



DESCRIÇÃO DO COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO DE LIGAS
COMMEMÓRIA DE FORMA A PARTIR DO MODELO DE PREISACH

Thiago Queiroz Alvares

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Marcelo Amorim Savi

Rio de Janeiro

Maiode 2023

DESCRIÇÃO DO COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO DE LIGAS
COMMEMÓRIA DE FORMA A PARTIR DO MODELO DE PREISACH

Thiago Queiro Alvares

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA MECÂNICA.

Orientador: Marcelo Amorim Savi

Aprovada por: Prof. Marcelo Amorim Savi

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MAIO DE 2023

Alvares, Thiago Queiroz

Descrição do Comportamento Termomecânico de Ligas Com Memória de Forma a Partir do Modelo de Preisach/ Thiago Queiroz Alvares. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2023.

XXIII, 76 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Marcelo Amorim Savi

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Mecânica, 2023.

Referências Bibliográficas: p. 67-76.

1. Modelagem Constitutiva. 2. Ligas com Memória de Forma. 3. Modelo de Preisach. 4. Função de Everett. 5. Simulações Numéricas. I. Savi, Marcelo Amorim. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Mecânica. III. Título.

*Aos meus pais e meu irmão, por estarem sempre ao meu lado,
à minha esposa e meus filhos, por serem faróis no meu caminho.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus pela vida e a São José por me guiar nos momentos de incerteza.

Ao meu pai Sérgio, cuja palavra me orienta nas principais decisões da minha vida, e a minha mãe Ana Lúcia, por sempre me motivar. O apoio de vocês foi fundamental nessa jornada.

Agradeço também ao meu irmão por todo carinho e atenção mesmo estando distante.

Aos meus avós que, embora não estejam mais presentes, foram de extrema importância para a minha formação.

À minha esposa, Viviane, pelo apoio nos momentos em que eu pensei que não seria capaz e compreensão nos momentos de ausência e estresse.

Aos meus filhos, incentivo pelo qual eu queira sempre seguir em frente.

Ao meu amigo, Fabiano Aragão, que além dos desafios que a Marinha já nos proporcionou, compartilhamos mais essa jornada.

Ao meu orientador, professor Marcelo Savi, pela orientação e conselhos ao longo desse trabalho.

Ao professor e Capitão de Mar e Guerra (FN-RM1) Sérgio Oliveira meu especial agradecimento por me guiar ao longo de toda essa atividade de forma que eu superasse minhas dificuldades.

Agradeço também a todos os colegas do Mecanon, sobretudo ao amigo Vanderson pelo apoio para a execução experimental desse trabalho, ajuda na revisão e companhia nas horas do almoço.

Agradeço ainda à Marinha do Brasil pela oportunidade de realizar esse curso e principalmente ao Capitão de Corveta (EN) Sérgio Clume pelo incentivo nos momentos de adversidades.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

DESCRIÇÃO DO COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO DE LIGAS
COMMEMÓRIA DE FORMA A PARTIR DO MODELO DE PREISACH

Thiago Queiroz Alvares

Maio/2023

Orientador: Marcelo Amorim Savi

Programa: Engenharia Mecânica

Este trabalho tem como objetivo investigar a descrição do comportamento termomecânico das ligas com memória de forma a partir do modelo de Preisach clássico. O modelo de Preisach descreve uma histerese a partir de operadores retangulares em um espaço abstrato. Seu ajuste com dados experimentais pode ser feito através da construção da superfície de Everett. Testes experimentais são realizados para serem usados como referência. Inicialmente o trabalho estabelece uma verificação do modelo usando os resultados experimentais da pseudoelasticidade. Depois, outras características são investigadas utilizando dados disponíveis na literatura. Os resultados mostram que as respostas do modelo estão de acordo com os dados experimentais. Desta forma, o modelo de Preisach se mostrou ser uma aproximação interessante para descrever o comportamento termomecânico das ligas com memória de forma podendo servir como base para diversas aplicações.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

DESCRIPTION OF THE THERMOMECHANICAL BEHAVIOR OF SHAPE
MEMORY ALLOYS BASED ON THE PREISACH MODEL

Thiago Queiroz Alvares

May/2023

Advisor: Marcelo Amorim Savi

Department: Mechanical Engineering

This work aims to investigate the description of the thermomechanical behavior of shape memory alloys, based on the classic Preisach model. The Preisach model describes a hysteresis based on rectangular operators in an abstract space. Its fit with experimental data can be done by constructing the Everett surface. Experimental tests are performed to be used as a reference. At first, this work establishes a verification of the model using the experimental results of pseudoelasticity. Afterwards, other characteristics are investigated using data available in the literature. The results show that the model responses are in agreement with the experimental data. In this way, the Preisach model proved to be an interesting approach to describe the thermomechanical behavior of shape memory alloys and can serve as a basis for several applications.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA	6
2.1	Pseudoelasticidade	8
2.2	Transformação de fase devido a variação de temperatura.....	9
2.3	Efeito Memória de Forma.....	10
2.4	Efeito Memória de Forma de Duas Vias	11
2.5	Sublaços	12
2.6	Assimetria Tensão-compressão	13
2.7	Aplicações.....	14
3	ANÁLISE EXPERIMENTAL	24
3.1	Caracterização do Material	25
3.2	Testes Cíclicos	28
4	MODELO MATEMÁTICO.....	30
4.1	Modelo de Preisach.....	30
4.1.1	Interpretação Geométrica	32
4.2	Função de Everett	39
5	SIMULAÇÕES NUMÉRICAS	44
5.1	Superfície de Everett.....	44
5.2	Testes Pseudoelásticos.....	52
5.3	Curvas Temperatura-deformação	56
5.4	Assimetria Tensão-compressão	62
5.5	Mola Helicoidal	Erro! Indicador não definido.
6	CONCLUSÕES	65
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 2.1: Curva obtida em um teste DSC para uma liga de NiTi (DORNELAS, 2020a).</i>	8
<i>Figura 2.2: Comportamento pseudoelástico de uma SMA (DORNELAS, 2020a).</i>	9
<i>Figura 2.3: Transformação de fase devido à mudança de temperatura (DORNELLAS, 2020a).</i>	10
<i>Figura 2.4: Efeito Memória de Forma em uma SMA (DORNELAS, 2020a).</i>	11
<i>Figura 2.5: Efeito Memória de Forma de Duas Vias.</i>	12
<i>Figura 2.6: Sublaço ABC em um diagrama deformação-temperatura.</i>	13
<i>Figura 2.7: Assimetria tensão-deformação. (a) Tração. (b) Compressão. Adaptado de GALL et al. (2001).</i>	14
<i>Figura 2.8: Expansão de um filtro Simon. Adaptado de MACHADO & SAVI (2003).</i>	15
<i>Figura 2.9: Miocárdio artificial que utiliza fibras feitas a partir de fios de SMA. Adaptado de KHULIEF (2020).</i>	15
<i>Figura 2.10: Prótese de perna que utiliza fios de SMA como articulação. Adaptado de KHULIEF (2020).</i>	16
<i>Figura 2.11: Regiões do corpo humano com potencial de utilização de dispositivos de SMA. Adaptado de JANI et al. (2014).</i>	16
<i>Figura 2.12: Pneu desenvolvido a partir de fios pseudoelásticos para aplicações aeroespaciais. Adaptado de NASA (2017).</i>	17
<i>Figura 2.13: Regiões com potencial de emprego de materiais de SMA na indústria aeronáutica. Adaptado de JANI et al. (2014).</i>	18
<i>Figura 2.14: Hidrofólio acionado por fios de SMA. Adaptado de REIDINIOTIS et al. (2002).</i>	19
<i>Figura 2.15: Robô voador dotado de atuadores de SMA, JANI et al. (2014).</i>	19
<i>Figura 2.16: Dispositivo para proteção sísmica de edificações. Adaptado de SPEICHER et al. (2009).</i>	20
<i>Figura 2.17: Configuração do dispositivo TVA para utilização em plataformas de petróleo. Adaptado de GHASEMI et al. (2019).</i>	21
<i>Figura 2.18: Amortecedor VG – SMA composto de barras de SMA de três tipos. Adaptado de GHASEMI et al. (2019).</i>	21

<i>Figura 2.19: Aplicação de SMAs na suspensão de veículos blindados. Adaptado de BAE Systems (2023).</i>	22
<i>Figura 2.20: Dispositivo de admissão de ar da aeronave F-15 da Marinha Norte-Americana, PITT et al, (2001).</i>	23
<i>Figura 3.1: Calorímetro diferencial de varredura - DSC 200 F3 Maia.</i>	24
<i>Figura 3.2: Sistema eletromecânico Instron 5882. No detalhe, montagem do corpo de prova.</i>	25
<i>Figura 3.3: Temperaturas de transformação de fase obtidas através do calorímetro diferencial de varredura (DSC) e verificação macroscópica através de curvas tensão-deformação. (a) Curva DSC; (b) Efeito memória de forma, baixa temperatura; (c) Pseudoelasticidade, temperatura ambiente.</i>	26
<i>Figura 3.4: Ensaio de tração quasi-estático de um fio de NiTi pseudoelástico. (a) Resposta tensão-deformação cíclica apresentando 50 ciclos; (b) Estabilização da deformação TRIP ao longo dos ciclos; (c) Parâmetros funcionais avaliados para o último ciclo.</i>	27
<i>Figura 3.5: Ensaio de tração quasi-estático de um fio de NiTi pseudoelástico com taxa de deformação de 0,5%/min. (a) Histórico de carregamento; (b) Curva tensão-deformação.</i>	28
<i>Figura 3.6: Ensaio de tração quasi-estático de um fio de NiTi pseudoelástico com taxa de deformação de 0,5%/min. (a) Histórico de carregamento; (b) Curva tensão-deformação considerando dois sublaços.</i>	29
<i>Figura 3.7: Ensaio de tração quasi-estático de um fio de NiTi pseudoelástico com taxa de deformação de 1%/min. (a) Histórico de carregamento; (b) Curva tensão-deformação considerando um sublaço.</i>	29
<i>Figura 4.1: Definição do operador de histerese de Preisach.</i>	30
<i>Figura 4.2: Estrutura da aplicação do modelo constitutivo obtido a partir do modelo de Preisach.</i>	32
<i>Figura 4.3: Triângulo de Preisach e histerese associada.</i>	32
<i>Figura 4.4: Correspondência entre a evolução no triângulo de Preisach e histerese associada no instante t_0.</i>	33
<i>Figura 4.5: Correspondência entre a evolução no triângulo de Preisach e histerese associada no instante t_1.</i>	34

<i>Figura 4.6: Correspondência entre a evolução no triângulo de Preisach e histerese associada no instante t_2.</i>	35
<i>Figura 4.7: Correspondência entre a evolução no triângulo de Preisach e histerese associada para valores arbitrados de ϵt.</i>	36
<i>Figura 4.8: Coordenadas dos trapézios formados na linha de fronteira. Caso em que a última alteração n de ϵt é um valor na coordenada α.</i>	37
<i>Figura 4.9: Coordenadas dos trapézios formados na linha de fronteira. Caso em que a última alteração n de ϵt é um valor na coordenada β.</i>	38
<i>Figura 4.10: Função de Everett. (a) Exemplo de uma função (ou superfície) de Everett. (b) Exemplo da dispersão de pontos sobre o triângulo de Preisach. (c) Exemplo da interpolação através dos pontos da dispersão para se obter a função de Everett.</i>	40
<i>Figura 4.11: Divisão do espaço tensão-deformação contendo o laço externo em duas regiões.</i>	41
<i>Figura 4.12: Malha no Plano de Preisach correspondente a duas regiões do espaço tensão-deformação.</i>	42
<i>Figura 4.13: Função de Everett obtida por interpolação bidimensional linear a partir dos dados da Tabela 4.4.</i>	43
<i>Figura 5.1: (a) Divisão do espaço tensão-deformação contendo o laço externo em quatro regiões. (b) Espaço de Preisach correspondente.</i>	45
<i>Figura 5.2: Resultado para a divisão do espaço tensão-deformação em quatro regiões. (a) Função de Everett. (b) Comparação numérico-experimental do laço externo.</i>	46
<i>Figura 5.3: (a) Divisão do espaço tensão-deformação contendo o laço externo em nove regiões. (b) Triângulo de Preisach correspondente.</i>	46
<i>Figura 5.4: Resultado para a divisão do espaço tensão-deformação em nove regiões. (a) Função de Everett. (b) Comparativo numérico-experimental.</i>	48
<i>Figura 5.5: (a) Divisão do espaço tensão-deformação contendo o laço externo e um sublaço em seis regiões. (b) Espaço de Preisach associado.</i>	49
<i>Figura 5.6: Resultado para a divisão do espaço tensão-deformação contendo o laço externo e um sublaço em seis regiões. (a) Função de Everett. (b) Comparativo numérico-experimental.</i>	50
<i>Figura 5.7: (a) Divisão do espaço tensão-deformação contendo o laço externo e um sublaço em nove regiões. (b) Espaço de Preisach associado.</i>	51

<i>Figura 5.8: Resultado para a divisão do espaço tensão-deformação contendo o laço externo e um sublaço em nove regiões. (a) Função de Everett. (b) Comparativo numérico-experimental.</i>	52
<i>Figura 5.9: Comportamento pseudoelástico de um fio de NiTi durante ensaios de tração, taxa de deformação de 0,5%/min. (a) Resultado experimental; (b) Superfície de Everett; (c) Resultado numérico</i>	53
<i>Figura 5.10: Comportamento pseudoelástico de um fio de NiTi durante ensaios de tração. Comparativo numérico-experimental para diferentes ciclos, taxa de deformação de 0,5%/min. (a) ciclo 2; (b) ciclo 4; (c) ciclo 6; (d) ciclo 9.</i>	54
<i>Figura 5.11: Comportamento pseudoelástico de um fio de NiTi durante ensaios de tração, taxa de deformação de 1%/min. (a) resultado experimental; (b) resultado numérico; (c) Comparativo numérico-experimental.</i>	55
<i>Figura 5.12: Comportamento pseudoelástico de um fio de NiTi durante ensaios de tração, taxa de deformação de 0,5%/min. (a) resultado experimental; (b) resultado numérico obtido pelo modelo constitutivo; (c) Comparativo numérico-experimental.</i> .	56
<i>Figura 5.13: Ensaio cíclico térmico sob carga uniaxial constante, baseado no ensaio experimental proposto por XIAOYU QUIN et al. (2019). (a) Dados experimentais; (b) Triângulo de Preisach associado.</i>	57
<i>Figura 5.14:(a) Superfície de Everett associada ao ensaio experimental proposto por XIAOYU QUIN et al. (2019). (b) Comparativo numérico-experimental.</i>	58
<i>Figura 5.18: Ensaio proposto por SAVI et al. (2015). (a) Resultado experimental para o ciclo externo do comportamento pseudoelástico de uma mola “S”. (b) Triângulo de Preisach associado.</i>	59
<i>Figura 5.19: Superfície de Everett associada ao ensaio experimental proposto por SAVI et al. (2015). (b) Comparativo numérico-experimental.</i>	60
<i>Figura 5.20: Ensaio realizado por KHAN E LAGOUDAS (2002). (a) resultado experimental. (b) Triângulo de Preisach associado.</i>	61
<i>Figura 5.21: Superfície de Everett associada ao ensaio experimental proposto por KHAN E LAGOUDAS (2002).</i>	61
<i>Figura 5.22: Comparativo numérico-experimental baseado no teste experimental de KHAN E LAGOUDAS (2002). (a) comparativo numérico-experimental com doze ciclos; (b) comparativo numérico-experimental apenas do laço externo para facilitar a visualização do comparativo proposto.</i>	62

<i>Figura 5.15: Ensaio proposto por SPEICHER et al. (2009). (a) Resultado experimental para os ciclos externos de tração e compressão; (b) Triângulo de Preisach associado. O índice T indica tração e o índice C indica compressão.....</i>	63
<i>Figura 5.16: Superfície de Everett baseada no ensaio experimental proposto por SPEICHER et al. (2009). (a) Vista superior. (b) Vista inferior.</i>	64
<i>Figura 5.17: Comparativo numérico-experimental baseado no teste de SPEICHER et al. (2009).</i>	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Pontos experimentais a serem utilizados no modelo.....	41
Tabela 4.2: Determinação da matriz $H_{\alpha\beta}$	42
Tabela 4.3: Resultado para $H_{\alpha\beta}$	43
Tabela 4.4: Pontos em relação aos quais a função de Everett será interpolada.....	43
Tabela 5.1: Pontos experimentais a serem utilizados no modelo.....	45
Tabela 5.2: Pontos experimentais a serem utilizados no modelo.....	47
Tabela 5.3: Pontos experimentais a serem utilizados no modelo.....	49
Tabela 5.4: Pontos experimentais a serem utilizados no modelo.....	51

LISTA DE SÍMBOLOS

A_f	Temperatura de término da transformação de fase austenita
A_s	Temperatura de início da transformação de fase austenita
M_f	Temperatura de término da transformação de fase martensita
M_s	Temperatura de início da transformação de fase martensita
d	Deslocamento
F	Função de Everett
E^A	Módulo de elasticidade da fase austenita
E^M	Módulo de elasticidade da fase martensita
f	Estado de magnetização de um material
f^{SMA}	Força de restituição de um elemento de SMA
$H_{\alpha\beta}$	Tensor de tensões
N, n, k	Números naturais
\mathfrak{R}^3	Espaço vetorial tridimensional
T	Temperatura
T_f	Temperatura final
T_i	Temperatura inicial
t	Tempo
u	Variável de comutação do estado magnético
α	Parâmetro do modelo de Preisach
β	Parâmetro do modelo de Preisach
$\hat{Y}_{\alpha\beta}$	Operador de Histerese de Preisach
ε	Deformação
$\dot{\varepsilon}$	Taxa de variação da deformação
ε_i	Deformação inicial
ε_f	Deformação final
ε_{iT}	Deformação inicial da tração
ε_{fT}	Deformação final da tração
ε_{iC}	Deformação inicial da compressão
ε_{fC}	Deformação final da compressão
ε_{ij}	Tensor de Deformações
μ	Função de Preisach
σ	Tensão

σ^{As}	Tensão crítica de início da transformação de fase austenítica
σ^{Af}	Tensão crítica de término da transformação de fase austenítica
σ^{MS}	Tensão crítica de início da transformação de fase martensítica
σ^{Mf}	Tensão crítica de término da transformação de fase martensítica
σ_{ij}	Tensor de tensões

1 INTRODUÇÃO

Os materiais inteligentes ou adaptativos têm sido o foco de diversas investigações na literatura. Esses materiais apresentam como principal característica um comportamento adaptativo ao ambiente em que estão inseridos graças ao acoplamento entre dois ou mais domínios físicos, como por exemplo, mecânico, térmico, elétrico e magnético. Diversos autores elaboraram trabalhos explicando as principais características dos materiais inteligentes e suas aplicações, destacando-se ENGD AHL (2000), SCHWARTZ (2002), SMITH (2005), LEO (2007), OLIVEIRA & SAVI (2013) e DE SOUZA (2018).

Uma das formas de classificaresses materiais é a partir dos campos físicos acoplados. Nesse sentido, destacam-se os materiais piezoelétricos (acoplamento eletromecânico), os magnetostrictivos (acoplamento magneto-mecânico), os eletrocromicos (acoplamento ótico-elétrico), os fluidos magnetorreológicos (acoplamento magneto-mecânico), as ligas ferromagnéticas (acoplamento termo-magnético), os polímeros com memória de forma (acoplamento termomecânico) e, as ligas com memória de forma (SMAs – *Shape Memory Alloys*), que são exploradas ao longo deste trabalho, onde também é observado um acoplamento termomecânico.

As SMAs possuem propriedades notáveis de comportamentos termomecânicos complexos incluindo o efeito memória de forma, a pseudoelasticidade, as transformações de fase devido à mudança de temperatura, a assimetria tensão-compressão e os sublaços devidos à transformação de fase incompleta. Essas propriedades estão relacionadas com às transformações de fase martensíticas que ocorrem sem difusão (LAGOUDAS, 2008), permitindo que sejam utilizadas em aplicações nas mais diversas áreas como por exemplo, automotiva, naval, estruturas civis, biomédica, robótica, óleo & gás e aeroespacial, existindo uma vasta literatura a respeito: MACHADO & SAVI (2003), ISALGUE *et al.* (2006), JANI *et al.* (2013), CHANG & ARAKI (2016), NEMATOLLAHI *et al.* (2019), SHREEKRISHNA *et al.* (2022) e NAIR & NACHIMUTHU (2022).

O desenvolvimento de dispositivos que utilizam SMAs deve estar relacionado com a modelagem adequada desses materiais. Uma revisão geral dos principais modelos para descrever o comportamento termomecânico das SMAs é apresentada nos trabalhos

propostos por PAIVA&SAVI(2006), KHANDELWAL & BURAVALLA(2009), JANI *et al.* (2013), CISSE *et al.* (2015), e CHOWDHURY (2018). A análise da literatura mostra uma grande variedade de modelos disponíveis para a descrição no contexto unidimensional, destacando-se os trabalhos propostos por FALK (1980, 1983), TANAKA (1986), BRINSON (1993), AURICCHIO & SACCO (1997), SAVI *et al.* (2002a), PAIVA *et al.* (2005) e ADEODATO *et al.* (2022). No contexto tridimensional, ressaltam-se os trabalhos desenvolvidos por FREMOND & MIYAZAKI (1996), SOUZA *et al.* (1998), BROCCA *et al.* (2002), AURICCHIO & PETRINI (2004), PANICO & BRINSON (2007), POPOV & LAGOUDAS (2007), AURICCHIO *et al.* (2007), ARGHAVANI *et al.* (2010), OLIVEIRA *et al.* (2010,2016), CHEMISKY *et al.* (2018), PHILLIPS *et al.* (2019) e DORNELAS (2020b, 2021).

A descrição do comportamento termomecânico das SMAs é complexa devido aos diferentes fenômenos envolvidos e uma descrição adequada da histerese é a principal dificuldade nesse tipo de descrição. A literatura apresenta modelos gerais para descrever o comportamento histerético associado a diferentes fenômenos físicos. A histerese magnética foi descrita a partir dos modelos de Preisach e de Duhem-Madelung. O modelo de Preisach descreve a resposta do material considerando dois estados fixos, que representam o tipo de transformação que ocorre. De outra forma, o modelo de Duhem-Madelung caracteriza a histerese através de equações diferenciais, considerando dois operadores diferenciais que representam o carregamento e a retirada do carregamento do material. Além desses modelos, outros modelos são encontrados na literatura para descrever a histerese de materiais inteligentes, sendo possível citar os modelos de Prandtl-Ishlinskii e o de Krasnosel'skii-Pokrovkii. Esses modelos também foram investigados em diversas pesquisas, como os trabalhos de KUHNEN (2003), AL JANAIDEH *et al.* (2008, 2009), e ZAKERZADEH & SAYYAADI (2012).

O modelo de Preisach tem sua origem no trabalho publicado na década de 1930 por F. Preisach (PREISACH, 1935), onde foram estabelecidas hipóteses sobre os mecanismos de magnetização, descrevendo a histerese. Desta forma, essa abordagem manteve-se conhecida principalmente na área de magnetismo, onde tem sido objeto de inúmeras pesquisas.

BENABOU (2002) estudou a modelagem numérica da histerese de materiais ferromagnéticos nos regimes estático e dinâmico. No caso estático, foi realizada uma comparação entre os modelos de Preisach e Jiles-Atherton. Dentre os três materiais

estudados (chapa de liga de ferro-silício, ferrita e pó de ferro) o modelo de Preisach apresentou melhor precisão no terceiro. O autor apresentou também de forma detalhada a implementação desse modelo a partir de dados experimentais.

DEL HOYO(2005) realizou um intenso estudo sobre a modelagem da histerese magnética utilizando ferramentas numéricas com o objetivo de levar em consideração o efeito da histerese na determinação da distribuição do campo magnético nos núcleos ferromagnéticos das máquinas elétricas. Foi realizada uma comparação entre os diversos modelos de histerese, suas propriedades e implementações numéricas, sendo escolhido como mais apropriado o modelo de Preisach. Além de apresentar a implementação desse modelo nas formas clássica e dinâmica, foi proposta uma forma inversa para aplicação em controle.

O modelo de Preisach se popularizou, sendo usado para descrever diferentes tipos de histerese (WANG *et al.*, 2007).KRASNOSELSKII (1989) identificou que esse modelo possui uma concepção matemática que pode ser dissociado comportamento magnético, podendo ser apresentada de forma puramente matemática. Assim, o modelo passa a apresentar uma abordagem generalista que considera operadores retangulares em um espaço abstrato.

O modelo de Preisach tem sido empregado para a descrição dos materiais inteligentes, incluindo os materiais piezoelétricos (SONG *et al.*, 2005; DONG *et al.*, 2014; XUE *et al.*, 2017); e os materiais magnetostrictivos (ADLY *et al.*,1991;DAVINO *et al.*, 2004;LI *et al.*, 2014;TRAPANESE *et al.*,2014).

A histerese das SMAs também tem sido descrita a partir do modelo de Preisach. SMITH (2005) apresenta uma discussão sobre os principais pontos relacionados a utilização dele para a modelagem das SMAs. HUGHES & WEN(1994) enumeraram os mecanismos microestruturais que promovem a histerese nas SMAs (efeitos dissipativos associados aos processos de mudança de fase e defeitos nas interfaces dos cristais) e nos materiais piezoelétricos, identificando as similaridades destes mecanismos com os que são a origem da histerese nos materiais ferromagnéticos. Assim, os autores sugeriram que o modelo de Preisach é apropriado para capturar os efeitos de histerese nesses materiais. Através de simulações numéricas, os autores obtiveram uma boa aproximação para a histerese dos materiais piezoelétricos e uma aproximação com erros mais elevados para as SMAs. Identificou-se que este último caso ocorreu não por deficiência do modelo e sim por limitações nas instalações para obtenção dos dados experimentais.

MAYERGOYZ (2003) desenvolveu uma implementação do modelo de Preisach a partir de funções de Everett, uma superfície no \mathcal{R}^3 que se correlaciona ao triângulo de Preisach, e que pode ser construída a partir de dados experimentais. Essa implementação facilita a implementação do modelo, eliminando algumas das dificuldades da abordagem original (TAKAHASHI, 1999, AMOR, 2000, REIMERS, 2001).

KHAN & LAGOUDAS (2002) aplicaram o modelo de Preisach, utilizando a abordagem de MAYERGOYZ (2003), para a modelagem do comportamento pseudoelástico de uma SMA. O modelo foi utilizado em simulações numéricas a fim de prever o comportamento de um sistema dinâmico que possui molas de SMA como absorvedores de vibração. A implementação capturou satisfatoriamente o regime pseudoelástico, apresentando boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais. Uma característica que o estudo deixa evidente é a simplificação computacional que o modelo permite para a análise dinâmica do sistema, principalmente quando se trata de um sistema com vários dispositivos de SMA.

Modelos híbridos de Preisach também estão disponíveis na literatura com o objetivo de capturar outros comportamentos das SMAs. RAO & SRINIVASA (2012) apresentam um modelo de torção onde o conceito de energia livre de Gibbs é combinado ao modelo de Preisach, obtendo-se um modelo que pode ser aplicado com variações de temperatura e carregamento. Os autores se basearam no trabalho de DORAISWAMY *et al.* (2011) para simular a resposta pseudoelástica de fios e molas de SMA submetidos a cargas de torção. RAO *et al.* (2014) investigaram através de testes experimentais a resposta pseudoelástica de fios de SMA sujeitos a cargas de torção com transformações parciais na região de histerese. Foram realizadas comparações entre os resultados experimentais e numéricos obtidos utilizando-se o modelo proposto por RAO & SRINIVASA (2012), demonstrando que a abordagem termodinâmica utilizada tem uma melhor capacidade de prever os resultados quando comparada ao modelo clássico de Preisach.

KTENA *et al.* (2002) estenderam o modelo de Preisach para duas dimensões, e o modelo obtido por MATSUZAKI *et al.* (2002) que, além da pseudoelasticidade, captura também a variação de temperatura. Os trabalhos de LIANG *et al.* (2009), RAO & SRINIVASA (2015) e CHEN *et al.* (2019) apresentam outros estudos onde o modelo de Preisach é utilizado para descrever o comportamento histerético das SMAs.

