



PRPG Pré-Reitoria de Pós-Graduação
PIBIC/CNPq/UFCG-2009



ESTUDOS PARA MODELAGEM TERMOMECÂNICA DE ATUADORES DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

Henrique Martinni Ramos de Oliveira¹, Celso Rosendo Bezerra Filho²

RESUMO

Este trabalho tem por finalidade estudar ferramentas capazes de modelar termomecanicamente atuadores de ligas com memória de forma. Utilizando a primeira e a segunda lei da termodinâmica e a equação de Clausius-Clapeyron foi determinada, a partir de ensaios de tração uniaxiais, isobáricos e isotérmicos, a variação das entalpias de transformação de um fio e de uma fita de Ni-Ti. Comparando-se os resultados obtidos através da equação de Clausius-Clapeyron com aqueles obtidos através de ensaios DSC foi verificada uma concordância aceitável do método.

Palavras-chave: Clausius-Clapeyron, Entalpia de Transformação de Fase, LMF

STUDIES TO TERMOMECHANICAL MODELING OF SHAPE MEMORY ALLOYS ACTUATORS

ABSTRACT

This work has for purpose to study tools capable of modeling thermomechanically shape memory alloys actuators. Using the first and the second law of thermodynamic and the Clausius-Clapeyron equation it was determined, from uniaxial traction assays isobaric and isothermal, the transformation enthalpy variation of a Ni-Ti wire and ribbon. Comparing the results obtained from the Clausius-Clapeyron equation with those obtained from DSC assays an acceptable concordance of the method was verified.

Keywords: Clausius-Clapeyron, Enthalpy Phase Transformation, SMA

INTRODUÇÃO

As ligas com memória de forma (SMA – Shape Memory Alloys) compõem uma classe especial de materiais metálicos que demonstram a capacidade de retomar uma forma previamente definida quando sujeitas a um tratamento termomecânico apropriado. Geralmente, estes materiais podem ser facilmente deformados plasticamente a uma temperatura relativamente baixa e, ao serem expostos a uma temperatura mais elevada, retomam a forma inicial. Além disso, sob condições específicas, as ligas com memória de forma podem absorver e dissipar energia mecânica quando submetidas a um carregamento mecânico cíclico (FERNANDES, 2006).

O efeito de memória de forma (EMF) ocorre devido à existência de duas fases presentes no material, uma fase de alta temperatura (fase austenítica) e uma fase de baixa temperatura (fase martensítica), cada uma com diferentes estruturas cristalográficas, portanto, diferentes propriedades. A fase martensítica apresenta uma estrutura cristalográfica formada por placas orientadas em várias direções (*twinned martensite*). Quando submetida a um esforço, essas placas martensíticas são orientadas em uma única direção (*detwinned martensite*) causando uma deformação pseudoelástica no material, sendo assim chamada por ser uma deformação provocada pela “acomodação” das placas martensíticas. Estas placas ao serem aquecidas posteriormente mudam da fase martensítica para a fase austenítica, resultando numa recuperação da forma inicial (LAGOUDAS, 2008).

¹ Aluno de Curso de Engenharia Mecânica, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, UFCG, Campina Grande, PB, E-mail: henriquemartinni@hotmail.com

² Engenheiro Mecânico, Prof. Doutor, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, UFCG, Campina Grande, PB, E-mail: celso@dem.ufcg.edu.br

Essas propriedades permitem que as ligas com memória de forma sejam empregadas em diversas aplicações nos mais diversos setores da indústria, como: aeroespacial, automotivo, biomédico, petrolífero, etc. (LAGOUDAS, 2008).

Como esses materiais se tornaram de grande aplicabilidade na indústria com o passar dos anos, muitos trabalhos a seu respeito vêm sendo desenvolvidos com o intuito de aprofundar cada vez mais o conhecimento sobre o comportamento desse material.

MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LaMMEA) da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica no Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande – PB, em conjunto com o laboratório de ligas inteligentes com memória de forma da Universidade Federal de Pernambuco.

Material

Foram utilizadas amostras de fios e fitas de Ni-Ti para a realização de ensaios de DSC no laboratório de ligas inteligentes com memória de forma da Universidade Federal de Pernambuco. Esses dados serviram de base para analisar dados experimentais obtidos pelo trabalho realizado por RODRIGUES & ARAÚJO (2008).

Primeira Lei da Termodinâmica

A troca de energia entre um sistema fechado e sua vizinhança é um dos assuntos clássicos da Termodinâmica. Um sistema fechado é uma determinada quantidade de massa localizada dentro de uma superfície fechada.

Consideraremos, dentre todos os processos que podem levar um sistema de um estado de equilíbrio a outro, apenas aqueles que apresentam interações na forma de trabalho, mas nenhuma interação térmica entre o sistema e suas vizinhanças. Qualquer um destes processos é chamado de processo adiabático.

Embora os processos adiabáticos possam levar um sistema de um estado de equilíbrio a outro, independente do caminho realizado, observa-se que o trabalho líquido realizado pelo ou sobre o sistema é o mesmo para qualquer um desses processos entre dois estados. Partindo dessas considerações, a primeira lei da termodinâmica diz que o valor do trabalho líquido realizado por ou sobre um sistema fechado submetido a um processo adiabático entre dois estados, depende apenas do estado inicial e do estado final (MORAN & SHAPIRO, 2002).

A primeira lei da termodinâmica estabelece a existência da energia interna (U) dependente do estado do sistema, a qual pode ser alterada por uma realização de trabalho (W), pelo ou sobre o sistema, e por uma quantidade de calor (Q) transferida, para ou do sistema. Uma relação da primeira lei da termodinâmica para um sistema onde as variações de energia cinética e potencial são desprezíveis é dada pela expressão abaixo:

$$\Delta U = W + Q \quad (1)$$

Na forma diferencial, a equação anterior pode ser escrita como:

$$dU = \delta W + \delta Q \quad (2)$$

O calor (Q) é considerado positivo quando entra no sistema e o trabalho (W) é considerado positivo quando sai do sistema.

A energia interna de um sistema pode ser de natureza eletromagnética, mecânica, química, térmica e etc. A energia mecânica é produzida por uma força causando uma compressão em um sistema e alterando seu volume ou provocando uma tensão sobre o mesmo. A energia térmica é produzida por uma variação da temperatura (via calor específico) ou por mudança de fase (via calor latente).

A soma da energia interna (U) com o produto da pressão (p) pelo volume (V) resulta numa propriedade termodinâmica denominada entalpia (H), que é representada por:

$$H = U + pV \quad (3)$$

Em um sistema aberto com fluxo de massa (\dot{m}) através da sua fronteira, troca de calor (\dot{Q}) e realização de trabalho (\dot{W}), o balanço da energia pode ser escrito como:

$$\frac{dE}{dt} = \sum_{i=0}^n \dot{Q}_i - \dot{W} + \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{v_s^2}{2} + gz_s \right) \quad (4)$$

Onde h é a entalpia por unidade de massa na entrada e na saída do sistema, $\frac{v^2}{2}$ é o termo associado à energia cinética e gz é o termo associado à energia potencial.

Segunda Lei da Termodinâmica

A segunda lei da termodinâmica indica que todos os processos naturais ocorrem num certo sentido e não no oposto. De acordo com o enunciado de Clausius é impossível construir um dispositivo que opere segundo um ciclo sem produzir outros efeitos além da transferência de calor de um corpo quente para um corpo frio. Esse sentido natural só pode ser invertido se for fornecida energia ao dispositivo (MORAN & SHAPIRO, 2002).

Partindo dessa análise qualitativa, podemos analisar quantitativamente a segunda lei juntamente com o conceito de entropia, a partir da desigualdade de Clausius, que estabelece que para um ciclo termodinâmico:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0 \quad (5)$$

Onde δQ é o calor transferido através da fronteira do sistema de temperatura T .
A entropia é definida, em processos reversíveis, como sendo:

$$\oint \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{rev} = \oint dS \quad (6)$$

ou

$$dS = \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{rev} \quad (7)$$

Considere o ciclo termodinâmico abaixo, figura 1, onde o processo I é irreversível e o processo II é reversível. Analisando a variação de entropia em um processo ocorrido entre os estados, a e b, temos da desigualdade de Clausius que:

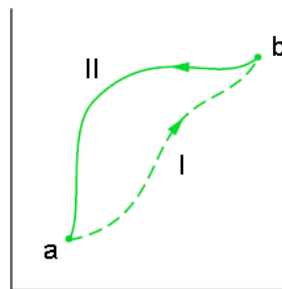


Figura 1. Processo ocorrido em um sistema fechado entre dois pontos a e b quaisquer.

