



PROJETO DE GRADUAÇÃO

**FABRICAÇÃO E ANÁLISE MODAL DE VIGAS
HÍBRIDAS COMPÓSITAS**

Por,
Guilherme Vaz Ferreira

Brasília, 30 de Março de 2012

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**FABRICAÇÃO E ANÁLISE MODAL DE VIGAS
HÍBRIDAS COMPÓSITAS**

POR,

Guilherme Vaz Ferreira

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico.

Banca Examinadora

Prof. Flaminio Levy Neto, UnB/ENM (Orientador)

Prof. Jorge Luiz de Almeida Ferreira, UnB/ENM

Prof. Éder Lima de Albuquerque, UnB/ENM

Brasília, 30 de Março de 2012

RESUMO

O presente relatório apresenta a fabricação, caracterização mecânica e análises modais numéricas de vigas híbridas compósitas reforçadas com filamentos de Ni-Ti. A utilização de tais vigas em controle de vibração, através da alteração de sua rigidez mediante o controle da temperatura dos filamentos de liga SMA, representa um grande avanço na área de materiais de construção mecânica e também de vibrações mecânicas. Os módulos de elasticidades foram obtidos analiticamente e experimentalmente. Os modos de vibração e suas respectivas frequências foram obtidos analiticamente e numericamente. Uma análise de sensibilidade foi feita para avaliar os parâmetros principais. A fração volumétrica de vazios de algumas amostras foi determinada. A maior diferença percentual na frequência natural encontrada entre as fases austenítica e martensítica, usando o módulo de elasticidade experimental, foi de 5,62 % para os três primeiros modos de vibração.

Palavras-chave: vigas SMAHC, fabricação, caracterização mecânica, análises modais, simulações numéricas, fração volumétrica de vazios

ABSTRACT

The present report presents the fabrication, mechanical characterization and numerical modal analysis of hybrid composite beams reinforced with Ni-Ti filaments. The use of such beams in vibration control, by changing its stiffness by controlling the temperature of the alloy SMA filaments, represents a great advance in the field of mechanical building materials and also mechanical vibration. Modulus of elasticity were obtained analytically and experimentally. The vibration modes and their frequencies were obtained analytically and numerically. A sensitivity analysis was done to evaluate main parameters. The void volume percent of some samples was determined. The largest percentage difference found between the natural frequency of the austenitic and martensitic phases using the experimental elastic modulus was 5,62 % for the first three vibration modes.

Keywords: SMAHC beams, fabrication, mechanical characterization, modal analyses, numerical simulations, void volume percent

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 ASPECTOS GERAIS	1
1.2 ESTADO DA ARTE	2
1.3 OBJETIVOS	5
2 MATERIAIS E MÉTODOS	6
2.1 MATERIAIS	6
2.1.1 Resinas Epóxi e Endurecedores	6
2.1.2 Fibras de Vidro-E	7
2.1.3 Fios de Ni-Ti	7
2.2 MÉTODOS	8
2.2.1 Processo de Fabricação	9
2.2.2 Ensaios de Flexão em Três Pontos	10
2.2.3 Simulações Numéricas Computacionais	10
2.2.4 Determinação da Fração Volumétrica de Vazios	10
3 MODELAGEM	13
3.1 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS VIGAS CONSTRUÍDAS	13
3.1.1 Cálculo Analítico das Vigas Híbridas	13
3.1.1.1 Análise das Lâminas Reforçadas com Mantas de Vidro-E picadas e Epóxi	13
3.1.1.2 Análise das Lâminas Reforçadas com Fios de SMA, Roving e Epóxi	14
3.1.1.3 Micromecânica da Viga Simétrica	16
3.1.1.4 Macromecânica da Viga Simétrica em Flexão	16
3.1.2 CÁLCULO ACERCA DO ENSAIO DE FLEXÃO	16
3.2 ANÁLISE MODAL	17
3.2.1 Valores Analíticos para as Freqüências Naturais	17
3.2.2 Modelagem Utilizada nas Simulações Numéricas	18
3.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	23
3.3.1 Parâmetros e Descrição dos Modelos	23
3.4 DETERMINAÇÃO DE VAZIOS	24
3.4.1 Formulação Necessária para Determinação de Vazios	24
4 RESULTADOS	26
4.1 PROPRIEDADES GERAIS DAS VIGAS	26
4.2 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS VIGAS SMAHC	27
4.2.1 Resultados Analíticos	27
4.2.2 Resultados Obtidos do Ensaio de Flexão das Vigas	28
4.2.3 Comparação Entre os Resultados Analíticos e Experimentais	29
4.3 ANÁLISE MODAL	29
4.3.1 Resultados Analíticos	29
4.3.2 Resultados Obtidos com as Simulações Numéricas	31
4.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	40
4.4.1 Resultados do Estudo Teórico	40
4.5 FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE VAZIOS	47
4.5.1 Amostras	47
5 CONCLUSÃO	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
ANEXOS	54

LISTA DE FIGURAS

1.1	Material compósito e fios de SMA embebidos (Aboudi, 1996)	2
2.1	Módulo de elasticidade versus Temperatura (Turner, 2001)	8
2.2	Bancada de fabricação das vigas híbridas simétricas (Silva, 2009)	9
2.3	Seção transversal da viga híbrida simétrica com suas 19 lâminas (Silva, 2009)	9
2.4	Ensaio de flexão de uma viga produzida	10
2.5	Balança Shimadzu modelo AUY 220	10
2.6	Máquina de corte de precisão Struers modelo Secotom-15.....	11
2.7	Aparato para medir a massa aparente das amostras	11
2.8	Cadinhos cerâmicos dentro de uma bandeja cerâmica	12
2.9	Forno elétrico da Linn Elektro Therm	12
3.1	Representação esquemática de uma curva ForçaFlexão.....	17
3.2	Elemento BEAM189.....	19
3.3	Malha de uma viga simulada com elemento BEAM189	19
3.4	Elemento SHELL281	20
3.5	Malha de uma viga simulada com elemento SHELL281	20
3.6	Elemento SOLID186.....	21
3.7	Malha de uma viga simulada com elemento SOLID186	21
3.8	1º modo de vibração transversal de uma viga simulada.....	22
3.9	2º modo de vibração transversal de uma viga simulada.....	22
3.10	3º modo de vibração transversal de uma viga simulada.....	23
4.1	Frequências naturais analíticas com módulo efetivo	30
4.2	Diferença percentual entre as fases dos modos de vibração com módulo efetivo...	30
4.3	Frequências naturais analíticas com módulo de elasticidade experimental.....	31
4.4	Diferença percentual entre as fases de cada modo de vibração com módulo de elasticidade experimental	31
4.5	Diferença percentual entre os resultados da simulação com elemento BEAM189 com módulo efetivo e os resultados analíticos.....	32
4.6	Diferença percentual entre a simulação com elemento SHELL281 com módulo efetivo e os resultados analíticos	32
4.7	Diferença percentual entre a simulação com SOLID186 com módulo efetivo e os resultados analíticos	33
4.8	Diferença percentual entre a simulação com elemento BEAM189 com módulo de elasticidade experimental e os resultados analíticos	35
4.9	Diferença percentual entre a simulação com SHELL281 com módulo de elasticidade experimental e os resultados analíticos	35
4.10	Diferença percentual entre a simulação com elemento SOLID186 com módulo de elasticidade experimental e os resultados analíticos	36
4.11	Variação da simulação da viga isotrópica em relação ao resultado padrão nas duas fases.....	38
4.12	Variação da simulação da viga com $E_{LamMantaEpóxi} = E_{LamFios} = E_F$ e densidades próprias em relação a viga isotrópica com densidade uniforme nas duas fases do fio.....	39
4.13	Variação da simulação da viga com $E_{LamMantaEpóxi} = E_{LamFios} = E_F$ e densidades próprias em relação a simulação padrão nas duas fase	39
4.14	Variação das frequências naturais entre fases pela $V_{FibrasLamMantaEpóxi}$ com $V_{FibrasLamFio} = 0$	40
4.15	Variação dos módulos efetivos entre fases pela $V_{FibrasLamMantaEpóxi}$ com $V_{FibrasLamFio} = 0$	40
4.16	Variação das frequências naturais entre fases pela $V_{FibrasLamMantaEpóxi}$ com $V_{FibrasLamFio} = 0,15$	41
4.17	Variação dos módulos efetivos entre fases pela $V_{FibrasLamMantaEpóxi}$ com $V_{FibrasLamFio} = 0,15$	41

4.18 Variação das frequências naturais entre fases pela $V_{\text{FibrasLamMantaEpóxi}}$ com $V_{\text{FibrasLamFio}}=0,3$	42
4.19 Variação dos módulos efetivos entre fases pela $V_{\text{FibrasLamMantaEpóxi}}$ com $V_{\text{FibrasLamFio}}=0,3$	42
4.20 Frequência natural fundamental pelo número de fios para $V_{\text{FibrasLamMantaEpóxi}}=0$ e $V_{\text{FibrasLamFio}}=0$	43
4.21 Módulo efetivo pelo número de fios para $V_{\text{FibrasLamMantaEpóxi}}=0$ e $V_{\text{FibrasLamFio}}=0$	44
4.22 Frequência natural fundamental pelo número de fios para $V_{\text{FibrasLamMantaEpóxi}}=0,5$ e $V_{\text{FibrasLamFio}}=0,3$	44
4.23 Módulo efetivo pelo número de fios para $V_{\text{FibrasLamMantaEpóxi}}=0,5$ e $V_{\text{FibrasLamFio}}=0,3$	45
4.24 Variação das frequências naturais entre fases pelo número de fios com $V_{\text{FibrasLamMantaEpóxi}}=0$ e $V_{\text{FibrasLamFio}}=0$ para diâmetros de fio selecionados	45
4.25 Variação do módulo efetivo entre fases pelo número de fios com $V_{\text{FibrasLamMantaEpóxi}}=0$ e $V_{\text{FibrasLamFio}}=0$ para diâmetros de fio selecionados	46
4.26 Variação das frequências naturais entre fases pelo número de fios com $V_{\text{FibrasLamMantaEpóxi}}=0,5$ e $V_{\text{FibrasLamFio}}=0,3$ para diâmetros de fio selecionados.....	46
4.27 Variação do módulo efetivo entre fases pelo número de fios com $V_{\text{FibrasLamMantaEpóxi}}=0,5$ e $V_{\text{FibrasLamFio}}=0,3$ para diâmetros de fio selecionados.....	47

LISTA DE TABELAS

3.1	Valores de β_{nl} para a condição livre-livre	18
3.1	Dimensões da viga nas análises de sensibilidade	24
4.1	Identificação das vigas	26
4.2	Dados médios das vigas	26
4.3	Propriedades das lâminas compostas por manta de vidro-E e epóxi das vigas	27
4.4	Propriedades das lâminas compostas por fios de SMA, roving e epóxi das vigas....	27
4.5	Propriedades das vigas híbridas simétricas.....	28
4.6	Módulos de elasticidade experimentais e diferenças percentuais	28
4.7	Comparação entre os módulos efetivos e de elasticidade experimentais	29
4.8	Diferenças percentuais entre as simulações e os resultados analíticos com módulo efetivo	34
4.9	Diferenças percentuais entre as simulações e os resultados analíticos com módulo de elasticidade experimental	37
4.10	Identificação das vigas utilizadas na determinação de vazios.....	48
4.11	Resultados obtidos na determinação de vazios	48

LISTA DE SÍMBOLOS

A_f	Temperatura final da transformação austenítica
ASTM	American Society for Testing and Materials
b	Largura
E	Módulo de elasticidade
E_F	Módulo de elasticidade efetivo
L	Comprimento
MEF	Método dos Elementos Finitos
Ni-Ti	Níquel-Titânio
ρ_{viga}	Densidade da viga
t	Espessura
SMA	Shape Memory Alloy
SMAHC	Shape Memory Alloy Hibrid Composite
v	Volume
V	Fração Volumétrica
ω_n	Frequência Natural

1 INTRODUÇÃO

1.1 ASPECTOS GERAIS

Estruturas que apresentam a capacidade de exibir funções especiais ao serem estimuladas por agentes externos são classificadas como estruturas inteligentes. Tais estruturas apresentam um sistema de monitoramento responsável pela aquisição de dados, um sistema de transmissão de dados encarregado de enviar as informações coletadas à uma unidade de controle e comando, uma unidade de controle e comando que possui o papel de analisar e determinar as ações necessárias, uma unidade de instrução de informações que deve enviar as decisões tomadas pela central de comando ao último sistema desse tipo de estrutura, sistema esse que é composto por dispositivos com o propósito de executar tarefas solicitadas pela central de comando (Akhras, 2000).

A demanda por materiais com peso reduzido e propriedades adaptativas forçou os pesquisadores a conceberem um material inteligente chamado de Compósito Híbrido com Liga de Memória de Forma ou, em inglês, “Shape Memory Alloy Hybrid Composite” (SMAHC). Esse tipo de material alia a versatilidade e o baixo peso dos materiais compósitos e as propriedades de mudança de forma das ligas de SMA.

As vigas híbridas compósitas concebidas no presente trabalho são constituídas de fibra de vidro-E, resina epóxi e fios de Ni-Ti. A fibra de vidro-E é responsável por reforçar o material, conferindo ao mesmo uma resistência moderada. A resina epóxi aglutina os materiais, serve como meio de transmissão de tensões externas às fibras e aos filamentos de Ni-Ti, protege as fibras e os fios de danos superficiais além de garantir maior ductilidade, tenacidade e também maior isolamento elétrico (Gibson, 1994). Os fios de Ni-Ti apresentam uma fase martensítica de baixo módulo de elasticidade, mas quando aquecidos acima de sua temperatura A_F apresentam um módulo de elasticidade de 2 a 3 vezes maior que o apresentado em sua fase martensítica. O aquecimento dos filamentos de Ni-Ti é responsável por aumentar o módulo de elasticidade da viga SMAHC e, conseqüentemente, a frequência natural de cada modo de vibração é também aumentada.

O objetivo principal do trabalho é a construção de vigas SMAHC com diversos métodos de fabricação, número diferentes de fios de Ni-Ti presentes nas mesmas, tipos diferentes de resina epóxi e o uso de reforço de fibra de vidro-E, na forma de cabos de roving, nas lâminas que contém os fios. E, neste contexto verificar se o aquecimento dos fios, transformando-os de martensita para austenita, pode elevar o módulo de elasticidade efetivo em flexão das vigas híbridas.

Como objetivos secundários temos a caracterização mecânica dos materiais utilizando-se a formulação analítica, com o auxílio da micromecânica e da macromecânica dos materiais compósitos, e também os resultados experimentais obtidos a partir de ensaios de flexão de 3 pontos e de análise de

vazios. O objetivo final do trabalho é a análise modal numérica por meio do método de elementos finitos (MEF) das vigas fabricadas.

1.2 ESTADO DA ARTE

O conceito de compósitos híbridos com elementos embebidos surgiu no final da década de 80 do século passado e atraiu o interesse de pesquisadores ao redor do mundo nas últimas décadas. Esses materiais são criados embebendo-se elementos de SMA na forma de fios, tiras ou partículas em uma matriz que pode ser de polímero, polímero reforçado com fibras, metal ou de material cerâmico (Sittner & Stalmans, 2000).

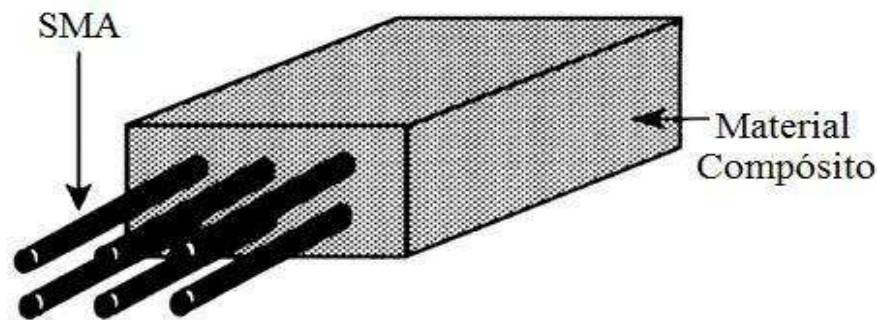


Figura 1.1 – Material compósito e fios de SMA embebidos (Aboudi, 1996)

A combinação de elementos de SMA e dos materiais compósitos confere aos compósitos híbridos a incrível capacidade inerente às ligas de SMA de modificar algumas de suas propriedades dado certos estímulos externos (por exemplo, o aquecimento e tensão mecânica) e também as já reconhecidas características dos materiais compósitos como alta relação resistência por peso, excelente proteção contra corrosão e baixa densidade. Tais características são responsáveis por tornarem o uso dos compósitos tão difundido nas indústrias aeroespacial, aeronáutica, automobilística e naval.

Aboudi et al (1996) realizou um experimento pioneiro com materiais SMAHC. O seu trabalho utilizou um modelo microestrutural que uniu os efeitos locais e globais a fim de analisar o comportamento dos materiais compósitos híbridos. Matrizes metálicas e com resina foram usadas na fabricação dos materiais em estudo. Ligas SMA com diâmetro grande foram empregadas, pois a teoria empregada era adequada para o tipo de material utilizado, onde o acoplamento entre os aspectos microestruturais e os macroestruturais são incorporados.

Jia et al (1998) apresentou em sua dissertação para o grau de PhD um estudo a cerca da absorção de energia de deformação de vigas e barras de ligas com memória de forma sob tensão e carregamento de flexão. Um modelamento teórico foi formulado visando-se relacionar a fração martensítica, a carga aplicada e a energia de deformação absorvida. Equações não-lineares para compósitos híbridos com liga de memória de forma foram usadas para descrever impacto de baixa

velocidade e também carregamento de contato quase-estático. Os métodos publicados nessa dissertação foram as primeiras pesquisas desenvolvidas no estudo da modelagem de ligas SMA sob o impacto de baixa velocidade e carregamento quase-estático.

Wang & Shen et al, (1999), apresentaram um artigo sobre um modelamento matemático baseado no método de inclusão equivalente e a abordagem de Mori-Tanaka para um material SMAHC constituído de ligas de SMA, fibras curtas e uma matriz elástica sujeita a um campo uniforme de temperatura. O modelamento foi criado a fim de se estudar o comportamento de transformação, a deformação e o coeficiente de expansão térmica do material. O foco principal do trabalho foi a discussão da influência da fração volumétrica de fibra. Os resultados obtidos no trabalho mostraram que a faixa de temperatura de transformação e os pontos de transformação dos materiais SMAHC são maiores que os dos materiais SMA isolados, os coeficientes de expansão térmica e de deformação dos materiais analisados podem ser alterados através da mudança da fração volumétrica de fibras e também da razão geométrica de fibras dos mesmos.

Duan, Tawfik, Goek, Ro & Mei, (2000), publicaram uma formulação e um procedimento de solução, usando-se o método de elementos finitos, para o comportamento de vibração livre de placas compósitas com filamentos de liga SMA incorporados em temperaturas elevadas. Exemplos de variação de frequências mais baixas versus a temperatura e também a influência do SMA nas frequências naturais foram apresentados.

O pesquisador Turner realizou dois trabalhos de extrema importância na área. A primeira pesquisa foi apresentada no ano de 2001 e apresentava os métodos de fabricação de vigas SMAHC, a caracterização dos materiais constitutivos para a quantificação do modelo, o desenvolvimento de todo o aparato experimental para os ensaios dinâmicos e estáticos, a discussão dos resultados experimentais e, por fim, a validação das ferramentas analíticas e numéricas propostas. O principal objetivo do estudo foi o de avaliar a utilização desse tipo de material no controle adaptativo de respostas termomecânicas de estruturas compósitas. As respostas dos controles estáticos e dinâmicos são demonstradas no estudo de flambagem térmica, pós flambagem térmica, vibração, fadiga sônica e transmissão acústica. O segundo artigo foi publicado no ano de 2005 e apresentou refinamentos na medição experimental e na modelagem numérica afim de se obter melhores correlações nas previsões numéricas e nas medições obtidas. Os resultados finais demonstraram a efetividade das estruturas SMAHC nos controles estáticos e dinâmicos, através da sua rigidez adaptativa.

Um grupo de pesquisadores chineses compostos por Lau, Zhou e Tao apresentou no ano de 2002 um artigo abordando o controle de frequências naturais de vigas compósitas com elementos de SMA embebidos engastadas em ambas as extremidades. Um modelo analítico apresentou resultados semelhantes aos encontrados de forma experimental para as frequências naturais encontradas. Descobriu-se que as frequências naturais das vigas SMAHC estavam diminuindo com o incremento dos fios de SMA, isso porque apesar do módulo de elasticidade do SMA ser maior que o do compósito

híbrido a sua densidade também é maior. Entretanto, quando os fios de SMA eram aquecidos acima de sua temperatura final de transformação austenítica (A_F) as frequências naturais das vigas SMAHC aumentavam.

Zhang, Kim & Koratkar, (2003), apresentaram uma pesquisa comparando-se vigas compósitas reforçadas com fios de SMA e fibra de vidro-E e vigas compósitas reforçadas apenas com fibra de vidro-E no que diz respeito à absorção de energia antes da fratura e também na resistência ao choque. As vigas que possuíam reforço de fios de SMA apresentaram uma maior tenacidade à fratura e também uma maior resistência ao choque foi observada. Um fenômeno observado foi um aumento significativo no amortecimento das vigas reforçadas com fios de SMA quando os mesmo passavam da sua fase martensítica para a sua fase austenítica.

Um método para o controle de um rotor foi concebido por Zak, Cartmell & Ostachowicz, (2005). Mostrou-se que a utilização de mancais com uma luva compósita com tiras de SMA foi capaz de alterar as velocidades críticas de um eixo. A utilização de luvas cilíndricas de fibra de vidro com epóxi mostrou maior controlabilidade dinâmica que as fabricadas com grafite-epóxi.

Em 2006 um artigo publicado por Balapgol, Majoria e Kulkarni apresentou um modelo utilizando-se o método de elementos finitos para a análise de vibração livre de uma superfície compósita laminada com SMA. A placa possui uma condição de contorno do tipo engastada-livre e a lâmina que contém a liga com memória de forma está contida no topo da placa compósita. Estudos paramétricos foram efetuados a fim de se avaliar o efeito na vibração livre variando-se a fração volumétrica de SMA, espessura, largura e elasticidade da placa compósita.

O primeiro trabalho desenvolvido na Universidade de Brasília sobre SMAHC foi a dissertação de mestrado de Vailton Alves de Faria et all (2007). O seu trabalho consistiu em uma análise numérica das frequências naturais de estruturas SMAHC utilizando-se várias combinações de reforço/matriz e também se variando a fração volumétrica de fios de SMA na estrutura. As vigas eram do tipo Euler-Bernoulli e as condições de contorno empregadas foram: em balanço, bi-engastada e bi-apoiadas. Os resultados teóricos obtidos com as simulações apontaram um potencial máximo de variação na frequência natural entre as fases martensíticas e austeníticas de 34,6%.

As primeiras vigas SMAHC construídas na Universidade de Brasília foram feitas por Weimar Silva Castilho e foram apresentadas em sua dissertação de mestrado (2008). Em seu projeto foram abordados os métodos de fabricação de vigas SMAHC para testes em tração. Como não há até o momento uma norma que regulamente as dimensões de vigas SMAHC para ensaios em tração, as dimensões utilizadas pelo autor do projeto foram as de uma norma específica para compósitos fibrosos, a norma em questão é a ASTM D3039-76 (Standart Test Method for Tensile Properties of Oriented Fiber Composites). Além da elaboração de um método para construir as vigas e a construção em si de tais materiais, a dissertação apresentou uma análise termomecânica comparativa entre as fases a fim de se avaliar a variação de certas propriedades mecânicas (como por exemplo, o módulo de

elasticidade, máxima deformação e tensão de ruptura trativa) em termos da fração volumétrica de SMA e da temperatura.

O projeto de graduação desenvolvido por João Paulo Campos da Silva (2009) apresentou quatro vigas híbridas simétricas para ensaios em flexão, sendo duas delas com lâminas reforçadas com fios de aço e as outras duas com lâminas reforçadas com fios de Ni-Ti. O seu trabalho apresentou uma formulação matemática baseada na micromecânica e na macromecânica para a obtenção dos módulos de elasticidade efetivos e também das frações volumétricas de fibra de vidro-E, epóxi e de fios de SMA. Ensaios de flexão em três pontos também foram realizados para determinar o módulo de elasticidade da viga em flexão experimental. Ensaios das vigas com os fios em sua fase austenítica não puderam ser realizados, isso porque não havia um dispositivo eficiente para promover o aquecimento dos fios.

Diego Maurício Sandoval Ceron, (2010), apresentou, em sua dissertação de mestrado, uma metodologia mais avançada para a construção de vigas SMAHC para ensaio de tração. Seu trabalho incluiu ainda o desenvolvimento de um sistema adequado para o aquecimento dos fios de SMA.

A pesquisa do doutorando Peter Faluhelyi é bem ampla e tem como objetivos a fabricação de vigas SMAHC para ensaios em tração e em flexão com métodos mais inovadores, análise modal analítica, numérica e experimental das frequências naturais das vigas híbridas simétricas na condição livre-livre, determinação das propriedades mecânicas dos fios de SMA e também estudos microscópicos a cerca da interface entre as lâminas das vigas SMAHC.

