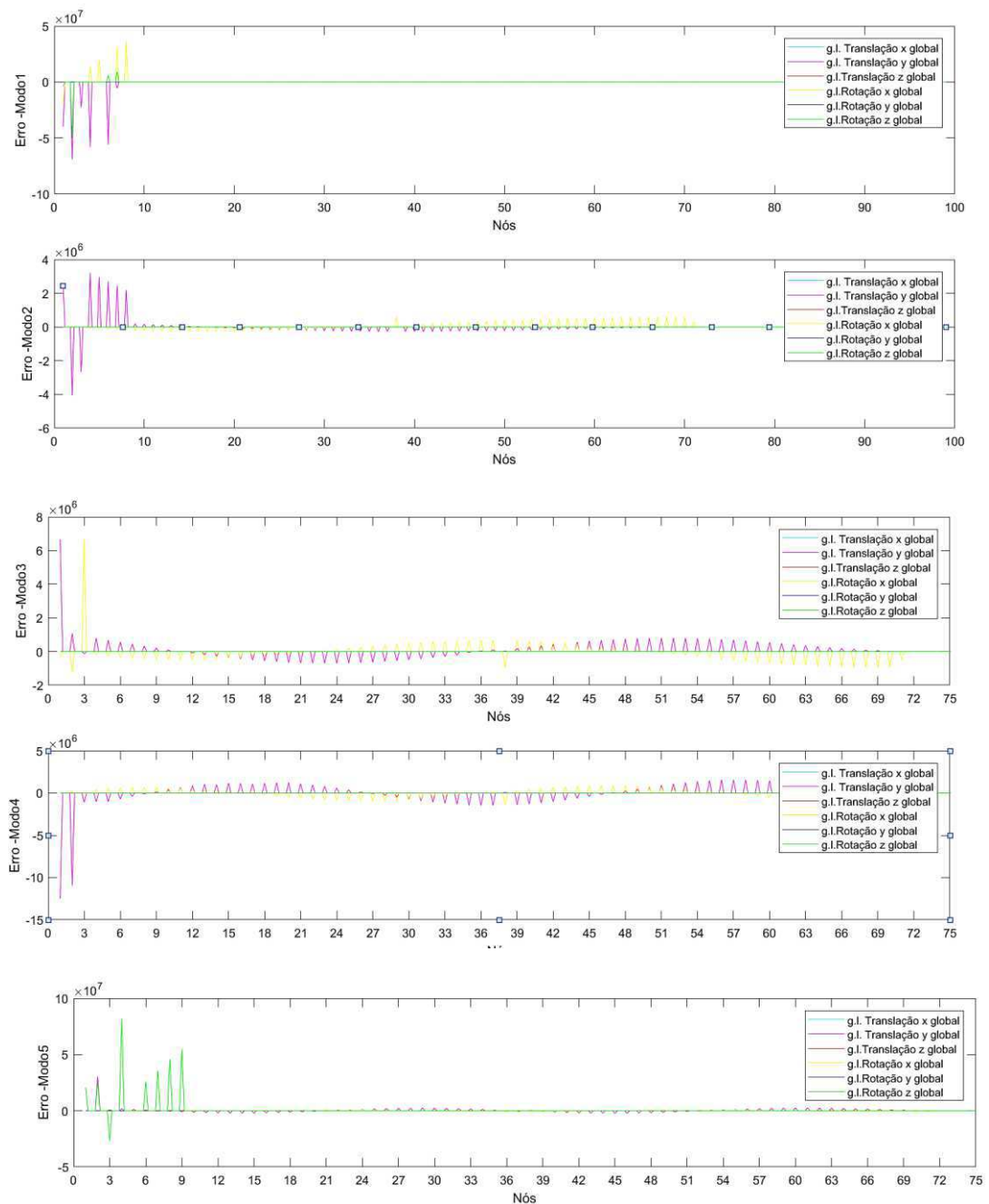


Fonte: Autoria Própria (2019)

Assim como o acontecido com o modelo anterior, ao se considerar a variação de temperatura, o resultado da detecção se tornou inconsistente permitindo apenas identificar a região onde se encontra o dano. Nesse caso, as alterações referentes aos graus de liberdade foram apresentadas na translação global em y, na rotação em x e z.

O cenário 08 (Tabela 03), levou em consideração o modelo danificado na temperatura de 40°C e seus resultados podem ser observados na Figura 21.

Figura 21 - Localização do dano no modelo V1.2 no cenário 08 – temperatura de 40°C



Fonte: Autoria Própria (2019)

Nesse último cenário, com o incremento da variação de temperatura, houve um aumento nas perturbações geradas por essa variação, permitindo novamente que apenas a região do dano fosse localizada, não sendo possível determinar o dano em si.

Quanto as alterações nos graus de liberdade, nesse caso foram indicadas com relação a translação global de y, rotação global de x e rotação global de z.

4.4.4 Análise Geral sobre a Localização de Danos sobre Influência da Temperatura

Após obtidos os resultados de todos os cenários é possível comparar e analisar como a variação de temperatura entre os modelos intactos e danificados pode influenciar na detecção de danos através do MER.