Sendo o processo (I) irreversível.

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = \left(\int_a^b \frac{\delta Q}{T} \right)_I + \left(\int_b^a \frac{\delta Q}{T} \right)_{II} < 0 \quad (8)$$

Se o processo (II) for reversível, temos:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = \left(\int_a^b \frac{\delta Q}{T} \right)_I + S(a) - S(b) < 0 \quad (9)$$

então,

$$S(b) > S(a) + \left(\int_a^b \frac{\delta Q}{T} \right)_I \quad (10)$$

Se o processo de a para b for adiabático, resulta:

$$S(b) > S(a) \quad (11)$$

Logo,

$$S(b) - S(a) > 0 \text{ , ou seja: } S(b) - S(a) = S_g$$

Onde S_g é um termo sempre positivo denominado de geração de entropia.

A geração de entropia S_g pode ser analisada para caracterizar o nível de reversibilidade do processo.

A equação da segunda lei da termodinâmica para um sistema fechado pode ser expressa como:

$$\Delta S = \int \frac{\delta Q}{T} + S_g \quad (12)$$

Para um sistema aberto, a segunda lei da termodinâmica pode ser escrita como:

$$\frac{dS}{dt} = \sum_{i=1}^n \frac{\dot{Q}_i}{T_i} + \sum_e \dot{m}s - \sum_s \dot{m}s + \dot{S}_g \quad (13)$$

Algumas relações importantes no desenvolvimento de cálculos termodinâmicos são:

$$du = Tds - pdv \quad (14)$$

$$dh = Tds + vdp. \quad (15)$$

Outras duas equações usadas para se obter resultados semelhantes são:

A **Função de Helmholtz** específica ψ definida por:

$$\psi = u - Ts \quad (16)$$

E a **Função de Gibbs** específica g definida por:

$$g = h - Ts \quad (17)$$

As funções de Helmholtz e Gibbs são propriedades porque ambas são definidas em termos de propriedades. Por inspeção das Equações 14 e 15, as unidades de ψ e g são as mesmas que as de u e h . A diferencial de $d\psi$, é dada por:

$$d\psi = du - d(Ts) = du - Tds - sdT \quad (18)$$

Substituindo a Equação 14 na Equação 18, obtém-se:

$$d\psi = -pdv - sdT \quad (19)$$

Analogamente, formando-se a diferencial dg , temos:

$$dg = dh - d(Ts) = dh - Tds - sdT \quad (20)$$

Substituindo a Equação 15 na Equação 20, obtém-se:

$$dg = vdp - sdT \quad (21)$$

Temos então que as diferenciais das Funções de **Helmholtz** e **Gibbs** são dadas pelas Equações 19 e 21, respectivamente.

Equação de Clausius-Clapeyron

Os cálculos de propriedades termodinâmicas como entalpia, ou entropia, em função de outras propriedades mensuráveis podem ser agrupados em duas categorias distintas. A primeira delas é composta pelas avaliações das diferenças entre as propriedades de duas fases diferentes e a segunda categoria é composta pelos cálculos das variações de propriedades numa fase simples e homogênea. Considerando a

primeira categoria, ou seja, aquela que é composta pelos problemas onde existem duas fases distintas. Analisaremos uma situação onde as fases são compostas por líquido e vapor, porém, veremos que esta restrição não invalida os resultados da análise nos casos onde existem outras fases em equilíbrio (WYLEN et al, 2003).

Considerando uma máquina térmica operando segundo o ciclo de Carnot entre dois reservatórios térmicos. As temperaturas dos reservatórios térmicos de baixa e de alta temperatura são respectivamente iguais a $T - \Delta T$ e T . Temos a representação do ciclo de Carnot expressa pela Figura 2.

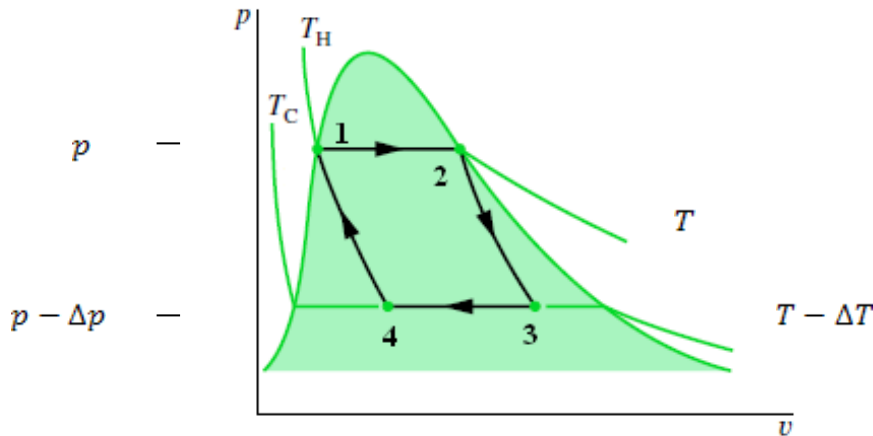


Figura 2. Ciclo de Carnot (pequena diferença entre as temperaturas dos reservatórios).

Vamos admitir que a diferença entre essas temperaturas seja pequena. As pressões de saturação correspondentes a essas temperaturas são $p - \Delta p$ e p . O ciclo de Carnot opera com quatro processos em regime permanente. A figura 2 mostra que os estados inicial e final do processo de transferência de calor a alta temperatura (q_H) são representados pelo ponto 1 (líquido saturado) e pelo ponto 2 (vapor saturado) e os pontos 3 e 4 representam os estados inicial e final de transferência de calor de baixa temperatura (q_L) (ambos na região de mistura líquido-vapor). Deste modo, as transferências de calor reversíveis no ciclo são dadas por:

$$q_H = T s_{lv} \quad \text{e} \quad q_L = (T - \Delta T) s_{lv}$$

e o trabalho líquido do ciclo é:

$$w_{liq} = q_H - q_L = \Delta T s_{lv} \tag{22}$$

Como todos os processos do ciclo de Carnot ocorrem em regime permanente e são reversíveis, temos que:

$$w = - \int v dp$$

Aplicando esta equação aos quatro processos do ciclo, temos:

$$\begin{aligned} w_{liq} &= 0 - \int_2^3 v dp + 0 - \int_4^1 v dp \\ w_{liq} &\approx - \left(\frac{v_2 - v_3}{2} \right) (p - \Delta p - p) - \left(\frac{v_1 + v_4}{2} \right) (p - p + \Delta p) \\ w_{liq} &\approx \Delta p \left[\left(\frac{v_2 + v_3}{2} \right) - \left(\frac{v_1 + v_4}{2} \right) \right] \end{aligned} \tag{23}$$

Combinando a Equação 22 com a Equação 23, temos:

$$\frac{\Delta p}{\Delta T} \approx \frac{s_{lv}}{\left(\frac{v_2 + v_3}{2} \right) - \left(\frac{v_1 + v_4}{2} \right)}$$

Na situação limite, onde $\Delta T \rightarrow 0, v_3 \rightarrow v_2 = v_v$ e $v_4 \rightarrow v_1 = v_l$. Neste caso,

$$\lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta p}{\Delta T} = \left(\frac{dp}{dT} \right)_{sat} = \frac{s_{lv}}{v_{lv}} \tag{24}$$

A transferência de calor entre os estados 1 e 2 ocorre a pressão constante. Deste modo,

$$q_h = h_{lv} = T s_{lv}$$

Generalizando o resultado indicado na Equação 24, temos:

$$\left(\frac{dp}{dT}\right)_{sat} = \frac{s_{lv}}{v_{lv}} = \frac{h_{lv}}{T v_{lv}} \quad (25)$$

Temos então que a Equação 25 é a equação de Clapeyron e é uma relação importante que envolve a pressão e a temperatura de saturação, as variações de entalpia e entropia associadas à mudança de fase e os volumes específicos das duas fases.

