

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**Influência da Inserção de Fios de Memória de Forma  
em Materiais Compósitos na Resposta ao Impacto**

**DIEGO MORAIS JUNQUEIRA**

ITAJUBÁ - MG

2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

# **Influência da Inserção de Fios de Memória de Forma em Materiais Compósitos na Resposta ao Impacto**

**Diego Morais Junqueira**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Mecânica

**Orientador: Antonio Carlos Ancelotti Junior**

**Co-orientador: Guilherme Ferreira Gomes**

**Área de Concentração: Projetos, Materiais e Processos**

**Linha de Pesquisa: Materiais Compósitos**

ITAJUBÁ – MG

2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

# Influência da Inserção de Fios de Memória de Forma em Materiais Compósitos na Resposta ao Impacto

**Diego Morais Junqueira**

Tese de Doutorado aprovada por banca examinadora  
em 31 de Março de 2023, conferindo ao autor o título  
de *Doutor em Engenharia Mecânica*.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Antonio Carlos Ancelotti Junior

Prof. Dr. Guilherme Ferreira Gomes

Prof. Dr. Márcio Eduardo Silveira

Prof. Dr. Ricardo Mello Di Benedetto

Prof. Dr. Sebastião Simões da Cunha Junior

Prof. Dr. Matheus Brendon Francisco

ITAJUBÁ – MG

2023

*Dedico este trabalho a minha esposa Eveline, aos meus pais João Carlos e Rosinéia, ao meu irmão Mateus e minha filha Alicia e futuros filhos(as).*

# Agradecimentos

Agradeço a Deus, que me guiou e concedeu persistência e sabedoria para continuar, coragem para acreditar, força para não desistir e proteção para me amparar nos dias difíceis.

À minha esposa, Eveline pelo carinho, amor, compreensão e paciência, por sempre estar ao meu lado, me incentivando e amparando da melhor forma.

Agradeço aos meus pais, João Carlos e Rosinéia, e ao meu irmão, Mateus, pelo apoio, amor e força para seguir em frente.

Ao meu Orientador, Dr. Antonio Carlos Ancelotti Junior pela amizade, dedicação a arte de ensinar, experiência transmitida e dedicação a este trabalho.

Ao meu Coorientador, Dr. Guilherme Ferreira Gomes pela amizade, dedicação a arte de ensinar e por dar suporte a este trabalho.

Aos amigos do NTC, pelo companheirismo e ajuda nas horas difíceis.

Aos funcionários da UNIFEI e do LEL, pela ajuda e suporte para a realização deste trabalho.

Altair Hyperworks, pela licença universitária do programa computacional de elementos finitos

Ao CNPQ, pelo apoio financeiro.

*"O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis."*

**José de Alencar**

# Resumo

Nas ultimas décadas, tornou-se cada vez mais comum a busca por materiais de alto desempenho, ou seja, materiais que conciliam baixo peso e alta resistência mecânica. Uma solução encontrada para esta demanda foram os compósitos reforçados com fibras e matriz polimérica. Entretanto, os materiais compósitos ainda possuem certa deficiência quanto a resistência à colisões (*crashworthiness*) onde uma solução para este problema encontra-se na utilização de materiais inteligentes (*smart materials*) como as ligas de memória de forma (NiTi) inseridos no laminado. Sendo assim, este trabalho tem como principal objetivo o desenvolvimento de um equacionamento, utilizando planejamento de experimentos, capaz de prever a capacidade de absorção de energia ao impacto em materiais compósitos de fibra de vidro e matriz de resina epóxi com fios de NiTi inseridos. Além disso, propor um modelo, por meio de simulação numérica pelo método dos elementos finitos (MEF) visando encontrar uma correlação com a análise experimental e conseqüentemente um modelo confiável para utilização em trabalhos futuros. A seleção da liga de NiTi (Martensítica ou Superelástica) a ser utilizada nos corpos de prova para impacto deu-se pela ferramenta de planejamento de experimentos em arranjo fatorial completo com Análise Dinâmica Mecânica (DMA). Após a seleção do fio estatisticamente adequado (Superelástico), foi realizada a fabricação dos corpos de prova via VARTM com três variáveis de projeto (Diâmetro, Espaçamento e Posição no Laminado) seguindo um arranjo fatorial fracionado e os ensaios de impacto de baixa velocidade para medir a absorção de energia foram conduzidos segundo a norma ASTM D7136. Os resultados obtidos por meio dos ensaios de impacto mostraram que existe um aumento na absorção de energia quando o

fio de NiTi esta presente no compósito. Um modelo através de simulação numérica não-linear (Análise Dinâmica) foi realizado e seus resultados foram comparados com os obtidos experimentalmente mostrando que existe uma excelente correlação (acima de 95%).

**Palavras-chave:** Materiais Compósitos, Resistência ao Impacto, Ligas de Memória de Forma, Elementos Finitos, Planejamento de Experimentos.



# Abstract

In recent decades, the search for high-performance materials has become increasingly common, that is, materials that combine low weight and high mechanical strength. A solution found was composites reinforced with fibers and polymeric matrix. However, composite materials still have a certain deficiency of crashworthiness where a solution to this problem lies in the use of smart materials such as shape memory alloys (NiTi) inserted into the laminate. Therefore, this work has as main objective the development an equation, using design of experiments, capable of predicting the energy absorption capacity upon impact in composite materials of fiberglass and epoxy resin matrix with inserted NiTi wires. In addition, propose a model, through numerical simulation by the finite element method (FEM) in order to find a correlation with the experimental analysis and consequently a reliable model for use in future work. The selection of the NiTi alloy (Martensitic or Superelastic) to be used in the impact specimens was carried out through the design of experiments in a complete factorial arrangement with Dynamic Mechanical Analysis (DMA). After selecting the statistically adequate wire (Superelastic), the test specimens were manufactured for VARTM with three design variables (Diameter, Spacing and Position in the Laminate) following a fractional factorial arrangement and the drop-weight impact test to measure the energy absorption were conducted according to the ASTM D7136 standard. The results obtained through the impact tests showed that there is an increase in energy absorption when the NiTi wire is present in the composite. A model through non-linear numerical simulation (Dynamic Analysis) was carried out and its results were compared with those obtained experimentally, showing that there is an

excellent correlation (above 95%).

**Keywords:** Composite Materials, Crashworthiness, Shape Memory Alloys, Finite Elements, Design of Experiments.

# Sumário

<b>Agradecimentos</b>	<b>ii</b>
<b>Resumo</b>	<b>iv</b>
<b>Abstract</b>	<b>vi</b>
<b>Índice</b>	<b>viii</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>x</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação . . . . .	1
1.2 Objetivos . . . . .	3
1.3 Justificativas . . . . .	4
1.4 Limitação da pesquisa . . . . .	4
1.5 Estrutura da Tese . . . . .	4
<b>2 Revisão Bibliográfica</b>	<b>6</b>
2.1 Materiais Compósitos . . . . .	6
2.2 Ligas de Memória de Forma Inseridas em Materiais Compósitos . . . . .	8
2.3 Ligas de Memória de Forma na Resposta ao Impacto . . . . .	11
2.4 Conceitos Estatísticos . . . . .	16
2.4.1 Teste de Hipótese . . . . .	16

2.4.2	A Estatística $T$ ou Teste $T$ - Student . . . . .	20
2.4.3	ANOVA . . . . .	23
2.5	Planejamento de Experimentos . . . . .	24
2.6	Simulação Numérica pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) . . . . .	28
<b>3</b>	<b>Materiais e Métodos</b>	<b>32</b>
3.1	Fluxograma das Atividades . . . . .	32
3.2	Materiais . . . . .	32
3.3	Seleção do Fio de LMF . . . . .	34
3.4	Obtenção de Equacionamento para DMA . . . . .	37
3.5	Planejamento de Experimentos para os Ensaios de Impacto . . . . .	40
3.6	Fabricação dos Corpos de Prova para Impacto . . . . .	42
3.7	Ensaio de Impacto de Baixa Velocidade . . . . .	45
3.8	Simulação Numérica de Impacto pelo método dos elementos finitos . . . . .	50
<b>4</b>	<b>Resultados e Discussões</b>	<b>63</b>
4.1	Seleção do Fio de Nitinol . . . . .	63
4.2	Equacionamento para o Módulo de Armazenamento e Temperatura de Transição Vítreia em DMA . . . . .	66
4.3	Análise e Resultados para os Ensaios Experimentais de Impacto . . . . .	73
4.4	Análise e Resultados para as Simulações Numéricas Não-Lineares de Impacto	82
	<b>Conclusão</b>	<b>89</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>93</b>

# Lista de Figuras

2.1	Classificação dos tipos de reforço. Fonte: Adaptado de [12] . . . . .	7
2.2	Diagrama Tensão x Deformação das LMFs e a suas respectivas estruturas cristalinas em suas respectivas temperaturas. a) $T \gg Af$ , b) $T > Af$ e c) $T < Af$ . Fonte: Adaptado de [7] . . . . .	10
2.3	Micrografias a) com fios de Aramida, b) com fios de NiTi . Fonte: Adaptado de [62] . . . . .	15
2.4	Tipos de testes de hipóteses. . . . .	18
2.5	Nível de significância e $p - value$ . . . . .	19
2.6	Erros no Teste de Hipótese. . . . .	20
2.7	Comparação entre a Distribuição Normal e a Distribuição $T$ de Student. . . . .	21
3.1	Fluxograma das atividades de Tese. Fonte: Autor . . . . .	33
3.2	Posição dos fios inseridos no plano neutro do compósito. Fonte: Autor . . . . .	35
3.3	Posicionamento do fio martensítico e superelástico no laminado . . . . .	36
3.4	Processo de infusão via VARTM. Fonte: Adaptado de [86] . . . . .	36
3.5	Impregnação das fibras via VARTM . . . . .	37
3.6	Posicionamento dos fios NiTi no laminado: a) Linha Neutra ; b) Nível Superior e c) Nível Inferior. . . . .	39
3.7	Processo VARTM com o posicionamento dos fios NiTi no laminado. . . . .	40
3.8	Espaçamento dos fios NiTi no laminado: a) $10mm$ ; b) $30mm$ e c) $50mm$ . . . . .	43
3.9	Fixação dos fios de NiTi para garantir o espaçamento correto. . . . .	44
3.10	Corte dos corpos de prova para ensaio de impacto. . . . .	44
3.11	Dimensões das amostras segundo a norma ASTM D7136/D7136M [9]. . . . .	46

3.12	Máquina de ensaio de impacto de baixa velocidade Instron <sup>®</sup> 9340. . . . .	47
3.13	Tipo de Impactor: a) segundo a norma ASTM D7136/D7136M [9] e b) impactor Instron 9340. . . . .	47
3.14	Tipos de Danos após evento de impacto. Fonte: Adaptado de [9]. . . . .	49
3.15	Simplificação do modelo do impactor. . . . .	50
3.16	Dimensões do suporte de fixação das placas de compósito. . . . .	51
3.17	Dimensão da geometria de uma camada de compósito. . . . .	52
3.18	Geometria do Modelo C no software de elementos finitos. . . . .	53
3.19	Geometria simétrica aplicada para simplificação do modelo. . . . .	54
3.20	Malha do Fio de NiTi inserido na placa de compósito. . . . .	55
3.21	Malha do Fio de NiTi inserido na placa de compósito. . . . .	56
3.22	Malha da Base e do Impactor. . . . .	57
3.23	Condição de contato entre a placa e a base de apoio. . . . .	58
4.1	Placa de compósito com os fios Superelástico e Martensítico. . . . .	63
4.2	Corpos de prova de DMA Superelástico, Base e Martensítico, respectiva- mente. . . . .	64
4.3	Curva de Pareto dos efeitos para $E'$ . . . . .	68
4.4	Curva de Pareto dos efeitos para $\tan \delta$ . . . . .	68
4.5	Curva das Médias dos Efeitos Principais para $E'$ . . . . .	69
4.6	Curva das Médias dos Efeitos Principais para $\tan \delta$ . . . . .	69
4.7	Curva das Médias dos Efeitos Principais para $E'$ . . . . .	72
4.8	Curva das Médias dos Efeitos Principais para $\tan \delta$ . . . . .	72
4.9	Corpos de Prova do Modelo E e F. . . . .	73
4.10	Amostra base sem fio NiTi fixada na máquina para ensaio de impacto. . .	74
4.11	Danos causados pelo impacto nas amostras do Modelo E e F. . . . .	75
4.12	Curvas das energias médias absorvidas em função do deslocamento do punção.	77
4.13	Curvas das energias absorvidas em função do deslocamento do punção. . .	78
4.14	Curva de Pareto dos efeitos para energia absorvida. . . . .	79
4.15	Curva das médias de energia absorvida em função do deslocamento do punção.	80

4.16	Curva conjunto da absorção de energia para os Modelos A, B, C e D. . . .	82
4.17	Curva individual da absorção de energia para os Modelos A, B, C e D. . .	83
4.18	Tensões de Cisalhamento (vista superior) para os Modelos A, B, C e D. . .	85
4.19	Tensões de Cisalhamento (vista inferior) para os Modelos A, B, C e D. . .	86
4.20	Tensões de <i>Von Mises</i> para os Modelos B, C e D. . . . .	87
4.21	Energia interna absorvida pelos fios NiTi para os Modelos B, C e D. . . . .	88

# Lista de Tabelas

2.1	Alguns trabalhos relacionados a inserção de LMF em materiais compósitos	11
2.2	Quantidade de experimentos em um arranjo fatorial completo	27
2.3	Quantidade de interações em um arranjo fatorial completo $N = 2^4$ .	28
3.1	Materiais utilizados no processo de infusão via VARTM	34
3.2	Arranjo Fatorial em função da quantidade de fios e posição no laminado	38
3.3	Arranjo Fatorial Fracionado em função do Diâmetro, Espaçamento e Posição dos Fios	41
3.4	Experimentos gerados pelo arranjo fatorial fracionado	42
3.5	Nomenclatura dos corpos de prova para impacto	45
3.6	Condições de Contorno do Experimento de Impacto	49
3.7	Nomenclatura das geometrias utilizadas na simulação numérica.	53
3.8	Propriedades do material compósito. Adaptado de [79].	61
3.9	Propriedades mecânicas dos fios de NiTi.	62
4.1	Módulos de Armazenamento dos ensaios de DMA	64
4.2	$H_0$ e $H_A$ para ANOVA e Teste $t$ -Student	65
4.3	Valores de $p$ -Value para ANOVA e Teste $t$ -Student	65
4.4	Respostas da análise de DMA no Arranjo Fatorial Completo	66
4.5	Respostas de $p$ -Value da ANOVA para $E'$	67
4.6	Respostas de $p$ -Value da ANOVA para $\tan \delta$	67
4.7	Respostas de $R^2$ para $E'$	70
4.8	Respostas de $R^2$ para $\tan \delta$ .	70



4.9	Resultados da Absorção de Energia ao Impacto. . . . .	76
4.10	Resposta de $p$ - Value da ANOVA para Absorção de Energia ao Impacto. . .	79
4.11	Resposta de $R^2$ para Absorção de Energia ao Impacto $E$ . . . . .	81
4.12	Resultados da simulação numérica para absorção de energia ao impacto $E$ . .	84
4.13	Correlação entre os resultados experimentais e numéricos para absorção de energia ao impacto $E$ . . . . .	84

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Motivação

Setores industriais de tecnologia avançada como, por exemplo, os aeronáutico e automotivo apresentam uma crescente demanda por peças e componentes mais leves e resistentes, capazes de resistir à carregamentos elevados. Uma solução encontrada para esta demanda foram os compósitos reforçados com fibras e matriz polimérica, sendo os mais comuns os de fibra de carbono e fibra de vidro com matriz epóxi. O uso destes materiais implica diretamente em redução de peso das estruturas além de outros benefícios como aumento da resistência mecânica, tenacidade, etc. No setor automotivo, a redução no peso dos automóveis torna-se de suma importância devido à crescente expansão do mercado de automóveis híbridos e elétricos. Além disso, estes materiais trouxeram grandes melhorias de certas características como resistência à corrosão, atenuação de ruídos e capacidade de amortecimento [1].

Entretanto, os materiais compósitos ainda possuem certa deficiência quanto a resistência à colisões (*crashworthiness*). Esta resistência à colisão é a capacidade da estrutura em proteger os ocupantes durante um evento de colisão. Esta capacidade avalia a absorção de energia por meio de mecanismos e modos de falha controlados, que permitem a manutenção gradual no perfil de carga durante a absorção e conseqüentemente garantindo a segurança dos ocupantes [2, 3]. Assim, cada vez mais se faz necessário estudos de soluções

para o aumento da absorção de energia ao impacto em materiais compósitos. Uma dessas soluções encontra-se na utilização de materiais inteligentes (*smart materials*) inseridos no laminado dos compósitos como estruturas ativas que oferecem propriedades que variam de acordo com a sollicitação do meio em que estão atuando. Dentre os materiais inteligentes enquadram-se os fios de Ligas com Memória de Forma (LMF) ou do inglês *Shape Memory Alloys* (SMA) que podem variar suas propriedades mecânicas em função da temperatura em que forem submetidos [4, 5].

Os fios de LMF mais utilizados são os de Níquel-Titânio (NiTi) ou comercialmente conhecidos como fios de nitinol. Os fios de NiTi podem ser classificados em função da sua temperatura de ativação ( $A_f$ ) e são divididos em Martensíticos e Superelásticos. O fio Martensítico, como o próprio nome já diz, possui a martensita como estrutura cristalina e fase estável na temperatura ambiente e o Superelástico apresenta a austenita como fase estável na temperatura ambiente [6, 7].

Em comparação com outros materiais inteligentes as ligas de memória de forma oferecem algumas vantagens tais como: altas deformações reversíveis (até 6%) e recuperação de forma, alta capacidade de amortecimento, grande alteração reversível das características mecânicas e físicas e capacidade de gerar altas tensões de recuperação quando impedidas de recuperar sua forma. Estas ligas podem apresentar-se na forma de fios e assim, facilitar sua integração ao material compósito polimérico. Além disso, as ligas de LMF podem trazer funcionalidade adicional, sem interromper drasticamente a microestrutura inicial e as propriedades estruturais e comprometer o baixo peso dos compósitos. Como resultado, materiais compostos com fios de LMF podem demonstrar funções como mudança de forma, expansão térmica controlada, mudança na frequência natural de vibração da peça após a ativação, possível redução e reparo de danos [8].

Tendo em vista as várias aplicações a serem estudadas por meio da inserção dos LMFs em materiais compósitos, o estudo a ser desenvolvido neste trabalho de tese relaciona a capacidade de resistência ao impacto dos compósitos poliméricos com os fios de LMFs. Para tal, os parâmetros utilizados foram a variação do tipo de fio, diâmetro, posição e espaçamento no laminado. Assim, de posse destes parâmetros utilizou-se Planejamento

e Análise de Experimentos para se obter um equacionamento capaz de prever a capacidade de absorção de energia no evento de impacto. Além disso, buscando uma forma mais rápida e menos dispendiosa para projetos futuros, utilizou-se simulação numérica pelo método dos elementos finitos (MEF) visando encontrar uma correlação com a análise experimental e conseqüentemente um modelo confiável para utilização em trabalhos futuros.

## 1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de um equacionamento estatístico utilizando planejamento de experimentos e regressão polinomial capaz de prever a capacidade de absorção de energia ao impacto em materiais compósitos de fibra de vidro e matriz de resina epóxi com fios de Liga de Memória de Forma inseridos.

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Avaliar a liga de metal com memória de forma mais adequada (Martensítica ou Superelástica) para função de absorção de energia ao impacto em materiais compósitos pelo método de Análise Dinâmico Mecânica (DMA);
- Analisar, por meio da técnica de planejamento de experimentos (DOE), quais fatores (diâmetro do fio, espaçamento entre fios e posição no laminado) que possuem maior influência na absorção de energia ao impacto seguindo as norma ASTM D7136 [9].
- Avaliar, por meio de simulação numérica pelo método dos elementos finitos a existência de correlação entre a análise experimental x computacional;
- Propor, por meio de simulação numérica pelo método dos elementos finitos um modelo numérico que possa ser utilizado para aplicação em trabalhos futuros, a fim de gerar uma redução de custos e modificações de parâmetros para projetos futuros;

### 1.3 Justificativas

Em virtude da atual tendência do mercado para fabricação de carros elétricos e híbridos, além do mercado aeronáutico, o uso de materiais compósitos cresceu rapidamente. Esse crescimento ocorre em virtude das suas excelentes propriedades mecânicas aliadas ao baixo peso. Sendo assim, cada vez mais se faz necessário o estudo de soluções para o aumento da absorção de energia ao impacto em materiais compósitos sendo que uma dessas soluções encontra-se na utilização de materiais inteligentes (*smart materials*) como fios de Ligas com Memória de Forma (LMF). Além disso, o desenvolvimento de um modelo matemático e numérico computacional (simulação numérica não-linear), capaz de prever o comportamento de absorção de energia, auxiliaria em diversos projetos estruturais envolvendo materiais compósitos com aplicações científicas e industriais diversas.

### 1.4 Limitação da pesquisa

A principal limitação da pesquisa refere-se ao alto custo do material compósito para a fabricação de corpos de prova para impacto. Tal custo impossibilitou a realização de um planejamento de experimentos (DOE) de superfície de resposta devido a grande quantidade de placas de compósito a serem fabricadas e de material a ser consumido. Como solução, utilizou-se um DOE com arranjo experimental fracionado e uma busca de correlação através de simulação numérica para diminuição de custos para este trabalho e futuros desenvolvimentos.

### 1.5 Estrutura da Tese

Este trabalho esta estruturado em cinco capítulos conforme descritos a seguir:

O Capítulo 1 aborda uma breve introdução deste trabalho objetivando ressaltar os motivos que levaram a este estudo bem como os objetivos e suas justificativas.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura com uma sucinta revisão de materiais compósitos, Ligas de Memória de Forma inseridas em compósitos, simulação numérica pelo

método dos elementos finitos. Além disso, aborda a revisão sobre ferramentas estatísticas a serem utilizadas para validação dos ensaios e modelos matemáticos.

O Capítulo 3 apresenta informações dos materiais, equipamentos e a metodologia utilizada para a seleção do fio de LMF, processamento, fabricação dos corpos de prova, metodologia para validação do modelo matemático através de ensaios de impacto e simulação numérica pelo método dos elementos finitos.

O Capítulo 4 apresenta os resultados que embasaram a escolha da liga de memória de forma a ser utilizada nos corpos de prova para ensaios de impacto. Além disso, trás os resultados da validação de modelo matemático e sua correlação com a análise numérica computacional.

# Capítulo 2

## Revisão Bibliográfica

### 2.1 Materiais Compósitos

O termo material compósito, segundo Strong [10], refere-se à união de dois ou mais materiais diferentes que se combinam para formar um terceiro material. O novo material, se bem projetado e fabricado, apresenta melhores propriedades estruturais que os seus componentes apresentam individualmente. Um destes componentes é chamado de reforço ou fase de reforço cujo objetivo é reforçar o compósito no aspecto de suportar carregamentos estruturais. O segundo componente é chamado de matriz e é responsável pela união e transferência de carga no compósito [11]. Segundo Kaw [12], os materiais compósitos podem ser classificados através da geometria do reforço (Figura 2.1), sendo eles:

- Reforço com particulados
- Reforço com fibras curtas ou descontínuas (alinhadas ou desalinhadas)
- Reforço com fibras longas (na forma de filamentos ou tecidos)

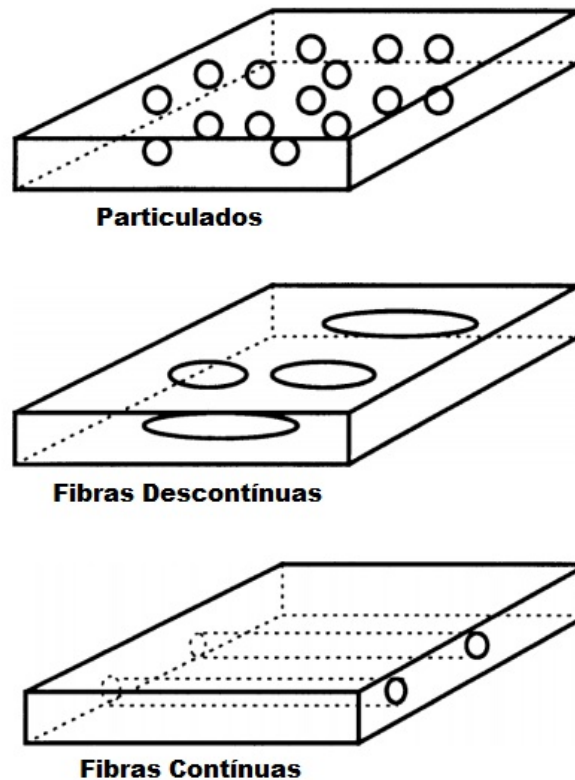


Figura 2.1: Classificação dos tipos de reforço. Fonte: Adaptado de [12]

Quanto a fase da matriz, os tipos mais utilizadas são as matrizes poliméricas como as resinas termorrígidas e termoplásticas [12]. Os materiais compósitos possuem uma vasta gama de aplicações dentro de diversos setores industriais tais como o aeroespacial, automotivo, construção marítima, energias renováveis, etc [13]. Os compósitos estruturais com matrizes poliméricas despertam interesse em aplicações na engenharia por apresentarem baixa massa específica ( $< 2g/cm^3$ ) aliada à alta resistência mecânica ( $\sigma_T > 500MPa$ ) [14]. O uso de materiais compósitos na indústria automotiva pode ser dividido em três categorias:

- Compósitos não estruturais: Moldes fabricados a partir de fibras curtas e longas utilizados no processo de injeção/moldagem por compressão de peças como coletores de admissão, pedais, retrovisores, etc.



- Compósitos semi estruturais: Semi-preg de fibra de vidro com resina termoplástica pelos processos de *glass mat thermoplastics* (GMT) e *sheet molding compound* (SMC) na fabricação de carenagens da carroceria, painéis do assoalho, encosto dos bancos, etc.
- Compósitos estruturais: Suporte do motor/suspensão (*Crossmember*), molas, eixos de transmissão, atenuares de impacto (*Bumper System*), etc, utilizando compósitos estruturais de matriz termoplástica e termorrígida através de processos como o de moldagem por transferência de resina (*RTM - Resin Transfer Molded*), enrolamento filamentar (*Filament Winding*), etc.

Enfoque deste trabalho, os compósitos estruturais com maior aplicação na indústria são os que apresentam fibra de carbono, fibra de vidro e fibra de aramida como reforço [12]. Para o processamento do material compósito, a forma mais utilizada na indústria é o empilhamento de camadas de tecido, sendo eles unidirecional ou bidirecional, com uma orientação pré-definida. Porém, dentre um dos aspectos limitantes na utilização destes materiais está relacionada a baixa resistência ao impacto associada a baixa tenacidade à fratura [15].

## 2.2 Ligas de Memória de Forma Inseridas em Materiais Compósitos

Desde sua descoberta, as ligas de memória de forma foram cada vez mais estudadas e aplicadas em uma variedade de áreas de conhecimento a fim de se apresentar como uma solução viável para problemas principalmente relacionados a área de engenharia [16]. Várias pesquisas concentraram-se em expandir e explorar maneiras eficientes de aproveitar ou até mesmo melhorar suas propriedades únicas relacionadas ao seu desempenho mecânico [17]. Em seu trabalho, Ashby e Bréchet [18] relacionaram duas possíveis abordagens para esse aumento de desempenho: (i) o desenvolvimento de novas ligas ou (ii) a criação de materiais híbridos que combinam as características dos materiais existentes para me-

lhorar suas propriedades. Estudos em relação ao desenvolvimento de novas ligas levaram a obtenção de LMFs de alta temperatura (do inglês *High Temperature Shape Memory Alloys* - HTSMA [19, 20]), ligas magnéticas com memória de forma (do inglês *Magnetic Shape Memory Alloys* - MSMA [21, 22]) e polímeros com memória de forma (do inglês *Shape Memory Polymer* - SMP [23, 24]).

A segunda linha de desenvolvimento proposta por Ashby e Bréchet [18] é a que apresenta mais estudos em relação as ligas de memória de forma (LMF), pois ao combinar uma ou mais ligas com outros materiais, podem ser criados novos compósitos com comportamentos termoelásticos, mecânicos e com algumas transformações de fase mais eficazes. Tal conceito incorpora materiais com fases distintas, incluindo a utilização de LMF como reforço ou matriz em meio poroso. No final dos anos 1980, Rogers e Robertshaw [25] incorporaram pela primeira vez fios de NiTi em um compósito de matriz polimérica e classificaram este material como um material adaptativo que eles definiram como sendo um compósito que contém fibras e liga com memória de forma de tal forma que o material pode ser reforçado ou controlado pela adição de calor.

As ligas de memória de forma foram descobertos no século 20, especificamente em 1932 com as primeiras observações com a liga de ouro-cádmio que é altamente cara e tóxica [80]. Na década de 60 houve a descoberta das ligas de memória de forma à base de níquel-titânio (NiTi) sendo mais acessíveis e não tóxicas [16]. Em sua grande maioria as LMFs exibem três propriedades principais (Figura 2.2): (i) a memória de forma após aquecimento a partir de um estado martensítico deformado, com um possível efeito de memória de forma bidirecional durante o treinamento da liga, (ii) amortecimento no estado martensítico, (iii) comportamento superelástico no estado austenítico. Para simplificar, a liga que apresenta memória de forma na temperatura ambiente é a liga Martensítica que, como o próprio nome diz, possui a martensita como estrutura cristalina e fase estável na temperatura ambiente. Já liga Superelástica apresenta a austenita como fase estável na temperatura ambiente [27].

