

Estudo do efeito de memória de forma em ligas inoxidáveis usando ensaio de compressão

Study of shape memory effect in stainless steel using compression tests

Resumo

As propriedades de recuperação de forma da liga à base de Fe-Mn-Si-Cr-Ni-Co foram estudadas usando ensaio de compressão. Foram analisadas medidas de recuperação elástica (Re), recuperação de forma (Rf) e recuperação de forma total ($R_T = Re + Rf$) em função do número de ciclos de treinamento. Os resultados indicaram que 3,3 foi a melhor razão entre altura ($h_o = 20$ mm) e diâmetro ($\phi_o = 6$ mm) para se conseguirem uma deformação homogênea e curvas de carregamento bem definidas. A maior contribuição para a R_T foi atribuída à recuperação de forma. No último ciclo de treinamento, foi obtida uma $R_T = 90\%$, sendo 25% atribuída a Re.

Palavras-chave: Efeito de memória de forma, ensaio de compressão, aço inoxidável.

Abstract

The shape recovery properties of an Fe-Mn-Si-Cr-Ni-Co based alloy were studied using compression tests. Analyzed were the elastic recovery (Er), shape recovery (Sr) and total shape recovery ($T_{SR} = Er + Sr$) measurements as a function of training cycles. The results indicated that 3.3 was the best ratio between height ($h_o = 20$ mm) and diameter ($\phi_o = 6$ mm) to obtain a homogeneous deformation and defined loading curves. A major contribution of T_{SR} was attributed to shape recovery. In the last training cycle, a $T_{SR} = 90\%$ was obtained, where 25% was attributed to Er .

Keywords: Shape memory effect, compression test, stainless steel.

1. Introdução

Como é conhecido, o efeito memória de forma (EMF) nas ligas inoxidáveis é baseado na transformação cristalograficamente reversível $\gamma(\text{cfc}) \leftrightarrow \epsilon(\text{hc})$. De acordo com a literatura (Jang, 1995 e Arruda, 2000), dependendo da composição química e do tratamento termomecânico aplicado, diferentes transformações cristalográficas podem ocorrer: $\gamma(\text{cfc}) \rightarrow \epsilon(\text{hc})$, $\gamma(\text{cfc}) \rightarrow \alpha'(\text{ccc})$ ou $\gamma(\text{cfc}) \rightarrow \epsilon(\text{hc}) \rightarrow \alpha'(\text{ccc})$.

Fabiana Cristina
Nascimento

Doutora, Professora Adjunta,
Departamento de Física, UEPG,
Ponta Grossa, PR
E-mail: fabianacristina@uepg.br

Paulo Roberto Mei

Doutor, Professor Titular, DEMA-FEM-
UNICAMP, Campinas, SP
E-mail: pme@fem.unicamp.br

Jorge Otubo

Doutor, Professor Adjunto, ITA/CTA,
São José dos Campos, SP
E-mail: jrotubo@ita.br

Em particular, a transformação para a fase martensita- α' (ccc) ocorre com o aumento da deformação. Estudos detalhados mostraram que a martensita- ϵ pode ser induzida mecanicamente ou termicamente. Em ambas as situações, a transformação reversa é obtida durante o aquecimento resultando no EMF (Bergeon, 1997 e 2000). Diferentes ensaios mecânicos podem ser utilizados para induzir, mecanicamente, a martensita- ϵ sendo os mais utilizados os ensaios de compressão, tração e dobramento (Ohtsuka, 1994, Otubo, 1996 e 2002, Matsumura, 2000, Nascimento, 2008). Independente do ensaio a ser utilizado, tanto as propriedades de recuperação de forma, como algumas propriedades mecânicas e cristalográficas, podem ser avaliadas.

Particularmente o ensaio de compressão é bastante viável, uma vez que não se faz necessária uma grande quantidade de material, como no caso dos ensaios de tração. Uma outra vantagem consiste no fato de que a recuperação de forma total (R_T), em materiais com EMF, pode ser avaliada em função da recuperação elástica e da recuperação de forma.