Reescrevendo a Equação 25 temos:

$$\begin{aligned} \left(\frac{dp}{dT}\right)_{sat} &= \frac{s_{lv}}{v_{lv}} = \frac{h_{lv}}{T v_{lv}} = \frac{\Delta H}{T v} \frac{1/v}{1/v} = \frac{\Delta H^*}{T \varepsilon} \\ \frac{d\sigma}{dT} &= \frac{\Delta H^*}{T_0 \varepsilon} \end{aligned} \quad (26)$$

Onde da Equação 26 temos que σ é a tensão axial de tração, ΔH^* é a variação de entalpia da transformação de fase por unidade de volume, ε é a deformação da transformação e T_0 é dado por:

$$T_0 = \frac{M s + A s}{2} \quad (27)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas tabelas 1 e 2 verificamos, respectivamente, os valores de entalpia e temperaturas de transformação de fase obtidos a partir do ensaio DSC.

	Fio	Fita
ΔH_A	21,36	18,06
ΔH_R	6,27	5,56
ΔH_M	11,33	4,80
$\Delta H_{R+M} = \Delta H_R + \Delta H_M$	17,60	10,36

Tabela 1. Valores de entalpia de transformação de fase obtidos a partir do ensaio DSC.

Onde ΔH_A é a entalpia de transformação reversa, ΔH_R é a entalpia associada à fase R, ΔH_M é a entalpia de transformação direta e ΔH_{R+M} é a soma das entalpias da transformação direta e da fase R.

	Fio	Fita
A_S	48,52°C	49,33°C
R_S	46,06°C	48,17°C
M_S	2,08°C	12,18°C

Tabela 2. Valores das temperaturas de transformação de fase obtidos a partir do ensaio DSC.

Onde A_S é a temperatura de início de transformação reversa, R_S é a temperatura de início de transformação da fase R e M_S é a temperatura de início de transformação martensítica ou transformação direta.

As Figuras 3a, 3b e 3c mostram as curvas de tensão mecânica e resistência elétrica em função da deformação acopladas no plano, para o fio de Ni-Ti (RODRIGUES & ARAÚJO, 2008).

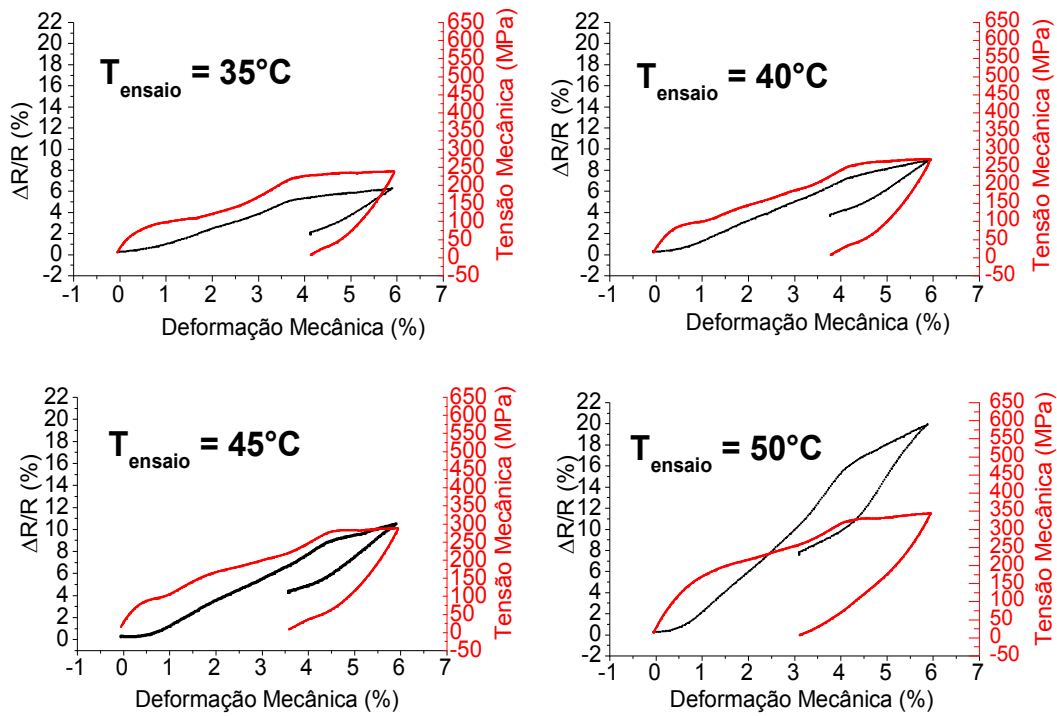


Figura 3a. Curvas de tensão mecânica e resistência elétrica ($\Delta R/R$), acopladas em função da deformação, para cada temperatura de ensaio do atuador do tipo fio de Ni-Ti.

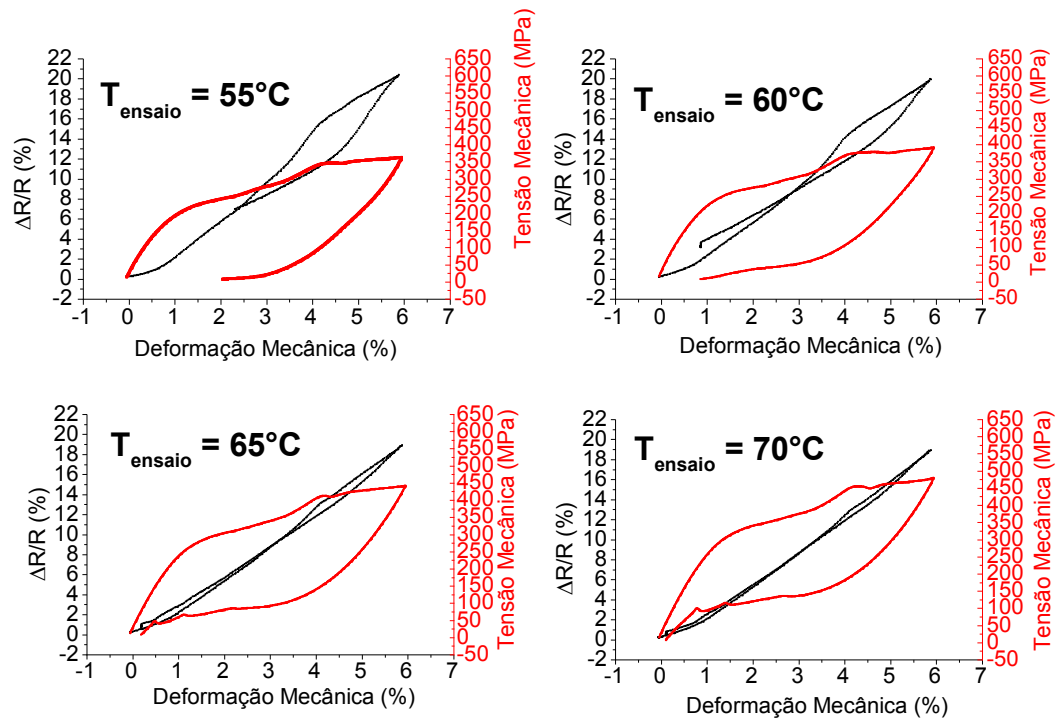


Figura 3b. Curvas de tensão mecânica e resistência elétrica ($\Delta R/R$), acopladas em função da deformação, para cada temperatura de ensaio do atuador do tipo fio de Ni-Ti.

