



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

RAYANE VANESSA PESSOA

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NAS PROPRIEDADES
DINÂMICAS DE UMA VIGA DE CONCRETO ARMADO**

CAMPINA GRANDE – PB

2019

RAYANE VANESSA PESSOA

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NAS PROPRIEDADES
DINÂMICAS DE UMA VIGA DE CONCRETO ARMADO**

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.

Rayane Vanessa Pessoa

P475i

Pessoa, Rayane Vanessa.

Influência da temperatura nas propriedades dinâmicas de uma viga de concreto armado / Rayane Vanessa Pessoa. – Campina Grande, 2019.

46 f. : il. : color

Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2019.

"Orientação: Prof.^a Dr.^a Marília Marcy Cabral de Araújo".

Referências.

1. Concreto Armado. 2. Propriedades Dinâmicas. 3. Variação de Temperatura. I. Araújo, Marília Marcy Cabral de. II. Título.

CDU 624.92(043)

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECÁRIA MARIA ANTONIA DE SOUSA CRB 15/398

RAYANE VANESSA PESSOA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NAS PROPRIEDADES
DINÂMICAS DE UMA VIGA DE CONCRETO ARMADO**

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

Engº. Francisco de Assis da Costa Neto
Examinador Externo

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me sustentar e me dar forças para continuar mesmo quando eu não sabia que precisava, e, principalmente, nos momentos que mais pensei em desistir.

À minha mãe, Maria do Socorro, que sempre abdicou de si para criar e cuidar das suas filhas da melhor maneira, sempre com muito amor e carinho. Mãe, o sonho que você jamais imaginou se concretizou.

Ao meu pai, Roberto, que sempre apoiou meus estudos e me motivou a crescer mais e mais, e a não desistir.

Às minhas irmãs, Roberta e Raniely, que foram meu conforto nos momentos de desespero e choro, e sempre demonstraram o amor que sentem por mim.

A Nick, aquele que, quando mais precisei de uma mão, Deus veio e me deu uma pata.

A todos os meus familiares, em especial meus avós, Maria Gomes, Maria Clarice, e Edvan, as minhas primas Dayane, Suelen, Aline e Samara e meu primo Valberto, que sempre me apoiaram, torceram por mim e comemoraram junto a cada conquista minha.

A Manoel Ludgerio, por me auxiliar nesta reta final. Considero-lhe como um tio, assim como você me tem como a uma sobrinha.

À Yasmin, presente que a escola me deu, mesmo longe, sempre está a me apoiar.

À Karol, presente da universidade, que Deus colocou na engenharia apenas para ser minha amiga, que, mesmo longe, está sempre a me apoiar.

À Thércyo, por todo o apoio e o ombro amigo quando mais precisei desabafar, não só sobre o curso, mas sobre a vida.

À Bianca e a Anderson, sem a ajuda dos quais este trabalho não teria sido concluído.

Aos meus amigos da universidade, que são bem mais que isso.

À minha orientadora Marília Marcy, pela paciência, por todos os ensinamentos, apoios e conselhos quando precisei.

A todos os professores que, de alguma forma, contribuíram para minha formação.

E, por fim, a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho e para a minha formação acadêmica.

*Às pessoas mais importantes da minha vida,
Maria do Socorro e Roberto, Roberta e
Raniely.*

RESUMO

A análise modal vem sendo utilizada para a verificação da integridade e da segurança da estrutura, sendo uma maneira de identificar e localizar danos estruturais. Evidentemente, nem toda alteração das características dinâmicas é resultado, necessariamente, de um dano estrutural. A temperatura é um fator ambiental que altera as propriedades físicas e geométricas de uma estrutura, podendo alterar a rigidez, e, conseqüentemente, as frequências naturais de vibração, formas modais e amortecimento. Sendo assim, este trabalho buscou estudar a influência da variação da temperatura nas propriedades dinâmicas de uma viga intacta de concreto armado, utilizando para modelagem o software *Ansys Student*. Com os resultados encontrados pode-se observar que a temperatura provoca uma variação mínima nas frequências da viga de concreto armado, que podem vir ou não a interferir em métodos de detecção de danos baseados nas propriedades dinâmicas de uma estrutura.

Palavras Chave: Propriedades Dinâmicas; Variação de temperatura; Concreto Armado; Análise Modal.

ABSTRACT

The modal analysis is being used to verify the structure's integrity and security, representing a way to identify and locate structural damages. Apparently, not every changing on the dynamic features comes necessarily from a structural damage. The temperature is an environmental factor that changes the structure's physical and geometrical properties, which can change its hardness and, consequently, the natural vibration frequencies, modal forms and damping. Therefore, this paper tried to study the influence of the temperature variation on the dynamical properties of a reinforced concrete intact beam, using the Ansys Student software to execute its modeling. It's noticeable with the found results that the temperature causes a minimum variation on the reinforced concrete beam frequency, that can interfere or not on the damage detection methods based on the dynamical properties of a structures.

Key Words: Dynamical Properties; Temperature Variation; Reinforced Concrete; Modal Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Respostas de um sistema oscilatório forçado	19
Figura 2 - Frequências naturais e modos de vibração para uma viga engastada-livre	23
Figura 3 - Influência da temperatura sobre o módulo de elasticidade, em alguns metais	25
Figura 4 – Fluxograma da Metodologia aplicada	28
Figura 5 – Seção transversal da viga	29
Figura 6 – Detalhamento de armadura	29
Figura 7 – Modelo de viga engaste-livre	30
Figura 8 – Seção transversal da viga no Ansys	30
Figura 9 – Vista isométrica da viga no Ansys	31
Figura 10 – Detalhe de armaduras no Ansys	31
Figura 11 – 1° modo de vibração	33
Figura 12 – 2° modo de vibração	34
Figura 13 – 3° modo de vibração	34
Figura 14 – 4° modo de vibração	34
Figura 15 – Seção transversal do perfil metálico utilizado por Miranda	40

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Linha de tendência do gráfico de Callister e Rethwish.....	36
Gráfico 2 – Variação da frequência natural no 1° modo de vibração.....	38
Gráfico 3 – Variação da frequência natural no 2° modo de vibração.....	38
Gráfico 4 – Variação da frequência natural no 3° modo de vibração.....	39
Gráfico 5 – Variação da frequência natural no 4° modo de vibração.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades dos materiais no Ansys	29
Tabela 2 – Propriedades físicas e geométricas da viga.....	31
Tabela 3 – Frequências naturais da viga obtidas no software Ansys	33
Tabela 4 – Comparativo entre frequências numéricas e analíticas.....	35
Tabela 5 - Variação do módulo de elasticidade segundo a temperatura.....	36
Tabela 6 – Variação das frequências da viga com diferentes temperaturas	37
Tabela 7 – Comparação percentual da variação das frequências	38
Tabela 8 - Quantificação da variação da frequência em função da variação de temperatura (modelo V1).....	40

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
A	Área da seção transversal
ANSYS	<i>Structural Mechanics Software</i>
C	Matriz de amortecimento do sistema
E	Módulo de elasticidade
F (t)	Vetor de forças externas aplicadas
I	Inércia do elemento
K	Matriz de rigidez do sistema
L	Comprimento do vão do elemento
M	Matriz de massa do sistema
MEF	Método dos Elementos Finitos
N	Grau de liberdade
NBR	Normas Brasileiras
n	Número de Modo de vibração
°C	Unidade de medida de temperatura em Celsius
ϕ	Modo de vibração

(t)	Tempo
\ddot{y}	Vetor de acelerações do sistema
\dot{y}	Vetor de velocidade do sistema
v	Vetor de deslocamentos do sistema
ω_n	Frequência natural de vibração
ω^2	Frequência circular do movimento ou autovalor

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	JUSTIFICATIVA	16
1.2	OBJETIVOS	17
1.2.1	<i>Objetivo Geral</i>	17
1.2.2	<i>Objetivos Específicos</i>	17
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	PROPRIEDADES DINÂMICAS	19
2.1.1	<i>Generalidades</i>	19
2.1.2	<i>Equação do Movimento</i>	20
2.1.3	<i>Frequência Natural e Modo de Vibração</i>	22
2.2	INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA	23
2.3	IDENTIFICAÇÃO DE DANOS ESTRUTURAIS	25
2.4	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	26
2.5	FERRAMENTA COMPUTACIONAL – PROGRAMA ANSYS	27
3	METODOLOGIA	28
4	RESULTADOS E ANÁLISES	33
4.1	FREQUÊNCIAS NATURAIS DAS VIGAS OBTIDAS ATRAVÉS DO ANSYS	33
4.2	FREQUÊNCIAS OBTIDAS ANALITICAMENTE	35
4.3	ANÁLISE DAS FREQUÊNCIAS DAS VIGAS EM DIFERENTES TEMPERATURAS	35
4.3.1	<i>Módulo de Elasticidade</i>	36
4.3.2	<i>Variação das Frequências</i>	37
4.3	COMPARAÇÃO COM OUTROS ESTUDOS	40
5	CONCLUSÃO	42
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	43
	REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

As estruturas, durante sua vida útil, estão submetidas às solicitações e sequentes deteriorações, desgastes e outros processos. São comuns problemas de vibrações ou oscilações excessivas, fissuração em elementos estruturais e outros danos em elementos arquitetônicos, causados por ações dinâmicas nas edificações, especialmente em edifícios altos e esbeltos (MOREIRA, 2002). Estes diminuem a resistência da estrutura, podem vir a comprometer o seu funcionamento, ou, de certa forma, ser causa de seu colapso estrutural.

Esses fatores, juntamente com o advento da concepção e uso de estruturas muito esbeltas, as quais são mais susceptíveis às vibrações excessivas, assim como a preocupação com o desempenho e a degradação de estruturas antigas, impulsionaram o âmbito de pesquisas e estudos sobre as propriedades dinâmicas estruturais, no tangente às frequências, modos de vibração e taxas de amortecimento (GENOVESE, 2005).

