

3

Comportamento Termomecânico à Tração – Comparação com Resultados Experimentais e Simulações

Este capítulo tem por objetivo apresentar uma validação do modelo constitutivo proposto considerando carregamentos que acarretam uma resposta tratativa. O capítulo está dividido em duas partes: comparação com resultados experimentais e simulações. Na primeira, é feito um ajuste quantitativo entre os resultados numéricos obtidos pelo modelo e resultados experimentais (Tobushi et al., 1991) encontrados na literatura para ensaios de tração a diversas temperaturas, visando a validação do modelo para este tipo de ensaio. Na segunda parte do capítulo, são apresentadas simulações numéricas para os principais fenômenos associados às ligas com memória de forma, atestando a habilidade do modelo em descrevê-los. São apresentados testes envolvendo: pseudoelasticidade juntamente com plasticidade; efeito de memória de forma (**SME**) com plasticidade; efeito de transformação de fase devida à variação de temperatura; efeito de memória de forma reversível (**TWSME**) e ainda a reprodução de um ensaio cíclico que atesta o acoplamento entre os fenômenos de plasticidade e de transformação de fase. Os testes apresentados nesta segunda parte do capítulo são resultados qualitativos, não sendo comparados quantitativamente com dados experimentais. Para tanto, utilizam-se propriedades típicas exibidas pelas **SMA**s. Todos os resultados apresentados são para o caso quasi-estático.

3.1

Comparação com Resultados Experimentais para Ensaios de Tração a Diversas Temperaturas

O objetivo deste item é fazer um ajuste quantitativo entre o modelo e resultados experimentais obtidos para ensaios de tração pseudoelásticos a temperaturas distintas. A importância deste ensaio consiste em mostrar que o modelo é capaz de prever o comportamento de ligas com memória de forma a

uma temperatura qualquer, a partir da resposta experimental a uma dada temperatura.

Na Figura 3.1, são mostradas as curvas tensão-deformação experimentais obtidas por Tobushi et al. (1991) para três temperaturas distintas. Estes resultados são utilizados para a calibração quantitativa do modelo.

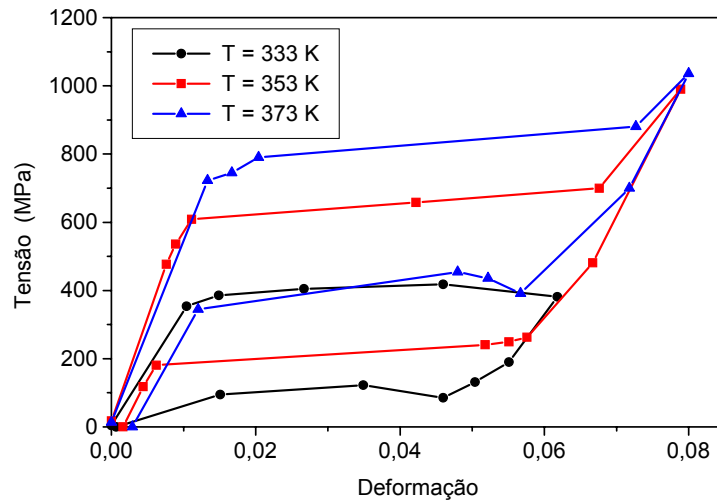


Figura 3.1 – Curvas tensão-deformação pseudoelásticas experimentais para liga Ni-Ti. (Tobushi et. al 1991).

Antes de se comparar os resultados numéricos com os experimentais, é necessário fazer algumas observações acerca das curvas experimentais. Primeiramente, deve-se observar que a curva para $T = 333 K$ apresenta módulos elásticos para as fases matriz e produto ligeiramente diferentes dos resultados encontrados para as outras duas temperaturas. Analogamente, a deformação residual máxima para este caso também apresenta uma pequena discrepância. Assim sendo, o ajuste do modelo é feito considerando as propriedades verificadas para $T = 373 K$. As propriedades obtidas estão apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Parâmetros identificados a partir dos resultados experimentais obtidos por Tobushi et. al (1991).

E_A (GPa)	E_M (GPa)	α^T (MPa)	ε_R^T	L (MPa)	L_M^T (MPa)
54	42	330	0,055	185	44
T_M (K)	T_0 (K)	η_C^T (MPa.s)	η_D^T (MPa.s)	η_C^A (MPa.s)	η_D^A (MPa.s)
291,4	295	1	2,7	1	2,7

Vale ressaltar que os testes conduzidos por Tobushi et. al (1991) não permitem a identificação de todos os parâmetros do modelo, já que possuem apenas respostas pseudoelásticas à tração. Portanto, a Tabela 3.1 relaciona apenas os parâmetros do modelo necessários a esta seção de testes.

A seguir, apresenta-se uma comparação dos resultados numéricos e experimentais. Na Figura 3.2, tem-se a comparação para o comportamento pseudoelástico com $T = 373 K$. Os resultados são bastante próximos a menos da deformação residual apresentada pelo teste experimental. Este fato pode estar associado a uma falha no experimento ou a uma deformação plástica induzida pela transformação de fase (Entchev & Lagoudas, 2002). De qualquer forma, os resultados são muito próximos, atestando a capacidade do modelo em descrever o fenômeno.