1.3 OBJETIVOS

Várias aplicações para os compósitos híbridos com liga de memória de forma são observadas na literatura. No entanto, o controle de vibração de vigas SMAHC, através da mudança de rigidez mediante o controle de temperatura dos filamentos de SMA, chama a atenção pela sua incrível aplicabilidade em diversos setores industriais.

Tendo em vista essa grande aplicação, o presente trabalho pretende avaliar a diferença entre métodos distintos de fabricação, a diferença entre os métodos experimentais e analíticos na determinação das características mecânicas das vigas em flexão e também os resultados das análises modais obtidas de forma analítica e numérica.

Ao fim do trabalho pretende-se propor um método de fabricação que apresente o maior potencial de controle de vibração, através da elevação do módulo de elasticidade induzido pelo aquecimento dos fios de Ni-Ti, bem como métodos de análise para as propriedades mecânicas em flexão e para as frequências naturais que apresentem resultados confiáveis.

Pretende-se apresentar propostas para a melhoria na fabricação dos exemplares de viga SMAHC para trabalhos futuros dentro da Universidade de Brasília.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo tem por finalidade apresentar os materiais mais importantes utilizados no projeto e também os métodos de análise utilizados.

2.1 MATERIAIS

A seção de materiais apresenta as matérias primas utilizadas no projeto que são as resinas epóxi e endurecedores, as fibras de vidro-E e os fios de Ni-Ti.

2.1.1 Resinas Epóxi e Endurecedores

As matrizes mais comuns entre os materiais compósitos são as matrizes poliméricas, isso porque apresentam características como, por exemplo, serem viáveis para a produção de peças com geometrias complexas, grande facilidade no processamento dos materiais compósitos, baixa densidade e baixo custo (Callister, 2000). Dentro do grupo das matrizes poliméricas, as matrizes termorrígidas, ou termofixas, são as mais utilizadas por apresentarem estabilidade térmica adequada. As resinas epóxi são as matrizes termorrígidas mais utilizadas, pois apresentarem excelente moldabilidade, boas propriedades mecânicas e baixa formação de bolhas de ar nos compósitos.

As matrizes termorrígidas apresentam um processo de polimerização chamado de cura, onde a formação de uma rede molecular com ligações cruzadas é formada. Ao final do processo, o material passa de um estado borracho para um estado vítreo (Levy Neto e Pardini, 2006). A reação depende da utilização de um catalisador, também denominado como endurecedor. A proporção adequada entre a resina epóxi e o endurecedor afeta nas propriedades finais da matriz como, por exemplo, a transição vítrea, o módulo de elasticidade e a resistência mecânica da mesma (Levy Neto & Pardini, 2006).

Existem dois tipos básicos de cura de um material termorrígido. O primeiro tipo é chamado de cura a frio, que é quando as unidades monoméricas apresentam um tamanho maior e por isso apresentam menores densidades de ligação cruzadas, e assim, uma temperatura de transição vítrea baixa. Já o processo de cura a quente apresenta menores unidades monoméricas e, como consequência, uma maior temperatura de transição vítrea e um menor tempo de cura (Levy Neto & Pardini, 2006).

O processo de fabricação das vigas SMAHC envolveu resinas com cura a quente e com cura a frio. No processo de cura à frio foram utilizadas a resina epóxi Araldite LY 1316 e o endurecedor HY 1208 (na proporção de 100 partes por peso da resina para 13 partes por peso do endurecedor), nas lâminas compostas apenas pelas mantas de fibras de vidro, e a resina epóxi Araldite F e o endurecedor HY 956 (na proporção de 100 partes por peso da resina para 25 partes por peso do endurecedor), nas lâminas reforçadas com fios de Ni-Ti. No processo de cura à quente usa-se a resina epóxi Araldite LY

1316 e o endurecedor HY 1316 (na proporção de 100 partes por peso da resina para 23 partes por peso do endurecedor), nas lâminas compostas apenas pelas mantas de fibras de vidro, e a resina epóxi Araldite F e o endurecedor HY 956 (na proporção de 100 partes por peso da resina para 25 partes por peso do endurecedor), nas lâminas reforçadas com fios de Ni-Ti. A proporção da massa de resina é de 1,5 vezes a da massa de fibra de vidro, tendo em vista a dificuldade de se impregnar as mantas de fibra de vidro, os cabos de roving e os fios de Ni-Ti. No processo de cura à quente, a viga fica sendo curada por um período de 10 horas à temperatura ambiente, próxima de 25°C, e pós curada por 7 horas à temperatura de 80°C constante mantida com o uso de um aquecedor do tipo placa térmica.

2.1.2 Fibras de Vidro-E

Os materiais compósitos são compostos por uma fase aglutinante e um reforço responsável por suportar os carregamentos na estrutura (Levy Neto & Pardini, 2006). O reforço pode acontecer na forma de particulados de diversas formas, fibras descontínuas e fibras contínuas (Daniel & Ishai, 1994).

As fibras de vidro são as fibras mais utilizadas em compósitos de baixo e médio desempenho, pois aliam alta resistência mecânica com baixo custo (Silva, 2009). As fibras de vidro-E possuem propriedades mais modestas que as fibras de vidro-S, isso porque apresentam menor custo (Gibson, 1994). As fibras de vidro-E são produzidas na forma de filamentos contínuos e na forma de fibras picadas (Levy Neto & Pardini, 2006). Foram utilizados reforços de vidro-E na forma de mantas de vidro-E e na forma de cabos de roving.

As mantas utilizadas possuem fibras de vidro-E picadas e distribuídas de maneira aleatória no plano. Em todas as vigas são utilizadas mantas com gramatura de 450 g/m², cortadas em tiras de 29,8 x 3,0 cm para o encaixe ideal no molde fêmea. A densidade das fibras é de 2,50 g/cm³, o módulo de elasticidade é de 70 GPa e o Coeficiente de Poisson é de 0,2 (matweb.com).

Os cabos de roving possuem cerca de 12000 filamentos de fibra de vidro-E dispostos longitudinalmente. Esses cabos foram utilizados nas lâminas reforçadas com fios de SMA de algumas vigas de SMAHC fabricadas e possuem a função de melhorar a condutividade térmica do calor gerado no aquecimento dos fios de SMA e melhorar a adesão dos fios.

2.1.3 Fios de Ni-Ti

Materiais com memória de forma (SMA – *Shape Memory Alloys*) são aqueles capazes de retornar a um estado inicial de pré-deformação de até 8%, quando aquecidos (Srinivasan & McFarland, 2001). Abaixo de sua temperatura de transformação austenítica (A_f), esses materiais possuem resistência ao escoamento e módulo de elasticidade relativamente baixos (por exemplo, em relação ao aço SAE 1020), podendo ser submetidos a elevadas taxas de deformação. Entretanto,

quando aquecidos acima de A_s , sofrem modificações em sua estrutura cristalina, retornam à forma inicial e tem seu módulo de elasticidade aumentado em um fator de 2 a 3 vezes (Turner, 2000).

As ligas de Ni-Ti (Níquel-Titânio) apresentam memória de forma por meio da transição reversível da fase martensítica para a austenítica através do aquecimento. Como sua fase austenítica possui módulo de elasticidade significativamente superior ao da fase martensítica, uma das aplicações sob análise é a utilização de vigas híbridas compósitas reforçadas com filamentos de Ni-Ti no controle ativo de vibrações.

Através do aquecimento dos filamentos de Ni-Ti até a temperatura de 69°C , aumenta-se seu módulo de elasticidade e modifica-se o módulo de elasticidade efetivo do material compósito, variando conseqüentemente sua frequência natural e modos de vibração.

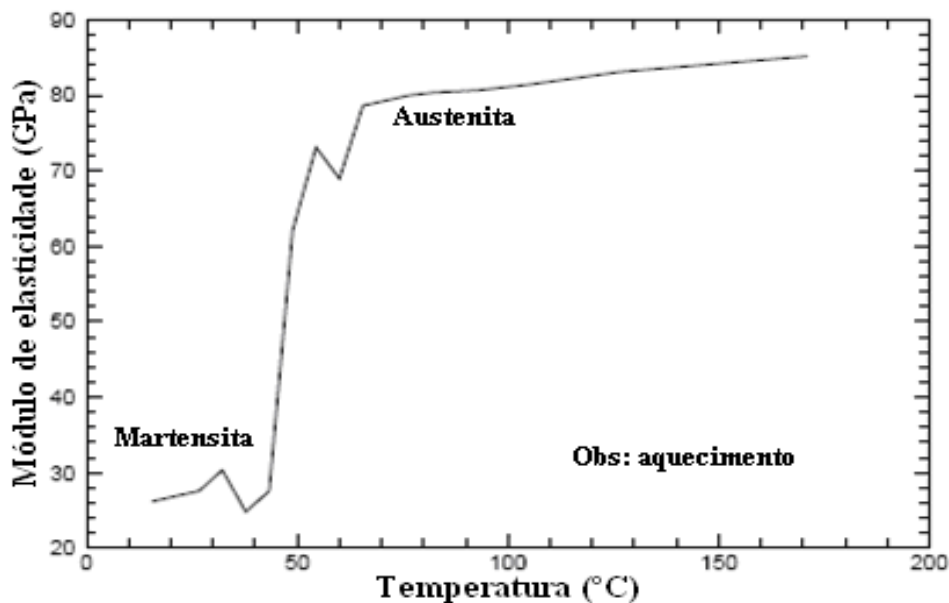


Figura 2.1 – Módulo de elasticidade versus Temperatura (Turner, 2001)

Os fios de Ni-Ti utilizados possuem composição química de 55,49% em peso de Níquel e 45,51% em peso de titânio. A temperatura de início da fase austenita é de 62°C (dado do fabricante Memory Metalle GmbH). O módulo de elasticidade na fase austenítica é de 48,4 GPa e na fase martensítica é de 22,7 GPa (Faluhelyi, 2010). A densidade do material é de $6,45\text{ g/cm}^3$ (dado do fabricante Memory Metalle GmbH).

2.2 MÉTODOS

A seção de métodos apresenta as principais variáveis no processo de fabricação das vigas, a máquina de ensaio de flexão em 3 pontos, o programa utilizado nas simulações numéricas e os equipamentos para determinação da fração volumétrica de vazios.

2.2.1 Processo de Fabricação

O processo de fabricação das vigas SMAHC construídas envolveu quatro variantes principais. A primeira delas é o tipo de cura da resina (cura a quente ou a frio). A segunda variante foi a quantidade de fios de Ni-Ti utilizados em cada viga (4, 6 ou 8 fios). A terceira variante consistiu no uso ou não de bolsa de vácuo. A quarta e última variante foi a quantidade cabos de roving nas lâminas reforçadas com fios de SMA.

A pressão obtida com o uso da bomba de vácuo presente no laboratório é de aproximadamente $0,4 \text{ kgf/cm}^2$, a última técnica de vácuo adotada foi o uso do equipamento da Hot Bonder, que gerou uma pressão de $0,64 \text{ kgf/cm}^2$, quando não se faz o uso da bomba de vácuo a pressão mecânica obtida com o uso de pesos sobre a viga chega à aproximadamente $0,2 \text{ kgf/cm}^2$.

O processo de laminação ocorre dentro da bancada de fabricação das vigas híbridas simétricas. A bancada de fabricação é um molde tipo fêmea que inclui guias para o posicionamento do fio e também uma manivela que tem a função de tencionar os fios de SMA. A bancada de laminação é mostrada na figura 2.2

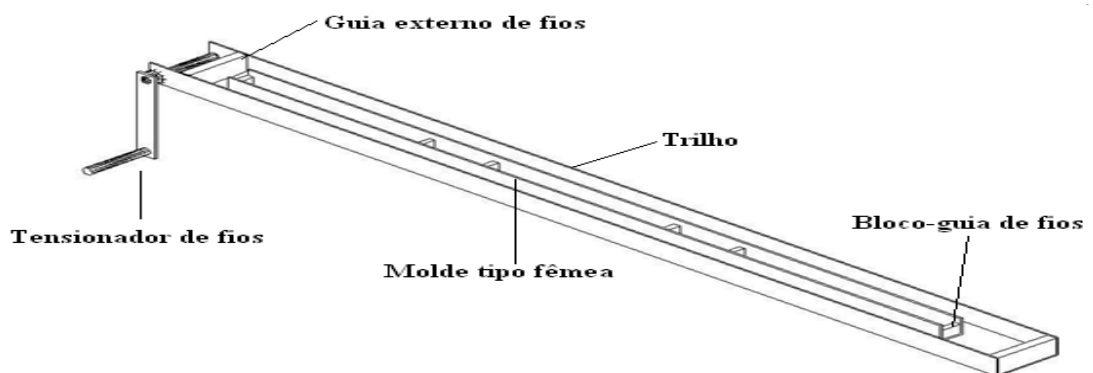


Figura 2.2 – Bancada de fabricação das vigas híbridas simétricas (Silva, 2009)

O posicionamento e a constiuição de cada lâmina dentro da viga SMAHC é mostrado na figura 2.3.

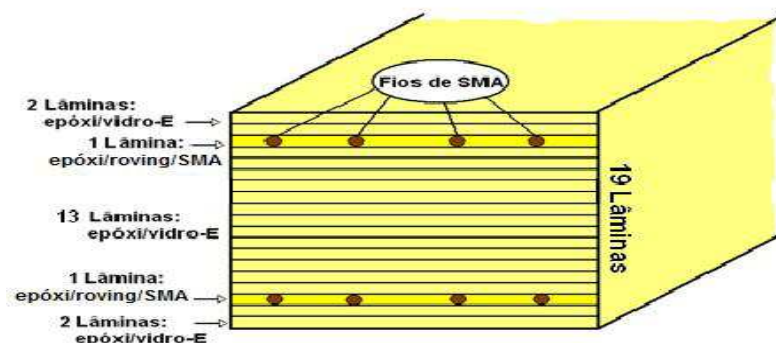


Figura 2.3 – Seção transversal da viga híbrida simétrica com suas 19 lâminas (Silva,2009)

2.2.2 Ensaio de Flexão em Três Pontos

Os ensaios de flexão em três pontos foram realizados com o auxílio da máquina MTS 810, localizada no laboratório do grupo GAMMA do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília. As garras e apoios são padronizados pela norma ASTM 790-07 que padroniza o ensaio de flexão. A figura 2.4 mostra o ensaio de uma das vigas produzidas:



Figura 2.4 – Ensaio de flexão de uma viga produzida

2.2.3 Simulações Numéricas Computacionais

As análises numéricas foram realizadas utilizando-se o software Ansys para caracterizar dinamicamente as vigas de SMAHC construídas. As simulações realizadas servem como apoio para a comparação, do ponto de vista dinâmico, entre os diferentes processos de fabricação utilizados e também visam propor um método adequado para o modelamento dinâmico de tais vigas.

2.2.4 Determinação da Fração Volumétrica de Vazios

Os experimentos utilizados para determinar a fração volumétrica de vazios presentes nas amostras são regidos pela norma ASTM D-3171-06. Segundo a norma, as amostras devem possuir uma massa que seja 1000 vezes igual ou superior a da precisão da balança analítica utilizada. A balança utilizada (figura 2.5) é da marca Shimadzu modelo AUY 220 possui capacidade de 220g, precisão de 1 mg e desvio padrão de 0,1 mg.



Figura 2.5 – Balança Shimadzu modelo AUY 220

As amostras foram cortadas com a máquina de corte de precisão da marca Struers modelo Secotom-15 apresentada na figura 2.6. As amostras ficaram com acabamento liso e dimensões adequadas.



Figura 2.6 – Máquina de corte de precisão Struers modelo Secotom-15

Para medir a massa aparente das amostras é necessário utilizar um conjunto composto por uma cesta, um suporte e um becher com água destilada. A cesta, que é imersa em água destilada contida dentro de um becher, é fixa a um suporte encaixado na balança. O aparato é mostrado na figura 2.7.



Figura 2.7 – Aparato para medir a massa aparente das amostras

O último procedimento experimental consiste em colocar as amostras dentro de cadinhos cerâmicos (figura 2.8) e leva-las ao forno elétrico da Linn Elektro Therm (figura 2.9) a uma temperatura de 630 °C por 30 minutos para que o epóxi seja evaporado.



Figura 2.8 – Cadinhos cerâmicos dentro de uma bandeja cerâmica



Figura 2.9 – Forno elétrico da Linn Elektro Therm

3 MODELAGEM

O presente capítulo apresenta toda a modelagem utilizada na caracterização mecânica, nas análises modais das vigas híbridas compósitas confeccionadas, na análise de sensibilidade e no procedimento de determinação da fração volumétrica.

3.1 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS VIGAS CONSTRUÍDAS

Essa seção é responsável por apresentar toda a formulação matemática e as suposições consideradas na utilização das equações da micromecânica e da macromecânica, a formulação utilizada na obtenção do módulo efetivo em flexão e também as equações e parâmetros importantes para o cálculo do módulo de elasticidade experimental.

3.1.1 Cálculo Analítico das Vigas Híbridas

Como as vigas são laminadas, deve-se analisar as lâminas que compõem o laminado e também a viga por inteiro (viga híbrida simétrica). A viga possui 19 camadas no total, sendo 17 lâminas reforçadas com manta de fibras de vidro-E picadas impregnadas com epóxi e mais 2 lâminas reforçadas com fios de Ni-Ti, roving (fibra de vidro-E unidirecional) impregnados com epóxi. Por fim, o módulo de elasticidade efetivo em flexão (E_F) pode ser calculado.

3.1.1.1 Análise das Lâminas Reforçadas com Mantas de Vidro-E picadas e Epóxi

Uma lâmina genérica reforçada com fios de SMA, roving e epóxi possui uma espessura igual ao diâmetro dos fios. Sendo assim, deduz-se que a espessura de uma lâmina genérica composta por mantas de vidro-E picadas e epóxi é dada por:

$$t_{LamMantaEpóxi} = \frac{(t - 2 \cdot d_{Fios})}{17} \quad (1)$$

Onde:

$t_{LamMantaEpóxi}$ representa a espessura de uma lâmina genérica composta por manta e epóxi;

t representa a espessura total da viga híbrida simétrica; e

d_{Fios} representa o diâmetro dos fios de Ni-Ti.

O volume dessa lâmina é então calculado como:

$$v_{LamMantaEpóxi} = t_{LamMantaEpóxi} \cdot b \cdot L \quad (2)$$

Onde:

$v_{LamMantaEpóxi}$ representa o volume de uma lâmina genérica composta por manta e epóxi;

b representa a largura da viga híbrida simétrica; e

L representa o comprimento da viga híbrida simétrica.

O cálculo do volume de manta em uma lâmina é dado por:

$$v_{MantaLamMantaEpóxi} = \frac{m_{Manta}}{\rho_{Manta}} \cdot \frac{1}{17} \quad (3)$$

Onde:

$v_{MantaLamMantaEpóxi}$ representa o volume de manta nessa lâmina; e ρ_{Manta} representa a densidade da manta.

A fração volumétrica de fibras da lâmina é dada por:

$$V_{FibrasLamMantaEpóxi} = \frac{v_{MantaLamMantaEpóxi}}{v_{LamMantaEpóxi}} \quad (4)$$

Onde:

$V_{FibrasLamMantaEpóxi}$ é a fração volumétrica de fibras nessa lâmina

A fração volumétrica de matriz na lâmina é dada por:

$$V_{MatrizLamMantaEpóxi} = 1 - V_{FibrasLamMantaEpóxi} \quad (5)$$

A formulação desconsidera a presença de vazios na lâmina

O módulo de elasticidade da lâmina, de acordo com Mendonça (2005), é dado por:

$$E_{LamMantaEpóxi} = 3,44 + 28,2 \cdot V_{FibrasLamMantaEpóxi} + 21,6 \cdot V_{FibrasLamMantaEpóxi}^4 \quad [GPa] \quad (6)$$

A densidade dessa camada pode ser obtida pela seguinte equação:

$$\rho_{LamMantaEpóxi} = \rho_{Manta} \cdot V_{FibrasLamMantaEpóxi} + \rho_{Epóxi} \cdot V_{MatrizLamMantaEpóxi} \quad (7)$$

3.1.1.2 Análise das Lâminas Reforçadas com Fios de SMA, Roving e Epóxi

O volume de uma lâmina genérica é dado por:

$$v_{LamFios} = d_{Fios} \cdot b \cdot L \quad (8)$$

Onde:

$v_{LamFios}$ representa o volume dessa lâmina.

O volume de roving na lâmina:

$$v_{RovingLamFios} = \frac{m_{Roving}}{\rho_{Roving}} \cdot \frac{1}{2} \quad (9)$$

Onde:

$v_{RovingLam}$ representa o volume de roving na lâmina; e ρ_{Roving} representa a densidade do roving.

A fração volumétrica de fibras da lâmina é dada por:

$$V_{FibrasLamFios} = \frac{v_{Roving}}{v_{LamFios}} \quad (10)$$

Onde:

$V_{FibrasLamFios}$ é a fração volumétrica de fibras nessa lâmina.

O volume de fios na lâmina é dado por:

$$v_{FiosLamFios} = N_{Fios} \cdot L \cdot \frac{\pi d_{Fios}^2}{4} \cdot \frac{1}{2} \quad (11)$$

Onde:

$v_{FiosLam}$ representa o volume de fios de SMA na lâmina; e

N_{Fios} representa o número de fios na viga.

A fração volumétrica de fios de SMA na lâmina é dada por:

$$V_{FiosLamFios} = \frac{v_{FiosLam}}{v_{LamFios}} \quad (12)$$

A fração volumétrica de matriz na lâmina é dada por:

$$V_{MatrizLamFios} = 1 - V_{FibrasLamFios} - V_{FiosLam} \quad (13)$$

Aqui se desconsidera a presença de vazios na lâmina

Para se calcular o módulo de elasticidade na direção dos fios deve-se usar a regra das misturas, para isso se tem:

$$E_{LamFios-1} = E_{Fios} \cdot V_{FiosLam} + E_{Roving} \cdot V_{FibrasLamFios} + E_{Matriz} \cdot V_{MatrizLamFios} \quad (14)$$

Como módulo de elasticidade dos fios (E_{Fios}) irá variar se ele estiver na fase austenítica ou martensítica temos que:

$$E_{LamFios Austenítico-1} = E_{FiosAustenítico} \cdot V_{FiosLam} + E_{Roving} \cdot V_{FibrasLamFios} + E_{Matriz} \cdot V_{MatrizLamFios} \quad (15)$$

$$E_{LamFios Martensítico-1} = E_{FiosMartensítico} \cdot V_{FiosLam} + E_{Roving} \cdot V_{FibrasLamFios} + E_{Matriz} \cdot V_{MatrizLamFios} \quad (16)$$

Onde:

$E_{LamFios Austenítico-1}$ representa o módulo de elasticidade na direção 1 dessa lâmina quando os fios estão em sua fase austenítica; e

$E_{LamFios Martensítico-1}$ representa o módulo de elasticidade na direção 1 dessa lâmina quando os fios estão em sua fase martensítica.

A densidade da lâmina que contém os fios pode ser obtida por:

$$\rho_{LamFios} = \rho_{Fios} \cdot V_{FiosLam} + \rho_{Roving} \cdot V_{FibrasLamFios} + \rho_{Epóxi} \cdot V_{MatrizLamFios} \quad (17)$$

3.1.1.3 Micromecânica da Viga Simétrica

Inicialmente o volume da viga é calculado:

$$v_{Viga} = b \cdot t \cdot L \quad (18)$$

A fração volumétrica de fibras é dada por:

$$V_{Fibras} = \frac{v_{Manta} + v_{Roving}}{v_{Viga}} \quad (19)$$

A fração volumétrica de fios é dada por:

$$V_{Fios} = \frac{v_{Fios}}{v_{Viga}} \quad (20)$$

A fração volumétrica de matriz é dada por:

$$V_{Matriz} = 1 - V_{Fibras} - V_{Fios} \quad (21)$$

A formulação desconsidera a presença de vazios na viga híbrida simétrica.

A densidade da viga híbrida simétrica pode ser dada por:

$$\rho_{Viga} = \rho_{Fios} \cdot V_{Fios} + \rho_{Manta} \cdot V_{Fibras} + \rho_{Epóxi} \cdot V_{Matriz} \quad (22)$$

3.1.1.4 Macromecânica da Viga Simétrica em Flexão

O módulo efetivo (E_F) é o módulo de elasticidade efetivo em flexão da viga laminada simétrica. Ou seja, uma viga isotrópica de módulo E_F , de mesma geometria e submetida ao mesmo carregamento apresentará as mesmas deflexões elásticas que a viga analisada. O módulo E_F é dado por (Levy Neto & Pardini, 2006):

$$E_F = \frac{8}{t^3} \sum_{j=1}^{\frac{N}{2}} (E_x)_j (z_j^3 - z_{j-1}^3) \quad (23)$$

Onde:

$(E_x)_j$ representa o módulo de elasticidade de uma lâmina genérica j ;

z_j representa a coordenada superior de uma lâmina a partir do plano médio da viga;

z_{j-1} representa a coordenada inferior de uma lâmina a partir do plano médio da viga; e

N representa o número total de lâminas da viga.