Nesse trabalho, ensaios de compressão foram utilizados, visando a avaliar as propriedades de recuperação de forma total em função do número de ciclos de treinamento para ligas à base de Fe com EMF.

2. Materiais e métodos

As composições das ligas inoxidáveis com EMF estão apresentadas na Tabela 1. Ambas as ligas foram elaboradas em trabalho anterior, usando um forno de indução a vácuo (Otubo, 1996).

As ligas I e II foram solubilizadas com tratamento térmico de 1050°C/1 hora e 1150°C/30 minutos, respectivamente. O resfriamento foi feito com posterior temperatura em água. A microestrutura de ambas as composições foi avaliada em trabalho anterior, observando-se que a redução do tamanho de grão austenítico favoreceu a reversão da fase martensítica, melhorando o EMF. O refinamento da microestrutura foi obtido com tratamento térmico a 1050°C/10 minutos/H₂O, em ambas as ligas, com posterior resfriamento em água (Nascimento, 2008).

Após várias etapas de tratamento termomecânico, foram obtidos corpos-de-prova para os ensaios de compressão com diferentes dimensões: $h_o = 9$ mm e 20 mm (altura) e $\phi_o = 6$ mm (diâmetro). Maiores detalhes referentes ao tratamento termomecânico das ligas I e II podem ser obtidos em trabalho anterior (Nascimento, 2008).

O principal objetivo do ensaio de compressão foi induzir a martensita- ϵ mecanicamente.

Fixando o diâmetro e variando a altura dos corpos-de-prova, pode-se analisar o efeito da razão h_o/ϕ_o na homogeneidade da deformação. Durante todos os ensaios de compressão, foram mantidas as seguintes condições: 4% de deformação (ligas I e II), taxa de deformação de $1,4 \times 10^{-4} s^{-1}$ (para $h_o = 9$ mm) e $0,63 \times 10^{-4} s^{-1}$ (para $h_o = 20$ mm) e 0,075 mm/minuto. A aplicação da carga foi monitorada constantemente, conforme sugerido pela norma E9-89a (ASTM). Todos os ensaios foram realizados, utilizando uma matriz de WC. A reversão cristalográfica $\epsilon \rightarrow \gamma$ e, conseqüentemente, o EMF foram obtidos com tratamento térmico posterior aos ensaios de compressão, que consistiu em aquecimento a 600°C/30 minutos

com posterior resfriamento em água. O procedimento adotado (deformação seguida de aquecimento) é chamado de “treinamento”. Nesse trabalho, as ligas I e II foram submetidas a cinco completos ciclos de treinamento.

Durante os ensaios de compressão, foram medidas as dimensões (altura e diâmetro) dos corpos-de-prova em diferentes estágios como mostrado na Figura 1. As medidas foram realizadas diretamente nos corpos-de-prova utilizando um micrômetro. As dimensões dos cilindros foram avaliadas, levando-se em consideração a média de 05 medidas. Esse procedimento foi adotado em todos os estágios apresentados na Figura 1.

As dimensões antes dos ensaios foram denominadas h_o e ϕ_o . Após 4% de deformação (estado deformado), as dimensões passaram a ser h_c e ϕ_c . Durante o descarregamento (alívio da carga), ocorreu uma alteração nas dimensões do corpo-de-prova atribuída à recuperação elástica do material. Nessa etapa, as dimensões passaram a ser h_{re} e ϕ_{re} . Com o tratamento térmico a 600°C e posterior resfriamento em água, ocorreu a transformação reversa $\epsilon \rightarrow \gamma$ e parte da martensita- ϵ foi revertida em austenita- γ . Nessa situação, teve-se a recuperação de forma do material com dimensões h_{rf} e ϕ_{rf} .

Uma das vantagens de se utilizar o ensaio de compressão para avaliar o EMF é que a recuperação elástica (Re) e a recuperação de forma (Rf) podem ser analisadas, separadamente, conforme as equações (1) e (2) a partir de medidas diretas realizadas nos corpos-de-prova:

$$Re = (h_{re} - h_c) \quad (Eq.1)$$

$$Rf = (h_{rf} - h_{re}) \quad (Eq. 2)$$

Tabela 1 - Composição química das ligas inoxidáveis com EMF (% em peso).