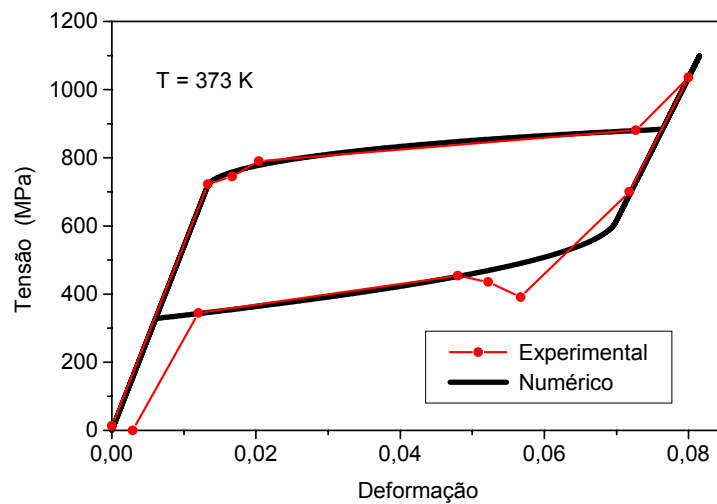


Figura 3.2 – Comparação numérico-experimental para $T = 373 K$.

Na Figura 3.3, tem-se a comparação entre os resultados experimental e numérico para o comportamento pseudoelástico com $T = 353 K$. Mais uma vez, existe uma boa concordância entre as duas curvas. Com relação à pequena deformação residual após o descarregamento, observa-se uma redução da discrepância entre os resultados numérico e experimental em função da diminuição dessa deformação residual com o decréscimo da temperatura.

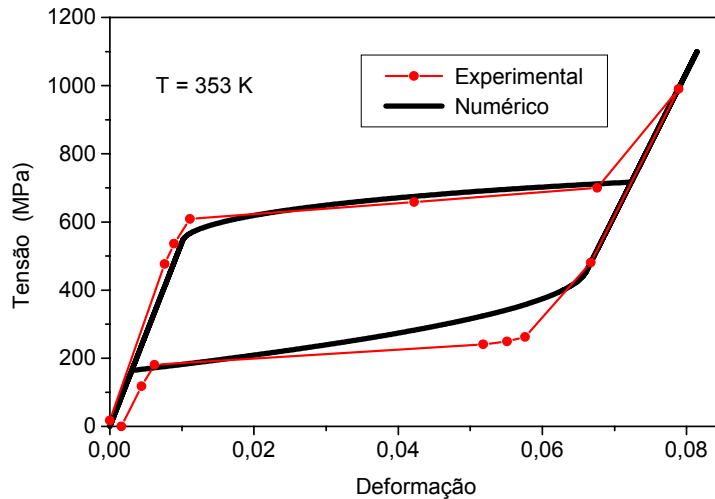


Figura 3.3 – Comparação numérico-experimental para $T = 353 K$.

Considerando o ensaio a $T = 333 K$ (Figura 3.4), a transformação inversa acontece completamente sem contudo apresentar uma resposta elástica após a transformação inversa. Isto caracteriza essa temperatura como a temperatura final para formação de austenita, já que abaixo dessa temperatura a transformação inversa não seria completa. O resultado numérico contempla exatamente esse aspecto.

Quanto às discrepâncias nos módulos elásticos e na deformação residual máxima, é pertinente observar que o resultado experimental não contempla o trecho elástico da fase produto o que pode indicar que a transformação de fase não aconteceu completamente. Esse fato pode justificar as pequenas discrepâncias apresentadas, já que para os outros dois ensaios ($T = 353 K$ e $T = 373 K$) isso não foi verificado.

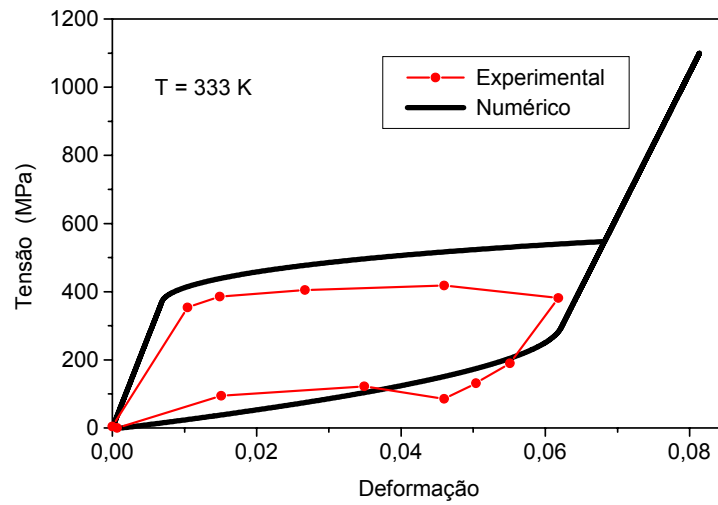


Figura 3.4 – Comparação numérico-experimental para $T = 333 K$.

De uma maneira geral, pode-se dizer que os resultados numéricos e experimentais são coerentes e o modelo é capaz de descrever os fenômenos após um ajuste em uma única temperatura.

3.2 Simulações Numéricas

Neste item, são apresentados alguns resultados para atestar a habilidade do modelo em descrever os seguintes fenômenos: pseudoelasticidade juntamente com plasticidade; efeito de memória de forma juntamente com plasticidade; ensaio de transformação de fase devida à variação de temperatura (deformação positiva e deformação negativa); efeito de memória de forma reversível (processo **SIMT**) e por fim um ensaio cíclico (Miller & Lagoudas, 2000) para analisar o acoplamento entre a plasticidade e a transformação de fase.

Em todos os ensaios deste item são utilizadas as propriedades apresentadas na Tabela 3.2. São conduzidos apenas ensaios de tração, já que a compressão possui comportamento análogo, conforme discutido no Item 2.4.

Tabela 3.2 – Propriedades termomecânicas típicas para uma liga **SMA** (Baêta Neves, 2002).