3.1.2 CÁLCULO ACERCA DO ENSAIO DE FLEXÃO

Os ensaios de flexão em três pontos realizados na máquina fornecem a flecha apresentada por cada viga mediante a força exercida em um dado instante do ensaio. Com os dados obtidos podem-se

criar curvas de força x flecha com um formato semelhante à Figura 3.1. O valor obtido experimentalmente para o módulo de elasticidade pode ser obtido utilizando-se a expressão representada pela equação (24).

$$E = \frac{a.150^3}{4.b.t} \quad (24)$$

Onde:

a representa o ângulo de inclinação da curva obtida; e

150 é o valor, em mm, do vão entre os apoios no ensaio.

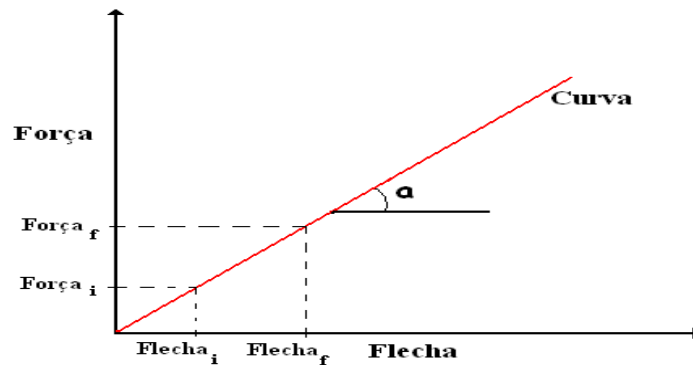


Figura 3.1– Representação esquemática de uma curva Força x Flecha

3.2 ANÁLISE MODAL

A presente seção apresenta a formulação matemática necessária para se obter as frequências naturais analíticas para uma vibração transversal e também a metodologia empregada na análise modal numérica das vigas.

3.2.1 Valores Analíticos para as Frequências Naturais

Dada uma vibração transversal não-amortecida de uma viga de Euler-Bernoulli, tem-se que a equação para as frequências naturais é dada por (Rao, 2008):

$$\omega_n = \frac{(\beta_n L)^2}{4.\pi} \cdot \frac{t}{L^2} \cdot \sqrt{\frac{E_F.10}{3.\rho_{viga}}} \cdot 10^7 \quad (25)$$

Onde:

ω_n representa a n ésima frequência natural transversal da viga;

B_n é um fator que depende da condição de contorno e do modo de vibração

t é a espessura da viga, em mm;

L é o comprimento da viga, em mm;

E_F é o módulo efetivo da viga, em GPa; e

ρ_{viga} é a densidade da viga, em kg/m^3

Os valores de $\beta_n l$ para os 3 primeiros harmônicos para a condição livre-livre são dados na tabela 3.1 (Rao, 2008):

Tabela 3.1 – Valores de $\beta_n l$ para a condição livre-livre

$\beta_1 l$	$\beta_2 l$	$\beta_3 l$
4,730041	7,853205	10,995608

3.2.2 Modelagem Utilizada nas Simulações Numéricas

As vigas fabricadas foram modeladas numericamente a fim de ser obter as frequências naturais e os seus respectivos modos de vibração transversal.

O primeiro conjunto de simulações consistiu em simulações onde as vigas foram consideradas como isotrópicas. Inicialmente, o valor do módulo de elasticidade considerado para cada viga foi o seu respectivo módulo efetivo. O procedimento posterior consistiu em utilizar valor do módulo de elasticidade experimental. A densidade considerada para os dois procedimentos foi a densidade média da viga híbrida simétrica. As simulações foram realizadas utilizando-se um tipo de elemento de viga, um tipo de elemento de casca e um tipo de elemento sólido. Testes de convergência foram utilizados a fim de descobrir o refinamento da malha ideal para as simulações. Os resultados obtidos foram comparados com os encontrados com os valores analíticos da equação (25).

O segundo conjunto de simulações realizadas foi pautado na utilização do mesmo elemento de casca utilizada no conjunto anterior. A utilização de elementos do tipo casca permite o modelamento das vigas por camadas. Esse tipo de modelamento permite atribuir a cada camada de uma viga propriedades (por exemplo, módulo de elasticidade e densidade) distintas das demais camadas que compõem o laminado.

Esse último conjunto de simulações possui dois grupos de análises. O primeiro grupo consistiu em considerar o módulo de elasticidade da cada camada composta por manta e epóxi como sendo o valor encontrado pela equação (6), já o valor utilizado para as camadas que contém os fios foram obtidos das equações (15) (fios na fase austenítica) e (16) (fios na fase martensítica). As equações (7) e (17) foram utilizadas para encontrar as densidades de cada camada. O segundo grupo utiliza a mesma densidade de cada camada do primeiro grupo, mas os módulos de elasticidade das mesmas é igual ao módulo efetivo de sua respectiva viga híbrida simétrica.

O elemento de viga utilizado foi o BEAM189 O elemento possui 3 nós e 6 graus de liberdade em cada nó. Os graus de liberdade de cada nó inclui translações nas direções x,y e z, as rotações nas

direções x,y e z também são admitidas. O elemento inclui efeitos de deformação cisalhante, responde a esforços de flexão, permite considerações de não linearidade do material. O uso desse elemento é permitido com qualquer seção transversal.

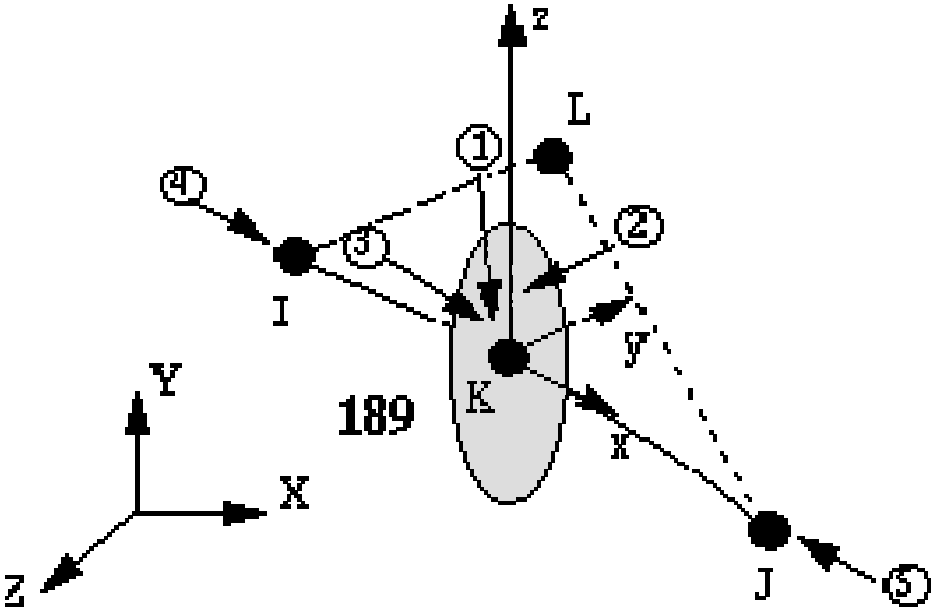


Figura 3.2 - Elemento BEAM189

A figura 3.3 apresenta a malha gerada de uma viga simulada com o elemento BEAM189.

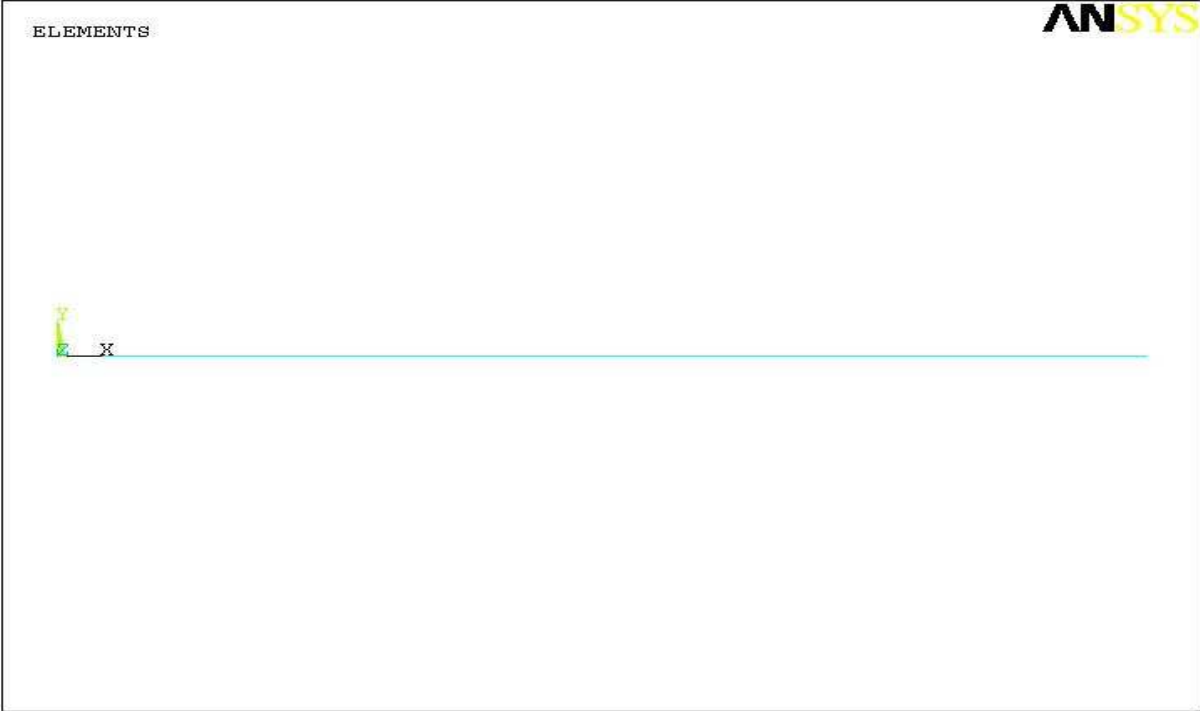


Figura 3.3 – Malha de uma viga simulada com elemento BEAM189

O elemento de casca utilizado foi o SHELL281, que possui 8 nós com seis graus de liberdade em cada nó, ou seja, translações e rotações nas direções x,y e z. Esse elemento por ser usado para a modelagem de compósitos laminados e construções em sanduíche. Mudanças na espessura da casca são levadas em conta para análises não lineares.

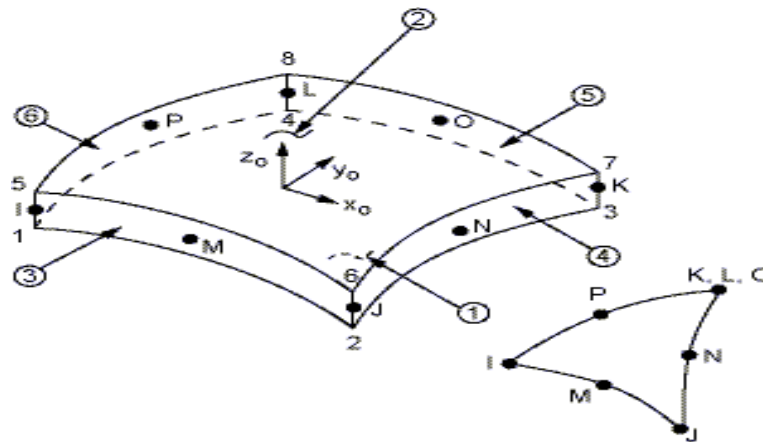


Figura 3.4 – Elemento SHELL281

A malha criada para uma viga simulada com o elemento SHELL281 é apresentada na figura 3.5.

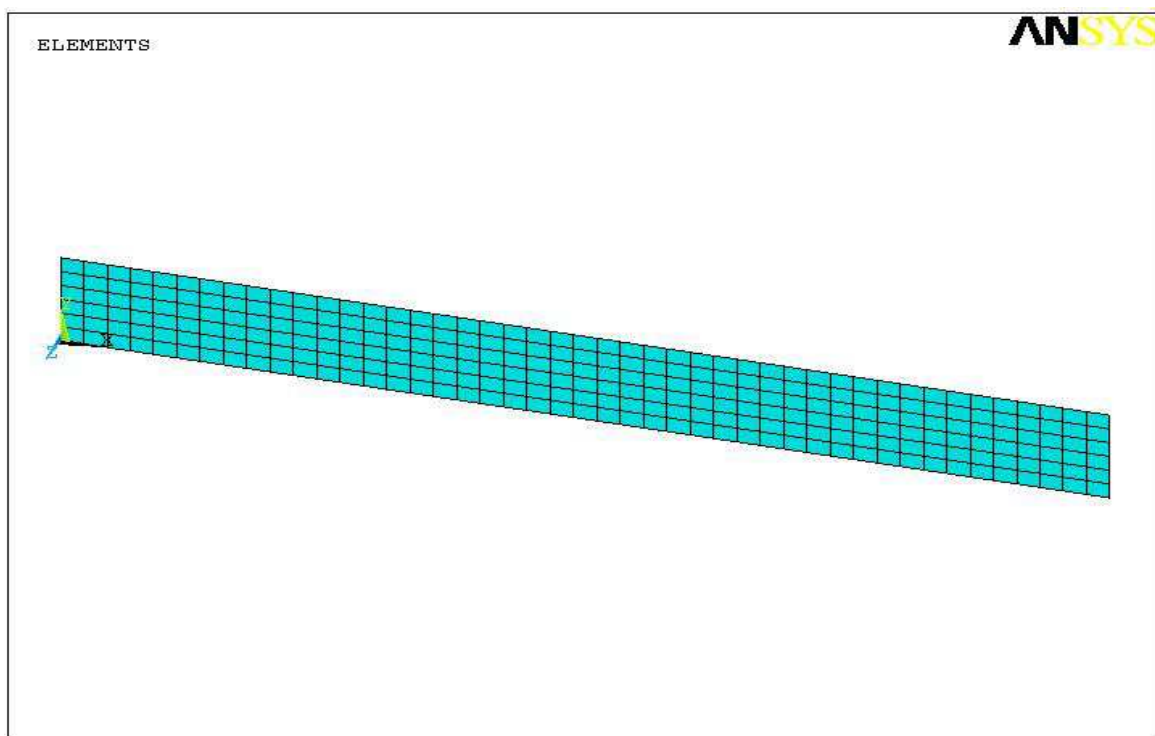


Figura 3.5 – Malha de uma viga simulada com elemento SHELL281

O elemento sólido utilizado foi o SOLID186. Esse é um elemento 3D com 20 nós e 3 graus de liberdade em cada nó. Os graus de liberdade admitidos para esse elementos são as translações nos eixos x,y e z. Formulação de materiais com plasticidade, fluência, encruamento e elevadas deformações são permitidas. A sua configuração básica é a hexaédrica, mas as configurações piramidal, prismática e tetraédrica também são admitas, de acordo com a geometria do modelo.

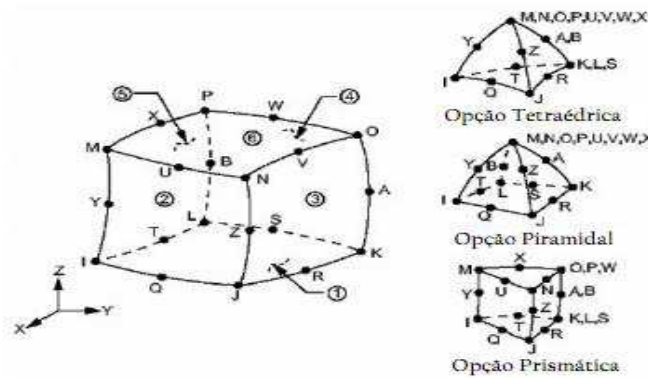


Figura 3.6 – Elemento SOLID186

A figura 3.7 apresenta a malha criada para uma viga simulada com o elemento SOLID186.

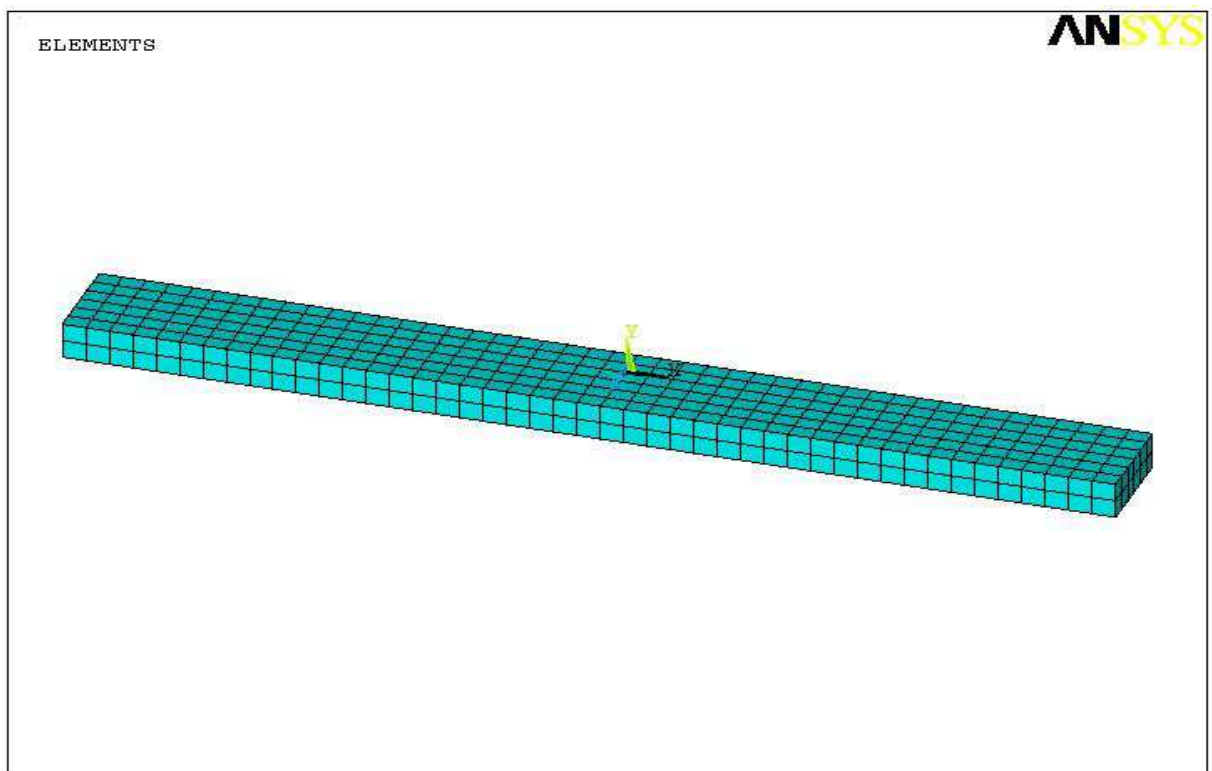


Figura 3.7 – Malha de uma viga simulada com elemento SOLID186

A figura 3.8 apresenta o 1º modo de vibração transversal de uma viga simulada numericamente utilizando o elemento SOLID186.

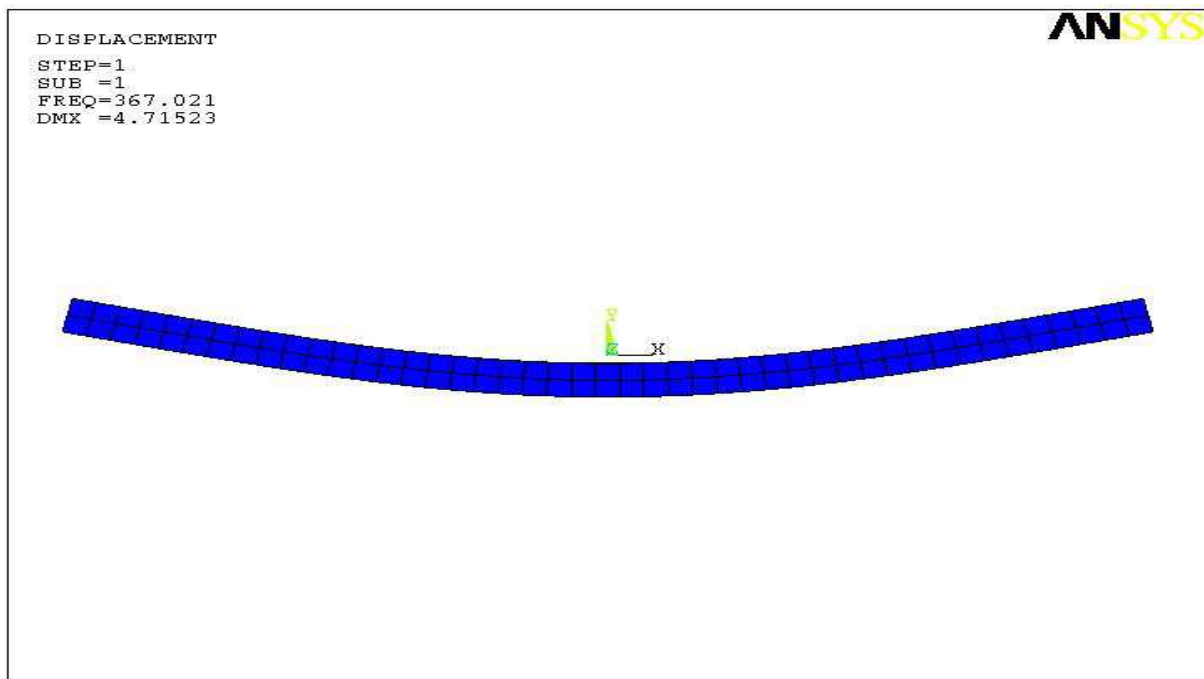


Figura 3.8 - 1º modo de vibração transversal de uma viga simulada

O segundo modo de vibração transversal de uma viga simulada com o elemento SOLID186 é mostrado na figura 3.9.

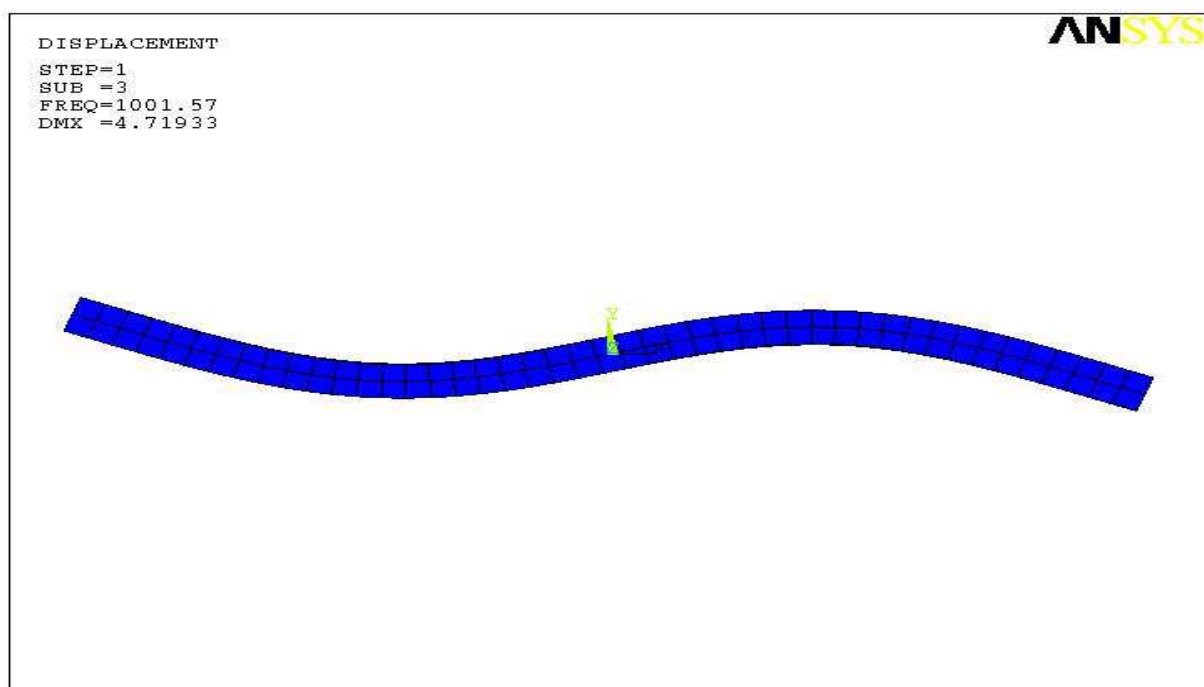


Figura 3.9 - 2º modo de vibração transversal de uma viga simulada

O 3º e último modo de vibração transversal analisado de uma viga simulada usando o elemento SOLID186 é representado na figura 3.10.