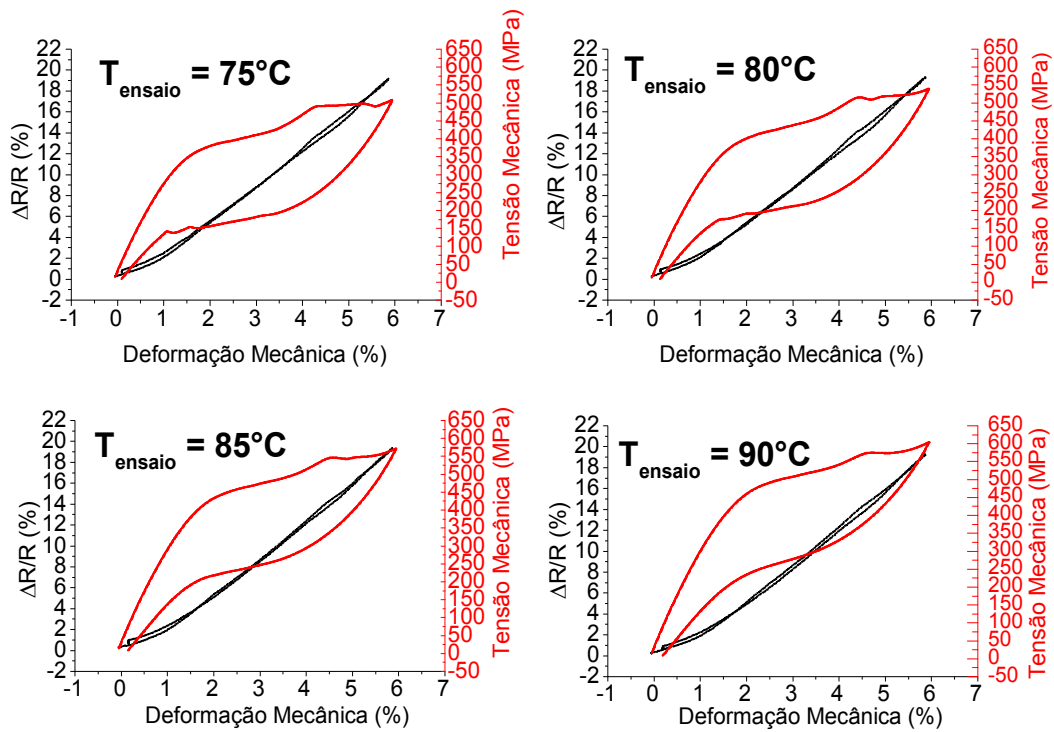


Figura 3c. Curvas de tensão mecânica e resistência elétrica ($\Delta R/R$), acopladas em função da deformação, para cada temperatura de ensaio do atuador do tipo fio de Ni-Ti.

As Figuras 4a, 4b e 4c mostram as curvas de tensão mecânica e resistência elétrica em função da deformação acopladas no plano, para a fita de Ni-Ti (RODRIGUES & ARAÚJO, 2008)

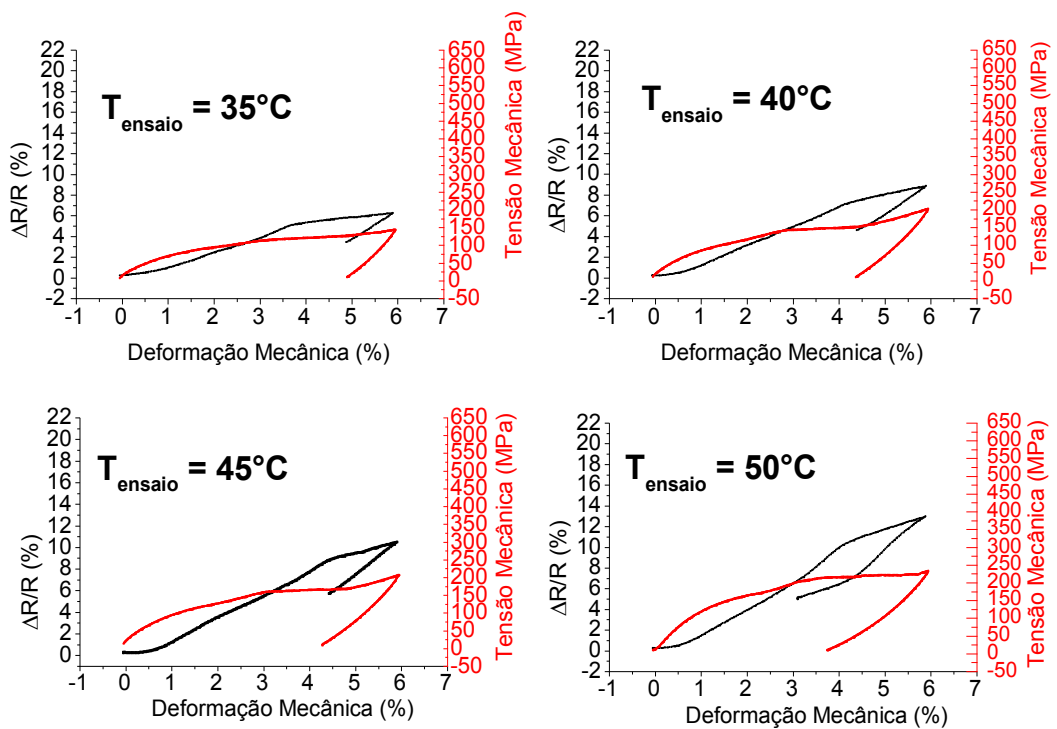


Figura 4a. Curvas de tensão mecânica e resistência elétrica ($\Delta R/R$), acopladas em função da deformação, para cada temperatura de ensaio do atuador do tipo fita de Ni-Ti.

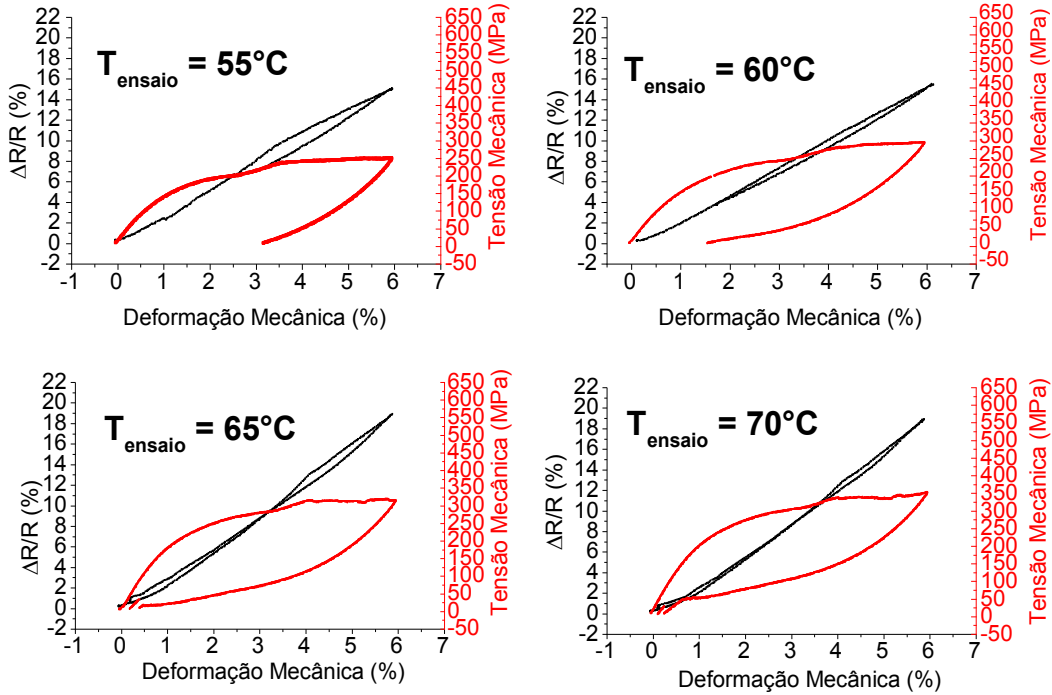


Figura 4b. Curvas de tensão mecânica e resistência elétrica ($\Delta R/R$), acopladas em função da deformação, para cada temperatura de ensaio do atuador do tipo fita de Ni-Ti.