E_A (GPa)	E_M (GPa)	α^T (MPa)	α^C (MPa)	ε_R^T	ε_R^C
67	26,3	89,42	50	0,067	-0,035
L (MPa)	L_M^T (MPa)	L_M^C (MPa)	$\sigma_Y^{A,i}$ (MPa)	$\sigma_Y^{A,f}$ (MPa)	σ_Y^M (MPa)
200	12	80	690	257,72	200
Ω_A (MPa/K)	Ω_M (MPa/K)	T_M (K)	T_A (K)	T_F (K)	T_0 (K)
0,74	0,17	291,4	307,5	423	298
K_A (GPa)	K_M (GPa)	H_A (GPa)	H_M (GPa)	η_{ci}	η_{ck}
1,4	0,4	0,4	0,11	0	0
η_C^T (MPa.s)	η_D^T (MPa.s)	η_C^C (MPa.s)	η_D^C (MPa.s)	η_C^A (MPa.s)	η_D^A (MPa.s)
0,7	0,4	0,7	0,4	0,7	0,4

A Figura 3.5(b) apresenta a curva tensão-deformação para um ensaio pseudoelástico à tração com temperatura constante de 333 K, conforme o carregamento mecânico mostrado na Figura 3.5(a). Durante este ensaio, o material responde elasticamente segundo a fase matriz (austenítica) até que seja alcançada uma tensão crítica para transformação de fase martensítica. A partir desse ponto,

há uma resposta não-linear correspondente ao trecho de transformação de fase ($A \Rightarrow M^+$). Esta transformação acontece até que seja alcançada uma tensão crítica para o término da transformação. A partir de então, o material volta a responder elasticamente segundo a fase produto (martensita induzida por tensão trativa) até que o limite de escoamento seja alcançado. A partir daí, o material passa a incorporar deformações plásticas de caráter irreversível. Durante o descarregamento, o material responde elasticamente segundo a fase produto até que uma tensão crítica para transformação de fase inversa ($M^+ \Rightarrow A$) seja alcançada. Esta transformação acontece até que o material atinja uma tensão crítica para fim da transformação inversa. Finalmente, o material volta a se comportar elasticamente segundo uma estrutura austenítica. É importante notar que após o descarregamento completo do material, há uma parcela de deformação que não pode ser recuperada que corresponde exatamente à deformação plástica induzida no material.

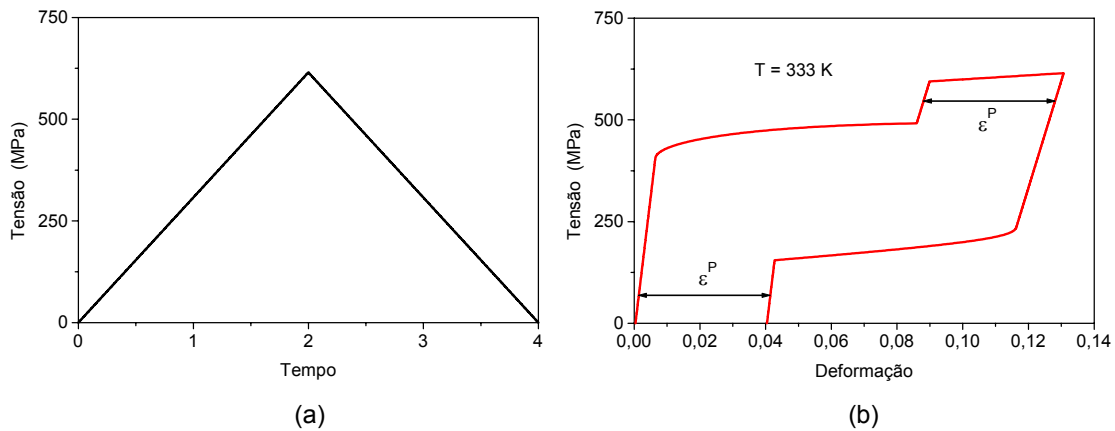


Figura 3.5 – Efeito pseudoelástico com plasticidade.

- (a) Carregamento mecânico;
 (b) Diagrama tensão-deformação.

A Figura 3.6 mostra a evolução no tempo das frações volumétricas dos quatro microconstituintes considerados no modelo. Inicialmente a estrutura é totalmente austenítica. Durante a transformação de fase, austenita e martensita induzida por tensão trativa coexistem. Após a transformação, o material possui uma estrutura totalmente martensítica induzida por tração (M^+). Durante a

transformação inversa, novamente ambas as fases coexistem. Por fim, o material volta a apresentar uma estrutura totalmente austenítica.

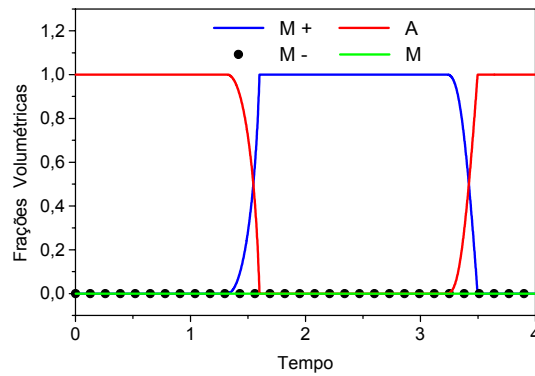


Figura 3.6 – Evolução das frações volumétricas para o efeito pseudoelástico com plasticidade.

Na Figura 3.7(b), observa-se o diagrama tensão-deformação-temperatura associado ao fenômeno de memória de forma.

