

Alberto Paiva

**Modelagem do Comportamento
Termomecânico das Ligas com
Memória de Forma**

TESE DE DOUTORADO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
Programa de Pós-graduação em Mecânica

Rio de Janeiro
Abril de 2004



Alberto Paiva

**Modelagem do Comportamento Termomecânico
das Ligas com Memória de Forma**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Arthur Martins Barbosa Braga (PUC-RIO)
Co-orientador: Marcelo Amorim Savi (UFRJ)

Rio de Janeiro

Abril de 2004



Alberto Paiva

Modelagem do Comportamento Termomecânico das Ligas com Memória de Forma

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de doutor em Engenharia Mecânica aprovada pela comissão examinadora abaixo assinada.

Arthur Martins Barbosa Braga

Orientador

Departamento de Eng^a Mecânica – PUC-Rio

Marcelo Amorim Savi

Co-Orientador

Departamento de Eng^a Mecânica – COPPE – UFRJ

Theodoro Antoun Netto

Departamento de Eng^a Oceânica – COPPE – UFRJ

Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco

Departamento de Eng^a Mecânica – CEFET-RJ

Fernando Pereira Duda

Departamento de Eng^a Mecânica – COPPE – UFRJ

Heraldo Silva da Costa Mattos

Departamento de Eng^a Mecânica – UFF

Ricardo Leiderman

Departamento de Eng^a Civil – PUC-Rio

José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 20 de Abril de 2004.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização do autor, do orientador e da universidade.

Alberto Paiva

Graduou-se em Engenharia Mecânica pelo CEFET-RJ em 1997. Concluiu o mestrado em Engenharia Mecânica na área de concentração de Mecânica dos Sólidos no IME em 2000. Atualmente, tem como principal área de interesse a modelagem do comportamento de materiais inteligentes.

Ficha catalográfica

Paiva, Alberto

Modelagem do Comportamento Termomecânico das Ligas com Memória de Forma / Alberto Paiva ; orientador: Arthur Martins Barbosa Braga ; co-orientador: Marcelo Amorim Savi. Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Mecânica, 2004.

113 f. :il. ; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica.

Inclui referências bibliográficas

CDD:621

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço aos meus professores orientadores Arthur M. B. Braga e Marcelo A. Savi pela oportunidade e pelo apoio na realização desse trabalho de tese.

Agradeço, também, a todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio pela atenção durante o curso de doutorado.

Aos companheiros de curso que, em diversos momentos, ajudaram a superar as dificuldades encontradas. Em especial, ao amigo Luiz Fernando Penna Franca pela valiosa ajuda durante o período dos créditos.

Aos integrantes da banca examinadora por aceitarem participar da avaliação desse trabalho, apontando melhorias e sugestões que enriqueceram o trabalho.

À toda a minha família que me apoiou durante o curso. Em especial, à minha mãe responsável pelo apoio dado em todos os aspectos e que concorreu para a concretização do trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pelo suporte financeiro durante o curso.

Por fim, mas não por último, à Deus que me iluminou e me deu forças em diversos momentos difíceis ao longo do curso.

Resumo

Paiva, Alberto; Braga, Arthur; Savi, Marcelo. **Modelagem do Comportamento Termomecânico das Ligas com Memória de Forma.** Rio de Janeiro, 2004. 111 p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O estudo de materiais inteligentes tem instigado várias aplicações nas mais diversas áreas do conhecimento (da área médica à indústria aeroespacial). Os materiais mais utilizados em estruturas inteligentes são as ligas com memória de forma, as cerâmicas piezoelétricas, os materiais magneto-strictivos e os fluidos eletro-reológicos. Nas últimas décadas, as ligas com memória de forma vêm recebendo atenção especial, sendo utilizadas principalmente como sensores ou atuadores. Existe uma gama de fenômenos associados a estas ligas que podem ser explorados. Visando uma análise mais precisa do comportamento destes materiais, tem se tornado cada vez maior o interesse no desenvolvimento de modelos matemáticos capazes de descrevê-los de maneira adequada, permitindo explorar todo o seu potencial. O objetivo deste trabalho é propor um modelo constitutivo unidimensional que considera quatro variantes de microconstituintes (austenita, martensita induzida por temperatura, martensita induzida por tensão trativa e martensita induzida por tensão compressiva) e diferentes propriedades para cada fase. O efeito das deformações induzidas por temperatura é incluído na formulação. O modelo contempla ainda o efeito das deformações plásticas e o acoplamento entre os fenômenos de plasticidade e transformação de fase. Além disso, são introduzidas modificações na formulação que permitem o alargamento do laço de histerese da curva tensão-deformação, fornecendo resultados mais coerentes com dados experimentais. Por fim, incorpora-se a assimetria no comportamento tração-compressão. A validação do modelo é obtida comparando os resultados numéricos obtidos através do modelo com resultados experimentais encontrados na literatura para ensaios de tração a diferentes temperaturas e para a assimetria no comportamento tração-compressão.