Como essas características são propriedades intrínsecas das estruturas e dependem das condições em que estas se encontram, a análise dinâmica pode ser utilizada para a verificação da integridade e da segurança da estrutura, sendo uma maneira de identificar e localizar danos estruturais, e também de detectar mudanças na sua deformabilidade. A existência de danos influi, pela perda de rigidez, na modificação dos modos de vibração e frequência natural particulares de uma estrutura íntegra (ALMEIDA, 2005).

Mesmo em ambientes de ações dinâmicas reduzidas (como em escritórios e residências, por exemplo), o efeito das vibrações pode vir a incomodar intensamente as pessoas. Complementando as técnicas usuais de análise, equipamentos modernos, sensores e softwares em ensaios dinâmicos podem quantificar corretamente as suas ações e seus efeitos (NÓBREGA, 2004).

Os danos estruturais que resultam na fissuração são evidenciados pela redução da inércia da peça (no caso de microfissuras), o que pode resultar em perda da rigidez, e, por consequência, modificação de suas propriedades dinâmicas (ALMEIDA 2005). Tais danos podem ser provocados tanto por ações estáticas (sobrecarga, por exemplo), como por ações dinâmicas (ação do vento, tráfego de pessoas, tráfego de veículos, sismos, entre outros).

Como as características dinâmicas de qualquer estrutura dependem da sua rigidez e da massa, a perda desta primeira, dependendo da sua posição e magnitude, modificará também os modos e frequências naturais de vibração, dando espaço para o desenvolvimento de pesquisas visando extrair informações que permitam localizar e quantificar a redução de rigidez da estrutura devido ao dano, mediante à aplicação de métodos apropriados (GENOVESE, 2005).

Evidentemente, nem toda alteração das características dinâmicas é resultado, necessariamente, de um dano estrutural. A temperatura é um fator ambiental que altera as propriedades físicas e geométricas de uma estrutura pelos efeitos de contração e dilatação, podendo alterar a rigidez, e, conseqüentemente, as frequências naturais de vibração, formas modais e amortecimento. A temperatura é a variável ambiental que possui maior influência nessas características (Li *et al.* 2010, apud SANTANA, 2018).

No presente trabalho buscou-se estudar como a temperatura, ao alterar as propriedades físicas e geométricas das estruturas, altera também suas propriedades dinâmicas, visando a possibilidade da influência da variação da temperatura chegar a mascarar métodos de detecção de danos estruturais baseados nas propriedades modais. O estudo inicia-se com uma revisão bibliográfica na literatura que embasa o tema, e prossegue com o auxílio do programa computacional de simulação de estruturas *Structural Mechanics Software (ANSYS-student)*, o qual utiliza o Método dos Elementos Finitos para a análise.

O software possibilita a construção de pequenos modelos de estruturas sob diferentes configurações, condições de contorno e propriedades geométricas, permitindo, também, a aplicação de diferentes temperaturas para a avaliação dos seus efeitos e propriedades dinâmicas. Com base nos resultados obtidos, será possível analisar os efeitos da temperatura sobre as frequências da estrutura estudada, a fim de perceber se esses terão valores capazes de sobrepor as variações devido à presença de danos estruturais.

1.1 JUSTIFICATIVA

A escolha do tema do presente Trabalho de Conclusão de Curso foi motivada pela importância do estudo das propriedades dinâmicas das estruturas e dos métodos de detecção de danos estruturais baseados nas propriedades modais, que vêm a cada dia sendo mais utilizados, devido a análise modal se apresentar como uma opção viável para o estudo do estado de degradação de uma estrutura.

Como danos estruturais não são os únicos a alterarem as propriedades dinâmicas, estudar a influência da temperatura nas propriedades modais das estruturas, constituídas por diversos materiais da construção civil, se torna de grande importância para engenharia. Pois, a temperatura pode vir a influenciar nas propriedades dinâmicas, e se faz necessário o estudo para se ter ciência se as possíveis alterações são significativas o suficiente para mascarar danos estruturais.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 *Objetivo Geral*

Analisar a influência da temperatura nas propriedades dinâmicas de uma viga de concreto armado submetida à influência de diferentes temperaturas.

1.2.2 *Objetivos Específicos*

- a) Obter os parâmetros dinâmicos da viga;
- b) Comparar os resultados do software com métodos analíticos de cálculo;
- c) Analisar a influência da temperatura nos parâmetros dinâmicos da estrutura estudada.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No presente Trabalho de Conclusão de Curso encontram-se cinco capítulos que tratam sobre as propriedades dinâmicas das estruturas, particularmente de vigas, e a alteração destas, levando em consideração a interferência da temperatura.

No Capítulo 1 constam as informações introdutórias a respeito da problemática da alteração das propriedades dinâmicas da estrutura devido à carregamentos e fatores ambientais, 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, influência da temperatura, comportamento dos materiais com a variação de temperatura.

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, assim como a comparação resultados de outros dois trabalhos realizados no mesmo eixo temático, mas com material estrutural distinto.

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 de uma estrutura de concreto armado e se esta pode chegar a camuflar danos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para conhecer o comportamento dinâmico de vigas, este capítulo apresenta uma revisão teórica sobre o tema da dinâmica das estruturas, o qual embasa o presente estudo.

2.1 PROPRIEDADES DINÂMICAS

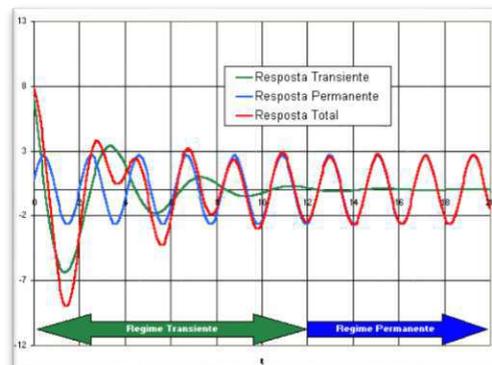
2.1.1 Generalidades

De acordo com Lima e Santos (2008), a dinâmica das estruturas objetiva determinar os deslocamentos, as velocidades e as acelerações dos elementos constituintes de uma estrutura submetida a cargas dinâmicas. A estrutura desloca-se ou movimenta-se em torno da sua deformada estática, ao vibrar ou apresentar movimento vibratório.

Vibração pode ser definida como “o movimento oscilatório de um objeto ou de um sistema em relação a sua posição de equilíbrio” (ALMEIDA, 2005), podendo este ser periódico, não periódico ou transiente. Existem dois tipos de vibrações: a vibração livre e a forçada. A vibração livre ocorre na ausência de excitação externa, somente com energia potencial e cinética, apresentando um movimento harmônico, cuja frequência natural depende exclusivamente das propriedades do sistema, como a massa e a inércia (ALMEIDA, 2005)..

Diferentemente da vibração livre, a vibração forçada resulta da aplicação de forças externas, constituída em duas partes: a transiente (desaparece num curto intervalo de tempo) e a permanente. Esse tipo de vibração está exemplificado na Figura 1, onde a linha vermelha se refere à resposta transiente, a linha azul, resposta permanente, e a linha vermelha representa a resposta total, dada pela soma das duas anteriores.

Figura 1- Respostas de um sistema oscilatório forçado



Fonte: ARAGÃO FILHO (2019).

A grande maioria das cargas consideradas em estruturas de obras civis tem natureza dinâmica. Cargas são elementos físicos de caráter vetorial, possuidoras de magnitude, direção, sentido e ponto de aplicação. Neste contexto, uma carga é dita dinâmica quando apresenta variação no tempo, na sua magnitude, direção ou posição, introduzindo na estrutura acelerações, velocidades e deslocamentos. Como consequência, há geração de forças de inércia e de amortecimento (LIMA & SANTOS, 2008).

As ações dinâmicas caracterizam-se por respostas que variam durante o tempo, seja de longa (vento, variação da temperatura, etc.) ou curta duração (sismos, explosões, impactos, etc). A resposta da estrutura a estas ações irá depender, basicamente, da sua massa, da sua rigidez e de seu amortecimento. Quanto ao amortecedor, a estrutura pode possuir um mecanismo dissipador de energia. Já a rigidez da peça dependerá tanto da sua geometria (seção transversal) quanto dos seus materiais constituintes (módulo de elasticidade e inércia).

2.1.2 Equação do Movimento

As expressões matemáticas que regem o comportamento dinâmico das estruturas são conhecidas como Equações do Movimento. Nestas são baseadas obtenção de frequências naturais, modos de vibração, razão de amortecimento, isto é, as propriedades dinâmicas de um sistema (MARCY, 2017). Estas equações podem ser obtidas aplicando-se o Princípio de d'Alembert, o qual estabelece que

[...] o equilíbrio dinâmico de um sistema pode ser obtido adicionando-se às forças externas aplicadas de uma força fictícia, chamada de força de inércia, proporcional à aceleração e com sentido contrário ao do movimento, sendo a constante de proporcionalidade igual à massa do sistema (LIMA & SANTOS, 2008).

Como a modelação de estruturas como um sistema de um grau de liberdade (SGL) é limitada, não atendendo às necessidades da engenharia de estruturas. O estudo foca em de sistemas estruturais mais complexos, com vários graus de liberdade (LIMA & SANTOS, 2008).

A equação de equilíbrio para um sistema estrutural de N graus de liberdade, submetida a carregamentos dinâmicos pode ser dada por (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 \mathbf{M} , \mathbf{C} e \mathbf{K} são, respectivamente, as matrizes de massa, amortecimento e rigidez do sistema, sendo o número de linhas e colunas dependentes do número de graus n de liberdade da

estrutura. Os vetores $\ddot{\mathbf{y}}(\mathbf{t})$, $\dot{\mathbf{y}}(\mathbf{t})$ e $\mathbf{y}(\mathbf{t})$ representam os vetores de aceleração, velocidade e deslocamento, respectivamente, e o vetor de forças externas aplicadas é indicado por $\mathbf{F}(\mathbf{t})$ (MARCY, 2017).