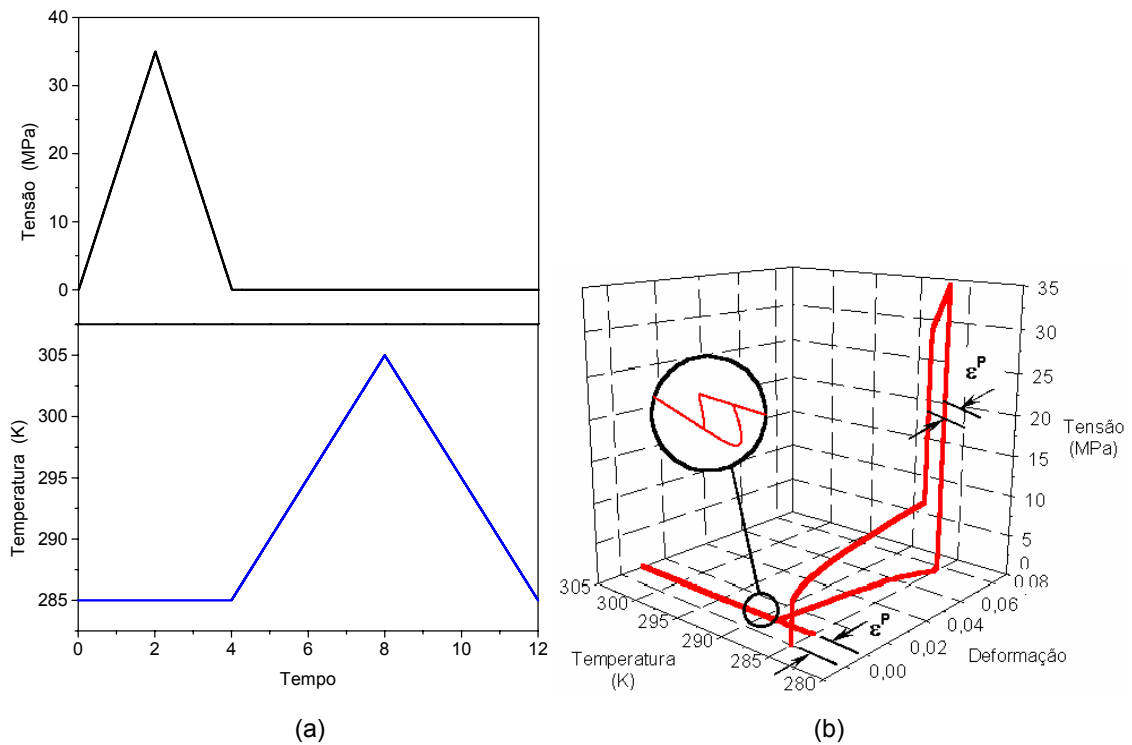


Figura 3.7 – Efeito de memória de forma com plasticidade.

(a) Carregamento termomecânico;

(b) Diagrama tensão-deformação-temperatura.

Primeiramente, é imposto um carregamento mecânico de tensão trativa à temperatura constante ($T = 285 K$), conforme Figura 3.7(a) (de 0 a 4 u.t.), permitindo que o material entre no regime plástico. Até então, o comportamento do material é análogo àquele descrito para o caso pseudoelástico. Durante o descarregamento, o material não experimenta uma transformação inversa, pois a esta temperatura a martensita induzida por tensão é uma fase estável mesmo em um estado livre de tensões. A partir desse ponto, impõe-se um ciclo térmico com tensão nula, conforme Figura 3.3(a) (de 4 a 12 u.t.).

Com o aumento da temperatura, o material experimenta uma transformação de fase ($M^+ \Rightarrow M$), promovendo a recuperação da deformação residual associada à transformação de fase. Continuando a aumentar a temperatura, o material experimenta uma outra transformação de fase ($M \Rightarrow A$). Com o decréscimo da temperatura, o material passa por uma nova transformação de fase ($A \Rightarrow M$), descrevendo, assim, um laço de histerese, ampliado no detalhe da Figura 3.7(b), envolvendo estas duas últimas transformações de fase. Porém, quando o material retorna à temperatura inicial ($T = 285 K$), ainda resta uma parcela de deformação plástica que é irreversível.

A Figura 3.8 ilustra a evolução das frações volumétricas envolvidas no processo. Inicialmente, o material apresenta uma estrutura martensítica maclada (M) que se transforma, dando origem a uma estrutura martensítica não maclada induzida por tração (M^+). Depois, há uma outra transformação de fase que converte o material novamente em uma estrutura martensítica maclada (M). A seguir, tem-se uma nova transformação de fase cujo produto é a austenita (estável a alta temperatura). Por fim, mais uma transformação converte a austenita em martensita maclada.

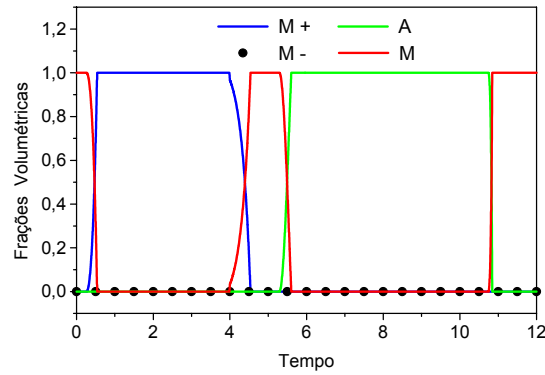


Figura 3.8 – Evolução das frações volumétricas para o efeito de memória de forma com plasticidade.