Palavras-chave

Ligas com memória de forma; modelagem constitutiva; efeito de memória de forma reversível; assimetria tração-compressão.

Abstract

Paiva, Alberto; Braga, Arthur; Savi, Marcelo. **Modeling of Thermomechanical Behavior of Shape Memory Alloys**. Rio de Janeiro, 2004. 111 p. D.Sc. Thesis – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The study of intelligent materials has instigated many applications within the various knowledge areas (from medical field to aerospace industry). The most used materials in intelligent structures are the shape memory alloys (SMA), the piezoelectric ceramics, the magnetostrictive materials and the electrorheological fluids. In the last decades, SMAs have received special attention, being mainly used as sensors or actuators. There is a number of phenomena related to these alloys that can be explored. Aiming a more precise analysis of SMA behavior, the interest on the development of mathematical models capable of describing these phenomena properly has grown, allowing to explore all their potential. The aim of this work is to propose a unidimensional constitutive model which considers four microconstituent variants (austenite, martensite induced by temperature, martensite induced by tensile loading and martensite induced by compressive loading) and different material properties for each phase. The effect of thermal strains is included in the formulation. The model considers the effect of plastic strains and the plastic-phase transformation coupling. Besides, some changes are introduced in the formulation in order to enlarge the stress-strain hysteresis loop, resulting in better agreements with experimental data. Eventually, the tension-compression asymmetry is incorporated. The model validation is obtained through the comparison between the numerical results given by the model and experimental results found in the literature for tensile tests at different temperatures and for tension-compression asymmetry.

Key-words

Shape memory alloy (SMA); constitutive modeling; two-way shape memory effect (TWSME); tension-compression asymmetry.

Sumário

1	Introdução	18
1.1	Aspectos Metalúrgicos	21
1.2	Principais Comportamentos Termomecânicos	24
1.2.1	Transformação de Fase Devida à Variação de Temperatura	24
1.2.2	Pseudoelasticidade	26
1.2.3	Efeito de Memória de Forma (SME)	27
1.2.4	Efeito de Memória de Forma Reversível (TWSME)	28
1.3	Aplicações	29
1.3.1	Aplicações Médicas e Odontológicas	29
1.3.2	Atuadores com Memória de Forma	33
1.3.3	Controle de Vibrações	36
1.3.4	Acoplamentos	38
1.4	Organização do Trabalho	39
2	Modelagem Constitutiva	40
2.1	Formulação Constitutiva	40
2.2	Modelo Constitutivo	44
2.2.1	Equações para o Modelo Constitutivo	44
2.2.2	Avaliação Analítica de Parâmetros do Modelo	55
2.3	Procedimentos Numéricos	61
2.4	Análise da Sensibilidade dos Parâmetros Associados à Tração e à Compressão	64
3	Comportamento Termomecânico à Tração – Comparação com Resultados Experimentais e Simulações	71
3.1	Comparação com Resultados Experimentais para Ensaios de Tração a Diversas Temperaturas	71
3.2	Simulações Numéricas	76

4	Assimetria Tração-Compressão	88
4.1	Validação do Modelo para Ensaio Envolvendo a Assimetria no Comportamento Tração-Compressão	88
4.1.1	Resultados Obtidos	90
4.1.2	Comparação das Propriedades Obtidas para os Diversos Ensaio	97
5	Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	100
5.1	Conclusões	100
5.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	102
6	Referências Bibliográficas	103