Pela geometria do sistema e propriedades dos materiais envolvidos, pode-se obter as matrizes de massa e rigidez. Entretanto, por se tratar de uma análise mais complexa, a matriz de amortecimento, geralmente, pode ser expressa como uma combinação entre as matrizes de massa e rigidez do sistema (MARCY, 2017).

Como estruturas civis apresentam, geralmente, valores de amortecimento inferiores a 15%, a análise modal do sistema pode ser feita de modo semelhante à do sistema em vibração livre não amortecida, isto é, sem a consideração da matriz \mathbf{C} (CARDOSO & CURY, 2017). Dessa forma, as equações de movimento para um sistema em vibração livre e não amortecido ($\mathbf{F}(\mathbf{t}) = \mathbf{0}$), podem ser obtidas da Equação (2.1), omitindo a matriz de amortecimento e o vetor de cargas aplicadas, resultando em:

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

Esta equação tem solução do tipo:

$$\mathbf{y}(t) = A\mathbf{sen}\omega t + B\mathbf{cos}\omega t \quad (2.3)$$

$$\ddot{\mathbf{y}}(t) = -A\omega^2\mathbf{sen}\omega t - B\omega^2\mathbf{cos}\omega t \quad (2.4)$$

Substituindo as equações (2.3) e (2.4) em (2.2), temos:

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

Como a equação (2.5) é homogênea e linear, para se obter uma resposta trivial, $\mathbf{y} = \mathbf{0}$, o determinante da matriz entre parêntesis deve ser nulo. Assim:

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

Esta é conhecida como a equação característica do sistema, equivalente a um problema de autovalores e autovetores, cuja solução representa as frequências naturais (ω^2) e os modos de vibração do sistema ($\hat{\mathbf{y}}$) (MARCY, 2017). A partir da análise modal, obtêm-se as frequências e os modos naturais de vibração, que são dependentes da rigidez estrutural. Desta forma, qualquer mudança na rigidez provocada por um eventual dano na estrutura resultará em mudanças nas frequências e nos modos naturais de vibração.

2.1.3 Frequência Natural e Modo de Vibração

A frequência natural de uma estrutura é representada pela taxa de oscilação livre, sofrida durante a vida útil da estrutura, obtida depois de cessada a força que provocou seu movimento. Este parâmetro modal é o mais importante da estrutura, pois, por depender, exclusivamente, da massa e da rigidez do sistema, pode sofrer alteração devido variações das propriedades físicas, geométricas ou térmicas. A frequência natural do primeiro modo de vibração é a frequência fundamental e, por apresentar o menor valor dentre as frequências, pode acarretar problemas para as estruturas civis (ALMEIDA, 2005).

Segundo Rao (2008), para sistemas de um grau de liberdade, a frequência natural é dada pela variação da massa e da rigidez. Esta definição também pode ser aplicada a sistemas com n graus de liberdade, os quais terão, em geral, n frequências naturais distintas (SHIGLEY, 1969, apud SILVA, 2012).

Nas situações práticas, a massa de um sistema pode ser previamente determinada, com valores estabelecidos de inércia. Dificilmente pode-se alterá-la com vistas à variação das frequências. Por isso, a rigidez se mostra como o melhor parâmetro a ser modificado a fim de alterar as frequências naturais de vibração para melhoria de um sistema (RAO, 2008).

Os modos de vibração da estrutura são suas possíveis formas de vibração, relacionadas a cada uma das frequências naturais. Este sofre grande influência da fissuração, principalmente quando a região atingida está localizada numa região de maior amplitude de modo correspondente (ALMEIDA, 2005).

De acordo com Paz (1992), as frequências naturais e respectivos modos de vibração de uma viga podem ser definidas por:

$$\omega_n = C_n \sqrt{\frac{EI}{mL^4}} \quad (2.7)$$

Onde

C_n – coeficiente utilizado para cada tipo de condição de contorno;

E – módulo de elasticidade do material;

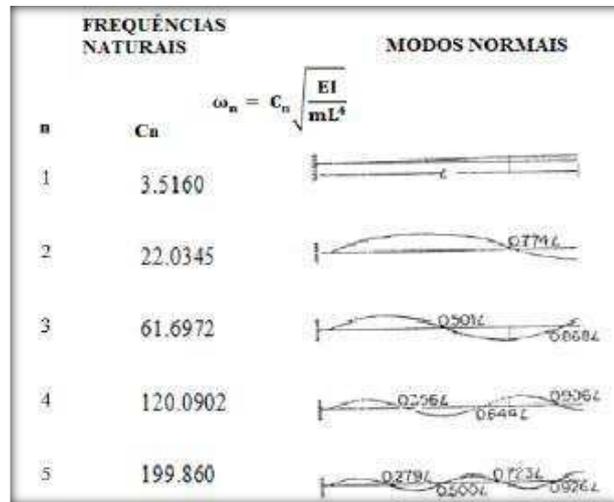
I – momento de inércia da área da seção transversal;

m – massa; e

L – comprimento da viga.

Como proposto por Paz (1992), é possível calcular, analiticamente, as frequências naturais e os modos de vibração de uma viga, considerando suas condições de apoio. No presente trabalho considerou-se apenas a condição engaste-livre para a viga de concreto armado estudada, cuja equação está demonstrada na Figura 2.

Figura 2 - Frequências naturais e modos de vibração para uma viga engastada-livre



Fonte: PAZ (1992)

Sobre as frequências naturais e modos de vibração, a NBR 6118/2014 se baseia no critério da frequência fundamental mínima da estrutura, considerando que esta deve ser 1,2 vezes a frequência crítica.

2.2 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA

De acordo com Zhou e Yi (2014, apud SANTANA, 2017), a temperatura de uma estrutura civil depende de muitas variáveis aleatórias, podendo ser influenciada pela temperatura do ar, velocidade do vento, umidade ambiente, intensidade da radiação solar, tipo e características dos materiais, configurações geométricas, condições de contorno e carregamento solicitante. Na estrutura, essa variação pode ser diferente a depender do local em que a construção foi feita, das condições climáticas e dos números de elementos que a compõem (SANTOS, 2004).

A expansão térmica de um corpo é consequência da mudança na distância média de separação dos átomos ou moléculas que o constituem, e ocorre devido à excitação da energia interna, associada à energia cinética e potencial das vibrações dos átomos em torno da sua

posição de equilíbrio. Com o aumento da temperatura o corpo, a separação média entre os átomos aumenta (SERWAY, 2014).

Segundo Santana (2018), o efeito provocado pela variação da temperatura na geometria é feito de forma linear, considerando-se o material isotrópico e seu alongamento proporcional à variação de temperatura em todas as direções. Em elementos como pilares e vigas, a expansão térmica é representada pelo alongamento do seu comprimento. Quando ocorre diminuição da temperatura, há contração e diminuição de volume, causando encurtamento longitudinal. O aumento da temperatura e deformações influenciam os módulos de elasticidade, podendo até modificar a linearidade da relação tensão x deformação.

Como as características dinâmicas de uma estrutura (frequências e modos de vibração) dependem das suas propriedades físicas e geométricas, estas são utilizadas para alimentação de métodos de detecção de danos estruturais. Entretanto, quando estes são utilizados em estruturas suscetíveis a efeitos do ambiente, como variação de temperatura, vento, radiação solar, umidade, os resultados podem ser imprecisos, por causa dos efeitos ambientais provocarem mudanças nas propriedades físicas/mecânicas e, conseqüentemente, dinâmicas (SANTANA, 2018).

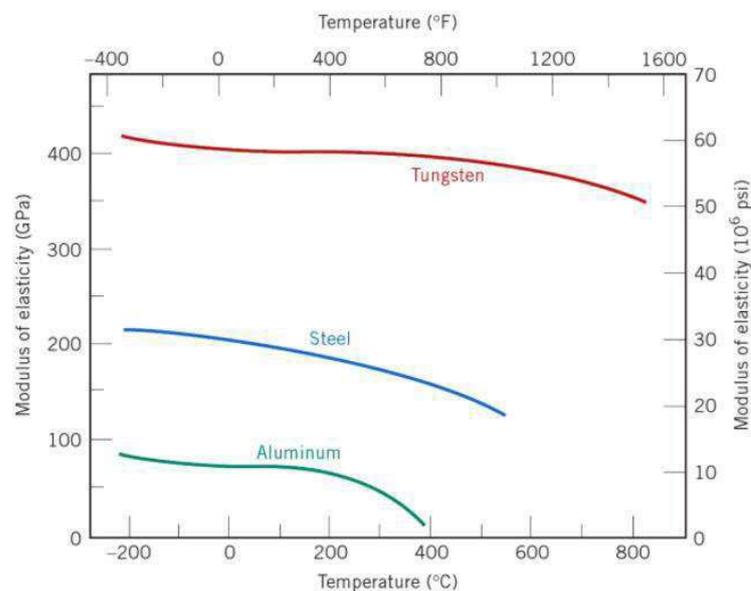
Segundo Li *et al.* (2010), a variação de temperatura é o mais significativo dos efeitos ambientais na variação das frequências modais. A correta interpretação e quantificação desta é fundamental para a implementação em métodos avaliação de danos, uma vez que, quando comparados aos efeitos da variação de temperatura, alguns danos apresentam a mesma influência nas propriedades dinâmicas, podendo sobrepô-las.

No tangente do comportamento dos materiais, a mudança de temperatura afeta diretamente o módulo de elasticidade dos mesmos. No caso de estruturas de concreto, a variação de temperatura excessiva provoca uma mudança volumétrica nestas, podendo causar tensões nos elementos que a compõem, recebendo a denominação de tensões térmicas (SANTOS, 2004). Entretanto, essas variações precisam ser extremas para que haja uma mudança significativa no módulo de elasticidade do concreto, como no caso de um incêndio, onde as temperaturas podem ultrapassar 600°C, o que não é o caso do presente estudo.