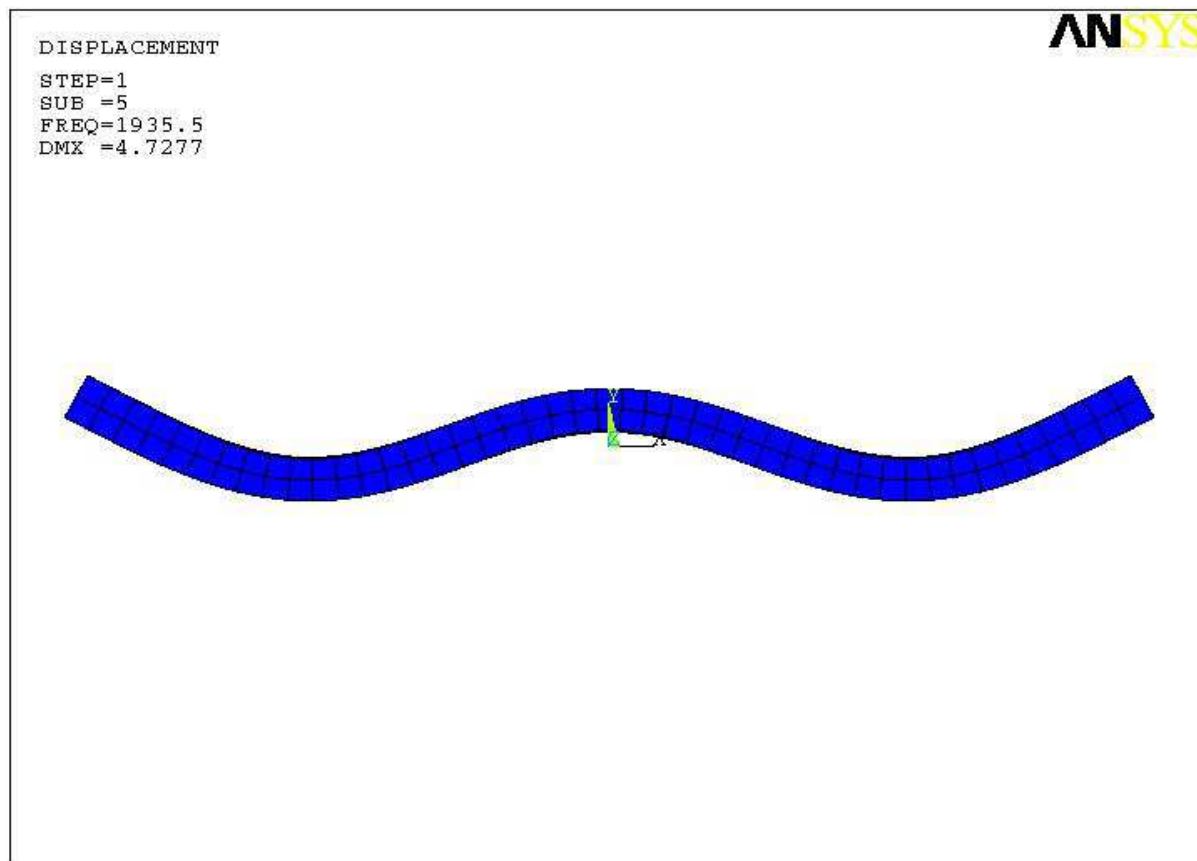


Figura 3.10 - 3º modo de vibração transversal de uma viga simulada

3.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A seção apresenta os parâmetros e a descrição do modelo teórico utilizado para avaliar a influência da fração volumétrica de fibras, quantidade e diâmetros dos fios.

3.3.1 Parâmetros e Descrição dos Modelos

Um estudo teórico acerca da influência de certos parâmetros fundamentais nas vigas SMAHC aponta quais desses devem ser enfatizados para que as respostas desejadas do material sejam correspondidas. Mesmo que a proposta do material no presente trabalho seja a sua utilização no controle de vibração, onde a resposta desejada é uma grande variação percentual das frequências naturais das vigas quando os seus fios de Ni-Ti passam da fase martensítica para a fase austenítica, a avaliação da variação do módulo efetivo entre as fases dos fios também deve ser considerada, pois a mesma pode ser muito útil em aplicações na área estática. As duas análises efetuadas serão discutidas a diante com a exposição dos parâmetros abordados e a descrição dos modelos utilizados.

Nas duas análises, uma viga genérica foi considerada com as dimensões apresentadas na tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Dimensões da viga nas análises de sensibilidade

Comprimento [mm]	Espessura [mm]	Largura [mm]
300	12	31,4

Um código contendo as equações de 1 a 25 foi implementado no EES (Engineering Equation Solver) a fim de se encontrar com maior facilidade os parâmetros esperados e criar os gráficos desejados.

Na primeira análise, os parâmetros variáveis foram: número de fios (0, 2, 4, 6, 8, 10 e 12), fração volumétrica de fibras nas lâminas de manta/epóxi ($0 \leq V_{\text{FibrasLamMantaEpóxi}} \leq 0,50$) e fração volumétrica de fibras nas lâminas que contém os fios ($V_{\text{FibrasLamFios}}=0$; $V_{\text{FibrasLamFios}}=0,15$ e $V_{\text{FibrasLamFios}}=0,3$). O diâmetro dos fios utilizados nessa análise foi de 1,05 mm (mesmo diâmetro dos fios utilizados na confecção das vigas). Os valores dos parâmetros apresentados anteriormente foram estabelecidos de acordo com as possibilidades laboratoriais existentes. As respostas esperadas foram: variação das frequências naturais entre as fases, variação do módulo efetivo entre fases, frequência natural fundamental e o módulo efetivo.

Na segunda análise, os parâmetros variáveis foram: número de fios (0, 2, 4, 6, 8, 10 e 12), fração volumétrica de fibras nas lâminas de manta/epóxi ($V_{\text{FibrasLamMantaEpóxi}}=0$ e $V_{\text{FibrasLamMantaEpóxi}}=0,50$), fração volumétrica de fibras nas lâminas que contém os fios ($V_{\text{FibrasLamFios}}=0$ e $V_{\text{FibrasLamFios}}=0,3$) e diâmetro dos fios de Ni-Ti ($d_{\text{Fios}}=0,5$ mm, $d_{\text{Fios}}=1,05$ mm, $d_{\text{Fios}}=1,5$ mm, $d_{\text{Fios}}=2,0$ mm, $d_{\text{Fios}}=2,5$ mm e $d_{\text{Fios}}=3,0$ mm). Para essa análise as respostas esperadas foram: variação das frequências naturais entre as fases e variação do módulo efetivo entre fases.

3.4 DETERMINAÇÃO DE VAZIOS

Toda formulação necessária para a determinação da fração volumétrica de vazios é apresentada na seção.

3.4.1 Formulação Necessária para Determinação de Vazios

Como as amostras possuem certa porosidade a densidade das mesmas pode ser calculada pela equação (26) que é baseada no princípio de Arquimedes.

$$\rho_{\text{amostra}} = \frac{m_{\text{seca}}}{m_{\text{saturada}} - m_{\text{aparente}}} \cdot \rho_{\text{água}} \quad (26)$$

Onde:

m_{seca} é a massa seca da amostra;

$m_{saturada}$ é a massa da amostrada saturada por 24 horas em água destilada;

$m_{aparente}$ é massa aparente da amostra obtida com auxílio do aparato mostrado na figura 2.6; e

$\rho_{água}$ é a densidade da água destilada contida no becher mostrado na figura 2.6

A fração volumétrica de vazios é dada por (Levy Neto & Pardini, 2006):

$$V_v = 1 - \rho_{amostra} \left(\frac{M_{Vidro}}{\rho_{Vidro}} + \frac{M_{Epóxi}}{\rho_{Epóxi}} + \frac{M_{Fios}}{\rho_{Fios}} \right) \quad (27)$$

Onde:

M_{vidro} é a fração mássica de fibra de vidro na amostra;

ρ_{vidro} é a densidade da fibra de vidro;

$M_{Epóxi}$ é a fração mássica de epóxi na amostra;

$\rho_{Epóxi}$ é a densidade de epóxi na amostra;

M_{Fios} é a fração mássica de fios de Ni-Ti na amostra;

$\rho_{Epóxi}$ é a densidade dos fios de Ni-Ti

4 RESULTADOS

Os conteúdos abordados nas seções são: características gerais das vigas, caracterização mecânicas, análises modais, análise de sensibilidade e determinação de vazios.

4.1 PROPRIEDADES GERAIS DAS VIGAS

A identificação das vigas de acordo com a quantidade de fios (4,6 ou 8), o tipo de cura (quente ou fria) e o tipo de vácuo (ausente, laboratório ou Hot Bonder) é feita pela tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Identificação das vigas

Viga	Número de Fios	Cura	Vácuo
1	8	Fria	Ausente
2	8	Quente	Ausente
3	8	Fria	Ausente
4	8	Quente	Laboratório
5	6	Quente	Laboratório
6	8	Quente	Hot Bonder
7	4	Quente	Hot Bonder

A tabela 4.2 apresenta o comprimento, a espessura média, a largura, a massa, a quantidade de manta de fibra de vidro-E e a quantidade de roving de cada viga. As variações encontradas nas espessuras e massas dos constituintes são acordo com o método de fabricação empregado e acarretam variações nos resultados.

Tabela 4.2 – Dados médios das vigas

Viga	Comprimento [mm]	Espessura [mm]	Largura [mm]	Massa [g]	Manta [g]	Roving [g]
1	299,16	12,29	31,55	180	67,5	0
2	298,90	12,66	31,47	182	64,5	0
3	300,18	14,37	31,39	208	72,5	5,5
4	299,31	11,41	31,43	174	71,5	13,5
5	300,17	11,49	31,50	173	71	10
6	299,84	12,40	31,47	177,5	72	10
7	300,16	8,93	31,48	131	71	10

4.2 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS VIGAS SMAHC

A presente seção apresenta os resultados analíticos e teóricos obtidos da caracterização mecânica das vigas.

4.2.1 Resultados Analíticos

As equações apresentadas na seção 3.1.1 foram utilizadas para a obtenção dos resultados analíticos apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3- Propriedades das lâminas compostas por manta de vidro-E e epóxi das vigas

Viga	$V_{LamMantaEpóxi}$ [cm ³]	$V_{FibrasLamMantaEpóxi}$ (%)	$V_{MatrizLamMantaEpóxi}$ (%)	$E_{LamMantaEpóxi}$ [GPa]
1	5,66	28,07	71,93	11,49
2	5,84	25,97	74,03	10,86
3	6,80	25,08	74,92	10,60
4	5,15	32,66	67,34	12,89
5	5,22	31,99	68,01	12,69
6	5,72	29,63	70,37	11,96
7	3,80	44,01	55,99	16,66

Evidencia-se que as vigas produzidas com vácuo apresentam uma alta fração volumétrica de fibras em suas lâminas compostas apenas por manta e epóxi. Como o módulo de elasticidade dessas lâminas é altamente dependente da fração volumétrica de fibras (vide equação (6)), observa-se que as vigas produzidas com vácuo (4, 5, 6 e 7) apresentam elevados módulos de elasticidade nessas lâminas quando comparadas às vigas produzidas sem vácuo (1, 2 e 3).

As propriedades das lâminas compostas por fios de SMA, roving e epóxi podem ser calculadas com as equações apresentadas na seção 3.1.2 (equações de 8 a 17). Os resultados são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4- Propriedades das lâminas compostas por fios de SMA, roving e epóxi das vigas

Viga	$V_{LamFios}$ [cm ³]	$V_{FibrasLamFios}$ (%)	$V_{FiosLamFios}$ (%)	$V_{MatrizLamFios}$ (%)	$E_{LamFiosAustenítico-1}$ [GPa]	$E_{LamFiosMartenítico-1}$ [GPa]
1	9,91	0	10,46	89,54	8,19	5,51
2	9,88	0	10,48	89,52	8,21	5,51
3	9,89	11,12	10,51	78,37	15,61	12,91
4	9,88	27,33	10,50	62,17	26,39	23,69
5	9,93	20,15	7,85	72,00	20,42	18,40
6	9,91	20,19	10,48	69,33	21,63	18,94
7	9,92	20,16	5,24	74,60	19,26	17,91

Como o volume de uma lâmina composta por fios de SMA, roving e epóxi é praticamente idêntico independente do método de fabricação (a espessura dessas lâminas é do tamanho do diâmetro

dos fios de SMA e a largura e o comprimento das vigas são praticamente iguais) a diferença entre os módulos de elasticidade observados entre essas camadas devem-se a quantidade de roving e de fios utilizados.

As propriedades das vigas híbridas simétricas são calculadas com as equações da seção 3.1.3 (equações de 18 a 22) e da seção 3.1.4 (equação (23)) e são apresentadas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Propriedades das vigas híbridas simétricas

Viga	V_{Viga} [cm ³]	Densidade [kg/m ³]	V_{Fibras} (%)	V_{Fios} (%)	V_{Matriz} (%)	$E_{F Aust Analítico}$ [GPa]	$E_{F Mart Analítico}$ [GPa]
1	116	1551,74	23,27	1,79	74,94	10,61	9,90
2	119,08	1528,32	21,66	1,74	76,60	10,17	9,47
3	135,40	1536,15	23,04	1,54	75,42	11,76	11,14
4	107,34	1621,06	31,68	1,93	66,39	16,74	15,97
5	108,64	1592,39	29,82	1,44	68,74	14,87	14,30
6	117,01	1517,02	28,03	1,78	70,19	14,52	13,81
7	84,40	1552,50	38,40	1,23	60,37	17,57	17,10

Os resultados demonstram que os métodos de fabricação influenciam fortemente as frações volumétricas da matriz e também das fibras de vidro. Os módulos de elasticidade efetivos e as espessuras também variam de forma significativa.

4.2.2 Resultados Obtidos do Ensaio de Flexão das Vigas

Os valores dos módulos de elasticidades experimentais obtidos mediante o uso da metodologia apresentada na seção 3.2 são apresentados na tabela abaixo:

Tabela 4.6- Módulos de elasticidade experimentais e diferenças percentuais

Viga	$E_{Aust Experimental}$ [GPa]	$E_{Mart Experimental}$ [GPa]	Diferença Percentual (%)
1	9,37	8,40	11,55
2	9,38	8,60	9,07
3	9,44	8,84	6,79
4	13,36	13,34	0,15
5	12,86	12,07	6,55
6	11,91	11,90	0,08
7	13,99	13,92	0,50

Como já era esperado, a Tabela 4.6 confirma a grande influência do método de fabricação empregado nos módulos de elasticidade efetivos encontrados. Pode-se observar que as vigas 4 (com vácuo de 0,4 Kgf./cm²), 6 e 7 (ambas com vácuo de 0,64 Kgf./cm²), possuem módulos de elasticidade praticamente idênticos na fase austenítica e na fase martensítica.

4.2.3 Comparação Entre os Resultados Analíticos e Experimentais

Finalmente, a Tabela 4.7 compara os valores dos módulos efetivos e de elasticidade experimentais.

Tabela 4.7- Comparação entre os módulos efetivos e de elasticidade experimentais

Viga	$E_{F \text{ Aust Analítico}}$ [GPa]	$E_{\text{ Aust Experimental}}$ [GPa]	Diferença Percentual (%)	$E_{F \text{ Mart Analítico}}$ [GPa]	$E_{\text{ Mart Experimental}}$ [GPa]	Diferença Percentual (%)
1	10,61	9,37	13,23	9,90	8,40	17,86
2	10,17	9,38	8,42	9,47	8,60	10,12
3	11,76	9,44	24,58	11,14	8,84	26,02
4	16,74	13,36	25,30	15,97	13,34	19,72
5	14,87	12,86	15,63	14,30	12,07	18,48
6	14,52	11,91	21,91	13,81	11,90	16,05
7	17,57	13,99	25,59	17,10	13,92	22,84

As diferenças percentuais encontradas entre os resultados analíticos e experimentais encontrados variaram de 8,40% a 26,02%, isso indica que o método analítico utilizado superestima os módulos de elasticidade experimentais. Ou seja, os módulos analíticos são sempre maiores que os experimentais. Nota-se também que nas vigas 4, 6 e 7 o modelo analítico não foi capaz de detectar a pequena variação entre as fases austenítica e martensítica observadas no ensaio de flexão.

4.3 ANÁLISE MODAL

Essa seção apresenta os resultados analíticos e numéricos para as análises modais realizadas.

4.3.1 Resultados Analíticos

A figura 4.1 apresenta os valores das frequências naturais para a vibração transversal de cada viga na condição livre-livre em seus estados austeníticos e martensíticos utilizando-se os módulos efetivos. As frequências foram obtidas com auxílio das tabelas 4.2 e 4.5 juntamente com a formulação apresentada na seção 3.3. A tabela 1 do Anexo I apresenta os valores apresentados na figura 4.1.

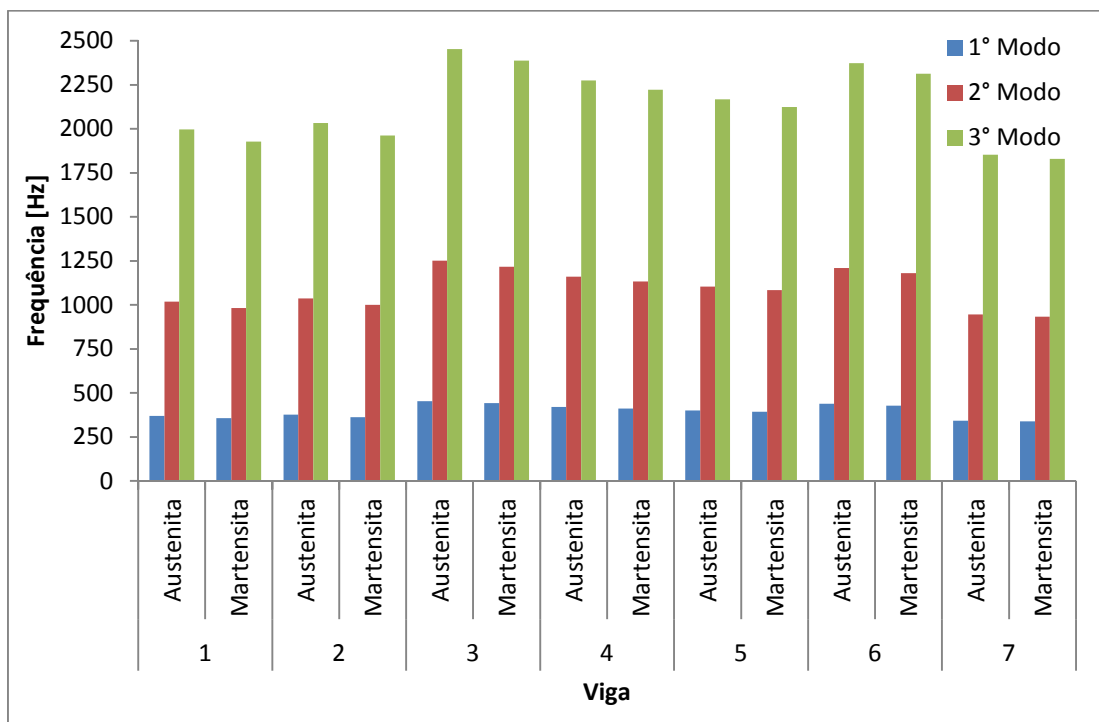


Figura 4.1 – Frequências naturais analíticas com módulo efetivo

A figura 4.2 apresenta a diferença percentual para cada modo de vibração entre as fases austenítica e martensítica utilizando o módulo efetivo.

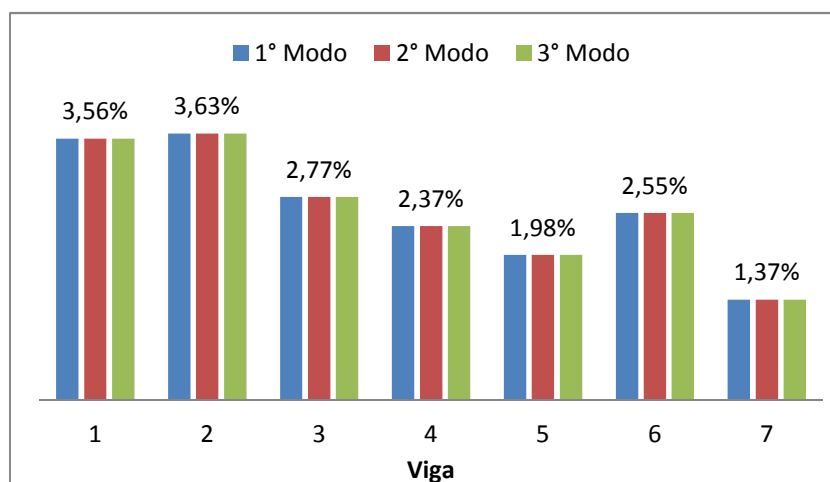


Figura 4.2 – Diferença percentual entre as fases de cada modo de vibração com módulo efetivo

Utilizando-se a formulação apresentada na seção 3.3, os valores experimentais dos módulos de elasticidade e os dados das tabelas 4.2 e 4.6, pode-se obter as frequências naturais apresentadas na figura 4.3. A figura apresenta os valores das frequências naturais para uma vibração transversal de cada viga na condição livre-livre nos estados austeníticos e martensíticos. Os dados também podem ser encontrados na tabela 3 do Anexo 1.

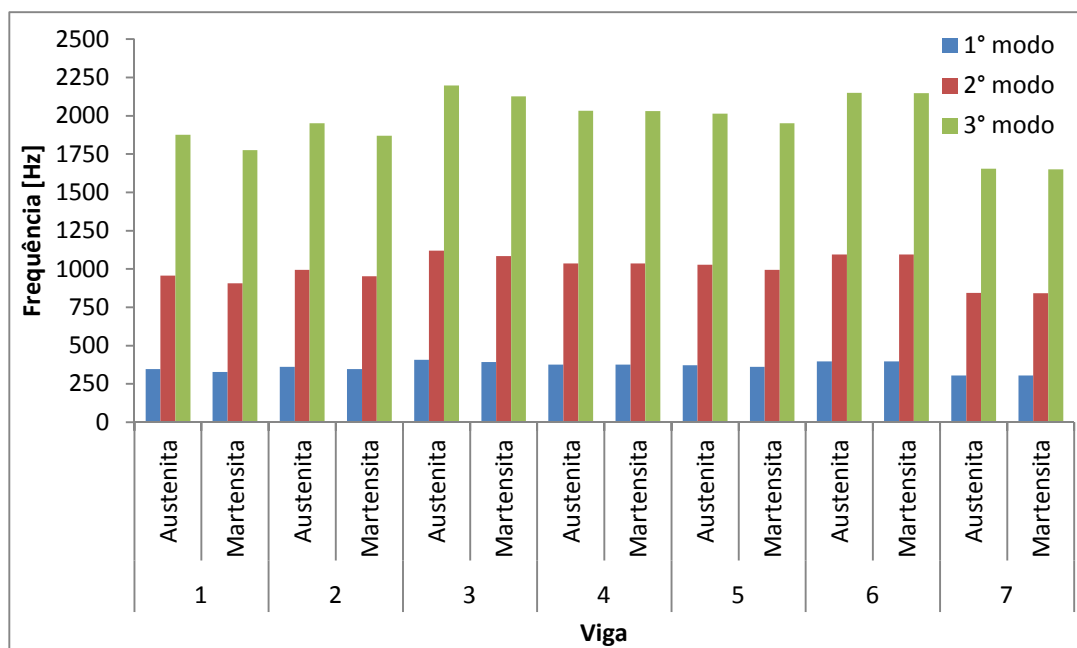


Figura 4.3 – Frequências naturais analíticas com módulo de elasticidade experimental

A figura 4.4 apresenta a diferença percentual entre cada modo de vibração entre as duas fases dos fios com módulo de elasticidade experimental.

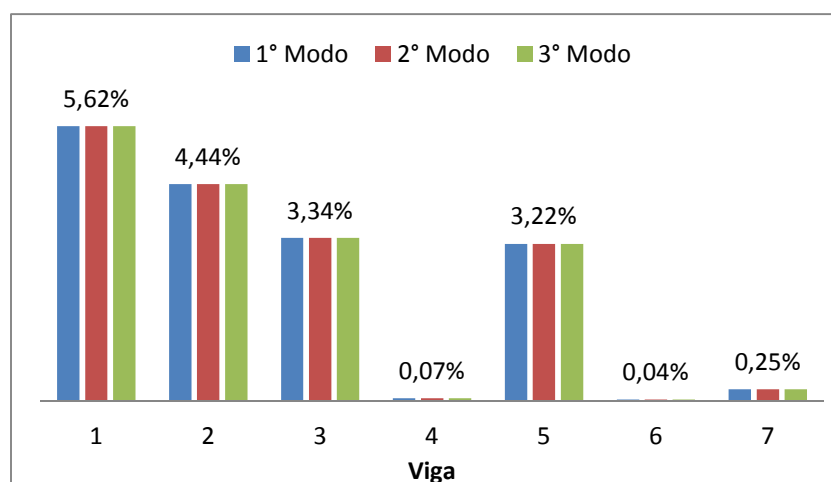


Figura 4.4 – Diferença percentual entre as fases de cada modo de vibração com módulo de elasticidade experimental

4.3.2 Resultados Obtidos com as Simulações Numéricas

O grau de refinamento da malha em uma análise modal que utiliza o método de elementos finitos é fundamental para obtenção de bons resultados, por isso um teste de convergência inicial deve ser realizado para que o número de elementos possa ser definido. Para o elemento BEAM189, o teste

de convergência efetuado utilizando-se o módulo efetivo aponta, para os dois estados, uma convergência com a utilização de 100 elementos (vide tabela 5 do Anexo I). As frequências naturais encontradas com a utilização desse elemento com o módulo efetivo podem ser encontradas na tabela 6 do Anexo I. A diferença percentual de cada frequência natural encontrada com essa simulação em relação à sua respectiva frequência natural analítica é apresentada na figura 4.5.