Este trabalho tem como objetivo investigar a descrição do comportamento termomecânico das ligas com memória de forma a partir do modelo de Preisach clássico. Esse modelo descreve uma histerese a partir da superposição de operadores em um domínio triangular, definido em um espaço abstrato, com uma correspondência à superfície de Everett que é construída a partir de dados experimentais. Testes experimentais são realizados para serem usados como referência. Inicialmente, o trabalho propõe um procedimento para a construção da função de Everett. Em seguida, é avaliada a relação entre a superfície de Everett e a reprodução do comportamento termomecânico das SMAse é estabelecida uma verificação do modelo usando os resultados experimentais da pseudoelasticidade. Em seguida, outras características são investigadas utilizando dados disponíveis na literatura. Os resultados mostram que as respostas do modelo estão de acordo com os dados experimentais e que, uma vez definida a função de Everett para uma determinada característica histerética, o comportamento geral dessa característica pode ser capturado. Desta forma, o modelo de Preisach mostrou ser uma aproximação interessante para descrever o comportamento termomecânico das ligas com memória de forma podendo servir como base para diversas aplicações.

Após esta introdução, este trabalho é organizado conforme se segue. O Capítulo 2 destina-se a revisão geral sobre as ligas com memória de forma, apresentando os seus principais comportamentos termomecânicos e algumas aplicações.

O Capítulo 3 é dedicado a abordagem experimental do trabalho. Nesse capítulo, o material utilizado nos ensaios é caracterizado, o procedimento de treinamento é apresentado bem como o procedimento para geração dos dados experimentais. Por fim, os ensaios são apresentados.

O Capítulo 4 apresenta o modelo de Preisach clássico e um procedimento para a construção da superfície de Everett.

No Capítulo 5, o comportamento da superfície de Everett é investigado e se discute a comparação entre os resultados numéricos e os resultados experimentais obtidos no Capítulo 3. Em seguida, apresenta-se o uso do modelo para descrever outras características das SMAs usando dados disponíveis na literatura. O Capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

As SMAs apresentam como principal característica um acoplamento termomecânico que lhes dá a capacidade de recuperar uma forma previamente definida, quando submetidas a um processo termomecânico apropriado. Caso haja restrição para recuperação desta forma, essas ligas promovem forças de restituição elevadas.

Embora o pesquisador Arne Ölander tenha observado o efeito térmico de memória de forma pela primeira vez em 1932, enquanto realizava pesquisas em ligas de ouro e cádmio, o interesse tecnológico nas SMA surgiu somente a partir da década de 1960. Em 1962, Buehler e Frederick Wang descobriram esse efeito em uma liga de Níquel-Titânio (NiTi), durante pesquisas no Laboratório de Artilharia Naval dos Estados Unidos da América (na época, *Naval Ordnance Laboratory* - NOL). Essa liga passou a ser conhecida como Nitinol, como referência aos elementos da liga e o local de descoberta.

As SMAs possuem essencialmente duas fases microconstituintes: austenita e martensita. A martensita pode ser classificada como maclada (*twinned*), quando induzida por temperatura, constituída a partir de vinte e quatro variantes que compõem a sua estrutura, ou não maclada (*detwinned*), quando induzida por carregamento mecânico, onde apenas uma variante é predominante e orientada na direção do carregamento. A austenita é estável a altas temperaturas enquanto a martensita é estável em baixas temperaturas, quando livre de tensões. As transformações martensíticas formam a base para o comportamento singular das SMAs (LAGOUDAS, 2008). Essas transformações, que ocorrem sem difusão, são caracterizadas por um deslocamento cisalhante dos átomos numa escala inferior à distância interatômica promovendo grandes deformações e pequenas mudanças de volume (TSUCHIYA, 2011).

Além das fases martensítica e austenítica, dependendo de determinadas condições específicas, as SMAs podem apresentar uma fase cristalográfica intermediária, denominada fase R, chamada assim devido ao fato de sua estrutura cristalina ser do tipo romboédrica. Essa fase possui como característica uma pequena fase de transformação quando comparada com a transformação de austenita para

martensita (CZECHOWICZ, 2015). A fase R pode aparecer tanto na transformação de austenita para martensita quanto na transformação inversa.

Considerando uma amostra de SMA livre de tensões em uma temperatura tal que ela se encontre na fase martensita maclada, caso haja um aumento de temperatura para um valor acima da temperatura de transformação de fase, ela passa para a fase austenítica. Reduzindo-se a temperatura, a amostra retorna para a martensita maclada. Essas temperaturas de transformações são importantes para caracterizar as SMAs.

Um teste comumente realizado para a determinação das temperaturas de transformação de fase, é o realizado utilizando-se um calorímetro diferencial de varredura (DSC – *Differential Scanning Calorimetry*). Esse teste tem como princípio a identificação dos picos do fluxo de calor que o equipamento fornece para a amostra de SMA que correspondem às temperaturas de transformação. A fim de ilustrar esse teste, considere uma amostra de SMA na fase martensita que é aquecida até a temperatura de início da transformação para a fase austenita (A_s). Nesta temperatura, o equipamento registra o início de um pico de fluxo de calor, pois na mudança de fase ocorre uma reação endotérmica. Atingida a temperatura de término de mudança para a fase austenita (A_f), o pico de calor é também cessado. Considerando agora a amostra na fase austenita, a temperatura é reduzida até a temperatura de início de transformação da fase martensita (M_s). O equipamento registra o início de um pico do fluxo de calor, apresentando agora uma reação exotérmica. De forma semelhante ao processo anterior, ao atingir a temperatura de término de mudança de fase (M_f), o pico de fluxo de calor é cessado e o material encontra-se novamente na fase martensítica. A Figura 2.1 apresenta a curva obtida em um DSC para uma amostra de uma liga de SMA que possui a fase R. O eixo das abscissas representa a temperatura e o eixo das coordenadas o fluxo de calor fornecido pelo equipamento. Nessa figura, observa-se a existência de três regiões onde ocorreram picos no fluxo de calor: a primeira, na curva de aquecimento, representa a transformação de martensita para a austenita; a segunda, na curva de resfriamento, representa a transformação de austenita para a fase R e a terceira, também na curva de resfriamento, representa a transformação da fase R para a fase martensita. Assim, as temperaturas de transformação de fase A_s , A_f , M_s e M_f são identificadas.

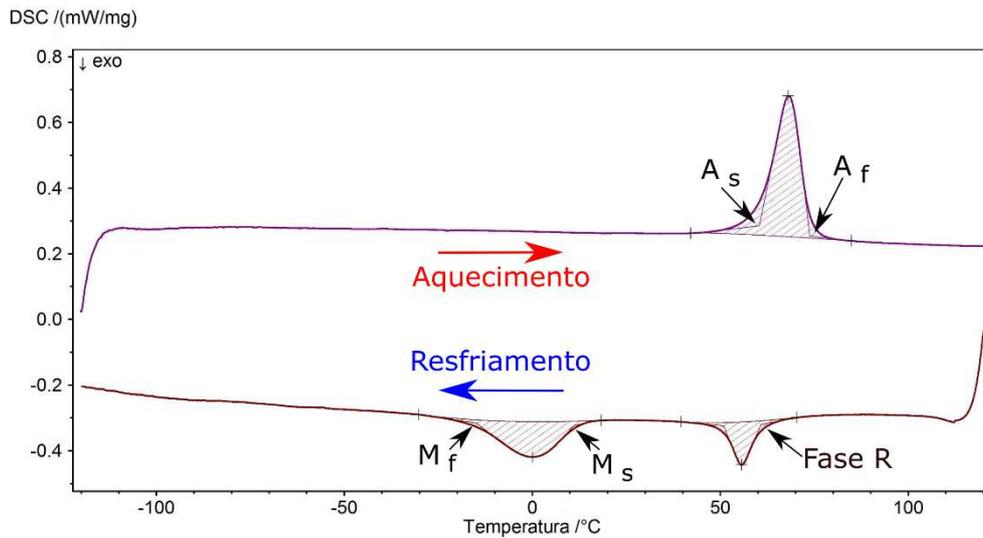


Figura 2.1: Curva obtida em um teste DSC para uma liga de NiTi (DORNELAS, 2020a).

Além das transformações de fase devido as variações de temperatura, variações no carregamento também podem induzir mudanças de fase nas SMAs. Dessa forma, combinações nas variações de tensão e/ou temperatura levam a uma série de comportamentos termodinâmicos presentes nas SMAs. Dentre eles, têm-se a transformação de fase devido a variação de temperatura, o efeito memória de forma, a pseudoelasticidade, os sublaços devidos as transformações incompletas de fase e a assimetria tensão-compressão. Diversos estudos investigaram estes comportamentos de maneira aprofundada, dentre eles, NISHIMURA *et al.*(1997), GALL *et al.* (2001), MACHADO & SAVI (2002), PAIVA *et al.* (2004), SAVI & PAIVA (2005), LAGOUDAS (2008), AL-HUMAIRI (2020). A seguir, é apresentado uma breve descrição desses comportamentos.

2.1 Pseudoelasticidade

O comportamento pseudoelástico pode ser identificado no ciclo da Figura 2.2. O ciclo representa uma amostra de SMA que se encontra inicialmente na fase austenita (temperatura acima de A_s) e na ausência de carregamento mecânico (ponto O da Figura 2.2). Ao ser submetido a um carregamento mecânico, inicialmente é observado um trecho linear na curva tensão-deformação que se desenvolve até uma tensão crítica σ_{M_s} ,

onde tem início a transformação de fase de austenita para martensita não maclada. Continuando o aumento do carregamento mecânico, a transformação para martensita não-maclada ocorre até uma tensão σ_{Mf} , acompanhada de uma deformação não-linear. Nessa região, pequenas variações na tensão correspondem a grandes deformações. Atingida a tensão σ_{Mf} , a transformação de fase termina e o material encontra-se completamente na fase martensítica. A partir de σ_{Mf} , aumentando-se a tensão aplicada, o material responde novamente de maneira elástica. Como a martensita não maclada é instável em altas temperaturas, com a retirada do carregamento, a partir da tensão σ_{As} , inicia-se a uma transformação inversa, acompanhada de uma nova região não linear na curva tensão-deformação. Atingida a tensão σ_{Af} , o material volta a ser completamente austenítico, apresentando novamente uma região elástica até o ponto O. Observa-se ao longo do carregamento, a presença de um laço de histerese caracterizando a dissipação de energia do material ao longo do processo de transformação de fase.

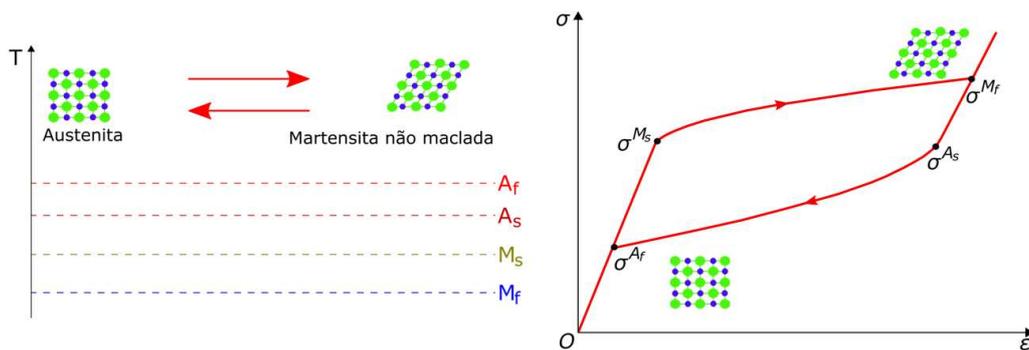


Figura 2.2: Comportamento pseudoelástico de uma SMA (DORNELAS, 2020a).

2.2 Transformação de fase devido a variação de temperatura

Considere agora uma amostra de SMA livre de tensões e em uma temperatura em que a fase martensítica é estável, ou seja, em uma temperatura abaixo de M_f , conforme mostrado na Figura 2.3. A amostra é então aquecida até uma temperatura superior a A_f , onde a fase austenita é estável. Entre as temperaturas A_s e A_f , o material sofre uma mudança de fase a qual é identificada graficamente como uma região não-linear, gerando a parte superior do laço de histerese. Ao se resfriar a amostra, ocorre uma transformação inversa, onde a partir de uma temperatura M_s , o material inicia a

transformação da fase austenita para a fase martensita. Ao atingir a temperatura M_f , a transformação é finalizada. Durante este processo, graficamente, completa-se o laço de histerese, caracterizando a dissipação de energia do material ao longo do processo de transformação de fase.

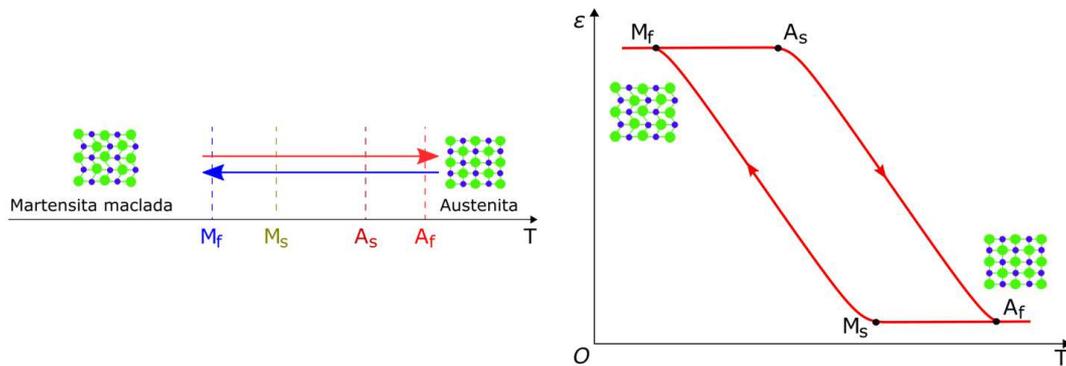


Figura 2.3: Transformação de fase devido à mudança de temperatura (DORNELLAS, 2020a).

2.3 Efeito Memória de Forma

Para descrever o efeito memória de forma, considere uma amostra de SMA a uma temperatura constante menor do que M_f . Na ausência de carregamento mecânico, esse material encontra-se na fase de martensita maclada (ponto O da Figura 2.4). Ao aplicar um carregamento mecânico, passa a ser verificada uma região linear na curva tensão-deformação até ser atingida a tensão crítica σ_{M_s} , onde inicia-se a reorientação da fase martensita maclada para a variante martensita não maclada. Essa transformação é finalizada na tensão σ_{M_f} , sendo que, a partir desse ponto, somente a variante não maclada passa a existir. Continuando-se a aplicação do carregamento mecânico, novamente observa-se uma região linear na curva tensão-deformação. Diferentemente da pseudoelasticidade, a martensita não maclada é estável a baixas temperaturas, dessa forma, cessando-se o carregamento, a transformação reorientação não ocorre, e a amostra passa a apresentar uma deformação residual como mostrado na Figura 2.4. Para recuperar esta deformação, a amostra deve ser aquecida até uma temperatura acima de A_f , onde ocorrerá a transformação de fase martensita não maclada para austenita.

Resfriando-se a amostra até a temperatura inicial, a transformação inversa ocorre, e o material retorna ao seu estado inicial.

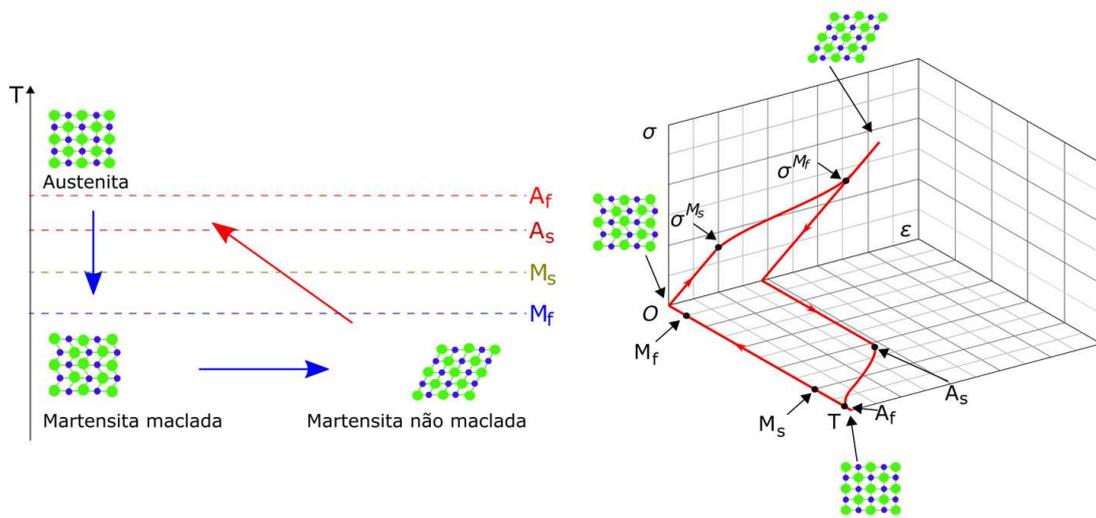


Figura 2.4: Efeito Memória de Forma em uma SMA (DORNELAS, 2020a).

2.4 Efeito Memória de Forma de Duas Vias

O efeito memória de forma de duas vias é mostrado na Figura 2.5. De forma similar ao realizado para o efeito memória de forma, uma amostra de SMA que se encontra em uma temperatura inferior a M_f , é submetida a um carregamento mecânico até o valor de σ^{M_f} onde é alcançado o fim de sua transformação de fase em martensita não maclada (ponto A da Figura 2.5). Nesse estado, a carga mecânica é mantida, e o material é aquecido até uma temperatura A_s (ponto B). Continuando o aquecimento até uma temperatura acima de A_f , o material na fase austenita apresenta uma deformação residual (ponto C). Resfriado a uma temperatura inferior a M_f , o material retorna diretamente para a fase martensita não maclada (ponto A) retendo a deformação e tensão aplicada. A transformação martensita-austenita (linha vermelha na Figura 2.5) pode ser alcançada aquecendo (através de corrente elétrica, por exemplo) e resfriando a amostra, sendo um processo útil nas aplicações de controle.

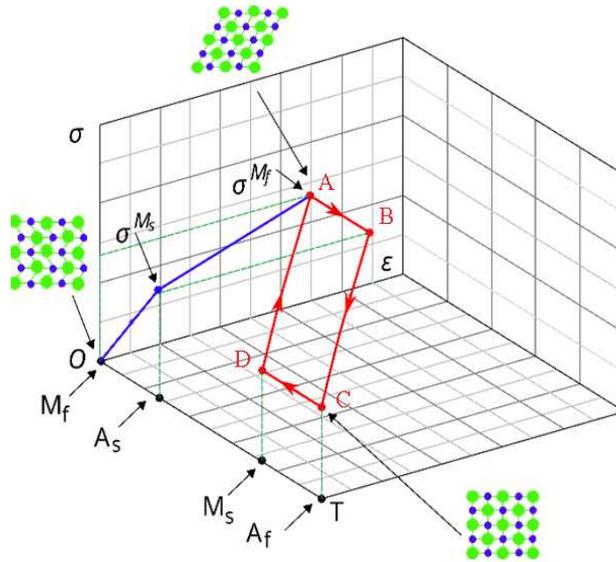


Figura 2.5: Efeito Memória de Forma de Duas Vias.

2.5 Sublaços

O laço de histerese principal pode ser definido como o envelope de todos os laços de histerese menores (ou internos), denominados usualmente de sublaços (SAVI & PAIVA, 2005). Os sublaços estão presentes tanto na histerese da curva tensão-deformação quanto na histerese da curva deformação-temperatura, sendo um fenômeno reversível. A nível microestrutural, eles ocorrem devido as transformações parciais entre as fases martensita e austenita. Essa característica pode ser visualizada graficamente quando se reverte a carga mecânica ou variação de temperatura a que um material de SMA está submetido antes da fase de saturação ser atingida. A Figura 2.6 ilustra esse processo em um diagrama deformação-temperatura. Nessa figura, o material de SMA sofre um aumento de temperatura entre os pontos A e B. Antes do processo de transformação de fase ser concluído, a temperatura é diminuída no processo entre os pontos B e C.

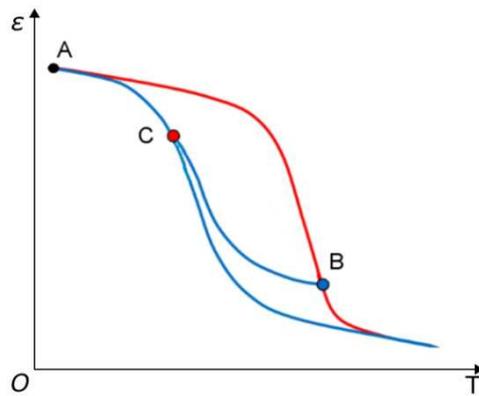


Figura 2.6: Sublaço ABC em um diagrama deformação-temperatura.

2.6 Assimetria Tensão-compressão

Resultados experimentais mostram que as SMAs podem apresentar um comportamento assimétrico quando submetidas a cargas de tensão e de compressão (PAIVA *et al.*, 2005). Essa característica foi observada por NISHIMURA *et al.* (1997) em ligas policristalinas a base de ferro, por GALL *et al.* (2001) em ligas monocristalinas e policristalinas de NiTi e por SITTNER & NOVAK (2000) em ligas a base de cobre.

As características assimétricas consistem principalmente que, para a compressão, as tensões críticas de transformação são significativamente maiores e a inclinação da mudança de fase no gráfico é mais íngreme. Estas diferenças encontram-se ilustradas graficamente na Figura 2.7, onde duas amostras de SMA de NiTi foram submetidas a tração e a compressão. Uma das amostras é uma liga de NiTi (monocristalina) e outra é de uma liga de NiTi com precipitado de Ti_3Ni_4 (policristalina). Ambas foram submetidas ao mesmo tratamento termomecânico e ambos os testes ocorreram a temperatura de 22°C.

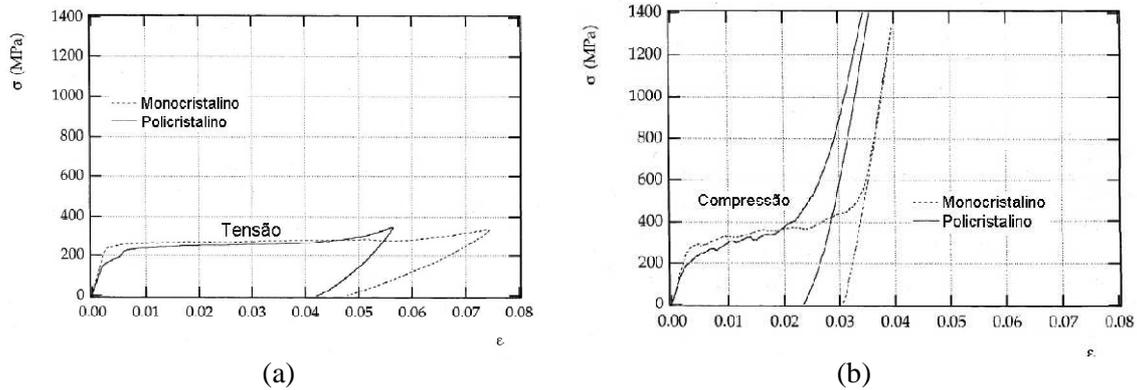


Figura 2.7: Assimetria tensão-deformação. (a) Tração. (b) Compressão. Adaptado de GALL et al. (2001).

2.7 Aplicações

Os diversos comportamentos termomecânicos apresentados pelas SMAs tornam-se atrativas para aplicações nas mais diversas áreas. Por este motivo, nos últimos anos, diversas pesquisas têm sido realizadas buscando apresentar novas aplicações para as SMAs. Neste sentido, os trabalhos de OLIVEIRA & SAVI (2013), JANI *et al.* (2014), SADASHIVA *et al.* (2021) e BALASUBRAMANIAN *et al.* (2021) apresentaram uma revisão sobre o emprego das SMAs nas mais diversas áreas.

Na área médica, DUERIG *et al.* (1999) e MACHADO & SAVI (2002, 2003) realizaram uma revisão geral do emprego das SMAs considerando diversos dispositivos. Neste sentido, DUERIG *et al.* (1999) ressaltaram a biocompatibilidade e a resistência a fadiga das SMAs como um diferencial desses materiais quando comparados com outros materiais utilizados para essa finalidade. KHULIEF (2020) ressaltou ainda as características de atoxidade e resistência a corrosão para esse emprego.

Devido às características menos invasivas de dispositivos de SMA, eles são usualmente empregados em procedimentos cardiovasculares, cirúrgicos, ortopédicos, entre outros. Como exemplo desse tipo de aplicação tem-se o filtro Simon, feito a partir de fios de ligas com memória de forma que pode ser utilizado para a retenção de coágulos nas artérias e prevenção da embolia pulmonar. Inicialmente, o filtro encontra-se contraído à baixa temperatura (fase martensítica), graças ao fornecimento de uma

solução salina em uma forma que permite a sua introdução no interior da artéria. Quando o filtro é colocado na posição desejada, a solução salina é retirada e a temperatura do corpo humano promove a expansão do filtro (transformação de fase da martensita para a austenita). A Figura 2.8 ilustra o processo de expansão do filtro.

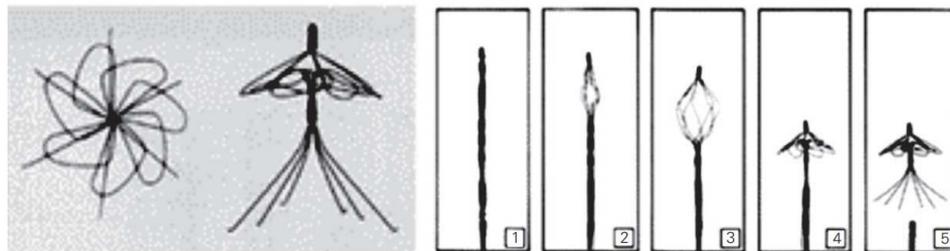


Figura 2.8: Expansão de um filtro Simon. Adaptado de MACHADO & SAVI (2003).

Outros exemplos de aplicação são: utilização de fibras de SMA para favorecer a circulação mecânica de sangue em pacientes com problemas cardíacos (Figura 2.9), fios de SMA para aparelhos ortodônticos, próteses inteligentes (Figura 2.10), utilização de SMAs para unir e reforçar ossos danificados e ancoragem de tendões em ossos.

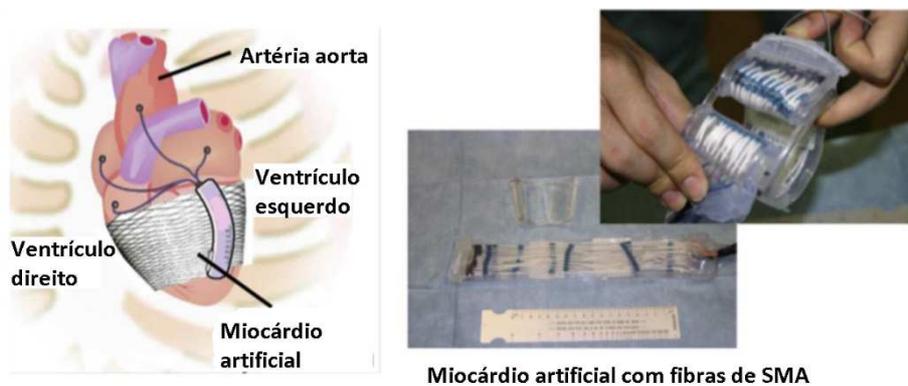


Figura 2.9: Miocárdio artificial que utiliza fibras feitas a partir de fios de SMA.

Adaptado de KHULIEF (2020).

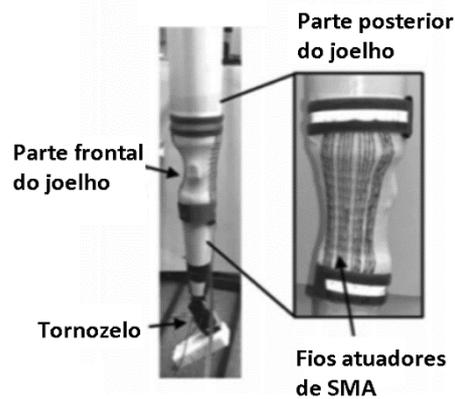


Figura 2.10: Prótese de perna que utiliza fios de SMA como articulação. Adaptado de KHULIEF (2020).