O concreto, por ser um material composto pela junção de cimento, água, agregado miúdo e graúdo, possui características determinadas pelas características dos seus componentes. Em geral, é um mau condutor de calor, e pouco se dilata/contrai com baixas variações de temperatura.

O gráfico de módulo de elasticidade x temperatura, mostrado na Figura 3, demonstra o comportamento do aço ao ser submetido à diversas temperaturas, de acordo com os parâmetros de Callister e Rethwish (2009), os quais serão utilizados neste trabalho.

Figura 3 - Influência da temperatura sobre o módulo de elasticidade, em alguns metais



Fonte: Callister e Rethwish (2009)

No presente estudo, o material da viga que terá seu módulo de elasticidade afetado pela variação da temperatura será o aço.

2.3 IDENTIFICAÇÃO DE DANOS ESTRUTURAIS

Segundo Moreira (2002), tanto atuações estáticas, como excesso de carga, quanto dinâmicas (ações do vento, circulação de pessoas, variação de temperatura, dentre outras) podem causar falhas estruturais. A identificação destas é essencial, pois podem gerar danos, desde o desconforto ao usuário, chegando ao colapso estrutural (NÓBREGA, 2004).

Uma vez que as falhas geram perda de rigidez na estrutura, a depender de sua magnitude, há modificação das características dinâmicas, as frequências naturais e modos de vibração, fato percebido por vários autores. Adams *et al.* (1978) apud Rocha (2017) verificou que, ao analisar cada modo de vibração e respectiva frequência natural, é possível localizar e quantificar o dano gerado pelas falhas.

Genovese (2005) mostrou, em seu trabalho, que o dano não é o único agente de alteração das características dinâmicas. Mudanças na temperatura podem ocasionar alterações na rigidez

e, conseqüentemente, nas frequências naturais e modos de vibração, muito maiores do que as provocadas por danos estáticos.

Outros autores, como Xu e Wu (2007) apud Esfarjani *et al.* (2017), Ralbovsky et al. (2014) apud Esfarjani *et al.* (2017), chegaram a importante conclusão de que as mudanças nas características dinâmicas da estrutura devido à danos podem ser menores que as mudanças devido às variações de temperatura. As características dinâmicas induzidas por danos podem ser completamente mascaradas pelas mudanças devido à temperatura.

2.4 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Neste trabalho optou-se por estudar uma viga de concreto armado, a qual será analisada numericamente através do software ANSYS, programa que trabalha com a Teoria de Elementos Finitos. Como os modelos numéricos têm sido cada vez mais utilizados para demonstrar o comportamento das estruturas, de forma mais representativa, o Método dos Elementos Finitos auxilia no projeto, na análise do carregamento e reações, gerando uma maior aproximação da modelagem estrutural com a modelagem numérica (CLOUGH, 1960, apud ROCHA, 2017).

Segundo Meireles (2007), o conceito básico do método se traduz na divisão de um meio contínuo em sub-regiões, elementos finitos, de geometria mais simples que a do problema original. Cada uma desta apresenta tamanho finito e um número de pontos pelos quais se estabelece o campo de deslocamentos (nós). São utilizadas funções de forma próprias para descrever os deslocamentos de cada ponto material interno em função dos deslocamentos dos nós. Um número finito de equações diferenciais de movimento é escrito para cada nó. De forma análoga, as velocidades e acelerações no interior do elemento também dependem dos valores nodais.

Em síntese, a solução utilizando o método dos Elementos Finitos é feita através da resolução do sistema de equações onde cada nó representam variáveis do sistema de equações, junto com seus respectivos graus de liberdade. Assim, o número de equações que serão resolvidas no sistema é igual à quantidade de nós cujo problema foi discretizado multiplicado pelo número de graus de liberdade de cada nó (FERREIRA, 2016).

Nesse contexto, a quantidade e a repartição desses elementos na estrutura constituem a malha de elementos finitos, a qual tem grande importância nesse estudo, por estar diretamente associada ao resultado real das estruturas. Quanto maior o número de elementos existentes na

malha, maior será o refinamento de seus resultados. O tipo e a geometria do elemento também são relevantes (FERREIRA, 2016).

2.5 FERRAMENTA COMPUTACIONAL – PROGRAMA ANSYS

A ferramenta computacional ANSYS utiliza o Método dos Elementos Finitos (MEF) para modelar numericamente problemas encontrados na engenharia, possibilitando diversos tipos de análise, utilizando as condições impostas pelo projetista. Essa ferramenta possibilita a modelagem de sistemas estruturais e problemas dinâmicos modais e transientes (ABREU, 2016).

Como cita Santos (2009), o programa ANSYS possibilita enumerar várias condições de visualizar os resultados, como visualização das condições de contorno impostas; vetores, cargas aplicadas e tensões; geração de listagens para relatórios; geração e malha automatizada e outros. Além disso, dentre os diversos tipos de análises presentes em sua biblioteca, podemos encontrar a análise estática estrutural, análise dinâmica estrutural de vibração livre (análise modal) e de vibração forçada (análise transiente).

Como já foi mencionado, neste trabalho serão utilizados os parâmetros modais da estrutura, para a detecção de seus danos. Assim, a análise que será feita no ANSYS, corresponde a análise modal, a qual consegue determinar as frequências e modos de vibração naturais da estrutura e possui característica linear, possibilitando ainda utilizar estruturas pré-tensionadas. Não linearidades são ignoradas mesmo se os parâmetros estiverem definidos (SANTOS 2009).

Densidade específica, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, dimensão da seção transversal e temperatura inicial das estruturas são os parâmetros de entrada do programa (os quais utilizaremos no estudo para a atribuição dos materiais e variação da temperatura). A partir destes, as frequências naturais e os modos de vibração de cada estrutura podem ser gerados (VAZ, 2008).

3 METODOLOGIA

O presente capítulo do Trabalho de Conclusão de Curso se atenta a descrever todas as etapas do estudo para analisar a variação das frequências naturais de uma viga de concreto armado, tendo essas organizadas em um fluxograma das principais fases de execução, representado na Figura 4.

Figura 4 – Fluxograma da Metodologia aplicada



Fonte: Autoria Própria (2019)

O software utilizado para a simulação e análise das estruturas foi o *Ansys Student* 2019.2, na plataforma *Analysis System Workbench*. O programa utiliza métodos dos Elementos Finitos, já explicado na revisão bibliográfica, e pode ser empregado em diversos problemas de engenharia.

Na análise modal, os procedimentos do ANSYS foram divididos em etapas. A modelagem do elemento foi realizada no plug-in *Modal* do software *Ansys Analysis System Workbench 19.2*, onde foram definidas as propriedades dos materiais. Optou-se por utilizar os elementos já presentes na biblioteca de materiais do software, o concreto – com densidade de (2.300 Kg/m³), módulo de Young (30.000 MPa), coeficiente de Poisson (0,18) –, e o aço estrutural – com densidade de (7.850 Kg/m³), módulo de Young (200.000 MPa), coeficiente de Poisson (0,3), como mostrado na Tabela 1. No software, os materiais se encontram à sua temperatura padrão de 22°C.

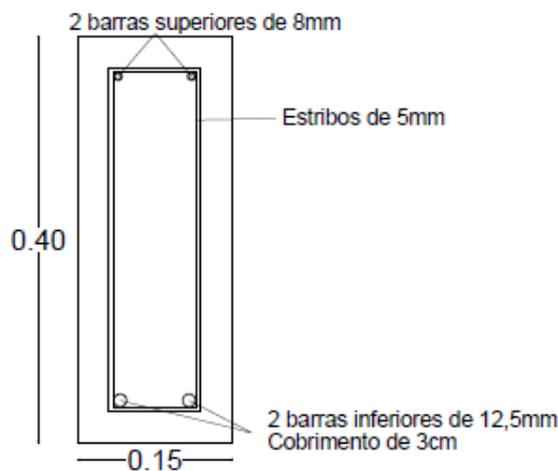
Tabela 1 - Propriedades dos materiais no Ansys

Propriedades	Concreto	Aço Estrutural
Densidade (Kg/m ³)	2.300 Kg/m ³	7.850 Kg/m ³
Módulo de Young (MPa)	30.000 MPa	200.000 MPa
Coefficiente de Poisson (ν)	0,18	0,3

Fonte: Autoria Própria (2019)

Estudou-se uma viga de concreto armado, com seção retangular de 15x40 cm, com 4,005 m de comprimento e cobrimento de 3 cm, com armadura positiva composta por 2 barras \varnothing 12,5 mm, porta estribos \varnothing 8 mm e 20 estribos \varnothing 5 mm com espaçamento de 21 cm. A condição de contorno utilizada foi engaste-livre. O modelo viga utilizado foi retirada de um projeto estrutural de uma residência unifamiliar.

Na Figura 5, pode-se observar a seção transversal da viga, e na Figura 6, detalhamento de armadura, nas suas vistas lateral e superior. A Figura 7 ilustra a condição de contorno utilizada.