Lista de Figuras

1.1	Fenômeno de transformação de fase devida à variação de temperatura	24
1.2	Termograma DSC esquemático para uma liga SMA	25
1.3	Fenômeno de pseudoelasticidade	26
1.4	Efeito de Memória de Forma	27
1.5	Filtro de Simon	30
1.6	Dispositivos auto-expansivos com memória de forma	30
1.7	Luva com memória de forma	31
1.8	Aparelhos ortodônticos com fios de memória de forma	32
1.9	Representação esquemática de um atuador com memória de forma	33
1.10	Micro-garra com memória de forma reversível	34
1.11	Hidrofólio	35
1.12	Absorvedores mecânicos	37
1.13	Acoplamento do tipo <i>CryOFit</i> (Hodgson & Brown, 2000)	38
2.1	Representação geométrica da restrição para coexistência das fases	47
2.2	Diagrama tensão de escoamento-temperatura	54
2.3	Interpretação geométrica de cada parcela de deformação	55
2.4	Interpretação geométrica de ε_R^T	57
2.5	Representação gráfica das subdiferenciais	62
2.6	Representação gráfica do algoritmo de mapeamento de retorno	63
2.7	Curvas pseudoelásticas variando α^C	66
2.8	Curvas pseudoelásticas variando L_M^C	66
2.9	Curvas pseudoelásticas variando ε_R^C	67

2.10	Curvas pseudoelásticas variando os diversos parâmetros de dissipação	68
2.11	Curvas pseudoelásticas variando η_C^T e η_D^C	69
3.1	Curvas tensão-deformação pseudoelásticas experimentais para liga Ni-Ti (Tobushi et. al 1991)	72
3.2	Comparação numérico-experimental para $T = 373 K$	73
3.3	Comparação numérico-experimental para $T = 353 K$	74
3.4	Comparação numérico-experimental para $T = 333 K$	75
3.5	Efeito pseudoelástico com plasticidade	77
3.6	Evolução das frações volumétricas para o efeito pseudoelástico com plasticidade	78
3.7	Efeito de memória de forma com plasticidade	78
3.8	Evolução das frações volumétricas para o efeito de memória de forma com plasticidade	80
3.9	Efeito de transformação de fase devida à variação de temperatura	80
3.10	Evolução das frações volumétricas para o efeito de transformação de fase devida à variação de temperatura	81
3.11	Deformação <i>two-way</i>	82
3.12	Carregamento termomecânico para o efeito de memória de forma reversível (processo SIMT)	83
3.13	Efeito de memória de forma reversível (processo SIMT)	84
3.14	Evolução das frações volumétricas para o efeito de memória de forma reversível (processo SIMT)	84
3.15	Carregamento termomecânico para o ensaio experimental cíclico (Miller & Lagoudas, 2000)	85
3.16	Curvas tensão-deformação para ensaio cíclico	86
3.17	Curvas deformação-temperatura para ensaio cíclico	87
3.18	Evolução das frações volumétricas para o ensaio cíclico (Miller & Lagoudas, 2000)	87

4.1	Termograma para liga 50,8% Ni-Ti monocristalina (Gall et al., 2001)	89
4.2	Termograma para liga 50,8% Ni-Ti monocristalina (Gall et al., 2001)	89
4.3	Curvas tensão-deformação (monocristalino, orientação [111] e tratamento térmico de envelhecimento por 1,5 hora e $T = 673 K$)	92
4.4	Curvas tensão-deformação (policristalino, textura <111> {110} e tratamento térmico de envelhecimento por 1,5 hora e $T = 673 K$)	93
4.5	Curvas tensão-deformação (monocristalino, orientação [111] e tratamento térmico de envelhecimento por 15 horas e $T = 773 K$)	94
4.6	Curvas tensão-deformação (policristalino, textura <111> {110} e tratamento térmico de envelhecimento por 15 horas e $T = 773 K$)	96