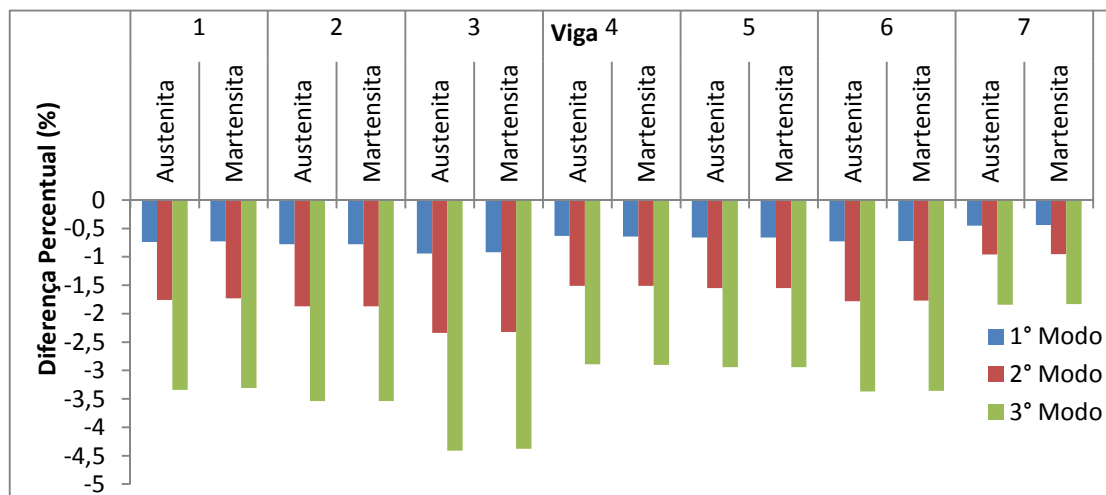


Figura 4.5 – Diferença percentual entre os resultados da simulação com elemento BEAM189 com módulo efetivo e os resultados analíticos

A análise de convergência para o elemento SHELL281 utilizando-se o módulo efetivo pode ser encontrada na tabela 8 do Anexo I. O teste de convergência aponta, para os dois estados, uma convergência nos valores com o uso de 270 elementos. As frequências naturais encontradas com essas simulações são encontradas na tabela 9 do Anexo I.

As diferenças percentuais observadas entre as frequências naturais utilizando o elemento SHELL281 com módulo efetivo e os resultados analíticos são apresentadas na figura 4.6.

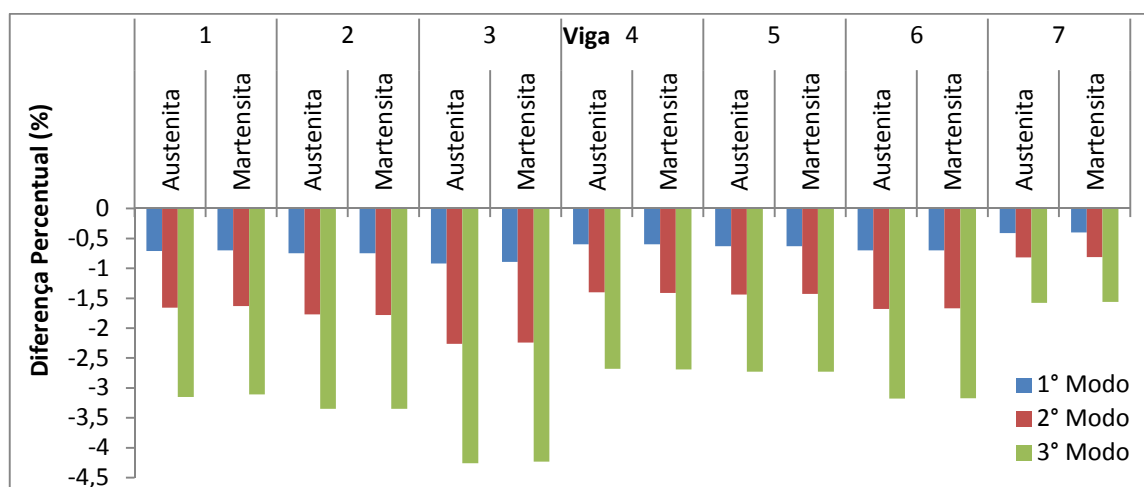


Figura 4.6 – Diferença percentual entre a simulação com elemento SHELL281 com módulo efetivo e os resultados analíticos

O teste de convergência para o SOLID186 com o módulo efetivo é apresentado na tabela 11 do Anexo I. O teste efetuado aponta uma convergência quando 540 elementos são utilizados. As simulações com esse tipo de elemento foram efetuadas utilizando-se 540 elementos e os valores obtidos para as frequências naturais são mostrados na tabela 12 do Anexo I.

A figura 4.7 apresenta a diferença percentual de cada frequência natural da tabela 11 do Anexo I em relação à sua respectiva frequência natural analítica.

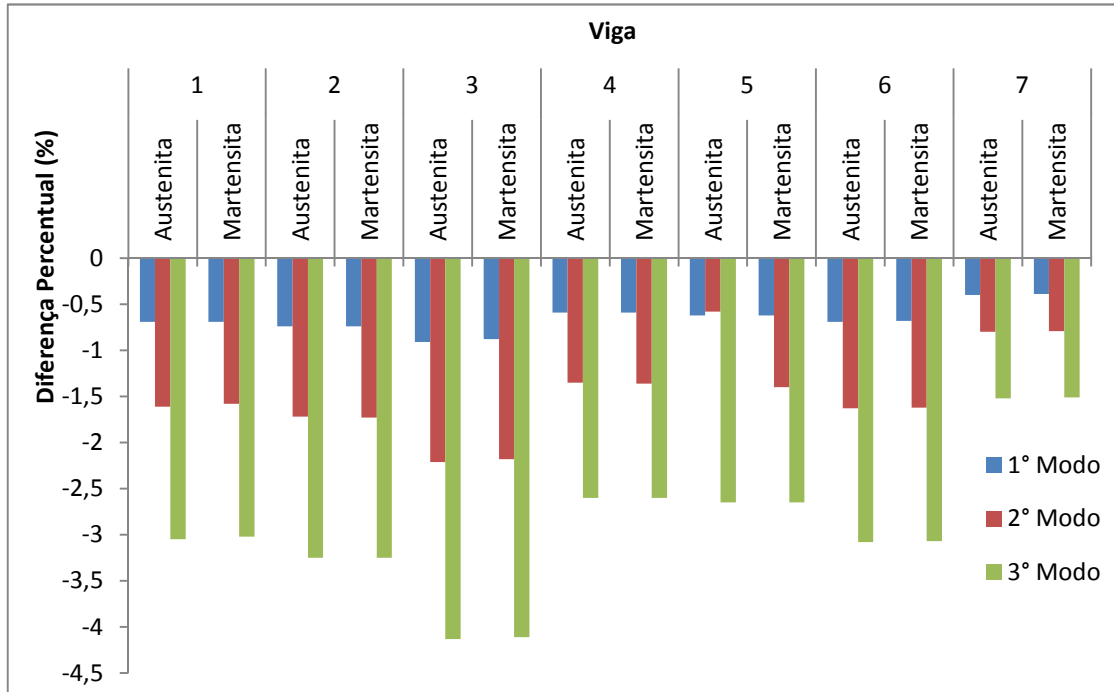


Figura 4.7 – Diferença percentual entre a simulação com SOLID186 com módulo efetivo e os resultados analíticos

A tabela 4.8 apresenta todas as diferenças percentuais encontradas nas simulações com os elementos BEAM189, SHELL281 e SOLID186 em relação aos resultados analíticos utilizando-se o módulo efetivo.

Tabela 4.8- Diferenças percentuais entre as simulações e os resultados analíticos com módulo efetivo

Viga	Tipo	Beam189			Shel1281			Solid186		
		Diferença Percentual (%)			Diferença Percentual (%)			Diferença Percentual (%)		
		1° modo	2° modo	3° modo	1° modo	2° modo	3° modo	1° modo	2° modo	3° modo
1	Austenita	-0,74	-1,76	-3,34	-0,71	-1,66	-3,15	-0,69	-1,61	-3,05
	Martensita	-0,73	-1,73	-3,31	-0,70	-1,63	-3,11	-0,69	-1,58	-3,02
2	Austenita	-0,78	-1,87	-3,54	-0,75	-1,77	-3,35	-0,74	-1,72	-3,25
	Martensita	-0,78	-1,87	-3,54	-0,75	-1,78	-3,35	-0,74	-1,73	-3,25
3	Austenita	-0,94	-2,34	-4,41	-0,92	-2,26	-4,26	-0,91	-2,21	-4,13
	Martensita	-0,92	-2,32	-4,38	-0,89	-2,24	-4,23	-0,88	-2,18	-4,11
4	Austenita	-0,63	-1,51	-2,89	-0,60	-1,40	-2,68	-0,59	-1,35	-2,60
	Martensita	-0,64	-1,51	-2,90	-0,60	-1,41	-2,69	-0,59	-1,36	-2,60
5	Austenita	-0,66	-1,55	-2,94	-0,63	-1,44	-2,73	-0,62	-1,38	-2,65
	Martensita	-0,66	-1,55	-2,94	-0,63	-1,43	-2,73	-0,62	-1,40	-2,65
6	Austenita	-0,73	-1,78	-3,37	-0,70	-1,68	-3,18	-0,69	-1,63	-3,08
	Martensita	-0,72	-1,77	-3,36	-0,70	-1,67	-3,17	-0,68	-1,62	-3,07
7	Austenita	-0,45	-0,96	-1,84	-0,41	-0,82	-1,58	-0,40	-0,80	-1,52
	Martensita	-0,44	-0,95	-1,83	-0,40	-0,81	-1,56	-0,39	-0,79	-1,51

O segundo procedimento adotado foi repetir todo procedimento realizado anteriormente, mas utilizando-se o módulo de elasticidade experimental.

Para determinar o número de elementos a ser utilizado nas simulações com o elemento BEAM189 para o caso das simulações com o módulo de elasticidade experimental, um teste de convergência foi realizado e seus valores são mostrados na tabela 14 do Anexo I.

O teste aponta uma convergência quando 100 elementos são utilizados, por isso esse número de elementos foi utilizado nas simulações com o elemento e os resultados das simulações são apresentados na tabela 15 do Anexo I.

As diferenças percentuais das frequências naturais apresentadas na tabela 15 do Anexo I em relação aos valores obtidos numericamente com o uso do elemento BEAM189 mostrados na tabela 14 do Anexo I são apresentadas na figura 4.8.

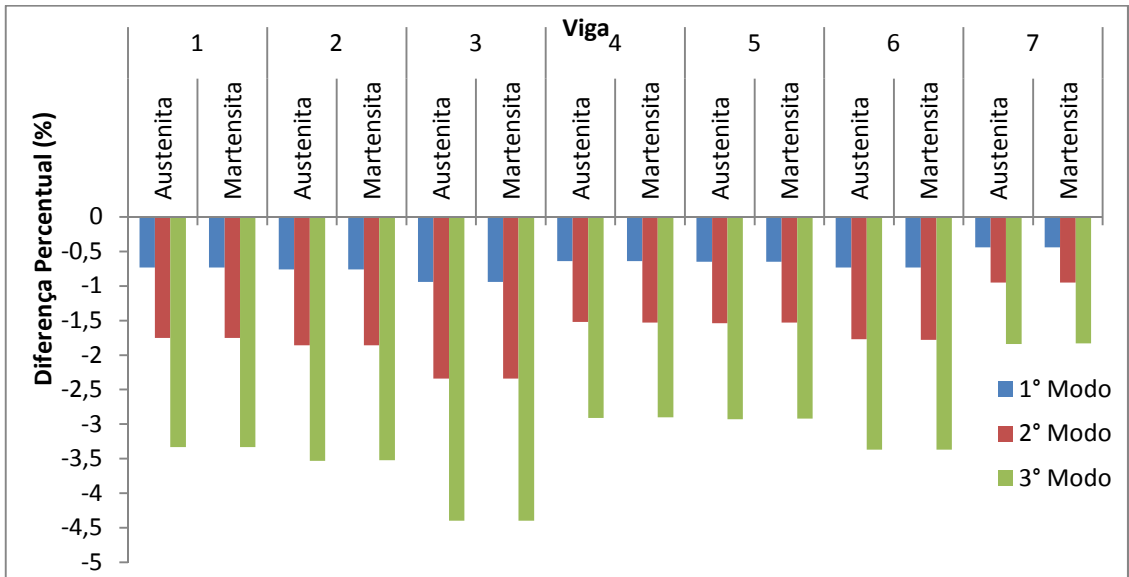


Figura 4.8- Diferença percentual entre a simulação com elemento BEAM189 com módulo de elasticidade experimental e os resultados analíticos

Para o elemento SHELL281, utilizando-se o módulo de elasticidade experimental, uma análise de convergência foi efetuada e os valores desse teste são mostrados na tabela 16 do Anexo I.

Observa-se do teste que o uso de 270 elementos é adequado para as simulações e por isso esse foi o número de elementos utilizados nas simulações com o elemento SHEL281 utilizando-se o módulo de elasticidade experimental. Os resultados encontrados com essa simulação são apresentados na tabela 17 do Anexo I.

A figura 4.9 apresenta a diferença percentual de cada frequência natural da tabela 16 do Anexo I em relação à sua respectiva frequência natural analítica apresentada na tabela 3 do Anexo I.

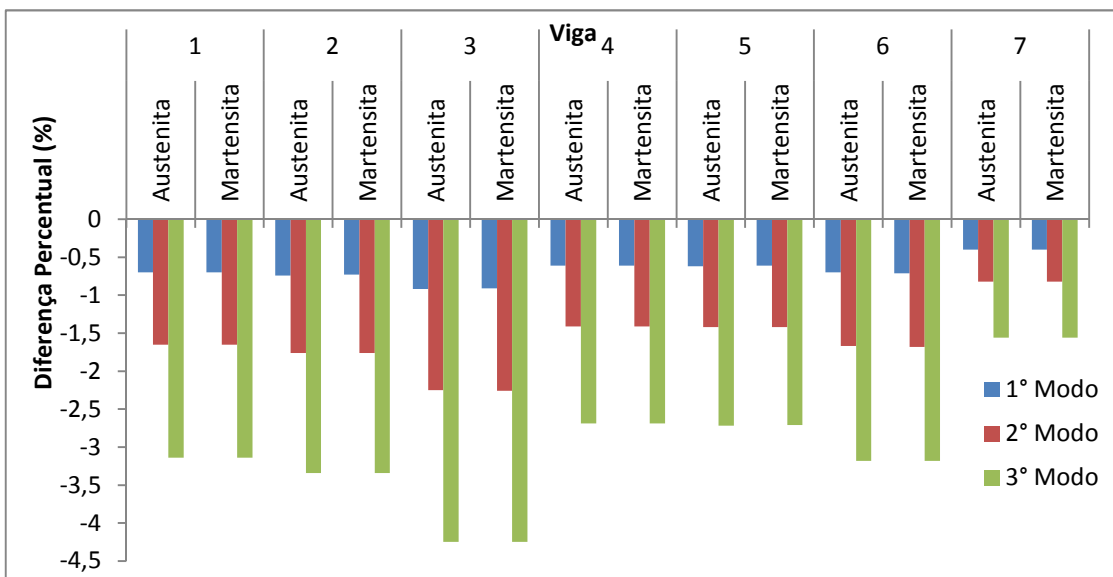


Figura 4.9 – Diferença percentual entre a simulação com SHELL281 com módulo de elasticidade experimental e os resultados analíticos

Para o elemento SOLID186 o teste de convergência com o módulo de elasticidade experimental é apresentado na tabela 19 do Anexo I.

O teste aponta a convergência quando 540 elementos são utilizados. As simulações com o elemento SOLID186 utilizando-se o módulo de elasticidade experimental foram realizadas com 540 elementos e os valores obtidos são mostrados na tabela 20 do Anexo I.

A figura 4.10 apresenta a diferença percentual de cada frequência natural da tabela 20 do Anexo I em relação à sua respectiva frequência natural analítica.

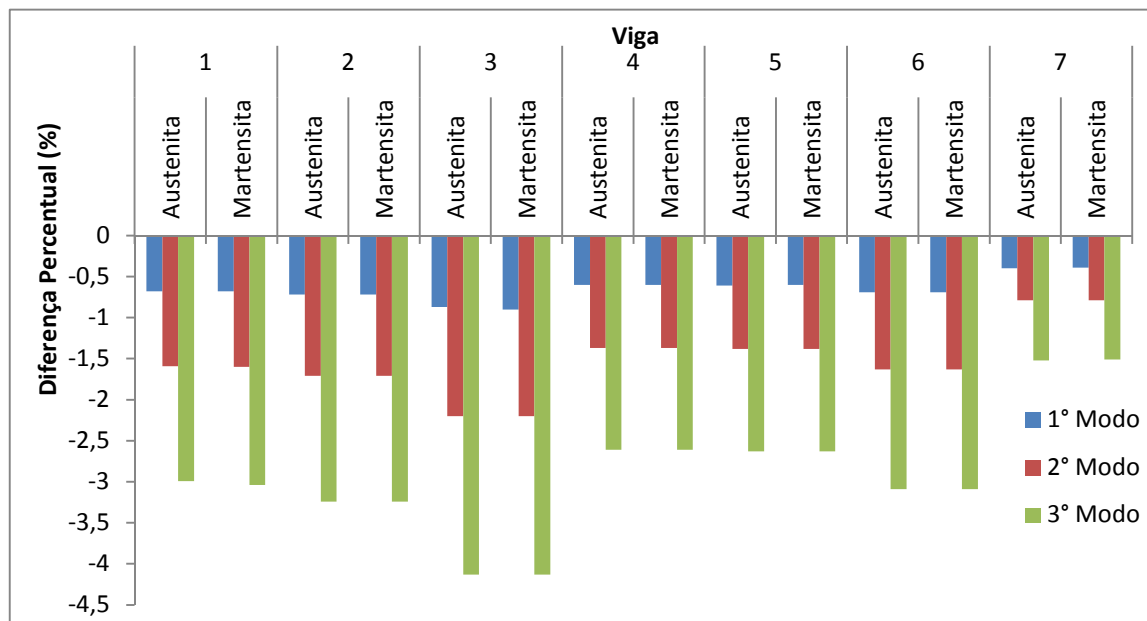


Figura 4.10- Diferença percentual entre a simulação com SOLID186 com módulo de elasticidade experimental e os resultados analíticos

A tabela 4.9 apresenta todas as diferenças percentuais encontradas nas simulações com os elementos BEAM189, SHELL281 e SOLID186 em relação aos resultados analíticos utilizando-se o módulo de elasticidade experimental.

Tabela 4.9- Diferenças percentuais entre as simulações e os resultados analíticos com módulo de elasticidade experimental

Viga	Tipo	Beam189			Shel1281			Solid186		
		Diferença Percentual (%)			Diferença Percentual (%)			Diferença Percentual (%)		
		1° modo	2° modo	3° modo	1° modo	2° modo	3° modo	1° modo	2° modo	3° modo
1	Austenita	-0,73	-1,75	-3,33	-0,70	-1,65	-3,14	-0,68	-1,59	-2,99
	Martensita	-0,73	-1,75	-3,33	-0,70	-1,65	-3,14	-0,68	-1,60	-3,04
2	Austenita	-0,76	-1,86	-3,53	-0,74	-1,76	-3,34	-0,72	-1,71	-3,24
	Martensita	-0,76	-1,86	-3,52	-0,73	-1,76	-3,34	-0,72	-1,71	-3,24
3	Austenita	-0,94	-2,34	-4,40	-0,92	-2,25	-4,25	-0,87	-2,20	-4,13
	Martensita	-0,94	-2,34	-4,40	-0,91	-2,26	-4,25	-0,90	-2,20	-4,13
4	Austenita	-0,64	-1,52	-2,91	-0,61	-1,41	-2,69	-0,60	-1,37	-2,61
	Martensita	-0,64	-1,52	-2,90	-0,61	-1,41	-2,69	-0,60	-1,37	-2,61
5	Austenita	-0,65	-1,54	-2,93	-0,62	-1,42	-2,72	-0,61	-1,38	-2,63
	Martensita	-0,65	-1,53	-2,92	-0,61	-1,42	-2,71	-0,60	-1,38	-2,63
6	Austenita	-0,73	-1,77	-3,37	-0,70	-1,67	-3,18	-0,69	-1,63	-3,09
	Martensita	-0,73	-1,78	-3,37	-0,71	-1,68	-3,18	-0,69	-1,63	-3,09
7	Austenita	-0,44	-0,95	-1,84	-0,40	-0,82	-1,56	-0,40	-0,79	-1,52
	Martensita	-0,44	-0,95	-1,83	-0,40	-0,82	-1,56	-0,39	-0,79	-1,51

Uma simulação numérica cujas propriedades de cada camada são definidas individualmente consegue discretizar cada camada que compõe o laminado de forma a modelá-lo da maneira mais próxima da realidade. Sendo assim, as vigas foram então simuladas com as propriedades de cada camada com os valores obtidos com as equações da seção 3.1.1 e os resultados foram denominados como padrão. A figura 4.11 apresenta as variações dos resultados obtidos modelando-se a viga como um material isotrópico com módulo de elasticidade igual ao módulo de elasticidade efetivo e densidade igual à densidade média da viga híbrida compósita em relação aos resultados encontrados com a simulação padrão. Os resultados apresentados pela figura 4.11 são para as duas fases dos fios e para os três primeiros modos de vibração para cada uma das vigas.

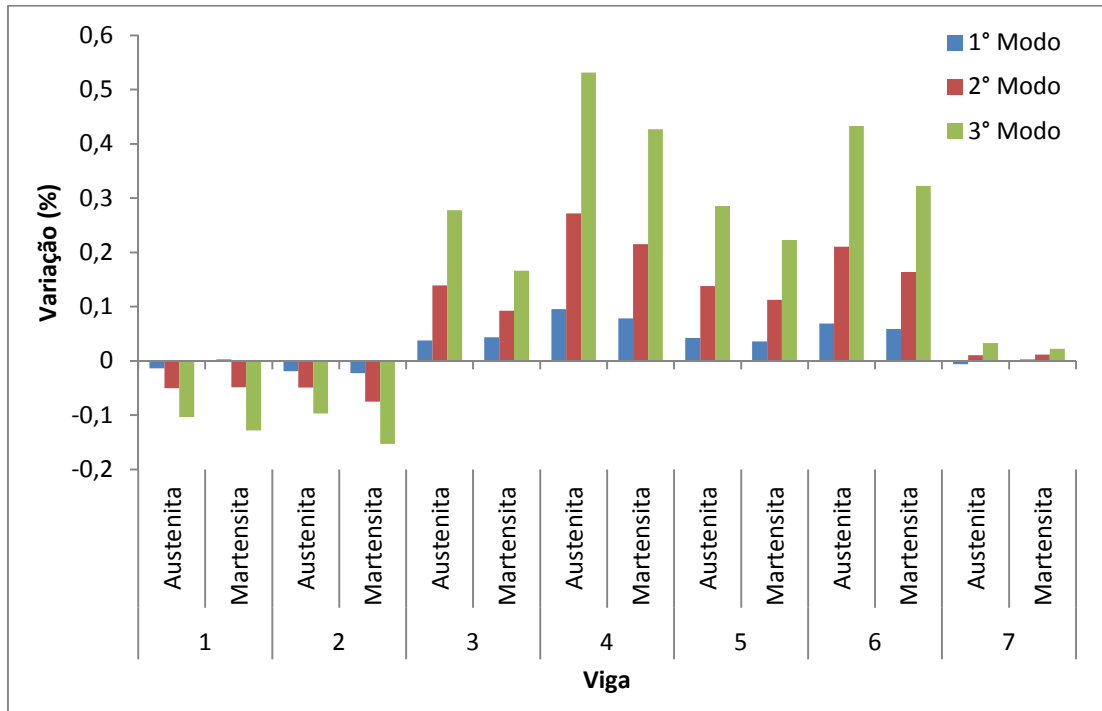


Figura 4.11- Variação da simulação da viga isotrópica em relação ao resultado padrão nas duas fases

Observa-se que as maiores variações encontradas entre a simulação como viga isotrópica e a simulação padrão são encontradas na viga 4. Nessa viga, as maiores variações são encontradas quando o fio está em sua fase austenítica e são de 0,1% (1° modo), 0,27% (2° modo) e 0,53% (3° modo).

Como a equação (23), que define o módulo efetivo, não leva em conta a densidade de cada camada, deve-se analisar a influência da mesma sobre as análises modais. Por isso uma segunda análise foi realizada levando em conta os seguintes parâmetros para os módulos de elasticidade: $E_{LamMantaEpóxi} = E_{LamFios} = E_F$. A densidade das camadas de manta/epóxi foi considerada igual a $\rho_{LamMantaEpóxi}$ e a densidade das camadas que contém os fios foi considerada como $\rho_{LamFios}$. A figura 4.12 apresenta as variações dessa simulação com os fios nas duas fases com a simulação que considera a viga como um material isotrópico com as densidades de cada cama iguais a densidade média da viga híbrida compósita.