Figura 5 – Seção transversal da viga

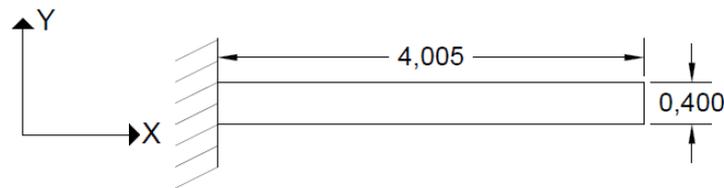
Fonte: Autoria Própria (2019)

Figura 6 – Detalhamento de armadura



Fonte: Autoria Própria (2019)

Figura 7 – Modelo de viga engaste-livre

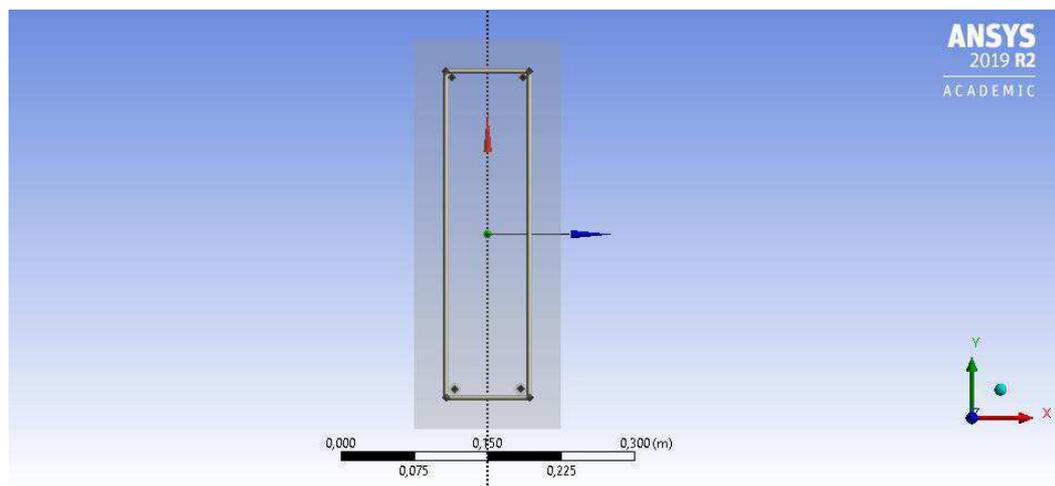


Fonte: Autoria Própria (2019)

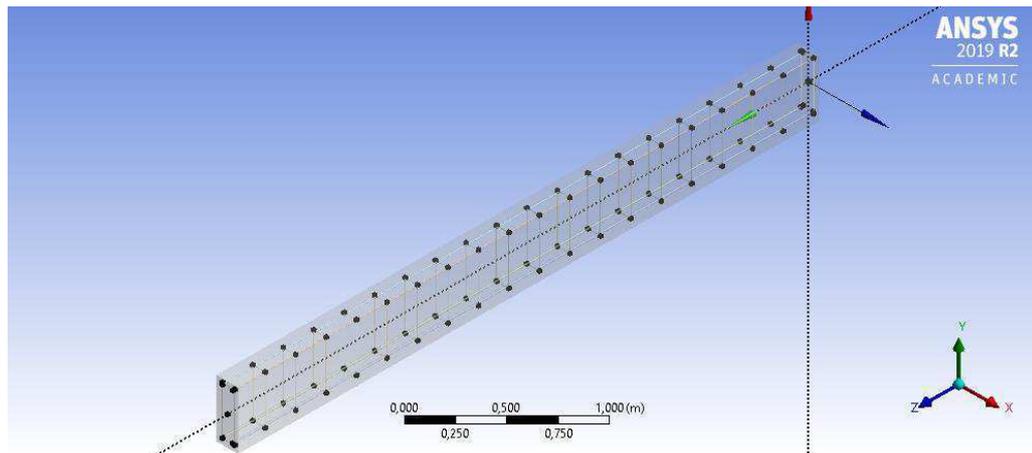
Seguiu-se, então para a modelagem da estrutura, definindo os tipos de elementos utilizados e dimensões. A elaboração da viga no software se deu na extensão *Geometry*, no *Designer Modeler*. Utilizou-se a marcação de pontos (*Point*) e linhas (*Line*) para se definir o sólido retangular, que representa a parte em concreto da viga, assim como a localização das barras de armadura e estribos. As características geométricas dos elementos foram atribuídas pela ferramenta *Cross Section*, onde se definia o tipo de seção e suas dimensões.

Nas Figuras 8 e 9, observa-se o traçado da viga no software com sua armadura, a partir da marcação dos pontos e atribuição da geometria, sendo a primeira com destaque à seção transversal, e a segunda, da viga como um todo, em sua vista isométrica.

Figura 8 – Seção transversal da viga no Ansys

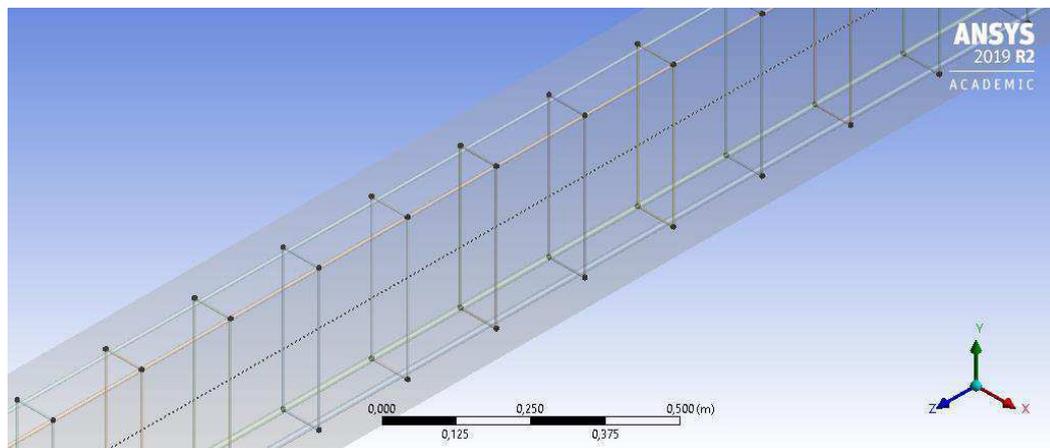


Fonte: Autoria Própria (2019)

Figura 9 – Vista isométrica da viga no Ansys

Fonte: Autoria Própria (2019)

A Figura 10 mostra um detalhe de zoom para melhor mostrar a representação das armaduras longitudinal e transversal na modelagem computacional.

Figura 10 – Detalhe de armaduras no Ansys

Fonte: Autoria Própria (2019)

O perfil da viga foi composto por elementos com área de seção transversal de $0,06 \text{ m}^2$, inércia de $8\text{E-}4 \text{ m}^4$, massa total de $566,13 \text{ kg}$ e comprimento do vão de $4,005 \text{ m}$, conforme apresentado na Tabela 2:

Tabela 2 – Propriedades físicas e geométricas da viga

Área (a) (m^2)	$0,06 \text{ m}^2$
Inércia (I) (m^4)	$8\text{E-}4 \text{ m}^4$
Massa da viga (Kg)	$566,13 \text{ kg}$
Comprimento do vão (L) (m)	$4,005 \text{ m}$

Fonte: Autoria Própria, 2019

Logo após, na plataforma *Model*, atribui-se o material para cada seção, assim como adicionou-se o apoio engastado à viga, aplicando sua condição de contorno. Em seguida, determinou-se o tamanho da malha em 0,1 metro, para um maior refinamento, com resultados mais precisos.

Para o caso de estruturas analisadas compostas por diferentes materiais, como a viga de concreto armado, o software Ansys necessita de um comando específico para a união dos materiais, de forma que sejam analisados como um todo. Para tanto, ainda na plataforma *Model*, atribuiu-se o *Manual Contact* entre a linha que determinava a seção de concreto da viga e as linhas das armaduras e estribos.

Em seguida, realizou-se a análise modal, para se obter as propriedades dinâmicas, frequências naturais e modos de vibração da viga estudada, aplicando-se depois diferentes temperaturas a fim de observar as mudanças de comportamento nas propriedades dinâmicas.

Realizada as análises modais da estrutura, iniciou-se a última etapa, na qual observou-se os resultados obtidos pelo programa ANSYS, comparando-os com as análises analíticas feitas por fórmulas de cálculos fornecidas na literatura, mostradas no item 2.1.3. Procurou-se obter os dados das mudanças das frequências naturais devido à variação da temperatura, tema de estudo do presente trabalho. Fez-se, também, uma comparação com os resultados obtidos por Miranda (2019), que analisou a interferência da temperatura nos métodos de detecção de danos baseados nas propriedades dinâmicas de vigas metálicas.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 FREQUÊNCIAS NATURAIS DAS VIGAS OBTIDAS ATRAVÉS DO ANSYS

A partir da viga modelada na condição de contorno engaste-livre, utilizando a temperatura padrão do software Ansys, de 22°C, obteve-se suas frequências naturais e respectivos modos de vibração. A Tabela 3 apresenta os resultados encontrados das frequências naturais, cujos modos de vibração estão mostrados nas Figuras 11, 12, 13 e 14.