Lista de Tabelas

2.1	Resumo das Equações Constitutivas	61
2.2	Propriedades termomecânicas típicas para uma liga SMA (Baêta Neves, 2002 e Gall et al., 2001)	65
3.1	Parâmetros identificados a partir dos resultados experimentais obtidos por Tobushi et. al 1991	73
3.2	Propriedades termomecânicas típicas para uma liga SMA (Baêta Neves, 2002)	76
4.1	Temperaturas para transformação de fase (Gall et al., 1999)	90
4.2	Propriedades para liga 50,8% Ni-Ti (monocristalino, orientação [111] e tratamento térmico de envelhecimento por 1,5 hora e $T = 673 K$)	91
4.3	Propriedades para liga 50,8% Ni-Ti (policristalino, textura <111> {110} e tratamento térmico de envelhecimento por por 1,5 hora e $T = 673 K$)	92
4.4	Propriedades para liga 50,8% Ni-Ti (monocristalino, orientação [111] e tratamento térmico de envelhecimento por 15 horas e $T = 773 K$)	94
4.5	Propriedades para liga 50,8% Ni-Ti (policristalino, textura <111> {110} e tratamento térmico de envelhecimento por 15 horas e $T = 773 K$)	95
4.6	Propriedades que variam com tratamento térmico e com o tipo de estrutura (monocristalina ou policristalina)	98
4.7	Propriedades constantes independentemente do tratamento térmico e do tipo de estrutura (monocristalina ou policristalina)	99

Lista de Símbolos

A	Austenita
A_S	Temperatura inicial de formação de austenita
A_f	Temperatura final de formação de austenita
B	Força termodinâmica
B_1	Força termodinâmica que governa as transformações de fase associada à martensita não-maclada induzida por tensão trativa
B_2	Força termodinâmica que governa as transformações de fase associada à martensita não-maclada induzida por tensão compressiva
B_3	Força termodinâmica que governa as transformações de fase associada à austenita
E	Combinação dos módulos elásticos austenítico e martensítico
E_A	Módulo elástico austenítico
E_M	Módulo elástico martensítico
f	Função que define a superfície de escoamento
g_i	Vetor associado ao gradiente de temperatura
H	Combinação dos módulos de endurecimento cinemático austenítico e martensítico
H_A	Módulo de endurecimento cinemático austenítico
H_M	Módulo de endurecimento cinemático martensítico
\mathbf{I}_f	Função indicatriz associada à superfície de escoamento
\mathbf{J}	Função indicatriz associada ao conjunto π
$\hat{\mathbf{j}}$	Função indicatriz associada ao conjunto Θ
K	Combinação dos módulos plásticos austenítico e martensítico
K_A	Módulo plástico austenítico
K_M	Módulo plástico martensítico
L	Parâmetro de referência para controle da tensão crítica
L_A	Parâmetro de controle da tensão crítica associado à austenita

$L_A(T)$	Parâmetro de controle da tensão crítica associado à austenita para temperaturas abaixo de $T_C^{C,T}$
L_M	Parâmetro de controle da tensão crítica associado à martensita maclada
$L_M(T)$	Parâmetro de controle da tensão crítica associado à martensita maclada para temperaturas abaixo de $T_C^{C,T}$
L_M^C	Parâmetro de controle da tensão crítica associado à martensita não-maclada obtida por tensão compressiva
L_M^T	Parâmetro de controle da tensão crítica associado à martensita não-maclada obtida por tensão trativa
M	Martensita maclada ou induzida por temperatura
M^+	Martensita não-maclada induzida por tensão trativa
M^-	Martensita não-maclada induzida por tensão compressiva
M_S	Temperatura inicial de formação de martensita
M_f	Temperatura final de formação de martensita
q_i	Vetor de fluxo de calor
r	Geração de calor
R	Fase R intermediária
s	Entropia específica
T	Temperatura
T_A	Temperatura acima da qual a austenita é estável
T_C^C	Temperatura crítica à compressão
$T_C^{C,T}$	Temperatura crítica à tração e/ou à compressão
T_C^T	Temperatura crítica à tração
T_F	Temperatura de referência para determinação da tensão de escoamento a alta temperatura
T_M	Temperatura abaixo da qual a martensita é estável
T_0	Temperatura de referência para deformação nula livre de tensão