Liga	C	Si	Mn	P	S	Co	Cr	Ni	Mo	Cu	O ₂ *	N ₂ *
I	0,044	5,11	7,79	0,003	0,007	11,85	13,02	5,74	0,010	0,31	74	75
II	0,009	5,25	8,26	0,002	0,006	11,84	12,81	5,81	0,001	0,16	50	52

* Teor em ppm.

Nesse caso, a recuperação total (R_T) foi atribuída à combinação da recuperação elástica (R_e) e da recuperação de forma (R_f) através da Equação (3):

$$R_T = (R_e + R_f) \quad (\text{Eq. 3})$$

A mesma análise para a R_e , a R_f e a R_T podem ser obtidas avaliando-se as variações no diâmetro (ϕ) ou volume dos corpos-de-prova para os diferentes estágios apresentados na Figura 1. Nesse trabalho, optou-se por avaliar a deformação convencional, sempre ligada à altura original do corpo-de-prova (Helman, 1993).

Todas as curvas, força (kN) versus deformação (mm), obtidas nos ensaios de compressão foram analisadas em ambas as ligas. Os resultados de R_e , R_f e R_T são apresentados em função do número de ciclos de treinamento (NC) para a liga que apresentou as melhores curvas de carregamento, sem indícios de flambagem (CETLIN, 2003) e com deformação mais homogênea, avaliada por microscopia óptica.

3. Resultados

3.1 Análise das curvas de carregamento versus descarregamento

O tratamento térmico, em ambas as ligas a 1050°C/10 minutos/H₂O, resultou em amostras com diferentes tamanhos de grãos austeníticos: (ASTM 7 - liga I) e (ASTM 4 - liga II). As medidas dos

diâmetros médios dos tamanhos de grão foram obtidas seguindo a norma ASTM E-112, usando imagens de microscopia óptica (Nascimento, 2008).

A Figura 2 apresenta uma curva típica obtida durante o ensaio de compressão na liga II, primeiro ciclo de treinamento. O segmento AB indica a curva de carregamento. No ponto A, as dimensões dos corpos-de-prova foram h_o e ϕ_o . O ponto B corresponde a 4% de deformação com dimensões h_c e c . A curva de descarregamento é representada pelo segmento BC. Nessa etapa, ocorreu uma recuperação elástica (R_e), que correspondeu à região representada pelo segmento BD. Nessa situação, os corpos-de-prova apresentaram dimensões h_{Re} e ϕ_{Re} . Os valores negativos, nas ordenadas e nas abscissas da Figura 2, indicam que o material foi comprimido. Em ambas as ligas, para todos os ensaios, foram obtidas curvas semelhantes à apresentada na Figura 2. Todas as curvas de carregamento foram, cuidadosamente, analisadas em todos os ciclos de treinamento, pois qualquer indício de flambagem do material, durante o ensaio, é detectado a partir da curva de carregamento.

A Figura 3 apresenta a comparação das curvas de carregamento para as ligas I e II. São representadas as curvas referentes aos ciclos (1_I), (2_I) e (4_I) - liga I e (1_{II}), (2_{II}) e (5_{II}) - liga II. Dois parâmetros podem ser comparados: dimensão dos corpos-de-prova e número de ciclos de treinamento.