A seguir, a Figura 3.9(b) mostra o efeito de transformação de fase devida à variação de temperatura, juntamente com o efeito de expansão/contração térmica para o ciclo térmico mostrado na Figura 3.9(a) e um estado livre de tensões.

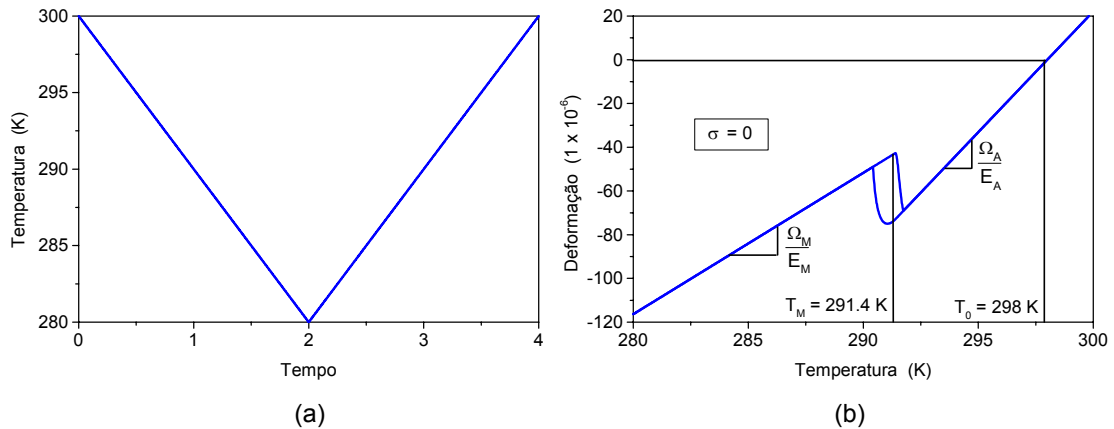


Figura 3.9 – Efeito de transformação de fase devida à variação de temperatura.

(a) Carregamento térmico;

(b) Diagrama deformação-temperatura.

Inicialmente, o material está a uma alta temperatura onde a fase estável é austenita. Com o decréscimo da temperatura, o material sofre uma deformação negativa que varia linearmente com a temperatura, correspondente ao fenômeno de contração térmica referente à fase austenítica (A). Quando alcança a temperatura de início de formação de martensita, dá-se início a uma transformação de fase martensítica ($A \Rightarrow M$), cujo produto é a martensita maclada. Ao término dessa transformação, identifica-se novamente o fenômeno de contração térmica

associado à fase martensítica (M). Elevando-se a temperatura, observam-se os fenômenos de expansão térmica e de transformação de fase inversa ($M \Rightarrow A$). Essas duas transformações de fase descrevem um laço de histerese, cuja área representa a energia envolvida nesse processo. Vale lembrar que está assinalada no diagrama deformação-temperatura a temperatura de referência T_0 para a qual o material deve apresentar deformação nula.

Analisando a Equação 2.23, desconsiderando o fenômeno de plasticidade e as frações volumétricas de martensita induzidas por tensão, para tensão nula, a relação constitutiva fica reduzida a

$$0 = E \varepsilon - \Omega(T - T_0).$$

Verifica-se, então, que os coeficientes angulares dos trechos lineares associados à austenita e à martensita são respectivamente $\frac{\Omega_A}{E_A}$ e $\frac{\Omega_M}{E_M}$. Portanto, para controlar o tamanho do laço de histerese, visando o ajuste com resultados experimentais, basta modificar os valores de Ω_A e Ω_M .

A evolução das frações volumétricas é apresentada na Figura 3.10. Inicialmente, o material apresenta uma estrutura totalmente austenítica (A). Baixando-se a temperatura, após a primeira transformação de fase ($A \Rightarrow M$), a estrutura resultante é a martensita maclada ou induzida por temperatura (M). Elevando-se a temperatura, após a segunda transformação de fase ($M \Rightarrow A$), retorna-se à estrutura original austenítica (A).

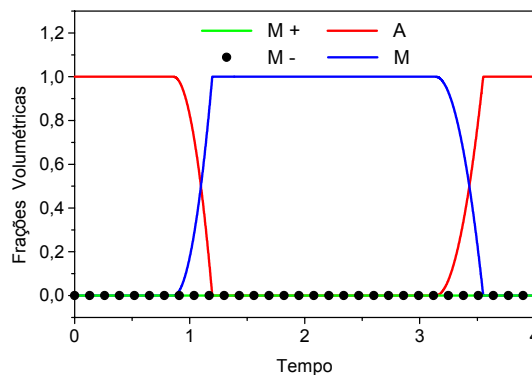


Figura 3.10 – Evolução das frações volumétricas para o efeito de transformação de fase devida à variação de temperatura.

Nas Figuras 3.11(a) e 3.11(b), observam-se os fenômenos conhecidos na literatura como deformação *two-way* positiva e negativa, respectivamente. Miller & Lagoudas (2000) definem deformação *two-way* como a deformação desenvolvida durante um ciclo térmico livre de tensões. Dependendo da temperatura de transformação de fase, que pode ser alterada através de tratamentos térmicos, essa deformação pode ser positiva ou negativa. Os ensaios apresentados a seguir atestam a capacidade do modelo em descrever ambos os comportamentos. Na Figura 3.11(a), é interessante notar que para o caso de deformação positiva, durante o trecho de transformação de fase, a curva tem o comportamento invertido. Ou seja, enquanto o fenômeno de contração térmica prevê que à medida que se baixa a temperatura, diminui-se a deformação, durante o trecho de transformação de fase ($A \Rightarrow M$), há um aumento da deformação. Já o fenômeno de expansão térmica pressupõe que à medida que se aumenta a temperatura, aumenta-se a deformação, no entanto, durante o trecho de transformação de fase ($M \Rightarrow A$), há uma diminuição da deformação. Já no caso de deformação negativa, processo contrário ocorre e não há inversão no comportamento do material, conforme Figura 3.11(b).