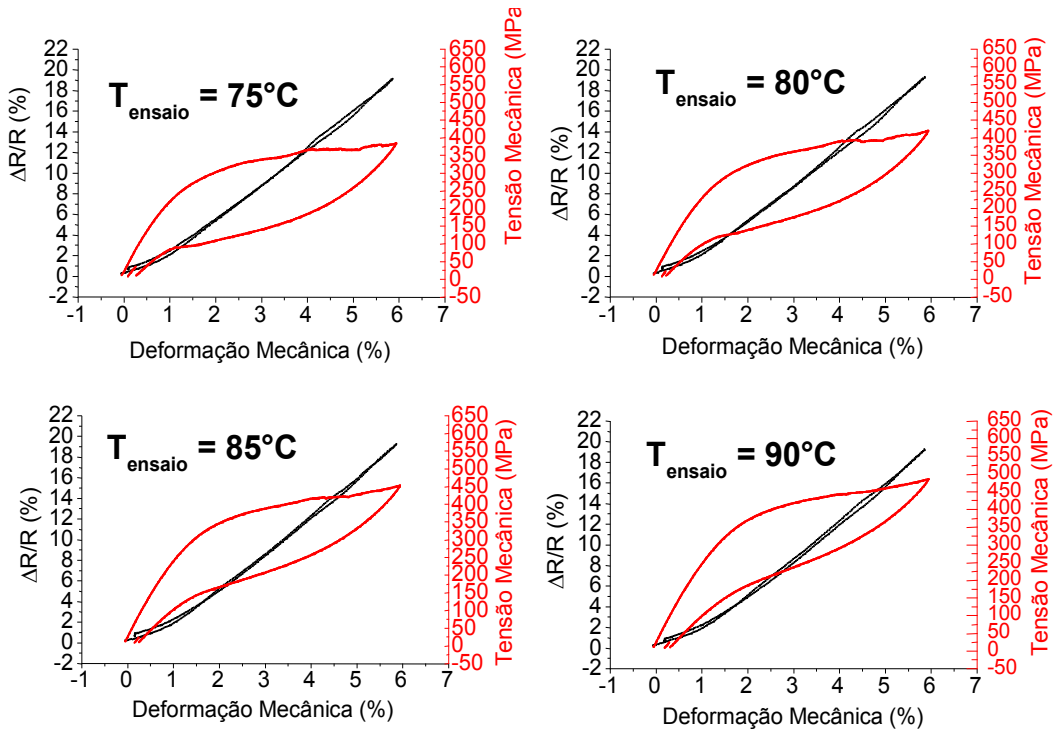


Figura 4c. Curvas de tensão mecânica e resistência elétrica ($\Delta R/R$), acopladas em função da deformação, para cada temperatura de ensaio do atuador do tipo fita de Ni-Ti.

A Figura 5 mostra o comportamento das tensões críticas de início de formação e reversão da martensita em função da temperatura de teste obtidas a partir das Figuras 3a, 3b e 3c para o atuador do tipo fio, e as Figuras 4a, 4b e 4c para o atuador do tipo fita. Conforme preconizado pela literatura (OTSUKA & WAYMAN, 1998), comprovou-se o comportamento linear dessa relação.

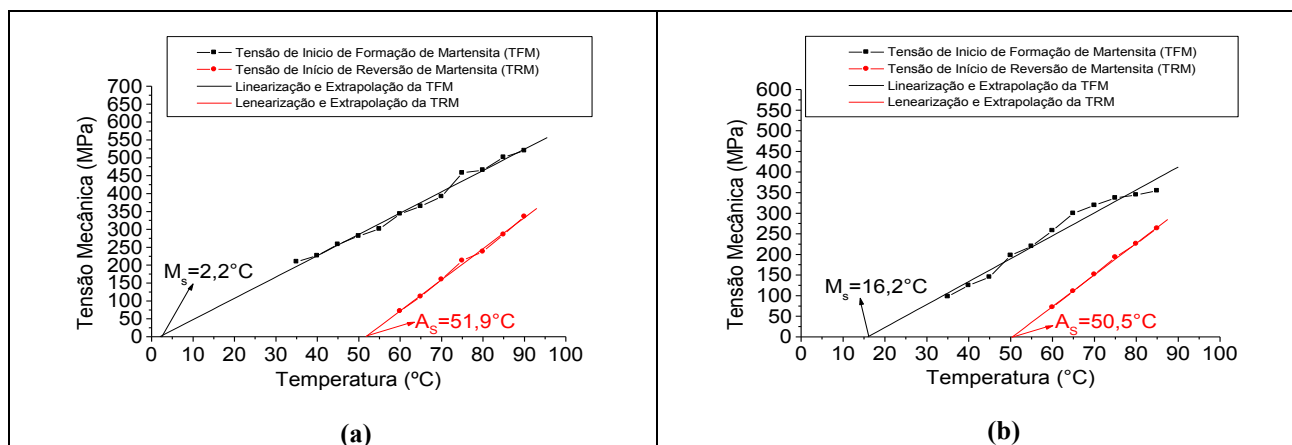


Figura 5. Comportamento das tensões críticas de formação e reversão de martensita em função da temperatura para os atuadores de Ni-Ti. (a) Fio. (b) Fita

A extrapolação dos comportamentos lineares verificados na Figura 5, permite estimar as temperaturas de transformação M_s e A_s para o caso de tensão nula. Esta estimativa forneceu $M_s = 2,2^\circ\text{C}$ e $A_s = 51,9^\circ\text{C}$ no caso dos fios e $M_s = 16,2^\circ\text{C}$ e $A_s = 50,5^\circ\text{C}$ para o caso das fitas.

Os resultados das temperaturas M_s e A_s extrapoladas a partir dos gráficos da Figura 5, apresentam valores semelhantes aos obtidos no ensaio DSC. Podemos comparar esses valores nas tabelas 3 e 4.

Tabela 3. Temperaturas de transformação M_s e A_s extrapoladas a partir dos gráficos da Figura 5 e de dados de ensaio DSC, para a amostra do tipo fio de Ni-Ti.

Fio	Temperaturas Extrapoladas	Ensaio DSC
M_s	$2,2^\circ\text{C}$	$2,08^\circ\text{C}$
A_s	$51,9^\circ\text{C}$	$48,52^\circ\text{C}$

Tabela 4. Temperaturas de transformação M_s e A_s extrapoladas a partir dos gráficos da Figura 5 e de dados de ensaio DSC, para a amostra do tipo fita de Ni-Ti.

Fita	Temperaturas Extrapoladas	Ensaio DSC
M_s	$16,2^\circ\text{C}$	$12,18^\circ\text{C}$
A_s	$50,5^\circ\text{C}$	$49,33^\circ\text{C}$

Utilizando as equações 26 e 27 calculamos as entalpias de transformação a partir dos gráficos da figura 5. Comparando estes valores com os obtidos no ensaio DSC, temos a tabela 5 para o fio e a tabela 6 para a fita. Onde o parâmetro ε que representa a deformação associada à transformação de fase é atribuído o valor de $\varepsilon = 0,06$, pois representa 6% de deformação, de acordo com os gráficos das figuras 3a, 3b, 3c, 4a, 4b e 4c.

Tabela 5. Entalpias de transformação de fase calculadas com base nos gráficos da figura 5 e obtidas no ensaio DSC, para a amostra do tipo fio de Ni-Ti.

Fio	Método Gráfico	Ensaio DSC
ΔH_M	9,64	11,33
ΔH_A	13,98	21,36

Tabela 6. Entalpias de transformação de fase calculadas com base nos gráficos da figura 5 e obtidas no ensaio DSC, para a amostra do tipo fita de Ni-Ti.

Fita	Método Gráfico	Ensaio DSC
ΔH_{R+M}	11,14	10,36
ΔH_A	15,31	18,06

Analisando o resultado da entalpia de transformação obtida através do gráfico da figura 5 para a fita, verificamos que a entalpia calculada corresponde à soma das entalpias de transformação da fase R mais a entalpia de transformação martensítica.

Podemos observar nas tabelas 5 e 6 que os valores das entalpias de transformação direta e reversa, tanto para o fio quanto para a fita, foram bem próximos dos valores obtidos pelo ensaio no calorímetro

(DSC). A pequena diferença entre os valores apresentados pode ser associada à erros na linearização dos gráficos. Também pode-se atribuir essas diferenças de valores ao fato de que as amostras ensaiadas no calorímetro são pequenas amostras retiradas de amostras maiores do fio e da fita e que estes podem não ser homogêneos.

Vemos nas Figuras 6a, 6b e 6c, gráficos feitos a partir de ensaios de resistência elétrica sob tensão constante, a fim de identificar a temperatura de início de transformação da fase R e temperaturas de transformação reversa (A_s e A_f), para amostra tipo fio (RODRIGUES & ARAÚJO, 2008).