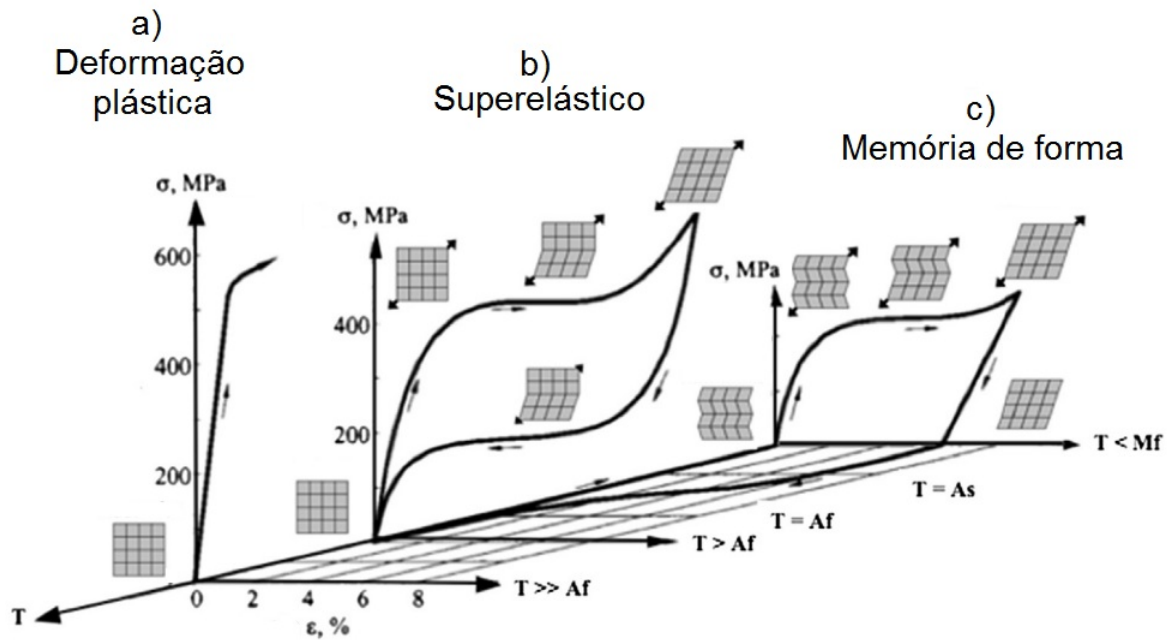


Figura 2.2: Diagrama Tensão x Deformação das LMFs e a suas respectivas estruturas cristalinas em suas respectivas temperaturas. a)  $T \gg Af$ , b)  $T > Af$  e c)  $T < Af$ .  
Fonte: Adaptado de [7]

Os primeiros estudos em compósitos com ligas de memória de forma concentraram-se na utilização dos efeitos de ativação aliada as propriedades do material e ajuste da energia de deformação [28, 29, 30]. O ajuste de propriedade ativa refere-se à transformação de fios LMF não deformados de seu estado martensítico para o austenítico visando aproveitar o aumento no módulo de elasticidade o que pode ser bastante útil em vibração, amortecimento e controle estrutural. Para o ajuste da energia de deformação ativa, os fios inicialmente alongados são aquecidos de volta à sua forma austenítica. A contração induzida dos fios leva a grandes tensões internas (e energia de deformação) que, além da mudança no módulo, pode fornecer ainda maior controle sobre a vibração, amortecimento ou outras características estruturais [31, 32, 33].

Em seu estudo, Baz e Ro [32] estenderam este conceito levando em consideração a dissipação de energia herdada da transformação martensítica em conjunto com mudanças na rigidez do compósito para alcançar o controle de vibração ideal em um amplo espectro de frequência. O efeito de memória de forma foi ainda usado para aumentar a resistência de compósitos com LMF devido às forças internas associadas à recuperação térmica, conforme proposto inicialmente por Yamada [34] e demonstrado por Armstrong e Kino [35]. Paine [36] também usou o SME com um sistema de matriz de polímero reforçado com NiTi para aliviar os picos de tensões em tração de vasos de pressão. A Tabela 2.1 exibe alguns trabalhos relacionados a inserção de LMF para melhoria das propriedades mecânicas de materiais compósitos.

Tabela 2.1: Alguns trabalhos relacionados a inserção de LMF em materiais compósitos

Tipo de Fibra	Modelo de LMF	Composição da LMF	Referências
Carbono	Fio	NiTi	[37]
Carbono	Fio	NiTi	[38, 39, 40, 41]
Carbono / Kevlar	Fio	NiTi	[42]
Kevlar	Fio	NiTi	[43]
Kevlar	Fio	NiTiCu	[44, 45, 46, 47]
Fibra de Vidro	Fio	NiTiCu	[48, 49, 50, 52]
Fibra de vidro	Fio	NiTi	[53]

## 2.3 Ligas de Memória de Forma na Resposta ao Impacto

Para o avanço no desenvolvimento de materiais compósitos, uma das principais motivações tem sido a crescente necessidade de materiais com alta rigidez e resistência mecânica específica. Recentemente, o desenvolvimento de materiais compósitos aproveitou sua heterogeneidade e anisotropia inerentes para combinar suas tradicionais funções de suporte de

carga com novas funcionalidades na forma de elementos incorporados. Esses novos materiais compósitos adaptáveis ou "inteligentes" (*Smart Materials*) podem integrar atuadores ou sensores para que possam se adaptar e reagir ao seu ambiente de serviço, permitindo ganhos de eficiência e não apenas reduzindo o peso estrutural, mas também integrando funções diretamente ligadas à estrutura. Neste contexto, um destes materiais inteligentes, enquadram-se as Ligas de Memória de Forma (LMF) ou do inglês *Shape Memory Alloys* [4, 5].

Objeto de estudo deste trabalho, Paine e Rogers [54] demonstraram pela primeira vez o uso de fios de LMF (0,4 mm de diâmetro) para melhorar a resposta de compósitos a danos por impacto de baixa velocidade. Em seu trabalho, integraram fios de NiTi em pré-impregnados de carbono, paralelos às fibras na direção  $0^\circ$  nas camadas que estão abaixo do eixo neutro da estrutura. No geral, a fração volumétrica dos fios foi de 2,8%. Esta estratégia permitiu um aumento de 25% na resistência à delaminação no momento do impacto em comparação com os compósitos sem fios de LMF. Os fios também permitiram parar a perfuração da estrutura pelo impactor.

Para se beneficiar ainda mais das propriedades dos fios de LMF, um pré-esforço pode ser aplicado aos fios antes de integrá-los na estrutura. Birman [55, 56] usou um modelo micromecânico baseado no método multicelular para modelar fibras reforçadas com LMF pré-tensionados. Seus resultados confirmaram a eficácia das ligas de memória de forma embutidos nas camadas dos compósitos para melhorar as propriedades de impacto de baixa velocidade, se estes forem pré-tensionados e sua contração for evitada durante a fabricação de compósitos, criando assim tensões de tração.

Em outra pesquisa, Tsoi [6] investigou experimentalmente o potencial de LMFs, pré-tensionadas, em compósitos de fibra de vidro/epóxi para melhorar as propriedades de dano por impacto. Eles integraram fios superelásticos e martensíticos de NiTi (0,15mm de diâmetro), bem como fios de aço inoxidável para comparação, em pré-impregnados de epóxi de fibra de vidro. Para permitir a integração de fios pré-tensionados, foi projetada uma estrutura especial para manter a deformação durante o processo de cura composta (que estava acima da temperatura de transformação dos fios). Os níveis de pré-deformação

de 0, 1,5 e 3% foram investigados para fios de NiTi. A influência da posição e da fração volumétrica foi investigada com fios de NiTi, que foram integrados entre as camadas de reforço, em diferentes posições, e com frações volumétricas de 0,45, 0,89 e 1,8%, correspondendo a 0,5, 1 e 2 fios /mm na estrutura, respectivamente. No geral, os resultados mostraram que (i) a área delaminada diminuiu ao aumentar o nível de pré-tensão da LMF; (ii) os LMFs precisavam ser integrados entre as camadas, na metade inferior do laminado, e especialmente na camada inferior para diminuir o dano à quebra da fibra; e (iii) aumentar a densidade do fio aumentou a resistência à delaminação.

Pappada [57, 58], em duas publicações, avaliou as características mecânica, de amortecimento e de impacto em compósitos híbridos de fibra de vidro e matriz de éster de vinil com fios de LMFs inseridos. Foram fabricadas três placas para ensaio de impacto de Charpy [57] sendo elas: (i) placas com fios de 0,1 mm de diâmetro de NiTi superelásticos unidirecionais; (ii) chapas com fios de aço unidirecionais para entender a influência das ligas de LMFs e (iii) placas com fios picados de NiTi superelásticos. Todas as placas possuíam cerca de 1% em volume dos fios e foram produzidas pelo processo de moldagem por infusão de resina assistida à vácuo (VARTM). Enquanto as amostras com fios picados apresentaram um aumento de 37% na energia de impacto em charpy, as amostras contendo aço unidirecional e fios de LMF não mostraram uma alteração significativa nas características do impacto. Os autores concluíram que a melhoria na configuração dos fios de LMF picados esteve relacionada ao módulo elástico inferior, quando comparado às LMFs integradas no plano da estrutura. Além disso, afirmaram que a falta de adesão na matriz dos fios superelásticos unidirecionais contribuíram para a baixa performance do compósito. Os autores continuaram seu trabalho através testes de impacto de baixa velocidade em laminados com LMF produzidos novamente por VARTM com uma resina de éster de vinil e um tecido de fibra de vidro [58]. Suportes de alumínio foram usados para alinhar os fios de NiTi superelásticos nas direções 0° e 90° e o volume de fios no compósito foi de cerca de 3%. As curvas de teste de impacto, medidas para energias que variam entre 1J e 500J, mostraram um ligeiro, mas marginal, aumento de delaminação para os compósitos. No entanto, ao medir a área de dano resultante por C-Scan, foi

observada uma diminuição considerável na área de dano (até 60%), especialmente para energias de impacto inferiores a  $10J$ .

Para observar a influência dos fios de LMF na melhora da absorção de energia em materiais compósitos, baixos de energia, Aurrekoetxea et al. [59] propuseram o uso de uma matriz termoplástica com os fios superelásticos de NiTi ( $0,5mm$  de diâmetro), com uma fração de volume de 2,3%. Os fios foram integrados a um tecido de fibra de carbono com uma matriz de poli (tereftalato de butileno). Os laminados foram processados a  $230^{\circ}C$  para permitir uma melhor impregnação da resina termoplástica no laminado. Os testes de impacto foram então realizados com energias variando de  $0,1J$  a  $6,8J$ . Os resultados mostraram que em níveis de energia acima de  $1,1J$ , existe uma melhor dissipação de energia ao impacto nos compósitos termoplásticos.

Para avaliar os efeitos das condições ambientais (temperatura) na resposta ao impacto dos laminados, Kang e Kim [60] produziram corpos de prova com 24 camadas de um pré-impregnado de vidro/epóxi e fios superelásticos de LMF inseridos na linha neutra do laminado, ou seja, entre as camadas 12 e 13. Testes de impacto foram realizados em sistemas a temperatura ambiente e em três diferentes temperaturas:  $293K$ ,  $263K$  e  $233K$ . Os resultados mostraram que a inserção dos fios melhora a resposta ao impacto. Entretanto, com a diminuição da temperatura, a fragilidade dos laminados aumentava e conseqüentemente diminuía a capacidade de absorção da energia ao impacto.

Em seu estudo, Lau [61] fabricou, via VARTM, um compósito com 10 camadas de tecido de fibra de vidro/epóxi costurado (técnica de stitching) com fios superelásticos de NiTi de  $0,22mm$  de diâmetro. Os testes de impacto foram conduzidos na energia de  $3,4J$  e os resultados mostraram que, com os fios de LMF, os corpos de prova diminuíram a energia de delaminação, o número de trincas translaminares, além de aumentar o módulo de tração e a taxa de amortecimento dos compósitos em comparação com os corpos de prova não costurados. Nesta mesma linha de pesquisa, Vachon [62] fabricaram um compósito com 16 camadas de tecido de fibra de carbono/epóxi costuradas com LMF e Aramida (Figura 2.3). Nos resultados, os autores observaram uma redução de 7% e 19% na área de delaminação por impacto (com nível de energia de  $1J/mm$ ) para LMF e

Kevlar, respectivamente. Além disso, com a costura, houve um aumento de 1% para LMF e 8% para Aramida na resposta CAI em comparação com corpos de prova sem costura. Os autores também concluíram que essas variações de propriedade podem ser melhoradas ao aumentar a fração de volume dos fios LMF no compósito.

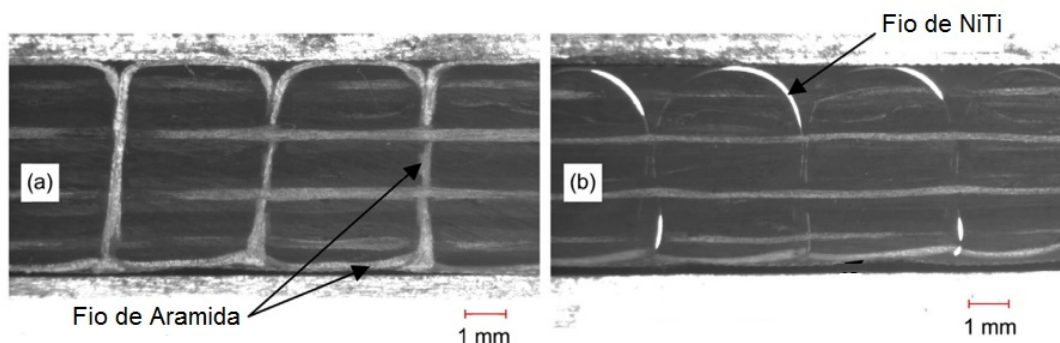


Figura 2.3: Micrografias a) com fios de Aramida, b) com fios de NiTi . Fonte: Adaptado de [62]

Diante dos vários estudos desenvolvidos a cerca da inserção de fios de LMF em compósitos com matriz polimérica, pode-se observar que existe uma grande quantidade de parâmetros a serem estudados. Dentre eles, podemos destacar o tipo de fio (Superelástico ou Martensítico), diâmetro, posição e espaçamento no laminado. Além disso, um equacionamento envolvendo todos estes parâmetros traria uma importante contribuição para o desenvolvimento tecnológico envolvendo materiais inteligentes e suas aplicações. Sendo assim, este trabalho de tese busca a elaboração de um equacionamento capaz de prever a capacidade de absorção de energia no evento de impacto e compressão pós impacto, além de análises mais detalhadas da influência de cada variável de projeto. Para se chegar a esse equacionamento, foi necessário realizar algumas etapas anteriores para auxiliar na seleção do fio de NiTi mais adequado para o desenvolvimento da tese. Para tal, utilizou-se a análise dinâmico-mecânica (DMA) que trata-se de um método de análise mais rápido e barato para se ter uma avaliação das propriedades viscoelásticas do material e se a inserção do fio ocasionará uma melhora de propriedades no compósito e assim possibilitando a inferência e o estudo da deformação do compósito em função do tempo, sob tensão e temperatura constantes. Esse tipo de análise usa a temperatura como ativador para que



o material inteligente promova os ajustes em suas propriedades. Vilar e colaboradores [63], obtiveram resultados no ensaio de DMA, constatando-se que os fios com memória de forma inseridos em compósitos obtidos com pré-preg de fibras de carbono unidirecionais, apresentam aumento substancial de rigidez quando aquecidos até uma temperatura suficientemente alta para promover a transformação de fase. O aumento observado de módulo de elasticidade dos fios de nitinol indica um grande potencial para obtenção de estruturas ativas. Dessa forma, justifica-se a análise de DMA como ponto de partida para seleção do fio de NiTi a ser utilizado na fabricação do compósito para a análise de impacto.

## 2.4 Conceitos Estatísticos

Neste tópico será apresentado conceitos da Estatística para melhor compreensão das ferramentas do planejamento de experimentos, análises de resultados e equacionamento utilizados neste trabalho [64].

### 2.4.1 Teste de Hipótese

Para se proceder a interpretação de um teste de hipótese há três requisitos básicos:

- Hipótese;
- O nível de significância;
- O valor  $p - value$ .

Fruto do embasamento filosófico da ciência, derivado dos trabalhos de Sir Karl Popper, a estatística leva em conta a natureza conjectural e provisória do conhecimento científico, sendo o conhecimento tido como verdadeiro até que não contrariado pelos fatos. Nessa linha de trabalho, que não é a única possível, parte-se de uma hipótese, a qual se deseja comprovar por meio de um estudo científico.

A hipótese científica se fundamenta em um problema e reflete uma possibilidade de resolvê-lo, sendo assim, tomemos um exemplo: Um professor está interessado em saber a respeito do andamento de sua disciplina. Para isso ele faz uma pesquisa solicitando que

os alunos apontem dois valores: a) A nota, de 0 a 10, que o aluno imaginava que teria a disciplina no momento em que fez matrícula. b) A nota, também de 0 a 10, que o aluno avalia a disciplina atualmente. Diante dessa situação, a hipótese a ser avaliada é a de que há diferença entre os valores observados antes e depois da primeira fase de aulas. Note que a diferença pode ser positiva (a disciplina supera as expectativas) ou pode ser negativa (a disciplina não atende as expectativas). Dentro do método científico, de posse da hipótese científica, enuncia-se a hipótese de nulidade, que contradiz a hipótese científica.

Hipótese de nulidade ( $H_0$ ) : Hipótese que se rejeitada, confirma a hipótese científica.

Ao mesmo tempo em que se enuncia a hipótese de nulidade, se enuncia também a hipótese alternativa.

Hipótese alternativa ( $H_A$ ) : Hipótese que é assumida caso haja rejeição da hipótese de nulidade e que valida a hipótese científica.

Observe que a rejeição da hipótese de nulidade traz subsídios para a confirmação da hipótese científica, aquela que foi definida na concepção do experimento ou da coleta de dados.

A rejeição da hipótese de nulidade conduz à aceitação da hipótese alternativa o que confirma a hipótese científica, a ideia que embasou a aquisição dos dados e a realização de todos os testes. A não rejeição da hipótese de nulidade faz com que o estudo seja inconclusivo. Ou seja, significa que a estatística não oferece subsídios de que a hipótese científica seja verdadeira, o que não significa que a hipótese de nulidade seja verdadeira, mas apenas não se obteve indícios nessa amostra de que a hipótese de nulidade seja falsa.

Os testes de hipótese podem ser bilaterais (bicaudais) ou unilaterais (unicaudais), onde a hipótese alternativa poderá ser uma diferença ou uma desigualdade, representados pela Figura 2.4.

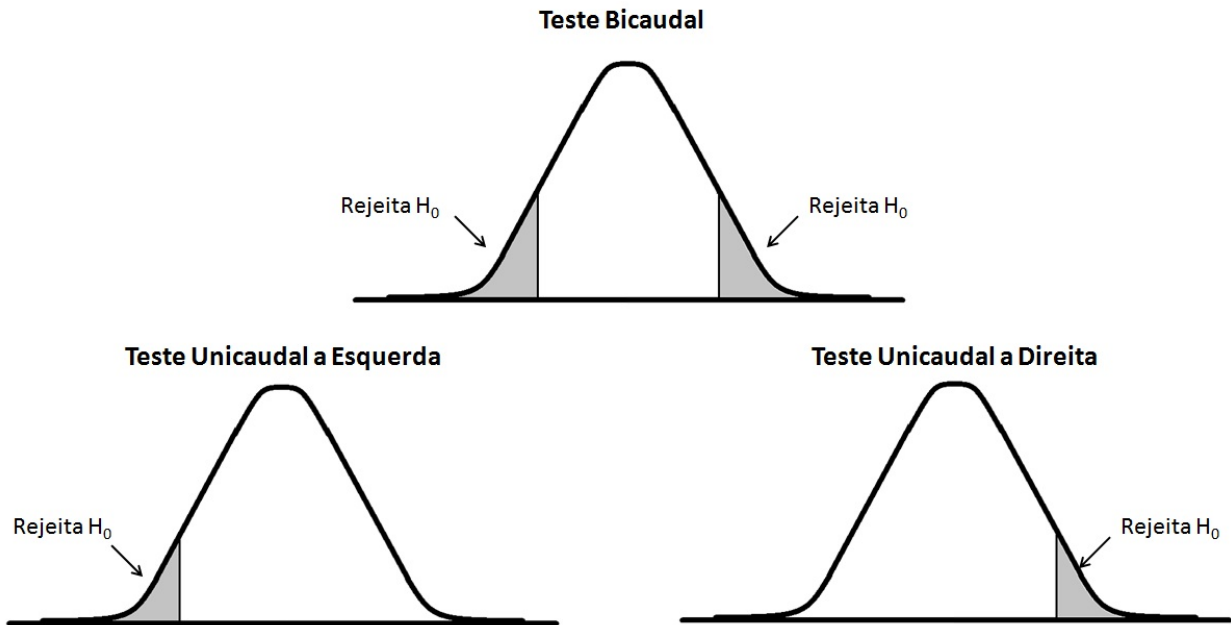


Figura 2.4: Tipos de testes de hipóteses.

O nível de significância ( $\alpha$ ) diz respeito a uma margem de erro tolerável e que sustenta a rejeição da hipótese de nulidade. O nível de significância é escolhido com base nos riscos envolvidos na rejeição incorreta da hipótese de nulidade, conforme ilustra a Figura 2.5.

O *valor - p* ou *p - value* é uma quantificação da probabilidade de se errar ao rejeitar  $H_0$  e a mesma decorre da distribuição estatística adotada. Se o *valor - p* é menor que o nível de significância, conclui-se que o correto é rejeitar a hipótese de nulidade.

No passado a conclusão dos testes estatísticos dependia da consulta a tabelas as quais contém valores críticos e que determinam se uma estatística é, ou não significativa, dentro de um nível de significância. Essas tabelas apareciam anexas aos livros de estatística e na maioria dos livros somente eram incluídas as tabelas para o nível de significância de 5%.

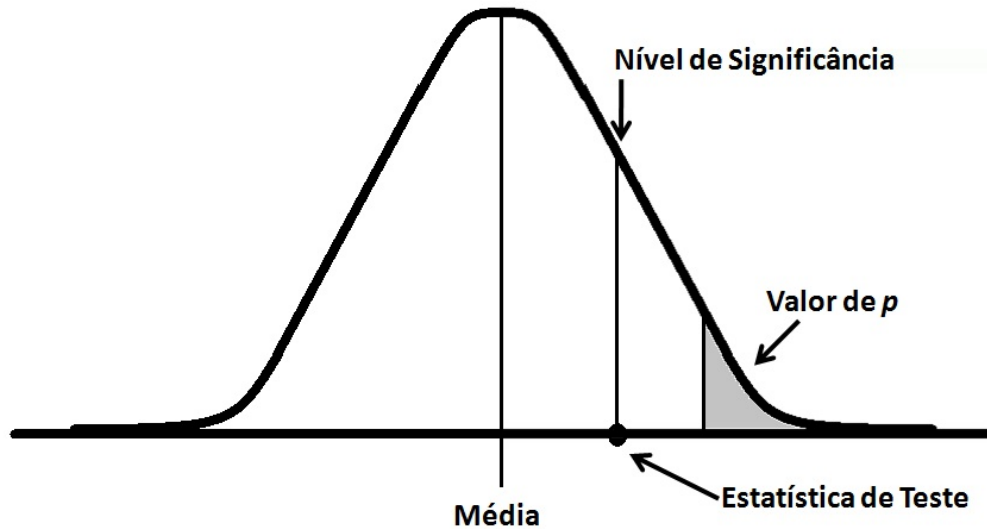


Figura 2.5: Nível de significância e  $p$  – *value*.

O erro tipo I ocorre quando o teste estatístico (oriundo de uma amostra) determina a rejeição da hipótese de nulidade, entretanto, na população a hipótese de nulidade não deve ser rejeitada. Esse é o nível de significância ( $\alpha$ ) e que estabelece um limite acima do qual, não se rejeita  $H_0$ . A redução do nível de significância, por exemplo de 5% para 1% (probabilidade de se incorrer no erro tipo I) vem acompanhada do acréscimo da probabilidade de ocorrência do erro tipo II (não rejeitar  $H_0$  quando na verdade, ela é falsa). O fato é que a rejeição de  $H_0$  sempre ocorrerá diante de uma possibilidade de que esta seja uma decisão errada uma vez que se está trabalhando com uma dentre tantas amostras possíveis. Como somente há controle do nível de significância, a única conclusão possível é a rejeição de  $H_0$  já que a não rejeição de  $H_0$  apenas nos informa que esta amostra não sustenta a rejeição, mas não há quantificação da probabilidade de erro tipo II.

	Hipótese Nula é <u>Verdadeira</u>	Hipótese Nula é <u>Falsa</u>
<b>Rejeita</b> Hipótese Nula	<b>Erro do Tipo I</b> Probabilidade: $\alpha$	<b>Decisão Correta</b> Probabilidade: $1 - \beta$ (Poder Estatístico)
<b>Não Rejeita</b> Hipótese Nula	<b>Decisão Correta</b> Probabilidade: $1 - \alpha$	<b>Erro do Tipo II</b> Probabilidade: $\beta$

Figura 2.6: Erros no Teste de Hipótese.

O poder de um teste estatístico é a probabilidade de se tomar uma decisão correta, rejeitar a hipótese nula se ela realmente for falsa. Ou seja, é a probabilidade complementar do erro tipo II ( $1 - \beta$ , ou ainda, poder + probabilidade do erro tipo II = 1). Logo, à medida que o poder aumenta, as chances de um falso negativo (erro tipo II) ocorrer diminuem. Três aspectos podem influenciar o poder, considerando todos os demais parâmetros iguais:

- O nível de significância: um teste possui maior poder se o nível de significância for 0,05 do que se for 0,01, por exemplo;
- O tamanho da amostra: quanto maior a amostra, maior o poder;
- O tamanho de efeito: quanto maior o tamanho de efeito, maior o poder do estudo;

### 2.4.2 A Estatística $T$ ou Teste $T$ - Student

O teste  $t$  de Student muito conhecido e utilizado dentro da área Estatística, é usado para comparar médias, de um grupo frente à média da população. Esse teste tem diversas variações de aplicação, mas sempre há a limitação do mesmo ser usado na comparação de duas (e somente duas) médias e as variações dizem respeito às hipóteses que são testadas.

Conhecendo então a média dos dois grupos, averigua se a média da amostra é diferente de um valor de referência ou da média da população, e então as hipóteses a serem testadas são:

- $H_0$  : a média da amostra é igual à média da referência (ou população);
- $H_A$  : a média da amostra é diferente à média da referência (ou população).

O teste  $t$  deriva da distribuição normal, assim como a distribuição  $t$  deriva da distribuição normal, conforme ilustrado na figura abaixo.

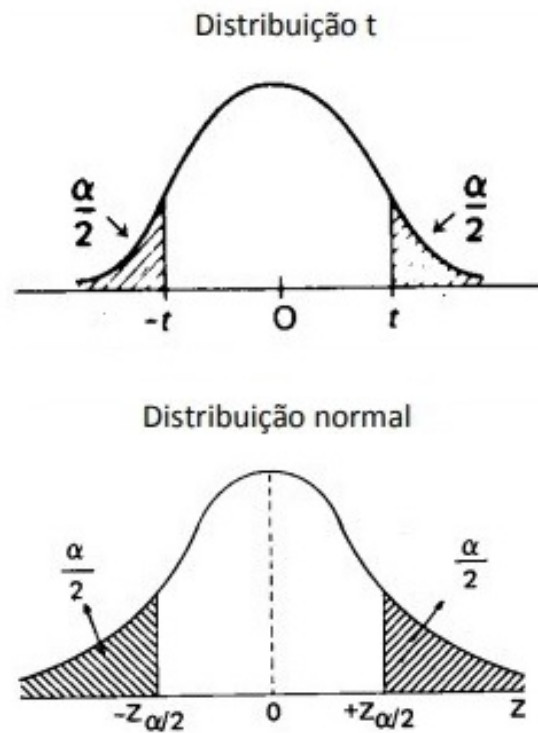


Figura 2.7: Comparação entre a Distribuição Normal e a Distribuição  $T$  de Student.

Para realizar o teste, faz-se necessário calcular o valor de  $t$ , dado pela seguinte equação:

$$t = \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{S}{\sqrt{n}}} \quad (2.1)$$

sendo:

$\bar{x}$  é a média da amostra;

$\mu$  é a média da população;

$S$  é o desvio padrão; e

$n$  é o tamanho da amostra.

É importante ressaltar que, esta forma de calcular a variável  $t$  é exclusivamente para comparar a média de uma amostra com a média de uma população. Caso se tenha um caso de comparação entre duas amostras independentes, é preciso recorrer á equação:

$$t = \frac{M_1 - M_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} \quad (2.2)$$

sendo:

$M_1$  e  $M_2$  são as médias de cada grupo;

$S_1$  e  $S_2$  são os desvios padrão para cada grupo;

$n_1$  e  $n_2$  o tamanho da amostra de cada grupo.

Para ambas as fórmulas, de acordo com a significância  $\alpha$  desejada e sabendo que  $T$  é obtido através da tabela dos valores de  $t - Student$ , disponível no anexo deste trabalho, temos que:

- quando a desigualdade  $t > -T$  é satisfeita, assume-se que não há diferença significativa entre as médias, ou seja, aceita-se  $H_0$ , isso para um teste unilateral ou unicaudal à esquerda;
- quando a desigualdade  $t < T$  é satisfeita, assume-se que não há diferença significativa entre as médias, ou seja, aceita-se  $H_0$ , isso para um teste unilateral ou unicaudal à direita;
- quando as desigualdades  $t > -T$  ou  $t < T$  são satisfeitas, assume-se que não há diferença significativa entre as médias, ou seja, aceita-se  $H_0$ , isso para um teste bilateral ou bicaudal;

### 2.4.3 ANOVA

Segundo Montgomery [64] a Análise de Variância é também conhecida como ANOVA e nada mais é do que um tipo de teste de hipótese, o mais utilizado deles. A ANOVA tem como objetivo comparar a média de uma população amostral, e assim identificar se essas médias diferem significativamente entre elas. Ou seja, uma proposta bem parecida com o teste  $t$  - Student.

A diferença básica entre os outros testes de hipótese e a análise de variância é o número de amostras. Enquanto nos testes de hipótese se trabalha com duas amostras, a ANOVA compara a média de mais de duas amostras e determina se ao menos uma se difere significativamente das demais.