JANI *et al.* (2014) apresentaram de forma esquemática, conforme ilustrado na Figura 2.11, as regiões do corpo humano com potencial de utilização de dispositivos de SMAs.

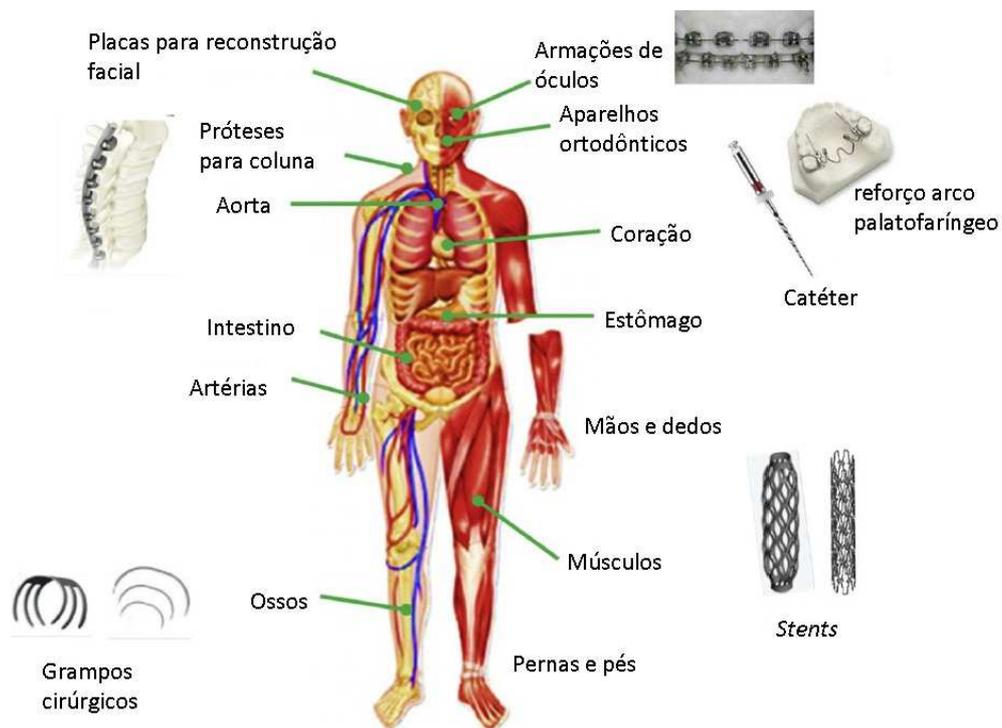


Figura 2.11: Regiões do corpo humano com potencial de utilização de dispositivos de SMA. Adaptado de JANI *et al.* (2014).

Na área aeroespacial, HARTL & LAGOUDAS (2007) apresentaram dispositivos de SMAs utilizados em veículos espaciais e atmosféricos e IKEDA (2011) enumerou as vantagens da utilização de SMAs nestes veículos, tais como a obtenção de estruturas mais resistentes, leves e seguras. Um exemplo de aplicação é o pneu desenvolvido pela NASA, que explora o comportamento pseudoelástico de fios de SMA. Este pneu (Figura 2.12), desenvolvido para veículos de exploração espacial, possui como principais vantagens a capacidade de recuperar sua geometria original ao passar por um obstáculo, boa tração em terrenos arenosos e um peso reduzido (NASA, 2017).

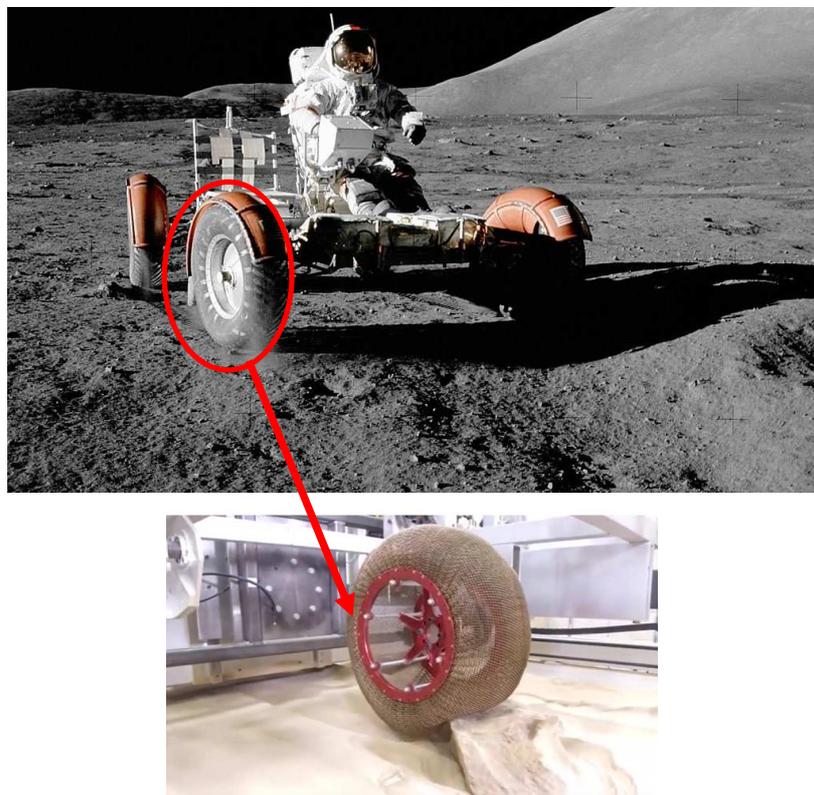


Figura 2.12: Pneu desenvolvido a partir de fios pseudoelásticos para aplicações aeroespaciais. Adaptado de NASA (2017).

Ainda na indústria aeronáutica, tem-se o emprego de SMAs em diversos sistemas, como, por exemplo, os *flaps*. Estas estruturas utilizam extensos sistemas hidráulicos que necessitam de bombas e atuadores, elevando o custo e o peso, dois pontos críticos do projeto de aeronaves. Muitas alternativas estão sendo pesquisadas para contornarem este problema, e potenciais soluções são os dispositivos que

empregam as SMAs. Uma possível configuração seria a de fios de SMA inseridos na parte superior e inferior do *flap*. Assim, com um sistema de aquecimento por corrente elétrica dos fios, a geometria do *flap* pode ser controlada, otimizando o peso e a eficiência do projeto.

JANI *et al.* (2014) apresentaram um mapeamento, ilustrado na Figura 2.13, das possíveis aplicações das SMAs na indústria aeronáutica.

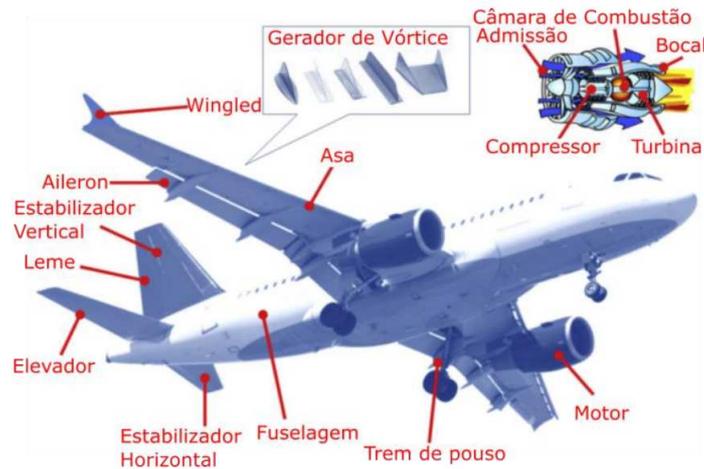


Figura 2.13: Regiões com potencial de emprego de materiais de SMA na indústria aeronáutica. Adaptado de JANI *et al.* (2014).

Uma aplicação similar aos *flaps* aeronáuticos é encontrada na área naval, em aerobarcos. REDINIOTIS *et al.* (2002) apresentam um protótipo de um hidrofólio que imita o movimento da cauda de um peixe. Fios atuadores de SMA são externamente acionados por uma fonte elétrica, promovendo a mudança de forma (Figura 2.14).

Ainda na área naval, IVOŠEVIĆ & RUDOLF (2019) listaram as possíveis aplicações das SMAs tais como o emprego em substituição às soldas orbitais em tubulações subaquáticas e a utilização como elemento de termostato de equipamentos subaquáticos. Os autores destacam ainda as características de resistência a fadiga e a corrosão em ambiente marinho que diversas ligas de SMAs apresentam.

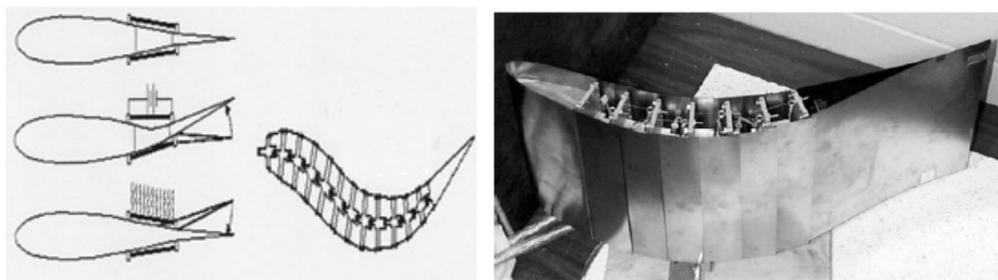


Figura 2.14: Hidrofólio acionado por fios de SMA. Adaptado de REIDINIOTIS et al. (2002).

PATIL & SONG (2017) realizaram uma revisão do emprego das SMAs na indústria de óleo & gás. Os principais empregos identificados foram: atuadores de válvulas de dispositivos que funcionam em grandes profundidades (gerando uma maior confiabilidade e segurança comparado com acionadores pneumáticos ou elétricos), reforço estrutural, conectores/selos de cabos e tubulações, centralizador do dispositivo de cimentação das paredes de perfuração e acionadores de explosivos (utilizados para fragmentar a rocha e aumentar a produção de petróleo). Outra importante utilização das SMAs apresentada pelos autores foi a substituição de explosivos. Atuadores de SMA são inseridos nas fissuras naturais da rocha e, aproveitando-se das elevadas tensões que variações no ambiente induzem nas SMAs, a rocha é fragmentada sem o uso de explosivos, proporcionando maior segurança ao processo.

As SMAs também encontram um vasto emprego na robótica. SREEKUMAR *et al.* (2007) elaboraram uma revisão de dispositivos de SMA empregados na área de automação. JANI *et al.* (2014) citaram o desenvolvimento de um robô voador dotado de quatro atuadores de SMA. Esse robô, semelhante a uma libélula (Figura 2.15), possui treze graus de liberdade podendo se locomover em todas as direções no ar.



Figura 2.15: Robô voador dotado de atuadores de SMA, JANI et al. (2014).

A dissipação de energia devido a histerese presente nas transformações de fase das SMAs permite que elementos deste material atuem como dispositivos de controle de vibrações. A análise dinâmica destes dispositivos mostra um comportamento bastante complexo devido as suas características não lineares. Essa riqueza de possibilidades inclui respostas periódicas, quasi-periódicas, caos e hipercaos (SAVI *et al.*, 2002, 2008).

Os dispositivos de SMA para emprego como absorvedores de vibração podem ser molas, fios, barras e elementos mais complexos, que envolvem uma combinação dos anteriores. SPEICHER *et al.* (2009) propuseram um dispositivo para a proteção sísmica de edificações que atua por compressão e tração. O dispositivo utiliza mola helicoidal de NiTi ou mola Belleville também de NiTi, conforme apresentado na Figura 2.16.

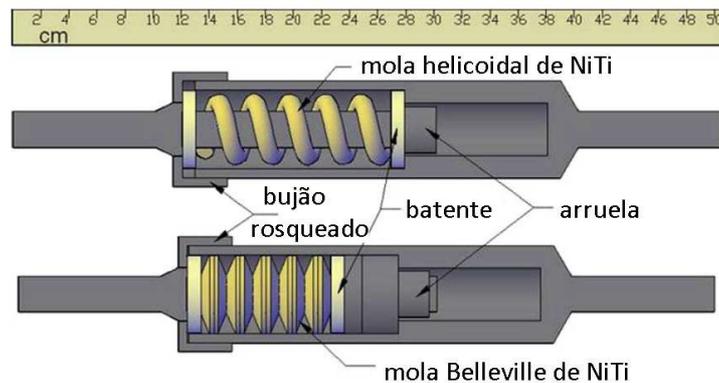


Figura 2.16: Dispositivo para proteção sísmica de edificações. Adaptado de SPEICHER *et al.* (2009).

A possibilidade de emprego das SMAs nos dispositivos denominados *tuned vibration absorber* (TVA) foi investigada numericamente no trabalho de SAVI *et al.* (2011). O TVA é um dispositivo utilizado para reduzir a vibração de um sistema primário sujeito a excitação externa, sendo constituído por um oscilador secundário que absorve energia do oscilador primário, o qual está acoplado. A utilização de SMAs nesses dispositivos permite que tais mecanismos tenham uma faixa de atuação maior.

GHASEMI *et al.* (2019) propuseram um TVA para utilização em plataformas de petróleo. O objetivo do mecanismo seria reduzir as vibrações oriundas de ventos, ondas, terremotos e colisões que acarretam fadiga dos elementos estruturais e equipamentos mecânicos no *deck*, interrompem a produção de petróleo, e reduzem o conforto dos

tripulantes da plataforma. O dispositivo consiste em uma massa interligada ao *deck* da plataforma através de um amortecedor denominado VG-SMA (Figura 2.17). Esse amortecedor possui cilindro, pistão e barras de SMA, conforme mostrado na Figura 2.18. O pistão possui como limites diversos batentes onde as barras de SMA são ligadas.

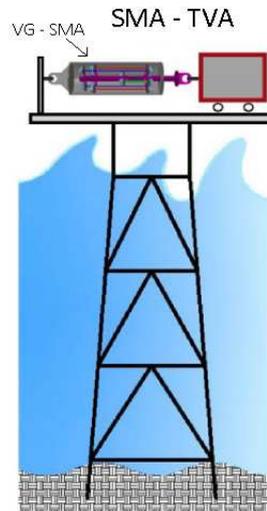


Figura 2.17: Configuração do dispositivo TVA para utilização em plataformas de petróleo. Adaptado de GHASEMI et al. (2019).

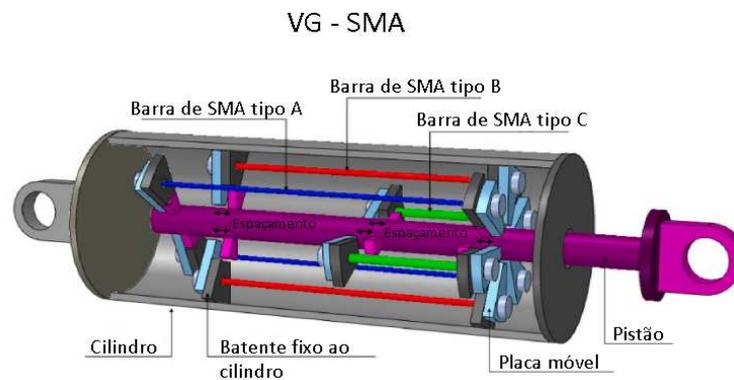
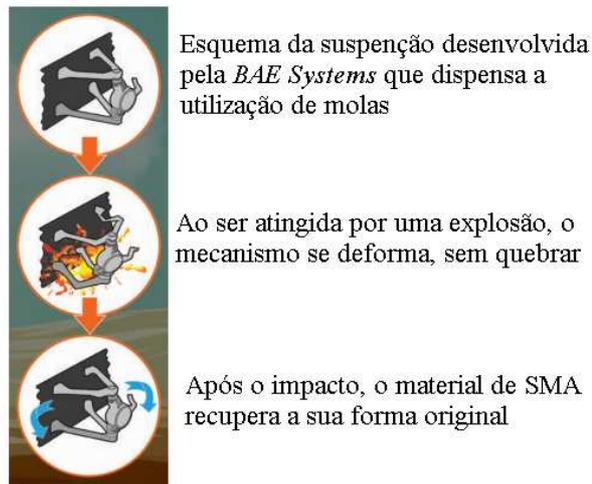


Figura 2.18: Amortecedor VG – SMA composto de barras de SMA de três tipos. Adaptado de GHASEMI et al. (2019).

O comércio global de SMAs no ano de 2022 foi liderado pela indústria de defesa e aeroespacial (THE BUSINESS RESEARCH COMPANY, 2023), o que mostra a importância que as SMAs vêm apresentando nessa área. Um exemplo de aplicação em

equipamentos militares das SMAs é o protótipo de suspensão resistente a explosões de minas terrestres desenvolvido pela empresa “BAE Systems”, para ser aplicado em veículos blindados (Figura 2.19). Essa suspensão, devido ao uso de dispositivos de SMA, dispensa o uso de molas, e, quando atingida por uma explosão, deforma-se, recuperando a sua forma original logo em seguida (BAE Systems, 2023).



Esquema da suspensão desenvolvida pela *BAE Systems* que dispensa a utilização de molas

Ao ser atingida por uma explosão, o mecanismo se deforma, sem quebrar

Após o impacto, o material de SMA recupera a sua forma original

Figura 2.19: Aplicação de SMAs na suspensão de veículos blindados. Adaptado de BAE Systems (2023).

Outro exemplo de aplicação das SMAs na área de defesa é o programa desenvolvido pela NASA em conjunto com o Laboratório de Pesquisa Naval da Marinha Norte-Americana, onde atuadores de SMA são utilizados para ajustar a geometria da admissão de ar para os motores de aeronaves quando velocidades subsônicas são atingidas (PITT *et al*, 2001). A Figura 2.20 mostra o dispositivo de

admissão. Resultados da pesquisa mostraram que a utilização de SMAs otimiza a configuração estrutural e melhora significativamente o desempenho dos motores (WANG *et al*, 2023).

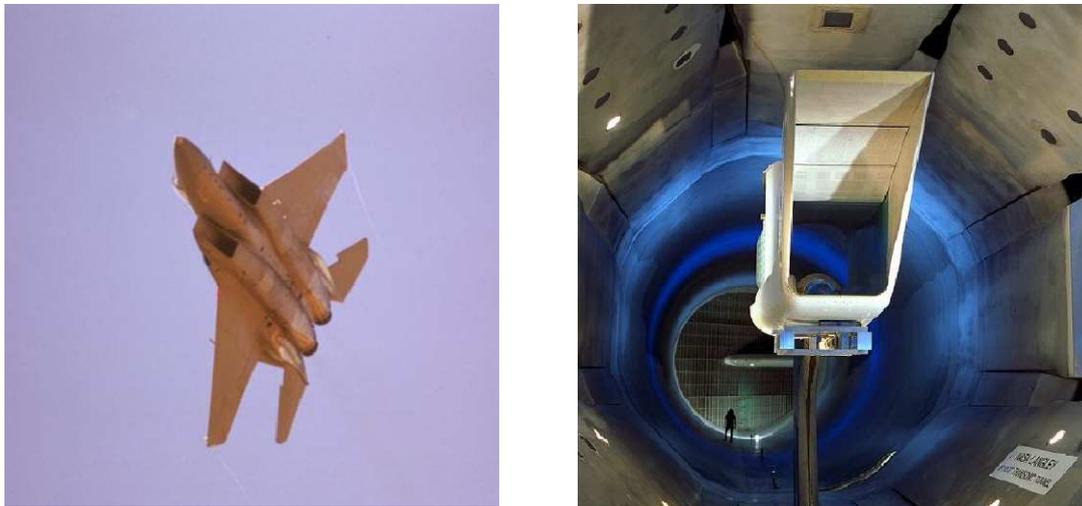


Figura 2.20: Dispositivo de admissão de ar da aeronave F-15 da Marinha Norte-Americana, PITT et al, (2001).

3 ANÁLISE EXPERIMENTAL

Este capítulo apresenta algumas características macroscópicas do comportamento termomecânico das ligas com memória de forma através de observações experimentais. Os ensaios experimentais foram realizados utilizando um fio pseudoelástico de Ni56Ti44 (% em peso), da forma como recebido do fornecedor, com diâmetro de 1,30 mm fabricado pela “Sandinox Biomateriais” seguindo as especificações da norma ASTM F063-18 (2018). As temperaturas de transformação de fase são obtidas usando um calorímetro diferencial de varredura (DSC), “NETZSCH Maia 200 F3”, mostrado na Figura 3.1. As propriedades do material são avaliadas através de ensaios de tração quasi-estáticos realizados em uma máquina de ensaios eletromecânicos, “Instron 5882”, empregando uma célula de carga estática de 30 kN e medição de deformação baseada em deslocamento, com um comprimento de medida útil do fio de 100 mm, conforme mostrado na Figura 3.2. Os procedimentos de teste seguem os empregados no trabalho de DORNELAS *et al.* (2021).

O capítulo é dividido em duas partes: na primeira são apresentados os testes para a caracterização do fio, onde o objetivo é confirmar o comportamento de interesse (pseudoelasticidade) à temperatura ambiente; e na segunda, são realizados testes cíclicos a fim de avaliar a resposta pseudoelástica da amostra.



Figura 3.1: Calorímetro diferencial de varredura - DSC 200 F3 Maia.

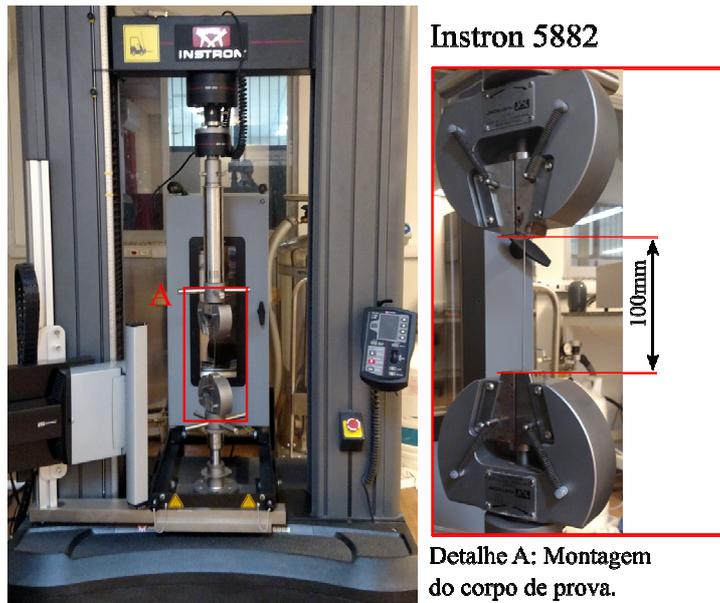


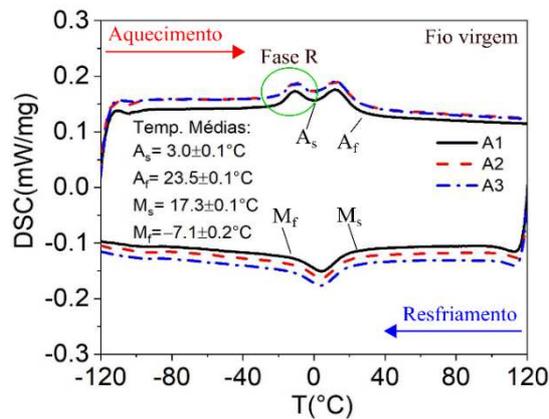
Figura 3.2: Sistema eletromecânico Instron 5882. No detalhe, montagem do corpo de prova.

3.1 Caracterização do Material

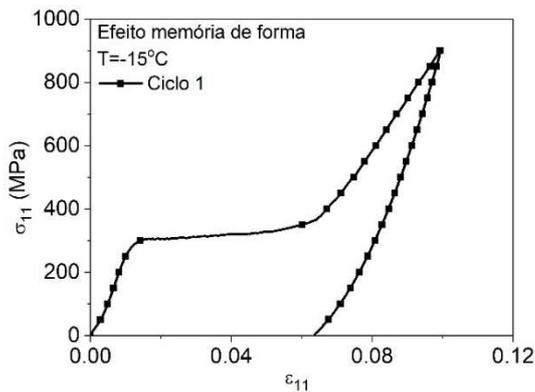
O procedimento de caracterização aplicado à amostra tem como objetivo obter as temperaturas de transformação de fase e avaliar as propriedades mecânicas do material após a estabilização da deformação TRIP (do inglês, *transformation induced plasticity*).

A determinação das temperaturas de transformação de fase é realizada por meio de testes DSC a partir de três amostras de fio virgem denominadas como A1, A2 e A3. Ao longo do teste, cada amostra é submetida a um processo de aquecimento desde a temperatura ambiente até 120°C, seguido de um processo de resfriamento até -120°C e, depois, o processo é então repetido. Os resultados desses testes são apresentados na Figura 3.3(a), que mostra as temperaturas médias e seus correspondentes desvios padrão. Durante o processo de aquecimento, duas regiões distintas de transformação de fase são observadas: martensita para fase R e fase R para austenita. Durante o processo de resfriamento, observa-se um pico de transformação na transição de austenita para martensita. Após o teste DSC, um exame macroscópico é realizado com base nas curvas tensão-deformação à baixa temperatura e à temperatura ambiente, como mostrado na Figura 3.3(b) e Figura 3.3(c), respectivamente. Nota-se que a amostra exibe o

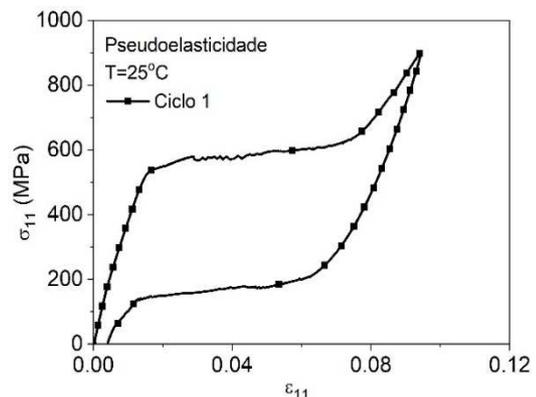
comportamento termomecânico de pseudoelasticidade à temperatura ambiente e efeito memória de forma em baixas temperaturas.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.3: Temperaturas de transformação de fase obtidas através do calorímetro diferencial de varredura (DSC) e verificação macroscópica através de curvas tensão-deformação. (a) Curva DSC; (b) Efeito memória de forma, baixa temperatura; (c) Pseudoelasticidade, temperatura ambiente.

Os parâmetros funcionais do material são determinados através de um ensaio de tração cíclico, quasi-estático, com pico de tensão de 900 MPa e taxa de 180 MPa/min. A Figura 3.4(a) mostra as curvas tensão-deformação obtidas a partir de 50 ciclos durante um processo de treinamento. O treinamento de uma SMA pode ser realizado através da aplicação de uma carga termomecânica cíclica até que seja observada uma estabilização na resposta do material. Este processo representa a estabilização da deformação TRIP, sendo um procedimento essencial para a utilização desses materiais em suas diversas

aplicações, permitindo a repetibilidade de resposta. A Figura 3.4(b) mostra a evolução da deformação ao longo dos ciclos, sendo observado que aproximadamente após trinta ciclos ocorre uma estabilização da deformação TRIP. A Figura 3.4(c) apresenta o último ciclo estabilizado onde algumas propriedades do material são identificadas. Os módulos elásticos para as fases austenítica e martensítica (E^A e E^M) são estimados calculando-se os coeficientes angulares das linhas que passam pelas regiões elásticas das respectivas fases. A tensão crítica para as transformações de fase diretas (σ^{Ms} e σ^{Mf}) e reversas (σ^{As} e σ^{Af}) são determinadas usando o método da tangente, que envolve a identificação da interseção das linhas tangentes para as regiões onde as transformações de fase começam e terminam.