No que se refere ao primeiro parâmetro, em alguns testes realizados na liga I, foi observada uma instabilidade na curva de carregamento, que foi atribuída à altura do corpo-de-prova ($h_o = 9$ mm). Algumas curvas apresentaram falhas, durante os testes, o que pode ser atribuído à acomodação do material, durante a deformação. Esse efeito pode ser observado na região destacada na curva referente ao ciclo (2_I) (Figura 3) e deve ser levado em consideração no momento de se determinarem outras propriedades mecânicas como o limite de escoamento $\sigma_{0,2\%}$ e $\sigma_{4\%}$ (Nascimento, 2008). A não uniformidade da deformação, para essa dimensão de corpo-de-prova, foi, também, avaliada por microscopia óptica. Os ensaios realizados com a liga II ($h_o = 20$ mm) resultaram em uma deformação mais homogênea, o que refletiu em curvas de carregamento mais definidas (Figura 3). Esse resultado possibilitou uma maior precisão na determinação das propriedades mecânicas e de recuperação de forma (Otubo, 2002 e Nascimento, 2003). Essa é uma das principais vantagens em realizar os ensaios com corpos-de-prova com maior altura, aumentando a região de deformação homogênea. Tais vantagens ficam mais evidentes, quando se comparam esse referidos ensaios com aqueles que são feitos com o volume total do material. Para o corpo de prova com $h_o = 9$ mm, a deformação total aplicada foi maior do que a prevista inicialmente, em torno de 8,8%. Esse comportamento está relacionado às diferenças entre as alturas

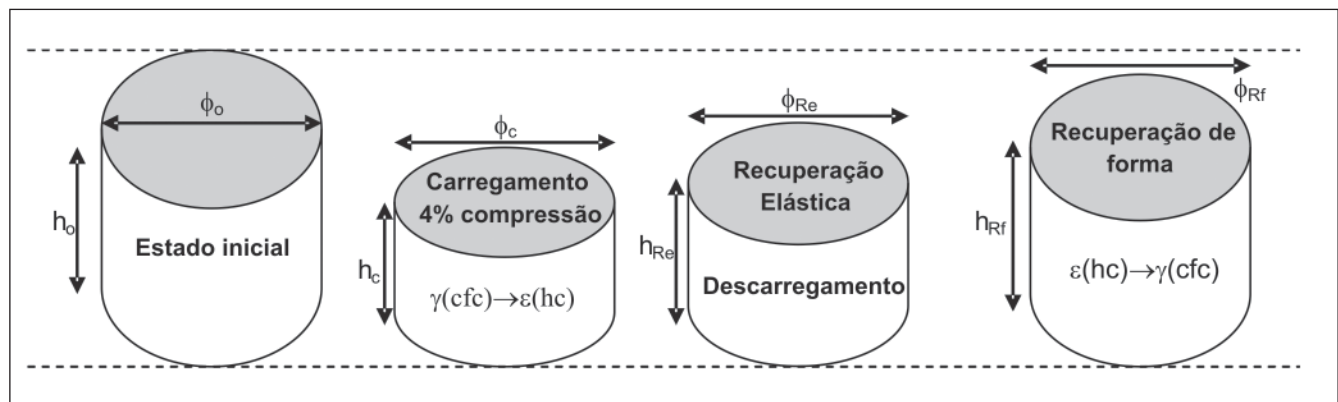


Figura 1 - Desenho esquemático do corpo-de-prova submetido a ensaio de compressão.

dos corpos-de-prova e o atrito matriz-material. De acordo com a literatura, a consequência do atrito está relacionada ao fluxo de deformações, que é mais grave à medida que o coeficiente de atrito matriz-material e o diâmetro do cilindro crescem, o que leva a uma heterogeneidade de deformação difícil de ser controlada (CETLIN, 2003). Estudos realizados por outros autores (Helman, 1993) indicaram que a deformação somente seria completamente homogênea, se a razão h_0/ϕ_0 fosse menor que 1,5, o que dificultaria a análise de propriedades de recuperação de forma.

O segundo parâmetro a ser avaliado na Figura 3, foi o comportamento da curva força (kN) versus deformação (mm) em função do número de ciclos (NC). No início do ensaio, as curvas de carregamento (1_{II}), (2_{II}) e (5_{II}) coincidiram, independente do NC, até uma deformação correspondente a 0,1 mm. Com o aumento da deformação, essas curvas começaram a se distanciar, indicando que o aumento do NC reduziu a força, influenciando na determinação do limite de escoamento. Esse comportamento pode ser associado à quantidade de martensita- ϵ residual (martensita que não foi revertida durante o aquecimento). Na Figura 3, esse efeito é, facilmente, visualizado na região entre 0,15 mm e 0,7 mm de deformação. A acomodação da deformação, a partir de um determinado ponto, faz com que todas as curvas, independentes do NC, tendam a um mesmo ponto. As curvas de carregamento (1_I), (2_I) e (4_I) da liga I apresentaram tendências semelhantes, quando analisadas em função do NC. No entanto, devido à diferença de dimensões dos corpos-de-prova, observou-se uma maior descontinuidade no início da deformação, dificultando as medidas de recuperação de forma. Comportamento similar pode ser observado, quando a curva carga-deformação foi obtida por ensaio de tração (Chen, 2000).