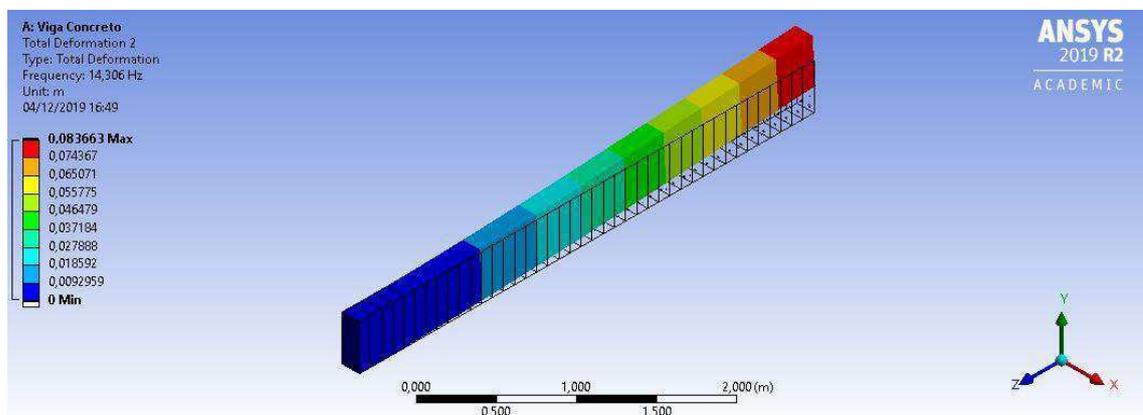
Tabela 3 – Frequências naturais da viga obtidas no software Ansys

Viga Engaste-Livre	
Modo	Frequência (Hz)
1°	14,306
2°	85,879
3°	226,84
4°	413,49

Fonte: Autoria Própria (2019)

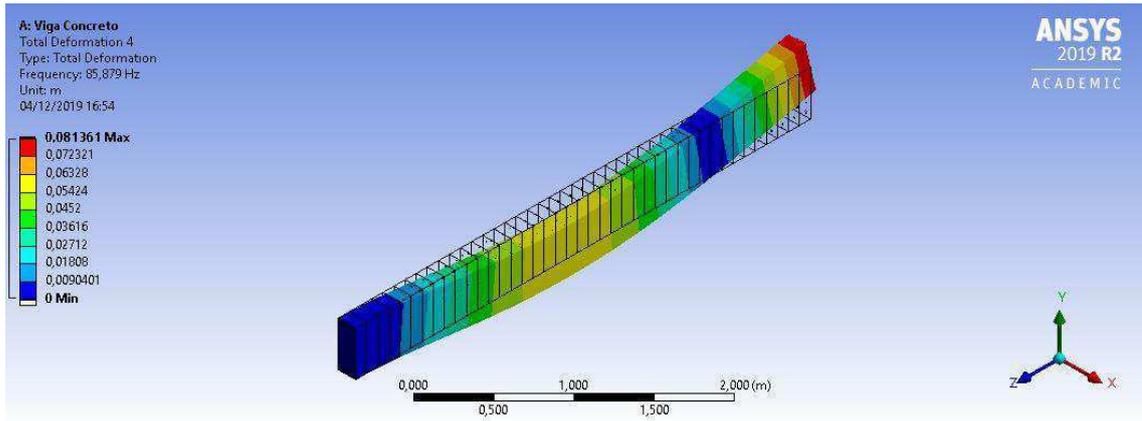
Pode-se observar o aumento das frequências ao longo dos modos de vibração. Têm-se que este último se refere à forma como a estrutura vai vibrar. Observa-se, na Figura 11, apenas a formação de uma onda, que define o primeiro modo. As Figuras 12, 13 e 14 mostram, respectivamente, 2 ondas (2° modo), 3 (3° modo) e 4 (4° modo).

Figura 11 – 1° modo de vibração



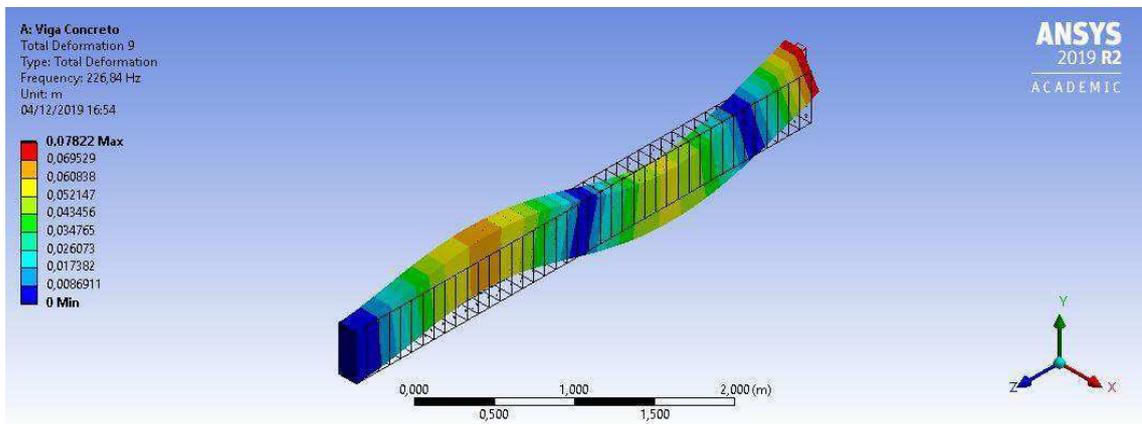
Fonte: Autoria Própria

Figura 12 – 2º modo de vibração



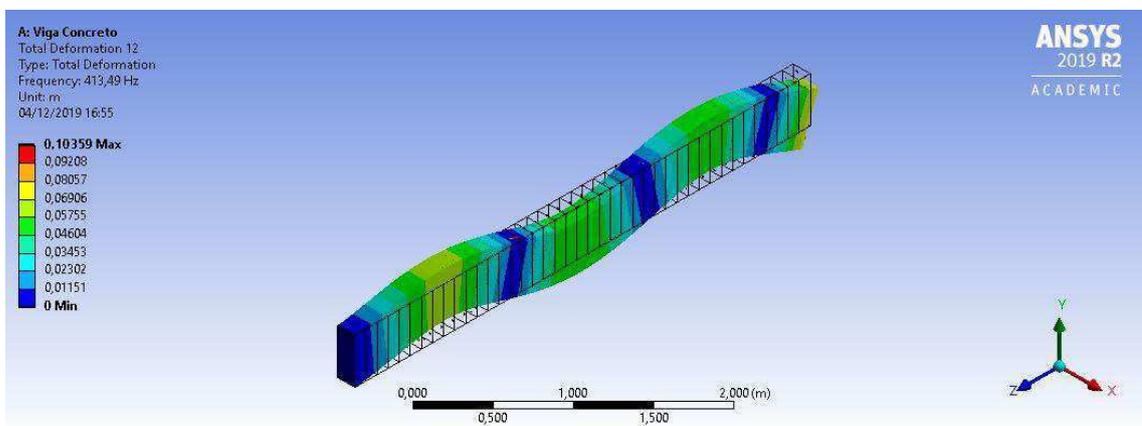
Fonte: Autoria Própria

Figura 13 – 3º modo de vibração



Fonte: Autoria Própria

Figura 14 – 4º modo de vibração



Fonte: Autoria Própria

4.2 FREQUÊNCIAS OBTIDAS ANALITICAMENTE

A partir da formulação de Paz (1992), demonstrada pela equação 2.7, juntamente com as informações mostradas na Figura 2, foi possível calcular analiticamente as frequências naturais para cada modo de vibração da viga na condição de contorno engaste-livre. Com os resultados analíticos, fez-se a comparação dos resultados obtidos no *Ansys*, calculando, após, o erro percentual, como mostrado na Tabela 4 a seguir.

Tabela 4 – Comparativo entre frequências numéricas e analíticas

Engaste - Livre				
Modo	Cn	Frequência (Hz) Resultado analítico	Frequência (Hz) Resultado Ansys	Erro (%)
1°	3,516	14,40212405	14,306	0,667429658
2°	22,0345	90,25699725	85,879	4,850590403
3°	61,6972	252,72205	226,84	10,24131056
4°	120,0902	491,9095442	413,49	15,9418627

Fonte: Autoria Própria (2019)

Ao se comparar as frequências obtidas pelo método analítico com as obtidas pelo software, percebe-se que, de início, os resultados para o primeiro modo de vibração se aproximaram, com erro próximo a 0,67%. O maior erro foi de 15,94%, no 4° modo. O modelo pode ser considerado representativo, mas com ressalva.

O modelo analítico proposto por Paz (1992) leva em consideração o módulo de Young, o módulo de elasticidade, de apenas um material. Vigas de concreto armado são compostas pela junção de dois materiais, o concreto e o aço. Como a porcentagem de concreto na viga é muito superior à de aço, utilizamos o módulo de elasticidade do primeiro para efeitos de simplificação de cálculo. O software *Ansys* considera ambos os materiais na sua análise, fato que contribui para certa parcela de diferença entre os resultados.

4.3 ANÁLISE DAS FREQUÊNCIAS DAS VIGAS EM DIFERENTES TEMPERATURAS

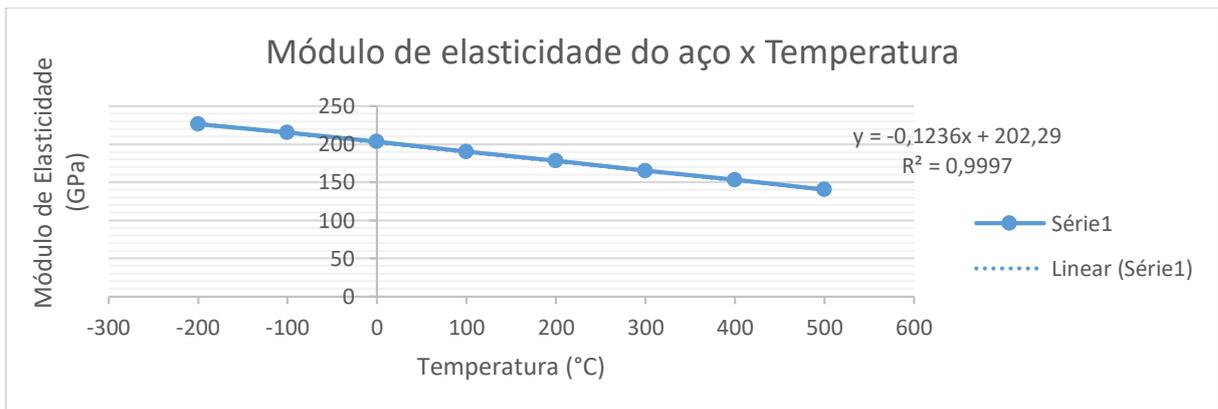
Após a obtenção das frequências naturais da viga sem danos, testou-se 6 tipos de temperatura, variando-a entre -30 e 50°C, tendo como temperatura de referência a inicial padrão do software, de 22°C. Como o programa *Ansys* não permite edição direta da temperatura, está é realizada indiretamente pela modificação do Módulo de Elasticidade, devido à relação entre ambos.