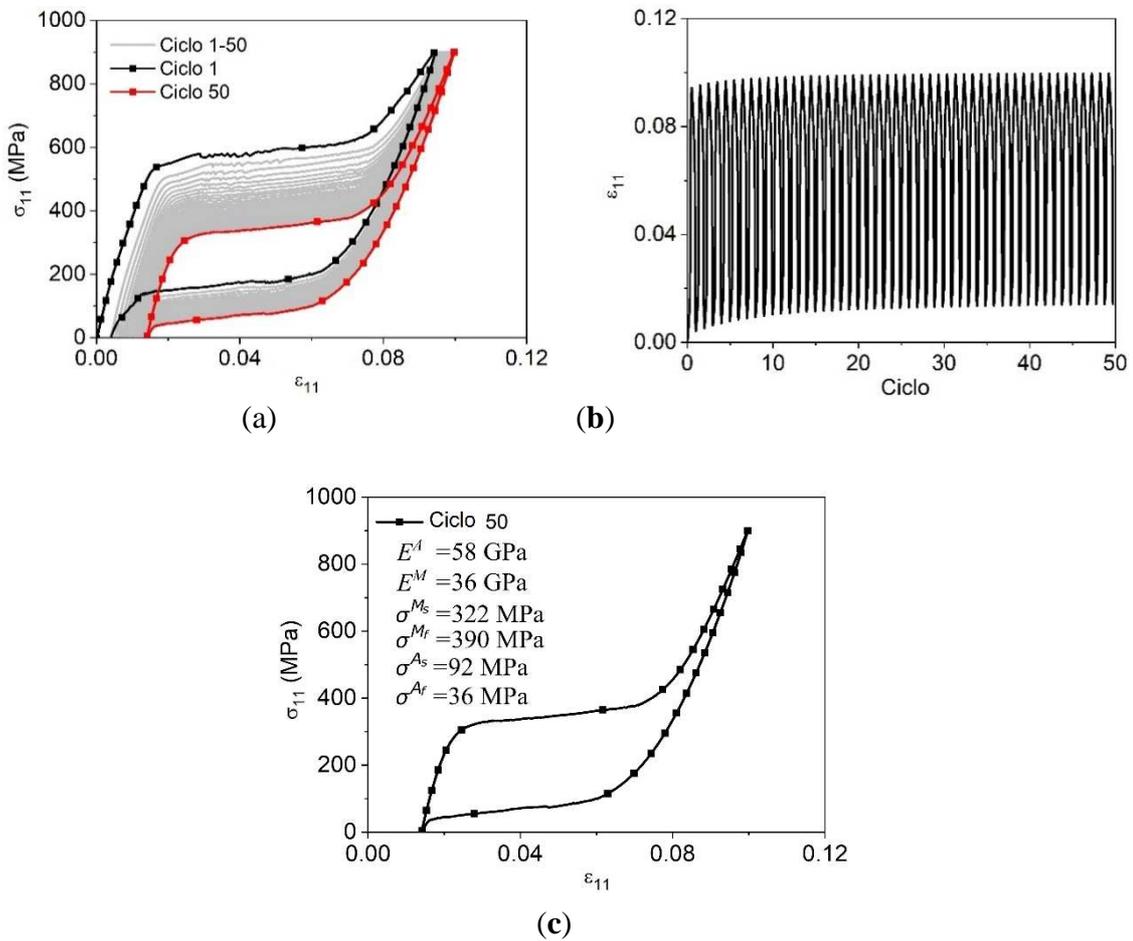


Figura 3.4: Ensaio de tração quasi-estático de um fio de NiTi pseudoelástico. (a) Resposta tensão-deformação cíclica apresentando 50 ciclos; (b) Estabilização da deformação TRIP ao longo dos ciclos; (c) Parâmetros funcionais avaliados para o último ciclo.

3.2 Testes Cíclicos

Após o procedimento de treinamento ter sido realizado, avalia-se a resposta pseudoelástica da amostra submetida a diferentes carregamentos termomecânicos. Esses experimentos são realizados aplicando deformação prescrita. Inicialmente, um ensaio considerando nove ciclos é proposto, com deformação máxima variando entre 1% (no primeiro ciclo) e 9% (no último ciclo) e deformação mínima próxima de zero, com taxa de carregamento de 0.5%/min. A Figura 3.5(a) mostra o histórico de carregamento do ensaio proposto e a Figura 3.5(b) apresenta a curva tensão-deformação correspondente. Nessa figura, é possível perceber que o material não apresenta transformação de fase durante o primeiro ciclo (deformação máxima de 1%) e apresenta transformação de fase incompleta entre os ciclos dois e seis. A partir do sétimo ciclo, o material apresenta transformação de fase completa, conforme pode ser observado na Figura 3.5(b).

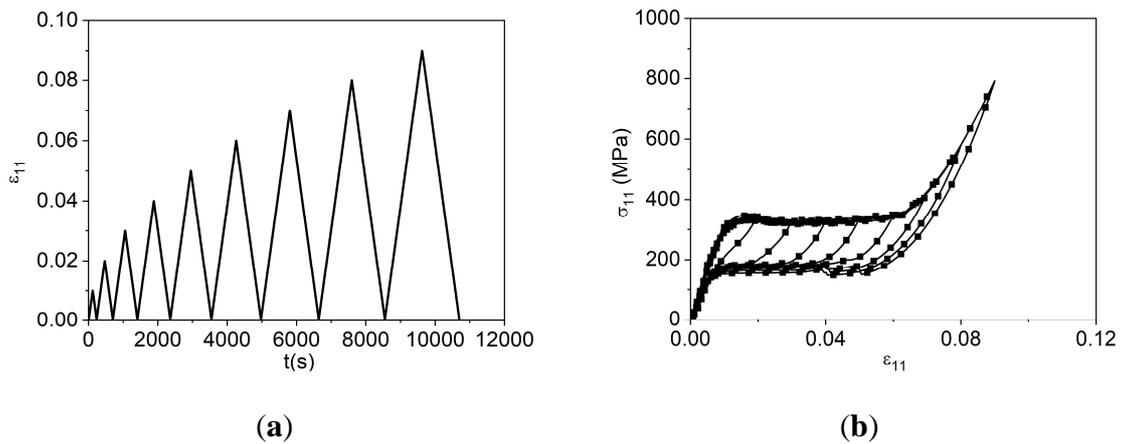


Figura 3.5: Ensaio de tração quasi-estático de um fio de NiTi pseudoelástico com taxa de deformação de 0,5%/min. (a) Histórico de carregamento; (b) Curva tensão-deformação.

A fim de se avaliar os sublaços devidos a transformações incompletas, dois experimentos são apresentados a seguir. No primeiro, considera-se a sequência de carregamento mostrada na Figura 3.6(a) a uma taxa de deformação de 0,5%/min. Observa-se na Figura 3.6(b) que o material apresenta um laço de histerese externo, devido à transformação de fase completa que, conforme visto no Capítulo 2, pode ser definido como o envelope dos dois laços de histerese internos devido à

transformação de fase incompleta (sublaços). No segundo experimento, uma nova sequência de carregamento é apresentada, conforme mostrado na Figura 3.7(a), considerando uma taxa de deformação de 1%/min. Mais uma vez, a presença de um sublaço é perceptível devido à transformação de fase incompleta. Esse sublaço encontra-se envolvido por um laço de histerese externo que representa a transformação completa, como pode ser visto na Figura 3.7(b).

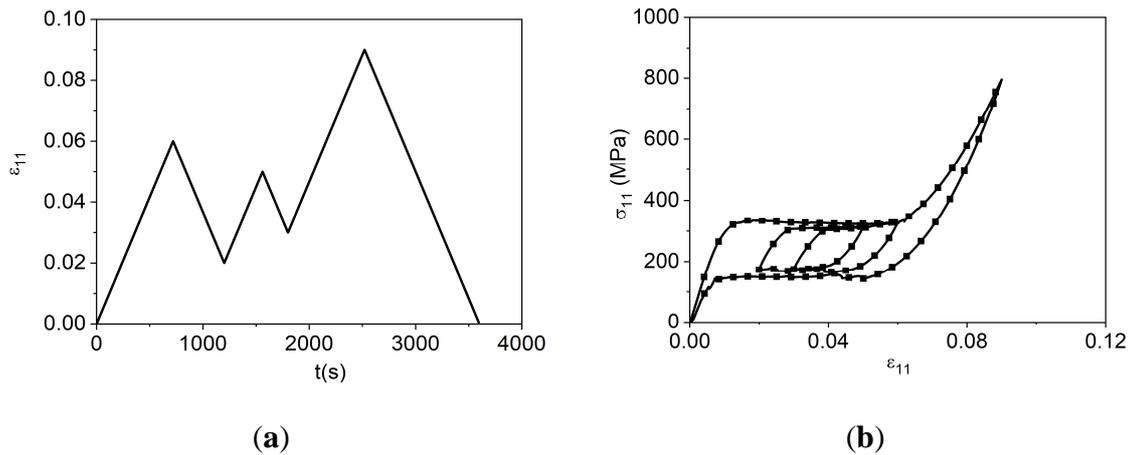


Figura 3.6: Ensaio de tração quasi-estático de um fio de NiTi pseudoelástico com taxa de deformação de 0,5%/min. (a) Histórico de carregamento; (b) Curva tensão-deformação considerando dois sublaços.

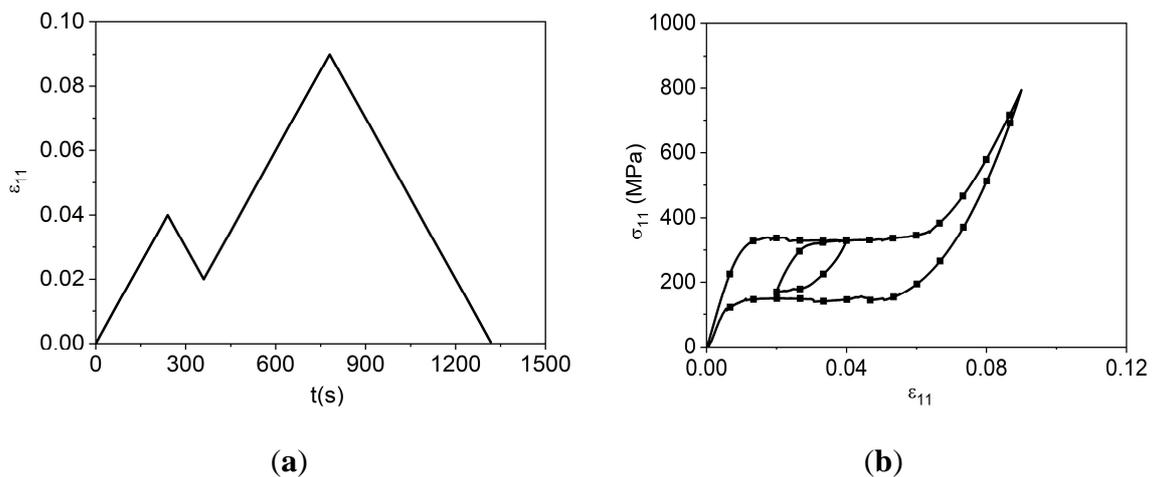


Figura 3.7: Ensaio de tração quasi-estático de um fio de NiTi pseudoelástico com taxa de deformação de 1%/min. (a) Histórico de carregamento; (b) Curva tensão-deformação considerando um sublaço.

4 MODELO MATEMÁTICO

O objetivo desse capítulo é apresentar a descrição do comportamento pseudoelástico de uma SMA a partir do modelo de Preisach. Nesse contexto, divide-se o capítulo em duas partes: na primeira, apresenta-se o modelo de Preisach e uma análise dos seus parâmetros; na segunda parte, apresenta-se a superfície de Everett, construída a partir de dados experimentais.

4.1 Modelo de Preisach

O modelo de Preisach é construído a partir de operadores elementares definidos em um espaço abstrato. Considera-se que esses operadores são combinados em laços retangulares em um diagrama de entrada-saída, representando um comportamento histerético.

Considere, portanto, um operador elementar de histerese de Preisach, $\hat{\gamma}_{\alpha\beta}$, associado às variáveis abstratas, α e β , respectivamente associadas a dois sentidos de transformação, conforme ilustrado na Figura 4.1.

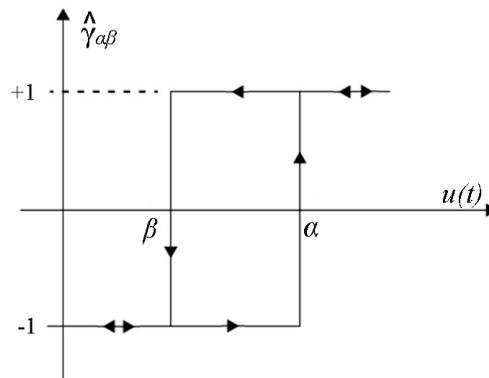


Figura 4.1: Definição do operador de histerese de Preisach.

Desta forma, uma curva genérica de histerese como tensão-deformação ($\sigma - \varepsilon$), força-deslocamento ($f - u$) ou temperatura-deformação ($T - \varepsilon$) pode ser representada como uma sequência de transformações elementares, expressas pela superposição de

operações elementares definidas pelos operadores de histerese. Com isso, a curva histerética de tensão (saída), em função da deformação (entrada), é expressa da seguinte forma onde se assume que $\alpha \geq \beta$ tendo em vista que a histerese é um fenômeno dissipativo,

$$\sigma(\varepsilon, t) = \hat{\Gamma}\varepsilon = \iint_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) \hat{\gamma}_{\alpha\beta} d\alpha d\beta \quad (4.1)$$

onde $\mu(\alpha, \beta)$ é a função peso normalmente chamada de função de Preisach e $\hat{\Gamma}$ representa o operador histerético de Preisach.

MAYERGOYZ (2003) substituiu a integração por um somatório de valores substituindo a função de Preisach pela função de Everett (F), construída a partir de resultados experimentais. A partir da abordagem proposta por MAYERGOYZ (2003), a equação (4.1) pode ser reescrita da seguinte forma (KHAN & LAGOUDAS, 2002):

$$\sigma(\varepsilon, t) = \sum_{k=1}^{n(t)} [F(\alpha_k, \beta_{k-1}) - F(\alpha_k, \beta_k)] \quad (4.2)$$

Com isso, é possível modelar o comportamento das SMAs usando a abordagem de Preisach conforme ilustrado na Figura 4.2. Os resultados são utilizados para construir a superfície de Everett que permite estabelecer a relação com o espaço de Preisach, espaço abstrato onde é construído a descrição da histerese.

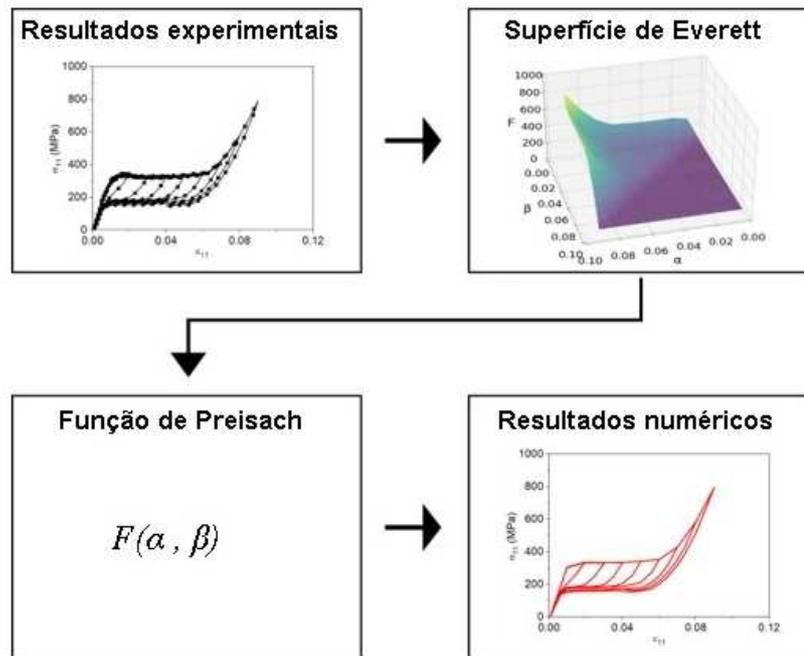


Figura 4.2: Estrutura da aplicação do modelo constitutivo obtido a partir do modelo de Preisach.

4.1.1 Interpretação Geométrica

A Figura 4.3 mostra a histerese em um espaço tensão-deformação e sua correspondente representação no espaço de Preisach. O espaço é construído considerando que o valor superior do ciclo de histerese possui correspondência com uma reta na coordenada α e o limite inferior com uma reta na coordenada β . Adicionando-se a reta $\alpha = \beta$, e considerando a região onde $\alpha(t) \geq \beta(t)$, tem-se o triângulo de Preisach ou triângulo limite.

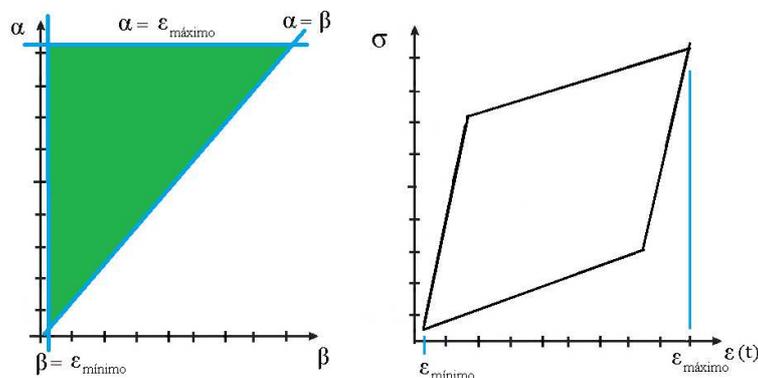


Figura 4.3: Triângulo de Preisach e histerese associada.

Considerando as coordenadas na região do triângulo de Preisach, é possível obter o valor da tensão em qualquer ponto da região de histerese, bastando identificar adequadamente as coordenadas no plano $\alpha - \beta$, obter o valor da função de Everett para a coordenada em questão e utilizar o valor obtido na Equação (4.2). O procedimento que se segue exemplifica essa aplicação. As coordenadas utilizadas na função F , são aquelas que aparecem como um ponto em vermelho nas figuras. Inicialmente, admite-se que a variável de entrada $\varepsilon(t)$ em um determinado instante de tempo t_0 , possui valor igual a ε_0 , estando no início da região de histerese, conforme ilustrado na Figura 4.4. As coordenadas no plano de Preisach correspondem a $(\alpha_0, \beta_0) = (\varepsilon_0, \varepsilon_0)$.

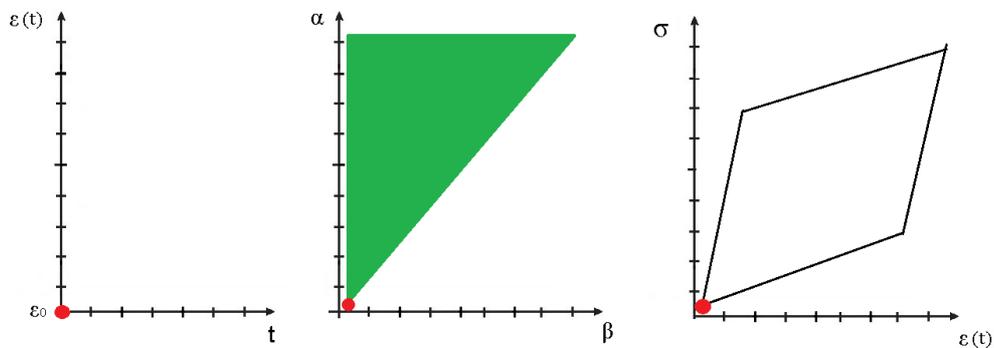


Figura 4.4: Correspondência entre a evolução no triângulo de Preisach e histerese associada no instante t_0 .

Aplicando-se o valor das coordenadas do Plano de Preisach na Equação (4.2), o valor de $\sigma(\varepsilon, t)$ é encontrado e dado pela seguinte Equação:

$$\sigma(\varepsilon, t) = F(\alpha_0, \beta_0) \quad (4.3)$$

De acordo com a Figura 4.5, assume-se agora que $\varepsilon(t)$ aumenta continuamente até atingir um valor ε_1 em um determinado tempo t_1 . Geometricamente, o triângulo de Preisach encontra-se dividido em duas áreas: uma amarela e outra verde. A divisão é realizada pela linha $\alpha = \varepsilon(t)$, que se move para cima conforme $\varepsilon(t)$ aumenta, até atingir ε_1 . Por se tratar da primeira variação na coordenada α , ela recebe o índice 1.

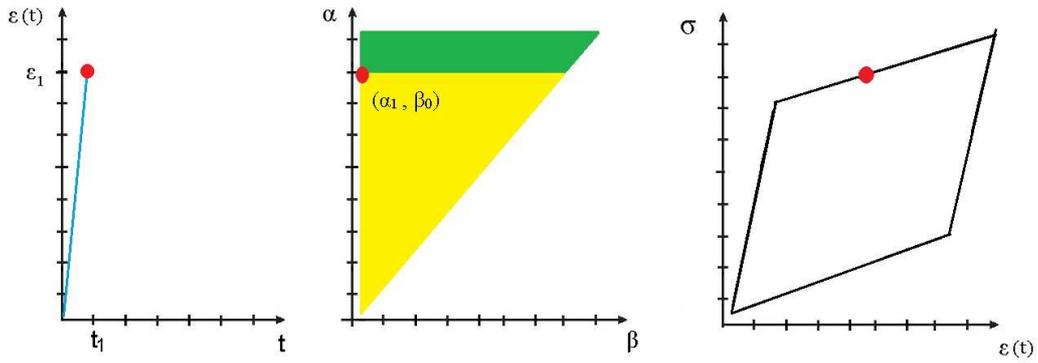


Figura 4.5: Correspondência entre a evolução no triângulo de Preisach e histerese associada no instante t_1 .

O valor de $\sigma(\varepsilon, t)$ é agora encontrado aplicando-se os valores da coordenada do vértice de 90° do triângulo amarelo, no caso $(\alpha_1, \beta_0) = (\varepsilon_1, \varepsilon_0)$, na equação (4.2). Dessa forma, é obtida a seguinte relação:

$$\sigma(\varepsilon, t) = F(\alpha_1, \beta_0) \quad (4.4)$$

Esse resultado exemplifica uma das propriedades do modelo de Preisach, descritas no trabalho de MAYERGOYZ (2003), que consiste em capturar apenas os pontos extremos das coordenadas α e β . No exemplo mostrado, isso corresponde a uma variação na coordenada α , entre dois instantes de tempo seguintes, t_0 e t_1 , como há um incremento na coordenada α ($\alpha_1 > \alpha_0$), o modelo desconsidera a parcela correspondente a $F(\alpha_0, \beta_0)$ e a substitui pela parcela $F(\alpha_1, \beta_0)$.

Agora, assume-se que a variável de entrada decresce de forma contínua até atingir um valor mínimo ε_2 no instante de tempo t_2 , conforme a Figura 4.6. A linha de fronteira agora possui duas retas: uma horizontal e outra vertical. A linha vertical se move da direita para a esquerda de acordo com a equação $\beta = \varepsilon(t)$ até atingir $\beta = \varepsilon_2$. Por se tratar da primeira variação na coordenada beta, ela recebe o índice 1. O vértice do trapézio amarelo formado possui as coordenadas $(\alpha_1, \beta_1) = (\varepsilon_1, \varepsilon_2)$.

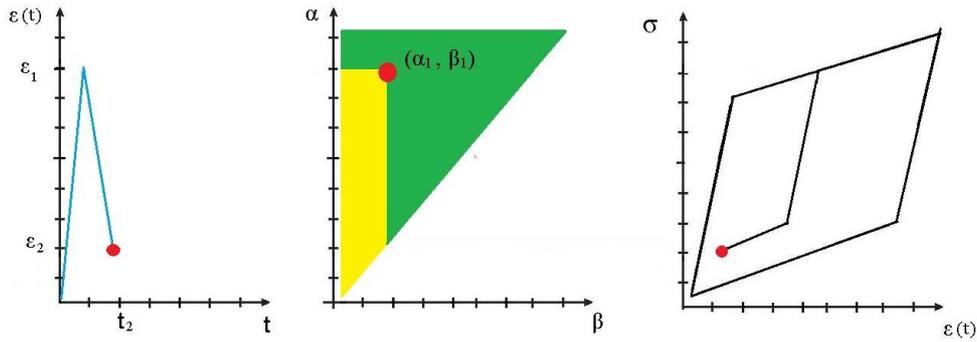


Figura 4.6: Correspondência entre a evolução no triângulo de Preisach e histerese associada no instantet₂.

O valor de $\sigma(\varepsilon, t)$ é encontrado aplicando-se os valores da coordenada assinalada do vértice do trapézio na Equação (4.2), como mostrado a seguir.

$$\sigma(\varepsilon, t) = F(\alpha_1, \beta_0) - F(\alpha_1, \beta_1) \quad (4.5)$$

Esse resultado ilustra outra propriedade do modelo de Preisach também citada no trabalho de MAYERGOYZ (2003) que consiste em acumular os resultados anteriores. No exemplo, $\sigma(\varepsilon, t)$ é o resultado obtido anteriormente (1^a parcela) acumulado com o resultado atual (2^a parcela).

A Figura 4.7 apresenta a evolução das regiões amarela e verde devido a novas entradas arbitradas. Note que o aumento do valor de $\varepsilon(t)$ fornece uma variação no eixo α (vertical) enquanto a diminuição fornece uma variação no eixo β (horizontal). Além disso, um aumento no valor de $\varepsilon(t)$ implica em somar uma parcela de um valor da função de Everett na Equação (4.2) e uma diminuição de $\varepsilon(t)$ implica em subtrair um valor da função de Everett na Equação (4.2). As coordenadas utilizadas na função de Everett são dadas pelo vértice do trapézio formado pela linha de interface.

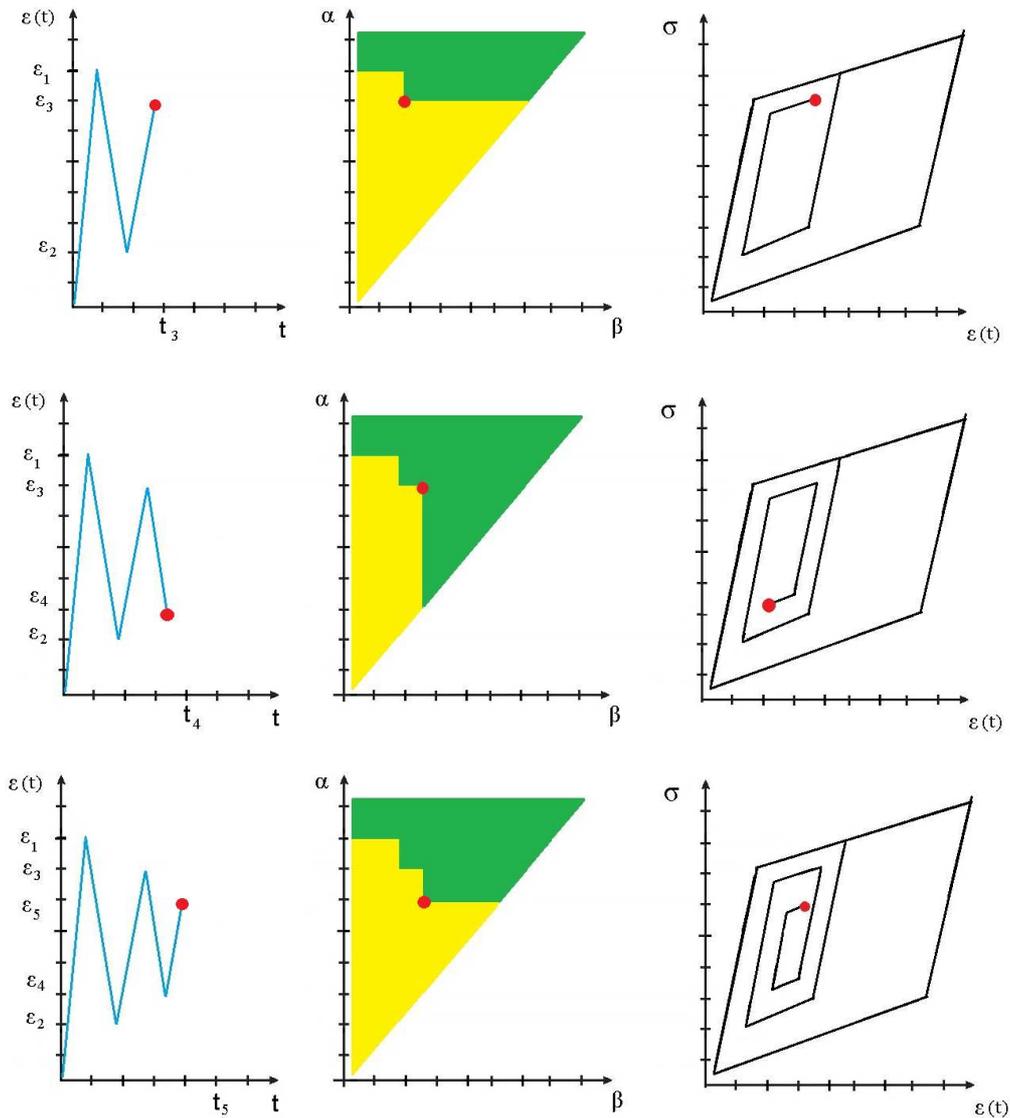


Figura 4.7: Correspondência entre a evolução no triângulo de Preisach e histerese associada para valores arbitrados de $\varepsilon(t)$.