Estudos realizados indicaram que, saindo da região elástica, o material entra em um estágio onde ocorre o início da formação da martensita- ϵ seguida de um aumento do número de discordâncias perfeitas (Chen, 2000). No presente estudo, essa situação estaria localizada próximo ao ponto B (Figura 2).

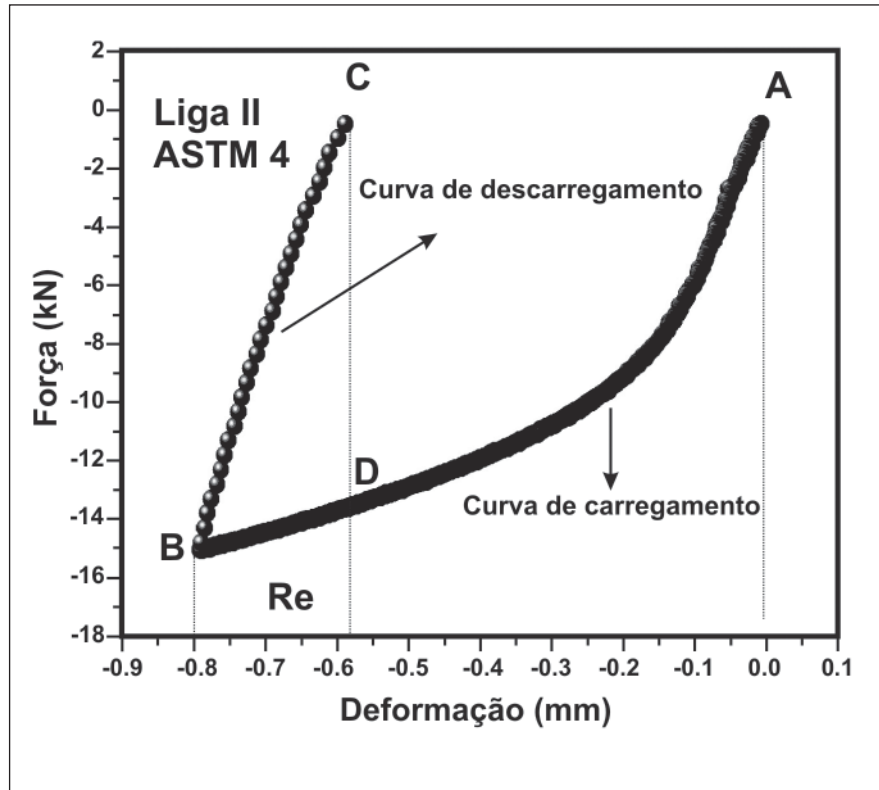


Figura 2 - Curva típica obtida durante o ensaio de compressão, liga II, ciclo (1).