Assim como o teste  $t$ , a ANOVA possui algumas restrições para ser usada que são listadas abaixo:

- Os resíduos devem ser normais ou próximos da normalidade. Para verificar se seus dados são normais, ou seja, as populações devem possuir uma distribuição normal;
- As variâncias de cada amostra devem ser iguais. Caso não seja, é possível padronizar dividindo pela variância amostral de forma a obter variância igual a um em todos os grupos;
- As amostras devem ser independentes.

As hipóteses nula e alternativa da análise a serem testadas na análise de variância são:

- Hipótese nula ( $H_0$ ): as médias populacionais são iguais.
- Hipótese alternativa ( $H_A$ ): as médias populacionais são diferentes, ou pelo menos uma é diferente das demais.

A estatística de teste,  $F$  ou teste- $F$ , recebe este nome em homenagem a Sir Ronald A. Fisher [65], e é simplesmente uma razão de duas variâncias. As variâncias são uma medida de dispersão, ou até que ponto os dados estão dispersos em relação à sua média. Valores



maiores representam maior dispersão. Usar o teste  $F$  para determinar se as médias de grupo são iguais é apenas uma questão de incluir as variâncias corretas na razão.

Assim como enunciado anteriormente para o teste  $t - Student$ , para a ANOVA, temos que:

- se  $\sigma_1^2 < \sigma_2^2$  e  $f > F$  é satisfeita, assume-se que não há diferença significativa entre as variâncias, ou seja, aceita-se  $H_0$ . E quando se  $\sigma_1^2 > \sigma_2^2$  e  $f < F$  é satisfeita, assume-se que não há diferença significativa entre as variâncias, ou seja, aceita-se  $H_0$ , com

$$f = \frac{S_1^2}{S_2^2} \quad (2.3)$$

- se  $\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$  e  $f < F$  é satisfeita, assume-se que não há diferença significativa entre as variâncias, ou seja, aceita-se  $H_0$ , com

$$f = \frac{\max(S_1^2, S_2^2)}{\min(S_1^2, S_2^2)} \quad (2.4)$$

sendo  $F$  dado pela tabela dos valores da distribuição  $F$  de Fisher, disponível no anexo deste trabalho, e  $S_1^2$  e  $S_2^2$  as variâncias dos grupos.

## 2.5 Planejamento de Experimentos

O Planejamento de experimentos, do inglês *Design of Experiments* (DoE), é um método estatístico desenvolvido para estabelecer quais variáveis apresentam maior significância em um processo e as condições sob as quais essas variáveis devem funcionar para otimizá-lo. Foi introduzido na década de 1920 por Sir Ronald A. Fisher, na Inglaterra, no campo da pesquisa agrícola [65]. Desde então, muitos cientistas e estatísticos contribuíram para o desenvolvimento do DoE e sua aplicação em diversos campos de pesquisa.

Segundo Montgomery [66], os experimentos são geralmente realizados para descobrir algo sobre um processo ou sistema específico. Um experimento é um teste ou uma série de testes nas quais alterações intencionais são feitas nas variáveis de entrada para que

seja possível observar e identificar os motivos das mudanças que podem ser ocasionadas na(s) resposta(s) de saída.

No campo industrial e no desenvolvimento científico, as variáveis de entrada são consideradas como parâmetros de controle e as de saída são as resposta ao problema. Como exemplo, no estudo a ser desenvolvido nesta tese, os parâmetros de controle considerados foram a variação do tipo de fio, diâmetro, posição e espaçamento no laminado. Como variável de resposta teremos a absorção de energia ao impacto e compressão pós impacto.

Sendo assim, o planejamento de experimentos insere todos os parâmetros considerados no problema em um arranjo experimental que será tratado estatisticamente através de uma análise de variância (ANOVA) [67].

Os arranjos experimentais podem ser categorizados pelo grau do polinômio característico, ou seja, um polinômio de primeiro grau (primeira ordem) demonstrado na Equação 2.5 ou de segundo grau (segunda ordem) demonstrado na Equação 2.6 [68, 69]. Dentro das definições do arranjo experimental, os de primeira ordem mais utilizados são Arranjo Fatorial Completo ou Fracionado e de segunda ordem o Composto Central (CCD) e Box-Behnken (BBD) [66, 70].

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \epsilon \quad (2.5)$$

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (2.6)$$

sendo:

$y$  representa a função real a ser modelada;

$\beta_0$  representa o termo constante do modelo;

$\beta_i$  representa os coeficientes dos termos lineares;

$\beta_{ii}$  representa os coeficientes dos termos quadráticos;

$\beta_{ij}$  representa os coeficientes dos termos de interação entre os fatores; e

$\epsilon$  representa o resíduo associado ao modelo estimado.

Nestes tipos de experimentos todos os fatores em estudo variam simultaneamente de forma a termos uma visão mais realística das operações conjuntas de um processo. Dessa forma, ao invés de estudarmos um fator por vez e seu fator de resposta, podemos estudar os efeitos conjuntamente com outros fatores na variável resposta. Essa avaliação conjunta permite o estudo da interação existente entre os fatores.

Quando tratamos de experimentos fatoriais, cada fator é colocado em dois ou mais valores (níveis) dependendo da situação experimental. Para estudar o efeito de um fator é preciso que se tenham no mínimo dois níveis. Na área industrial geralmente os fatores são testados num mesmo número de níveis, que varia de 2 a 3.

A metodologia de análise utilizada neste trabalho, o arranjo fatorial completo (do inglês *Full Factorial Designs - FFD*) e o arranjo fatorial fracionado são ferramentas estatísticas robustas que cobrem todo o espaço amostral e suas respectivas variáveis, ou seja, são combinações experimentais de variáveis, combinadas de maneira que cada variável independente seja experimentada em igual número de vezes em cada um dos seus níveis, sendo estes definidos como limite superior (positivo) e limite inferior (negativo) [71]. Deste modo, arranjos *FFD* são balanceados e ortogonais (a soma dos sinais dos limites superior e inferior é nula) [72]. A quantidade de experimentos a ser realizada em um arranjo fatorial completo está relacionado a quantidade de variáveis de entrada e pode ser demonstrado pela Equação 2.7.

$$N = 2^k \tag{2.7}$$

sendo:

$N$  representa a quantidade de experimentos; e

$k$  representa a quantidade de variáveis do problema.

O número de experimentos em um arranjo fatorial completo cresce numa progressão geométrica de razão 2 em função das variáveis de entrada fazendo com que, em alguns

casos, seu uso seja muito oneroso quando a quantidade de fatores se torna muito grande (Tabela 2.2).

Aumentando a quantidade de variáveis do problema, as interações de ordem superior (interações entre 3 ou mais fatores) aumentam significativamente. Entretanto, de acordo com [72, 66], essas interações de ordem superior geralmente apresentam pouca ou quase nenhuma significância. Como exemplo (Tabela 2.3), com 4 (quatro) variáveis de entrada obtemos 6 interações de ordem 2, 4 de ordem 3 e 1 de ordem 4. Trabalhando com experimentação, além dos custos envolvidos para a realização dos experimentos, as réplicas e tréplicas se fazem necessárias para efeito de comparação do processo e validação dos resultados, tornando-os mais confiáveis.

Tabela 2.2: Quantidade de experimentos em um arranjo fatorial completo

Quantidade de Variáveis	Quantidade de Experimentos (Sem Réplicas)
1	2
2	4
3	8
4	16
5	32
6	64
7	128
8	256
9	512
10	1024
...	...
15	32.768
...	...
20	1.048.576

Tabela 2.3: Quantidade de interações em um arranjo fatorial completo  $N = 2^4$ .

Variáveis de Entrada	Fatores Principais	Fatores de Ordem 2	Fatores de Ordem 3	Fatores de Ordem 4
X,Y,Z,W	X Y Z W	XY, XZ, XW YZ, YW, ZW	XYZ, XYW XZW, YZW	XYZW

Sendo assim, experimentos onde existem 3 ou mais variáveis de entrada e limitações de custos, o arranjo fatorial fracionado se torna uma excelente ferramenta matemática e estatística. A quantidade de experimentos a ser realizada em um arranjo fatorial fracionado esta relacionado a quantidade de variáveis de entrada e pode ser demonstrado pela Equação 2.8.

$$N = 2^{k-1} \quad (2.8)$$

sendo:

$N$  representa a quantidade de experimentos; e

$k$  representa a quantidade de variáveis do problema.

## 2.6 Simulação Numérica pelo Método dos Elementos Finitos (MEF)

A simulação numérica pelo método dos elementos finitos vem sendo utilizada a algum tempo como uma forma de modelagem e cálculo estrutural mais utilizada para obtenção de soluções aproximadas para problemas de engenharia [73]. O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma técnica numérica utilizada para determinar a solução aproximada para cálculos estruturais, por equações diferenciais parciais (EDP) em um domínio definido. Para resolver a EDP, o principal desafio é criar uma base de função que pode aproximar-se

da solução. Há muitas maneiras de construir a base de aproximação e como isso é feito é determinado pela formulação selecionada.

O Método dos Elementos Finitos tem um desempenho muito bom para resolver equações diferenciais parciais sobre domínios complexos que podem variar com o tempo. Este método surgiu em meados dos anos 50 como uma ferramenta analítica e teve seu desenvolvimento vertiginoso na década 60 com a demanda do setor espacial [74, 75]. A sua aplicação tornou-se bastante ampla, podendo ser aplicado tanto na parte de cálculo estrutural (análises lineares e não lineares) como também na área de fluidos e na área térmica.

A simulação numérica pelo método dos elementos finitos aplicados a materiais compósitos com fios de liga de memória de forma foram objeto de estudo em alguns trabalhos. Rui Xu [76] propôs um método de elementos finitos multi escala 3D genérico (FE2) para modelar a pseudo-elasticidade e os efeitos de memória de forma em compósitos reforçados com fibras de liga de memória de forma. Os compósitos foram separados em um nível macroscópico e um nível microscópico, onde o comportamento constitutivo de cada ponto de integração no nível macroscópico é representado pelo comportamento efetivo de um correspondente elemento volumétrico representativo (RVE). Este comportamento efetivo foi calculado pelo método de elementos finitos sob o RVE malhado por elemento volumétrico. A transição de informações em tempo real entre os dois níveis foi realizada no software comercial ABAQUS por meio de sua sub-rotina definida pelo usuário (UMAT). Um modelo termodinâmico foi adotado para descrever o comportamento constitutivo total da LMF. Este modelo considera três mecanismos de deformação dependentes do caminho relacionados à transformação de fase, reorientação da martensita e acomodação pela derivação da energia livre de Gibbs. Vários testes termodinâmicos da literatura submetidos a cargas de tração-compressão e flexão foram estudados para validar o modelo multi escala, que apresentou boa precisão e confiabilidade.

Em seu trabalho, Brinson [77] desenvolveu um procedimento através do método de elementos finitos não lineares que incorporou uma lei termodinamicamente constitutiva derivada para o comportamento do material de liga com memória de forma. As equações constitutivas incluem as variáveis internas necessárias para explicar as transformações do

material e foram utilizadas em um procedimento de elemento finito unidimensional que captura as respostas únicas da liga com memória de forma e pseudo elasticidade do efeito de memória de forma em todas as temperaturas, níveis de tensão e condições de carregamento. A solução do problema não linear foi obtida pela aplicação de um método de Newton no qual uma sequência de problemas lineares é resolvida numericamente. Devido à linearização consistente, uma taxa quadrática de convergência foi obtida. Vários casos de teste foram apresentados para ilustrar o potencial do procedimento de elementos finitos. Casos que simulam o comportamento tensão-deformação de uma barra de liga com memória de forma sob carregamento uniaxial simples, bem como respostas de recuperação restritas em diferentes temperaturas. Os resultados dessas análises mostraram boa correlação com os resultados analíticos e a metodologia para uso do procedimento de elementos finitos em casos gerais foi demonstrada. O procedimento de elementos finitos mostrou-se uma ferramenta poderosa para estudar várias aplicações de ligas com memória de forma.

Em outro trabalho, Cho [78] apresentou uma abordagem de análise de elementos finitos não linear para o procedimento de modelagem de cascas híbridas compostas laminadas com fio de liga de memória de forma submetido a carga estrutural e térmica. Análises numéricas de laminados compósitos reforçados com fio SMA foram realizadas pela sinergia do elemento de casca laminada não linear com o modelo de Brinson da lei constitutiva de LMF. Para verificar o procedimento proposto, foi utilizado painéis laminados retangulares presos ao longo de um lado. Os resultados da análise numérica mostraram uma concordância muito boa com os resultados experimentais.

Danos induzidos por impacto de baixa velocidade em laminados simétricos e assimétricos foram objeto de estudo por Singh [79]. Uma sequência generalizada de lay-up foi proposta para laminados assimétricos. O laminado assimétrico fabricado de acordo com a sequência de lay-up proposta possui uma característica de rigidez quase idêntica à dos laminados simétricos. A sequência de colocação proposta no trabalho fornece um laminado que se comporta como laminado quase isotrópico. Um impactor cilíndrico com massa de  $5,23 \text{ Kg}$  foi lançado com as velocidades de  $3\text{m/s}$ ,  $4\text{m/s}$  e  $6\text{m/s}$ . O padrão de dano e a relação energia  $\times$  tempo do laminado assimétrico proposto são comparados com lami-

nados simétricos com matrizes de rigidez semelhantes. Os resultados obtidos mostraram que a altura do dano e a largura do laminado simétrico pela análise numérica foram de  $4,25mm$  e  $22,96mm$ , respectivamente. Para o laminado assimétrico, a altura e a largura do dano foram de  $5,67mm$  e  $23,34mm$ , respectivamente. Assim, pode-se evidenciar que essas previsões de danos estão muito próximas dos os resultados experimentais.

Em seu trabalho, Chang [80] desenvolveu um modelo de dano baseado no critério de Hashin é desenvolvido para simular a placa composta reforçada com liga de memória de forma sujeita a impactos de baixa ou alta velocidade. O efeito da velocidade de impacto na placa de compósito reforçada com liga com memória de forma sob condição de contorno fixo foi investigado pelo método dos elementos finitos, também como o estado de dano. Em um primeiro momento um impacto de baixa velocidade foi aplicada ao modelo e para ilustrar a precisão dos parâmetros e procedimentos comparando com os dados experimentais. Em uma outra etapa, várias velocidades de impacto foram aplicadas durante o processo de simulação para investigar a resistência ao impacto e o mecanismo de falha. Os resultados da simulação indicam que o modelo de dano do compósito foi sensível à velocidade de carregamento e foi mais fácil para o dano crescer sob alta velocidade.

Como um dos enfoques deste trabalho, a utilização da ferramenta de simulação numérica pelo método dos elementos finitos via análise não linear encontra-se bastante difundida na literatura trazendo bons resultados. Sendo assim, esta ferramenta foi aplicada para correlacionar os dados numéricos e experimentais cuja resposta foi a energia de absorção ao impacto.



# Capítulo 3

## Materiais e Métodos

### 3.1 Fluxograma das Atividades

Esse capítulo descreve todas as etapas do desenvolvimento do trabalho desde o início da seleção do fio de NiTi, passando pelo processo planejamento de experimentos e manufatura chegando nos aos ensaios experimentais e simulação numérica não linear. A Figura 3.1 ilustra o fluxograma com as etapas do desenvolvimento deste trabalho de Tese.

### 3.2 Materiais

Para a fabricação dos corpos de prova destinados aos ensaios de DMA foram utilizadas oito camadas de tecido *Plain Weave* de fibra de vidro com gramatura de  $200g/m^2$  da fabricante Fibertex<sup>®</sup>. Esse tipo de tecido é compatível com vários tipos de resinas comerciais sendo que cada trama e urdidura é composta por 300 fios com diâmetro de  $13\mu m$ , resistência à tração de  $1500MPa$  e módulo de elasticidade de  $75GPa$ . A matriz polimérica utilizada para a fabricação da placa de compósito foi a resina epóxi AR21 com o endurecedor Slow na proporção de 100:33, respectivamente.

Os fios com memória de forma utilizados nos compósitos deste trabalho foram os NiTi #1 (fio de nitinol superelástico) e NiTi #6 (fio de nitinol martensítico) fornecidos

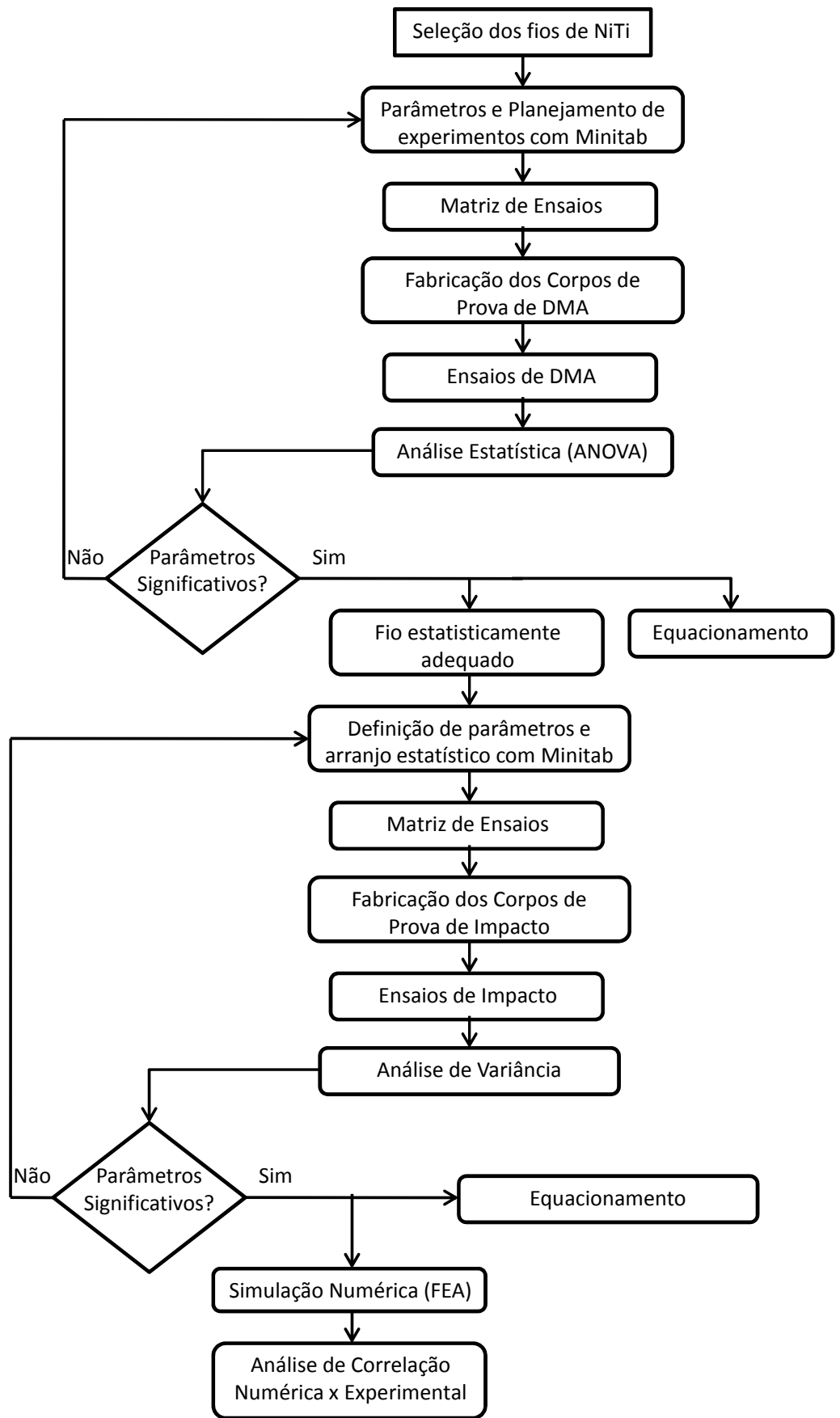


Figura 3.1: Fluxograma das atividades de Tese. Fonte: Autor

pela FW Metals, ambos com diâmetro de  $0,7\text{mm}$ . A proporção de níquel/titânio do fio martensítico é de  $54,7\%/45,12\%$  com resistência à tração de  $1516\text{MPa}$  e percentual de alongamento maior que 3 e a proporção do fio superelástico é de  $56,02\%/43,93\%$  com resistência à tração de  $1475\text{MPa}$  e percentual de alongamento maior que 10.

Os materiais consumíveis utilizados para a fabricação dos corpos de prova de DMA através do processo VARTM estão listados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Materiais utilizados no processo de infusão via VARTM

<b>Material</b>	<b>Modelo</b>	<b>Fabricante</b>
Bolsa de Vácuo	Flexnyl MLA SF	MAP
Tecido Desmoldante (Peel Ply)	MAP Ply - MT	MAP
Selante de Borda	TAPE 9880-13A	MAP
Mídia de Distribuição	INFLUX-E 110-M 1220-100	MAP
Mangueira para Vácuo	120-WA-120-160	MAP
Mangueira Espiral (Spiroduto)	-	-
Registro para Linha de Infusão	-	-

### 3.3 Seleção do Fio de LMF

Para a etapa de seleção dos fios, os corpos de prova de DMA foram padronizados com 8 camadas de tecido de fibra de vidro e dimensões de  $45\text{mm}$  de comprimento por  $12\text{mm}$  de largura e  $3\text{mm}$  de espessura. Inicialmente, no laminado, os fios de NiTi foram inseridos uniformemente ao longo do plano neutro, ou seja, entre a quarta e a quinta camada de fibra de vidro conforme ilustrado na Figura 3.2. Para a seleção, foram fabricados 3 diferentes tipos de compósitos que, além da amostra base ( $B$ ) (compósito sem a presença do fio NiTi), foram os Martensítico ( $M$ ) e Superelástico ( $S$ )

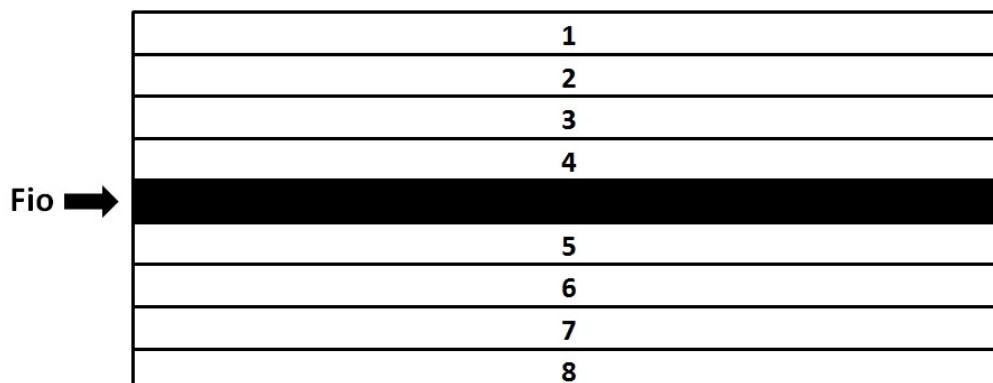


Figura 3.2: Posição dos fios inseridos no plano neutro do compósito. Fonte: Autor

A partir da inserção dos fios no laminado (Figura 3.3), iniciou-se o processo de infusão de resina via VARTM (Figura 3.4). Resumidamente, neste processo as camadas de fibras (laminado) são posicionadas contra um molde e envoltas em um filme plástico cujo objetivo é o de compactar o laminado e ao mesmo tempo servir de contramolde flexível. Em seguida, é realizada a adição de materiais consumíveis (tecido desmoldante, mídia de transporte, duto de transporte de resina) e fechamento do sistema utilizando uma fita selante de borda. Para a aplicação do vácuo, utiliza-se uma bomba de vácuo conectada a uma saída para a resina. Assim, com o auxílio do vácuo, realiza-se a infusão de resina através do laminado ocasionando a impregnação das fibras (Figura 3.5).

De acordo com o fabricante, após a infusão é recomendado a utilização de um ciclo de cura pra se obter melhores propriedades do compósito. Diante disto o compósito foi colocado dentro de uma estufa da Solab<sup>®</sup> SL-1152L com temperatura controlada de 80°C por 4 horas para garantir sua cura completa.

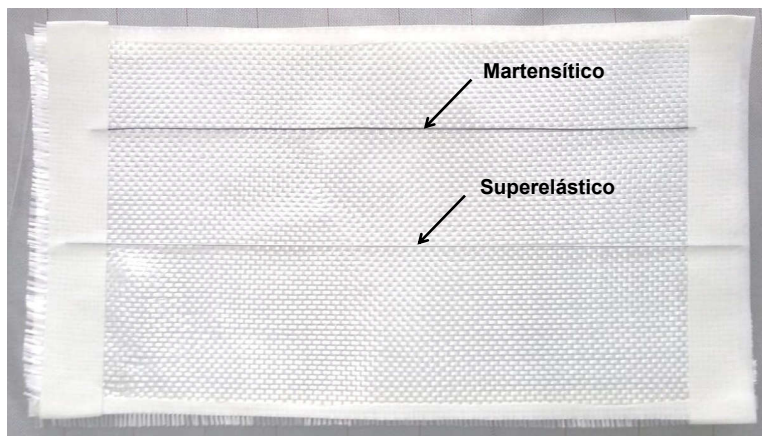


Figura 3.3: Posicionamento do fio martensítico e superelástico no laminado

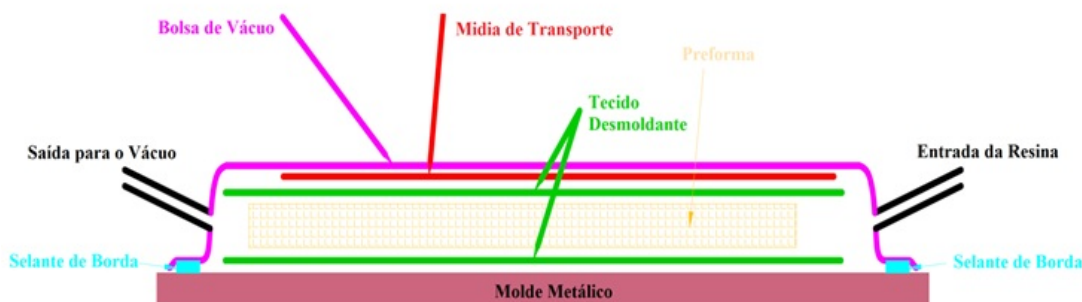


Figura 3.4: Processo de infusão via VARTM. Fonte: Adaptado de [86]

Para garantir a precisão dimensional, os corpos de prova foram cortados em equipamento CNC SHG Router disponível no NTC - UNIFEI. Seguindo a norma ASTM D7028, foram selecionadas 12 amostras, sendo 4 de cada tipo de compósito, para o teste de DMA com dimensões de  $12 \times 45 \times 3\text{mm}$  (Largura, Comprimento e Espessura).

Os ensaios de DMA foram realizados em equipamento da SEIKO SII EXSTAR, modelo 6000 DMS, onde as amostras base, martensítica e superelástica foram testadas no modo dual cantilever utilizando-se uma frequência de  $1,0\text{Hz}$  com uma amplitude de  $20\mu\text{m}$  e  $0,01\%$  do comprimento útil da amostra. As amostras foram aquecidas da temperatura ambiente ( $\sim 25^\circ\text{C}$ ) até  $220^\circ\text{C}$  com uma taxa de aquecimento de  $3^\circ\text{C}/\text{min}$ .



Figura 3.5: Impregnação das fibras via VARTM

### 3.4 Obtenção de Equacionamento para DMA

Após a seleção do fio de nitinol superelástico, e tendo em vista os vastos parâmetros a serem estudados através da inserção dos fios de memória de forma em materiais compósitos, foi realizado o equacionamento em função das variáveis de posição e quantidade de fios no laminado. Para tal, um equacionamento capaz de prever a capacidade de armazenamento do compósito ( $E'$ ) e a temperatura de transição vítrea ( $T_g$  - *Glass Transition*) através de ensaios de DMA. A  $T_g$  do material pode ser obtida em ensaios de DMA através da Tangente de Delta ( $\tan \delta$ ). Tanto o módulo de armazenamento quanto a  $\tan \delta$  podem ser expressados pela Equação 3.1.

$$\tan \delta = \frac{E''}{E'} \quad (3.1)$$

sendo:

$\tan \delta$  representa a temperatura de transição vítrea do material;

$E'$  representa o módulo de armazenamento do material; e

$E''$  representa o módulo de perda ou viscosidade do material.

Neste contexto, a ferramenta estatística utilizada foi o arranjo fatorial completo, onde o equacionamento é obtido por regressão linear pelo método de mínimos quadrados, segundo a equação 3.2 [70, 71].

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i < j}^k \sum \beta_{ij} x_{ij} \beta_0 + \epsilon \quad (3.2)$$

sendo:

$y$  representa a função real a ser modelada;

$\beta_0$  representa o termo constante do modelo;

$\beta_i$  representa os coeficientes dos termos lineares;

$\beta_{ij}$  representa os coeficientes dos termos de interação entre os fatores; e

$\epsilon$  representa o resíduo associado ao modelo estimado.

Para a confecção dos corpos de prova, foi realizado um planejamento de experimentos, utilizando o MiniTab<sup>®</sup>, em nível fatorial completo ( $2^n$ ) com 2 fatores (quantidade de fios e posição no laminado), 2 réplicas e 3 pontos centrais gerando 11 experimentos (Tabela 3.2). O espaçamento entre os fios e a posição no laminado foram os parâmetros adotados para analisar a significância em relação a quantidade e se sua posição interferem na absorção de energia e temperatura de transição vítrea do compósito via análise de DMA.

Tabela 3.2: Arranjo Fatorial em função da quantidade de fios e posição no laminado

Variáveis de Controle	Símbolo	Níveis		
		Inferior (-1)	Ponto Central (0)	Superior (+1)
Posição	$x_1$	-1,125	0	1,125
Quantidade de Fios	$x_2$	1	2	3

A linha neutra foi posicionada no centro do laminado logo, os valores  $-1,125$ ,  $1,125$  e  $0$  correspondem a posição abaixo da linha neutra (entre as camadas 7 e 8), acima da linha neutra (entre as camadas 1 e 2) e na linha neutra (entre as camadas 4 e 5), respectivamente como mostra a Figura 3.6.