Como citado no t3pico 2.2, o m3dulo de elasticidade do concreto n3o 3e considerado variante 3a faixa de varia33o de temperatura do presente estudo. Ent3o, utilizou-se a varia33o apenas no m3dulo de elasticidade da armadura presente na viga. Com isso, objetivou-se distinguir o comportamento num3rico da viga sob influ3ncia de diversas temperaturas, com a obten33o das frequ3ncias naturais e modos de vibra33o.

4.3.1 M3dulo de Elasticidade

O programa *Ansys* n3o permite a edi33o direta da temperatura. A modifica33o desta propriedade no software 3e feita atrav3s do m3dulo de elasticidade, utilizado como par3metro de entrada, o qual 3e inversamente influenciado pela temperatura, de acordo com os par3metros propostos por Callister e Rethwish (2009), conforme a Figura 3, do item 2.2. Como estes n3o possu3am uma f3rmula para c3lculo dos m3dulos de elasticidade, fez-se a transfer3ncia dos dados da Figura 3 para um gr3fico no Excel, a fim de se aplicar uma linha de tend3ncia e obter a equa33o, conforme o Gr3fico 1.

Gr3fico 1 - Linha de tend3ncia do gr3fico de Callister e Rethwish



Fonte: Autoria Pr3pria (2019)

A temperatura padr3o do software, de 223C, tem como m3dulo de elasticidade padr3o do material no programa 2,0000E+11 Pa. Os m3dulos de elasticidade utilizados est3o organizados na Tabela 5 a seguir.

Tabela 5 - Varia33o do m3dulo de elasticidade segundo a temperatura

Temperatura (3C)	M3dulo de elasticidade (Pa)
-303C	2,05998E+11
-103C	2,03526E+11

15°C	2,0436E+11
22°C	2,0000E+11
25°C	1,992E+11
40°C	1,9735E+11
50°C	1,9611E+11

Fonte: Autoria Própria (2019)

Observando os valores obtidos, percebe-se que, à medida que há aumento de temperatura, o valor do Módulo de Elasticidade diminui. Este fato reflete na rigidez da peça, uma vez que, a rigidez e o módulo de elasticidade do material estão intrinsecamente ligados, mantendo uma relação de proporcionalidade. Para o caso analisado, observou-se a tendência de que quanto menor a rigidez de um material, menor foi seu módulo de elasticidade. Logo se pode fazer a inferência de que, à medida que a temperatura aumenta, a rigidez dos modelos tende a diminuir, ou seja, há uma relação inversamente proporcional.

4.3.2 Variação das Frequências

A partir dos valores do Módulo de Elasticidade pode-se gerar os resultados de frequência naturais e modos de vibração para cada temperatura, organizados na Tabela 6. A temperatura de 22°C foi utilizada como referência.

Tabela 6 – Variação das frequências da viga com diferentes temperaturas

Engaste - Livre							
Frequência (Hz)	Temperatura (°C)						
	-30°C	-10°C	15°	22°C	25°C	40°	50°C
1°	14,307	14,306	14,306	14,306	14,305	14,305	14,305
2°	85,88	85,879	85,879	85,879	85,878	85,878	85,878
3°	226,84	226,84	226,84	226,84	226,84	226,84	226,84
4°	413,5	413,5	413,5	413,49	413,49	413,49	413,49

Fonte: Autoria Própria (2019)

Analisando a Tabela 6, percebe-se que, comparando à temperatura padrão do programa, uma redução na temperatura refletiu em tendência de aumento dos valores das frequências naturais para o modelo estudado, enquanto o inverso também se verifica, o aumento da temperatura levou à diminuição das frequências. Este fato se relaciona e se explica com o que foi discutido no item 4.3.1, sobre a temperatura e a rigidez de um material possuem relação inversamente proporcional. Como a frequência natural é fator diretamente proporcional a

rigidez da peça, logo, a temperatura também mantém uma relação inversa com a frequência, como notado nos dados apresentados na Tabela 6.

A Tabela 7 mostra uma comparação percentual das frequências obtidas nas temperaturas de -30°C, -10°C, 15°C, 25°C, 40°C e 50°C com a temperatura padrão do software, de 22°C, utilizada como referência.

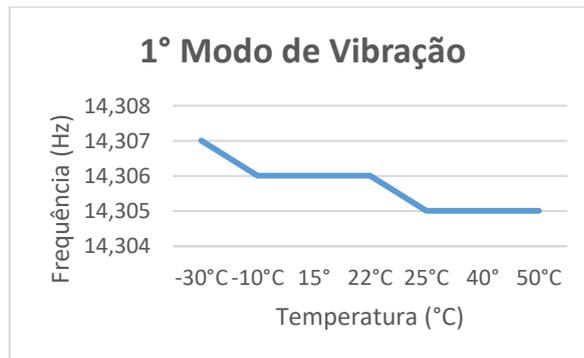
Tabela 7 – Comparação percentual da variação das frequências

Temperatura		-30°	-10°	15°	22°	25°	40°	50°
Percentual de variação por modo (%)	1°	0,00699	0	0	0	-0,00699	-0,00699	-0,00699
	2°	0,00116	0	0	0	-0,00116	-0,00116	-0,00116
	3°	0	0	0	0	0	0	0
	4°	0,00242	0,00242	0,0024184	0	0	0	0

Fonte: Autoria Própria (2019)

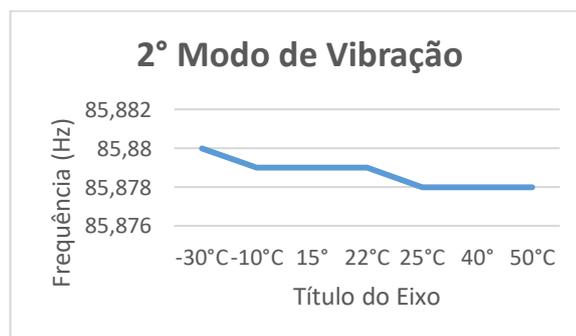
Com esses dados, gerou-se quatro gráficos (Gráficos 2, 3, 4 e 5) das frequências naturais em função da variação da temperatura, cada um referente a um modo de vibração, onde se faz possível observar o comportamento destes parâmetros.

Gráfico 2 – Variação da frequência natural no 1° modo de vibração

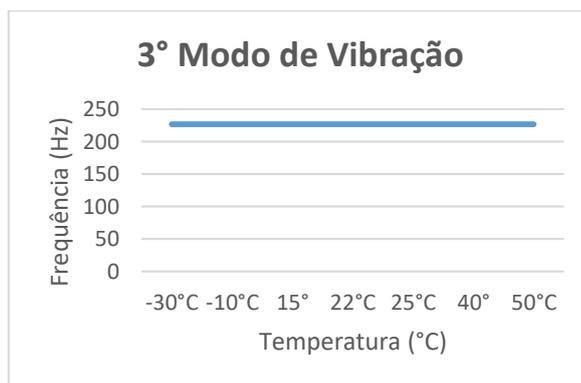


Fonte: Autoria Própria (2019)

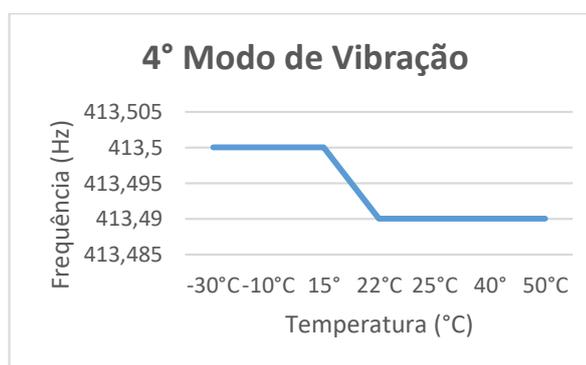
Gráfico 3 – Variação da frequência natural no 2° modo de vibração



Fonte: Autoria Própria (2019)

Gráfico 4 – Variação da frequência natural no 3º modo de vibração

Fonte: Autoria Própria (2019)

Gráfico 5 – Variação da frequência natural no 4º modo de vibração

Fonte: Autoria Própria (2019)

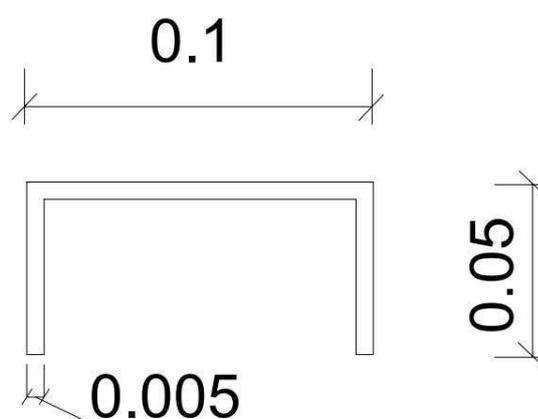
Analisando as Tabelas 6 e 7, e os Gráficos 1, 2, 3 e 4, anteriormente mostrados, percebe-se, como já era esperado desde o cálculo dos módulos de elasticidade no item 4.3.1, a variação, mesmo que pequena, das frequências naturais com a temperatura. Como já comentado, a variação da frequência com a temperatura se deve a modificação da rigidez do elemento. Nota-se que, para o caso estudado, há uma tendência de relação inversamente proporcional entre as frequências e a variação de temperatura: à medida que a temperatura aumenta, a frequência tende a diminuir.

Um fato que explica a pequena variação percentual nas frequências se explica pelo fato de que foi modificada apenas o módulo de elasticidade do aço, por conta de o concreto ser pouco sensível a esta variação. Em vigas de concreto armado, a taxa de armadura geralmente é bem baixa em relação a seção da viga, que é preenchida com o concreto. Assim sendo, também já se era esperado pequenos resultados de variação de frequência. Apesar disso, esses números pequenos podem vir a camuflar danos estruturais, a depender do modelo de detecção de danos utilizado.