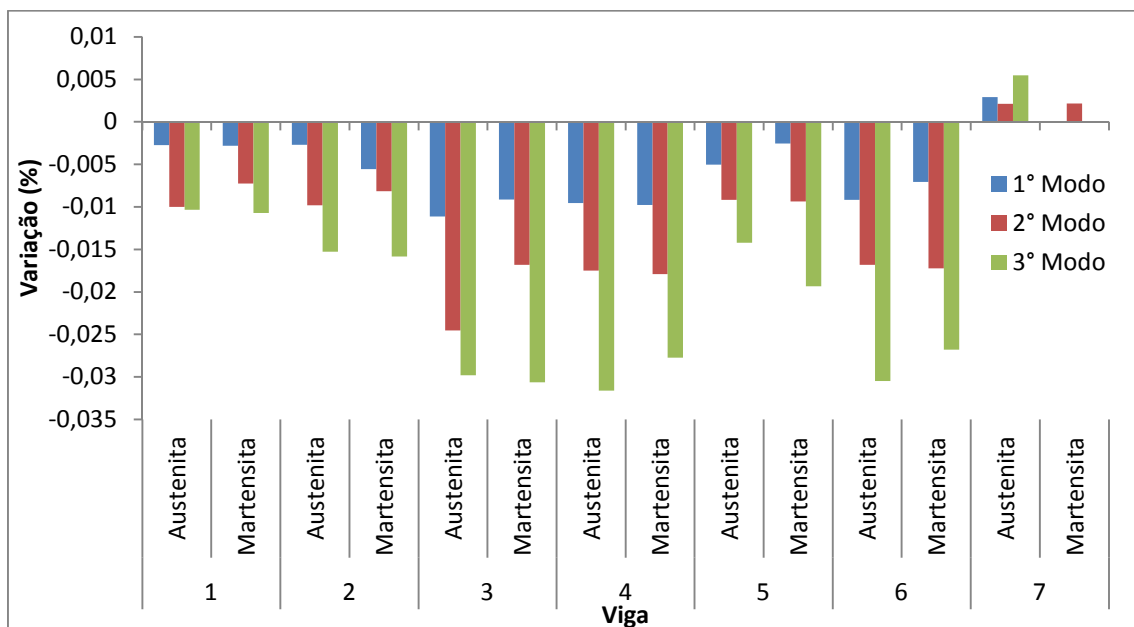


Figura 4.12 – Variação da simulação da viga com $E_{LamMantaEpóxi} = E_{LamFios} = E_F$ e densidades próprias em relação a viga isotrópica com densidade uniforme nas duas fases do fio

As maiores variações, em módulo, para o 1° modo e 2° modo são encontradas na viga 3 e são de, respectivamente, 0,01% e 0,025%. A viga 4 apresenta, em módulo, a maior variação no 3° modo (0,031%).

Os resultados encontrados com a segunda análise são agora comparados com os resultados da simulação padrão. A figura 4.13 apresenta as variações encontradas com os fios na austenita e na martensita.

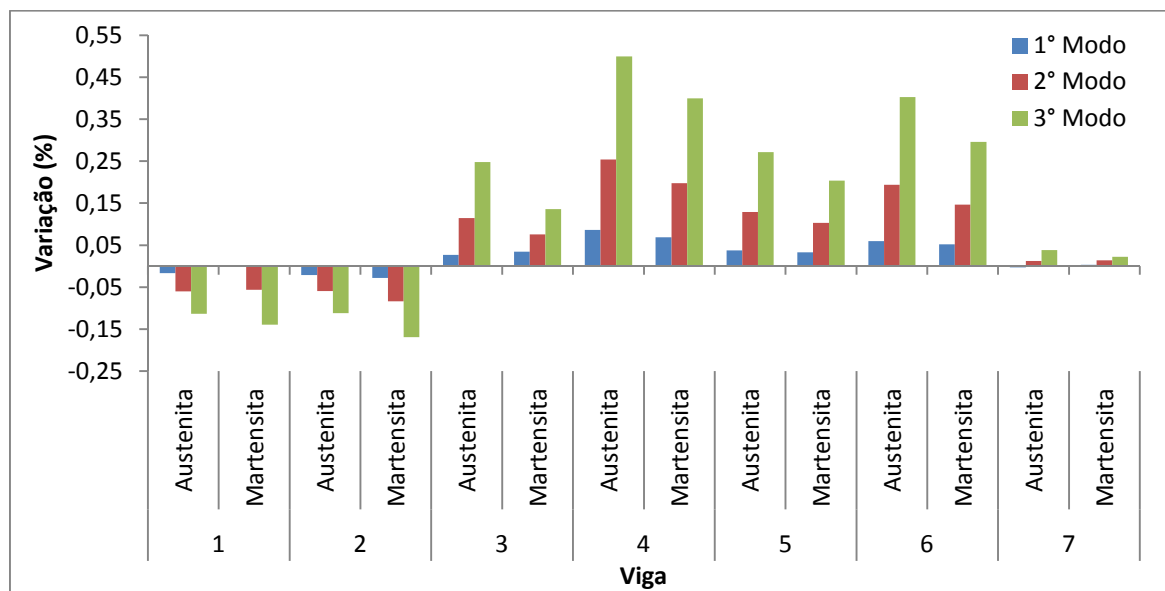


Figura 4.13 – Variação da simulação da viga com $E_{LamMantaEpóxi} = E_{LamFios} = E_F$ e densidades próprias em relação a simulação padrão nas duas fases

Quando os fios estão em sua fase austenítica, a viga 4 apresenta as maiores variações para os três primeiros modos. Os valores encontrados são de 0,09% (1° modo), 0,25% (2° modo) e 0,5% (3° modo).

4.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Essa seção apresenta os resultados obtidos com o estudo teórico de análise de sensibilidade de parâmetros.

4.4.1 Resultados do Estudo Teórico

O gráfico da figura 4.14 apresenta a variação da frequência natural entre as fases dos fios de Ni-Ti pelo aumento da fração volumétrica de fibras nas camadas de manta/epóxi, já o gráfico da figura 4.15 apresenta a variação dos módulos efetivos entre as fases dos fios pelo aumento da fração volumétrica de fibras nas camadas de manta/epóxi. Os dois gráficos foram construídos utilizando-se $V_{\text{FibrasLamFios}}=0$. As diversas curvas nos gráficos representam a quantidade de fios na viga idealizada.

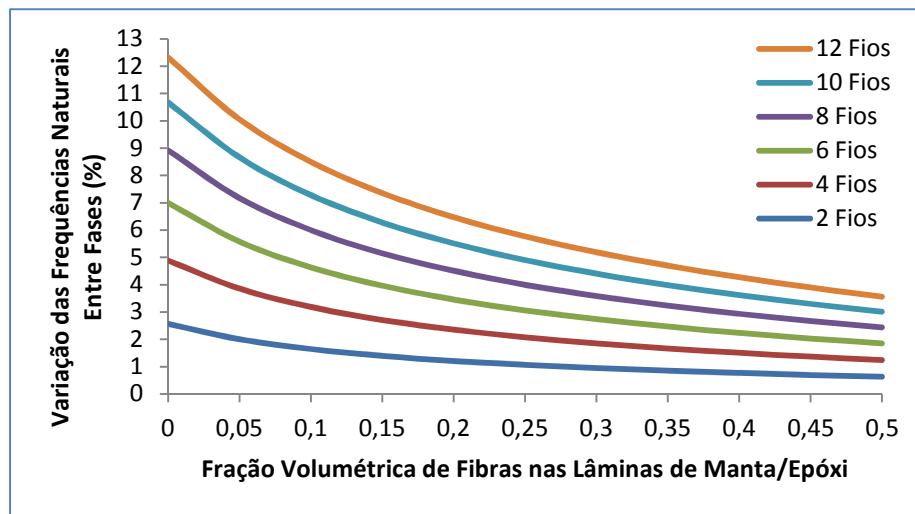


Figura 4.14 – Variação das frequências naturais entre fases pela $V_{\text{FibrasLamMantaEpóxi}}$ com $V_{\text{FibrasLamFio}} = 0$

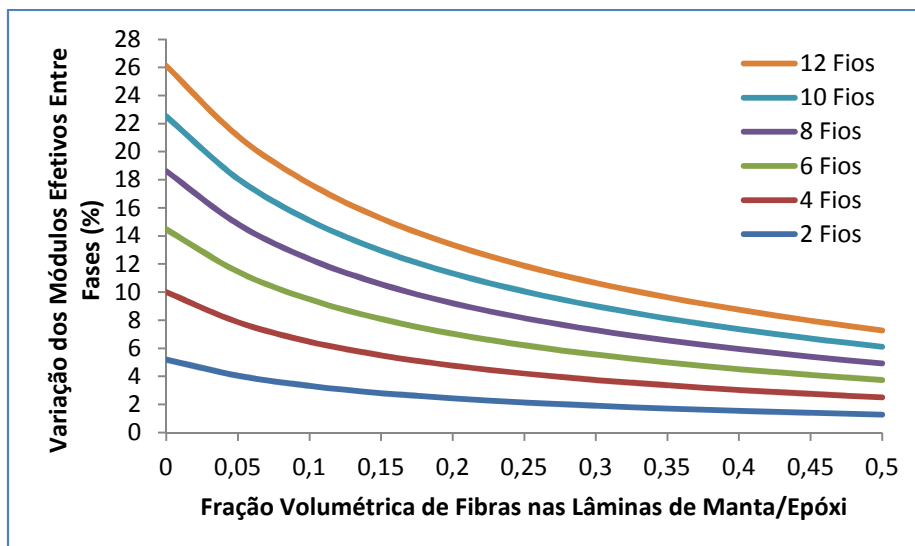


Figura 4.15 – Variação dos módulos efetivos entre fases pela $V_{\text{FibrasLamMantaEpóxi}}$ com $V_{\text{FibrasLamFio}} = 0$

O gráfico da figura 4.14 apresenta uma redução da variação das frequências naturais entre as fases dos fios com o aumento da $V_{\text{FibrasLamMantaEpóxi}}$ para todas as curvas apresentadas. De maneira análoga ao gráfico da figura 4.14, observa-se do gráfico da figura 4.15 uma redução da variação dos módulos efetivos entre as fases dos fios com o aumento da $V_{\text{FibrasLamMantaEpóxi}}$ para todas as curvas.

Os gráficos das figuras 4.16 e 4.17 foram construídos de maneira semelhante aos gráficos das figura 4.15 e 4.16, diferenciando-se apenas pela utilização de uma $V_{\text{FibrasLamFios}}=0,15$ ao invés de $V_{\text{FibrasLamFios}}=0$.

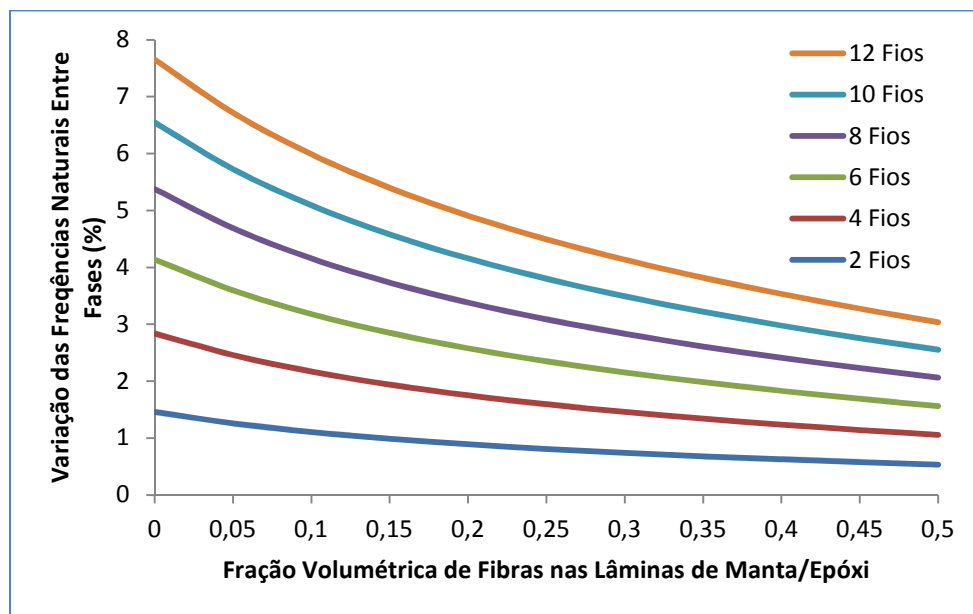


Figura 4.16 – Variação das frequências naturais entre fases pela $V_{\text{FibrasLamMantaEpóxi}}$ com $V_{\text{FibrasLamFio}} = 0,15$

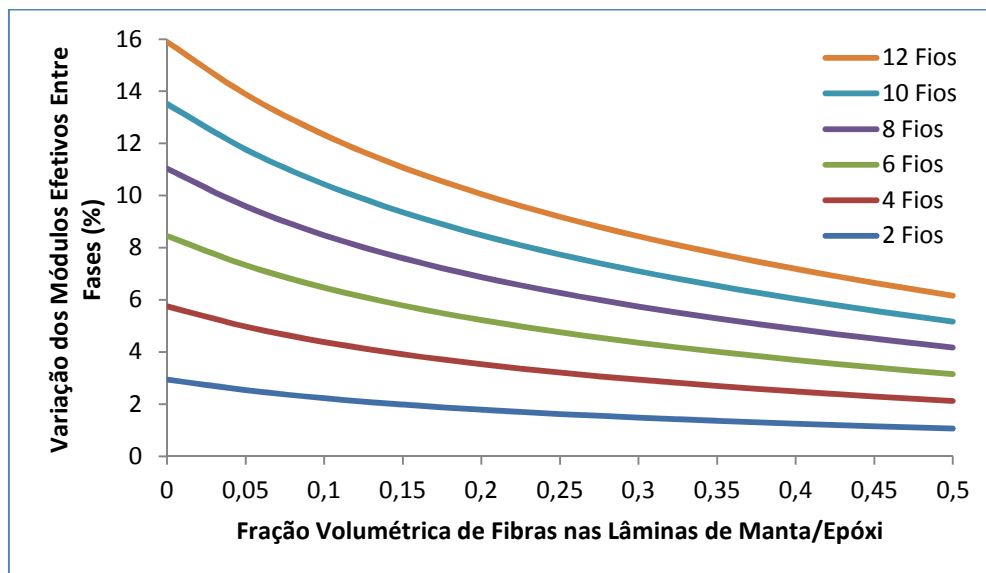


Figura 4.17 – Variação dos módulos efetivos entre fases pela $V_{\text{FibrasLamMantaEpóxi}}$ com $V_{\text{FibrasLamFio}} = 0,15$

Os gráficos das figuras 4.16 e 4.17 também apontam quedas na variação das frequências naturais entre fases e variação dos módulos efetivos entre fases com o aumento da $V_{\text{FibrasLamMantaEpóxi}}$.

A variação das frequências naturais entre fases e as variação dos módulos efetivos entre fases para o caso de $V_{\text{FibrasLamFio}} = 0,30$ são apresentados, respectivamente, pelos gráficos das figuras 4.18 e 4.19.

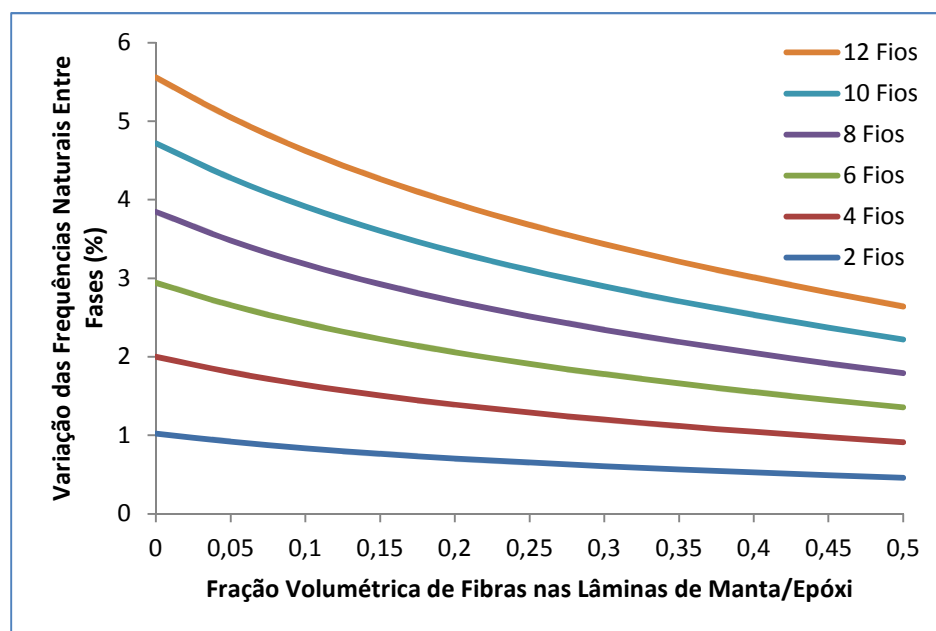


Figura 4.18 – Variação das frequências naturais entre fases pela $V_{\text{FibrasLamMantaEpóxi}}$ com $V_{\text{FibrasLamFio}} = 0,3$

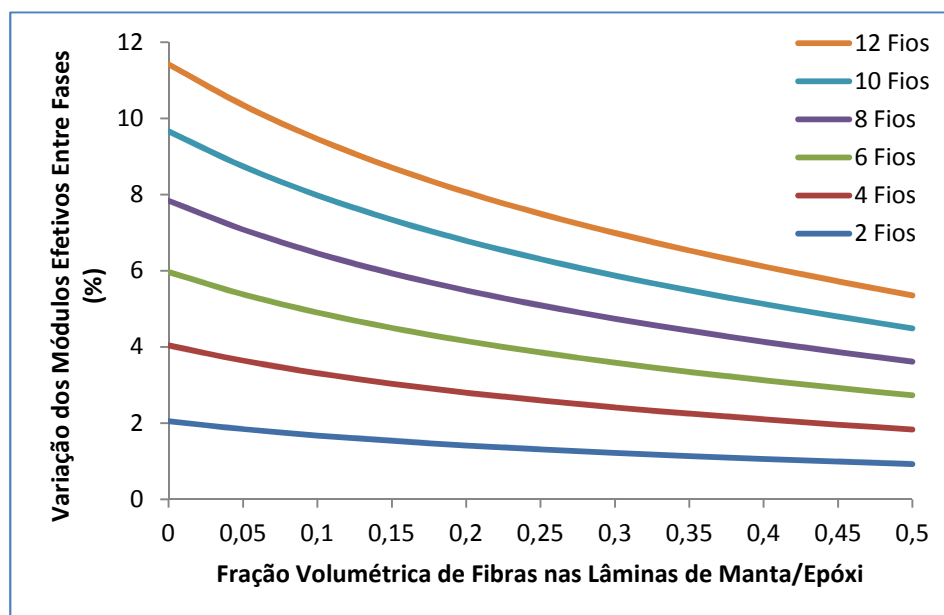


Figura 4.19 – Variação dos módulos efetivos entre fases pela $V_{\text{FibrasLamMantaEpóxi}}$ com $V_{\text{FibrasLamFio}} = 0,3$

O aumento da $V_{\text{FibrasLamMantaEpóxi}}$ nos gráficos das figuras 4.18 e 4.19 provocam, de maneira semelhante aos gráficos anteriores, uma menor variação das frequências naturais entre fases e uma menor variação dos módulos efetivos entre fases.

Observa-se, para qualquer número de fios, que as maiores variações entre as fases são encontradas para o caso em que a $V_{\text{FibrasLamMantaEpóxi}}$ é igual a 0 e a $V_{\text{FibrasLamFio}}$ é igual a 0. Para o caso em que a $V_{\text{FibrasLamMantaEpóxi}}$ é igual a 0,5 e a $V_{\text{FibrasLamFio}}$ é igual a 0,3, independente do número de fios, são encontradas as maiores variações entre as fases. Esse conjunto de fatores representam as condições críticas, por isso, gráficos que apresentam os valores dos módulos efetivos nas fases austeníticas e martensíticas e os valores das frequências naturais fundamentais para cada fase do fio foram criados a fim de se analisar com maior precisão a influência de tal conjunto.

O gráfico da figura 4.20 apresenta o valor da frequência natural fundamental de acordo com o número de fios para a fase austenítica e martensítica. O gráfico da figura 4.21 apresenta o módulo efetivo da viga genérica de acordo com o número de fios para a fase austenítica e martensítica. Os dois gráficos foram construídos para o caso em que a $V_{\text{FibrasLamMantaEpóxi}}$ é igual a 0,5 e a $V_{\text{FibrasLamFio}}$ é igual a 0,3.

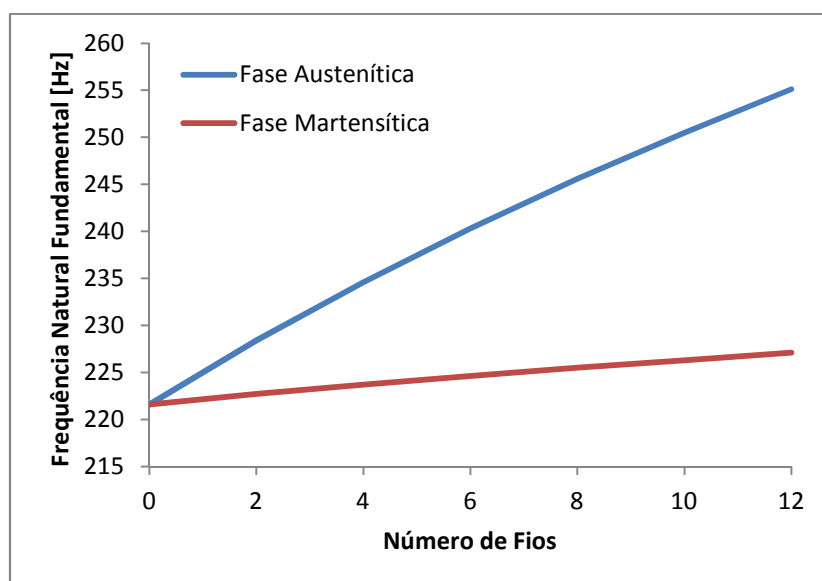


Figura 4.20 – Frequência natural fundamental pelo número de fios para $V_{\text{FibrasLamMantaEpóxi}}=0$ e $V_{\text{FibrasLamFio}}=0$

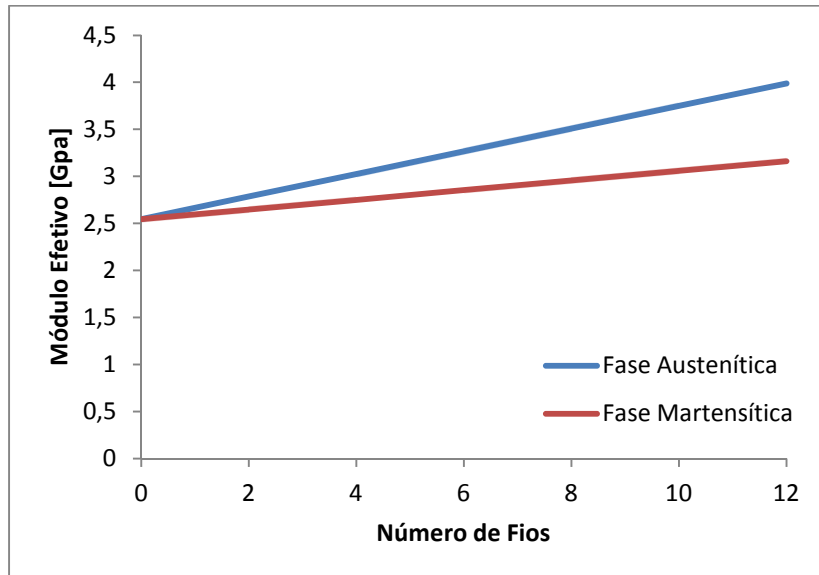


Figura 4.21 – Módulo efetivo pelo número de fios para $V_{\text{FibrasLamMantaEpóxi}}=0$ e $V_{\text{FibrasLamFio}}=0$

Verifica-se, pelo gráfico da figura 4.20, um aumento próximo de 30 Hz entre a fase austenítica e martensítica quando 12 fios estão presentes na viga. Um aumento de quase 1 GPa é observado entre a fase austenítica e a fase martensítica para 12 fios na viga.

Para a condição em que a $V_{\text{FibrasLamMantaEpóxi}}$ é igual a 0,5 e a $V_{\text{FibrasLamFio}}$ é igual a 0,3, foram feitos gráficos análogos aos gráficos das figuras 4.20 e 4.21. O gráfico da figura 4.22 apresenta a frequência natural fundamental pelo número de fios. O módulo efetivo pelo número de fios é representado pelo gráfico da figura 4.23.