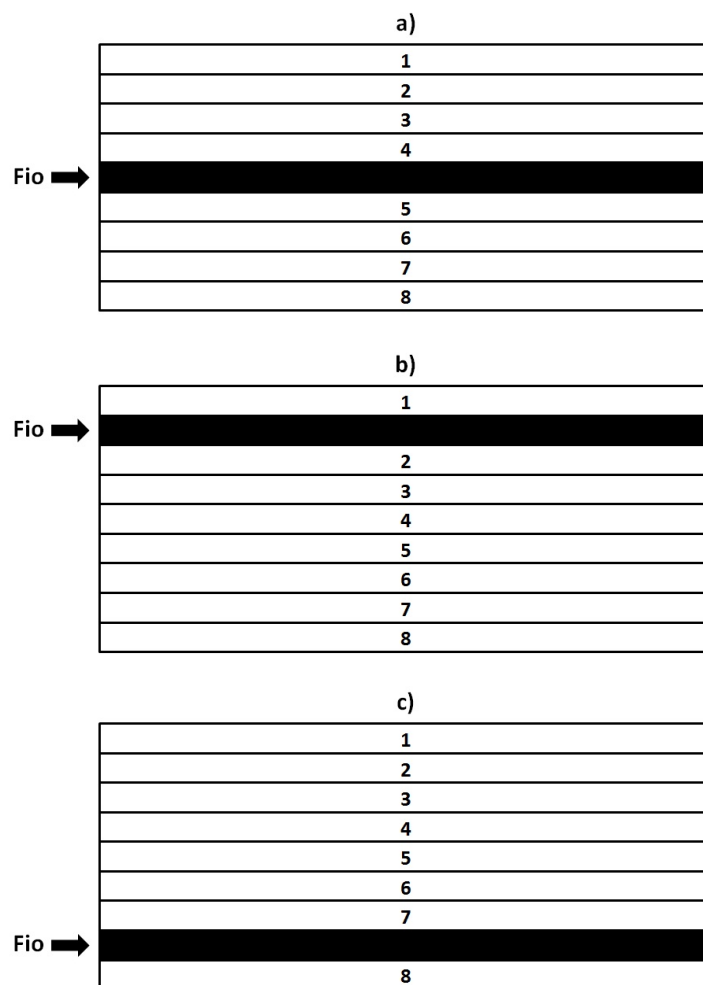


Figura 3.6: Posicionamento dos fios NiTi no laminado: a) Linha Neutra ; b) Nível Superior e c) Nível Inferior.

Uma única placa de compósito com fibra de vidro e resina epóxi (Figura 3.7) foi fabricada para garantir homogeneidade dos corpos de prova. O processo utilizado na fabricação foi via VARTM com resina epóxi AR21 com o endurecedor Slow na proporção de 100:33. Todos esses materiais e suas propriedades foram descritas no item 3.2. O processo de VARTM, os parâmetros de cura do compósito, o corte dos corpos de prova e os parâmetros de ensaio em DMA foram os mesmos adotados no item 3.3.





Figura 3.7: Processo VARTM com o posicionamento dos fios NiTi no laminado.

### 3.5 Planejamento de Experimentos para os Ensaios de Impacto

Para a confecção dos corpos de prova dos ensaios de Impacto de baixa velocidade, foi realizado um planejamento de experimentos (DOE), utilizando o MiniTab<sup>®</sup>, em nível fatorial fracionado ( $2^n - k$ ) com 3 fatores (diâmetro dos fios, espaçamento dos fios e posição no laminado), 3 réplicas e 3 pontos centrais gerando 15 experimentos, ou seja, 15 placas de laminado compósito com diferentes configurações (Tabela 3.3 e 3.4). Em relação aos corpos de prova fabricados para o ensaio de DMA, o espaçamento entre os fios e a posição no laminado também foram parâmetros adotados havendo a inclusão do diâmetro do fio de Niti para analisar a significância em relação a quantidade de energia absorvida pelo compósito no ensaio de impacto de baixa velocidade.

A opção de realizar o fatorial fracionado foi tomada devido a redução de custos, pois o uso de um fatorial completo acarretaria em cerca de 27 experimentos, o que tornaria o trabalho muito dispendioso diante dos altos valores envolvidos como os da resina epóxi, fibra de vidro, fios de NiTi, horas máquina para corte dos corpos de prova, horas máquina para ensaios de impacto, etc. Além disso, o uso do fatorial fracionado, como foi explicado no item 2.5, não acarreta em perdas significativas no modelo pois as interações de ordem

superior geralmente não apresentam alto grau de significância o que não compromete a análise do trabalho.

Tabela 3.3: Arranjo Fatorial Fracionado em função do Diâmetro, Espaçamento e Posição dos Fios

Experimento	Diâmetro do Fio de NiTi ( <i>mm</i> )	Espaçamento no Laminado ( <i>mm</i> )	Posição no Laminado ( <i>mm</i> )
1	0,3	10	1,125
2	0,7	10	-1,125
3	0,3	50	-1,125
4	0,7	50	1,125
5	0,3	10	1,125
6	0,7	10	-1,125
7	0,3	50	-1,125
8	0,7	50	1,125
9	0,3	10	1,125
10	0,7	10	-1,125
11	0,3	50	-1,125
12	0,7	50	1,125
13	0,5	30	0
14	0,5	30	0
15	0,5	30	0

Tabela 3.4: Experimentos gerados pelo arranjo fatorial fracionado

Variáveis de Controle	Símbolo	Níveis		
		Inferior (-1)	Ponto Central (0)	Superior (+1)
Diâmetro dos Fios (mm)	$x_1$	0,3	0,5	0,7
Espaçamento dos Fios (mm)	$x_2$	10	30	50
Posição dos Fios	$x_3$	-1,125	0	1,125

### 3.6 Fabricação dos Corpos de Prova para Impacto

O processo de fabricação dos corpos de prova para o ensaio de impacto de baixa velocidade foi o VARTM, ou seja, o mesmo descrito para a manufatura dos corpos de prova de DMA. Diferentemente da manufatura para DMA foi incluso mais uma variável de controle que foi o diâmetro do fio de NiTi. O posicionamento dos fios de NiTi foram os mesmos adotados e ilustrados pela figura 3.6 onde a linha neutra se situa entre as camadas 4-5 e a posição -1,125 e 1,125 que corresponde a inserção entre as camadas 7-8 e 1-2, respectivamente. A fabricação dos corpos de prova para o ensaio de impacto seguiu as configurações geradas pela Tabela 3.3.

A variação do espaçamento entre os fios utilizada nas placas de compósito para o ensaio de impacto esta ilustrada na Figura 3.8. Este espaçamento foi aplicado horizontalmente ao comprimento da placa com os fios posicionados paralelamente uns aos outros. Para garantir que no momento do impacto as mesmas condições de ensaios fossem replicadas a todos os corpos de prova adotou-se que o posicionamento inicial do fio fosse no centro da placa, diante disso aplicando-se o espaçamento conforme ilustrado pela Figura 3.8. Sendo assim, foi possível garantir que o impactor sempre fosse impactado na região onde estaria pelo menos um fio de NiTi inserido.

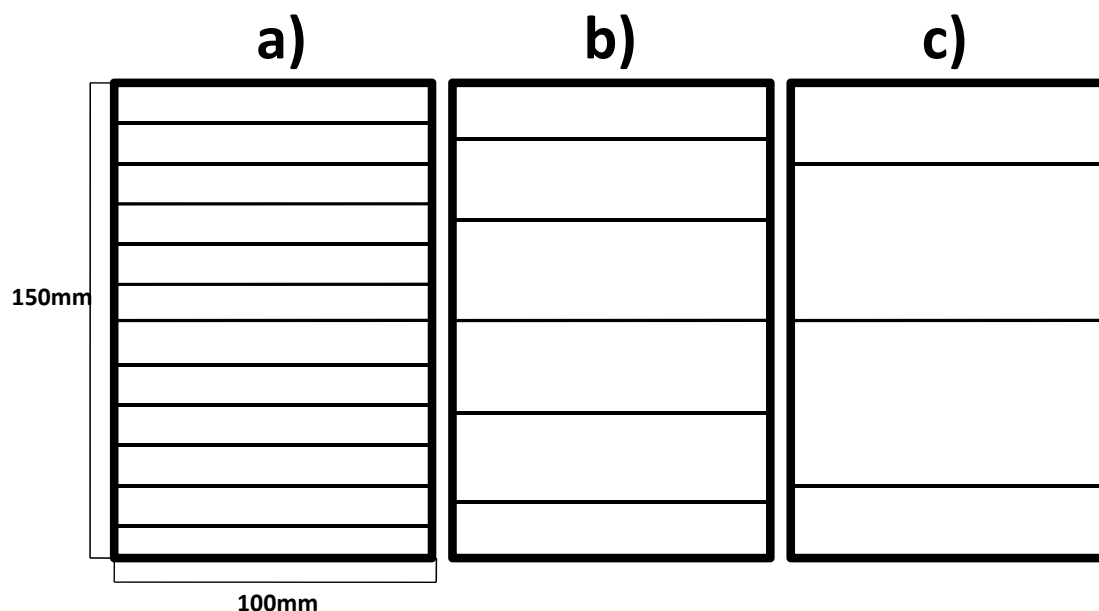


Figura 3.8: Espaçamento dos fios NiTi no laminado: a)  $10mm$  ; b)  $30mm$  e c)  $50mm$ .

Na etapa de fabricação dos corpos de prova para impacto, com o intuito de garantir o espaçamento correto dos fios de NiTi no laminado, foi utilizado molde impresso de papel para marcação e fita aderente para que os fios não se desprendessem do tecido de fibra de vidro. Um exemplo de como foi realizado essa fixação no tecido esta ilustrado na Figura 3.9 onde o diâmetro do fio utilizado foi de  $0,3mm$  e espaçamento de  $10mm$ . Vale ressaltar que no projeto da placa de compósito foi deixado uma sobra de material, inclusive onde a fita aderente estava posicionada, para que a mesma não interferisse no laminado sendo que no momento do corte ela ficasse de fora do corpo de prova. Para garantir a precisão dimensional, os corpos de prova foram cortados em equipamento CNC SHG Router disponível no NTC - UNIFEI (Figura 3.10).

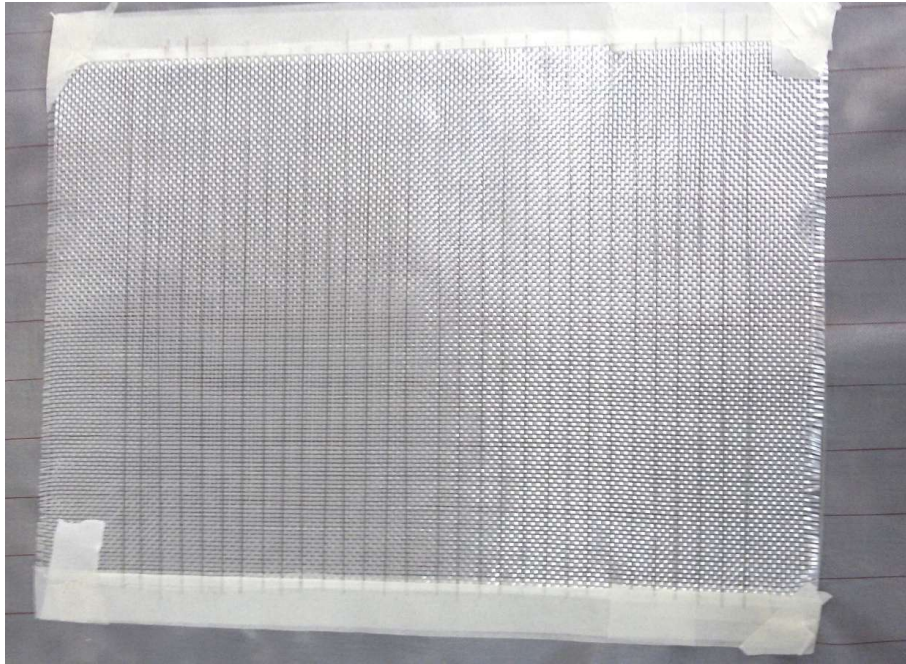


Figura 3.9: Fixação dos fios de NiTi para garantir o espaçamento correto.

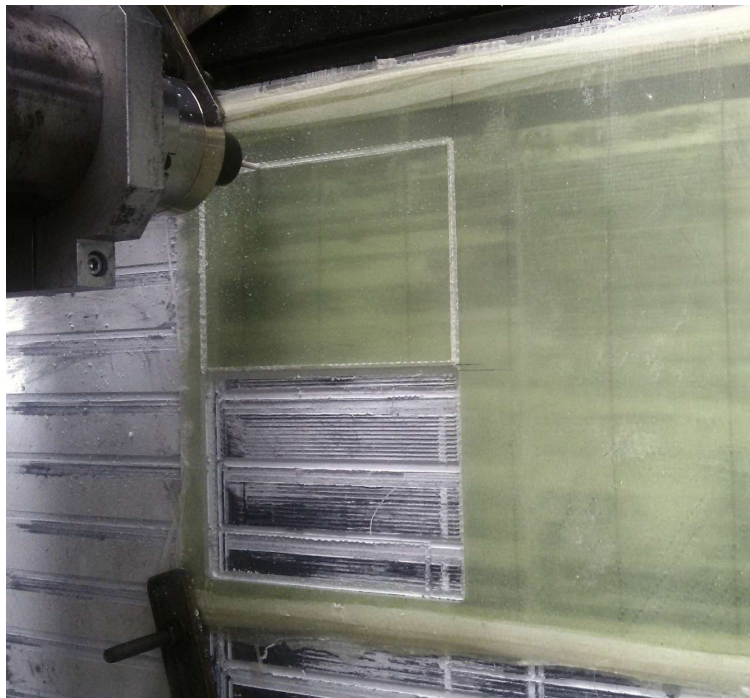


Figura 3.10: Corte dos corpos de prova para ensaio de impacto.

Como pode ser observado na Tabela 3.3, os 15 corpos de prova resultantes do planejamento de experimentos geram 5 configurações diferentes com três réplicas cada. Além disso, para se ter um parâmetro de comparação do efeito dos fios de NiTi inseridos no compósito, três amostras base foram fabricadas sendo que as mesmas não continham o fio. Sendo assim, a Tabela 3.5 foi criada com o objetivo de um melhor entendimento e organização dessas configurações que serão objeto de estudo deste trabalho.

Tabela 3.5: Nomenclatura dos corpos de prova para impacto

Configuração	Diâmetro ( <i>mm</i> )	Espaçamento ( <i>mm</i> )	Posição no Laminado ( <i>mm</i> )	Réplicas	Nomenclatura
1	0,3	10	1,125	3	A
2	0,3	50	-1,125	3	B
3	0,7	10	-1,125	3	C
4	0,7	50	1,125	3	D
5	0,5	30	0	3	E
6	Sem a presença do fio			3	F

### 3.7 Ensaio de Impacto de Baixa Velocidade

O ensaio de impacto por queda livre de baixa velocidade (do inglês *drop-weight impact test*) consiste em um método, regido pela norma ASTM D7136/D7136M [9], que determina a resistência a danos de placas laminadas de compósito de matriz polimérica multidirecional sujeitas a um evento de impacto de queda livre de peso. De acordo com a norma, as dimensões das amostras devem ser de aproximadamente  $3mm$  de espessura,  $150mm$  de comprimento por  $100mm$  de largura com tolerância dimensional de  $\pm 0,25mm$  (Figura 3.11).

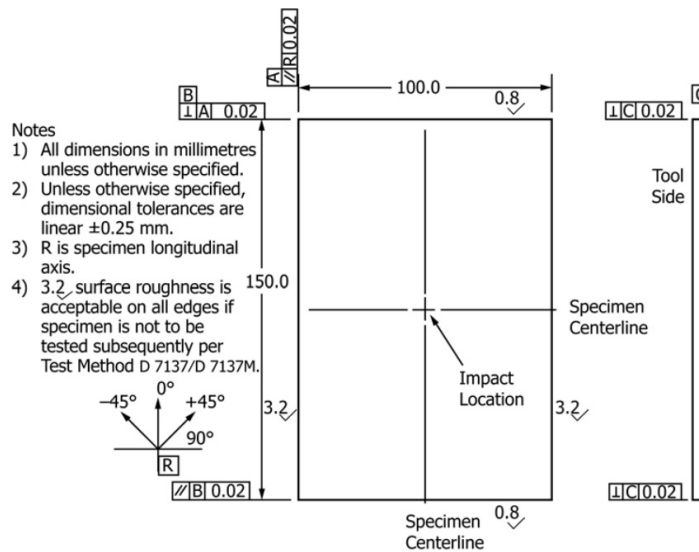


Figura 3.11: Dimensões das amostras segundo a norma ASTM D7136/D7136M [9].

Os ensaios de impacto foram realizados no LEL - Núcleo de Estruturas Leves do IPT - Instituto de Pesquisa Tecnológica em São José dos Campos - SP. O equipamento para ensaio de impacto foi a máquina Instron<sup>®</sup> 9340 (Figura 3.12), com punção esférico de aproximadamente 16mm de diâmetro e a massa do impactor (Figura 3.13) de 1,215Kg. Esse equipamento possui mecanismo de *Rebound Catcher*, ou seja, um dispositivo capaz de "segurar" o impactor após o mesmo se chocar contra a amostra ensaiada e não realizar um segundo evento de impacto. Esse tipo de mecanismo de segurança é uma das exigências da norma para se obter maior confiabilidade nos resultados.



Figura 3.12: Máquina de ensaio de impacto de baixa velocidade Instron<sup>®</sup> 9340.

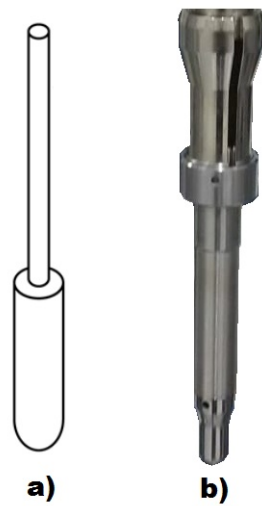


Figura 3.13: Tipo de Impactor: a) segundo a norma ASTM D7136/D7136M [9] e b) impactor Instron 9340.



Segundo a norma, a Energia de Impacto ( $E$ ) é calculada em função da velocidade de impacto ( $v_i$ ), o deslocamento do impactor ( $\delta$ ) e o tempo ( $t$ ) conforme as Equações 3.3 a 3.5.

$$E(t) = \frac{m(v_i^2 - v(t)^2)}{2} + mg\delta(t) \quad (3.3)$$

$$v_i = \frac{w_{12}}{t_2 - t_1} + g\left(t_i - \frac{t_1 - t_2}{2}\right) \quad (3.4)$$

$$\delta(t) = \delta_i + v_i t + \frac{gt^2}{2} - \int_0^t \left( \int_0^t \frac{F(t)}{m} dt \right) dt \quad (3.5)$$

sendo:

$w_{12}$  a distância entre os sensores de velocidade 1 e 2 que fazem a medição do impactor;

$t_1$  o tempo da passagem do impactor no sensor 1;

$t_2$  o tempo da passagem do impactor no sensor 2;

$t_i$  o tempo referente ao ponto de contato inicial com a superfície da amostra;

$g$  representa a aceleração da gravidade;

$\delta_i$  o deslocamento do impactor no temp  $t = 0s$ ;

$F(t)$  a força de contato do impactor medida no instante  $t$ ; e

$m$  a massa do impactor.

A energia total de impacto  $E_T$  é a soma entre a energia absorvida pelo material ( $AEI$ ) e a energia elástica ( $E_E$ ) relacionada ao retorno (*Rebound*) do impactor e pode ser calculada pela Equação 3.6.

$$E_T = AEI + E_E \quad (3.6)$$

A taxa de deformação  $\varepsilon(t)$  pode ser calculada pela Equação 3.7.

$$\varepsilon(t) = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{L(t) - L_0}{L_0} \right) = \frac{1}{L_0} \frac{dL}{dt} t = \frac{v(t)}{L_0} \quad (3.7)$$

sendo:

$L_0$  o comprimento inicial da deflexão;

$L(t)$  o comprimento em cada tempo  $t$ ; e  
 $v(t)$  a velocidade de queda no tempo  $t$ .

Após o evento de impacto, segundo a norma ASTM D7136/D7136M, os danos mais comuns que ocorrem nas amostras ensaiadas podem ser visualizados pela Figura 3.14

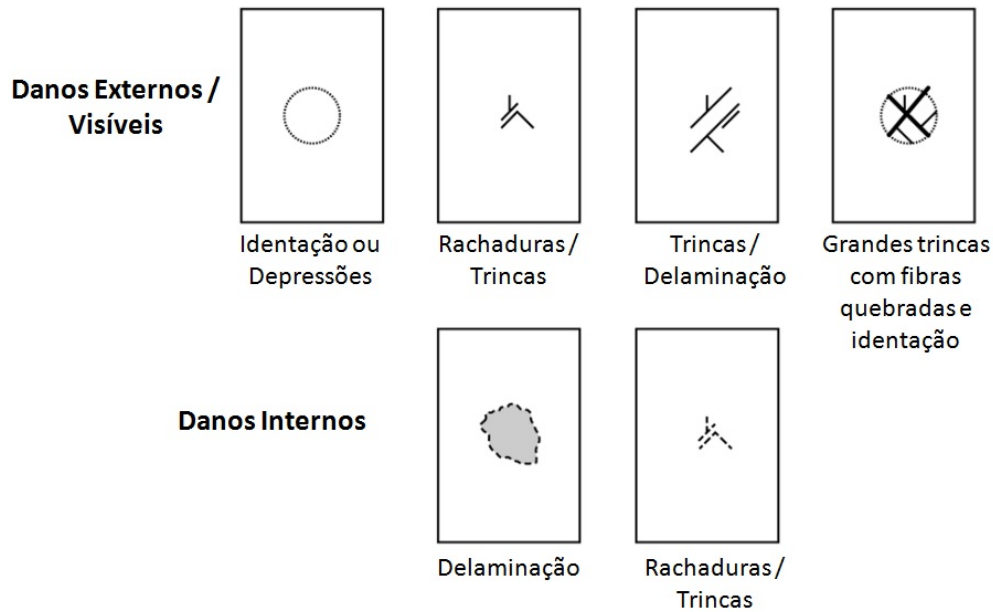


Figura 3.14: Tipos de Danos após evento de impacto. Fonte: Adaptado de [9].

As condições de ensaio adotadas para o impacto de baixa velocidade estão dispostos na Tabela 3.6 e foram realizados segundo a norma ASTM D7136/D7136M.

Tabela 3.6: Condições de Contorno do Experimento de Impacto

Massa Total de Impacto	3,215 <i>Kg</i>
Energia Total de Impacto	31,5 <i>J</i>
Aceleração de Impacto	4,429 <i>m/s</i> <sup>2</sup>
Dimensões da Placa	100 x 150 x 3 <i>mm</i>
Mecanismo de Segurança	Reboud Catcher

### 3.8 Simulação Numérica de Impacto pelo método dos elementos finitos

Como visto Capítulo 2, item 2.6 deste trabalho, vários autores citados anteriormente fizeram uso de simulação numérica para que de alguma forma pudessem propor um modelo ao qual tivesse correlação e fosse capaz de prever o comportamento experimental de determinados corpos de prova sob circunstâncias diversas de condições de contorno. Neste trabalho, o modelo proposto corresponde aos parâmetros de variação do diâmetro, espaçamento e posição dos fios de NiTi no compósito de fibra de vidro com matriz epóxi sob circunstâncias de impacto de baixa velocidade. Diante disso, utilizou-se uma análise dinâmica não linear através do software de elementos finitos da Altair Hyperworks com gerador de malha *Hypermesh* e o solver *Radioss*.

As geometrias necessárias para a realização da simulação numérica, tais como o a base de suporte da placa de compósito e o impactor, foram desenhadas utilizando software *SolidWorks*. As dimensões da geometria basearam-se no modelo real do experimento. Para a geometria do impactor, um cilindro com uma altura de  $50mm$  e um diâmetro de  $16mm$  (Figura 3.15). Devido a simplificação na geometria do impactor, uma correção da massa específica foi realizada para que a massa total de impacto de  $3,214\text{ kg}$  pudesse ser mantida no modelo da simulação dinâmica.

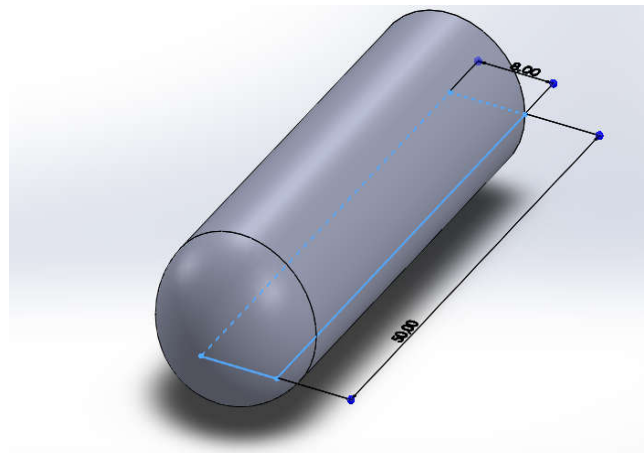


Figura 3.15: Simplificação do modelo do impactor.

A base do suporte de fixação para os corpos de prova foi modelada com a geometria de um retângulo de  $250 \times 200 \times 6 \text{ mm}$  (Figura 3.16), sendo representativa a base real do suporte da máquina de ensaio Instron<sup>®</sup> 9340.

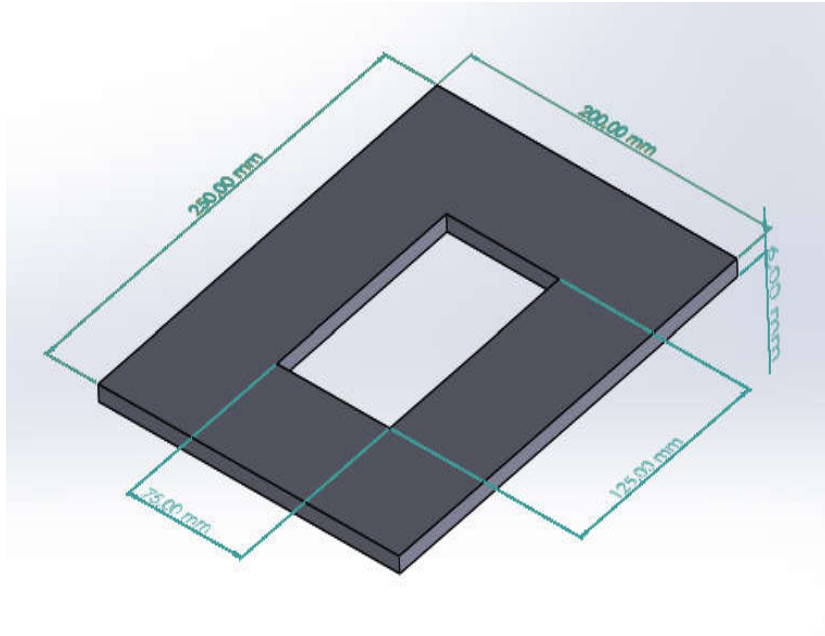


Figura 3.16: Dimensões do suporte de fixação das placas de compósito.

A geometria do corpo de prova é composta por oito camadas de fibra de vidro com  $150 \times 100 \text{ mm}$  sendo cada camada com  $0,375 \text{ mm}$  de espessura (Figura 3.17). Neste trabalho foi realizado a geometria de apenas uma camada e para a formação do laminado foi realizado múltiplas importações no software de simulação até a obtenção da espessura de  $3 \text{ mm}$ .

Como discutido anteriormente, o processo de simulação numérica foi realizado utilizando o Software Altair HyperWorks em sua versão 2022. As unidades de medida padrão do software adotadas neste trabalho foram:

- ( $\text{mm}$ ) Milímetros como unidade de comprimento;
- ( $\text{s}$ ) Segundos como unidade de tempo;

- (*ton*) Tonelada como unidade de massa;
- (*N*) Newton como unidade de força;
- (*MPa*) Mega Pascal como unidade de pressão.

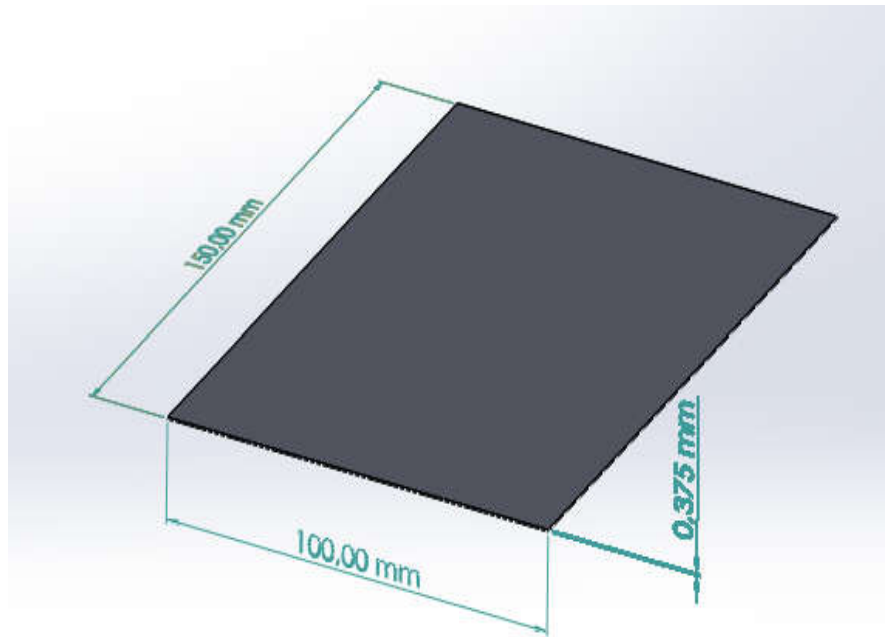


Figura 3.17: Dimensão da geometria de uma camada de compósito.

Na etapa de modelagem do corpo de prova no software, foram utilizados três modelos com fios e um modelo base sem o fio de NiTi de acordo com a Tabela 3.7. A Figura 3.18 ilustra a geometria no software de elementos finitos do modelo C.

Tabela 3.7: Nomenclatura das geometrias utilizadas na simulação numérica.