Observa-se ainda que, dependendo da variação de $\varepsilon(t)$, o último seguimento de reta que compõe a linha de interface pode ser vertical ou horizontal. Assim, generalizando-se a análise para k alterações na variável $\varepsilon(t)$, com k variando de zero a n , identificam-se duas situações possíveis para esse seguimento:

- i) paralelo ao eixo de coordenadas β (conforme a Figura 4.8), para o caso em que a última alteração n de $\varepsilon(t)$ corresponde a um valor na coordenada α , ou seja $\dot{\varepsilon}(t) > 0$;

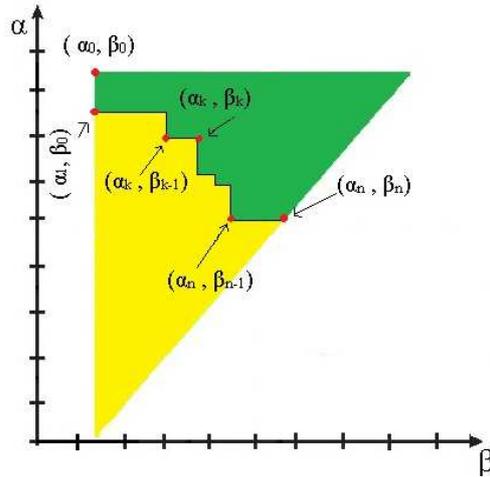


Figura 4.8: Coordenadas dos trapézios formados na linha de fronteira. Caso em que a última alteração n de $\varepsilon(t)$ é um valor na coordenada α .

Desta forma, considerando as coordenadas da Figura 4.8, a Equação (4.2) pode ser reescrita como:

$$\sigma(\varepsilon, t) = \sum_{k=1}^{n(t)-1} [F(\alpha_k, \beta_{k-1}) - F(\alpha_k, \beta_k)] + F(\alpha_n, \beta_{n-1}) \quad (4.6)$$

Dado que $\varepsilon(t) = \alpha_n$, têm-se:

$$\sigma(\varepsilon, t) = \sum_{k=1}^{n(t)-1} [F(\alpha_k, \beta_{k-1}) - F(\alpha_k, \beta_k)] + F(\varepsilon(t), \beta_{n-1}) \quad (4.7)$$

- ii) paralelo ao eixo de coordenadas α (conforme mostra a Figura 4.9), para o caso em que a última alteração n de $\varepsilon(t)$ corresponde a um valor na coordenada β , ou seja $\dot{\varepsilon}(t) < 0$.

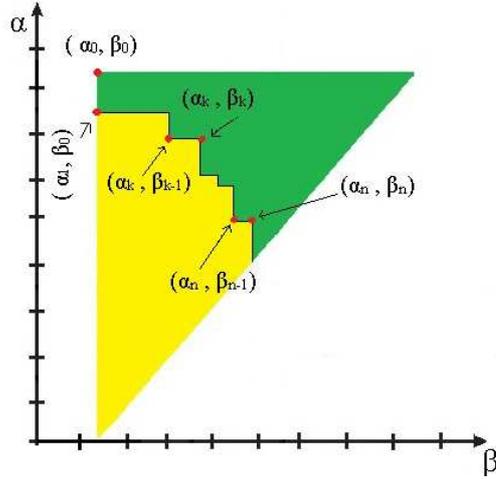


Figura 4.9: Coordenadas dos trapézios formados na linha de fronteira. Caso em que a última alteração n de $\varepsilon(t)$ é um valor na coordenada β .

De forma similar ao caso anterior, a Equação (4.2) pode ser reescrita como:

$$\sigma(\varepsilon, t) = \sum_{k=1}^{n(t)-1} [F(\alpha_k, \beta_{k-1}) - F(\alpha_k, \beta_k)] + [F(\alpha_n, \beta_{n-1}) - F(\alpha_n, \beta_n)] \quad (4.8)$$

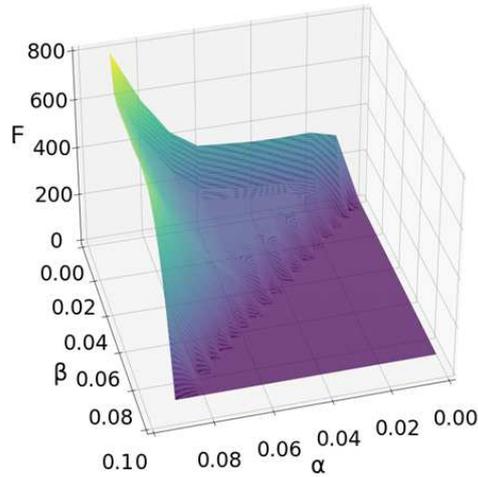
Como $\varepsilon(t) = \beta_n$, têm-se:

$$\sigma(\varepsilon, t) = \sum_{k=1}^{n(t)-1} [F(\alpha_k, \beta_{k-1}) - F(\alpha_k, \beta_k)] + [F(\alpha_n, \beta_{n-1}) - F(\alpha_n, \varepsilon(t))] \quad (4.9)$$

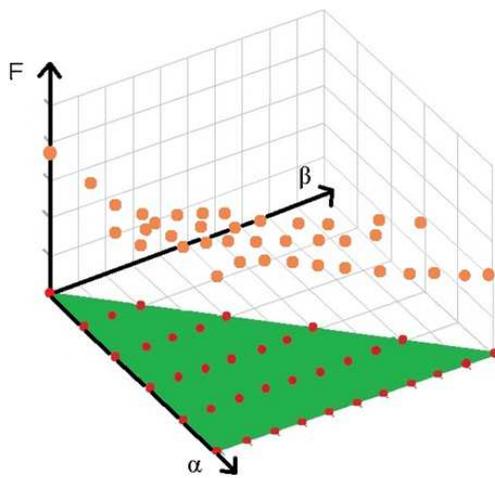
As Equações (4.7) e (4.9) são as formas da equação (4.2) que KHAN & LAGOUDAS (2002) apresentaram em seu trabalho. Essas equações representam o modelo de Preisach aplicado ao caso pseudoelástico de uma SMA, tendo sido computacionalmente implementadas utilizando o *software Python 3.0* para o desenvolvimento deste trabalho.

4.2 Função de Everett

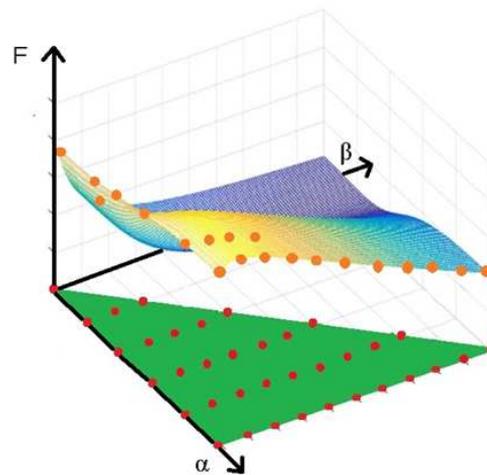
A função de Everett é uma superfície no \mathfrak{R}^3 , construída a partir de dados experimentais e estabelecendo uma conexão com o domínio de Preisach. **Erro! Fonte de referência não encontrada.**(a) mostra um exemplo dessa superfície. A determinação dessa superfície consiste em, primeiramente, encontrar um número suficiente de pontos de coordenadas (α, β, F) na região do triângulo de Preisach. **Erro! Fonte de referência não encontrada.**(b) ilustra um exemplo para essa dispersão de pontos (pontos em laranja). Depois, deve-se realizar uma interpolação bidimensional linear através desses pontos, definindo-se a função. **Erro! Fonte de referência não encontrada.**(c), ilustra um exemplo de uma superfície definida através da interpolação dos pontos no \mathfrak{R}^3 .



(a)



(b)



(c)

Figura 4.10: Função de Everett. (a) Exemplo de uma função (ou superfície) de Everett. (b) Exemplo da dispersão de pontos sobre o triângulo de Preisach. (c) Exemplo da interpolação através dos pontos da dispersão para se obter a função de Everett.

Para se determinar os pontos de coordenadas (α, β, F) , o seguinte procedimento deve ser realizado:

- 1- Obter os dados experimentais do fenômeno de interesse que apresenta histerese;
- 2- Dividir a região de histerese em um número adequado de divisões através de retas verticais;
- 3- Identificar os pontos experimentais a serem utilizados no modelo. Eles são a interseção entre as retas verticais das divisões e as curvas experimentais;
- 4- Identificar o valor da deformação dos pontos experimentais;

- 5- Construir a matriz de tensões $H_{\alpha\beta}$;
- 6- Construir a função de Everett por interpolação bidimensional linear.

A fim de ilustrar os referidos passos, inicialmente considera-se uma curva experimental da relação tensão-deformação de uma SMA, apresentada no Capítulo 3e mostrada novamente na Figura 4.11. O espaço tensão-deformação é dividido em regiões definidas pelas retas $\varepsilon(t) = 0.000652$, $\varepsilon(t) = 0.04$ e $\varepsilon(t) = 0.09$. A Tabela 4.1 identifica os pontos experimentais.

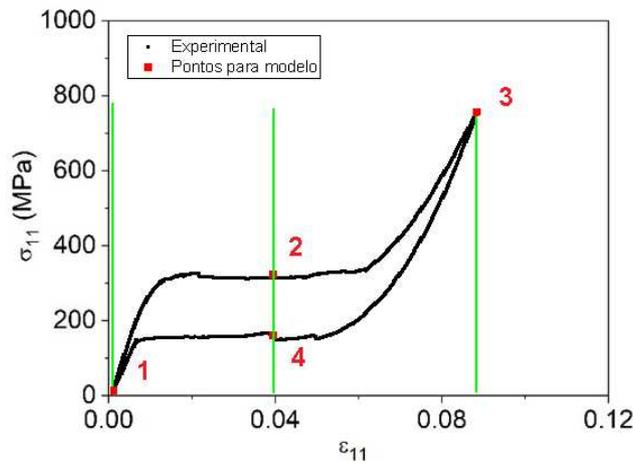


Figura 4.11: Divisão do espaço tensão-deformação contendo o laço externo em duas regiões.

Tabela 4.1: Pontos experimentais a serem utilizados no modelo.

Ponto	Deformação	Tensão(MPa)
1	0,000652	0,76
2	0,04	331,6
3	0,09	791,6
4	0,04	159,2

No domínio de Preisach, as três retas que definem as regiões no espaço tensão-deformação representam seis retas: $\alpha(t) = \beta(t) = 0.000652$, $\alpha(t) = \beta(t) = 0.04$ e $\alpha(t) = \beta(t) = 0.09$. Essa divisão gera uma malha no plano de Preisach, conforme mostrado na Figura 4.12(retas em verde claro). Os nós dessa malha, localizados no plano de Preisach (nós em vermelho e azul), são as coordenadas α e β de cada ponto no

\mathfrak{R}^3 . Essas coordenadas são identificadas na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

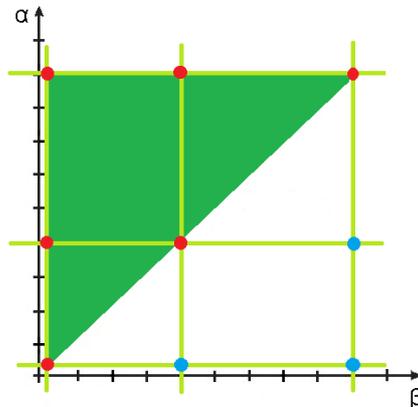


Figura 4.12: Malha no Plano de Preisach correspondente a duas regiões do espaço tensão-deformação.

Os pontos em vermelho são os pontos em que $\alpha \geq \beta$, ou seja, estão sobre o triângulo de Preisach e os azuis, externos ao triângulo de Preisach. A 3ª coordenada dos pontos (coordenada F) é obtida através da matriz de tensões $H_{\alpha\beta}$, onde α e β são as colunas e as linhas dessa matriz, respectivamente. A construção dessa matriz é mostrada na Tabela 4.2. Os valores da primeira linha são encontrados subtraindo o menor valor da tensão dos pontos experimentais da transformação austenita \rightarrow martensita (ou seja, σ_1) dos valores das tensões de cada ponto experimental dessa mesma transformação ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$). Os valores da coluna $\alpha = 0.09$ são obtidos subtraindo do maior valor da tensão dos pontos experimentais da transformação martensita \rightarrow austenita (ou seja, σ_3) os valores das tensões de cada ponto experimental dessa transformação ($\sigma_1, \sigma_3, \sigma_4$). Como somente foram considerados os pontos do laço externo, somente a coluna $\alpha = 0.09$ (em amarelo) possui um maior preenchimento. A Tabela 4.3 mostra os resultados obtidos para $H_{\alpha\beta}$. Dessa forma, os pontos (α, β, F) apresentam suas coordenadas definidas. A Tabela 4.4 apresenta as coordenadas de cada ponto de maneira mais clara.

Tabela 4.2: Determinação da matriz $H_{\alpha\beta}$.

$\beta \backslash \alpha$	0,000652	0,04	0,09
0,000652	$\sigma_1 - \sigma_1$	$\sigma_2 - \sigma_1$	$\sigma_3 - \sigma_1$
0,04	0	0	$\sigma_3 - \sigma_4$
0,09	0	0	$\sigma_3 - \sigma_3$

Tabela 4.3: Resultado para $H_{\alpha\beta}$.

$\beta \backslash \alpha$	0,000652	0,04	0,09
0,000652	0	331	791
0,04	0	0	632
0,09	0	0	0

Tabela 4.4: Pontos em relação aos quais a função de Everett será interpolada.

α	β	F (MPa)
0,000652	0,000652	0
0,000652	0,04	0
0,000652	0,09	0
0,04	0,04	0
0,04	0,000652	331
0,04	0,09	0
0,09	0,09	0
0,09	0,04	632
0,09	0,000652	791

A interpolação bidimensional linear dos pontos é realizada utilizando a função “*interpolate*” do *software Python 3.0*. Os argumentos dessa função são os vetores das coordenadas α e β , ou seja, $\alpha = \beta = [0.000652, 0.04, 0.09]$, os valores da matriz $H_{\alpha\beta}$ e o tipo de interpolação que se deseja realizar, no caso “*linear*”. A superfície de Everett encontrada é mostrada na Figura 4.13 que mostra que ela é basicamente composta de planos.

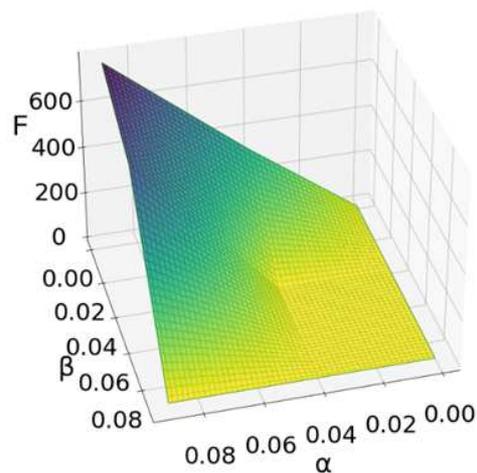


Figura 4.13: Função de Everett obtida por interpolação bidimensional linear a partir dos dados da Tabela 4.4.

5 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

O objetivo deste capítulo é investigar através de simulações numéricas a capacidade do modelo constitutivo obtido a partir do modelo de Preisach clássico de capturar diversos comportamentos termomecânicos associados às SMAs. Dessa forma, inicialmente é avaliada a relação entre a superfície de Everett e a reprodução do comportamento termomecânico. Em seguida, o modelo é utilizado para descrever o comportamento pseudoelástico das SMAs utilizando os dados experimentais apresentados no Capítulo 3. Por fim, outros fenômenos são descritos considerando novas funções de Everett, e utilizando informações experimentais da literatura. Basicamente, considera-se comportamentos temperatura-deformação, assimetria tensão-compressão e a histerese apresentada por uma mola de SMA.

5.1 Superfície de Everett

A definição da superfície de Everett é essencial para a descrição adequada do comportamento termomecânico das SMAs. Nesse sentido, considera-se o procedimento descrito no Capítulo 4 para avaliar a relação entre a superfície de Everett e o comportamento termomecânico.

Considere o espaço tensão-deformação dividido em quatro regiões, sendo dividido através de cinco retas: $\varepsilon(t) = 0.000652$, $\varepsilon(t) = 0.02$, $\varepsilon(t) = 0.04$, $\varepsilon(t) = 0.06$ e $\varepsilon(t) = 0.09$, conforme mostrado na Figura 5.1(a), que também mostra os pontos no espaço de Preisach (Figura 5.1(b)). Os pontos experimentais que são utilizados no modelo são mostrados na Tabela 5.1.

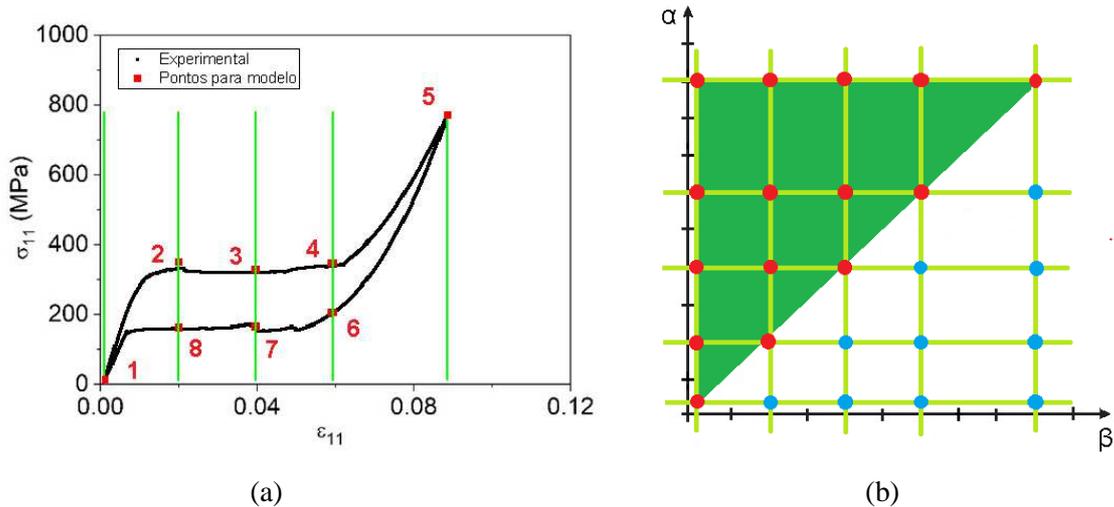


Figura 5.1: (a) Divisão do espaço tensão-deformação contendo o laço externo em quatro regiões. (b) Espaço de Preisach correspondente.

Tabela 5.1: Pontos experimentais a serem utilizados no modelo.

Ponto	Deformação	Tensão (MPa)
1	0,000652	0,76
2	0,02	352,2
3	0,04	331,6
4	0,06	349,8
5	0,09	791,6
6	0,06	201,2
7	0,04	159,2
8	0,02	157,2

A superfície de Everett obtida é mostrada na Figura 5.2(a). Essa função é acoplada ao modelo de Preisach e o resultado é mostrado na Figura 5.2(b). O resultado apresenta um perfil de histerese que se aproxima do laço externo da pseudoelasticidade do experimento realizado, contudo as discrepâncias em determinadas regiões são consideráveis devido a pouca quantidade de pontos. O resultado pode ser melhorado considerando uma malha mais refinada, fazendo-se uma subdivisão do espaço tensão-deformação como mostrado na Figura 5.3.

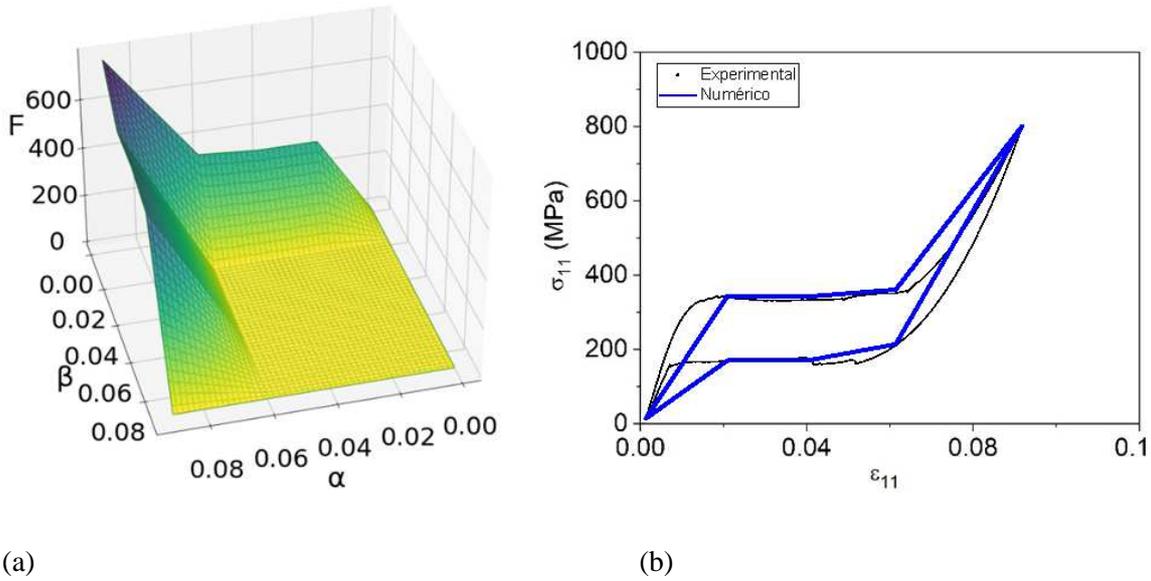


Figura 5.2: Resultado para a divisão do espaço tensão-deformação em quatro regiões.
 (a) Função de Everett. (b) Comparação numérico-experimental do laço externo.

Considerando nove divisões, o espaço tensão-deformação é então dividido através de dez retas: $\varepsilon(t) = 0.000652, \varepsilon(t) = 0.01, \varepsilon(t) = 0.02, \varepsilon(t) = 0.03, \varepsilon(t) = 0.04, \varepsilon(t) = 0.05, \varepsilon(t) = 0.06, \varepsilon(t) = 0.07, \varepsilon(t) = 0.08, \varepsilon(t) = 0.09$, conforme ilustrado na Figura 5.3(a) que também mostra os pontos no espaço de Preisach (Figura 5.3(b)). Os pontos experimentais que são utilizados no modelo são mostrados na Tabela 5.2.

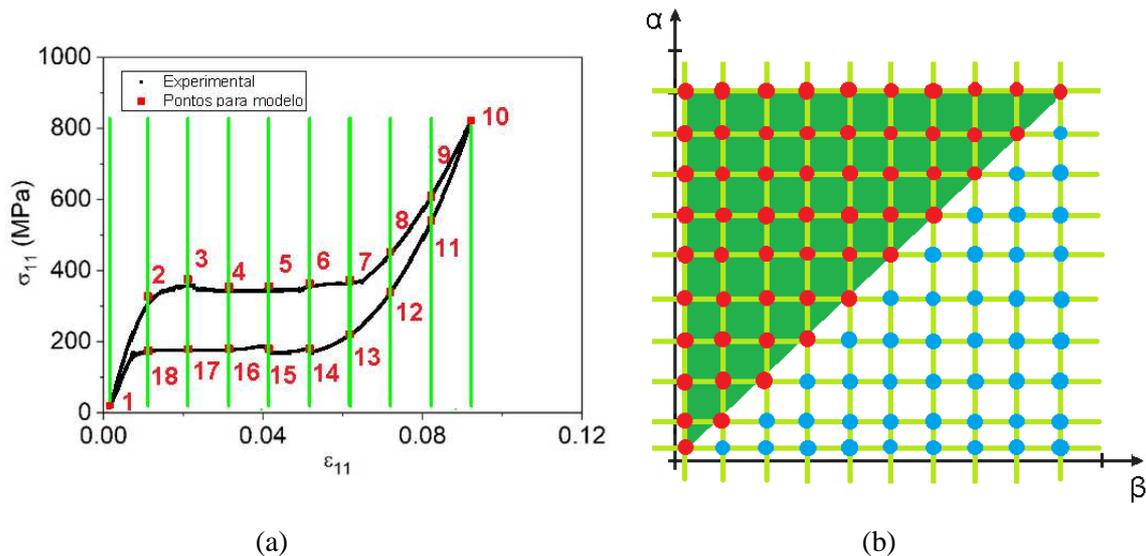


Figura 5.3: (a) Divisão do espaço tensão-deformação contendo o laço externo em nove regiões. (b) Triângulo de Preisach correspondente.

Tabela 5.2: Pontos experimentais a serem utilizados no modelo.

Ponto	Deformação	Tensão (MPa)
1	0,000652	0,764
2	0,01	306,4
3	0,02	352,2
4	0,03	330,0
5	0,04	331,6
6	0,05	340,1
7	0,06	349,8
8	0,07	427,0
9	0,08	581,0
10	0,09	791,6
11	0,08	514,0
12	0,07	317,2
13	0,06	201,2
14	0,05	159,2
15	0,04	159,2
16	0,03	158,8
17	0,02	157,2
18	0,01	154,4

A superfície de Everett obtida é mostrada na Figura 5.4(a). É possível observar que ela apresenta um perfil mais complexo do que superfície anterior. Nota-se ainda que, como foram utilizados dados experimentais apenas do laço externo, a função de Everett é apenas uma envoltória de parte do triângulo de Preisach. Acoplando-se essa função ao modelo de Preisach, o resultado obtido é mostrado na Figura 5.4(b). O resultado apresenta um perfil de histerese que se aproxima com boa concordância dos resultados experimentais analisados.