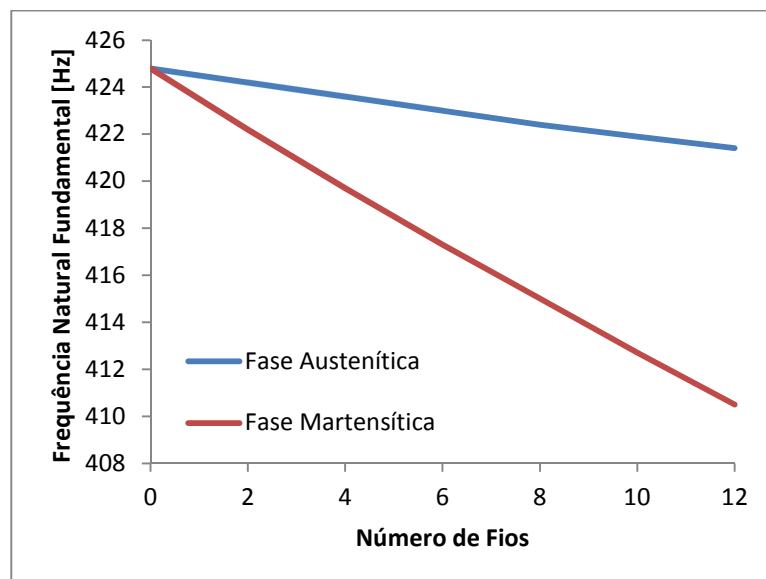


Figura 4.22 – Frequência natural fundamental pelo número de fios para $V_{\text{FibrasLamMantaEpóxi}}=0,5$ e $V_{\text{FibrasLamFio}}=0,3$

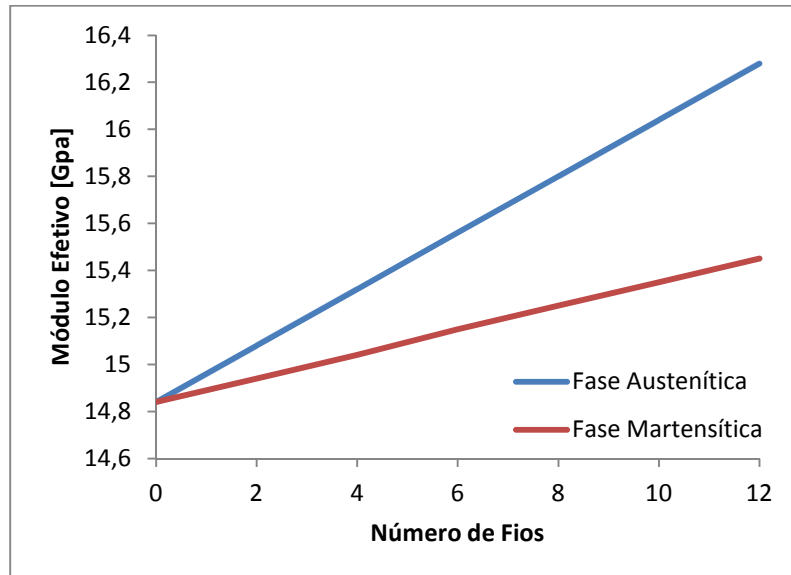


Figura 4.23 – Módulo efetivo pelo número de fios para $V_{\text{FibrasLamMantaEpóxi}}=0,5$ e $V_{\text{FibrasLamFio}}=0,3$

Os próximos gráficos visam avaliar a influência do diâmetro dos fios de Ni-Ti na variação das frequências naturais entre fases e a variação do módulo efetivo entre as fases do fio. Os gráficos das figuras 4.24 e 4.25 foram construídos para o caso em que a $V_{\text{FibrasLamMantaEpóxi}}$ é igual a 0 e a $V_{\text{FibrasLamFio}}$ é igual a 0. O gráfico presente na figura 4.24 apresenta a variação das frequências naturais entre fases pelo número de fios, já as curvas apresentam os diâmetros dos fios selecionados. O gráfico da figura 4.25 apresenta a variação do módulo efetivo entre fases pelo número de fios para as mesmas condições do gráfico anterior.

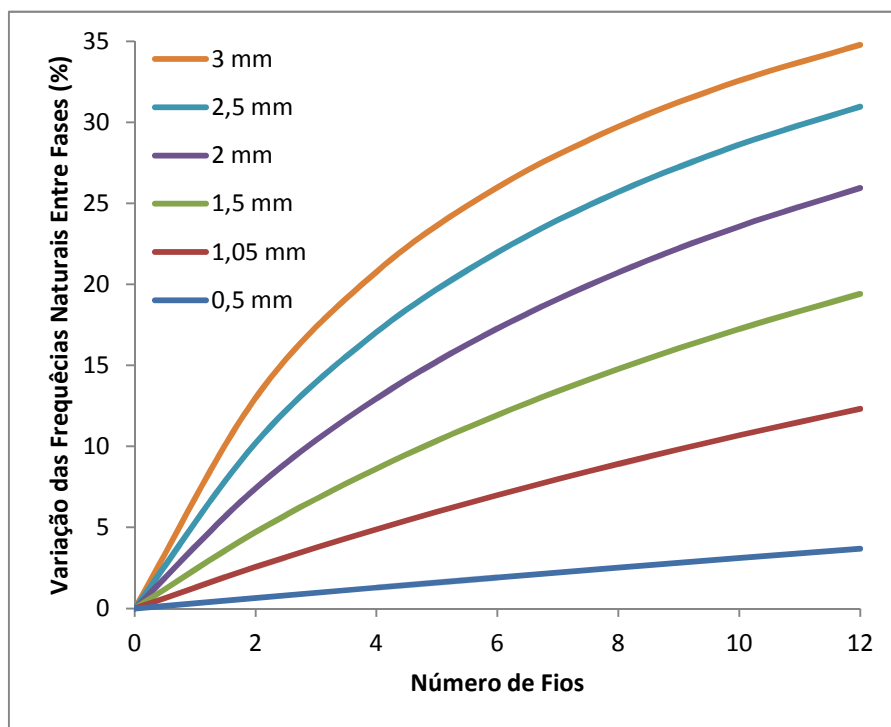


Figura 4.24 – Variação das frequências naturais entre fases pelo número de fios com $V_{\text{FibrasLamMantaEpóxi}}=0$ e $V_{\text{FibrasLamFio}}=0$ para diâmetros de fio selecionados

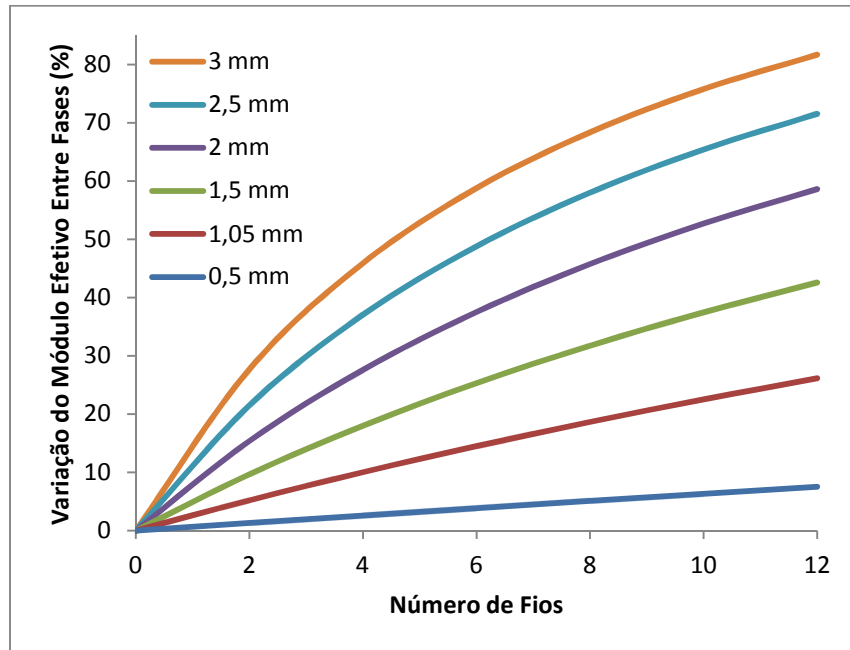


Figura 4.25 – Variação do módulo efetivo entre fases pelo número de fios com $V_{\text{FibrasLamMantaEpóxi}}=0$ e $V_{\text{FibrasLamFio}}=0$ para diâmetros de fio selecionados

Infere-se, para a condição em que $V_{\text{FibrasLamMantaEpóxi}}$ é igual a 0 e a $V_{\text{FibrasLamFio}}$ é igual a 0, que o aumento do diâmetro dos fios favorece, independente do número de fios presente na viga, maior variação das frequências naturais entre fases e também uma maior variação do módulo efetivo entre fases.

Os gráficos das figuras 4.26 e 4.27 são análogos, respectivamente, aos gráficos das figura 4.24 e 4.25 com a diferença que foram construídos para a condição em a $V_{\text{FibrasLamMantaEpóxi}}$ é igual 0,5 e a $V_{\text{FibrasLamFio}}$ é igual a 0,3.

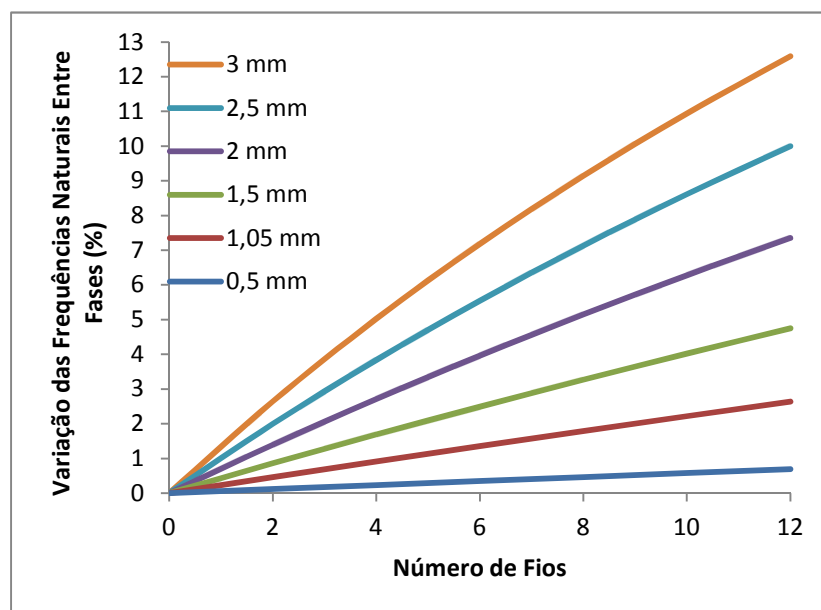


Figura 4.26 – Variação das frequências naturais entre fases pelo número de fios com $V_{\text{FibrasLamMantaEpóxi}}=0,5$ e $V_{\text{FibrasLamFio}}=0,3$ para diâmetros de fio selecionados

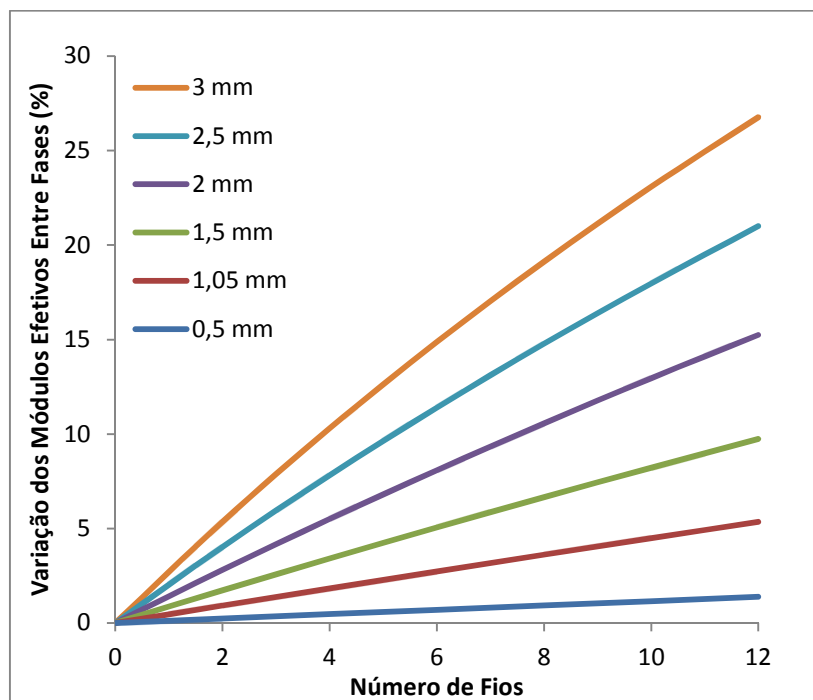


Figura 4.27 – Variação do módulo efetivo entre fases pelo número de fios com $V_{\text{FibrasLamMantaEpóxi}}=0,5$ e $V_{\text{FibrasLamFio}}=0,3$ para diâmetros de fio selecionados

Para essa condição, um aumento no diâmetro dos fios, para qualquer quantidade de fios, também ocasiona uma maior variação das frequências naturais entre fases e uma maior variação do módulo efetivo entre fases. No entanto, como era de se esperar, os valores das variações são menores que os valores encontrados para o caso em que a $V_{\text{FibrasLamMantaEpóxi}}$ é igual a 0 e a $V_{\text{FibrasLamFio}}$ é igual a 0.

4.5 FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE VAZIOS

Essa seção apresenta os resultados dos experimentos realizados para determinar a fração volumétrica de vazios nas amostras.

4.5.1 Amostras

As amostras utilizadas para a determinação da fração volumétrica de vazios não pertencem a nenhuma das vigas analisadas previamente ao longo do trabalho. No entanto, as vigas de onde as amostras foram retiradas possuem características dimensionais e de constituintes semelhantes às demais já analisadas. As características das vigas utilizadas são mostradas na tabela 4.10. A letra V que antecede o número da viga é a inicial de vazios e serve para diferenciar as mesmas das analisadas anteriormente.

Tabela 4.10 – Identificação das vigas utilizadas na determinação de vazios

Viga	Número de Fios	Cura	Vácuo	Roving
V1	0	Fria	Ausente	Não
V2	6	Quente	Laboratório	Sim

Foram utilizadas 6 amostras de cada viga para a determinação da fração volumétrica de vazios e dos outros componentes. Os resultados observados são encontrados na tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Resultados obtidos na determinação de vazios

Viga	Amostra	ρ_{Amostra} [g/cm ³]	V _{Fibras} (%)	V _{Fios} (%)	V _{Epóxi} (%)	V _{Vazios} (%)
V1	1	1,4685	26,45	----	67,58	5,97
	2	1,4611	26,13	----	67,96	5,91
	3	1,4801	25,05	----	69,76	5,19
	4	1,4576	24,72	----	68,91	6,37
	5	1,4513	24,24	----	69,91	5,85
	6	1,4542	26,22	----	68,22	5,56
Média		1,46	25,47	----	68,72	5,81
Desvio Padrão		0,01	0,92	----	0,97	0,40
V2	1	1,5326	22,87	1,86	70,49	4,78
	2	1,5	23,24	1,85	66,59	8,32
	3	1,5424	23,65	1,98	68,98	5,39
	4	1,5589	23,87	2,52	66,96	6,65
	5	1,5686	23,51	2,35	69,5	4,64
	6	1,5083	24,36	1,43	67,59	6,62
Média		1,54	23,58	2,00	68,35	6,07
Desvio Padrão		0,03	0,51	0,39	1,54	1,41

5 CONCLUSÃO

A maior diferença percentual na frequência natural encontra entre as fases austenítica e martensítica, com o aquecimento dos fios de Ni-Ti, usando o módulo de elasticidade experimental das vigas SMAHC, foi de 5,62%, para os três primeiros modos de vibração. Isso indica que as vigas híbridas investigadas podem funcionar como um componente estrutural adaptativo.

As diferenças encontradas entre os resultados analíticos e experimentais na caracterização mecânica devem-se, provavelmente, à simplificação de ausência de bolhas de ar dentro das vigas, dificuldade de na determinação do módulo de elasticidade das lâminas compostas somente de matriz e fibra de vidro, limitações impostas pelas condições laboratoriais e também eventuais erros de fabricação cometidos no procedimento. Adicionalmente, no modelo macromecânico sintetizado pela equação (23), está implícito que as adesões entre camadas laminadas, bem como entre a matriz de epóxi e as fibras de vidro e fios de Ni-Ti, são perfeitas e que os rovings adjacentes aos fios de Ni-Ti estão perfeitamente alinhados com a direção longitudinal das vigas.

A utilização do vácuo diminui a quantidade de epóxi presente no laminado, como consequência dois fenômenos importantes podem ser observados. O primeiro deles é a redução da distância da linha neutra até a lâmina que contém os fios e como essa distância é elevada ao cubo (na fórmula para obtenção do módulo de elasticidade efetivo, vide equação (23)) a influência da alteração do módulo de elasticidade dos fios entre as fases austenítica (quente) e martensítica (fria) é reduzida. O segundo fator importante observado é que a fração volumétrica de fibra de vidro ($E=70$ GPa) aumenta e isso também torna o efeito de mudança de fase dos fios menos acentuado. Com o aquecimento, o módulo de elasticidade dos fios aumenta de 22,7 GPa para 48,4 GPa. O último fator deve-se principalmente porque o módulo de elasticidade encontrado nas lâminas compostas somente por manta e epóxi torna-se bastante elevado e acaba mascarando o efeito da transformação de fase dos fios.

O estudo teórico realizado aponta, para todas as situações analisadas, que o aumento da fração volumétrica de fibras nas camadas da manta/epóxi e nas camadas que contém os fios diminui a variação percentual entre as fases tanto para as frequências naturais como para o módulo efetivo. O aumento da quantidade de fios e do diâmetro dos mesmos aumenta a fração volumétrica de fios na viga e acentua a variação entre as fases nas frequências naturais e no módulo de elasticidade.

As maiores diferenças percentuais encontradas nas frequências naturais considerando-se os resultados analíticos com os valores do módulo de elasticidade experimental, entre as fases martensítica e austenítica dos fios nos três primeiros modos de vibração, foram observadas nas vigas 1 e 2 com, respectivamente, 5,62 % e 4,44 %. A ausência de roving ($E=70$ GPa) e a não utilização de

vácuo evidenciaram de forma mais acentuada a transformação de fase dos fios de SMA, a qual provoca o aumento do módulo de elasticidade dos fios de Ni-Ti.

Percebe-se pelas tabelas 4.8 e 4.9 que as simulações numéricas com o elemento SOLID186 apresentaram os resultados mais próximos aos valores analíticos. Entretanto, as diferenças apresentadas no modelamento com os elementos BEAM189 e SHELL281 apresentaram uma diferença menor que 0,5 % quando comparados ao elemento SOLID186. Isso mostra que a escolha do tipo de elemento não interfere de maneira significativa na análise modal das vigas analisadas.

O resultado numérico que mais se distanciou do seu corresponde analítico foi a simulação da viga 3 em seu estado austenítico utilizando-se o elemento BEAM189. A diferença percentual foi de -4,41 %, no entanto, esse resultado encontra-se dentro de um limite razoável em termos de engenharia, algo como 10%. Esse dado confirma os bons resultados do método numérico para a obtenção das frequências naturais.

As diferenças máximas encontradas entre as simulações que consideram o módulo de elasticidade de todas as camadas como sendo o módulo efetivo da respectiva viga híbrida simétrica e a densidade de cada camada como sendo o valor encontrado pela equação (7) ou (17) em relação às simulações que consideram a viga como sendo isotrópica com densidade constante são de -0,0111% (1° modo), -0,0245 (2° modo) e -0,0316 (3° modo). Esses resultados permitem concluir que as diferenças de densidades apresentadas entre as camadas não influenciam de maneira significativa a análise modal das vigas construídas.

Os resultados obtidos com as simulações numéricas permitem concluir que futuras análises modais podem ser realizadas considerando a viga como um material isotrópico equivalente, com módulo de elasticidade igual ao módulo efetivo ou igual ao módulo de elasticidade experimental. A densidade do material pode ser considerada uniforme e igual à densidade da viga híbrida simétrica. Visto que todos os tipos de elementos utilizados apresentaram bons resultados e que pequenas diferenças foram encontradas entre os mesmos, conclui-se que a escolha do tipo do elemento dependerá apenas de critérios que levam em consideração o grau de complexidade no modelamento e do tempo de máquina a ser gasto.

O estudo de vazios permite concluir que a presença dos fios de SMA aumentam a presença de vazios nas vigas. O epóxi não consegue aderir perfeitamente aos fios e, então, bolhas de ar conseguem ficar aprisionadas entre os mesmos. A viga V2 apresentou uma fração volumétrica média de vazios igual a 6,07 %. A viga V1 apresentou uma fração volumétrica de vazios igual a 5,81%. O vácuo utilizado na viga V2 aparenta ter tido êxito em retirar as bolhas de ar presentes apenas nas camadas de manta/epóxi. Um estudo mais detalhado a respeito da localização das bolhas de ar é necessário para o melhoramento das propriedades mecânicas do material. A alta concentração de vazios aumenta a suscetibilidade do material à umidade e é responsável também por reduzir o módulo de elasticidade, a resistência à fadiga e a resistência do material.

Como os experimentos para a determinação da fração volumétrica de vazios são destrutivos, a fração volumétrica de vazios não pode ser realizadas nas vigas híbridas analisadas no presente trabalho, já que as mesmas ainda serão utilizadas em outros trabalhos. Porém, foram realizadas em corpos de prova que utilizam as mesmas matérias primas, o mesmo aparato para fabricação e produzidas pela mesma equipe. Apesar de diminuir a influência dos fios de SMA, a utilização do vácuo e a presença de roving nas camadas que contém os fios parecem contribuir com a redução de vazios. No entanto, somente após a análise de todas as vigas o método mais adequado para a redução de vazios poderá ser confirmado.

Somente um estudo mais avançado poderá determinar quais aplicações necessitam de um controle mais rígido dos vazios e a maneira de se obter uma viga com baixa fração volumétrica de vazios e grande variação das propriedades com a mudança de fase dos fios de Ni-Ti.

O tipo de cura (a quente ou a frio) não afetou os resultados obtidos. O tipo de cura deve ser definido então se levando em conta a aplicação do material. Vigas com cura a quente deverão ser utilizadas em condições mais elevadas de temperatura e também em condições onde os fios deverão ser aquecidos diversas vezes. A utilização de cura a quente no último caso visa reduzir os efeitos de fluência no material.

A utilização de uma maior quantidade de fios e também fios com diâmetros diferentes do que foram utilizados no presente trabalho é capaz de produzir uma ampla faixa de frequências, possibilitando o uso desse tipo de material em várias aplicações aeronáuticas, automobilísticas e aeroespaciais, por exemplo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aboudi, Jacob, The Response of Shape Memory Alloy Composites, Department of Solid Mechanics, Materials and Systems, Faculty of Engineering, Tel-Aviv University, Ramat-Aviv, Israel, 2004.
- Akhras, Georges, Smart Material and Smart Systems for the Future, Canadian Military Journal, Kingston, Ontario, Canada, 2000.
- Balapogol, Basavaraj S., Majoria Kamal M., Kulkarni, Sudhakar A., Natural Frequencies of a Multilayer SMA Laminated Composite Cantilever Plate, Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology, Bombay, Powai, Mumbai, India, 2006.
- Callister, William D. Jr. Ciência e engenharia de materiais: Uma Introdução, Editora LTC, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Utah, 5ª Edição, 2000.
- Castilho, Weimar Silva, Dissertação de mestrado: Caracterização Termomecânica de Compósitos Compósitos Híbridos com Memória de Forma, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, Brasil, 2008.
- Cerón, Diego Maurício Sandoval, Dissertação de Mestrado: Desenvolvimento de uma Metodologia para Fabricação de Compósitos Híbridos com Memória de Forma, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Distrito Federal, Brasil, 2010.
- Daniel J. Inman, Engineering Vibration, 3rd ed., Person Education, New Jersey, 2008.
- Duan, Bin, Tawfik, Mohammad, Sylvain, N. Goek, Ro, Jeng-Jong, Mei, Chuh, Analysis and Control of Large Thermal Deflection of Composite Plates Using Shape Memory Alloy, Department of Aerospace Engineering, Old Dominion University, Norfolk, VA, 2000.
- Faluhelyi, Peter, Exame de qualificação de doutorado: Fabricação e Comportamento Termomecânico de Compósitos Estruturais Adaptativos com Filamentos de Liga Ni-Ti, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, Brasil, 2010.
- Faria, Vailton Alves de, Dissertação de Mestrado: Análise Numérica de Frequência Natural de Materiais Compósitos Híbridos com Memória de Forma, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, 2007.
- Gibson, R. F. Principles of Composite Material Mechanics. Ed. McGraw-Hill, New York, 1994.
- Jia, Hongyu, Dissertação de PhD: Impact Damage Resistance of Shape Memory Alloy Hybrid Composite Structures, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 1998.
- Lau, Kin-tak, Zhou, Li-mim, Tao, Xiao-ming, Control of Natural Frequencies of a Clamped-Clamped Composite Beam with Embedded Shape Memory Alloy Wires, Department of Mechanical Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong, People`s Republic of China, 2000.