Modelo	Diâmetro ( <i>mm</i> )	Espaçamento ( <i>mm</i> )	Posição ( <i>mm</i> )
A	Sem fio inserido		
B	0,3	10	1,125
C	0,5	30	0
D	0,7	10	-1,125

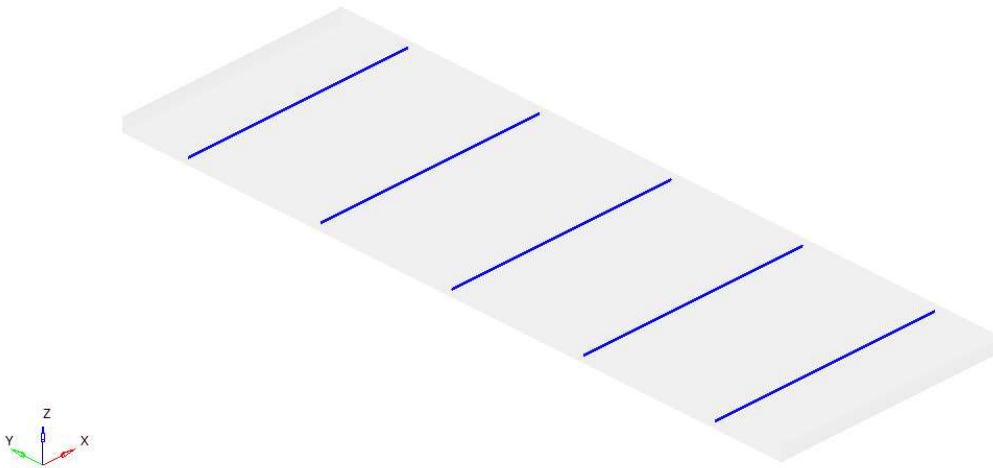


Figura 3.18: Geometria do Modelo C no software de elementos finitos.

Em simulações numéricas, a respeito das análises experimentais, também existem certos custos como custo computacional, onde o mesmo se torna mais dispendioso tratando-se de uma simulação não-linear em comparação com uma linear. Este custo está diretamente ligado às geometrias e quantidade dos elementos (malha) envolvidos na modelagem. Devido à natureza simétrica dos componentes deste estudo e visando reduzir o custo computacional, um corte simétrico longitudinal foi realizado na geometria (Figura 3.19). Esta forma utilizada para simplificação de geometria através da simetria dos elementos não causa impacto nem variação dos resultados em uma simulação numérica [73, 74, 75].

Após a importação e o ajuste da geometria, foi realizada a aplicação da malha no punção, na base, na placa de compósito e nos fios inseridos na placa. Os fios de NiTi foram modelados utilizando elementos do tipo viga com um tamanho de malha adequando ( $1mm$ ) para coincidir os nós da malha utilizada na placa de compósito. A Figura 3.20 ilustra a malha dos fios de NiTi aplicadas junto a placa de compósito para todos os modelos utilizados na simulação numérica não-linear.

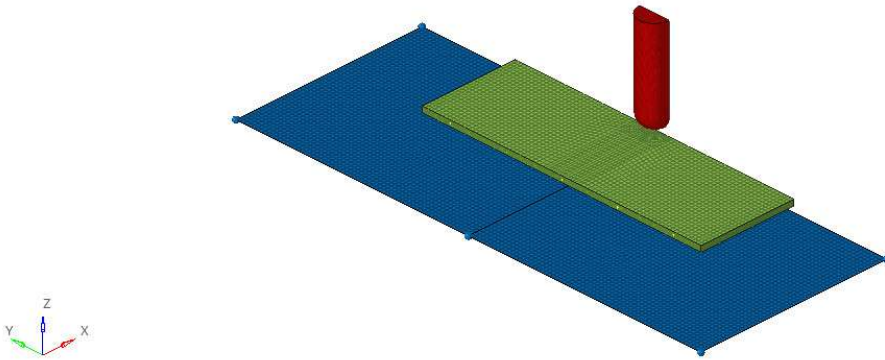


Figura 3.19: Geometria simétrica aplicada para simplificação do modelo.

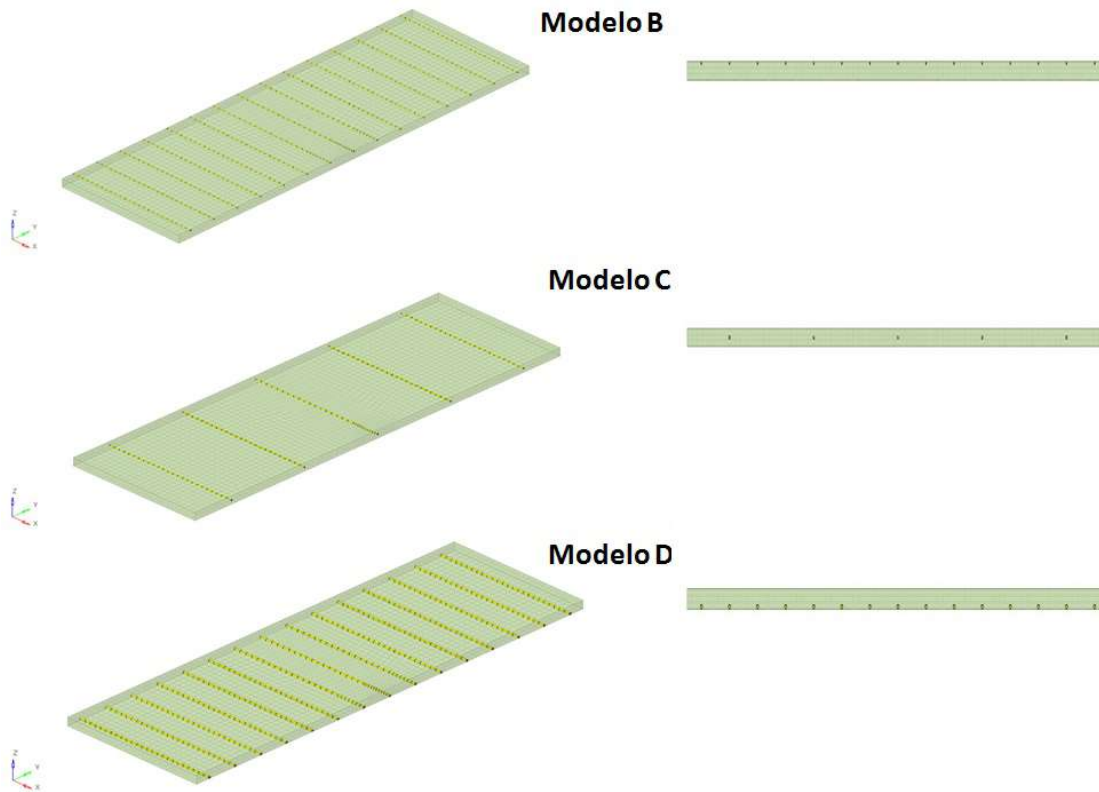


Figura 3.20: Malha do Fio de NiTi inserido na placa de compósito.

Na etapa de aplicação da malha na placa de compósito realizou-se três cortes na superfície dividindo ela em regiões cujo objetivo foi de realizar uma melhor adaptação da malha com os fios e também da região de contato com o impactor. Na primeira região, um corte circular foi realizado na interface de contato da placa com o impactor sendo o tamanho médio dos elementos da malha igual a  $1mm$ . Tal refinamento da malha foi aplicado para uma melhor adaptação e também para um melhor resultado na região de impacto. Na região adjacente a zona de impacto, foi aplicado uma malha com elementos de tamanho médio de  $1,5mm$ . No restante da superfície foram aplicados elementos de tamanho médio de  $2mm$ . Tal configuração de malha foi escolhido após sucessivos testes de convergência de malha, buscando o melhor custo/benefício para o hardware disponível.



Os elementos de malha gerados são de primeira ordem e possuem 3 (três) graus de liberdade por nós e apenas um ponto de integração. Além disso, estes elementos também foram configurados para serem aplicados ao problema da não linearidade geométrica (grandes deformações). A Figura 3.21 ilustra as regiões e a malha aplicada na placa de compósito utilizada na simulação de elementos finitos.

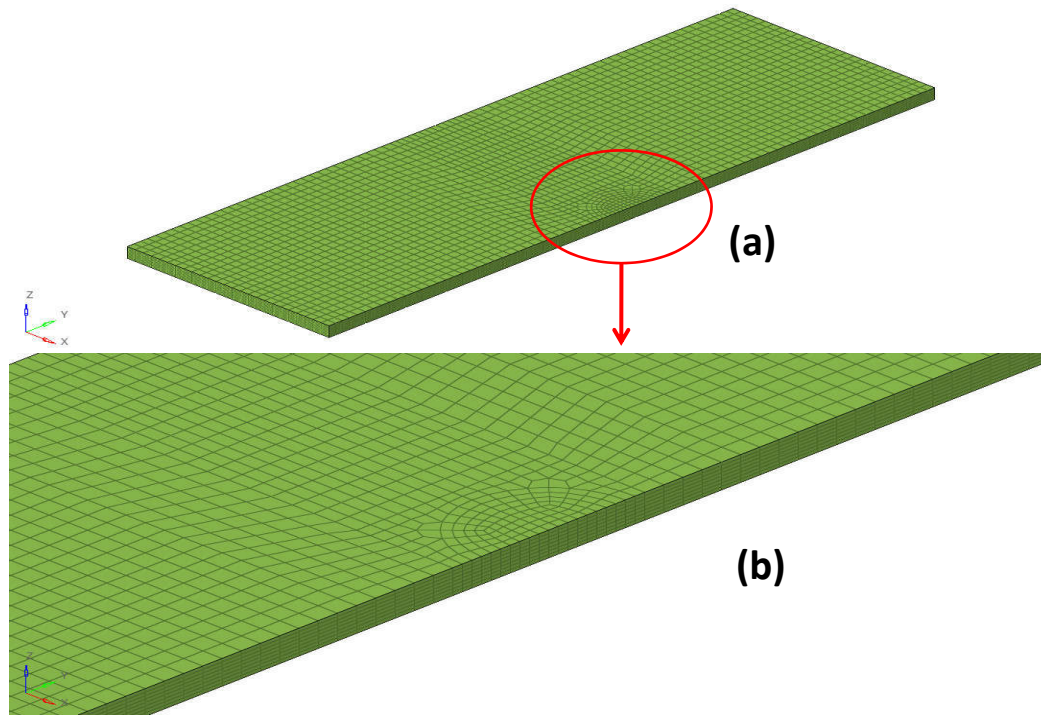


Figura 3.21: Malha do Fio de NiTi inserido na placa de compósito.

Após a etapa de geração de malha da placa de compósito, foi realizado a malha da base e do impactor. Para este modelo, considera-se que o impactor e a base de apoio possuem deformações desprezíveis, o que fornece mecanismos para simplificação da geometria. Sendo assim, a base de apoio foi modelada com elementos 2D após extração da superfície média da geometria e o impactor foi modelado utilizando elementos 3D tetra onde ambas as geometrias possuem tamanho de malha  $2mm$ . A Figura 3.22 ilustram as malhas na geometria da base e do impactor.

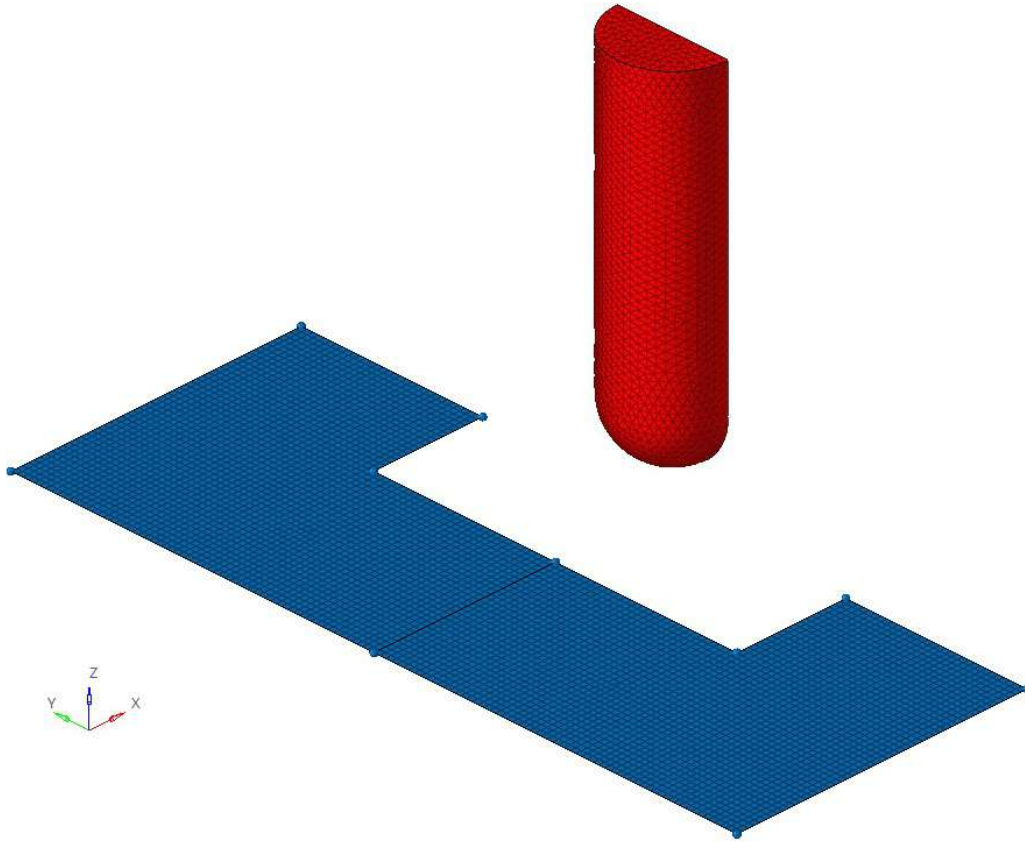


Figura 3.22: Malha da Base e do Impactor.

Em relação as condições de contorno da simulação, foram utilizadas três restrições de movimentos no modelo. A primeira restrição foi realizada para impedir o movimento da base de apoio onde foi aplicada uma fixação de todos os graus de liberdade, ou seja, impedindo a base de transladar ou rotacionar. Na segunda restrição também foi fixado todos os graus de liberdade do elemento de contato criado entre a placa de compósito e a base de apoio. Este contato simula o *Toggle Clamp* (Figura 3.23) que consta na norma ASTM D7136 e foi modelado para garantir as corretas posições em que a placa seria fixada. A terceira restrição tem como objetivo garantir que o movimento do impactor aconteça somente em translação na direção da placa de compósito (direção do eixo Z). Para tal, foi aplicada uma restrição de movimento em 5 graus de liberdade do impactor deixando livre apenas o de translação na direção da placa.

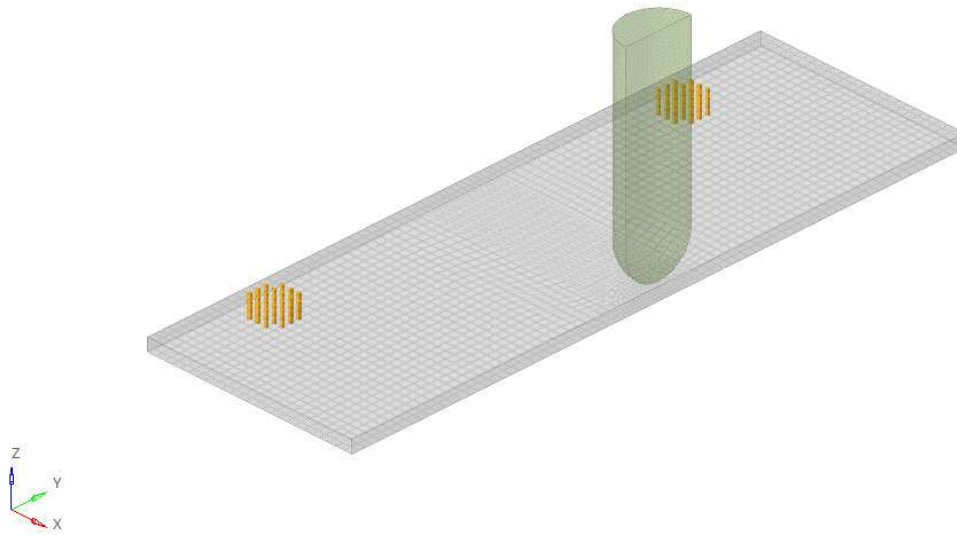


Figura 3.23: Condição de contato entre a placa e a base de apoio.

A velocidade de impacto entre o compósito e o impactor foi outra condição de contorno inserida no modelo de simulação onde esta velocidade foi aplicada no nó principal do elemento rígido que liga todos os nós do impactador. Esta velocidade atua na direção da placa com um valor de  $4,429m/s$  e em conjunto com a massa de  $3,215Kg$  do impactor gera uma Energia Total de Impacto de  $31,5J$  conforme condições de contorno experimentais.

Após a etapa de geração da malha e aplicação das condições de contorno, foi realizado a inserção das propriedades dos materiais nas geometrias no software de elementos finitos. Em relação a base e o impactor, por serem feitos de material metálico isotrópico, bastou inserir o valor do módulo de elasticidade de  $210GPa$  e massa específica de  $7,8g/cm^3$ .

Para a placa de compósito, o parâmetro adotado no software de elementos finitos foi de um material ortotrópico-elástico [78, 79, 80]. Na fase elástica o cálculo da relação Tensão x Deformação é calculado seguindo as relações demonstradas nas equações de 3.8 a 3.13.

$$\varepsilon_{11} = \frac{1}{E_{11}}\sigma_{11} - \frac{\nu_{21}}{E_{22}}\sigma_{22} - \frac{\nu_{31}}{E_{33}}\sigma_{33} \quad (3.8)$$

$$\varepsilon_{22} = \frac{1}{E_{22}}\sigma_{22} - \frac{\nu_{12}}{E_{11}}\sigma_{11} - \frac{\nu_{32}}{E_{33}}\sigma_{33} \quad (3.9)$$

$$\varepsilon_{33} = \frac{1}{E_{33}}\sigma_{33} - \frac{\nu_{13}}{E_{11}}\sigma_{11} - \frac{\nu_{23}}{E_{22}}\sigma_{22} \quad (3.10)$$

$$\gamma_{12} = \frac{1}{2G_{12}}\sigma_{12} \frac{\nu_{21}}{E_{22}} = \frac{\nu_{12}}{E_{11}} \quad (3.11)$$

$$\gamma_{23} = \frac{1}{2G_{23}}\sigma_{23} \frac{\nu_{32}}{E_{33}} = \frac{\nu_{23}}{E_{22}} \quad (3.12)$$

$$\gamma_{31} = \frac{1}{2G_{31}}\sigma_{31} \frac{\nu_{13}}{E_{11}} = \frac{\nu_{31}}{E_{33}} \quad (3.13)$$

Na simulação numérica, a cada incremento, uma análise para saber se o material da placa de compósito está na fase elástica ou na fase não linear é realizada por meio do critério de *Tsai-Wu* que verifica se  $F(\sigma)$  é menor ou maior que  $F(W_p^*, \varepsilon)$ , ambas expressas pelas Equações 3.14 e 3.15, respectivamente. Para o cálculo de  $F(\sigma)$  os coeficientes de resistência  $F_i$  e  $F_{ij}$  estão expressos nas equações 3.16 a 3.27.

$$\begin{aligned} F(\sigma) = & F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_3\sigma_3 + F_{11}\sigma_1^2 + \\ & F_{22}\sigma_2^2 + F_{33}\sigma_3^2 + F_{44}\sigma_{12}^2 + F_{55}\sigma_{23}^2 \\ & + F_{66}\sigma_{31}^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + 2F_{23}\sigma_2\sigma_3 + 2F_{13}\sigma_1\sigma_3 \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$F(W_p^*, \varepsilon) = [1 + B(W_p^*)^n] * [1 + c * \ln \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}] \quad (3.15)$$

$$F_1 = -\frac{1}{\sigma_{1y}^c} + \frac{1}{\sigma_{1y}^t} \quad (3.16)$$

$$F_2 = -\frac{1}{\sigma_{2y}^c} + \frac{1}{\sigma_{2y}^t} \quad (3.17)$$

$$F_3 = -\frac{1}{\sigma_{3y}^c} + \frac{1}{\sigma_{3y}^t} \quad (3.18)$$

$$F_{11} = \frac{1}{\sigma_{1y}^c \sigma_{1y}^t} \quad (3.19)$$

$$F_{22} = \frac{1}{\sigma_{2y}^c \sigma_{2y}^t} \quad (3.20)$$

$$F_{33} = \frac{1}{\sigma_{3y}^c \sigma_{3y}^t} \quad (3.21)$$

$$F_{44} = \frac{1}{\sigma_{12y}^c \sigma_{12y}^t} \quad (3.22)$$

$$F_{55} = \frac{1}{\sigma_{23y}^c \sigma_{23y}^t} \quad (3.23)$$

$$F_{66} = \frac{1}{\sigma_{31y}^c \sigma_{31y}^t} \quad (3.24)$$

$$F_{12} = -\frac{1}{2} \sqrt{F_{11} F_{22}} \quad (3.25)$$

$$F_{23} = -\frac{1}{2} \sqrt{F_{22} F_{33}} \quad (3.26)$$

$$F_{13} = -\frac{1}{2} \sqrt{F_{11} F_{33}} \quad (3.27)$$

Quando o valor de tensão atinge os limites  $\sigma_{ti}$  deste material, uma nova tensão reduzida é calculada com a utilização de um valor de dano ( $D$ ) que é atualizado em cada incremento

de tempo por meio do parâmetro de dano ( $\delta$ ). O cálculo do dano é realizado conforme a equação 3.28 e a tensão reduzida é calculada seguindo a relação exibida na equação 3.29.

$$D_i = \sum_i * \delta_i \quad (3.28)$$

$$\sigma_i^{reduzida} = (1 - D_i)\sigma_{ti} \quad (3.29)$$

As propriedades mecânicas do material compósito utilizadas na simulação numérica não linear estão dispostas na Tabela 3.8 [79].

Tabela 3.8: Propriedades do material compósito. Adaptado de [79].

Módulo de Elasticidade ( <i>GPa</i> )		Coeficiente de Poisson		Módulo de Cisalhamento ( <i>GPa</i> )	
$E_x$	26	$\nu_{xy}$	0,1	$G_{xy}$	3,8
$E_y$	26	$\nu_{yz}$	0,25	$G_{yz}$	2,8
$E_z$	8	$\nu_{xz}$	0,25	$G_{xz}$	2,8
Resistência a Tração ( <i>MPa</i> )		Resistência a Compressão ( <i>MPa</i> )		Resistência ao Cisalhamento ( <i>MPa</i> )	
$X_T$	850	$X_C$	720	$S_{12}$	105
$Y_T$	850	$Y_C$	720	$S_{13}$	65
$Z_T$	120	$Z_C$	500	$S_{23}$	65
Tensão de Falha Normal Interlaminar			Tensão de Falha ao Cisalhamento Interlaminar		
35 <i>MPa</i>			65 <i>MPa</i>		

O modelo do material adotado no software de elementos finitos para a liga de NiTi foi representado pelo critério de *Johnson-Cook*. Neste modelo, durante cada incremento, sua deformação plástica a tensão é descrita em função da deformação de acordo com a equação 3.30.

$$\sigma = (a + b\varepsilon_p^n)(1 + c * \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}) \quad (3.30)$$

No *Solver Radioss Card*, inserindo a opção  $I_{flag} = 1$  do material, o próprio software realiza o cálculo dos parâmetros  $a, b$  e  $n$  baseado nas tensões de escoamento, tensão de ruptura e a deformação de ruptura do NiTi. Além disso, se fez necessário a inserção do modulo de elasticidade e a massa específica do material para a realização dos os cálculos na fase elástica. Todos os dados do material, que estão dispostos na Tabela 3.9, foram fornecidos pela fabricante *Sandinox Biomateriais* sob o certificado de qualidade 34424/19 ISO 9001.

Tabela 3.9: Propriedades mecânicas dos fios de NiTi.

Propriedades Mecânicas	Diâmetro (mm)		
	0,3	0,5	0,7
Densidade $\rho$ ( $\frac{g}{cm^3}$ )	5,54	5,61	6,75
Módulo de Elasticidade $E$ (GPa)	35	35	35
Tensão de Escoamento $\sigma_Y$ (MPa)	566	536	586
Tensão de Ruptura $\sigma_U$ (MPa)	1519	1496	1475
Tensão de Escoamento $\varepsilon$ (%)	14,3	14,8	15,9

Após toda a modelagem computacional, parâmetros e inserção das condições de contorno, foram realizadas as análises não lineares pelo método dos elementos finitos dos Modelos A, B, C e D, contidos na Tabela 3.7 deste trabalho.

# Capítulo 4

## Resultados e Discussões

### 4.1 Seleção do Fio de Nitinol

Como relatado anteriormente, para a seleção do fio de Nitinol a ser utilizado no ensaio de impacto, foi realizado o experimento através de DMA para avaliar a influência no módulo de armazenamento do compósito ( $E'$ ). Sendo assim, uma placa de compósito contendo os fios Superelástico e Martensítico (Figura 4.1) foi fabricada para retirada dos corpos de prova de Amostras Base (B), Amostras Martensíticas (M) e Amostras Superelásticas (S) (Figura 4.2).

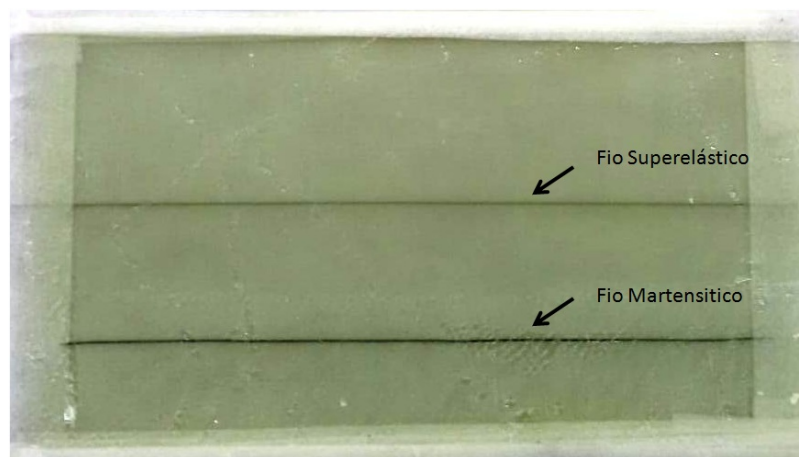


Figura 4.1: Placa de compósito com os fios Superelástico e Martensítico.





Figura 4.2: Corpos de prova de DMA Superelástico, Base e Martensítico, respectivamente.

Com a obtenção dos corpos de prova, foram realizados os ensaios de DMA para obtenção dos módulos de armazenamento ( $E'$ ). O Módulo de armazenamento está diretamente relacionado a capacidade do material em absorver energia e retornar-la na forma elástica, ou seja, resultando na afirmativa de que um material absorve mais ou menos energia que outro. Os resultados apresentados pela análise dinâmico-mecânica em termos do módulo de armazenamento ( $E'$ ) podendo ser visualizados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Módulos de Armazenamento dos ensaios de DMA

Amostra	Base (B)	Martensítico (M)	Superelástico (S)
1	6,1 <i>GPa</i>	7,7 <i>GPa</i>	8,3 <i>GPa</i>
2	5,8 <i>GPa</i>	7,6 <i>GPa</i>	8,3 <i>GPa</i>
3	6,7 <i>GPa</i>	6,9 <i>GPa</i>	9,2 <i>GPa</i>
4	6,6 <i>GPa</i>	7,2 <i>GPa</i>	8,0 <i>GPa</i>
<b>Média</b>	6,3 <i>GPa</i>	7,3 <i>GPa</i>	8,4 <i>GPa</i>

Para garantir que os resultados dos ensaios de DMA pudessem ser quantitativamente comparáveis, realizou-se análises estatísticas tais como Anova e testes  $t$  - Student. Estas análises são realizadas quando se pretende comparar e averiguar médias de experimentos para garantir que pelo menos uma ou todas são estatisticamente diferentes. Os testes de hipóteses onde se considera a hipótese nula ( $H_0$ ) e a hipótese alternativa ( $H_A$ ) para a ANOVA e  $t$  - Student estão dispostos na Tabela 4.2. Os valores de cada ensaio de DMA foram inseridos no software MiniTab<sup>®</sup> e os resultados podem ser visualizados pela Tabela 4.3.

Tabela 4.2:  $H_0$  e  $H_A$  para ANOVA e Teste  $t$ -Student

Teste Estatístico	Fator	$H_0$	$H_A$
ANOVA	B x M x S	$\sigma_B^2 = \sigma_M^2 = \sigma_S^2$	$\sigma_B^2 \neq \sigma_M^2 \neq \sigma_S^2$
$t$ - Student	B x M	$\mu_B = \mu_M$	$\mu_B < \mu_M$
$t$ - Student	B x S	$\mu_B = \mu_S$	$\mu_B < \mu_S$
$t$ - Student	M x S	$\mu_M = \mu_S$	$\mu_M < \mu_S$

Tabela 4.3: Valores de  $p$ -Value para ANOVA e Teste  $t$ -Student

Teste Estatístico	Fator	$p$ -Value
ANOVA	Amostra Base x Martensítica x Superelástica	0,000
$t$ - Student	Amostra Base x Martensítica	0,007
$t$ - Student	Amostra Base x Superelástica	0,001
$t$ - Student	Martensítica x Superelástica	0,011

Analisando os resultados da Tabela 4.3, como o parâmetro  $p$  - *value* da ANOVA é nulo (0,000), demonstra que as médias entre os três tratamentos são significativamente diferentes ( $p$  - *value* < 0,05 rejeita-se a hipótese nula), ou seja, pode-se afirmar que existe diferenças entre os módulos de armazenamento dos compósitos. Tendo em vista a diferença constatada pela ANOVA, como o  $p$  - *value* foi de 0,007 para o teste  $t$ -Student para a primeira comparação, rejeita-se a hipótese nula e assume-se a alternativa onde a média de  $B$  é menor que  $M$ . Na segunda análise entre a amostra Base e Superelástica o valor de  $p$  - *value* foi de 0,001, logo a média de  $B$  também é menor que  $S$ . Por fim, na terceira análise entre a amostra Superelástica e Martensítica o valor de  $p$  - *value* foi de 0,011, sendo assim, pode-se afirmar que o fio de nitinol Superelástico possui a maior capacidade de armazenamento do compósito. Diante dos resultados obtidos, o fio Superelástico será utilizado no restante do trabalho de tese na fabricação dos compósitos que serão testados em impacto de baixa velocidade.