Nos cenários onde não existia o dano, cenários 01 e 02, os resultados apresentados nos gráficos foram apenas referentes ao desequilíbrio gerado pela diferença de temperatura entre os modelos, sendo assim, não havia presença de um pico definido.

Ainda sobre esses primeiros cenários foi possível perceber que uma variação de apenas 0,1% nos parâmetros modais (cenário 01 – viga intacta na temperatura padrão e viga intacta na temperatura de 15°C), já foi suficiente para que o MER apresentasse alguns picos embora não fossem definidos.

Quanto aos cenários que envolviam modelos danificados, o método se comportou da mesma forma independente de onde se encontrava os danos. Quando considerado apenas o dano, sem a influência de temperatura, o foi possível localizar utilizando o MER onde se encontravam os elementos danificados através da indicação de picos nos nós que limitavam o elemento.

Nos cenários que levavam em consideração danos e variação de temperatura, tanto no modelo V1.1 quanto no modelo V1.2, o método deixou de apresentar um pico bem definido e passou a indicar apenas a região onde o dano estava localizado através de um conjunto de picos, sendo na temperatura de 15°C com uma intensidade menor do que na de 40°C.

Embora ainda fosse possível determinar as regiões onde estavam os danos, no caso desse trabalho se era no início ou no fim da viga, em situações onde não se sabe previamente onde se encontra o dano, como em caso de inspeções sobre a integridade estrutural, esse

acréscimo de pico pode levar a interpretação de resultados de maneira equivocada, fazendo acreditar que a peça está mais danificada do que a realidade.

Assim, após todas as análises foi gerada a Tabela 16 que contém o resumo dos resultados encontrados em todos os cenários.

Tabela 16 - Resumo da localização de danos através do MER

Cenário	Presença de Danos	Presença de Variação de Temperatura	Localização Bem Definida do Dano	Presença de Região Perturbada e Não Definida
01	Não	Sim	Não	Sim
02	Não	Sim	Não	Sim
03	Sim	Não	Sim	Não
04	Sim	Sim	Não	Sim
05	Sim	Sim	Não	Sim
06	Sim	Não	Sim	Não
07	Sim	Sim	Não	Sim
08	Sim	Sim	Não	Sim

Fonte: Autoria Própria (2019)

5 CONCLUSÕES

A fim de se estudar como a variação de temperatura pode influenciar na localização de danos através do MER, foram analisados resultados que levam em consideração desde a influência da temperatura no módulo de elasticidade do material até como a localização dos danos vem a ser afetada por esse fator ambiental, sendo assim, pode-se fazer as conclusões a seguir:

Foi possível estabelecer a relação de que à medida que a temperatura aumenta, a peça se torna menos rígida e a frequência natural diminui, assim como a redução na temperatura implica no aumento da rigidez e dos valores de frequências.

Quanto a influência da variação de temperatura nos parâmetros modais foi possível observar que o modelo intacto foi afetado de maneira diferente dos modelos danificados e ainda que os modelos com danos possuíam variações diferentes entre si, ou seja, a presença e a localização de seções danificadas alteram a maneira com que a temperatura influencia nas frequências naturais.

Quanto a localização de danos através do MER, o método foi capaz de localizar os elementos danificados nos cenários onde não havia variação de temperatura, independente do posicionamento da seção danificada. Nos cenários que incluíam uma diferença entre a temperatura dos modelos, o MER passou a não apresentar mais a localização bem definida do dano e indicava uma região perturbada nos gráficos, sendo possível apenas a identificação das proximidades de onde se encontrava o dano e não mais o elemento em si.

Na variação menor, de 22°C para 15°C essas regiões perturbadas foram menores do que quando levada em consideração a temperatura de 40°C. No primeiro modelo danificado, apenas uma variação de aproximadamente 0,1% nas frequências (considerando a diferença de temperatura com relação a padrão) já foi suficiente para que o método não pudesse detectar o dano com precisão.

Nos cenários onde não haviam danos, apenas a presença de variação de temperatura, o MER apresentou um região perturbada (menos intensa para a temperatura de 15°C e mais intensa na de 40°C) que foi gerada pelo desequilíbrio entre os parâmetros intactos e os parâmetros variados devido apenas a temperatura.

No geral, foi possível perceber que a presença da variação de temperatura na aplicação do MER pode levar a interpretações de resultados equivocados quanto a presença, ou não, de regiões danificadas, sendo assim, é necessário levar em consideração esse fator ambiental antes de aplicar o método para que esses resultados sejam tratados de forma a eliminar, ou reduzir, a influência da temperatura na localização dos danos.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar a influência da temperatura na localização de danos com cenários mais complexos de danos conjuntos;
- Estudar a influência da temperatura na localização de danos de estruturas mais complexas;
- Estudar uma método para tratar os resultados de maneira que mesmo com a variação de temperatura ainda seja possível identificar os danos de maneira precisa.