- Levy Neto, Flaminio & Pardini, Luiz Cláudio. "Compósitos estruturais: Ciência e Tecnologia", Ed. Edgard Blücher, São Paulo, 2006.
- Mendonça, P. T. R. Materiais Compostos & Estruturas-Sanduiche: Projeto e Análise. Ed. Manole, Barueri, São Paulo, Brasil, 2005.
- Rao, Singiresu S., Vibrações Mecânicas, Ed. Pearson Prentice Hall, São Paulo, 2008.
- Silva, João Paulo Campos da, Projeto de Graduação: Fabricação e Análise de Vigas Adaptativas com Filamentos de Liga de Níquel-Titânio, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, Brasil, 2009.
- Sittner, P., Stalmans, R., Developing Hybrid Polymer Composites with Embedded Shape-Memory Alloy Wires, Department of Metallurgy and Materials Engineering, Institut de Génie Atomique Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Heverlee, Belgium, 2000.
- Srinivasan A. V., McFarland, M. D., Smart Structures Analysis and Design, Cambridge University Press, 2001.
- Turner, T.L., Thermomechanical Response of Shape Memory Alloy Hybrid Composites. NASA/TM-2001-210656, Langley Research Center, Hampton, Virginia, 2000.
- Wang, J., Shen, Y. P., Micromechanics of Composites Reinforced in the Aligned SMA Short Fibers in Uniform Thermal Fields, Department of Engineering Mechanics, Xi'an Jiaotong University, Shaanxi, People's Republic of China, 1999.
- Zak, A. J., Cartmeel, M. P., Ostachowicz, W. M., Department of Mechanical Engineering, University of Glasgow, Glasgow, Scotland, 2005.
- Zhang, Wei, Kim, Jongmin, Koratkar, Nikhil, Energy-Absorbent Composites Featuring Embedded Shape Memory Alloys, Department of Mechanical, Aerospace and Nuclear Engineering, Rensselaer Polytechnic Institut, New York, United States of America, 2003.
- www.matweb.com, acesso em: Setembro de 2011; propriedades da fibra de vidro-E

ANEXOS

		Página
Anexo I	Tabelas Simulações Numéricas	55
Anexo II	Medidas Determinação de Vazios	65

ANEXO I: Tabelas Simulações Numéricas

Tabela 1 – Frequências naturais analíticas com módulo efetivo

Viga	Tipo	1° modo [Hz]	2° modo [Hz]	3° modo [Hz]
1	Austenita	369,58	1018,00	1996,40
	Martensita	356,98	983,04	1927,84
2	Austenita	376,25	1036,37	2032,42
	Martensita	363,08	1000,10	1961,30
3	Austenita	454,13	1250,89	2453,12
	Martensita	441,87	1217,13	2386,92
4	Austenita	421,15	1160,04	2274,97
	Martensita	411,38	1133,13	2222,18
5	Austenita	401,11	1104,85	2166,72
	Martensita	393,33	1083,44	2124,73
6	Austenita	439,14	1209,61	2372,17
	Martensita	428,23	1179,56	2313,23
7	Austenita	343,18	945,28	1853,80
	Martensita	338,53	932,47	1828,67

Tabela 2 – Diferença percentual entre as fases de cada modo de vibração com módulo efetivo

Viga	Diferença Percentual 1° modo (%)	Diferença Percentual 2° modo (%)	Diferença Percentual 3° modo (%)
1	3,56	3,56	3,56
2	3,63	3,63	3,63
3	2,77	2,77	2,77
4	2,37	2,37	2,38
5	1,98	1,98	1,98
6	2,55	2,55	2,55
7	1,37	1,37	1,37

Tabela 3 – Frequências naturais analíticas com módulo de elasticidade experimental

Viga	Tipo	1° modo [Hz]	2° modo [Hz]	3° modo [Hz]
1	Austenita	347,28	956,58	1875,95
	Martensita	328,82	905,71	1776,19
2	Austenita	361,29	995,15	1951,60
	Martensita	345,94	952,88	1868,70
3	Austenita	406,86	1120,67	2197,75
	Martensita	393,71	1084,47	2126,76
4	Austenita	376,29	1036,48	2032,65
	Martensita	376,01	1035,71	2031,12
5	Austenita	372,96	1027,30	2014,64
	Martensita	361,32	995,24	1951,78
6	Austenita	397,72	1095,51	2148,41
	Martensita	397,56	1095,05	2147,51
7	Austenita	306,21	843,44	1654,07
	Martensita	305,44	841,33	1649,92

Tabela 4 – Diferença percentual entre as fases de cada modo de vibração com módulo de elasticidade experimental

Viga	Diferença Percentual 1° modo (%)	Diferença Percentual 2° modo (%)	Diferença Percentual 3° modo (%)
1	5,62	5,62	5,62
2	4,44	4,44	4,44
3	3,34	3,34	3,34
4	0,07	0,07	0,08
5	3,22	3,22	3,22
6	0,04	0,04	0,04
7	0,25	0,25	0,25

Tabela 5 – Convergência para elemento BEAM189 com módulo efetivo

Tipo	Elementos	1° modo [Hz]	2° modo [Hz]	3° modo [Hz]
Austenita	10	366,90	1000,8	1935,0
	100	366,86	1000,1	1929,7
	1000	366,86	1000,1	1929,7
	5000	366,86	1000,1	1929,7
Martensita	10	354,41	966,74	1869,2
	100	354,38	966,02	1864,0
	1000	354,38	966,02	1864,0
	5000	354,38	966,02	1864,0

Tabela 6 – Frequências naturais para elemento BEAM189 com módulo efetivo

Viga	Tipo	1° modo [Hz]	2° modo [Hz]	3° modo [Hz]
1	Austenita	366,86	1000,1	1929,7
	Martensita	354,38	966,02	1864,0
2	Austenita	373,32	1017,0	1960,5
	Martensita	360,24	981,35	1891,9
3	Austenita	449,84	1221,6	2345,0
	Martensita	437,82	1188,9	2282,3
4	Austenita	418,50	1142,5	2209,2
	Martensita	408,76	1116,0	2157,8
5	Austenita	398,45	1087,7	2103,0
	Martensita	390,74	1066,7	2062,3
6	Austenita	435,92	1188,1	2292,2
	Martensita	425,13	1158,7	2235,4
7	Austenita	341,65	936,20	1819,7
	Martensita	337,05	923,59	1795,2

Tabela 7 – Diferença percentual entre os resultados analíticos e a simulação com elemento BEAM189 com módulo efetivo

Viga	Tipo	Diferença Percentual 1° modo (%)	Diferença Percentual 2° modo (%)	Diferença Percentual 3° modo (%)
1	Austenita	-0,74	-1,76	-3,34
	Martensita	-0,73	-1,73	-3,31
2	Austenita	-0,78	-1,87	-3,54
	Martensita	-0,78	-1,87	-3,54
3	Austenita	-0,94	-2,34	-4,41
	Martensita	-0,92	-2,32	-4,38
4	Austenita	-0,63	-1,51	-2,89
	Martensita	-0,64	-1,51	-2,90
5	Austenita	-0,66	-1,55	-2,94
	Martensita	-0,66	-1,55	-2,94
6	Austenita	-0,73	-1,78	-3,37
	Martensita	-0,72	-1,77	-3,36
7	Austenita	-0,45	-0,96	-1,84
	Martensita	-0,44	-0,95	-1,83

Tabela 8 – Convergência para elemento SHELL281 com módulo efetivo

Tipo	Elementos	1° modo [Hz]	2° modo [Hz]	3° modo [Hz]
Austenita	30	366,98	1001,3	1935,0
	120	366,97	1001,1	1933,7
	270	366,97	1001,1	1933,6
	3000	366,97	1001,1	1933,6
	6750	366,97	1001,1	1933,6
Martensita	30	354,49	967,20	1869,1
	120	354,48	967,04	1867,9
	270	354,48	967,03	1867,8
	3000	354,48	967,03	1867,8
	6750	354,48	967,03	1867,8

Tabela 9 – Frequências naturais para elemento SHELL281 com módulo efetivo

Viga	Tipo	1° modo [Hz]	2° modo [Hz]	3° modo [Hz]
1	Austenita	366,97	1001,1	1933,6
	Martensita	354,48	967,03	1867,8
2	Austenita	373,43	1018,0	1964,3
	Martensita	360,35	982,33	1895,5
3	Austenita	449,95	1222,6	2348,6
	Martensita	437,92	1189,9	2285,9
4	Austenita	418,64	1143,8	2214,1
	Martensita	408,90	1117,2	2162,5
5	Austenita	398,58	1088,9	2107,5
	Martensita	390,86	1067,9	2066,8
6	Austenita	436,05	1189,3	2296,7
	Martensita	425,25	1159,9	2239,8
7	Austenita	341,78	937,50	1824,6
	Martensita	337,18	924,88	1800,1

Tabela 10 – Diferença percentual entre os resultados analíticos e a simulação com elemento SHELL281 com módulo efetivo

Viga	Tipo	Diferença Percentual 1° modo (%)	Diferença Percentual 2° modo (%)	Diferença Percentual 3° modo (%)
1	Austenita	-0,71	-1,66	-3,15
	Martensita	-0,70	-1,63	-3,11
2	Austenita	-0,75	-1,77	-3,35
	Martensita	-0,75	-1,78	-3,35
3	Austenita	-0,92	-2,26	-4,26
	Martensita	-0,89	-2,24	-4,23
4	Austenita	-0,60	-1,40	-2,68
	Martensita	-0,60	-1,41	-2,69
5	Austenita	-0,63	-1,44	-2,73
	Martensita	-0,63	-1,43	-2,73
6	Austenita	-0,70	-1,68	-3,18
	Martensita	-0,70	-1,67	-3,17
7	Austenita	-0,41	-0,82	-1,58
	Martensita	-0,40	-0,81	-1,56

Tabela 11 – Convergência para elemento SOLID186 com módulo efetivo

Tipo	Elementos	1° modo [Hz]	2° modo [Hz]	3° modo [Hz]
Austenita	60	367,03	1001,7	1936,5
	540	367,02	1001,6	1935,5
	1500	367,02	1001,6	1935,5
	6000	367,02	1001,6	1935,5
	13500	367,02	1001,6	1935,5
Martensita	60	354,53	967,60	1870,6
	540	354,53	967,48	1869,6
	1500	354,53	967,48	1869,6
	6000	354,53	967,48	1869,6
	13500	354,53	967,48	1869,6

Tabela 12 – Frequências naturais para elemento SOLID186 com módulo efetivo

Viga	Tipo	1° modo [Hz]	2° modo [Hz]	3° modo [Hz]
1	Austenita	367,02	1001,6	1935,5
	Martensita	354,53	967,48	1869,6
2	Austenita	373,48	1018,5	1966,3
	Martensita	360,40	982,82	1897,5
3	Austenita	450,02	1223,3	2351,7
	Martensita	438,00	1190,6	2288,8
4	Austenita	418,68	1144,33	2215,9
	Martensita	408,94	1117,7	1952,7
5	Austenita	398,62	1098,4	2109,4
	Martensita	390,91	1068,3	2068,5
6	Austenita	436,10	1189,9	2299,0
	Martensita	425,31	1160,5	2242,1
7	Austenita	341,81	937,74	1825,6
	Martensita	337,21	925,11	1801,0

Tabela 13 – Diferença percentual entre os resultados analíticos e a simulação com elemento SOLID186 com módulo efetivo

Viga	Tipo	Diferença Percentual 1° modo (%)	Diferença Percentual 2° modo (%)	Diferença Percentual 3° modo (%)
1	Austenita	-0,69	-1,61	-3,05
	Martensita	-0,69	-1,58	-3,02
2	Austenita	-0,74	-1,72	-3,25
	Martensita	-0,74	-1,73	-3,25
3	Austenita	-0,91	-2,21	-4,13
	Martensita	-0,88	-2,18	-4,11
4	Austenita	-0,59	-1,35	-2,60
	Martensita	-0,59	-1,36	-2,60
5	Austenita	-0,62	-0,58	-2,65
	Martensita	-0,62	-1,40	-2,65
6	Austenita	-0,69	-1,63	-3,08
	Martensita	-0,68	-1,62	-3,07
7	Austenita	-0,40	-0,80	-1,52
	Martensita	-0,39	-0,79	-1,51

Tabela 14 – Convergência para elemento BEAM189 com módulo de elasticidade experimental

Tipo	Elementos	1° modo [Hz]	2° modo [Hz]	3° modo [Hz]
Austenita	10	344,80	940,51	1818,4
	100	344,76	939,81	1813,5
	1000	344,76	939,81	1813,5
	5000	344,76	939,81	1813,5
Martensita	10	326,46	890,50	1721,7
	100	326,43	889,83	1717,0
	1000	326,43	889,83	1717,0
	5000	326,43	889,83	1717,0

Tabela 15 – Frequências naturais para elemento BEAM189 com módulo de elasticidade experimental

Viga	Tipo	1° modo [Hz]	2° modo [Hz]	3° modo [Hz]
1	Austenita	344,76	939,81	1813,5
	Martensita	326,43	889,83	1717
2	Austenita	358,53	976,67	1882,8
	Martensita	343,30	935,18	1802,9
3	Austenita	403,03	1094,5	2101
	Martensita	390,01	1059,1	2033,1
4	Austenita	373,87	1020,7	1973,6
	Martensita	373,59	1019,9	1972,2
5	Austenita	370,54	1011,5	1955,7
	Martensita	358,98	979,98	1894,7
6	Austenita	394,80	1076,1	2076
	Martensita	394,64	1075,6	2075,1
7	Austenita	304,86	835,39	1623,7
	Martensita	304,10	833,30	1619,7

Tabela 16 – Diferença percentual entre os resultados analíticos e a simulação com elemento BEAM189 com módulo de elasticidade experimental

Viga	Tipo	Diferença Percentual 1° modo (%)	Diferença Percentual 2° modo (%)	Diferença Percentual 3° modo (%)
1	Austenita	-0,73	-1,75	-3,33
	Martensita	-0,73	-1,75	-3,33
2	Austenita	-0,76	-1,86	-3,53
	Martensita	-0,76	-1,86	-3,52
3	Austenita	-0,94	-2,34	-4,40
	Martensita	-0,94	-2,34	-4,40
4	Austenita	-0,64	-1,52	-2,91
	Martensita	-0,64	-1,53	-2,90
5	Austenita	-0,65	-1,54	-2,93
	Martensita	-0,65	-1,53	-2,92
6	Austenita	-0,73	-1,77	-3,37
	Martensita	-0,73	-1,78	-3,37
7	Austenita	-0,44	-0,95	-1,84
	Martensita	-0,44	-0,95	-1,83

Tabela 17 – Convergência para elemento SHELL281 com módulo de elasticidade experimental

Tipo	Elementos	1° modo [Hz]	2° modo [Hz]	3° modo [Hz]
Austenita	30	344,87	940,96	1818,4
	120	344,86	940,80	1817,2
	270	344,86	940,79	1817,1
	3000	344,86	940,79	1817,1
	6750	344,86	940,79	1817,1
Martensita	30	326,53	890,92	1721,7
	120	326,53	890,77	1720,5
	270	326,53	890,76	1720,5
	3000	326,53	890,76	1720,5
	6750	326,53	890,76	1720,5

Tabela 18 – Frequências naturais para elemento SHELL281 com módulo de elasticidade experimental

Viga	Tipo	1° modo [Hz]	2° modo [Hz]	3° modo [Hz]
1	Austenita	344,86	940,79	1817,1
	Martensita	326,53	890,76	1720,5
2	Austenita	358,63	977,65	1886,5
	Martensita	343,40	936,12	1806,3
3	Austenita	403,13	1095,4	2104,3
	Martensita	390,11	1060,0	2036,3
4	Austenita	373,99	1021,9	1977,9
	Martensita	373,71	1021,1	1976,5
5	Austenita	370,66	1012,7	1959,9
	Martensita	359,10	981,07	1898,8
6	Austenita	394,92	1077,2	2080,1
	Martensita	394,75	1076,7	2079,2
7	Austenita	304,98	836,56	1628,2
	Martensita	304,22	834,46	1624,1

Tabela 19 – Diferença percentual entre os resultados analíticos e a simulação com elemento SHELL281 com módulo de elasticidade experimental

Viga	Tipo	Diferença Percentual 1° modo (%)	Diferença Percentual 2° modo (%)	Diferença Percentual 3° modo (%)
1	Austenita	-0,70	-1,65	-3,14
	Martensita	-0,70	-1,65	-3,14
2	Austenita	-0,74	-1,76	-3,34
	Martensita	-0,73	-1,76	-3,34
3	Austenita	-0,92	-2,25	-4,25
	Martensita	-0,91	-2,26	-4,25
4	Austenita	-0,61	-1,41	-2,69
	Martensita	-0,61	-1,41	-2,69
5	Austenita	-0,62	-1,42	-2,72
	Martensita	-0,61	-1,42	-2,71
6	Austenita	-0,70	-1,67	-3,18
	Martensita	-0,71	-1,68	-3,18
7	Austenita	-0,40	-0,82	-1,56
	Martensita	-0,40	-0,82	-1,56

Tabela 20 – Convergência para elemento SOLID186 com módulo de elasticidade experimental

Tipo	Elementos	1° modo [Hz]	2° modo [Hz]	3° modo [Hz]
Austenita	60	344,91	941,35	1819,8
	540	344,91	941,23	1818,9
	1500	344,91	941,23	1818,9
	6000	344,91	941,23	1818,9
	13500	344,91	941,23	1818,9
Martensita	60	326,57	891,29	1723,1
	540	326,57	891,18	1722,2
	1500	326,57	891,18	1722,2
	6000	326,57	891,18	1722,2
	13500	326,57	891,18	1722,2

Tabela 21 – Frequências naturais para elemento SOLID186 com módulo de elasticidade experimental

Viga	Tipo	1° modo [Hz]	2° modo [Hz]	3° modo [Hz]
1	Austenita	344,91	941,35	1819,8
	Martensita	326,57	891,18	1722,2
2	Austenita	358,68	978,14	1888,4
	Martensita	343,44	936,58	1808,2
3	Austenita	403,30	1096,0	2107,0
	Martensita	390,17	1060,6	2038,9
4	Austenita	374,04	1022,3	1979,6
	Martensita	373,75	1021,5	1978,1
5	Austenita	370,70	1013,1	1961,6
	Martensita	359,14	981,47	1900,4
6	Austenita	394,97	1077,7	2082,1
	Martensita	394,80	1077,2	2081,2
7	Austenita	305,00	836,77	1629,0
	Martensita	304,24	834,67	1625,0

Tabela 22 – Diferença percentual entre os resultados analíticos e a simulação com elemento SOLID186 com módulo de elasticidade experimental

Viga	Tipo	Diferença Percentual 1° modo (%)	Diferença Percentual 2° modo (%)	Diferença Percentual 3° modo (%)
1	Austenita	-0,68	-1,59	-2,99
	Martensita	-0,68	-1,60	-3,04
2	Austenita	-0,72	-1,71	-3,24
	Martensita	-0,72	-1,71	-3,24
3	Austenita	-0,87	-2,20	-4,13
	Martensita	-0,90	-2,20	-4,13
4	Austenita	-0,60	-1,37	-2,61
	Martensita	-0,60	-1,37	-2,61
5	Austenita	-0,61	-1,38	-2,63
	Martensita	-0,60	-1,38	-2,63
6	Austenita	-0,69	-1,63	-3,09
	Martensita	-0,69	-1,63	-3,09
7	Austenita	-0,40	-0,79	-1,52
	Martensita	-0,39	-0,79	-1,51

Tabela 23 – Frequências naturais para simulação padrão

Viga	Tipo	1° modo [Hz]	2° modo [Hz]	3° modo [Hz]
1	Austenita	367,02	1001,6	1935,6
	Martensita	354,47	967,50	1870,2
2	Austenita	373,50	1018,5	1966,2
	Martensita	360,43	983,07	1898,4
3	Austenita	449,78	1220,9	2342,1
	Martensita	437,73	1188,8	2282,1
4	Austenita	418,24	1140,7	2202,4
	Martensita	408,58	1114,8	2153,3
5	Austenita	398,41	1087,4	2101,5
	Martensita	390,72	1066,7	2062,2
6	Austenita	435,75	1186,8	2286,8
	Martensita	425,00	1158,0	2232,6
7	Austenita	341,80	937,40	1824,0
	Martensita	337,17	924,77	1799,7

Tabela 24 – Diferença percentual entre Tabela 9 e Tabela 23

Viga	Tipo	Diferença Percentual 1° modo (%)	Diferença Percentual 2° modo (%)	Diferença Percentual 3° modo (%)
1	Austenita	-0,0136	-0,0499	-0,1033
	Martensita	0,0028	-0,0486	-0,1283
2	Austenita	-0,0188	-0,0491	-0,0966
	Martensita	-0,0222	-0,0753	-0,1528
3	Austenita	0,0378	0,1393	0,2775
	Martensita	0,0434	0,0925	0,1665
4	Austenita	0,0956	0,2718	0,5312
	Martensita	0,0783	0,2153	0,4273
5	Austenita	0,0427	0,1380	0,2855
	Martensita	0,0358	0,1125	0,2231
6	Austenita	0,0689	0,2107	0,4329
	Martensita	0,0588	0,1641	0,3225
7	Austenita	-0,0059	0,0107	0,0329
	Martensita	0,0030	0,0119	0,0222

Tabela 25 – Frequências naturais para simulação com $E_{LamMantaEpóxi} = E_{LamFios} = E_F$ e densidades diferentes nas camadas

Viga	Tipo	1° modo [Hz]	2° modo [Hz]	3° modo [Hz]
1	Austenita	366,96	1001,0	1933,4
	Martensita	354,47	966,96	1867,6
2	Austenita	373,42	1017,9	1964,0
	Martensita	360,33	982,25	1895,2
3	Austenita	449,90	1222,3	2347,9
	Martensita	437,88	1189,7	2285,2
4	Austenita	418,60	1143,6	2213,4
	Martensita	408,86	1117,0	2161,9
5	Austenita	398,56	1088,8	2107,2
	Martensita	390,85	1067,8	2066,4
6	Austenita	436,01	1189,1	2296,0
	Martensita	425,22	1159,7	2239,2
7	Austenita	341,79	937,52	1824,7
	Martensita	337,18	924,90	1800,1

Tabela 26 – Variação da simulação das vigas com $E_{LamMantaEpóxi} = E_{LamFios} = E_F$ e densidades diferentes em relação a simulação das mesmas como isotrópicas nas duas fases do fio

Viga	Tipo	Diferença Percentual 1° modo (%)	Diferença Percentual 2° modo (%)	Diferença Percentual 3° modo (%)
1	Austenita	-0,0027	-0,0100	-0,0103
	Martensita	-0,0028	-0,0072	-0,0107
2	Austenita	-0,0027	-0,0098	-0,0153
	Martensita	-0,0056	-0,0081	-0,0158
3	Austenita	-0,0111	-0,0245	-0,0298
	Martensita	-0,0091	-0,0168	-0,0306
4	Austenita	-0,0096	-0,0175	-0,0316
	Martensita	-0,0098	-0,0179	-0,0277
5	Austenita	-0,0050	-0,0092	-0,0142
	Martensita	-0,0026	-0,0094	-0,0194
6	Austenita	-0,0092	-0,0168	-0,0305
	Martensita	-0,0071	-0,0172	-0,0268
7	Austenita	0,0029	0,0021	0,0055
	Martensita	0,0000	0,0022	0,0000

Tabela 27 – Variação da simulação das vigas com $E_{LamMantaEpóxi} = E_{LamFios} = E_F$ e densidades diferentes em relação a simulação padrão para as duas fases do fio

Viga	Tipo	Diferença Percentual 1° modo (%)	Diferença Percentual 2° modo (%)	Diferença Percentual 3° modo (%)
1	Austenita	-0,0163	-0,0599	-0,1137
	Martensita	0,0000	-0,0558	-0,1390
2	Austenita	-0,0214	-0,0589	-0,1119
	Martensita	-0,0277	-0,0834	-0,1686
3	Austenita	0,0267	0,1147	0,2476
	Martensita	0,0343	0,0757	0,1358
4	Austenita	0,0861	0,2542	0,4995
	Martensita	0,0685	0,1973	0,3994
5	Austenita	0,0376	0,1287	0,2712
	Martensita	0,0333	0,1031	0,2037
6	Austenita	0,0597	0,1938	0,4023
	Martensita	0,0518	0,1468	0,2956
7	Austenita	-0,0029	0,0128	0,0384
	Martensita	0,0030	0,0141	0,0222

ANEXO II: Medidas Determinação de Vazios

Tabela 28 – Medidas das amostras para determinação dos vazios

Viga	Amostra	M _{seca}	M _{saturada}	M _{aparente}	T °C	$\rho_{\text{água}}$	M _{fibras}	M _{fios}	M _{epóxi}
V1	1	2,8856	2,9053	0,9444	22	0,9979	1,3197	---	1,5673
	2	2,7072	2,7127	0,8638	22	0,9979	1,2184	---	1,4910
	3	2,8670	2,8772	0,9442	22	0,9979	1,3140	---	1,5568
	4	2,8295	2,8394	0,9023	22	0,9979	1,2846	---	1,5479
	5	2,8329	2,8485	0,9006	22	0,9979	1,2466	---	1,5894
	6	2,9445	3,0073	0,9867	22	0,9979	1,3916	---	1,6100
V2	1	2,2453	2,2620	0,8012	25	0,9971	0,8509	0,1757	1,2187
	2	2,2089	2,2659	0,7932	25	0,9971	0,8719	0,1765	1,1605
	3	2,1223	2,1471	0,7751	25	0,9971	0,8267	0,1757	1,1199
	4	1,6393	1,6714	0,6229	25	0,9971	0,6376	0,1709	0,8308
	5	1,7740	1,7880	0,6603	25	0,9971	0,6755	0,1710	0,9275
	6	2,8202	2,8764	1,0120	25	0,9971	1,1573	0,1717	1,4912