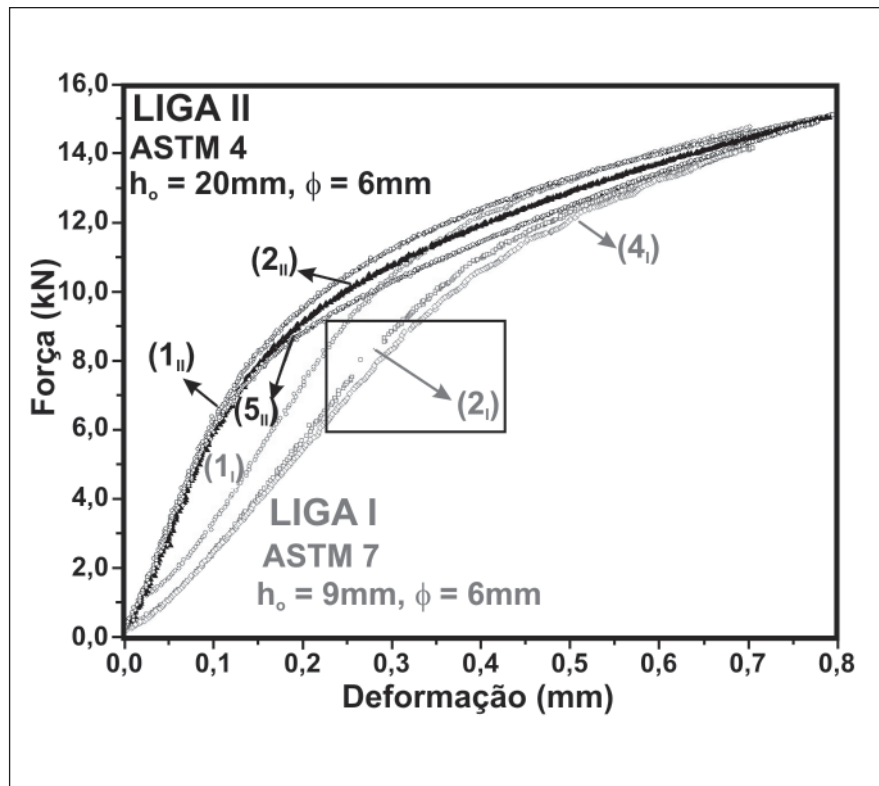


Figura 3 - Comparação das curvas de carregamento para as ligas I e II em função do número de ciclos de treinamento.

A Figura 4 apresenta uma comparação das curvas de deformação (carregamento) obtidas em ensaios de compressão e tração. A curva resultante do ensaio de compressão é referente ao ciclo (3_{II}), liga II analisada nesse trabalho, e a curva referente ao ensaio de tração foi obtida em trabalho anterior (Otubo, 1996). Uma comparação qualitativa dessas curvas leva a supor uma melhor acomodação da deformação durante os ensaios de tração, situação que facilita a transformação $\gamma \rightarrow \epsilon$. A região indicada por setas destacada na curva de compressão (Figura 4) indica uma região de instabilidade e maior dificuldade de acomodação do material após a deformação, quando ambos os ensaios são comparados. A análise dessa figura é qualitativa, uma vez que essas curvas não correspondem à deformação verdadeira. Quando se trata de pequenas deformações, a diferença entre a deformação convencional (baseada na altura dos corpos-de-prova) e a deformação verdadeira ou logarítmica é muito pequena (Helman, 1993).