## 4.2 Equacionamento para o Módulo de Armazenamento e Temperatura de Transição Vítrea em DMA

Como descrito no item 3.4, uma placa de compósito foi fabricada via VARTM com as posições e quantidades de fio em conformidade com o arranjo fatorial completo. Os ensaios de DMA foram conduzidos utilizando a norma ASTM D7028, e os resultados do módulo de armazenamento e  $\tan \delta$  para cada experimento foram coletados e inseridos no MiniTab<sup>®</sup> para a realização da análise estatística fatorial conforme a Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Respostas da análise de DMA no Arranjo Fatorial Completo

Variáveis Contínuas		Experimento		
Quantidade de Fios	Posição (mm)	Módulo de Armazenamento ( $E'$ )	Temperatura Transição Vítrea ( $\tan \delta$ )	
1	-1,125	7,08 GPa	99,79° C	
1	-1,125	6,92 GPa	99,67° C	
1	1,125	6,10 GPa	100,09° C	
1	1,125	6,04 GPa	100,08° C	
2	0	6,67 GPa	99,78° C	
2	0	6,88 GPa	99,65° C	
2	0	6,66 GPa	99,67° C	
3	-1,125	6,33 GPa	99,56° C	
3	-1,125	6,38 GPa	99,32° C	
3	1,125	6,78 GPa	100,20° C	
3	1,125	6,78 GPa	100,18° C	

Com os dados inseridos no MiniTab<sup>®</sup>, uma análise de variância (Tabela 4.5 e Tabela 4.6) foi realizada para obtenção dos resultados e estudo das variáveis que mais possuem significância.

Tabela 4.5: Respostas de  $p$ -Value da ANOVA para  $E'$ 

Fator	$p$ - Value
Quantidade de Fios	0,623
Posição	0,007
Quantidade de Fios x Posição	0,000
Constante ( $\epsilon$ )	0,000

Tabela 4.6: Respostas de  $p$ -Value da ANOVA para  $\tan \delta$ 

Fator	$p$ - Value
Quantidade de Fios	0,190
Posição	0,000
Quantidade de Fios x Posição	0,020
Constante ( $\epsilon$ )	0,000

Analisando os resultados da Tabela 4.5 com os valores de  $p$  - Value para  $E'$  e Tabela 4.6 com os valores de  $p$  - Value para  $\tan \delta$ , pode-se observar que a variável mais significativa seria a Posição dos fios no laminado e a variável de segunda ordem que corresponde a interação entre a Quantidade de Fios versus Posição no Laminado. Os resultados numéricos tabelados também podem ser observados e confirmados graficamente através da curva de Pareto dos Efeitos (Figuras 4.3 e 4.4) e da curva das Médias dos Efeitos Principais (Figuras 4.5 e 4.6).

Na curva dos Efeitos Principais para  $E'$  (Figura 4.5), correspondente à Quantidade de Fios nota-se que os pontos estão bem próximos ao eixo de referência da média central do modelo, logo não apresentam efeitos significativos sobre os resultados. Diferentemente da Quantidade de Fios, a Posição no laminado apresenta um expressivo distanciamento sobre a média central do modelo, o que acarreta em grande significância nos resultados.

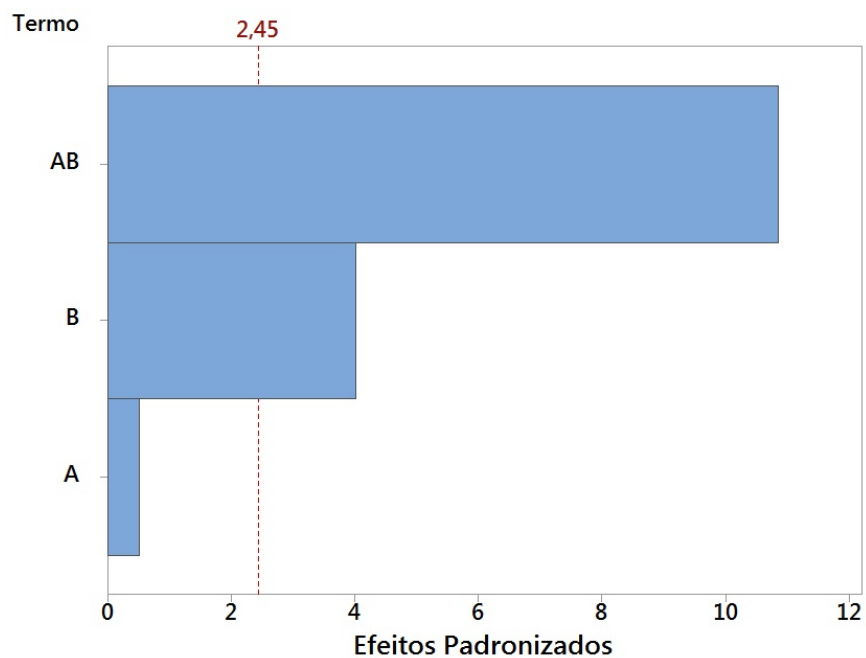


Figura 4.3: Curva de Pareto dos efeitos para  $E'$ .

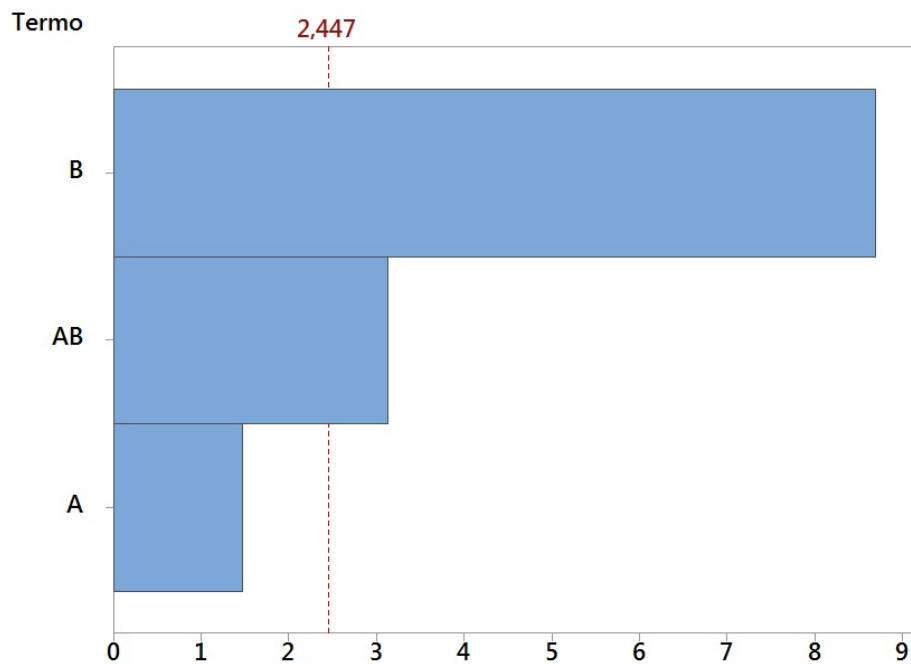


Figura 4.4: Curva de Pareto dos efeitos para  $\tan \delta$ .

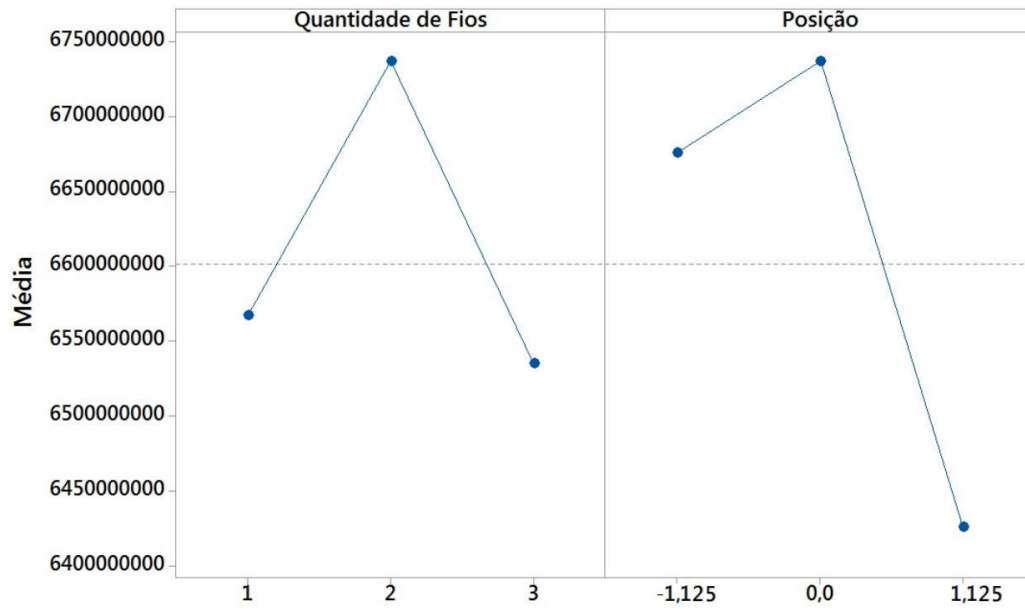


Figura 4.5: Curva das Médias dos Efeitos Principais para  $E'$ .

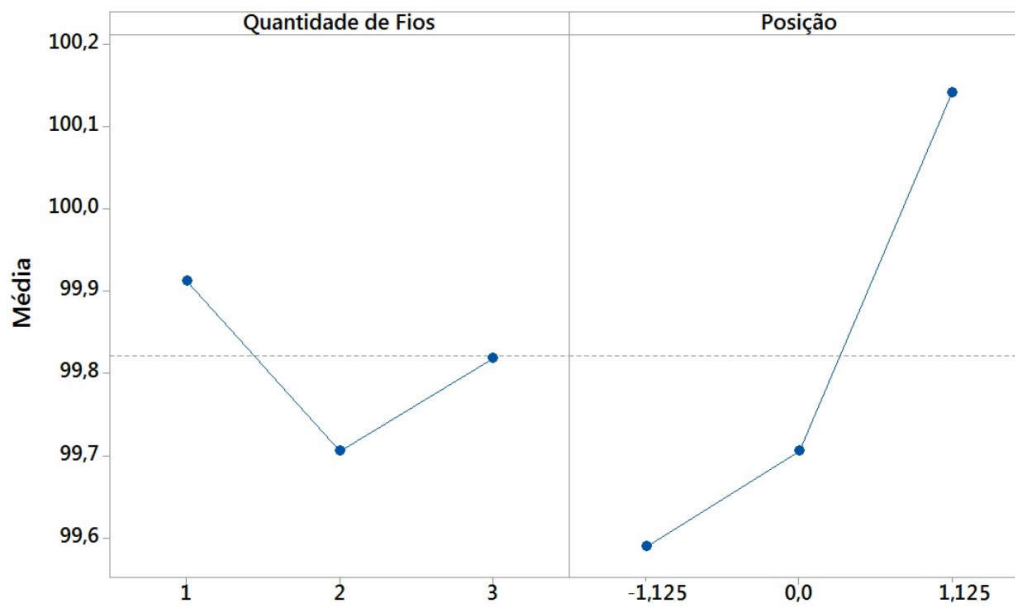


Figura 4.6: Curva das Médias dos Efeitos Principais para  $\tan \delta$ .

Na Figura 4.6 da curva dos efeitos principais para  $\tan \delta$ , as retas em relação a Quantidade de Fios estão praticamente paralelas a média central do modelo o que significa que essa variável não é significativa, ao inverso da Posição dos fios no laminado onde as retas estão basicamente na horizontal o que indica efeito de significância. Além das análises das curvas de Pareto e dos Efeitos Principais, pela análise de variância, os dados da ANOVA trouxeram um excelente ajuste com  $R^2$  de aproximadamente 96% para  $E'$  e 94% para  $\tan \delta$  conforme as Tabelas 4.7 e 4.8.

Tabela 4.7: Respostas de  $R^2$  para  $E'$

Resposta	$R^2$	$R^2_{aj}$	$R^2_{pred}$
Módulo de Armazenamento ( $E'$ )	95,99%	93,32%	88,63%

Tabela 4.8: Respostas de  $R^2$  para  $\tan \delta$ .

Resposta	$R^2$	$R^2_{aj}$	$R^2_{pred}$
Tangente de Delta ( $\tan \delta$ )	94,02%	90,04%	78,38%

O modelo matemático para o comportamento do módulo de armazenamento ( $E'$ ) e a temperatura de transição vítrea ( $\tan \delta$ ) em função da posição e quantidade de fios no laminado baseia-se na equação 3.1 do item 3.4 sendo que, através do processo de regressão linear, pode-se obter as equações 4.1 e 4.2. Como pode-se constatar, os fatores mais significativos para aumento do  $E'$  e  $\tan \delta$ , corresponde aos termos  $x_1$  e  $x_1x_2$  onde o sinal é positivo (+), diferentemente do termo  $x_2$  cujo sinal é negativo (-), ou seja, causa diminuição do valor do módulo de armazenamento.

$$E' = 1,61 * 10^7(x_1) - 2,85 * 10^8(x_2) + 1,2 * 10^8(x_1x_2) + 6,52 * 10^9 \quad (4.1)$$

$$\tan \delta = 0,0276(x_1) - 0,0470(x_2) + 0,0355(x_1x_2) + 99,9593 \quad (4.2)$$

sendo:

$E'$  : é o módulo de armazenamento em DMA;

$\tan \delta$  : é a temperatura de transição vítrea;

$x_1$  : representa a posição dos fios no laminado; e

$x_2$  : representa a quantidade de fios inseridos no laminado.

As Figuras 4.7 e 4.8 representam os gráfico tridimensional referentes aos modelos matemáticos para o módulo de armazenamento e temperatura de transição vítrea. Foi possível observar que o  $E'$  e a  $\tan \delta$  apresentam uma diminuição devido ao posicionamento dos fios de NiTi Superelástico nas camadas abaixo da linha neutra do compósito (vide Figura 3.6), ou seja, quanto mais abaixo da linha neutra os fios são posicionados menor o módulo de armazenamento e a tangente de delta. A medida que modifica-se a posição do fio para as camadas superiores, ou seja, acima da linha neutra, o módulo de armazenamento vai aumentando significativamente. A interação entre a quantidade de fios pela posição também acarreta em modificação dos valores para  $E'$  e  $\tan \delta$ . Analisando a Figura 4.7, essa interação se torna mais significativa pois existe uma quantidade maior de regiões onde se tem um aumento do módulo de armazenamento, ao contrário da Figura 4.8 onde esse efeito de interação não modifica substancialmente os valores da tangente de delta.

Diante dos resultados para  $E'$  e  $\tan \delta$  pode-se avaliar que a posição dos fios no laminado é a variável mais significativa, o que implica diretamente nas propriedades mecânicas e térmicas do compósito, ou seja, quanto mais acima da linha neutra essas propriedades aumentam. O módulo de armazenamento está diretamente relacionado com a parte elástica do material compósito, porém a tangente de delta indica a temperatura onde o material começa a apresentar "relaxamento", ou seja, entra na fase viscoelástica causando perdas de propriedades mecânicas onde o material deformado não retorna a sua forma original.



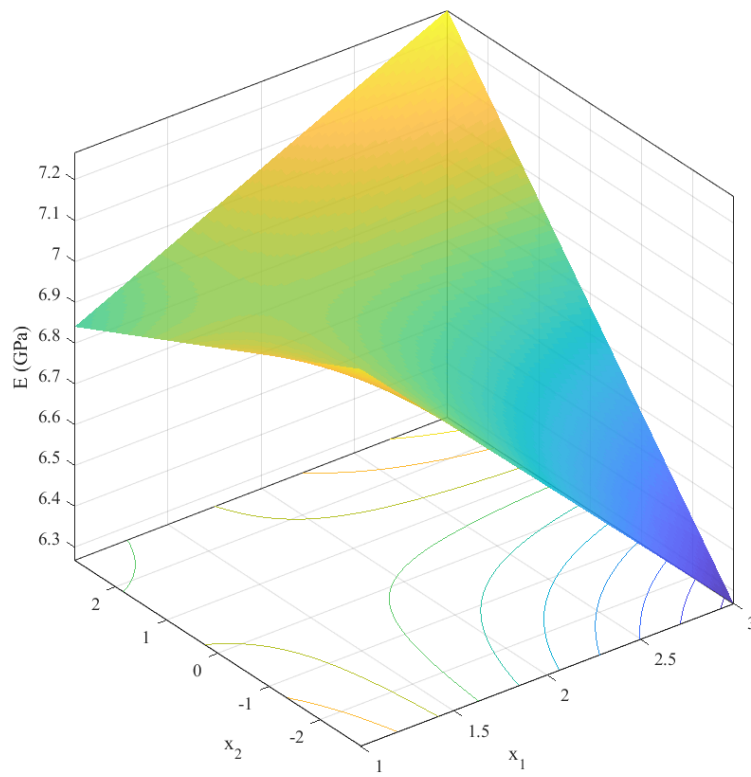


Figura 4.7: Curva das Médias dos Efeitos Principais para  $E'$ .

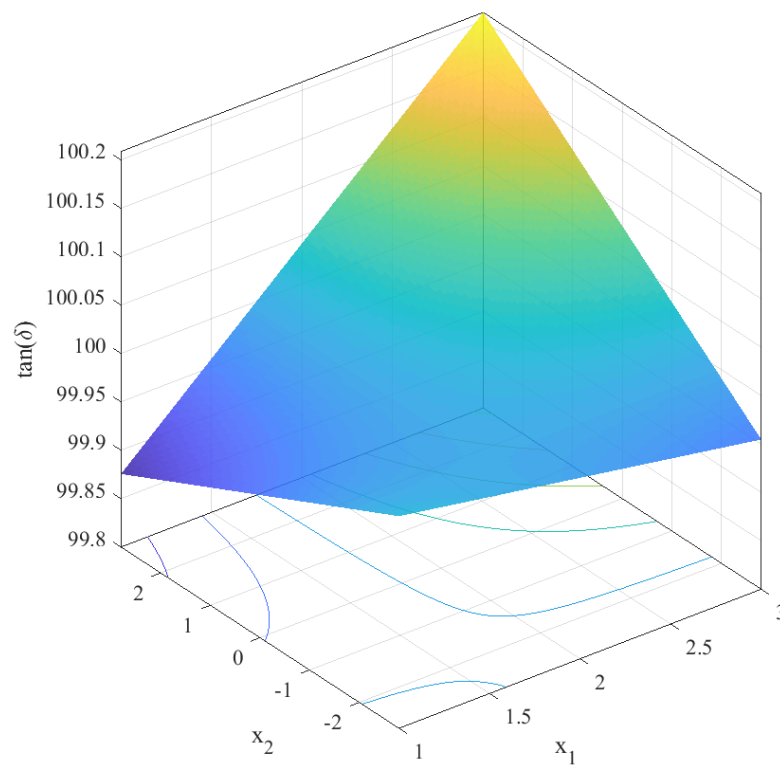


Figura 4.8: Curva das Médias dos Efeitos Principais para  $\tan \delta$ .

Os resultados mostraram que a correta inserção do NiTi pode trazer grandes benefícios para o compósito aumentando a zona elástica e a temperatura de trabalho, uma vez que esses aspectos são fatores importantes na maioria dos projetos de engenharia. Na indústria automotiva por exemplo, o aumento da tangente de delta e da parte elástica amplifica a utilização e aplicação deste material garantindo segurança ao projeto.

Também é de grande relevância mencionar, que o fato da inserção de fios de NiTi Superelástico aumentar a temperatura de transição vítrea do compósito, possivelmente se dá pela alta condutividade dos fios, uma vez que esses são materiais metálicos e geram homogeneidade de dispersão da temperatura por todo o material compósito.

### 4.3 Análise e Resultados para os Ensaios Experimentais de Impacto

Como explicado anteriormente, todos os 15 corpos de prova gerados pelo arranjo fatorial fracionado mais os 3 corpos de prova sem o fio de NiTi foram fabricados em concordância com as Tabelas 3.4 e 3.5 deste trabalho. A Figura 4.9 ilustra o Modelo E (Com o Fio de Niti) e F (Sem o Fio de NiTi) com suas respectivas réplicas.

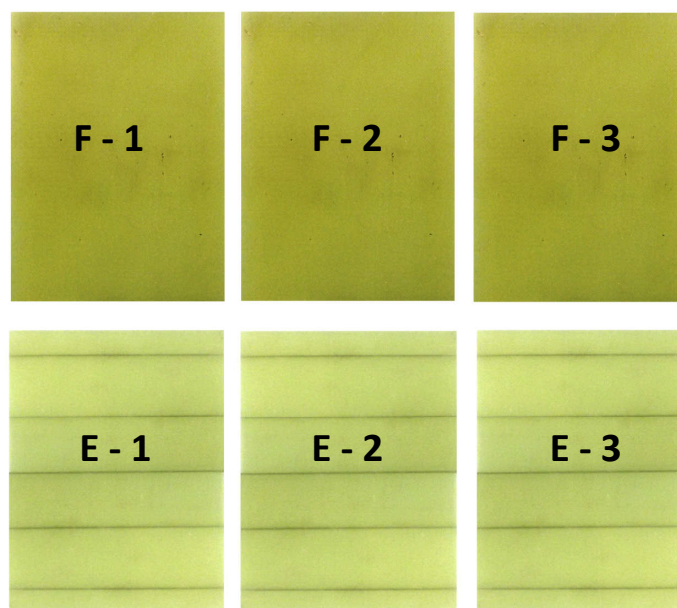


Figura 4.9: Corpos de Prova do Modelo E e F.

Após a fabricação dos corpos de prova, todas as amostras foram levadas ao LEL - Núcleo de Estruturas Leves do IPT para a realização dos ensaios de impacto. Como discutido no item 3.7 do Capítulo 3, as amostras foram ensaiadas de acordo com a norma ASTM D7136 utilizando uma máquina Instron 9340. A figura 4.10 ilustra uma amostra sem fio de NiTi fixada na base de suporte do equipamento para a realização dos experimentos de impacto de baixa velocidade. A figura 4.11 ilustra as amostras do Modelo E e F após o ensaio de impacto de baixa velocidade. Analisando as imagens dos danos causados pelo punção, pode-se identificar que as placas de compósito estão em acordo com a norma ASTM D7136 onde o dano externo foi do Tipo I - Identação/Depressão.

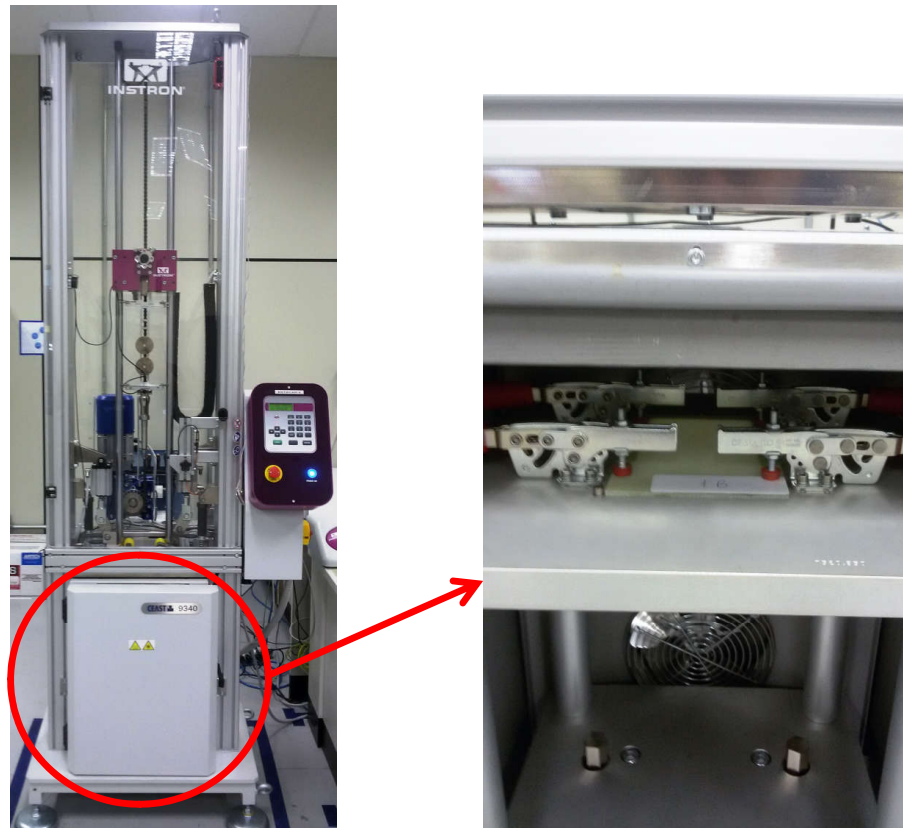


Figura 4.10: Amostra base sem fio NiTi fixada na máquina para ensaio de impacto.

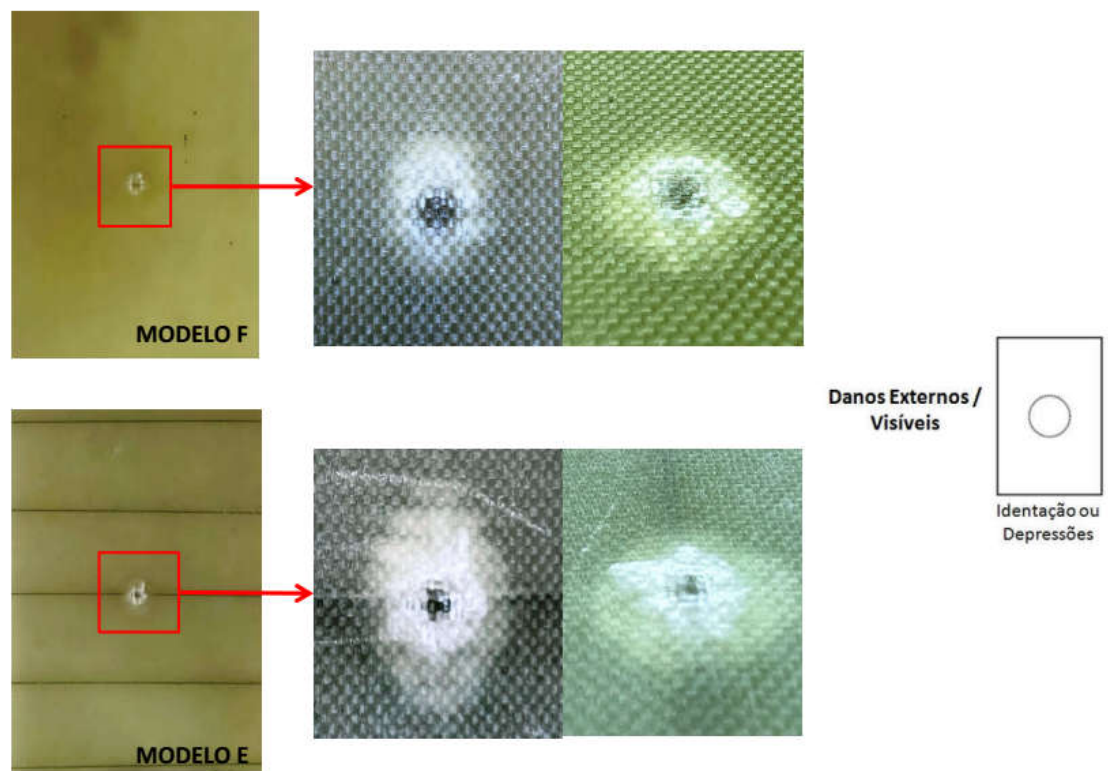


Figura 4.11: Danos causados pelo impacto nas amostras do Modelo E e F.

Os resultados da absorção de energia ao impacto de todas as 18 amostras, tanto as geradas pelo arranjo fatorial facionado quanto as que não continham o fio de NiTi estão sintetizados na Tabela 4.9 e ilustrados através das curvas nas Figuras 4.12 e 4.13 seguindo a nomenclatura de modelos da Tabela 3.5.

Tabela 4.9: Resultados da Absorção de Energia ao Impacto.

CDP	Diâmetro do Fio ( <i>mm</i> )	Espaçamento ( <i>mm</i> )	Posição no Laminado ( <i>mm</i> )	Energia ( <i>J</i> )	Energia Média ( <i>J</i> )
1	0,3	10	1,125	27,57	
2	0,3	10	1,125	27,67	27,54
3	0,3	10	1,125	27,37	
4	0,3	50	-1,125	27,99	
5	0,3	50	-1,125	27,29	27,70
6	0,3	50	-1,125	27,82	
7	0,7	10	-1,125	28,29	
8	0,7	10	-1,125	28,32	28,25
9	0,7	10	-1,125	28,14	
10	0,7	50	1,125	28,54	
11	0,7	50	1,125	28,58	28,52
12	0,7	50	1,125	28,44	
13	0,5	30	0	29,26	
14	0,5	30	0	29,74	29,52
15	0,5	30	0	29,56	
16		Sem Fio NiTi		26,48	
17		Sem Fio NiTi		26,71	26,63
18		Sem Fio NiTi		26,70	

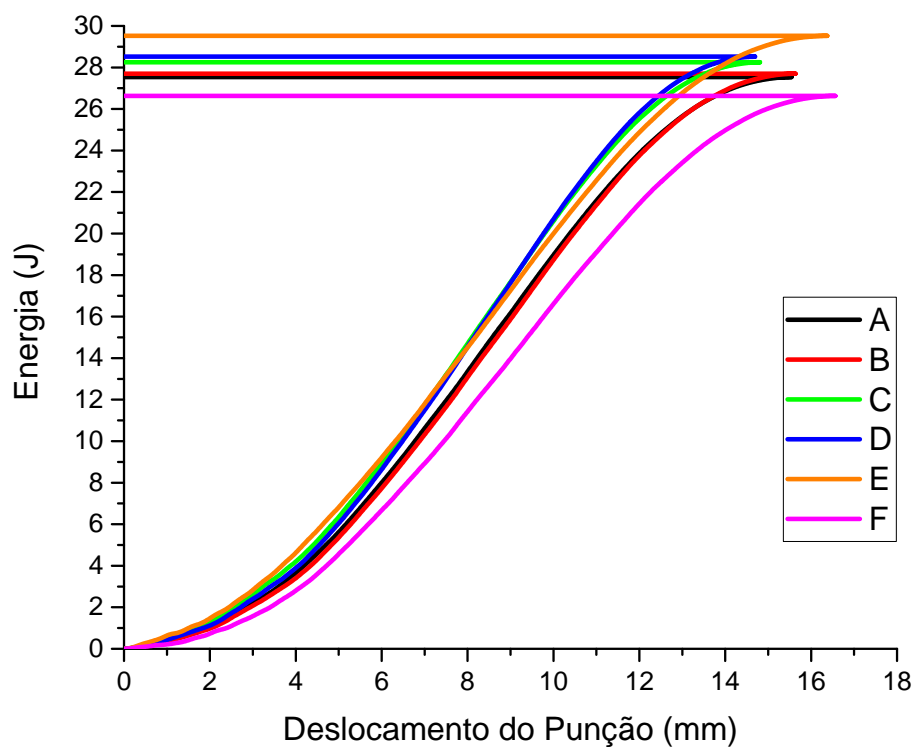


Figura 4.12: Curvas das energias médias absorvidas em função do deslocamento do punção.