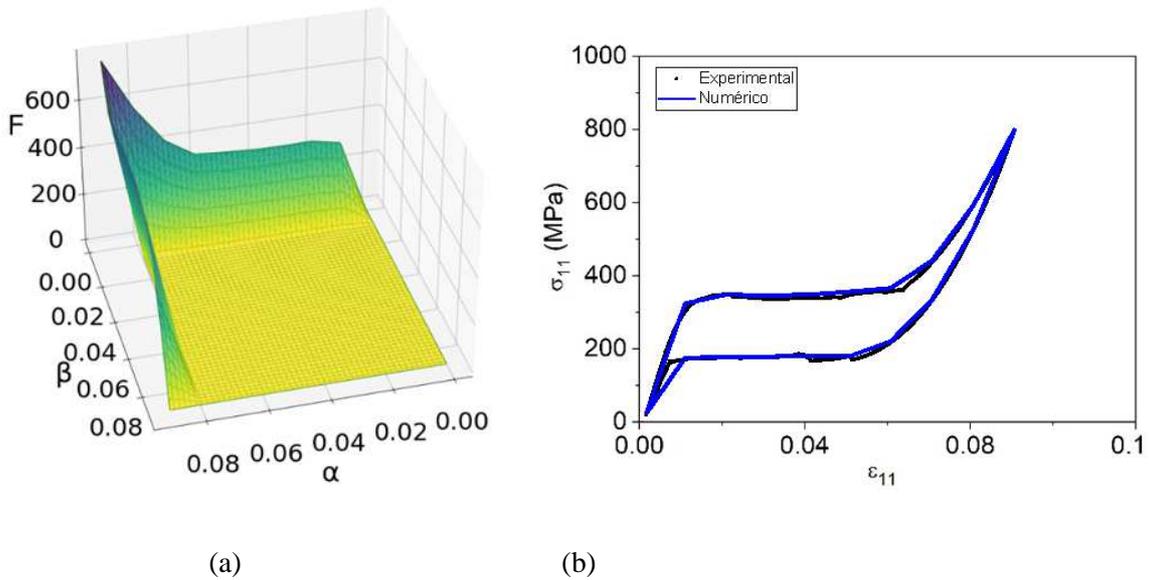
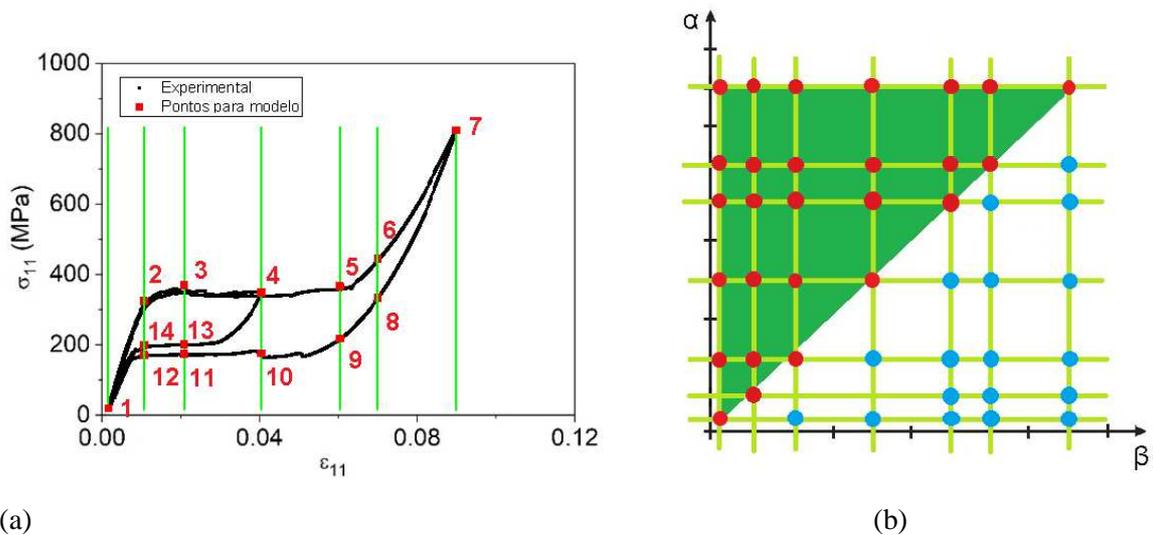


Figura 5.4: Resultado para a divisão do espaço tensão-deformação em nove regiões.

(a) Função de Everett. (b) Comparativo numérico-experimental.

Considerando esses resultados como base, são adotadas nove partições para a implementação do modelo considerando os dados experimentais do Capítulo 3. Esse valor encontra-se de acordo com os dados da literatura que consideram um número de divisões entre oito e quinze (DEL HOYO, 2005) para a adequada representação do comportamento macroscópico das ligas com memória de forma obtido através do modelo de Preisach.

Para que o modelo capture o comportamento no interior do ciclo de histerese, ou seja, os sublaços internos devido a transformações de fase incompletas, faz-se necessário que a função de Everett seja estendida para a região do interior do triângulo de Preisach. Para isso, consideram-se pontos experimentais do interior do ciclo (MAYERGOYZ, 2003, DEL HOYO, 2005). A Figura 5.5(a) mostra seis divisões, o que leva o sublaço ser interceptado por quatro retas verticais. A Figura 5.5(b) mostra os pontos no espaço de Preisach. Os pontos experimentais que são utilizados no modelo são diretamente determinados e possuem as coordenadas dadas na Tabela 5.3.

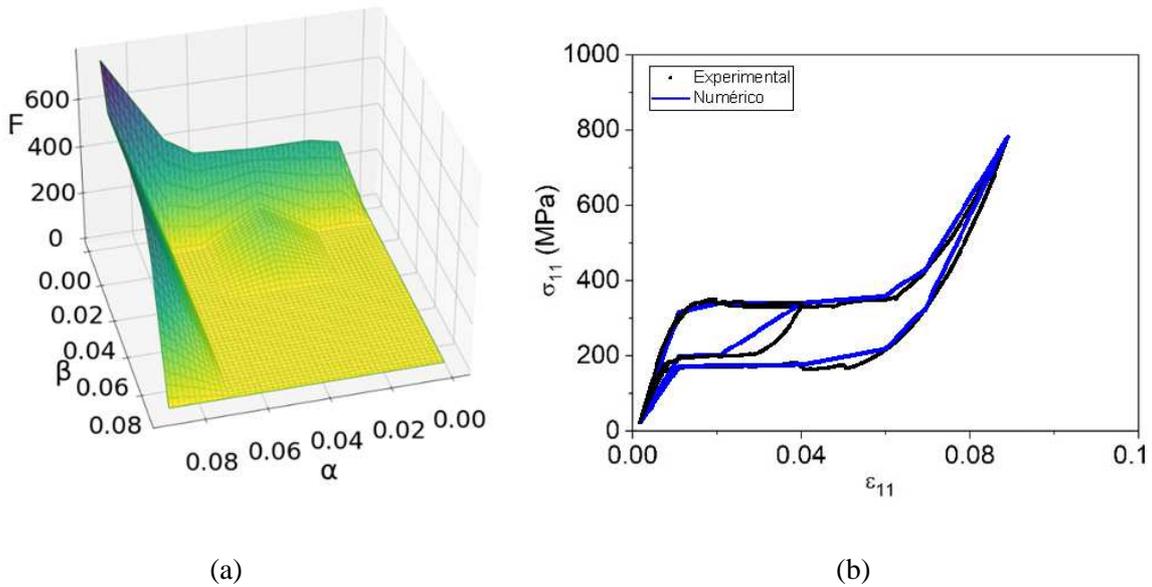


(a) *Divisão do espaço tensão-deformação contendo o laço externo e um sublaço em seis regiões.* (b) *Espaço de Preisach associado.*

Tabela 5.3: Pontos experimentais a serem utilizados no modelo.

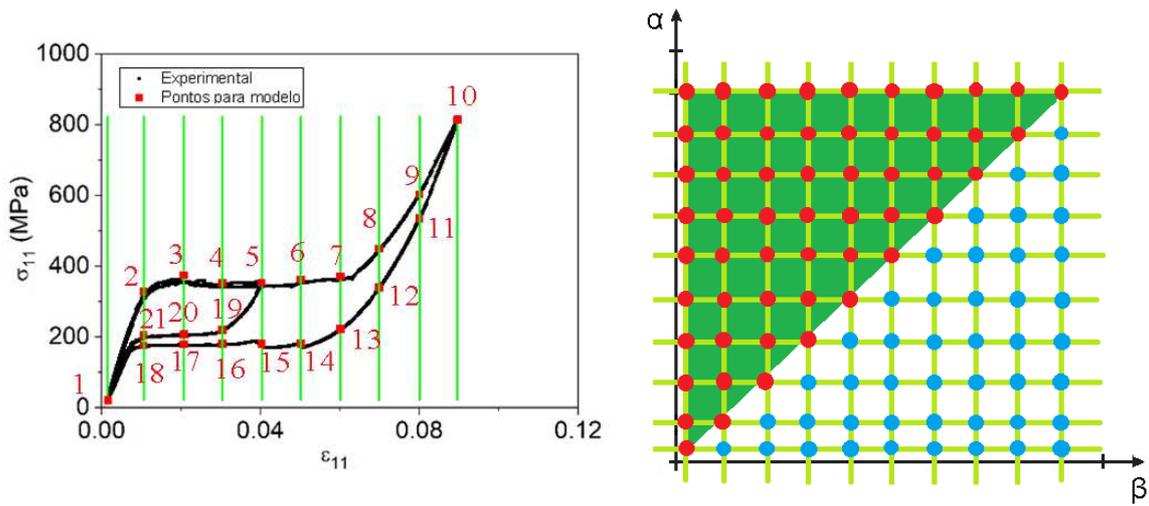
Ponto	Deformação	Tensão (MPa)
1	0,000652	0,764
2	0,01	306,4
3	0,02	352,2
4	0,04	331,6
5	0,06	349,8
6	0,07	427,0
7	0,09	791,6
8	0,07	317,2
9	0,06	201,2
10	0,04	159,2
11	0,02	157,2
12	0,01	154,4
13	0,02	185,3
14	0,01	182,4

A superfície de Everett obtida é mostrada na Figura 5.6(a). É possível observar que, além da envoltória de parte do triângulo de Preisach, a função de Everett apresenta valores diferentes de zero para uma região no interior do triângulo de Preisach, que corresponde ao sublaço considerado. A Figura 5.6(b) apresenta o comparativo numérico-experimental do laço externo e do sublaço, mostrando que o modelo numérico representa uma razoável aproximação, com discrepâncias.



(a) (b)
 Figura 5.6: Resultado para a divisão do espaço tensão-deformação contendo o laço externo e um sublaço em seis regiões. (a) Função de Everett. (b) Comparativo numérico-experimental.

Esse resultado pode ser melhorado através do aumento do número de divisões. A Figura 5.7(a) mostra a nova malha com nove divisões e o sublaço interceptado por cinco retas verticais. A malha gerada no plano de Preisach, Figura 5.7(b), é a mesma da Figura 5.3(b), pois o número de divisões é o mesmo. As coordenadas dos pontos experimentais utilizados no modelo são apresentadas na Tabela 5.4.



(a) Divisão do espaço tensão-deformação contendo o laço externo e um sublaço em nove regiões. (b) Espaço de Preisach associado.

Figura 5.7: (a) Divisão do espaço tensão-deformação contendo o laço externo e um sublaço em nove regiões. (b) Espaço de Preisach associado.

Tabela 5.4: Pontos experimentais a serem utilizados no modelo.

Ponto	Deformação	Tensão (MPa)
1	0,000652	0,764
2	0,01	306,4
3	0,02	352,2
4	0,03	330,0
5	0,04	331,6
6	0,05	340,1
7	0,06	349,8
8	0,07	427,0
9	0,08	581,0
10	0,09	791,6
11	0,08	514,0
12	0,07	317,2
13	0,06	201,2
14	0,05	159,2
15	0,04	159,2
16	0,03	158,8
17	0,02	157,2
18	0,01	154,4
19	0,03	197,1
20	0,02	185,3
21	0,01	182,4

A superfície de Everett é mostrada na Figura 5.8(a). Observa-se que ela possui um perfil mais complexo e houve uma maior definição da região que corresponde aos

dados do sublaço considerado, ou seja, a região interna ao triângulo de Preisach. Acoplado esta função ao modelo de Preisach implementado, o resultado é mostrado na Figura 5.8(b). Observa-se que com o refinamento da superfície de Everett o resultado numérico obtido para o laço externo e para o sublaço melhoraram, ficando bem próximo dos resultados experimentais. Esse refinamento foi obtido aumentando-se o número de partições no espaço tensão-deformação, o que implicou em um aumento de nós da malha sobre o triângulo de Preisach.

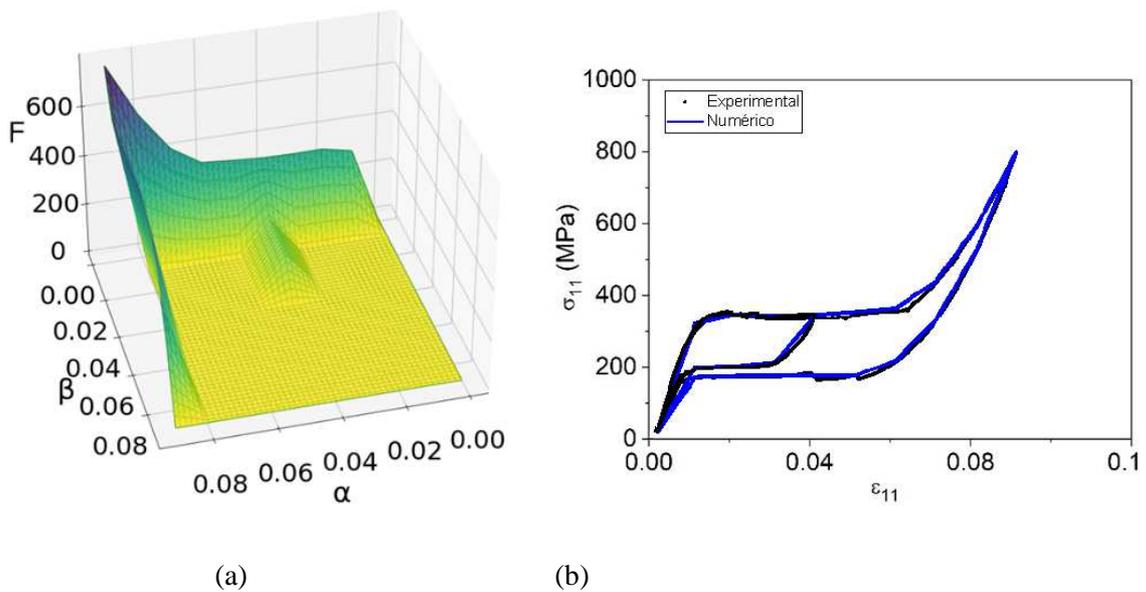


Figura 5.8: Resultado para a divisão do espaço tensão-deformação contendo o laço externo e um sublaço em nove regiões. (a) Função de Everett. (b) Comparativo numérico-experimental.

5.2 Testes Pseudoelásticos

A função de Everett é construída a partir dos dados experimentais adotando nove divisões na região de histerese conforme mostrado na Figura 5.9(a). Essa combinação de sublaços e divisões geram 54 pontos experimentais que são utilizados para a construção da função de Everett, conforme procedimento apresentado no Capítulo 4. A função de Everett encontra-se definida em toda região sobre o triângulo de Preisach, conforme mostrado na Figura 5.9(b). O resultado numérico é apresentado na Figura 5.9(c)

mostrando que as nove divisões são suficientes para o modelo capturar tanto o laço externo como os sublaços.

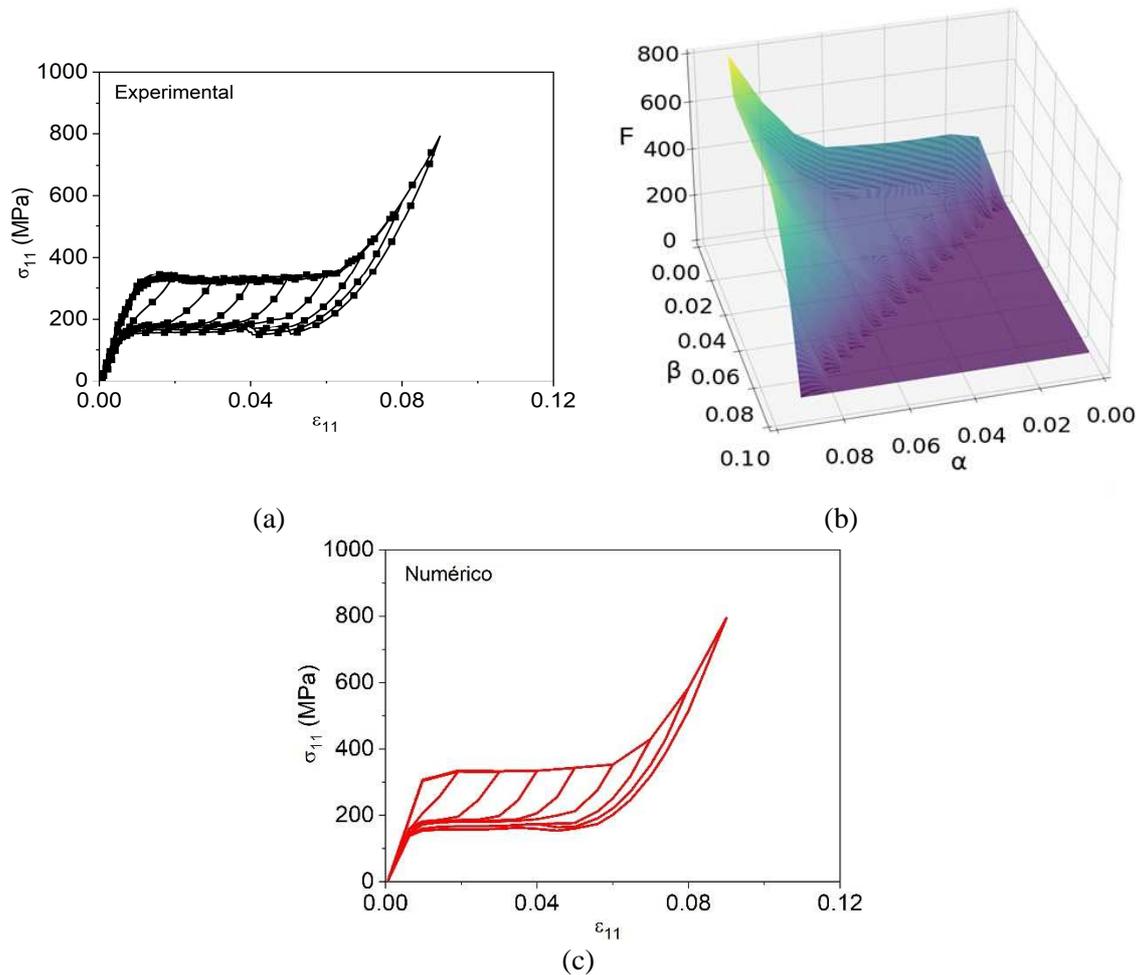


Figura 5.9: Comportamento pseudoelástico de um fio de NiTi durante ensaios de tração, taxa de deformação de 0,5%/min. (a) Resultado experimental; (b) Superfície de Everett; (c) Resultado numérico

Para aprofundar a verificação dos resultados, é realizada uma comparação entre as curvas experimentais e as curvas obtidas numericamente. A Figura 5.10 mostra essa comparação realizada para os ciclos 2, 4, 6 e 9 (laço externo). Os resultados mostram que o modelo é capaz de representar satisfatoriamente o comportamento pseudoelástico das ligas com memória de forma. Além disso, mostra que a utilização de nove divisões para a construção da função de Everett é adequada.

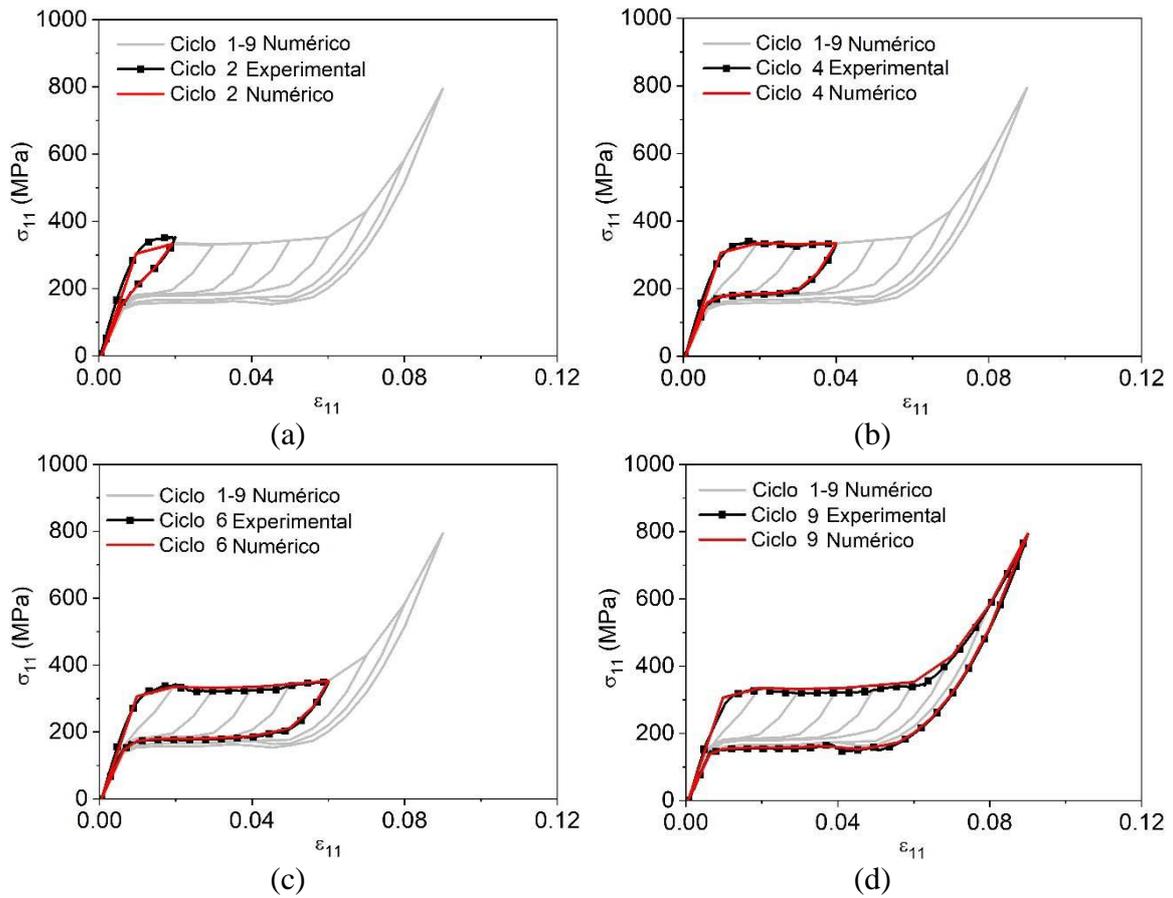


Figura 5.10: Comportamento pseudoelástico de um fio de NiTi durante ensaios de tração. Comparativo numérico-experimental para diferentes ciclos, taxa de deformação de 0,5%/min. (a) ciclo 2; (b) ciclo 4; (c) ciclo 6; (d) ciclo 9.

Outros testes experimentais apresentados no Capítulo 3 são avaliados a partir da mesma função de Everett. No primeiro teste é analisado se o modelo é capaz de capturar um sublaço, conforme mostrado na curva experimental da Figura 5.11(a). O resultado numérico é apresentado na Figura 5.11(b) e o comparativo numérico-experimental, na Figura 5.11(c), demonstrando uma boa concordância entre os resultados obtidos.

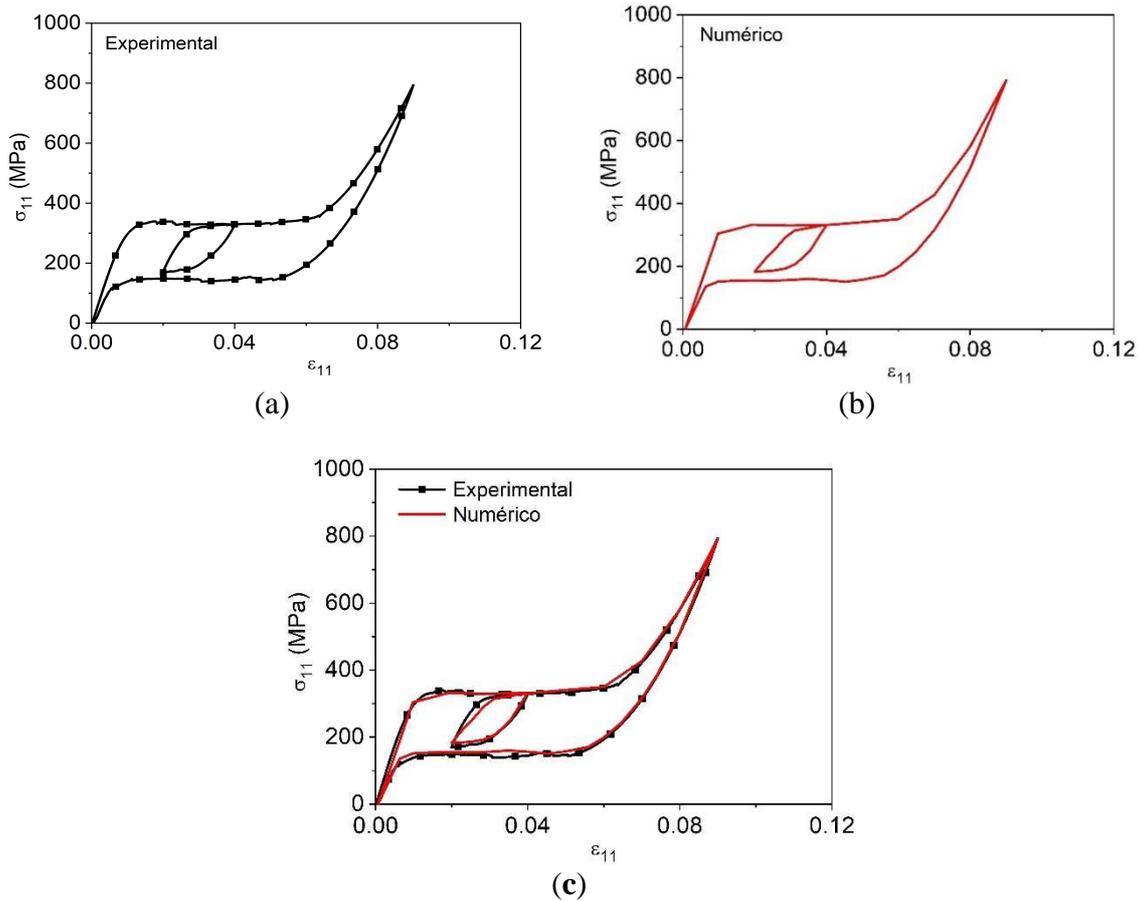


Figura 5.11: Comportamento pseudoelástico de um fio de NiTi durante ensaios de tração, taxa de deformação de 1%/min. (a) resultado experimental; (b) resultado numérico; (c) Comparativo numérico-experimental.

No segundo teste verifica-se a capacidade do modelo representar dois sublaços, conforme resultado experimental da Figura 5.12(a). A Figura 5.12(b) mostra o resultado numérico e a Figura 5.12(c) a comparação numérico-experimental. Mais uma vez, é possível observar uma boa concordância entre os resultados.

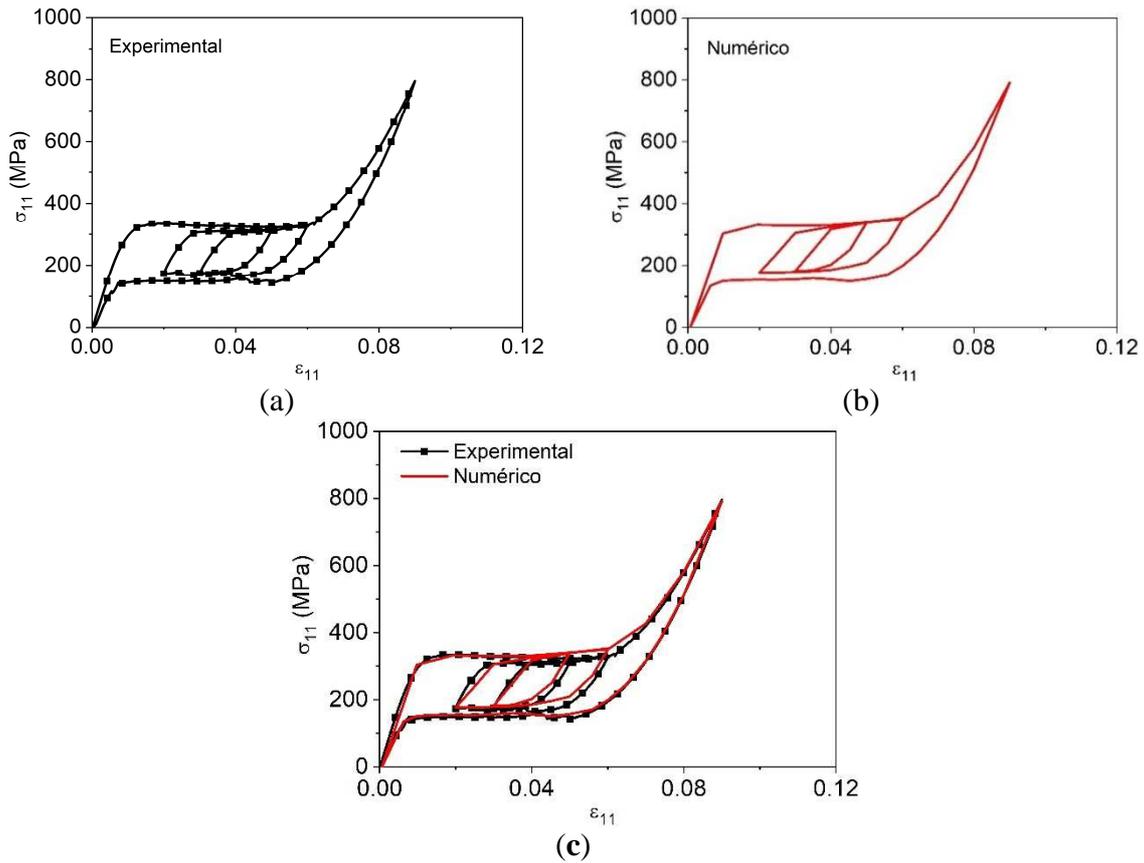


Figura 5.12: Comportamento pseudoelástico de um fio de NiTi durante ensaios de tração, taxa de deformação de 0,5%/min. (a) resultado experimental; (b) resultado numérico obtido pelo modelo constitutivo; (c) Comparativo numérico-experimental.