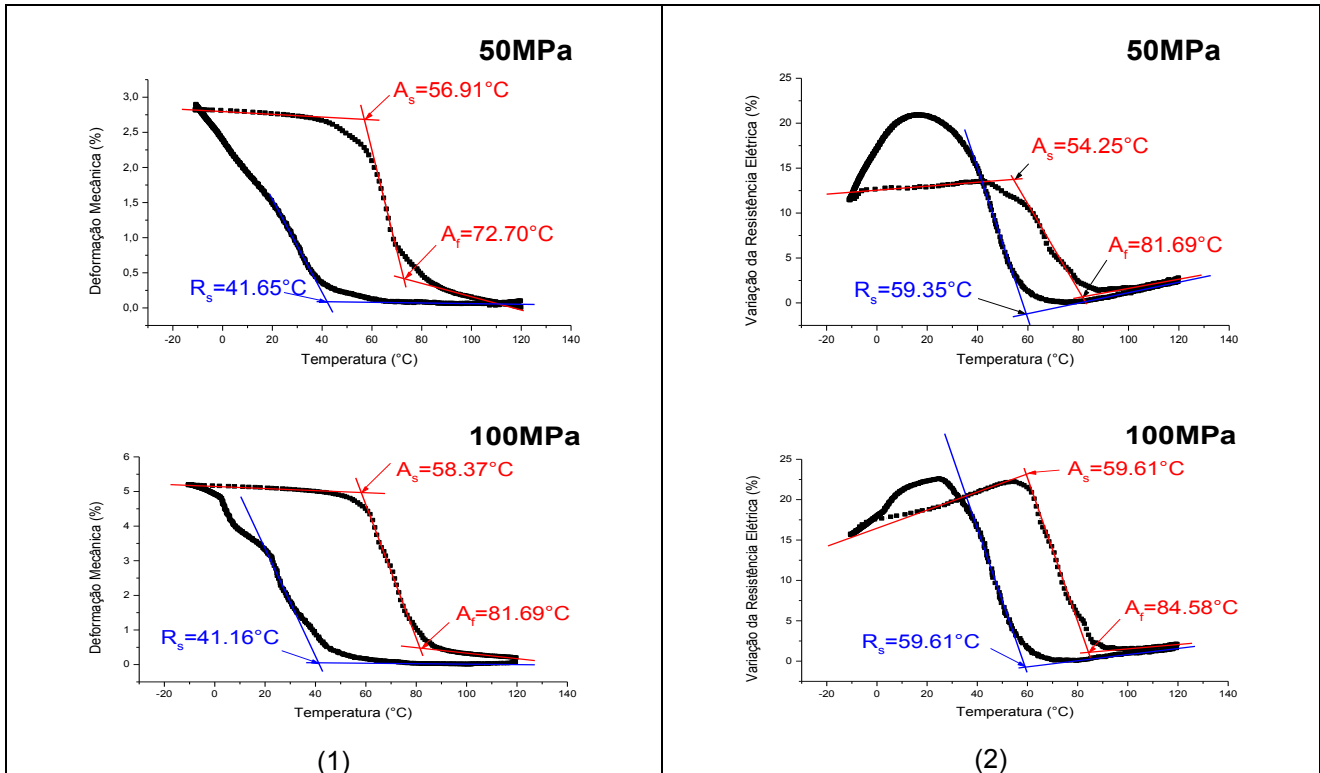


Figura 6a. Comportamento eletrotermomecânico isobárico do fio. (1) Curvas ϵ - T. (2) Curvas R - T.

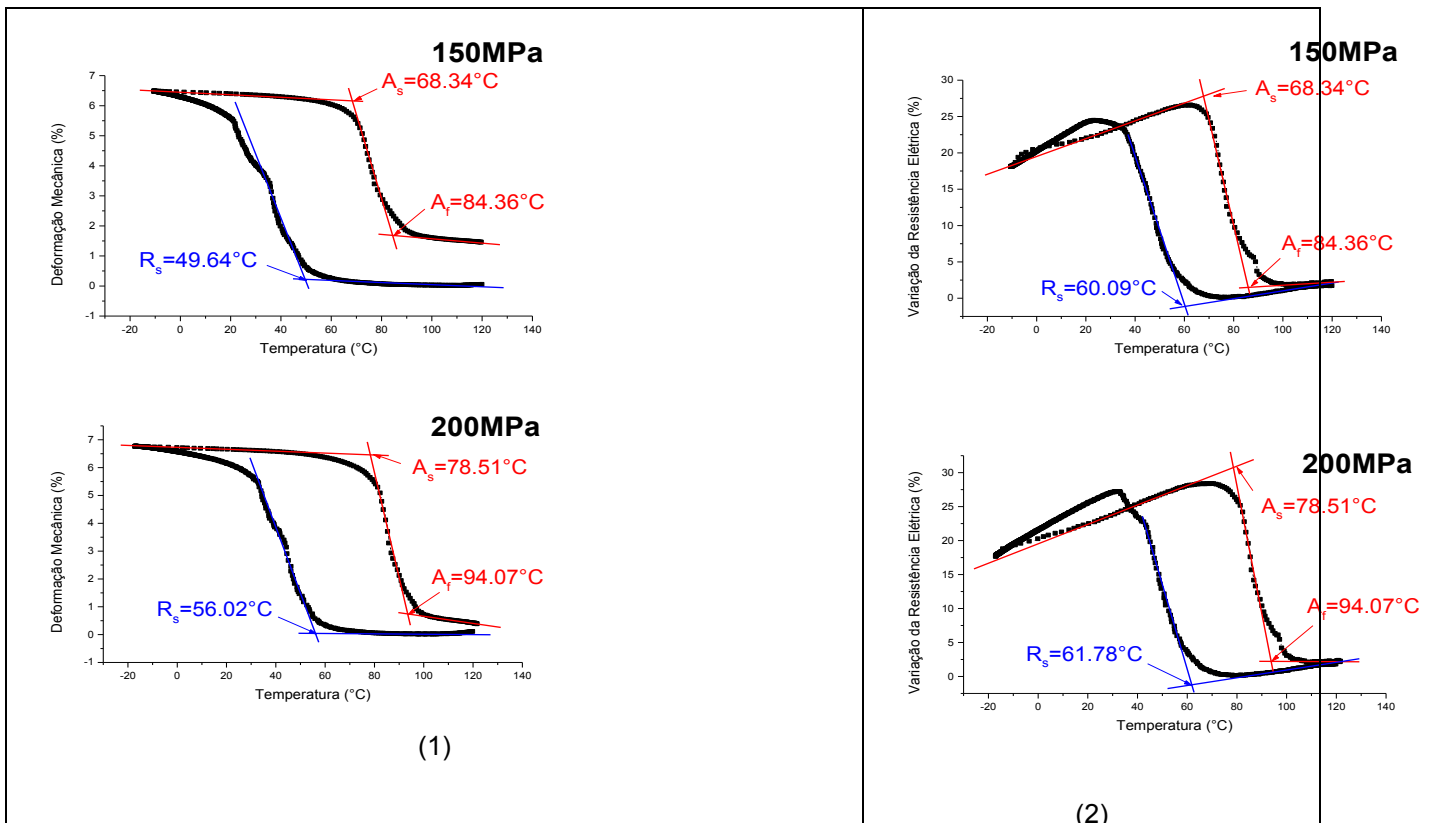


Figura 6b. Comportamento eletrotermomecânico isobárico do fio. (1) Curvas ϵ -T. (2) Curvas R - T.

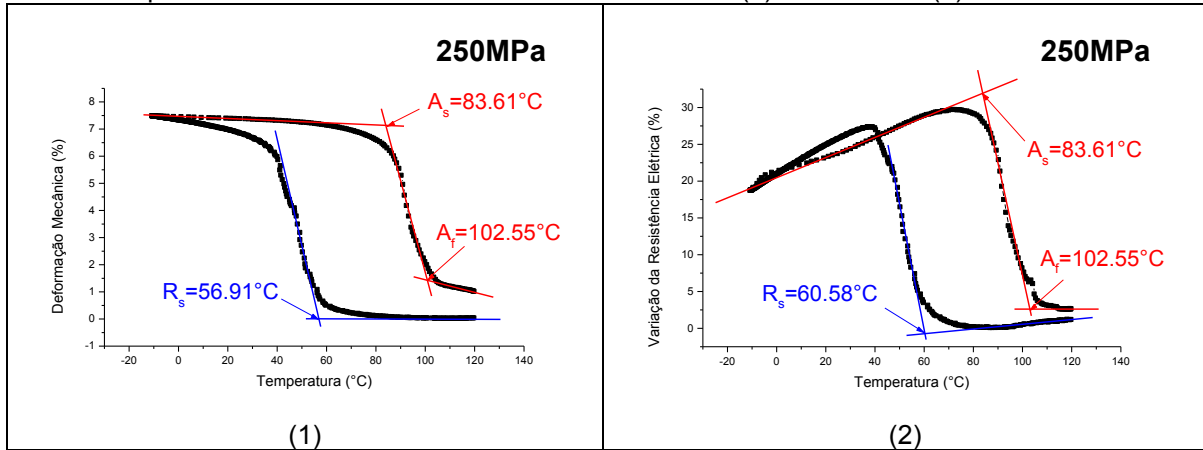


Figura 6c. Comportamento eletrotermomecânico isobárico do fio. (1) Curvas ϵ -T. (2) Curvas R - T.