X	Força termodinâmica de plasticidade que fornece a equação constitutiva
Y	Força termodinâmica de plasticidade associada ao endurecimento isotrópico
Z	Força termodinâmica de plasticidade associada ao endurecimento cinemático
α^C	Parâmetro associado ao tamanho vertical do laço de histerese à compressão
α^T	Parâmetro associado ao tamanho vertical do laço de histerese à tração
α_h^C	Parâmetro associado ao tamanho horizontal do laço de histerese à compressão
α_h^T	Parâmetro associado ao tamanho horizontal do laço de histerese à tração
β	Variável interna
β_1	Fração volumétrica de martensita não-maclada obtida por tensão trativa
β_2	Fração volumétrica de martensita não-maclada obtida por tensão compressiva
β_3	Fração volumétrica de austenita
β_4	Fração volumétrica de martensita maclada
β_1^S	Fração volumétrica de martensita não-maclada induzida por tensão trativa quando o carregamento mecânico é invertido
β_2^S	Fração volumétrica de martensita não-maclada induzida por tensão compressiva quando o carregamento mecânico é invertido
ε	Deformação total
ε_e	Deformação elástica
ε_{ij}	Tensor deformação
ε_p	Deformação plástica
ε_R^C	Deformação residual máxima à compressão

ε_R^T	Deformação residual máxima à tração
ϕ	Potencial de dissipação
ϕ^*	Potencial de dissipação complementar
ϕ_I	Parcela intrínseca do potencial de dissipação
ϕ_T	Parcela térmica do potencial de dissipação
ϕ_I^*	Parcela intrínseca do potencial de dissipação complementar
ϕ_T^*	Parcela térmica do potencial de dissipação complementar
γ	Variável associada ao endurecimento isotrópico
η^A	Parâmetro de dissipação interna associado à austenita
η_C^A	Parâmetro de dissipação interna associado à austenita que controla a transformação martensítica
η_D^A	Parâmetro de dissipação interna associado à austenita que controla a transformação inversa
η^C	Parâmetro de dissipação interna associado à martensita não-maclada induzida por tensão compressiva
η_{ci}	Parâmetros relacionado ao acoplamento entre plasticidade e transformação de fase para endurecimento isotrópico
η_{ck}	Parâmetros relacionado ao acoplamento entre plasticidade e transformação de fase para endurecimento cinemático
η_C^C	Parâmetro de dissipação interna associado à martensita não-maclada induzida por tensão compressiva que controla a transformação martensítica
η_D^C	Parâmetro de dissipação interna associado à martensita não-maclada induzida por tensão compressiva que controla a transformação inversa
η^T	Parâmetro de dissipação interna associado à martensita não-maclada induzida por tensão trativa
η_C^T	Parâmetro de dissipação interna associado à martensita não-maclada induzida por tensão trativa que controla a transformação martensítica

η_D^T	Parâmetro de dissipação interna associado à martensita não-maclada induzida por tensão trativa que controla a transformação inversa
λ	Multiplicador de Lagrange associado à plasticidade
μ	Variável associada ao endurecimento cinemático
π	Conjunto de restrições associado às variáveis β_1 , β_2 e β_3
Θ	Conjunto de restrições associado às variáveis β_1 , β_2 , β_3 e β_4
ρ	Massa específica
σ_{ij}	Tensor tensão
σ^{CRIT}	Tensão crítica para início de transformação de fase
σ_{ij}^I	parcela irreversível do tensor tensão
σ_{ij}^R	Parcela reversível do tensor tensão
σ_Y	Tensão de escoamento
$\sigma_Y^{A,f}$	Tensão de escoamento austenítica à temperatura T_F
$\sigma_Y^{A,i}$	Tensão de escoamento austenítica à temperatura T_A
σ_Y^M	Tensão de escoamento martensítica
Ω	Combinação dos coeficientes de dilatação térmica austenítico e martensítico
Ω_A	Coeficiente de dilatação térmica austenítico
Ω_M	Coeficiente de dilatação térmica martensítico
ψ_n	Energias livre de Helmholtz parciais para $(n = 1,2,3,4)$
$\tilde{\psi}$	Energia livre de Helmholtz total que considera β_1 , β_2 e β_3 .
$\hat{\psi}$	Energia livre de Helmholtz total que considera β_1 , β_2 , β_3 e β_4