5.3 Curvas Temperatura-deformação

A histerese das curvas temperatura-deformação em SMAs é analisada considerando os resultados experimentais apresentados por XIAOYU QUIN *et al.*(2019). Nesse trabalho os autores estudaram a fadiga estrutural e funcional de fios de NiTi, com porcentagem de elementos de 49.8% de Ni e 50.2% deTi, submetidos a diversos carregamentos térmicos. Os fios possuíam 0.3 mm de diâmetro, sendo produzidos pelo fabricante “Grikin Advanced Materials Co., Ltd.” Todas as amostras sofreram tratamento térmico a 470 °C por 10 minutos, seguido por resfriamento ao ar. As temperaturas de transformação foram determinadas por testes DSC (*Differential*

Scanning Calorimetry). Esses fios foram cortados, padronizando os comprimentos em 100 mm, e treinados por dez ciclos variando-se a temperatura entre a temperatura de interesse, 95 °C, e a temperatura de 20 °C. A Figura 5.13(a) mostra o laço de histerese externo do último ciclo de treinamento. Observa-se que o perfil de histerese é diferente do perfil do caso pseudoelástico, pois reduzindo a temperatura (variável independente) a deformação (variável dependente) aumenta e aumentando a temperatura, a deformação diminui. Para esse caso, ajusta-se o triângulo de Preisach para que a função de Everett capture a histerese associada, conforme mostrado na Figura 5.13(b).

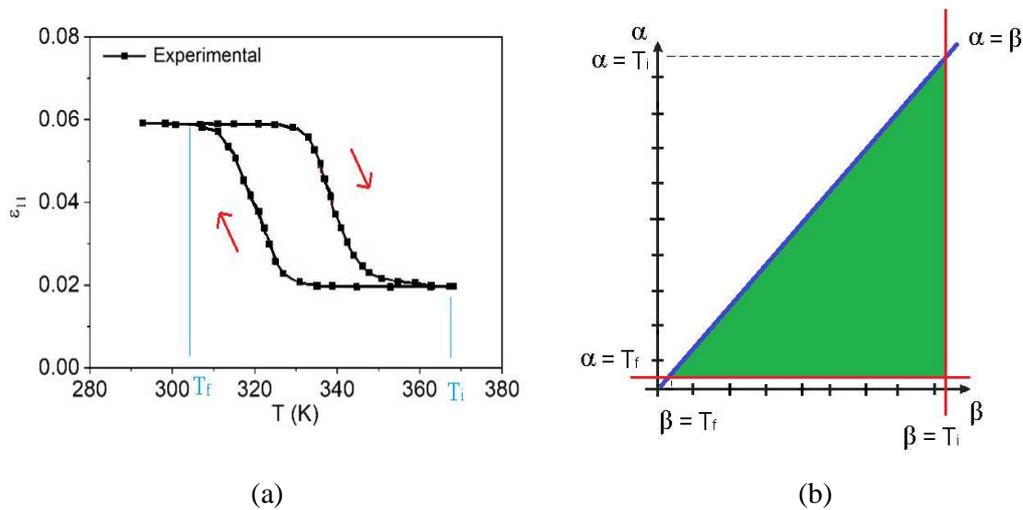


Figura 5.13: Ensaio cíclico térmico sob carga uniaxial constante, baseado no ensaio experimental proposto por XIAOYU QUIN et al. (2019). (a) Dados experimentais; (b) Triângulo de Preisach associado.

Dividindo-se a histerese da Figura 5.13(a) em nove regiões, são obtidos dezoito pontos experimentais, com os quais a função de Everett é construída. Como somente pontos experimentais do laço externo estão disponíveis, a função de Everett apresenta-se como uma envoltória de parte da região do triângulo de Preisach, conforme ilustrado na Figura 5.14(a). A Figura 5.14(b) mostra a comparação entre o resultado numérico e o experimental, apresentando uma boa concordância.

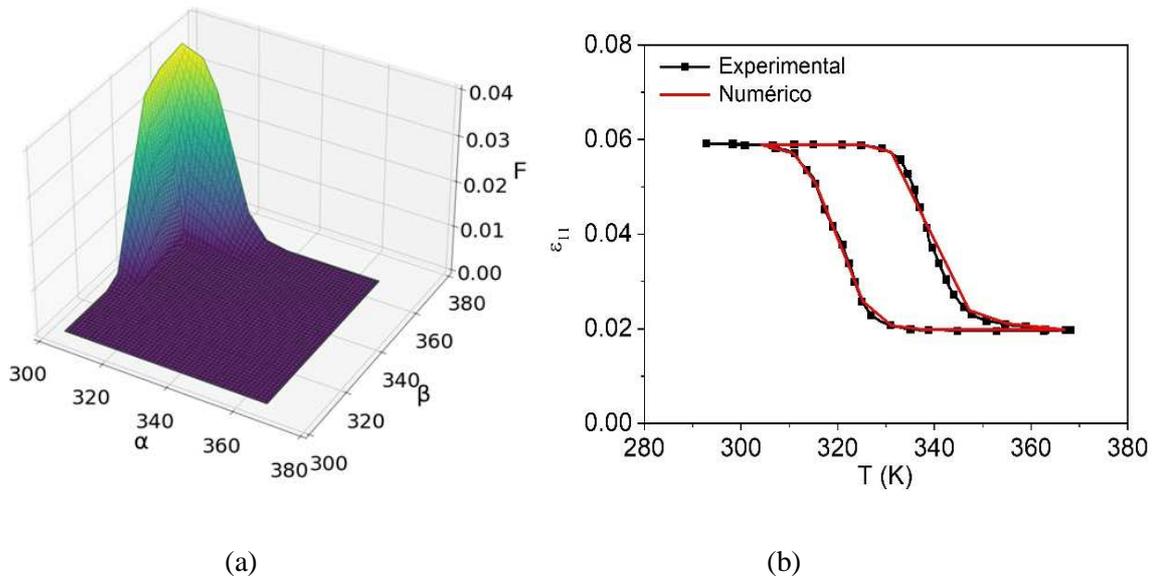


Figura 5.14:(a)Superfície de Everett associada ao ensaio experimental proposto por XIAOYU QUIN *et al.* (2019).(b) Comparativo numérico-experimental.

5.4 Mola Helicoidal

Considere uma mola helicoidal que é macroscopicamente caracterizada através de curvas força-deslocamento. Considere inicialmente os resultados experimentais obtidos por SAVI *et al.* (2015), onde testes pseudoelásticos foram realizados para dois tipos de mola avaliando o efeito de não-linearidades geométricas. Neste trabalho consideram-se os testes realizados com a mola “S”, caracterizada por não possuir efeitos da não-linearidade geométrica. A mola é construída a partir de um fio de NiTi de 1.7 mm de diâmetro e, depois de fabricada, foi tratada termicamente a 500 °C por trinta minutos e resfriada a água. O teste para caracterizar o comportamento pseudoelástico da mola foi realizado em uma máquina “INSTRON 5966”, com uma célula de carga de 1kN, deslocamento prescrito, a uma taxa de carregamento de 100 mm / min. A Figura 5.15(a) mostra a curva força-deslocamento da mola e a Figura 5.15(b) o triângulo de Preisach associado.

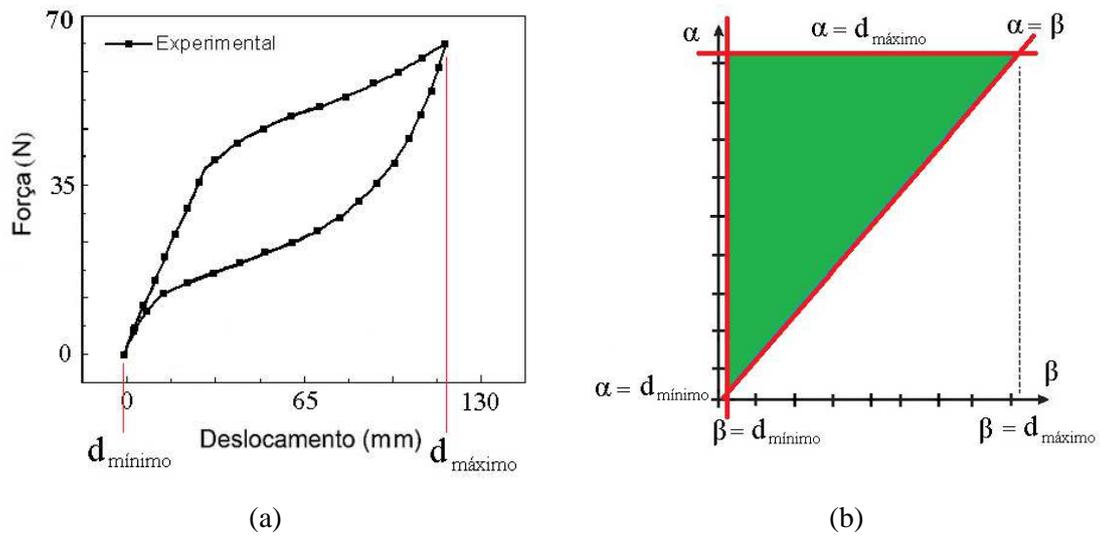
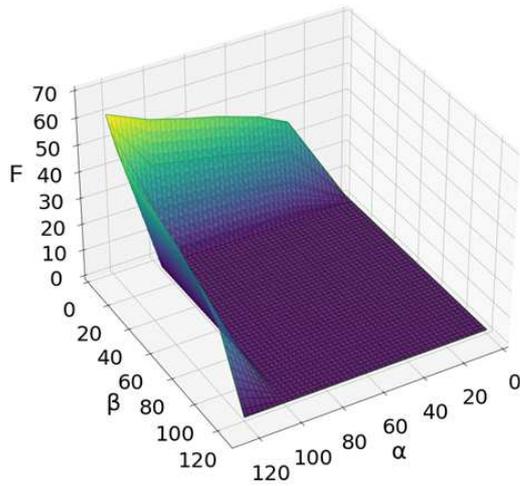
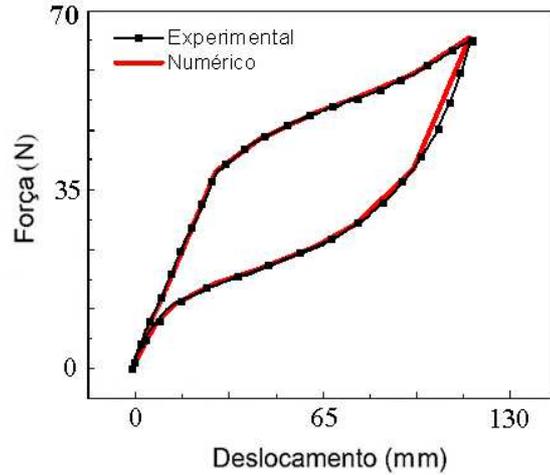


Figura 5.15: Ensaio proposto por SAVI et al. (2015). (a) Resultado experimental para o ciclo externo do comportamento pseudoelástico de uma mola “S”. (b) Triângulo de Preisach associado.

Dividindo-se a região de histerese da Figura 5.15(a) em nove regiões, são obtidos dezoito pontos experimentais, com os quais a função de Everett é construída. A função de Everett apresenta-se como uma envoltória de parte da região do triângulo de Preisach, pois somente pontos experimentais do laço externo foram considerados, conforme ilustrado na Figura 5.16(a). A Figura 5.16(b) mostra a comparação entre o resultado numérico obtido e o experimental. O resultado encontrado apresenta boa concordância.



(a)



(b)

Figura 5.16: Superfície de Everett associada ao ensaio experimental proposto por SAVI et al. (2015). (b) Comparativo numérico-experimental.

Neste ponto, consideram-se os resultados experimentais apresentados por KHAN & LAGOUDAS (2002) para uma mola de NiTi submetida à compressão, com um deslocamento variando de zero a quatro milímetros. Os testes foram realizados em uma máquina servo-hidráulica “MTS” com um controlador “Test Star Ilm”, a uma temperatura ambiente de 25 °C. A Figura 5.17(a) mostra a curva força-deslocamento e a Figura 5.17(b) o triângulo de Preisach associado. O triângulo é ajustado para que a função de Everett capture a histerese associada a compressão adequadamente.

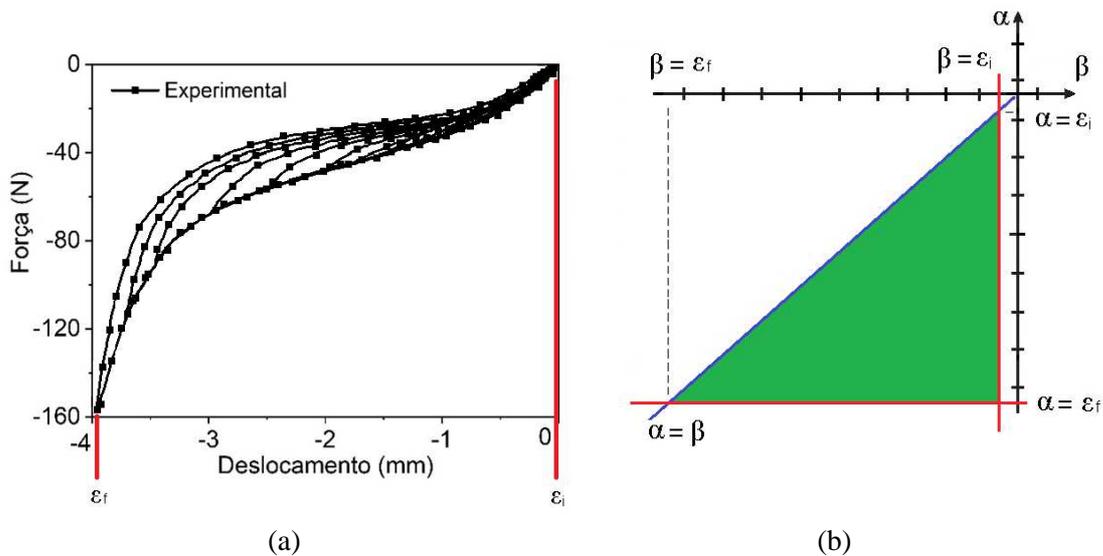


Figura 5.17: Ensaio realizado por KHAN E LAGOUDAS (2002). (a) resultado experimental. (b) Triângulo de Preisach associado.

Considerando doze curvas, são obtidos quarenta e cinco pontos experimentais, o que permite construir a função de Everett. A Figura 5.18 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra a função de Everett de onde observa-se valores diferentes de zero para toda a região do triângulo de Preisach da Figura 5.17(b).

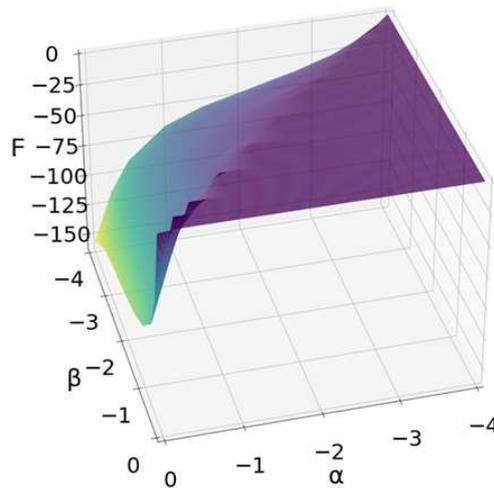


Figura 5.18: Superfície de Everett associada ao ensaio experimental proposto por KHAN E LAGOUDAS (2002).

A Figura 5.19 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**(a) mostra o comparativo numérico-experimental de todas as curvas (onze sublaços mais o laço

externo) e a Figura 5.19 Erro! Fonte de referência não encontrada. (b) mostra o comparativo numérico-experimental apenas para o laço externo para facilitar a visualização do comparativo proposto. Ambas as figuras demonstram que os resultados estão em consonância.

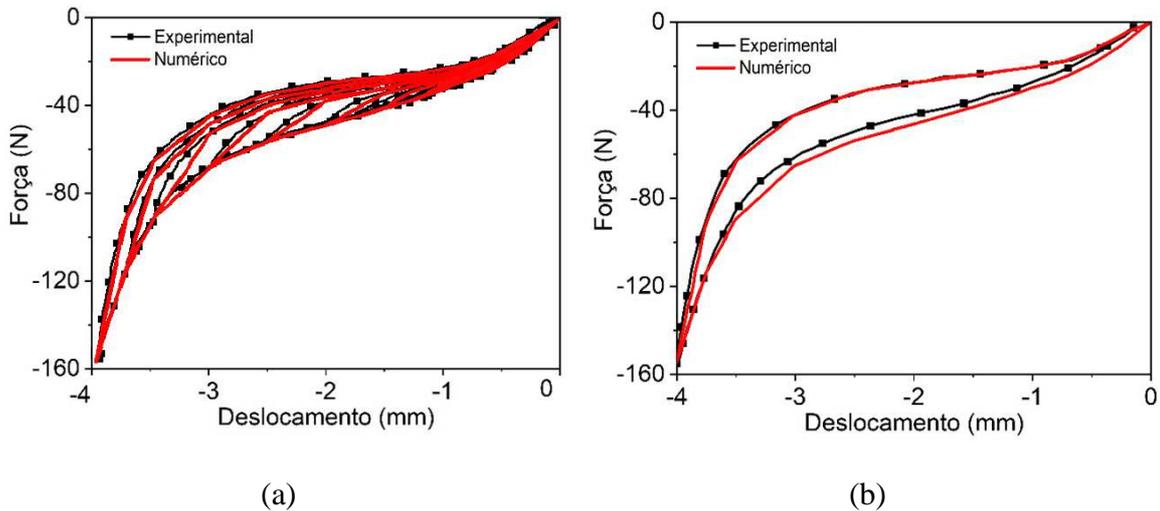


Figura 5.19: Comparativo numérico-experimental baseado no teste experimental de KHAN E LAGOUDAS (2002). (a) comparativo numérico-experimental com doze ciclos; (b) comparativo numérico-experimental apenas do laço externo para facilitar a visualização do comparativo proposto.

5.4.1 Assimetria Tensão-compressão

Considereos resultados experimentais apresentados por SPEICHER *et al.* (2009), onde os autores propuseram um dispositivo que permitiu que molas de SMA fossem submetidas a tração e a compressão. Esse dispositivo encontra-se ilustrado na Figura 2.16. Os dados experimentais utilizados foram referentes ao dispositivo que utilizava uma mola helicoidal de diâmetro de 3.81 cm, comprimento inicial de 2.98 cm e capacidade de deformação de 4.57 cm. A mola foi construída a partir de fios de NiTi aquecidos até aproximadamente 650 °C – 700 °C, posteriormente dobrados em um mandril para se atingir o formato helicoidal. Essas molas foram então submetidas a um tratamento térmico a fim de uniformizar as propriedades. A Figura 5.20(a) mostra os dados do experimento para os ciclos de maior carga.

Para capturar esse comportamento, a tração e a compressão pseudoelástica foram combinadas e os limites do triângulo de Preisach foram estabelecidos, conforme ilustrado na Figura 5.20(b). Nessa figura, a região do triângulo de Preisach em azul é o domínio em que a função de Everett corresponde a região linear que liga os ciclos de histerese da tração e da compressão. Observa-se também que o triângulo inferior que corresponde a compressão pseudoelástica (α e β negativos) é ajustado para que a função de Everett capture a histerese associada a compressão adequadamente.

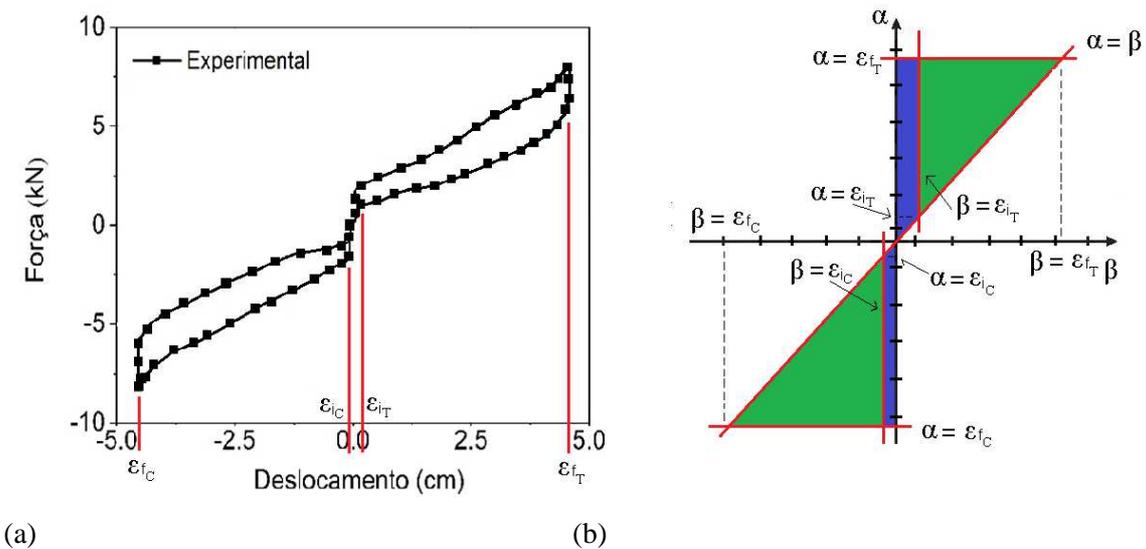


Figura 5.20: Ensaio proposto por SPEICHER et al. (2009). (a) Resultado experimental para os ciclos externos de tração e compressão; (b) Triângulo de Preisach associado. O índice T indica tração e o índice C indica compressão.

Considerando dezenove divisões do espaço força-deslocamento, foram obtidos 37 pontos experimentais, inclusive na região linear entre os ciclos de histerese. A função de Everett é mostrada na Figura 5.21(a) e (b). Como foram considerados dados experimentais apenas dos laços externos da histerese, a função de Everett é uma envoltória de parte dos triângulos da Figura 5.20(b).

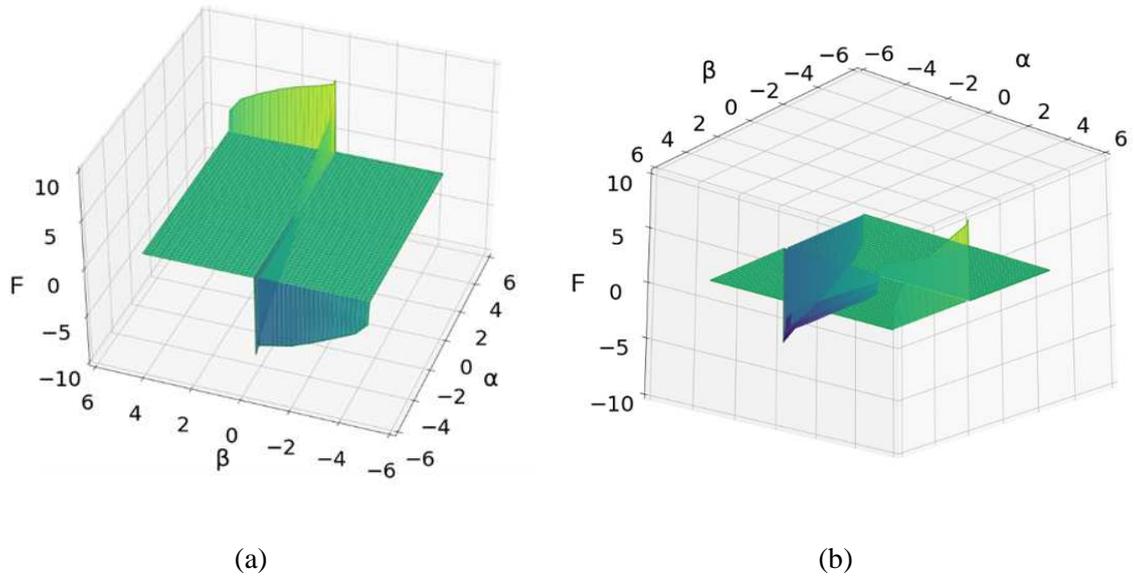


Figura 5.21: Superfície de Everett baseada no ensaio experimental proposto por SPEICHER et al. (2009). (a) Vista superior. (b) Vista inferior.

A Figura 5.22 mostra a comparação entre o resultado numérico obtido e o experimental, demonstrando boa semelhança. É possível observar também que o modelo captura inclusive o comportamento linear externo a região de histerese.

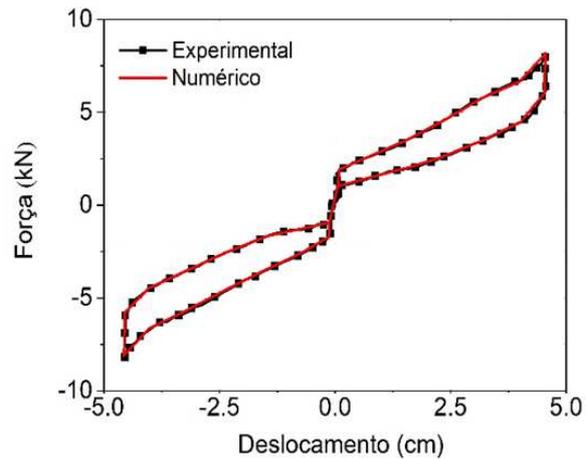


Figura 5.22: Comparativo numérico-experimental baseado no teste de SPEICHER et al. (2009).

6 CONCLUSÕES

As ligas com memória de forma apresentam uma série de propriedades termomecânicas complexas, as quais permitem a sua aplicação nas mais diversas áreas. Para melhor compreender a resposta desses materiais, foram realizados ensaios experimentais em um fio de NiTi. Inicialmente, foi realizada a caracterização do fio através de um ensaio DSC a fim de se estimar as temperaturas de mudança de fase. Esse ensaio somando a ensaios de tração a temperatura ambiente e à baixa temperatura confirmaram que o fio apresenta comportamento pseudoelástico à temperatura ambiente e efeito memória de forma à baixas temperaturas. Em seguida um procedimento de treinamento foi conduzido para estabilizar a deformação TRIP e avaliar as propriedades funcionais do material considerando o ciclo estabilizado. Por fim, foram realizados uma série de testes cíclicos, utilizando a amostrada treinada, para se avaliar o comportamento pseudoelástico desse material sob diferentes condições de carregamento. Motivado por esses ensaios, foi realizada uma investigação no modelo constitutivo proposto por KHAN & LAGOUDAS (2002) que captura o comportamento pseudoelástico das SMAs. Esse modelo, desenvolvido a partir do modelo de histerese de Preisach clássico, relaciona o espaço de fase tensão-deformação (ou força-deslocamento) com um novo espaço de fase através de um polinômio composto de parcelas que são obtidas considerando a função de Everett. Para a obtenção dessa função são necessários dados experimentais. Nesse contexto, esse trabalho desenvolveu um procedimento para a construção dessa função considerando diferentes cenários.