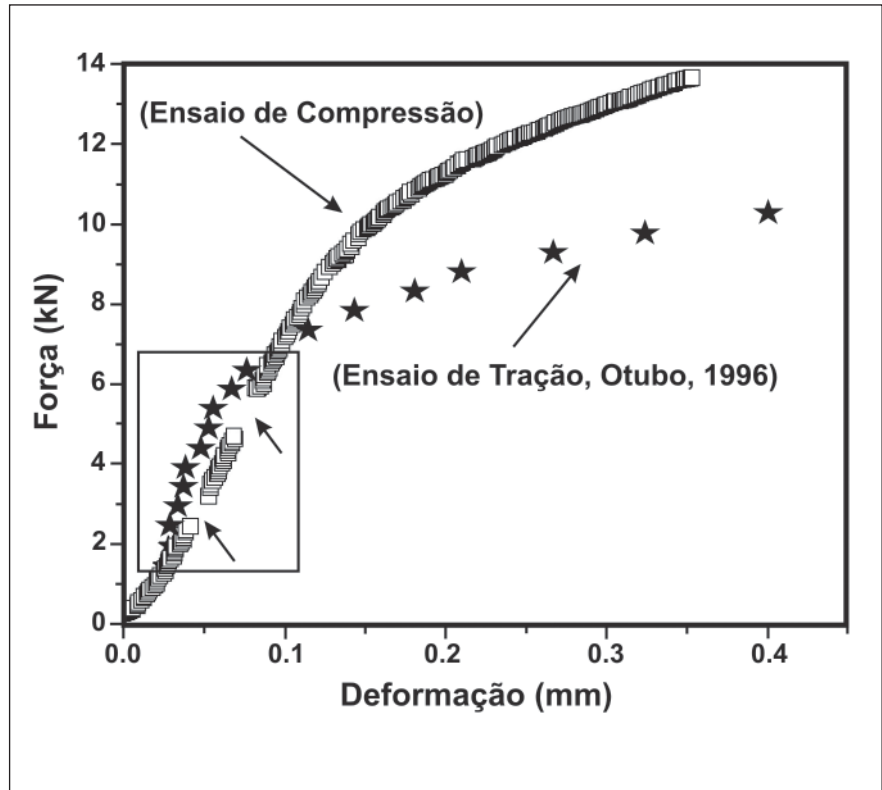


Figura 4 - Comparação das curvas obtidas em ensaio de compressão e tração em ligas à base de ferro com EMF.

3.2 Efeito de memória de forma - EMF

Utilizando as equações (1), (2) e (3) apresentadas no procedimento experimental, foi possível avaliar o desempenho, em termos de recuperação elástica, de forma e recuperação total da liga II em função do número de ciclos de treinamento. Conforme apresentado na Figura 3, as curvas de carregamento foram mais precisas para as dimensões dos corpos-de-prova da liga II. A Figura 5 apresenta o efeito do número de ciclos de treinamento nas propriedades de recuperação de forma da liga II. Os resultados apresentados correspondem aos valores médios de cinco medidas para cada corpo-de-prova. Os desvios estão representados pelas barras de erro na Figura 5. Em termos de recuperação elástica, não foi observada uma alteração significativa em função do treinamento, permanecendo um valor médio de, aproximadamente, 25 %.

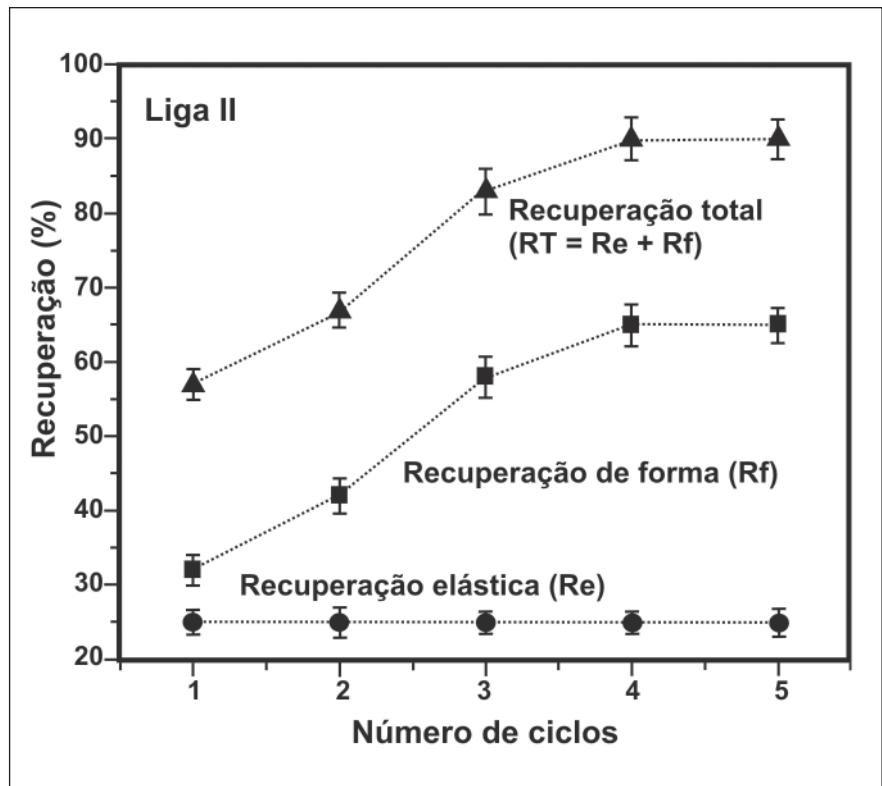


Figura 5 - Efeito do número de ciclos de treinamento nas propriedades de recuperação de forma da liga II.