Temos também nas Figuras 7a, 7b e 7c, gráficos feitos a partir de ensaios de resistência elétrica sob tensão constante, a fim de identificar a temperatura de início de transformação da fase R e temperaturas de transformação reversa (A_s e A_f), para amostra tipo fita. (RODRIGUES, et. Al., 2008)

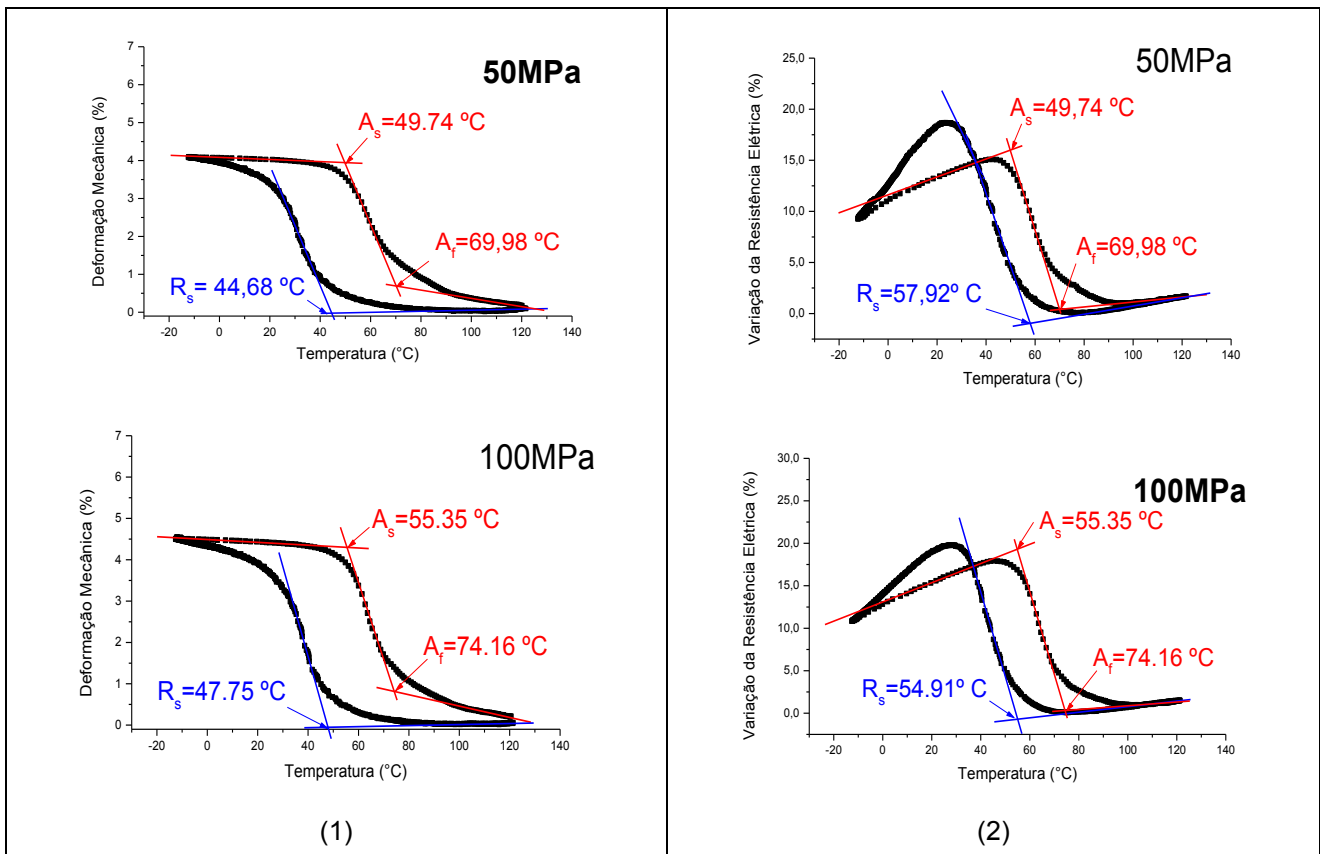


Figura 7a. Comportamento eletrotermomecânico isobárico da fita. (1) Curvas ϵ -T. (2) Curvas R - T.

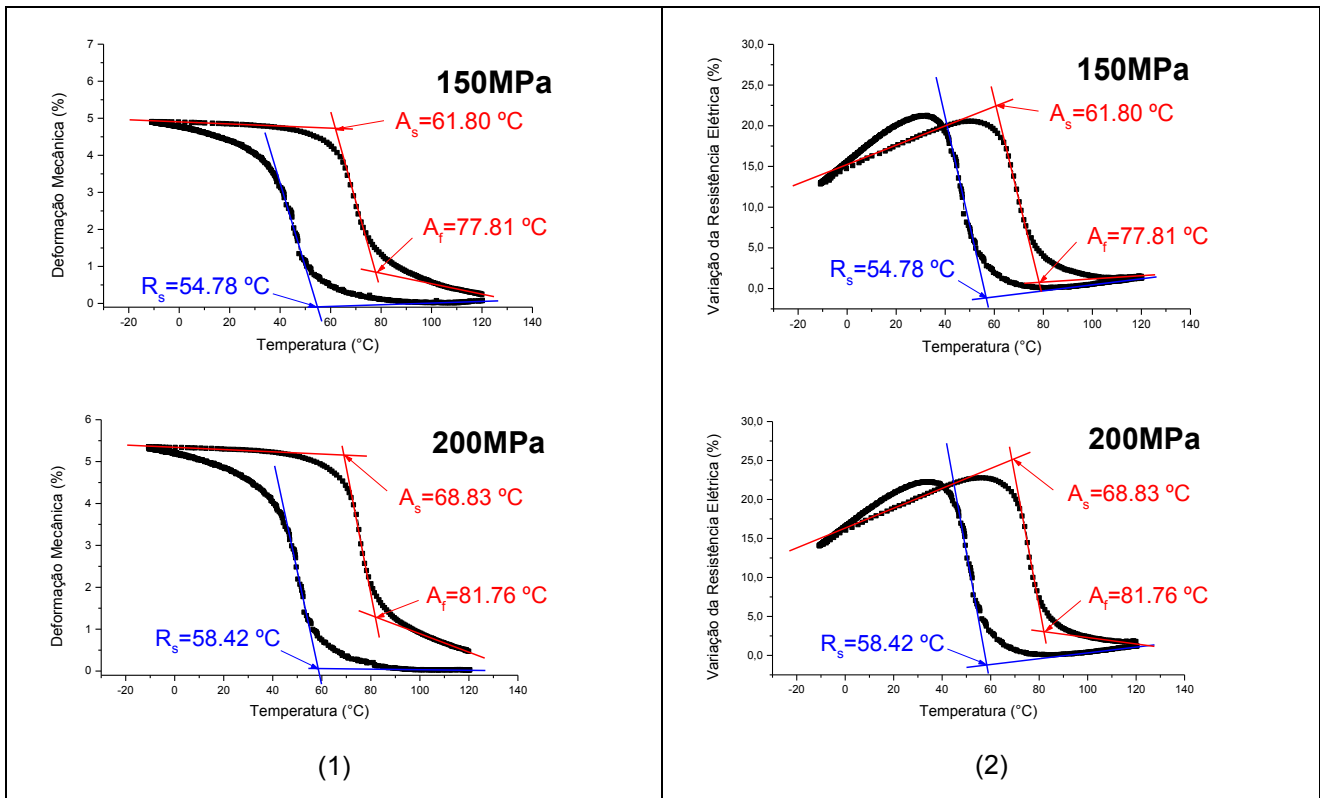


Figura 7b. Comportamento eletrotermomecânico isobárico da fita. (1) Curvas ϵ -T. (2) Curvas R – T.