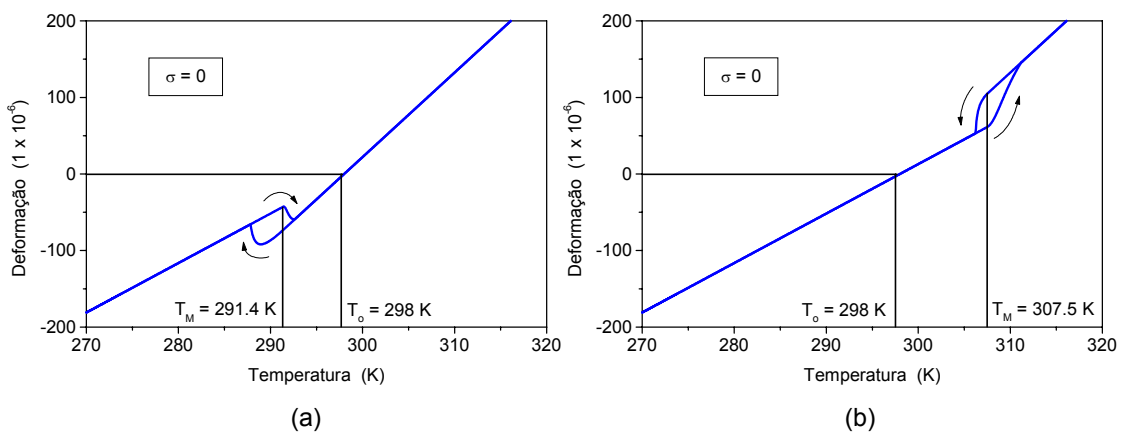


Figura 3.11 – Deformação *two-way*.

(a) Deformação *two-way* positiva;

(b) Deformação *two-way* negativa.

O próximo ensaio tem por objetivo verificar a capacidade do modelo em descrever o fenômeno de memória de forma reversível. Isto é possível tendo em vista o acoplamento entre os fenômenos de plasticidade e transformação de fase, que é contemplado no modelo proposto. Para tanto, os parâmetros de acoplamento

não podem ser nulos. Adotou-se, então, para este ensaio $\eta_{ci} = \eta_{ck} = 0,02$. Para obtenção desse comportamento, impõe-se um carregamento mecânico cíclico a uma alta temperatura constante. Após alguns ciclos, mantém-se um nível mínimo de tensão durante o descarregamento e aplica-se um ciclo térmico ao material, reduzindo e elevando a temperatura (com esse patamar mínimo de tensão constante), conforme Figura 3.12.

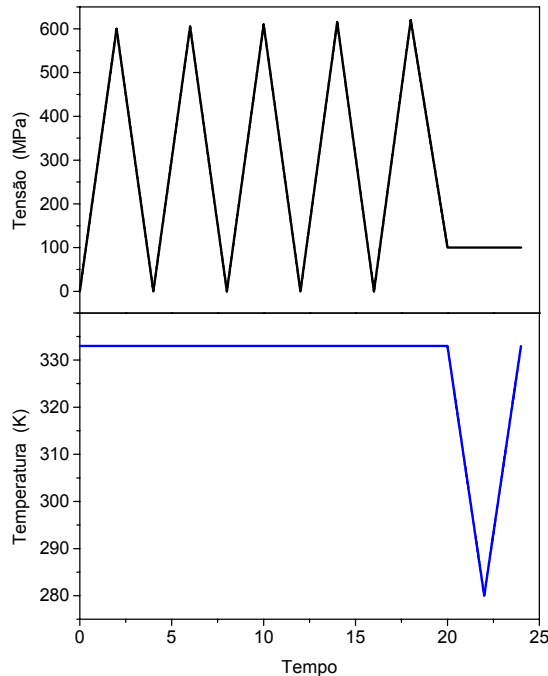


Figura 3.12 – Carregamento termomecânico para o efeito de memória de forma reversível (processo **SIMT**);

De acordo com a Figura 3.13(a), observa-se cinco ciclos mecânicos onde em cada ciclo o material é submetido ao efeito pseudoelástico com plasticidade. A cada ciclo, o material acumula uma parcela de deformação plástica (irreversível). Este processo é conhecido como treinamento. Durante o descarregamento do último ciclo, mantém-se um nível mínimo de tensão (100 MPa). Após o descarregamento parcial do último ciclo mecânico, o material é submetido a um ciclo térmico que permite associar uma forma a cada fase, conforme mostrado na Figura 3.13(b). É importante notar que as fases envolvidas nesta transformação de fase induzida pela variação de temperatura são a austenita (à alta temperatura) e

martensita não maclada M^+ (à baixa temperatura) ao invés da martensita maclada (M).