Em uma primeira análise, pode-se observar que todos os modelos que continham o fio de NiTi inseridos na placa de compósito obtiveram uma maior absorção de energia ao impacto em relação a amostra base sem a presença do fio. Nesta etapa estamos comparando apenas valores médios sem um embasamento matemático estatístico, sendo assim, para uma análise mais criteriosa, se faz necessária um aprofundamento das análises.

De posse dos resultados experimentais, utilizou-se o MiniTab<sup>®</sup> para a realização da análise estatística fatorial. Com os dados inseridos, foi rodada uma análise de variância (ANOVA) para obtenção dos resultados e estudo das variáveis mais significativas de acordo com os valores de *p*-Value onde esses resultados estão dispostos na Tabela 4.10.

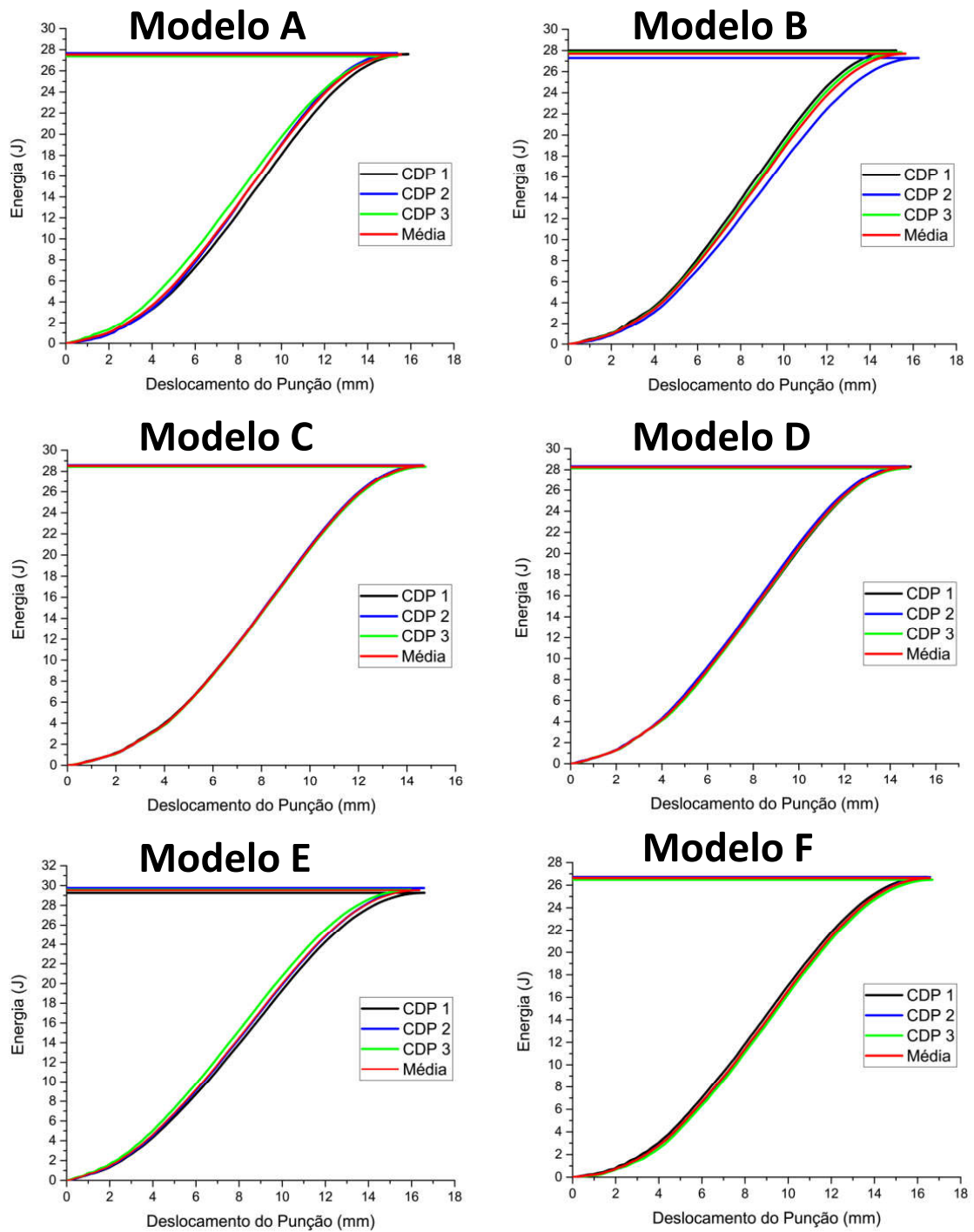


Figura 4.13: Curvas das energias absorvidas em função do deslocamento do punção.

Tabela 4.10: Resposta de  $p$  - Value da ANOVA para Absorção de Energia ao Impacto.

Fator	$p$ - Value
Diâmetro do Fio	0,000
Espaçamento	0,111
Posição no Laminado	0,684
Constante ( $\varepsilon$ )	0,000
Curvatura (Pt Ct)	0,000

Analisando os resultados da Tabela 4.10 com os valores de  $p$  - Value para a Energia de Absorção de Impacto  $E$ , pode-se observar que a variável mais significativa seria o diâmetro do fio. Além disso, pode-se observar nesta análise que existe a presença de curvatura no modelo. Os resultados numéricos tabelados também podem ser observados e confirmados graficamente através da curva de Pareto dos Efeitos (Figuras 4.14) e da curva das Médias dos Efeitos Principais (Figura 4.15).

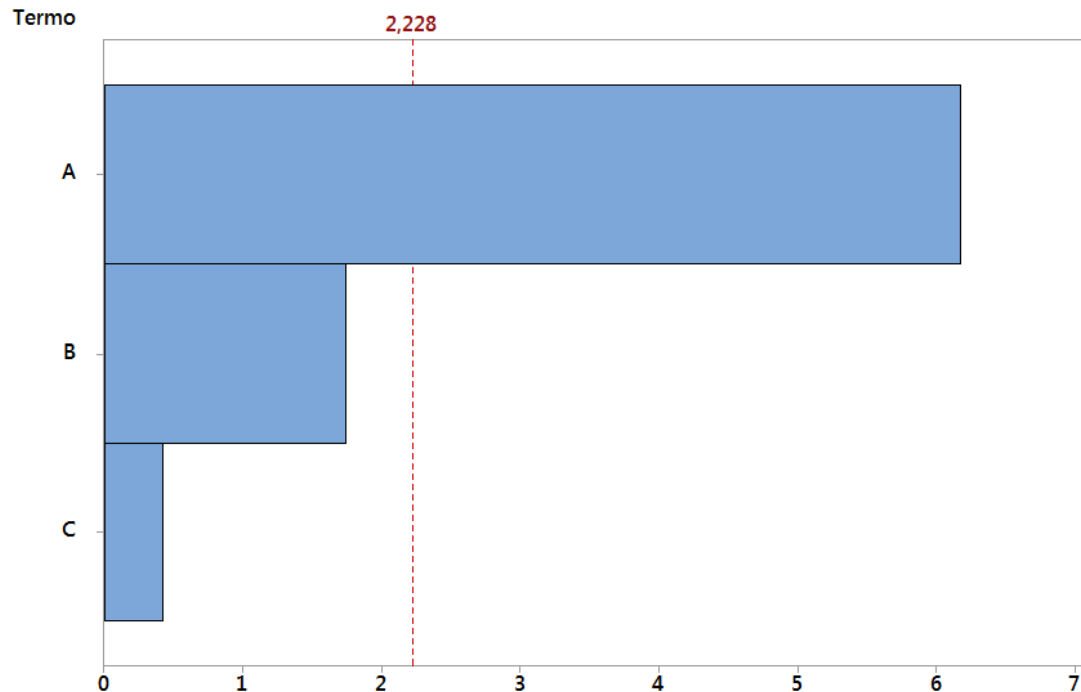


Figura 4.14: Curva de Pareto dos efeitos para energia absorvida.



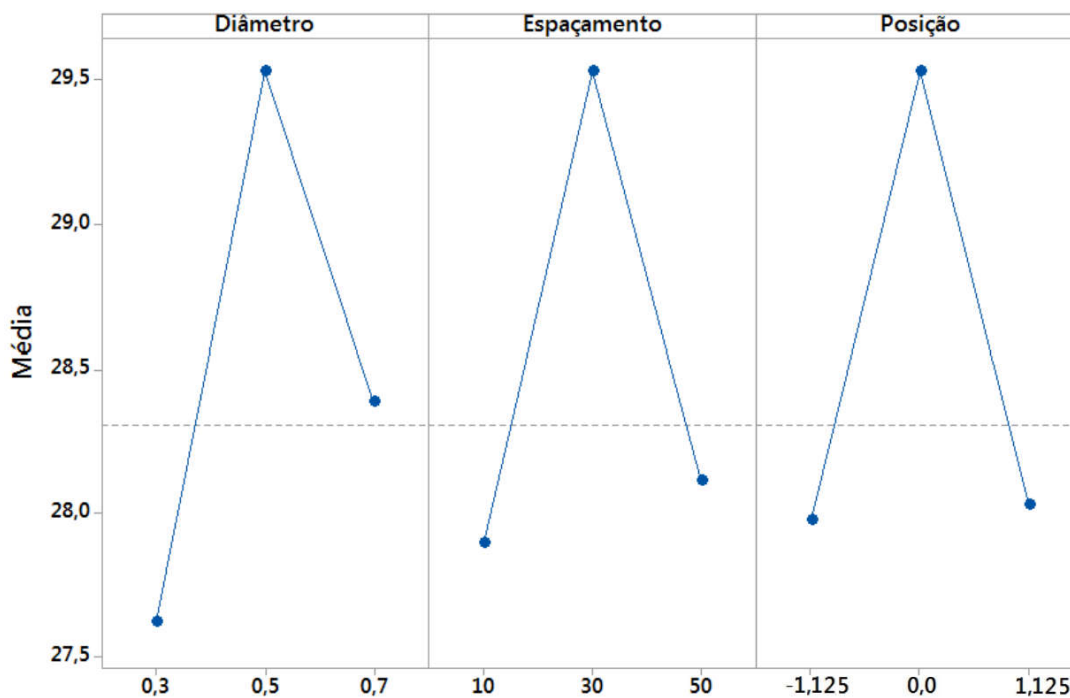


Figura 4.15: Curva das médias de energia absorvida em função do deslocamento do punção.

Tanto na curva de Pareto (Figura 4.14) quanto na das médias dos efeitos principais para absorção de energia ao impacto  $E$  (Figura 4.15), nota-se que os pontos correspondente ao espaçamento do fio e posição no laminado estão bem próximos ao eixo de referência da média central, logo não apresentam efeitos significativos sobre os resultados. Porém o diâmetro do fio apresenta um expressivo distanciamento sobre a média central do modelo, o que acarreta em grande significância nos resultados.

Vale ressaltar que, apesar do espaçamento não apresentar significância neste ensaio experimental, pela curva de Pareto, esta variável possui uma grande possibilidade de apresentar significância. Uma justificativa para tal análise consta no fato de que neste experimento seguindo a norma ASTM D7136 trabalhou-se em uma região de impacto com dimensões bem pequenas, considerando o diâmetro de 16mm do impactor e uma placa de compósito de 150 x 100 x 3mm. Em se tratando de um teste experimental de impacto em aeronaves (*Bird Strike*) por exemplo, um projétil com diâmetro variando

entre 100 a 200 *mm* atinge um corpo de prova de uma aeronave com uma velocidade de aproximadamente 175*m/s* [81, 82, 83], onde muito provavelmente o espaçamento dos fios apresentariam significância matemática estatística.

Além das análises da curva de Pareto e dos Efeitos Principais, pela análise de variância, os dados da ANOVA trouxeram um excelente ajuste com  $R^2$  de aproximadamente 94% para a absorção de energia ao impacto  $E$  conforme a Tabela 4.11. Logo, com esse resultado de  $R^2$  os dados experimentais apresentam confiabilidade e podem ser validados estatisticamente.

Tabela 4.11: Resposta de  $R^2$  para Absorção de Energia ao Impacto  $E$ .

Resposta	$R^2$	$R^2_{aj}$	$R^2_{pred}$
Absorção de Energia ao Impacto $E$	94,18%	91,86%	86,92%

O modelo matemático para o comportamento da absorção de energia ao impacto ( $E$ ) em função das variáveis de diâmetro, espaçamento e posição no laminado baseia-se na equação 3.1 do item 3.4 sendo que, através do processo de regressão linear, pode-se obter a equações 4.3. Como pode-se constatar, os fatores mais significativos para aumento do  $E$ , corresponde aos termo  $x_1$ . Vale ressaltar que o termo  $x_1x_2x_3$  no Arranjo Fatorial Fracionado causou um efeito de confundimento com o ponto central ( $x_3$ ) do experimento, isso ocorreu devido a região apresentar curvatura significativa conforme Tabela 4.10.

$$E = 1,1912(x_1) + 0,00541(x_2) + 0,0093(x_3) + 1,522(x_1x_2x_3) + 26,885 \quad (4.3)$$

sendo:

$E$  : é a Absorção de Energia ao Impacto;

$x_1$  : Diâmetro do fio de NiTi;

$x_2$  : Espaçamento dos fios no laminado; e

$x_3$  : Posição dos fios inseridos no laminado.

## 4.4 Análise e Resultados para as Simulações Numéricas Não-Lineares de Impacto

Nesta etapa, serão analisados e discutidos os resultados para absorção de energia ao impacto via simulação numérica não-linear pelo método dos elementos finitos. Como ressaltado no Capítulo 3, a finalidade da análise destes resultados deve-se ao fato de encontrar uma correlação numérica para validar um modelo capaz de prever o comportamento de absorção de energia ao impacto em uma placa de compósito. Sendo assim, foram realizadas as simulações numéricas de todos os quatro modelos propostos na Tabela 3.7 e suas curvas da absorção de energia ilustrados pelas Figuras 4.16 e 4.17.

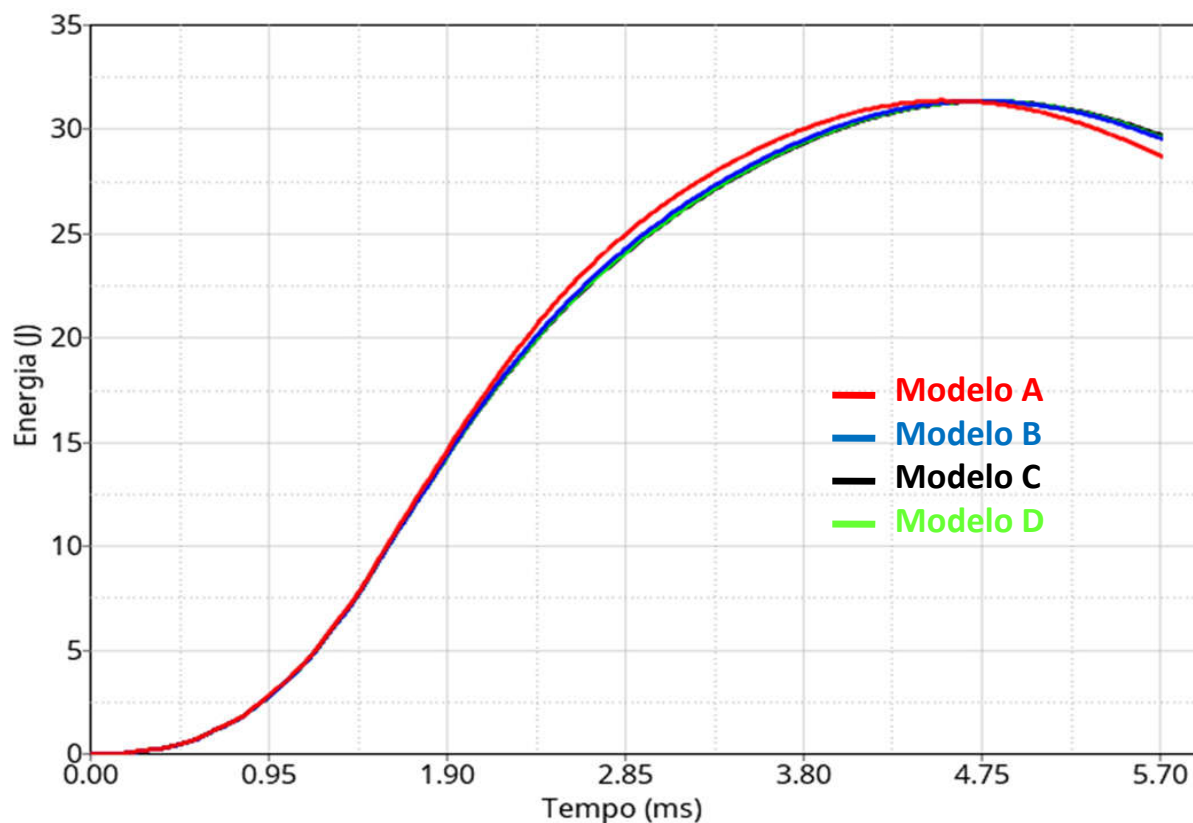


Figura 4.16: Curva conjunto da absorção de energia para os Modelos A, B, C e D.

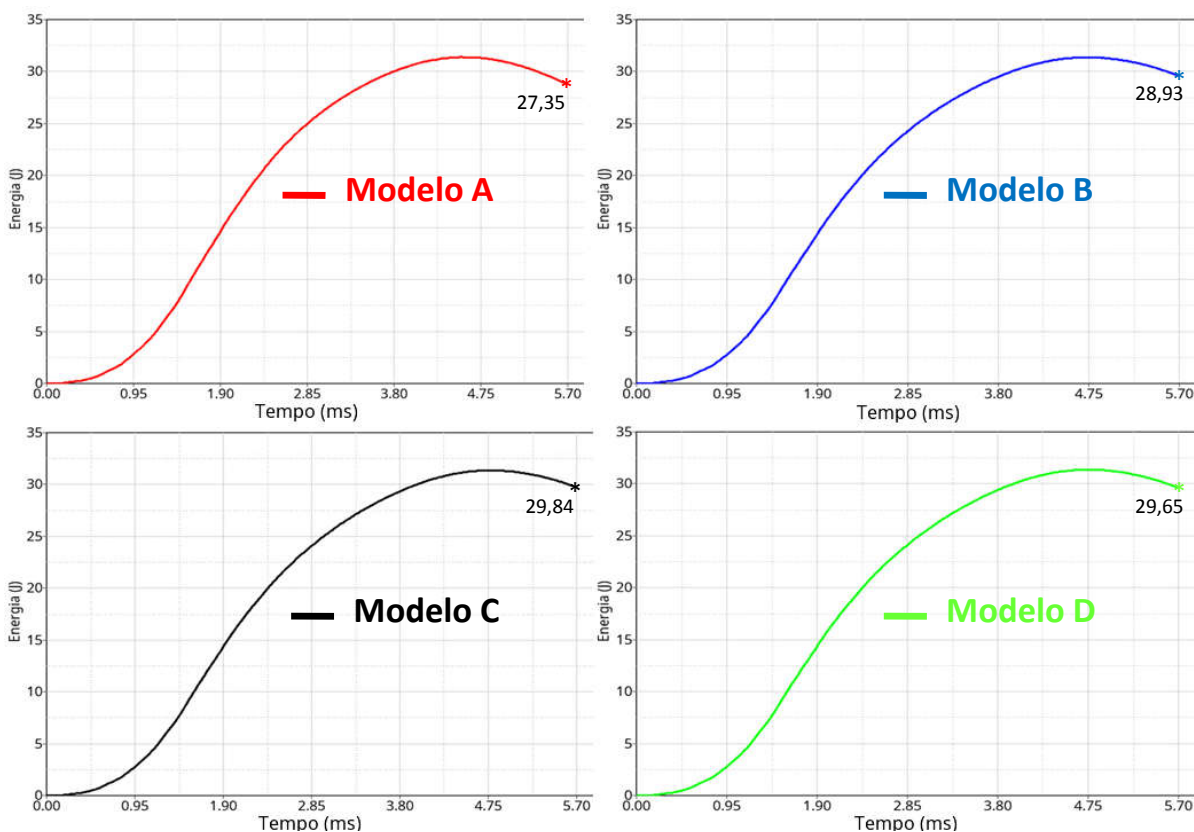


Figura 4.17: Curva individual da absorção de energia para os Modelos A, B, C e D.

As curvas geradas pelo software de elementos finitos da *Altair Hyperworks* diferem um pouco dos gráficos de resultados experimentais, porém sem nenhum prejuízo para as análises. Os resultados das curvas experimentais (Figuras 4.12 e 4.13) foram plotados em função do deslocamento do punção para uma melhor visualização das curvas de absorção de energia ao impacto [1]. Para uma reprodução idêntica dos gráficos da simulação numérica em relação aos experimentais, a modelagem do punção deveria ter o posicionamento exatamente na mesma altura e no exato momento de tempo do contato entre a placa e o impactor.

Para uma melhor análise, os resultados da simulação numérica não-linear para absorção de energia ao impacto estão dispostos na Tabela 4.12. Analisando os resultados, pode-se observar que, apesar dos valores numéricos ficarem um pouco acima dos experimentais, eles seguiram o mesmo padrão de resposta da análise experimental indicando um bom ajuste do modelo.

Tabela 4.12: Resultados da simulação numérica para absorção de energia ao impacto  $E$ .

Modelo	Diâmetro ( $mm$ )	Espaçamento ( $mm$ )	Posição ( $mm$ )	Energia ( $J$ )
A		Sem Fio NiTi		27,35
B	0,3	10	1,125	28,93
C	0,5	30	0	29,84
D	0,7	10	-1,125	29,65

Com o objetivo de validar o modelo numérico, os resultados para absorção de energia ao impacto experimental e numérica estão dispostos na Tabela 4.13 juntamente com os valores das correlações existentes.

Tabela 4.13: Correlação entre os resultados experimentais e numéricos para absorção de energia ao impacto  $E$ .

Modelo	Energia Experimental ( $J$ )	Energia Simulação Numérica ( $J$ )	Correlação (%)
A	26,63	27,35	97,36
B	27,54	28,93	95,19
C	29,52	29,84	98,92
D	28,25	29,65	95,28

Analisando a Tabela 4.13, os valores de correlação entre os resultados obtidos por simulação numérica e experimental foram todos acima de 95% ou seja, com todas as variações da margem abaixo de 10%, sendo que para o Modelo C a variação foi de apenas 1,08% [84, 85]. Isto significa que o modelo de elementos finitos adotado para as simulações numéricas destes ensaios está coerente, podendo ser utilizados em projetos futuros que envolvam a inserção de fios de NiTi em compósitos para aumentar absorção de energia ao impacto.

Outro fator importante para validação do modelo de elementos finitos esta relacionado ao comportamento dinâmico das simulações numéricas não-lineares. As Figuras 4.18 e 4.19 ilustram os valores referentes ao campo de tensões de cisalhamento na placa de compósito para os modelos A, B, C e D.

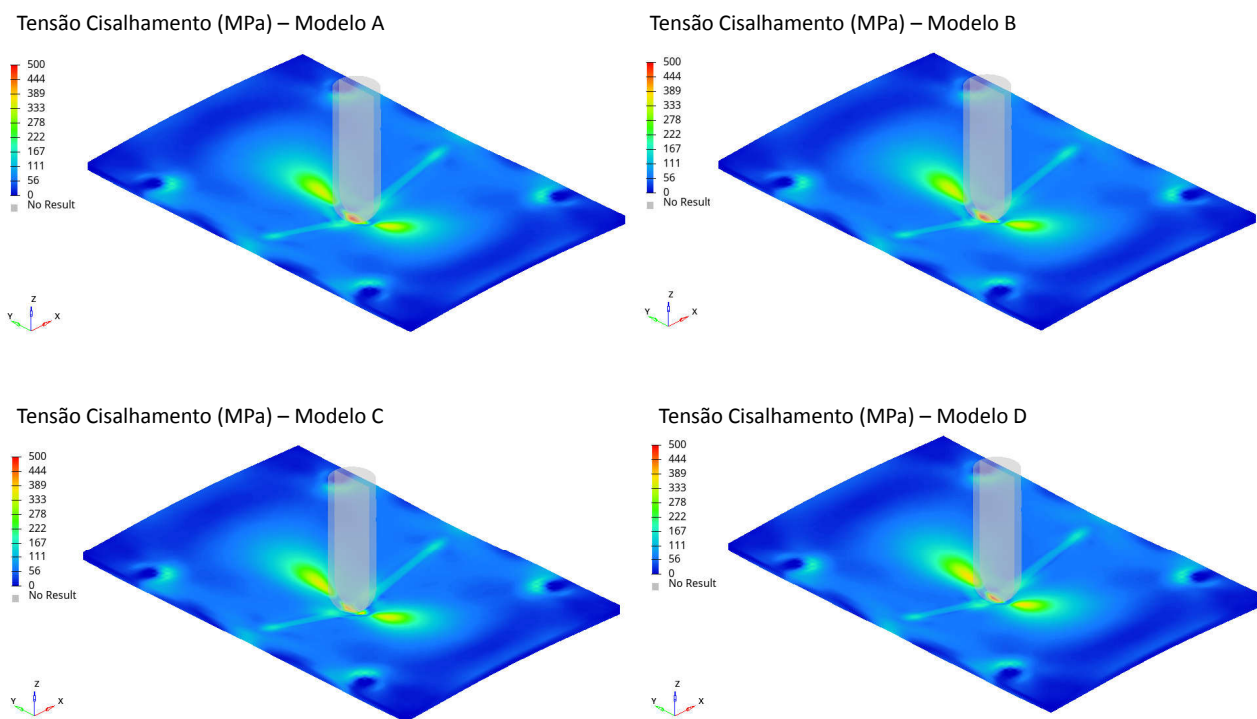


Figura 4.18: Tensões de Cisalhamento (vista superior) para os Modelos A, B, C e D.

Analisando as figuras, pode-se verificar que existe falha no compósito devido as altas tensões de cisalhamento geradas pelo impacto. Pode-se verificar que em concordância com o resultado experimental, o impactor também não perfurou a placa de compósito. Vale ressaltar que, apesar do *Solver Radioss* na sua versão *2022*, utilizar em sua base de cálculo do dano (Equações 3.8 a 3.29) o critério de *Tsai-Wu*, o mesmo não exporta os resultados em função deste critério.

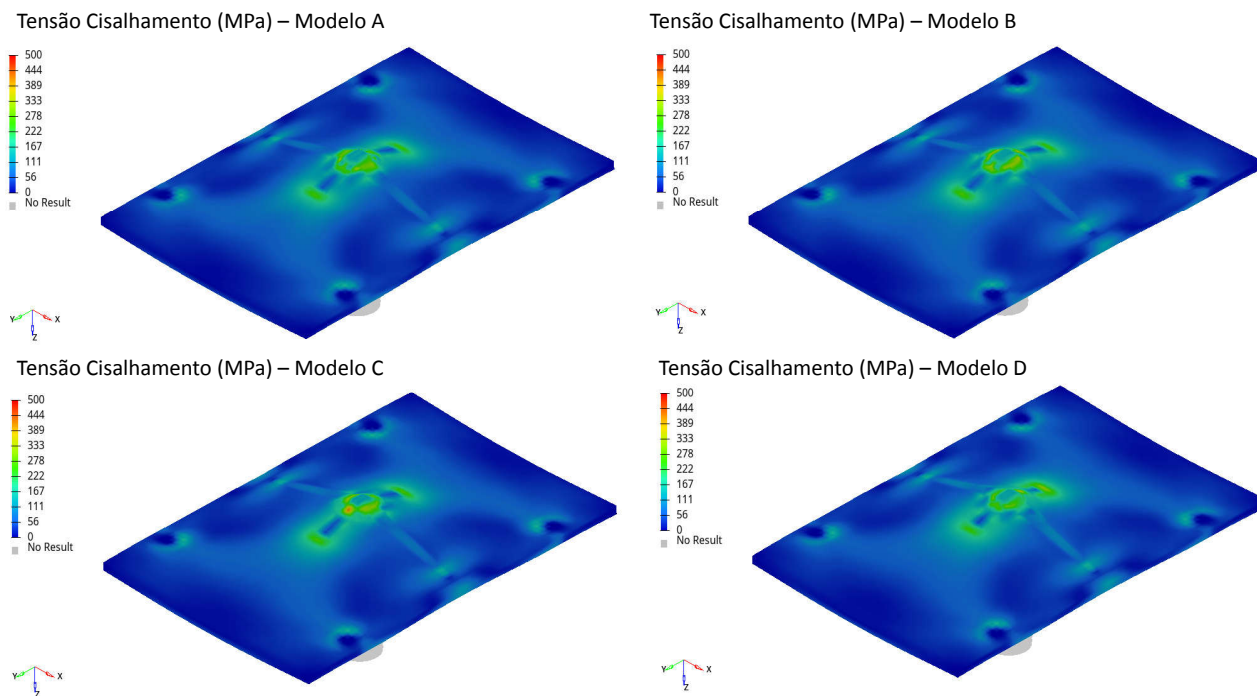


Figura 4.19: Tensões de Cisalhamento (vista inferior) para os Modelos A, B, C e D.