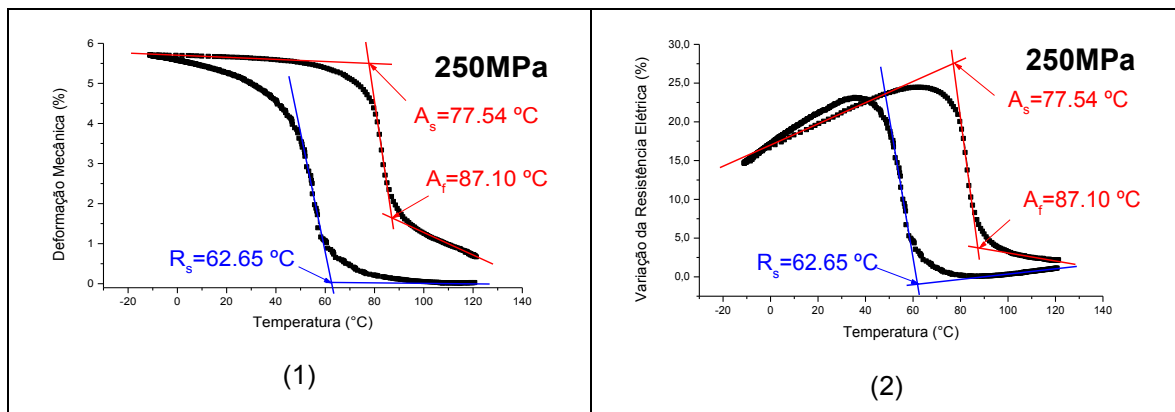


Figura 7c. Comportamento eletrotermomecânico isobárico da fita. (1) Curvas ϵ -T. (2) Curvas R – T.

De forma análoga aos gráficos gerados na Figura 5, a Figura 8 apresenta a temperatura de início da transformação da fase R (R_s) e as temperaturas de início de transformação reversa A_s correspondentes à cada tensão de ensaio. Os gráficos tensão x temperatura, plotados a partir dos dados das Figuras 6a, 6b e 6c para amostra do tipo fio, e das Figuras 7a, 7b e 7c para foram extrapolados a fim de identificar as temperaturas correspondentes à tensão zero, já que o comportamento apresentado é linear.

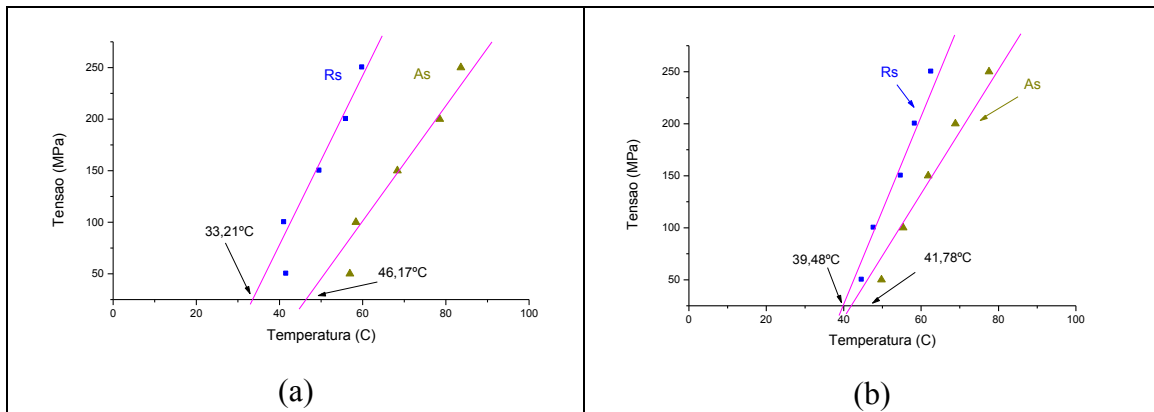


Figura 8. Extrapolação das temperaturas de transformação a partir dos resultados dos ensaios isobáricos.(a) Fio e (b) Fita.

A extrapolação dos comportamentos lineares verificados na Figura 8 assim como a Figura 5, permite estimar as temperaturas de transformação Rs e As para o caso de tensão nula. Esta estimativa forneceu Rs= 33,21°C e As=46,17 °C no caso dos fios e Rs = 39,48 °C e As = 41,78 °C para o caso das fitas.

Os resultados das temperaturas Rs e As extrapoladas a partir dos gráficos da Figura 8, apresentam valores semelhantes aos obtidos no ensaio DSC. Podemos comparar esses valores nas tabelas 7 e 8.

Tabela 7. Temperaturas de Transformação Rs e As extrapoladas a partir dos gráficos da Figura 8 e de dados de ensaio DSC, para a amostra do tipo Fio de Ni-Ti.

Fio	Temperaturas Extrapoladas	Ensaio DSC
Rs	33,21°C	46,06°C
As	46,17°C	48,52°C

Tabela 8. Temperaturas de Transformação Rs e As extrapoladas a partir dos gráficos da Figura 8 e de dados de ensaio DSC, para a amostra do tipo Fita de Ni-Ti.

Fita	Temperaturas Extrapoladas	Ensaio DSC
Rs	39,48°C	48,17°C
As	41,78°C	49,33°C

Utilizamos novamente as equações 26 e 27 e o parâmetro $\epsilon = 0,06$, correspondente à deformação de transformação de fase, calculamos as entalpias de transformação a partir dos gráficos da figura 8. Comparando estes valores com os obtidos no ensaio DSC, temos a tabela 9 para o fio e a tabela 10 para a fita.

Tabela 9. Entalpias de Transformação de Fase calculadas com base nos gráficos da figura 8, para a amostra do tipo Fio de Ni-Ti.

Fio	Método Gráfico	Ensaio DSC
ΔH_{R+M}	21,69	17,59
ΔH_A	15,54	21,36

Tabela 10. Entalpias de Transformação de Fase calculadas com base nos gráficos da figura 8, para a amostra do tipo Fita de Ni-Ti.

Fita	Método Gráfico	Ensaio DSC
ΔH_{R+M}	25,79	10,36
ΔH_A	17,52	18,06

Verificamos também que as entalpias calculadas a partir dos gráficos da figura 8, tanto para o fio quanto para a fita, apresentam valores de entalpias correspondentes à soma da entalpia de transformação da fase R e da transformação martensítica, obtidas no ensaio DSC.

CONCLUSÕES

Concluimos com a realização desse trabalho que através de gráficos obtidos a partir de ensaios de tração uniaxiais em regime isobáricos e isotérmicos e a equação de Clausius-Clapeyron, podemos obter as entalpias de transformação de fase. Estes resultados mostraram-se semelhantes aos resultados obtidos no ensaio DSC. As temperaturas de início de transformação de fase também podem ser extraídas destes gráficos através da extrapolação dos mesmos para o caso de tensão nula.

As entalpias de transformação de fase, assim como as temperaturas, são de fundamental importância no modelamento termodinâmico dos atuadores de ligas com memória de forma.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela bolsa de Iniciação Científica. Ao Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LaMMEA) da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica em conjunto com o laboratório de ligas inteligentes com memória de forma da Universidade Federal de Pernambuco.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

LAGOUDAS, D.C.; Modeling and Engineering Applications, **Shape Memory Alloys**, 2008.

OTSUKA, K.; Wayman, C.M.; **Shape Memory Materials**, Cambridge University Press. 1998.

WYLEN, V.; Sonntag; Borgnakke; **Fundamentos da Termodinâmica**. Tradução da 6ª edição americana. Editora Edgard Blücher Ltda, 2003, 574p

MORAN, M.J.; Shapiro, H.N.; **Princípios de termodinâmica para engenharia**, 4ª edição. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.,2002,681p

FERNANDES, F.M.B.; **Ligas com memória de forma**, Departamento de ciência dos Materiais / CENIMAT.Universidade Nova de Lisboa. Abril de 2006.

RODRIGUES,L.F.A.;de Araújo, C.J. **Comportamento termomecânico de ligas Ni-Ti com memória de forma:caracterização para aplicação em compósitos ativos**, V Congresso de iniciação científica da Universidade Federal de Campina Grande. 2008.