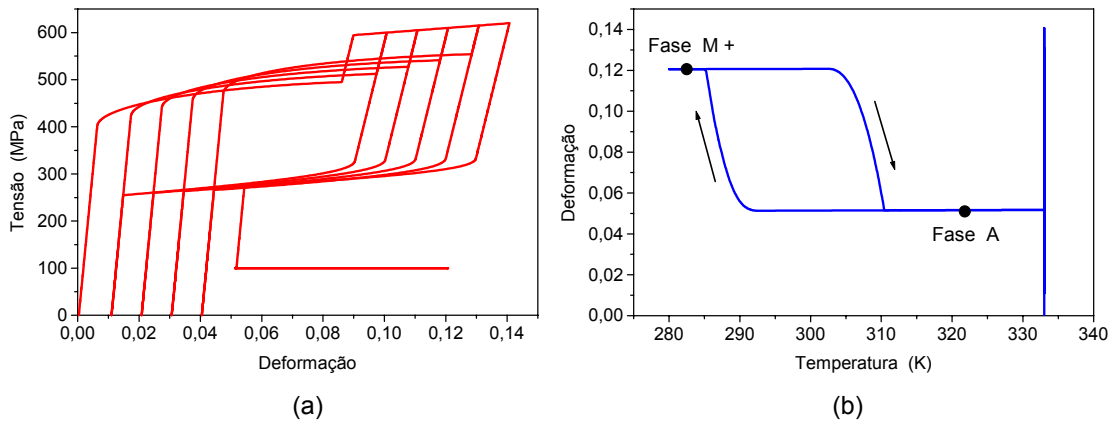


Figura 3.13 – Efeito de memória de forma reversível (processo **SIMT**).

- (a) Curva tensão-deformação;
 (b) Diagrama deformação-temperatura.

A Figura 3.14 apresenta a evolução das frações volumétricas para o efeito de memória de forma reversível. É importante notar que as fases austenítica (A) e martensítica não maclada induzida por tração (M^+) se revezam. Mesmo nas duas últimas transformações que correspondem ao ciclo térmico de resfriamento/aquecimento do material. As frações martensíticas maclada (M) e não maclada induzida por compressão (M^-) permanecem nulas durante todo o ensaio.

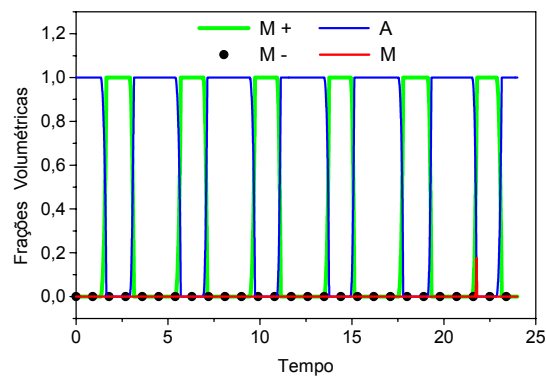


Figura 3.14 – Evolução das frações volumétricas para o efeito de memória de forma reversível (processo **SIMT**).

Visando analisar o efeito do acoplamento entre a plasticidade e a transformação de fase, utilizou-se os resultados obtidos em um ensaio experimental cíclico proposto por Miller & Lagoudas, 2000, conforme descrito a seguir. A exemplo do que foi feito para a obtenção do efeito de memória de forma reversível, adotou-se neste ensaio $\eta_{ci} = \eta_{ck} = 0,02$.

Este ensaio é composto por nove ciclos, conforme Figura 3.15, onde cada ciclo consiste em carregar e descarregar mecanicamente o material a uma alta temperatura constante ($T = 393 K$), tal que o material entre no regime plástico sem que haja transformação de fase. Após o descarregamento mecânico, submete-se o material a um ciclo térmico, abaixando a temperatura, tal que o material experimnte uma transformação de fase do tipo $A \Rightarrow M$ e em seguida elevando-se a temperatura novamente, quando o material experimenta uma transformação de fase do tipo $M \Rightarrow A$.

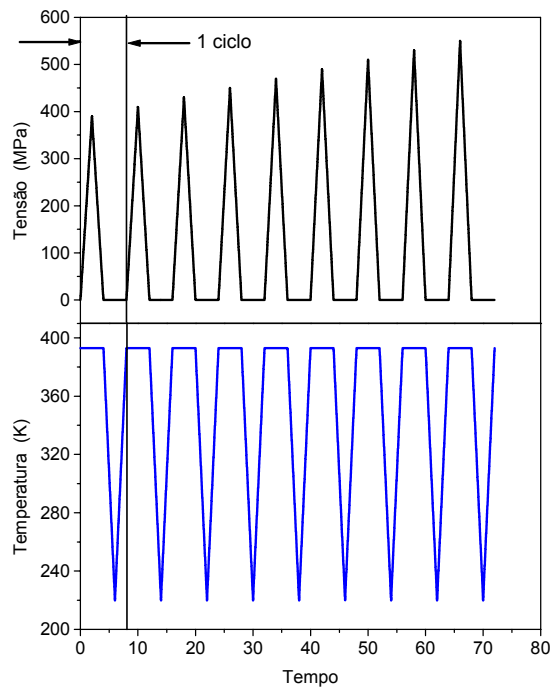


Figura 3.15 – Carregamento termomecânico para o ensaio experimental cíclico (Miller & Lagoudas, 2000).

A Figura 3.16(a) ilustra o diagrama tensão-deformação obtido experimentalmente por Miller & Lagoudas (2000), onde se observa o crescimento gradativo da deformação plástica imposta ao material a cada ciclo. Enquanto na

Figura 3.16(b), tem-se o resultado numérico obtido para este ensaio. Lembrando que para esta temperatura a estrutura do material é totalmente austenítica (A). Nessa análise preliminar, não houve uma preocupação com o ajuste quantitativo.