4.3 COMPARAÇÃO COM OUTROS ESTUDOS

Embora o estudo da Dinâmica Estrutural seja relativamente novo no Brasil, diversas pesquisas sobre as propriedades dinâmicas das estruturas já foram realizadas, assim como sobre os fatores que influenciam nestas. Miranda (2019), em seu estudo sobre a influência da temperatura na localização de danos estruturais através do Método do Erro Residual, utilizou uma viga de perfil metálico, com 7 m de comprimento, cuja seção transversal está representada na Figura 15. A pesquisa se desenvolveu com a viga na condição engaste-livre, mesma condição utilizada na viga do presente trabalho, com a análise de um modelo intacto e dois outros apresentando danos estruturais em diferentes locais. A autora utilizou os softwares Ansys e Matlab.

Figura 15 – Seção transversal do perfil metálico utilizado por Miranda



Fonte: MIRANDA (2019)

Da viga intacta analisada por Miranda (2019), temos os percentuais da variação das frequências conforme a aplicação de diferentes temperaturas pela autora, listados na Tabela 8.

Tabela 8 - 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%

Fonte: Adaptado de Miranda (2019)

Observando os resultados obtidos pela autora em seu estudo utilizando perfis metálicos, percebe-se que, ao compará-los com os obtidos no presente estudo com a viga de concreto

armado (Tabela 7), os primeiros foram mais expressivos. Enquanto no concreto armado os percentuais de variação da frequência com a temperatura não ultrapassaram a ordem de 0,007%, no perfil metálico chegou-se a uma variação de 0,791%.

Essa expressiva diferença se deve, primordialmente, à diferença dos materiais utilizados nas vigas. O aço é muito mais sensível à temperatura. Como já explicado, a variação do módulo de elasticidade na viga de concreto armado do presente trabalho se deu apenas no aço da armadura, que, em relação a viga como todo, possui baixa porcentagem em volume e massa. A viga utilizada por Miranda (2019) foi um perfil metálico de, o que proporciona um valor deveras mais expressivo.

Outro fato ao qual vale a pena se atentar a partir desta comparação entre trabalhos é que, para utilização de métodos de detecção de danos em estruturas deve-se ter muito mais cuidado com estruturas metálicas, por suas frequências serem muito mais sensíveis ao efeito da temperatura, podendo mascarar danos estruturais. Para as estruturas de concreto armado, os efeitos são muito menos expressivos, como foi mostrado no presente trabalho.

Entretanto, a depender do tipo de análise e método a ser utilizado, deve-se levar em conta possíveis alterações na detecção de danos devido a influência da temperatura, pois haverá modificações nas frequências de vibração, como mostrado no presente trabalho. A viga utilizada possui baixa taxa de armadura por ser simples, com uso em uma residência. Outras estruturas de concreto armado podem apresentar densidades de armadura muito maiores, o que pode torná-las mais sensíveis à influência da temperatura nas propriedades modais, fato esse que reforça a importância em não desconsiderar tema do presente estudo.

5 CONCLUSÃO

A partir do estudo proposto, o qual levou em consideração desde a influência do módulo de elasticidade dos materiais nas características modais de uma estrutura até a comparação de resultados obtidos em estudos semelhantes com perfis de outros materiais, podem-se fazer as seguintes conclusões:

A modelagem computacional é uma ferramenta deveras útil para se obter os mais variáveis parâmetros, a qual possibilitou a análise das frequências naturais e dos modos de vibração da viga de concreto armado em estudo, proporcionando a comparação com métodos analíticos propostos pela literatura. A diferença entre o método analítico e o computacional foi influenciada pelas simplificações de cálculo na consideração do módulo de elasticidade dos materiais.

Para a aplicação da variação da temperatura foi necessária a realização dos cálculos dos módulos de elasticidade, a partir do qual já podíamos perceber a influência da temperatura nas propriedades modais. Com o aumento da temperatura, os valores do módulo de elasticidade tendiam a diminuir para o modelo estudado. As frequências de uma estrutura estão intrinsecamente relacionadas à rigidez, a qual depende do módulo de elasticidade.

Logo, ao proceder com a variação da temperatura na modelagem computacional, mostrou-se que a temperatura altera, mesmo que minimamente, os valores das frequências naturais da viga de concreto armado. Estabeleceu-se a relação de que, à medida que a temperatura aumenta, a rigidez da peça estudada tendeu a diminuir, diminuindo, também, a frequência natural. Da mesma forma, a redução da temperatura tende a resultar no aumento da rigidez e dos valores das frequências para o modelo de viga estudado, na condição de contorno engaste-livre.

Ao se comparar os resultados obtidos da variação percentual das frequências da viga de concreto armado com os de outros trabalhos sobre uma viga de perfil de aço com as mesmas condições de apoio, observa-se que os primeiros são bem menos expressivos. Fato este se deve à consideração do módulo de elasticidade do concreto ser pouco sensível à variação da temperatura, utilizando-se apenas a variação do módulo no aço da armadura. Como a taxa de armadura em relação a viga como um todo é baixíssima, já era de se esperar resultados bem pequenos.

Entretanto, a consideração da influência da temperatura em estruturas de concreto armado não pode ser descartada, pois há, sim, presença de alterações. Em estruturas de grande porte, com maior densidade de armadura, possa ser que haja valores mais expressivos à variação da temperatura na modificação das suas frequências naturais e modos de vibração, o que pode vir a mascarar métodos de detecção de danos baseados nas propriedades dinâmicas das estruturas.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar a influência da temperatura em vigas de concreto armado com outras condições de contorno;
- Estudar a influência da temperatura em vigas de concreto armado com maior densidade de armadura, para observar se há maior variação nas frequências;
- Estudar a influência da temperatura em estruturas de concreto armado mais complexas, como pórticos.

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.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento, Rio de Janeiro, 2014.
- ALMEIDA, S.F. (2005). **Análise experimental da rigidez de elementos de concreto submetidos à danificação progressiva até a ruptura**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.
- ARAGÃO FILHO, L. A. C. M. de. **Curso de Dinâmica das Estruturas – Notas de aula**. IME – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <<http://www.ime.eb.br/~moniz/dina2010.htm>>. Acesso em maio de 2019.
- CALLISTER, W. D., & RETHWISCH, D. G. (2009). **Materials Science and Engineering: An Introduction** (8 ed.). Wiley. doi:9780470941669
- CARDOSO, R. A., CURY, A., & BARBOSA, F. (2017). **A clustering-based strategy for automated structural modal identification**. Structural Health Monitoring.
- ESFARJANI, S. M.; SALEHI, M.; GHASSEMI, A. (2017) **Effect of the multiple damages and temperature chances on the natural frequency**. Journal of Theoretical and Applied Mechanics 55, 3, pp. 813-822, Warsaw 2017 DOI: 10.1532/jtam-pl.55.3.813. Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran, 2017.
- FERREIRA, B. M. (2016). **Estudo do Efeito do Carregamento de Pulso em Viga** – Monografia apresentada no Trabalho de Conclusão de Curso 2 do Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás.
- GENOVESE, M (2005). **Avaliação Estrutural: Influência do Ruído nos Métodos de Detecção de Danos Baseados na Análise das Propriedades Dinâmicas**, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil, 2005.

LI, H.; LI, S.; OU, J.; LI, H. Modal identification of bridges under varying environmental conditions: temperature and wind effects. **Structural Control and Health Monitoring**, v. 17, n. 5, p. 495–512, 2010.

LIMA, S. S.; SANTOS, S. H. C. **Análise Dinâmica das Estruturas**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda., 2008.

MARCY M., C. A. (2017). **Metodologia Baseada Em Redes Neurais Artificiais para a Detecção de Danos Estruturais**. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 203p.

MEIRELES, J. F. B. de. (2007). **Análise dinâmica de estruturas por modelos de elementos finitos identificados experimentalmente**. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica – Área de Mecânica dos Materiais. Universidade do Minho, Guimarães, 2007.

MIRANDA, B. M. de. (2019). **Influência da temperatura na localização de danos estruturais via método do erro residual**. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, CTRN, 2019.

MOREIRA, T. V. (2002). **Análise da sensibilidade dinâmica de edifícios com estruturas esbeltas**. Tese (Doutorado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

NÓBREGA, P.G.B (2004). **Análise dinâmica de concreto: estudo experimental e numérico das condições de contorno de estruturas pré-moldadas**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

PAZ, M. (1992). **Dinámica Estructural, Teoría y Cálculo, tercera edición**. Editorial Reverté S.A., 1992.

RAO, S. S. **Vibrações Mecânicas**. 4. Ed. São Paulo: Pearson Prentice-Hall, 2008.

ROCHA, R. de M. (2017). **Estudo da influência da temperatura nas propriedades dinâmicas de vigas metálicas**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil – Instituto de Educação Superior de Brasília., Brasília, 2017.

SANTANA, V. M. (2018). **Avaliação de danos estruturais em vigas considerando a influência da temperatura via Redes Neurais Artificiais**. Dissertação de Mestrado em

Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-21A/18, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 116p.

SANTOS, I. C. (2009). **Atualização do modelo numérico em elementos finitos de uma passarela de pedestres com base em dados experimentais.** Dissertação de Mestrado, Publicação E.DM 010A/ 09, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 136p.

SANTOS, S. B (2004). **Uma Contribuição ao Estudo do Comportamento Termomecânico de Estruturas Maciças de Concreto. Modelagem Viscoelástica Linear e Aplicações.** 287 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória.

SERWAY, R. A; JEWETT JR., J. W. **Princípios de física: oscilações, ondas e termodinâmica.** São Paulo: Thomson Learning Edições, 2014.

SILVA, M. de S. P. (2012). **Determinação da frequência natural de eixos utilizando o software Excel** - Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá.

VAZ, J. D. C. (2008), **Análise do Comportamento Dinâmico de uma Viga de Euler-Bernoulli Escalonada com Apoios Elasticamente Variáveis,** Itajubá, 113p. Dissertação (Mestrado em Projeto e Fabricação), Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.