REFERÊNCIAS

- ABREU, J. F. A. C. **Estudo computacional via ANSYS de vigas , arcos e anéis com restrições de contato impostas por bases elásticas.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.
- ADAMS, R. D., Cawley, P., Pye, C. J. e Stone B. J. (1978). **A vibration technique for nondestructively assessing the integrity of structures,** Journal of Mechanical Engineering, Science, 20(2), 93-100.
- ALVES, V. N. **Estudo de novas estratégias para identificação de danos estruturais a partir de dados vibracionais.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.
- ALVES, V. N. **Técnicas de anormalidade aplicadas à detecção de danos estruturais.** 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.
- AMARAL, R. P. F. et al. **Aplicação de métodos computacionais a dados vibracionais para detecção de alterações estruturais.** In: XII SIMPÓSIO DE MECÂNICA COMPUTACIONAL. 2016, Diamantina, MG. **Anais...**Diamantina, 2016.
- BOLINA, C. C. et al. **Vibrações: As Frequências Naturais Estimada E Experimental De Uma Estrutura.** In: CONGRESSO NACIONAL DE MATEMÁTICA APLICADA Á INDÚSTRIA. 2014, Caldas Novas, GO. **Anais...**Caldas Novas, 2014.
- BRASILIANO, S. A. **Caracterização de Danos em Estruturas Aporticadas.** 2001. 109p. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil, 2001.
- CALLISTER, W. D., & RETHWISCH, D. G. (2009). **Materials Science and Engineering: An Introduction** (8 ed.). Wiley. doi:9780470941669
- CARDOSO, C. G. **Identificação de danos em estruturas de viga por meio das suas propriedades dinâmicas.** 2005. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasília, Brasília, 2005.
- CLOUGH, R. W., & PENZIEN, J. (1993). **Dynamics of Structures.** New York: McGraw-Hill.
- CURI, A. P. **Vibrações Em Tabuleiro De Ponte Sob Ação Dinâmica De Vento Turbulento.** 2015. (Projeto de Graduação de Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.
- FERRO, R. M.; FERREIRA, W. G.; CALENZANI, A. F. G. **Análise dinâmica de estruturas de aço suportes de máquinas rotativas.** In: CONSTRUMETAL. 2014, São Paulo, SP. **Anais...**São Paulo, 2014.

- GENOVESE, M. **Localização e quantificação de danos em estruturas por meio de suas características dinâmicas**. 2000. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2000.
- HEARN, G., TESLA, R. B. (1991). **Modal Analysis for Damage Detection in Structure**, Journal of Structural Engineering, Vol 117, No. 10, pp.3042-3063.
- LOTTERMANN, A. F. **Patologias Em Estruturas De Concreto: Estudo De Caso**. 2013. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Departamento de Ciências Exatas e Engenharias. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2013.
- MARCHETTO, R. **Utilização do software MATLAB como recurso tecnológico de aprendizagem na transformação de matrizes em imagens**. 2014. REVEMAT. Florianópolis (SC), v.11, n. 1, p. 118-130, 2016.
- MARCY, M. C. A. **Identificação e Quantificação de Danos em Pórticos Espaciais Via Método do Erro Residual e Redes Neurais Artificiais**. 2013. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasília, Brasília, 2013.
- MARCY, M. C. A. **Metodologia baseada em redes neurais artificiais para a detecção de danos estruturais**. 2017. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasília, Brasília, 2017.
- MATSUMOTO, E. Y. **MATLAB 6.5 - Fundamentos de Programação**. São Paulo: Editora Érica, 2002.
- MEDEIROS, A. G. **Uso do MATLAB para o pré-dimensionamento de unidades de clarificação em uma estação de tratamento de água convencional**. 2014. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Ciências Ambientais e Tecnológicas. Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2014.
- PAZ, M. **Structural Dynamics, theory and computation**, third edition. Editorial Reverté S.A., 1992.
- RANGEL, I. C. DA S. E S.; RANGEL, L. D. S.; STUTZ, L. T. **Identificação de danos estruturais a partir de um Modelo de Superfície de Resposta**. In: XXXV CONGRESSO NACIONAL DE MATEMÁTICA APLICADA E COMPUTACIONAL. Petrópolis, RJ, 2016. **Anais...**Petrópolis, 2016.
- ROCHA, R. M. **Estudo da Influência da Temperatura nas Propriedades Dinâmicas de Vigas Metálicas**. 2017. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Instituto de Educação Superior de Brasília, Brasília, 2017.
- SANTANA, V. M. **Avaliação de danos estruturais em vigas considerando a influência da temperatura via Redes Neurais Artificiais**. 2018. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 116p.
- SANTOS, S. B. **Uma Contribuição ao Estudo do Comportamento Termomecânico de Estruturas Maciças de Concreto. Modelagem Viscoelástica Linear e Aplicações**. 2004.

287 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. 2004.

SILVA, R. L. DA. **Identificação e localização de danos em estruturas de concreto por meio de análise modal, experimental e numérica.** 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2018.

SOHN, H., 2006. **Effects of environmental and operational variability on structural health monitoring.** Philosophical Transaction of the Royal Society A, December, pp. 541-543.