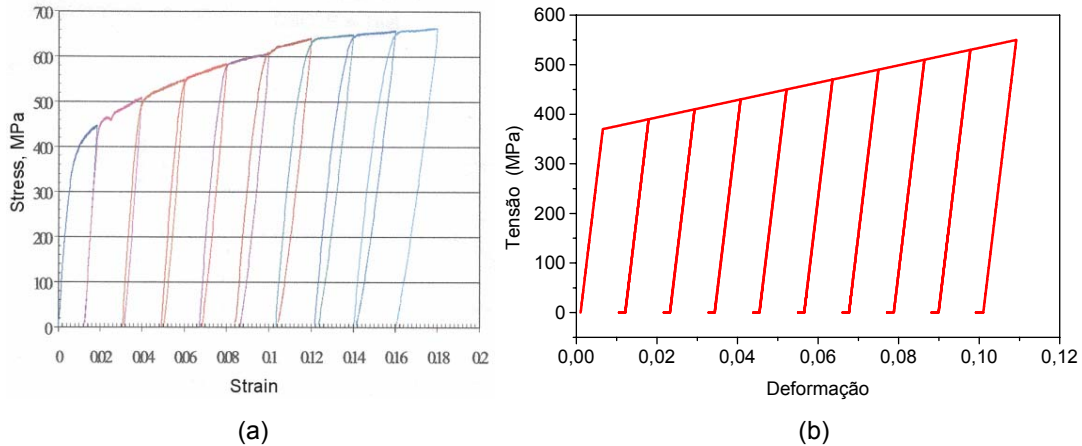


Figura 3.16 – Curvas tensão-deformação para ensaio cíclico.

(a) Resultado experimental (Miller & Lagoudas, 2000);

(b) Resultado numérico.

Na Figura 3.17(a), é apresentado o diagrama deformação-temperatura obtido experimentalmente por Miller & Lagoudas (2000), que apresenta laços de histerese distintos associados a cada um dos ciclos térmicos. Na Figura 3.17(b), observa-se o resultado numérico equivalente. Do ponto de vista qualitativo, verifica-se que o modelo prevê um resultado coerente com o resultado experimental. Ou seja, a deformação plástica afeta a transformação de fase induzida por temperatura, reduzindo as temperaturas de início e fim de transformação de fase (deslocamento do laço) e alargando o laço de histerese.

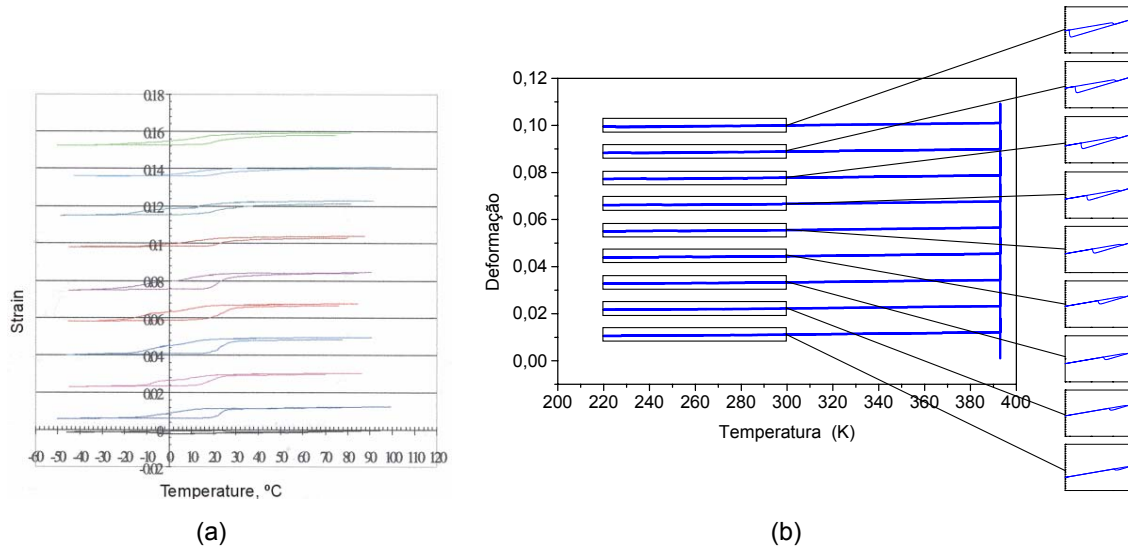


Figura 3.17 – Curvas deformação-temperatura para ensaio cíclico.

(a) Resultado experimental (Miller & Lagoudas, 2000);

(b) Resultado numérico.

A seguir, tem-se a evolução das frações volumétricas para este ensaio, conforme a Figura 3.18. Observa-se que durante todo o carregamento mecânico envolvendo plasticidade a estrutura é totalmente austenítica. Já durante o ciclo térmico livre de tensões, no resfriamento o material experimenta uma transformação de fase $A \Rightarrow M$, enquanto no aquecimento o material experimenta uma transformação inversa do tipo $M \Rightarrow A$. Este comportamento se repete para os nove ciclos. As frações volumétricas de martensita induzidas por tensão (M^+ e M^-) permanecem nulas durante todo o ensaio.

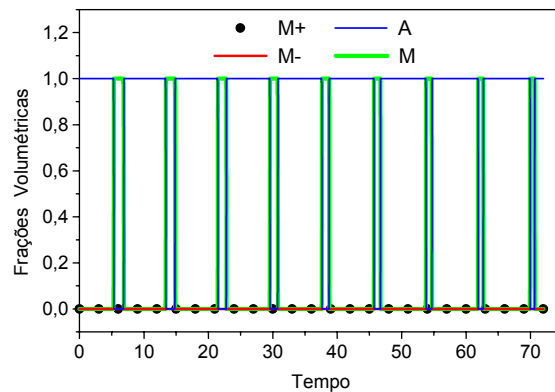


Figura 3.18 – Evolução das frações volumétricas para o ensaio cíclico.