Como explicado no capítulo 3, o dano é calculado a cada instante de tempo e a cada incremento do modelo gerando um campo de tensões até o momento em que o dano cessa e o equacionamento estabiliza. Neste momento, pela análise das Figuras 4.18 e 4.19, foi possível verificar que existe falha do compósito e que essa falha cessa em determinado instante de tempo (exatamente em  $5,7ms$ ) pois existe a absorção de energia ao impacto evidenciada e correlacionada com os resultados experimentais e o início do retorno do impactor. Nas condições de contorno do modelo, a simulação numérica não-linear cessa quando existe esse retorno do impactor pois, após este exato momento, não existem resultados relevantes que justifiquem o uso computacional.

Além das análises dos resultados relacionados ao compósito, foi realizado uma verificação do comportamento do Fio de NiTi e sua influência em relação a absorção de energia ao impacto. Neste trabalho foi comprovadamente mostrado que a inserção do fio acarreta em ganho na absorção de energia e para ilustrar esse comportamento, a Figura 4.20

apresenta o resultado do campo de tensões pelo critério de *Von Mises*.

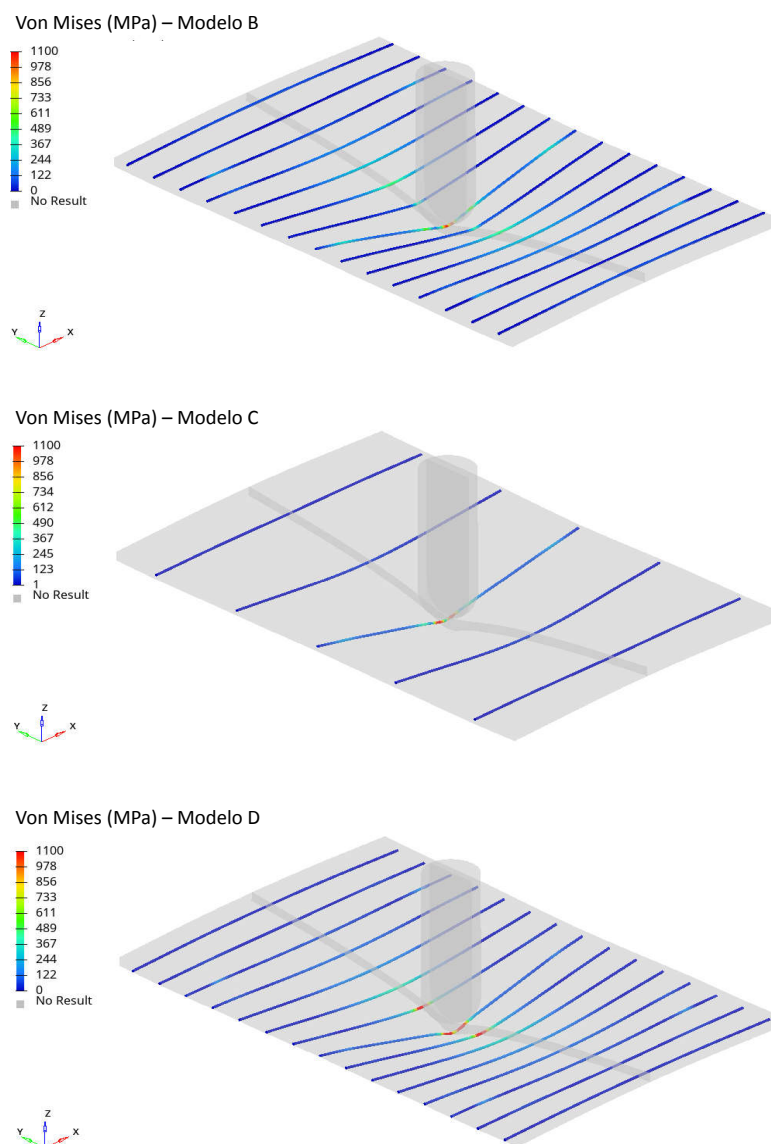


Figura 4.20: Tensões de *Von Mises* para os Modelos B, C e D.

Analisando os resultados de tensões da Figura 4.20, foi possível verificar que os fios de NiTi inseridos no compósito apresentam pontos de deformação plástica. Através destes resultados, esta análise justifica um dos motivos que leva ao aumento da absorção de energia ao impacto pelo corpo de prova pois o fio mostra-se eficiente em absorver parte



da energia transformando em deformação interna. As curvas da Figura 4.21 ilustram os resultados da energia interna absorvida pelo fio de NiTi para os Modelos B, C e D. Os resultados mostram que realmente existe uma parcela de energia de impacto que transforma-se em energia interna absorvida pelos fios gerando uma melhora nos resultados dos experimentos.

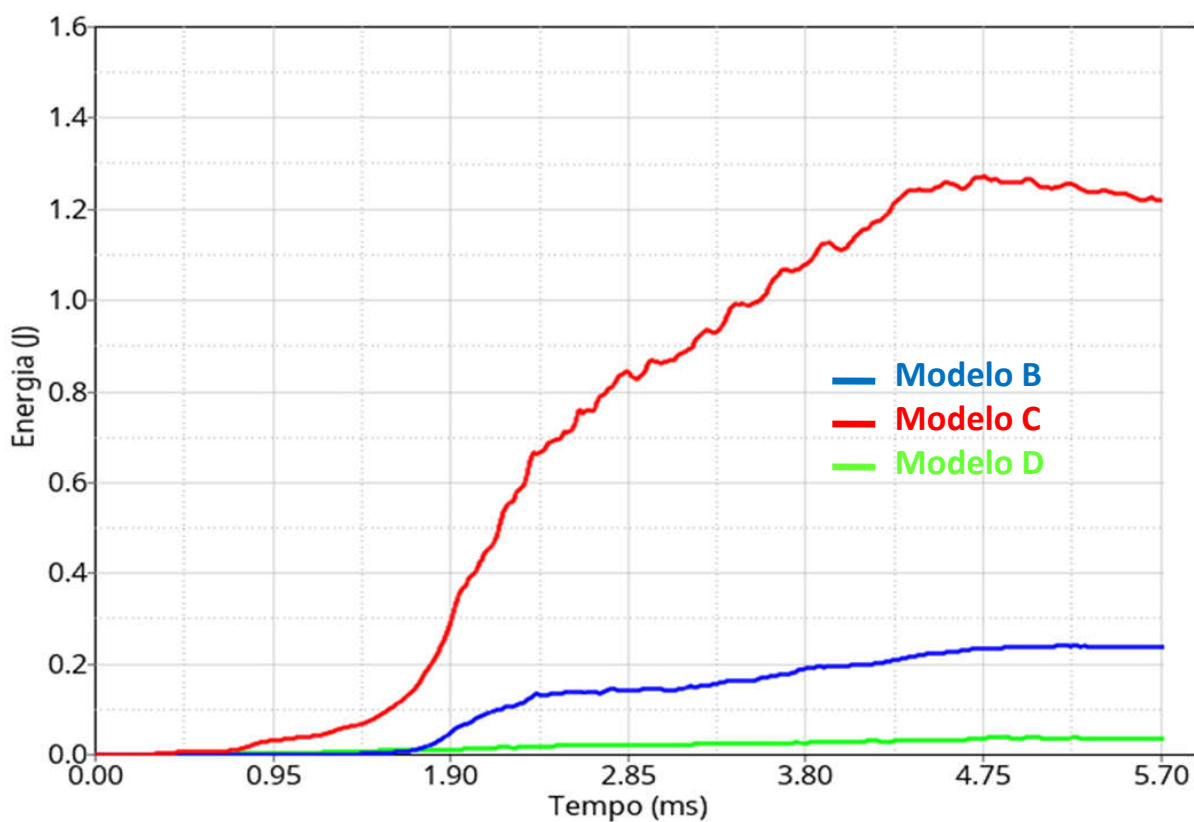


Figura 4.21: Energia interna absorvida pelos fios NiTi para os Modelos B, C e D.

# Conclusão

No presente trabalho foi avaliado a viabilidade de aumentar a absorção de energia ao impacto de um material compósito através da inserção de fios de NiTi desenvolvendo um equacionamento, através de DOE, para prever esta capacidade de absorção. Para tal proposta, foi utilizada a norma ASTM D7136 que garante a viabilidade do projeto em relação a impacto de baixa velocidade em materiais compósitos. Os resultados da análise estatística pelo arranjo fatorial fracionado mostraram que a inserção do fio no compósito aumenta a capacidade de absorção de energia em comparação com as amostras base (sem o fio). Sendo assim, um equacionamento para descrever o problema foi possível e realizado em função das três variáveis de projeto (Diâmetro, Espaçamento e Posição no Laminado).

- Em relação a avaliar a liga de metal com memória de forma mais adequada (Martensítica ou Superelástica) para função de absorção de energia ao impacto em materiais compósitos pelo método de Análise Dinâmico Mecânica (DMA):

Com uma análise dos resultados, através da comparação dos valores médios pela ANOVA e estatística *t-Student*, de DMA para a seleção do fio pode-se afirmar que a liga Superelástica apresentou as melhores propriedades mecânicas em comparação com a Martensítica e Amostra Base (Sem o Fio). Além disso, através do planejamento de experimentos (DOE) com o Arranjo Fatorial Completo, análise das curvas de Pareto e Média dos Efeitos Principais, foi possível concluir que os fatores que mais influenciam para esta melhora nas propriedades mecânicas foram a posição

no laminado e a interação entre a posição *versus* quantidade de fios. Diante destas análises foi possível obter um equacionamento capaz de prever o comportamento em relação ao aumento da capacidade do módulo de armazenamento  $E'$  e temperatura de transição vítrea do compósito  $\tan \delta$ .

- Em relação a analisar, através da técnica de planejamento de experimentos (DOE), quais fatores (diâmetro do fio, espaçamento entre fios e posição no laminado) que possuem maior influência na absorção de energia ao impacto seguindo as norma ASTM D7136 [9]:

Utilizando a ferramenta estatística de Planejamento de Experimentos no nível Arranjo Fatorial Fracionado, análise dos gráficos de Pareto e Média dos Efeitos Principais, foi possível concluir que as variáveis de projeto que mais causaram influência na absorção de energia ao impacto foram o Diâmetro do Fio de NiTi e a interação de primeira ordem entre o Diâmetro do fio, Espaçamento e Posição no Laminado ( $x_1x_2x_3$ ). Porém, como discutido nos resultados deste trabalho, além do Diâmetro ( $x_1$ ) existe uma grande possibilidade da variável Espaçamento dos Fios no Laminado ( $x_2$ ) apresentar significância ( $p - value < 0,05$ ) em uma condição de contorno para impacto diferente da Norma ASTM D7136, por exemplo, uma análise do tipo *Bird Strike* em aeronaves.

- Em Relação a avaliar, através de simulação numérica pelo método dos elementos finitos a existência de correlação entre a análise experimental x computacional:

Através das análises dos resultados do modelo de simulação numérica não-linear (Análise Dinâmica), pode-se concluir que existe uma correlação entre os resultados numéricos e experimentais, com todas as relações das margens de erro abaixo de 10%. Além disso, houve uma correlação do Modelo C, por exemplo, que obteve uma relação de acerto maior que 98% indicando que o modelo de simulação numérica esta bem ajustado e apresenta confiabilidade.

- Por fim, em relação a propor um modelo através de simulação numérica pelo método dos elementos finitos a fim de gerar uma redução de custos e modificações de parâmetros para projetos futuros:

Pela análise das curvas, modelos e os resultados que a simulação numérica não-linear apresentou, pode-se concluir que trata-se de um modelo robusto mesmo diante das simplificações propostas para ganho de tempo computacional. Através da comprovada correlação com os dados experimentais o modelo apresentou diversas possibilidades de análises que contribuem para um melhor entendimento do evento de impacto. Além de possibilitar uma análise detalhada do compósito em relação as tensões e energias envolvidas no evento de impacto, uma outra possibilidade reside no fato de verificar somente a influência do Fio de NiTi que foi inserido no compósito em relação as tensões e energias envolvidas no evento. Sendo assim o modelo de simulação numérica não-linear proposto por este trabalho é uma promissora ferramenta para previsibilidade do comportamento de placas de material compósito com fios de NiTi visando ganho em absorção de energia em eventos de impacto.

Como sugestões para trabalhos futuros:

- Avaliar através de simulação numérica não-linear as respostas para um planejamento de experimento do tipo superfície de resposta, e posteriormente utilizar técnicas de otimização para encontrar a melhor configuração para absorção de energia ao impacto.
- Avaliar através de simulação numérica não-linear as respostas para um planejamento de experimento do tipo superfície de resposta, para outros *Smart Materials* incluindo mudança de fase e hiperelasticidade e posteriormente utilizar técnicas de otimização para encontrar a melhor configuração para absorção de energia ao impacto.

- Avaliar através de simulação numérica não-linear as respostas para um outro tipo de ensaio de impacto com outras energias e outros tipos de falha como *Bird Strike* ou *Automotive Crash Test*.
- Avaliar a utilização de outros tipos fibras, matrizes e *Smart Materials* como por exemplo magnetoreológicos e eletroreológicos para aumentar a absorção de energia ao impacto.
- Avaliar a influência da variação de temperatura no comportamento das ligas de memória de forma inseridas no compósito.
- Avaliar a influência das ligas de memória de forma inseridas no compósito como resposta a compressão pós impacto.

# Referências Bibliográficas

- [1] DI BENEDETTO, R.M. Estudo da absorção de energia no impacto e pós-compressão do compósito commingled fibra de carbono/poliamida 6 por um modelo de regressão múltipla . Tese Doutorado em materiais para engenharia - Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, p 127. 2019.
- [2] GARNER, D.M.; ADAMS D.O. Test methods for composites crashworthiness: A review. *J Adv Mater.* v. 40, n. 4. p. 5-26, 2008.
- [3] THORNTON, P.H. Energy absorption in composite structures. *Compos Mater.* v. 13, n. 1, 1979.
- [4] WEI, Z.G; SANDSTROM, R; MIYAZAKI S. Review Shape-memory materials and hybrid composites for smart systems Part I Shape-memory materials, *J. Mater. Sci.* v. 33, p. 3743-3762, 1998.
- [5] WEI, Z.G; SANDSTROM, R; MIYAZAKI S. Review Shape memory materials and hybrid composites for smart systems Part II Shape-memory hybrid composites, *J. Mater. Sci.* v. 33, p. 3763-3783, 1998.
- [6] TSOI, K.A; STLMANS, R; SCHROOTEN, J. Transformational behavior of constrained shape memory alloys, *Acta Mater.* v. 50, p. 3535-3544, 2002.
- [7] DESROCHES, R; MCCORMICK, J; DELEMONT, M. Cyclic properties of superelastic shape memory alloy wires and bars, *J. Struct. Eng.* v. 130, p. 38-46, 2004.
- [8] MICHAUD, V. Can shape memory alloy composites be smart? *Scripta Mater.* v.50, p. 249-253, 2004.

- [9] ASTM D7136/D7136M. Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event. 2015.
- [10] STRONG, A.B. Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications. p. 683, Second Edition, 2008.
- [11] ANCELOTTI JUNIOR, A.C. Efeitos da porosidade na resistência ao cisalhamento e nas propriedades dinâmicas de compósitos de fibra de carbono/resina epoxi. [s.l.] Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2006.
- [12] KAW, A.K. Mechanics of Composite Materials. Second Edition, p.473, 2006.
- [13] ATAFF, B. Ecodesign Criteria for Composite Materials and Products. Journal of Fundamental and Applied Sciences, v. 5, n. 1, p. 68-80, 2013.
- [14] PARDINI, L.C. Preformas para compósitos estruturais. Polímeros: Ciência e Tecnologia, v. 10, n. 2, p. 100-109, 2000.
- [15] CHAWLA, K.K. Composite Materials: Science and Engineering. Springer Science and Business Media; 1998.
- [16] BUEHLER, W.J; GILFRICH, J.V; WILEY, R.C. Effect of low-temperature phase changes on the mechanical properties of alloys near composition TiNi, J. Appl. Phys. v.34, p. 1475-1477, 1963.
- [17] SUN, L.; et al. Stimulus-responsive shape memory materials: a review. Mater. Des. n.33, 577-640, 2012.
- [18] ASHBY, M.F.; BRÉCHET, Y.J.M. Designing hybrid materials. Acta Mater. n.53, 5801-5821, 2003)
- [19] FIRSTOV, G.S., VAN HUMBEECK, J.; KOVAL, Y.N. High temperature shape memory alloys problems and prospects. J. Intell. Mater. Syst. Struct. n.17, p.1041, 2006.

- [20] MA, J.; KARAMAN, I.; NOEBE, R.D. Medical applications of shape memory alloys. *Int. Mater. Rev.* 55, 257-315, 2010.
- [21] KARACA, H.; et al. Magnetic field-induced phase transformation in NiMnCoIn magnetic shape-memory alloys? a new actuation mechanism with large work output. *Adv. Funct. Mater.* n.19, p.983-998, 2009.
- [22] PONS, J.; et al. Ferromagnetic shape memory alloys: alternatives to Ni-MnGa. *Mater. Sci. Eng. A* n.481-482, p.57-65, 2008.
- [23] LENG, J.; LAN, X.; LIU, Y.; DU, S. Shape-memory polymers and their composites: stimulus methods and applications. *Prog. Mater. Sci.* n.56, p.1077-1135, 2011.
- [24] RATNA, D.; KARGER-KOCSIS, J. Recent advances in shape memory polymers and composites: a review. *J. Mater. Sci.* n.43, p.254-269, 2008.
- [25] ROGERS, C.A., ROBERTSHAW, H.H.: Development of a novel smart material. In: *Proceedings of the 1988 Winter Annual Meeting of the American Society of Mechanical Engineers*, p. 1-5, 1988.
- [26] CHANG, L.C; READ, T. A. Plastic deformation and diffusionless phase changes in metals and the gold-cadmium beta phase, *Trans. AIME.* v. 189, p. 47-52, 1951.
- [27] LESTER, B.T; BAXEVANIS, T; CHEMISKY, Y; LAGOUDAS, D.C. Review and perspectives: shape memory alloy composite systems, *Acta Mech.* v. 226, p. 3907-3960, 2015.
- [28] LIANG, C.; JIA, J.; ROGERS, C.A. Behavior of shape memory alloy reinforced composite plates part II: results. In: *Proceedings of the 30th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ACS Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, vol. 1331, p. 1504-1513, 1989.
- [29] ROGERS, C.A., BAIKER, D.K.: Experimental studies of active strain energy tuning of adaptive composites. In: *Proceedings of the 31st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, p. 2234-2241, 1990.



- [30] ROGERS, C.A., LIANG, C., JIA, J.: Behavior of shape memory alloy reinforced composite plates part I: model formulations and control concepts. In: Proceedings of the 30th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, p. 2011-2017, 1989.
- [31] BAZ, A.; POH, S.; RO, J.; Gilheany, J. Control of the natural frequencies of NiTiNOL-reinforced composite beams. *J. Sound Vib.* n.185, p. 171-185, 1995.
- [32] BAZ, A.; RO, J. Thermo-dynamic characteristics of NITINOL reinforced composite beams. *Compos. Eng.* n.2, p. 527-542, 1992.
- [33] BAZ, A.; RO, J. Torsional stiffness of NiTiNOL-reinforced composite drive shafts. *Compos. Eng.* n.3, p. 1119-1130, 1993.
- [34] YAMADA, Y.; TAYA, M.; WATANABE, R.: Strengthening of metal matrix composite by shape memory effect. *Mater. Trans. JIM Vol. 34*, n.3, p. 5083-5091, 1993.
- [35] ARMSTRONG, W.D.; KINO, H. Martensitic transformations in a NiTi fiber reinforced 6061 aluminum matrix composite. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* n.6, p. 809-816, 1995.
- [36] PAINE, J.S.N., ROGERS, C.A., SMITH, R.A.: Adaptive composite materials with shape memory alloy actuators for cylinders and pressure vessels. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* n.6, p. 210-219, 1995.
- [37] AURREKOETXEA, J.; et al. Effect of super elastic shape memory alloy wires on the impact behavior of carbon fiber reinforced in situ polymerized poly(butylene terephthalate) composites. *Mater. Lett.* n.65, p.863-865, 2011.
- [38] ARAÚJO, C.J.; et al. Fabrication and static characterization of carbon fiber-reinforced polymers with embedded NiTi shape memory wire actuators. *Smart Mater. Struct.* n. 17, 2008.

- [39] JANG, B.K.; KISHI, T. Influence of stacking angle of carbon fibers on fracture behavior of TiNi fiber impregnated CFRP composites. *J. Alloys Compd.* n.49, p.208-212, 2006.
- [40] PAPPADÀ, S., et al. Embedding of superplastic SMA wires into composite structures: evaluation of impact properties. *J. Mater. Eng. Perform.* n.18, p.522-630, 2009.
- [41] ZHOU, G.; LLOYD, P. Design, manufacture and evaluation of bending behavior of composite beams embedded with SMA wires. *Compos. Sci. Technol.* n.69, p.2034-2041, 2009.
- [42] PINTO, F.; MEO, M. Mechanical response of shape memory alloy-based hybrid composite subjected to low-velocity impacts. *J. Compos. Mater.* n. 22, p. 2713-2722, 2015.
- [43] KHALILI, S.M.R.; SHIRAVI, M.; NOORAMIN, A.S. Mechanical behavior of notched plate repaired with polymer composite and smart patches?experimental study. *J. Reinf. Plastics Compos.* n.29, p.3021-3037, 2010.
- [44] BOLLAS, D.; et al. Stress generation by shape memory alloy wires embedded in polymer composites. *Acta Mater.* n.55, p.5489-5499, 2007.
- [45] TRIANTAFYLLOU, G.; PSARRAS, G.C. Probing the reverse martensitic transformation in constrained shape memory alloys via electrical resistance. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* n.21, p.975-981, 2010.
- [46] ZHENG, Y.; CUI, L.; SCHROOTEN, J. Thermal cycling behaviors of a NiTiCu wire reinforced Kevlar/epoxy composite. *Mater. Lett.* n.59, p.3287-3290, 2005.
- [47] ZHENG, Y.J.; CUI, L.S.; SCHROOTEN, J. Basic design guidelines for SMA/epoxy smart composites. *Mater. Sci. Eng. A* n.390, p.139-143, 2005.
- [48] KANG, K.W.; KIM, J.K. Effect of shape memory alloy on impact damage behavior and residual properties of glass/epoxy laminates under low temperature. *Compos. Struct.* n.88, p.455-460, 2009.

- [49] PAPPADÀ, S.; et al. Mechanical and vibration characteristics of laminated composite plates embedding shape memory alloy superplastic wires. *J. Mater. Eng. Perform.* n.18, p.531-664, 2009.
- [50] FAIELLA, G.; et al. Fabrication and thermo-mechanical characterization of a shape memory alloy hybrid composite. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* n.22, p.245-252, 2011.
- [51] SOFOCLEOUS, K.; et al. Controlled impact testing of woven fabric composites with and without reinforcing shape-memory alloy wires. *J. Compos. Mater.* n.48, p.3799-3813, 2014.
- [52] TAHERI-BEHROOZ, F.; TAHERI, F.; HOSSEINZADEH, R. Characterization of a shape memory alloy hybrid composite subject to static loading. *Mater. Des.* n.32, p.2923-2933, 2011.
- [53] DAVIS, B., TURNER, T.L., SEELECKE, S.: Measurement and prediction of the thermomechanical response of shape memory alloy hybrid composite beams. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* n.19, p.129-143, 2008.
- [54] PAINE, J.S.N; ROGERS, C.A, The response of SMA hybrid composite materials to low velocity impact, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* v.5, p. 530-535, 1994.
- [55] BIRMAN, V; K. Chandrashekhara, S. Sain, An approach to optimization of shape memory alloy hybrid composite plates subjected to low-velocity impact, *Compos. Part B Eng.* v. 27, p. 439-446, 1996.
- [56] BIRMAN, V. Review of mechanics of shape memory alloy structures, *Appl. Mech. Rev.* v.50, p. 629-645 1997.
- [57] PAPPADA, S; et al. Mechanical and vibration characteristics of laminated composite plates embedding shape memory alloy superelastic wires, *J. Mater. Eng. Perform.* v. 18, p. 531-537, 2009.

- [58] PAPPADA, S; RAMETTA, R; LARGO, A; MAFFEZZOLI, A. Low-velocity impact response in composite plates embedding shape memory alloy wires, *Polym. Compos.* v. 33 p. 655-664, 2012.
- [59] AURREKOETXEA, J; et al, Effect of superelastic shape memory alloy wires on the impact behavior of carbon fiber reinforced in situ polymerized poly(butylene terephthalate) composites, *Mater. Lett.* v. 65, p. 863-865, 2011.
- [60] KANG, K.W; KIM, J.K. Effect of shape memory alloy on impact damage behavior and residual properties of glass/epoxy laminates under low temperature, *Compos. Struct.* v. 88, p. 455-460, 2009.
- [61] LAU, K; LING, H; ZHOU, L. Low velocity impact on shape memory alloy stitched composite plates, *Smart Mater. Struct.* v. 13, p. 364-370. 2004.
- [62] VACHON, P.L; BRAILOVSKI, V; TERRIAULT, P. Suppression of delamination propagation in carbon/epoxy laminates by the use of superelastic stitching wires: preliminary results, *Eight Jt. Canada-Japan Work. Composites*, 2010.
- [63] VILAR, Z. T., ARAUJO, C. J. de; SANTOS, A. G. dos. Dynamic-mechanical properties study of an aeronautical CFRP composite with embedded shape memory alloy wires. *Polímeros* vol.26 no.spe, São Carlos, 2016.
- [64] MONTGOMERY, D. C. *Designs and Analysis of Experiments*. 7 ed. John Wiley E Sons, 2009.
- [65] ILZARBE, L; et al. Practical applications of design of experiments in the field of engineering: a bibliographical review. *Quality and Reliability Engineering International*, v. 24, p. 417-428, 2008.
- [66] MONTGOMERY, D. C. *Design and analysis of experiments*. John wiley and sons. 2017.

- [67] GUO, W; HUA, L; MAO, H. Minimization of sink mark depth in injection-molded thermoplastic through design of experiments and genetic algorithm. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 72, n. 1-4, p. 365-375, 2014.
- [68] BEZERRA, M; et al. Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. *Talanta*, n. 76, p. 965-977, 2008.
- [69] BOX, George E. P. Exploration and Exploitation of Response Surfaces: Some General Considerations and Examples. *Biometrics*, v. 10, n. 1, p. 16-60, 1954.
- [70] BOX, George E. P.; DRAPER, Norman R. Response surfaces, mixtures, and ridge analyses. 2 ed. Hoboken: John Wiley and Sons, 2007.
- [71] BOX, G. E. P.; HUNTER, J. S. The 2k-p Fractional Factorial Designs Part. *Technometrics*, v.3, n. 3, p. 311-351, 1961.
- [72] BOX, G. E. P.; HUNTER, J. S.; HUNTER, W. G. *Statistics for Experimenters: Design, Innovation and Discovery*. 2 ed. New York: John Wiley and Sons, 2005.
- [73] JUNQUEIRA, D. M; et al. Design Optimization and Development of Tubular Isogrid Composites Tubes for Lower Limb Prosthesis. *Appl Compos Mater* n. 26, p. 273-297, 2019.
- [74] JUNQUEIRA, D. M; et al. Analysis of spot weld distribution in a weldment?numerical simulation and topology optimization. *Int J Adv Manuf Technol* n. 95, p. 4071-4079, 2018.
- [75] SILVEIRA, M. E.; FANCELLO, E. A. O uso de otimização numérica no projeto de blanks soldados. *Ciencia y Engenharia/ Science and Engineering Journal*, v. 24, n. 1, p. 9-19, 2015.
- [76] RUI, XU. et al.; 3D modeling of shape memory alloy fiber reinforced composites by multiscale finite element method. *Composite Structures*, v.200, p. 408-419, 2018.

- [77] BRINSON, L. C; LAMMERING, R. al.; Finite element analysis of the behavior of shape memory alloys and their applications, *Int Journal of Solids and Structures*, v. 30, n. 23, 1993.
- [78] CHO, H. K; RHEE, J.; Nonlinear finite element analysis of shape memory alloy (SMA) wire reinforced hybrid laminate composite shells, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, V. 47, n. 6, p. 672-678, 2012.
- [79] SINGH, K. K.; SINGH, N. K.; JHA R.; Analysis of symmetric and asymmetric glass fiber reinforced plastic laminates subjected to low-velocity impact. *Journal of Composite Materials*. v. 50, n. 40, p. 1853-1863, 2016.
- [80] CHANG, M.; et al.; A novel failure analysis of SMA reinforced composite plate based on a strain-rate-dependent model: low-high velocity impact, *Journal of Materials Research and Technology*, v. 8, n. 1, p. 812-826, 2019.
- [81] HEIMBS, S.; Computational methods for bird strike simulations: A review, *Computers e Structures*, v. 89, n. 23-24, p. 2093-2112, 2011.
- [82] BARBER J. P., et al.; Bird impact forces and pressures on rigid and compliant targets, DTIC Document, 1978.
- [83] LAVOIE, M. A., et al.; Birds substitute tests results and evaluation of available numerical methods, *International Journal of Impact Engineering*, v. 36, n. 10, p. 1276-1287, 2009.
- [84] JUNQUEIRA, D.M. Tubo para prótese de membro inferior utilizando estruturas de travessas rígidas. Dissertação de Mestrado Doutorado em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, p. 114. 2018.
- [85] ELOY, F. S; et al.; A numerical-experimental dynamic analysis of composite sandwich beam with magnetorheological elastomer honeycomb core, *Composite Structures*, v. 209, p. 242-257, 2019.

- [86] ZHU, L. Damage Resistance of Aircraft Wing Structure Using Low Cost Carbon Fibre Composite Materials. [s.l.] Cranfield University, 2010.