Os resultados numéricos quasi-estáticos obtidos através do modelo foram divididos em duas etapas. Na primeira realizou-se uma análise da função de Everett e uma verificação do modelo através de um comparativo numérico-experimental com os dados experimentais obtidos ao longo desse trabalho, que foram utilizados para a construção da função de Everett. Em seguida, foram realizados outros comparativos numérico-experimentais considerando sublaços internos devido à transformação incompleta de fase. Deve-se destacar nesse momento a boa concordância entre os resultados apresentados demonstrando a capacidade do modelo em representar o comportamento geral pseudoelástico apresentado pelas ligas com memória de forma.

Na última parte deste trabalho, foi proposta alterações nos parâmetros do modelo e a função de Everett foi ajustada para que os comportamentos temperatura-deformação, pseudoelasticidade associada a mola helicoidal e assimetria tensão-compressão fossem capturados. Resultados experimentais obtidos na literatura foram utilizados para a construção das funções de Everett associadas a cada comportamento e para a verificação dos resultados numéricos. De maneira similar aos resultados discutidos inicialmente, a comparação numérico-experimental desses comportamentos apresentou boa concordância. Além disso, foi observado que a função de Everett é capaz de capturar o comportamento elástico das fases austenita e martensita observados durante os carregamentos apresentados.

O modelo constitutivo estudado nesse trabalho representa uma contribuição para o melhor entendimento do comportamento termomecânico das SMAs. Contudo análises futuras ainda são necessárias a fim de se verificar a possibilidade de novas alterações serem implementadas no modelo para que outros comportamentos das SMAs sejam capturados, como, por exemplo, o efeito memória de forma e a estabilização da deformação TRIP.

Além disso, o modelo possui potencial considerável para ser explorado na análise dinâmica de elementos de SMA, tais como molas atuando como elementos estruturais e absorvedores de vibração de equipamentos mecânicos.

Outra interessante pesquisa seria a aplicação do modelo de Preisach como modelo constitutivo de diferentes materiais inteligentes como por exemplo os materiais piezoelétricos.

De uma maneira geral, o modelo constitutivo para as SMAs obtido a partir do modelo de histerese de Preisach clássico representou com boa aproximação o comportamento das SMAs, preservando as vantagens do modelo de Preisach, como a implementação numérica mais simples quando comparado aos modelos baseados na termodinâmica do problema. O modelo mostrou ser uma aproximação interessante para descrever o comportamento termomecânico das SMAs podendo servir como base teórica em diversas aplicações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADEODATO, A.; VIGNOLI, L.L.; PAIVA, A., MONTEIRO, L.L.S., PACHECO, P.M.C.L, SAVI, M.A, “A Shape Memory Alloy Constitutive Model with Polynomial Phase Transformation Kinetics”, **Shape Memory and Superelasticity**, pp.1–18, 2022.

ADLY, A. A.; MAYERGOYZ, I. D.; BERGQVIST, "A. Preisach Modeling of Magnetostrictive Hysteresis." **Journal of Applied Physics**, v. 69, n° 8, pp. 5777-5779, 1991.

AL-HUMAIRI, S. N. S., “Cu-Based Shape Memory Alloys: Modified Structures and Their Related Properties”, **Recent Advancements in the Metallurgical Engineering and Electrodeposition**, v. 25, pp. 25-54, 2020.

AL JANAIDEH, M.; RAKHEJA, S., SU, C.Y., “A Generalized Prandtl–Ishlinskii Model for Characterizing the Hysteresis and Saturation Nonlinearities of Smart Actuators”, **Smart Materials and Structures**, v.18, n° 4, 045001, 2009.

AL JANAIDEH, M.; SU, C.Y.; RAKHEJA, S., “Development of the Rate-dependent Prandtl–Ishlinskii Model for Smart Actuators”. **Smart Materials and Structures**, v. 17, n° 3, 035026, 2008.

AMOR, Y.O., FELIACHI, M., MOHELLEBI, H.; "A New Convergence Procedure for the Finite Element Computing Associated to Preisach Hysteresis Model", **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 36, n° 4, pp. 1242-1245, 2000.

ARGHAVANI, J.; AURICCHIO, F.; NAGHDABADI, R.; REALI, A.; SOHRABPOUR, S., “A 3-D Phenomenological Constitutive Model for Shape Memory Alloys Under Multiaxial Loadings”, **International Journal of Plasticity**, v.26, n° 7, pp. 976–991, 2010.

ASTM F2063-18. **Standard Specification for Wrought Nickel-Titanium Shape Memory Alloys for Medical Devices and Surgical Implants**.ASTM International. West Conshohocken. 2018.

AURICCHIO, F.; PETRINI, L., “A Three - dimensional Model Describing Stress - temperature Induced Solid Phase Transformations: Thermomechanical Coupling and Hybrid Composite Applications” , **Int. J. Numer. Meth. Engng.**, v.61, n° 5, pp. 716– 737, 2004.

AURICCHIO, F.; REALI, A.; STEFANELLI, U., “A Three-dimensional Model Describing Stress-induced Solid Phase Transformation with Permanent Inelasticity”, **International Journal of Plasticity**, v.23, n° 2, pp. 207–226, 2007.

AURICCHIO, F.; SACCO, E., “A One-dimensional Model for Superelastic

Shapememory Alloys with Different Elastic Properties Between Austenite and Martensite”, **International Journal of Non-Linear Mechanics**, v.32, n° 6, pp. 1101–1114, 1997.

BALASUBRAMANIAN, M.; SRIMATH, R.; VIGNESH, L.; RAJESH, S., “Application of Shape Memory Alloys in Engineering – A review”. In: **Journal of Physics: Conference Series**, IOP Publishing, 2021, pp. 012078.

BAE SYSTEMS. **Ironclad Beetles Inspire New “Memory” Metal Suspension for Military Vehicles**, 2023. Disponível em: <www.baesystems.com/en/article/ironclad-beetles-inspire-new--memory--metal-suspension-for-military-vehicles> Acesso em: 11 de maio de 2023.

BENABOU, A.; “**Contribution à la Caractérisation et à la Modélisation de Matériaux Magnétiques en Vue D’Une Implantation Dans Un Code de Calcul de Champ**”, Ph.D. Thesis, École Doctorale Des Sciences Pour L’Ingénieur – Université des Sciences et Technologies de Lille I (in French). France, Déc. 2002.

BRINSON, L. C., “One-dimensional Constitutive Behavior of Shape Memory Alloys: Thermomechanical Derivation with Non-constant Material Functions and Redefined Martensite Internal Variable”, **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v.4, n° 2, pp. 229–242, 1993.

BROCCA, M.; BRINSON, L. C.; BAŽANT, Z. P., “Three-dimensional Constitutive Model for Shape Memory Alloys Based on Microplane Model”, **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, v.50, n° 5, pp. 1051–1077, 2002.

CHANG, W.; ARAKI, Y., “Use of Shape-memory Alloys in Construction: A Critical Review”, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering*.v.169, n°2, pp. 87-95, 2016.

CHEMISKY, Y.; HARTL, D.J.; MERAGHNI, F., “Three-dimensional Constitutive Model for Structural and Functional Fatigue of Shape Memory Alloy Actuators”, **International Journal of Fatigue**, v. 112, pp. 263–278, 2018.

CHEN, Y.; SHEN, X.; LI, J.; CHEN, J., “Nonlinear Hysteresis Identification and Compensation Based on the Discrete Preisach Model of an Aircraft Morphing Wing Device Manipulated by an SMA Actuator”, **Chinese Journal of Aeronautics**, v. 32, n° 4, pp. 1040-1050, 2019.

CHOWDHURY, P.; “Frontiers of Theoretical Research on Shape Memory Alloys: A General Overview”,**Shape Memory Superelasticity**, v.4, pp.26–40, 2018.

CISSE, C.; ZAKI, W.; ZINEB, T.B.;“A Review of Constitutive Models and Modeling Techniques for Shape Memory Alloys”,**International Journal of Plasticity**, v.76, pp. 244-284, 2015.

CZECHOWICZ, A.; LANGBEIN, S., "Introduction to Shape Memory Alloy

Technology", In: CZECHOWICZ, A.; LANGBEIN, S. **Shape Memory Alloy Valves Basics, Potentials, Design**. Cham: Springer, 2015. Cap. 3, p. 23–40.

DAVINO, D.; NATALE, C.; PIROZZI, S.; VISIONE, C., "Phenomenological Dynamic Model of a Magnetostrictive Actuator." **Physica B: Condensed Matter**, v. 343, n° 1-4, pp. 112-116, 2004.

DE SOUZA, V. F.; SAVI, M. A.; SILVA MONTEIRO, L. L. S., et al., "Phenomenological modeling of the thermo-magneto-mechanical behavior of magnetic shape memory alloys", **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v.29, n. 19, pp. 3696–3709, 2018.

DEL HOYO, A.B.; “**Modelización De La Histéresis Magnética Y Su Aplicación Al Cálculo Numérico Em Máquinas Eléctricas**”, Ph.D. Thesis, Departamento de Ingeniería Eléctrica – Universidad Politécnica de Cataluña (in Spanish). Barcelona – Soria, Nov. 2005.

DONG, Y.; HU, H.; WANG, H., "Identification and Experimental Assessment of Two-input Preisach Model for Coupling Hysteresis in Piezoelectric Stack Actuators.", **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 220, pp. 92-100, 2014.

DORAISWAMY, S.; RAO, A.; SRINIVASA, A.R., “Combining Thermodynamic Principles with Preisach Models for Superelastic Shape Memory Alloy Wires”, **Smart Materials and Structures**, v. 20, n° 8, 085032, 2011.

DORNELAS, V.M., “**Modelagem Constitutiva da Fadiga em Ligas com Memória de Forma**”, Tese de Doutorado, UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Mecânica, 2020a.

DORNELAS, V.M.; OLIVEIRA, S.A.; SAVI, M.A., “A Macroscopic Description of Shape Memory Alloy Functional Fatigue”, **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 170, pp.105345, 2020b.

DORNELAS, V.M.; OLIVEIRA, S.A.; SAVI, M.A.; PACHECO, P.M.C.L.; DE SOUZA, L.F.G., “Fatigue on Shape Memory Alloys: Experimental Observations and Constitutive Modeling”, **International Journal of Solids and Structures**, v. 213, pp. 1–24, 2021.

ENGDAHL, G., **Handbook of Giant Magnetostrictive Materials**. San Diego, Academic Press Inc, 2000.

FALK, F., “Model Free Energy, Mechanics, and Thermodynamics of Shape Memory Alloys”, **Acta Metallurgica**, v. 28, n° 12, pp. 1773–1780, 1980.

FALK, F., “One-dimensional Model of Shape Memory Alloys”, **Archives of Mechanics**, v.35, n°1, pp. 63–84, 1983.

FREMOND, M.; MIYAZAKI, S., **Shape Memory Alloy: A Thermomechanical Macroscopic Theory**. New York, Springer-Verlag Wien, 1996.

GALL, K.; SEHITOGLU, H.; ANDERSON, R.; KARAMAN, I.; CHUMLYAKOV, Y.I., KIREEVA, I.V., "On the Mechanical Behavior of Single Crystal NiTi Shape Memory Alloys and Related Polycrystalline Phenomenon", **Materials Science and Engineering**, v. 317, n° 1-2, pp. 85-92, 2001.

GHASEMI, M.R.; SHABAKHTY, N.; ENFERADI, M.H.; "Vibration Control of Offshore Jacket Platforms Through Shape Memory Alloy Pounding Tuned Mass Damper (SMA-PTMD)", **Ocean Engineering**, v. 197, pp. 106348, 2019.

HARTL, D. J.; LAGOUDAS, D. C., "Aerospace Applications of Shape Memory Alloys", **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering**, v. 221, n° 4, pp. 535–552, 2007.

HUGHES, D.; WEN, J.T.; "Preisach Modeling and Compensation for Smart Material Hysteresis", **SPIE Active Materials and Smart Structures**, v. 2427, pp. 50–64, 1994.

ISALGUE, A.; LOVEY, F. C.; TERRIAULT, P.; MARTORELL, F.; TORRA, R. M.; TORRA, V., SMA for Dampers in Civil Engineering. **Materials Transactions**, v. 47, n° 3, pp. 682-690, 2006.

IKEDA, T., "The Use of Shape Memory Alloys (SMAs) in Aerospace Engineering", **Shape Memory and Superelastic Alloys Technologies and Applications**. Nagoya: Woodhead Publishing Limited, 2011. Cap. 11, pp. 125–140.

IVOŠEVIĆ, Š.; RUDOLF, R.; "Materials with Shape Memory Effect for Applications in Maritime", **Scientific Journal of Polish Naval Academy**, v. 60, 2019.

JANI, M.J.; MARTIN, L.; ALEKSANDAR, S.; MARK, A. G., "A Review of Shape Memory Alloy Research, Applications and Opportunities", **Materials & Design**, v. 56, pp. 1078-1113, 2014.

KHAANDELWAL, A.; BURAVALLA, V.; "Models for Shape Memory Alloy Behavior: An Overview of Modeling Approaches", **INTERNATIONAL JOURNAL OF STRUCTURAL CHANGES IN SOLIDS – Mechanics and Applications**, v.1, n° 1, pp. 111-148, 2009.

KHAN, M.M.; LAGOUDAS, D.; "Modeling of Shape Memory Alloy Pseudoelastic Spring Elements Using Preisach Model for Passive Vibration Isolation", **Smart Structures and Materials 2002: Modeling, Signal Processing, and Control, Proc.**, v. 4693, pp. 336-347, 2002.

KHANDELWAL, A.; BURAVALLA, V., "Models for Shape Memory Alloy Behavior: an Overview of Modeling Approaches", **The International Journal of Structural Changes in Solids**, v.1, n° 1, pp. 11-148, 2009.

KHULIEF, Z.T.; "Applications of Shape Memory Alloys", **Journal of University**

of **Babylon for Engineering Sciences**, v. 28, n° 2, 2020.

KRASNOSEL'SKII, M.A.; POKROVSKII, A.V.; **Systems with Hysteresis**, 1^a ed., Springer-Verlag, New York, NY, 1989.

KTENA, A., FOTIADIS, D.I., SPANOS, P.D., BERGER, A., MASSALAS, C.V.; "Identification of 1D and 2D Preisach Models for Ferromagnets and Shape Memory Alloys", **International Journal of Engineering Science**, v.40, pp. 2235–2247, 2002.

KUHNEN, K. "Modeling, Identification and Compensation of Complex Hysteretic Nonlinearities: A Modified Prandtl-Ishlinskii Approach", **European Journal of Control**, v. 9, n° 4, pp. 407–418, 2003.

LAGOUDAS, C.D., **Shape Memory Alloys – Modeling and Engineering Applications**, 1^a ed., New York, NY, USA, Springer, 2008.

LEO, D. J., **Engineering Analysis of Smart Material Systems**. New Jersey, John Wiley and Sons, 2007.

LI, Z.; SU, C.; CHAI, T., "Compensation of Hysteresis Nonlinearity in Magnetostrictive Actuators with Inverse Multiplicative Structure for Preisach Model.", **IEEE Transactions on Automation Science and engineering**, v. 11, n° 2, pp. 613-619, 2014.

LIANG, H.; ZENG, C.; GIRAUD-AUDINE, C., "Modelling and Simulation of Shape Memory Alloys Micro-actuator", **Fourth International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC) IEEE**, pp. 1405-1408, 2009.

LIU, C. Y.; LIAO, W. H., "A Snake Robot Using Shape Memory Alloys". In: 2004 **IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics**, pp. 601–605, Shenyang, IEEE, 2004.

MACHADO, L.G., SAVI, M.A., "Aplicações Odontológicas das Ligas com Memória de Forma", **Revista Brasileira de Odontologia**, v.59, n° 5, pp.302-306, 2002.

MACHADO, L. G.; SAVI, M. A., "Medical Applications of Shape Memory Alloys", **Brazilian Journal of Medical and Biological Research**, v. 36, n° 6, pp. 683–691, 2003.

MATSUZAKI, Y., FUNAMI, K., NAITO, H.; "Inner Loops of Pseudoelastic Hysteresis of Shape Memory Alloys: Preisach Approach", **Smart Structures and Materials 2002: Active Materials: Behavior and Mechanics**, SPIE, v. 4699, pp. 355-364, 2002.

MAYERGOYZ, I., **Mathematical Models of Hysteresis and Their Applications**, 2^a ed., College Park, USA, ACADEMIC PRESS, 2003.

MAYES, J.J.; LAGOUDAS, D.C.; “An Experimental Investigation of Shape Memory Alloy Springs for Passive Vibration Isolation”, **AIAA Space 2001 Conference and Exposition**, p. 4569, 2001.

NAIR, V. S.; NACHIMUTHU, R., "The Role of NiTi Shape Memory Alloys in Quality of Life Improvement Through Medical Advancements: A Comprehensive Review.", **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine**, v. 236, nº 7, pp. 923-950, 2022.

NASA Glenn Research Center. Reinventing the Wheel, 2017. Disponível em: <https://www.nasa.gov/specials/wheels/>. Acesso em: 02 de Março 2023.

NEMATOLLAHI, M.,M.; BAGHBADERANI, K.S.; AMERINATANZI, A.; ZAMANIAN, H.; ELAHINIA, M.,“Application of NiTi in Assistive and Rehabilitation Devices: AReview.” **Bioengineering**, v. 6, nº 2, pp. 37, 2019.

NISHIMURA, F., WATANABE, N.; TANAKA, K., “Uniaxial Transformation Behavior in Tension and Compression in an Fe-Based Shape Memory Alloy: Transformation Lines and Thermomechanical Hystereses”, **JournalOf Physique IV**, v. 7, nº C5, pp. C5-441-C5-446, 1997.

OLIVEIRA, S.A., “**Modelagem Termodinâmica de Ligas com Memória de Forma em um Contexto Tridimensional**”, Tese de Doutorado, UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Mecânica, 2013.

OLIVEIRA, S. A.; SAVI, M. A.; KALAMKAROV, A. L., “A Three-dimensional Constitutive Model for Shape Memory Alloys”, **Archive of Applied Mechanics**, v.80, pp. 1163–1175, 2010.

OLIVEIRA, S. A.; SAVI, M. A.; ZOUAIN, N., “A Three-dimensional Description of Shape Memory Alloy Thermomechanical Behavior Including Plasticity”, **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v.38, pp. 1451–1472, 2016.

OLIVEIRA, S.A., SAVI, M.A., “Os Materiais Inteligentes e Suas Aplicações”, **RevistaMarítima Brasileira**, v.133, nº 10-12, pp. 39-56, 2013.

PAIVA, A., SAVI, M.A.;“An Overview of Constitutive Models for Shape Memory Alloys”, **Mathematical Problemsin Engineering**,v.2006; pp.1–30, 2006.

PAIVA, A.; SAVI, M. A.; BRAGA, M. B.; PACHECO, P.M.C.L., “A Constitutive Model for Shape Memory Alloys Considering Tensile-compressive Asymmetry and Plasticity”, **International Journal of Solids and Structures**, v.42, nº 11–12, pp. 3439–3457, 2005.

PHILLIPS, F.R.; WHEELER, R.W.; GELTMACHER, A.B.; LAGOUDAS, D.C., “Evolution of Internal Damage During Actuation Fatigue in Shape Memory Alloys”, **International Journal of Fatigue**, v. 124, pp. 315-327,2019.

PANICO, M.; BRINSON, L. C., “A Three-dimensional Phenomenological Model

for Martensite Reorientation in Shape Memory Alloys”, **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, v.55, n° 11, pp. 2491–2511, 2007.

PARWANI, RAMKUMAR, P., ABHISHEK, K., YADAV, S.K., **Recent Advances in Mechanical Infrastructure**. Springer Singapore, 2020

PATIL, D.; SONG, G.; “A Review of Shape Memory Material’s Applications in the Offshore Oil and Gas Industry”, **Smart Materials and Structures**, v. 26, n° 9, 2017.

PITT, D.; DUNNE, J.; GARCIA, E., WHITE, E., “SAMPSON Smart Inlet SMA Powered Adaptive Lip Design and Static Test.” In: **19th AIAA Applied Aerodynamics Conference**, pp. 1359, 2001.

POPOV, P.; LAGOUDAS, D. C., “A 3-D Constitutive Model for Shape Memory Alloys Incorporating Pseudoelasticity and Detwinning of Self-accommodated Martensite”, **International Journal of Plasticity**, v.23, n° 10–11, pp. 1679–1720, 2007.

PREISACH, F., “Über die magnetische Nachwirkung“, **Zeitschrift für Physik**, v. 94, pp. 277–302, 1935.

RAO, A.; RUMI, A.; SRINIVASA, A. R., “Internal Loops in Superelastic Shape Memory Alloy Wires Under Torsion—Experiments and Simulations/predictions”, **International Journal of Solids Structures**, v. 51, n° 25–26, pp. 4554–4571, 2014.

RAO, A., SRINIVASA, A.R.; “A Two Species Thermodynamic Preisach Model for the Torsional Response of Shape Memory Alloy Wires and Springs Under Superelastic Conditions”, **International Journal of Solids and Structures**, v.50, pp. 887–898, 2012.

RAO, A.; SRINIVASA, A.R., “A Three-species Model for Simulating Torsional Response of Shape Memory Alloy Components using Thermodynamic Principles and Discrete Preisach Models”, **Mathematics and Mechanics of Solids**, v. 20, n° 3, pp. 345–372, 2015.

REDINIOTIS, O.K.; WILSON, L.N.; LAGOUDAS, D.C.; KHAN, M. M., “Development Of A Shape-MemoryAlloy Actuated Biomimetic Hydrofoil”, **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 13, n° 1, pp. 35-49, 2002.

REIMERS, A., GYIMESI, M., DELLA TORRE, E., OSTERGAARD, D.; “Implementation of the Preisach DOK Magnetic Hysteresis Model in a Commercial Finite Element Package”, **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 37, n° 5, pp. 3362-3365, 2001.

SADASHIVA, M. M.; YUNUS, S.; NOUMAN, K.; RAMESH, K.; GOWDA, T.M.; “A Review on Application of Shape Memory Alloys. Transformation”, **International Journal of Recent Technology and Engineering**, v. 21, pp. 24,

2021.

SAVI, M. A.; PACHECO, P. M. C. L.; BRAGA A. M. B., “Chaos in a Shape Memory Two-Bar Truss”, **International Journal of Non-Linear Mechanics**, v. 37, n° 8, pp. 1.387-1.395, 2002b.

SAVI, M. A.; PACHECO, P. M. C. L.; GARCIA, M.S.; AGUIAR, R.A.A.; SOUZA, L.F.G.; HORA, R.B.; “Nonlinear Geometric Influence on the Mechanical Behavior of Shape Memory Alloy Helical Springs”, **Smart Materials and Structures**, v. 24, n° 3, pp. 035012, 2015.

SAVI, M. A.; PAIVA, A.; PACHECO, P. M. C. L., “Tensile-Compressive Asymmetry Influence on Shape Memory Alloy System Dynamics”, **Chaos, Solitons and Fractals**, v. 36, n° 4, pp. 828- 842, 2008.

SAVI, M.A., PAIVA, A., “Describing Internal Subloops Due to Incomplete Phase Transformations in Shape Memory Alloys”, **Archive of Applied Mechanics**, v.74, n° 9, pp.637-647, 2005.

SAVI, M. A.; PAIVA, A.; BAÊTA-NEVES, A. P.; PACHECO, C.L., “Phenomenological Modeling and Numerical Simulation of Shape Memory Alloys: a Thermo-plasticphase Transformation Coupled Model”, **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v.13, n° 5, pp. 261–273, 2002a.

SAVI, M. A.; PAULA, A. S.; LAGOUDAS, D. C., “Numerical Investigation of Adaptative Vibration Absorber Using Shape Memory Alloys”, **Journal of Intelligent Material System and Structures**, v. 22, n° 1, pp. 67-80, 2011.

SCHWARTZ, M., **Encyclopedia of smart materials**, Volume 1 and Volume 2. New York, John Wiley and Sons, 2002.

SHREEKRISHNA, S.; NACHIMUTHU, R.; NAIR, V. S., "A Review on Shape Memory Alloys and Their Prominence in Automotive Technology.", **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 34, n° 5, pp. 499-524, 2022.

ŠITTNER, P.; NOVÁK, V., “Anisotropy of Martensitic Transformations in Modeling of Shape Memory Alloy Polycrystals”, **International Journal of Plasticity**, v. 16, n° 10-11, pp. 1243-1268, 2000.

SMITH, R. C., **Smart Material Systems**, 1ª. ed., Raleigh - North Carolina - USA, Society for Industrial and Applied Mathematics, 2005.

SONG, G.; ZHAO, J.; ZHOU, X.; DE ABREU-GARCIA, J.A., "Tracking Control of a Piezoceramic Actuator with Hysteresis Compensation Using Inverse Preisach Model.", **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, v. 10, n° 2, pp. 198-209, 2005.

SOUZA, A. C.; MAMIYA, E. N.; ZOUAIN, N., “Three-dimensional Model for Solids Undergoing Stress-induced Phase Transformations”, **European Journal of**

Mechanics Solids, v.17, n° 5, pp. 789–806, 1998.

SPEICHER, M.; HODGSON, E.; ROCHES, R. D.; LEON, R. T., “Shape Memory Alloy Tension/Compression Device for Seismic Retrofit of Buildings”, **Journal of Materials Engineering and Performance**, volume 18, pp 746-753, 2009.

SREEKUMAR, M.; NAGARAJAN, T.; SINGAPERUMAL, M., "Critical Review of Current Trends in Shape Memory Alloy Actuators for Intelligent Robots", **Industrial Robot: An International Journal**, v. 34, n° 4, pp. 285–294, 2007.

TAKAHASHI, N.S., MIYABARA, H., FUJIWARA, K.; "Problems in Practical Finite Element Analysis Using Preisach Hysteresis Model", **IEEE Transactions on Magnetics**, v.35, n° 3, pp. 1243-1246,1999.

TANAKA, K., “A Thermomechanical Sketch of Shape Memory Effect: One-dimensional Tensile Behavior”, **Res. Mechanica: International Journal of Structural Mechanics and Materials Science**, v.18, pp. 251–263, 1986.

THE BUSINESS RESEARCH COMPANY. **Shape Memory Alloys Global Market Report 2023, 2023.** Disponível em <www.thebusinessresearchcompany.com/report/shape-memory-alloys-global-market-report>. Acesso em: 11 de maio de 2023.

TRAPANESE, M.; FRANZITTA, V.; VIOLA, A., "A Dynamic Model for Hysteresis in Magnetostrictive Devices.", **JOURNAL OF APPLIED PHYSICS**, v. 115, n° 17, 2014.

TSUCHIYA, K., "Mechanisms and Properties of Shape Memory Effect and Superelasticity in Alloys and Other Materials: A Practical Guide", In: YAMAUCHI, K.; OHKATA, I.; TSUCHIYA, K., *et al.* **Shape memory and superelastic alloys Technologies and applications**. Nagoya: Woodhead Publishing Limited, 2011. p. 3–14.

WANG, Y.F.; SU, C.Y.; HONG, H.; HU, Y.M. “Modeling and Compensation for Hysteresis of Shape Memory Alloy Actuators with the Preisach Representation”, **IEEE - 13th International Workshop on Advanced Motion Control**, pp. 239–244, 2007.

WANG, W.; XIANG, Y.; YU, J.; YANG, L., “Development and Prospect of Smart Materials and Structures for Aerospace Sensing Systems and Applications.”, **Sensors**, v. 23, n° 3, pp. 1545, 2023.

XIAOYU, Q.; ZHANG, X.; YAN, X.; WANG, S.; ZHANG, S.; JIANG, J.; HUANG, D., “Structural and Functional Fatigue Behavior of Ni_{49.8}Ti_{50.2} (at. %) Wires Under Various Maximum Heating Temperatures: Experimental and Modeling Study”, **Materials & Design**, v. 178, pp. 107842, 2019.

XUE, Z.; Li, L.; ICHCHOU, M.N.; LI C., "Hysteresis and the Nonlinear Equivalent Piezoelectric Coefficient of MFCs for Actuation.", **Chinese Journal of**

Aeronautics, v. 30, n° 1, pp. 88-98, 2017.

ZAKERZADEH, M.R.; SAYYAADI, H., “Experimental Comparison of some Phenomenological Hysteresis Models in Characterizing Hysteresis Behavior of Shape Memory Alloy Actuators”, **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 23, n° 12, pp. 1287–1309, 2012.