Os primeiros resultados de recuperação de forma na liga II foram analisados em função da microestrutura em trabalho anterior (Nascimento, 2003), onde se verificou que a redução do tamanho de grão austenítico facilitou a transformação e reversão da martensita- ϵ , melhorando as propriedades de recuperação de forma. Complementando as informações anteriores (Nascimento, 2003 e 2008) e (Otubo, 2002), nesse trabalho, foi verificado o efeito do treinamento na Rf. Na Figura 5, o aumento da recuperação de forma com os ciclos de treinamento foi mais pronunciado entre os ciclos (1_{II}) e (3_{II}), havendo uma tendência a se estabilizar entre os ciclos (3_{II}) e (5_{II}), onde a proporção de martensita residual foi maior (Nascimento, 2008).

A maior contribuição para o aumento da recuperação total R_T com o treinamento foi devido à recuperação de forma (Figura 5). Para o quinto ciclo de treinamento, foi obtidos, aproximadamente, $R_T = 90(2)\%$. Valores próximos ($\sim 80\%$) foram obtidos para o primeiro ciclo de treinamento por outros autores (Ogawa, 1993). Essa diferença na R_T foi atribuída ao tratamento especial aplicado à liga, induzindo a martensita- ϵ através de uma pré-deformação.

4. Discussão

As propriedades de recuperação de forma foram avaliadas a partir de ensaios de compressão, avaliando-se, separadamente, as contribuições da recuperação elástica e da recuperação de forma. A combinação dessas duas propriedades correspondeu à recuperação de forma total do material. Tal combinação tem por base a transformação reversa da martensita- ϵ durante o aquecimento. Nesse tipo de ensaio (onde a transformação $\gamma \rightarrow \epsilon$ é induzida mecanicamente), as recuperações Re e Rf foram obtidas por medidas realizadas diretamente nos corpos-de-prova, sendo a recuperação total a soma das duas contribuições (Figura 1). A vantagem do ensaio de compressão é que, além de permitir avaliar, separadamente, as propriedades de recuperação de forma, a curva força

(kN) versus deformação (mm) pode ser usada para a determinação de outras propriedades mecânicas, como limite de escoamento $\sigma_{0,2\%}$ (Nascimento, 2008) e (Otubo, 2002). Para tanto é necessária uma boa definição nas curvas de carregamento. Tal definição foi obtida aumentando-se a altura dos corpos-de-prova de 9 mm (liga I) para 20 mm (liga II). Esse procedimento resultou em uma deformação mais homogênea, conforme apresentado na Figura 3. Na Figura 5, a pequena dispersão nas medidas de Re, Rf e R_T refletiu na definição das curvas de carregamento obtidas para a razão $h_0/\phi_0 = 3,3$ para a liga II. Curvas de carregamento semelhantes analisadas para a liga I ($h_0/\phi_0 = 1,5$) comprometeram as análises de recuperação de forma, uma vez que a deformação não foi homogênea por toda a extensão dos corpos-de-prova. Esse comportamento foi associado à diferença nas dimensões dos corpos-de-prova e, também, a relação de atrito entre matriz-material.

O aumento da Rf, em função do treinamento na liga II, foi mais pronunciado nos primeiros ciclos, tendendo a atingir um valor estável a partir do terceiro ciclo (Figura 5). Esse comportamento é comum nas ligas que apresentam o EMF e está relacionado com a introdução de falhas de empilhamento na estrutura c.f.c., as quais, por sua vez, atuam como pontos de nucleação para a martensita- ϵ (Ohtsuka, 1994; Kajiwara, 1999; Bergeon, 1997 e 2000; Wang, 1992; Maki, 1992). Ainda na Figura 5, pode-se observar que a maior contribuição para o aumento da recuperação total é atribuída à recuperação de forma. A contribuição da Re foi de apenas 25 % e não apresentou alterações significativas com os ciclos de treinamento.

5. Conclusões

Usando testes de compressão para analisar as propriedades de recuperação de forma em ligas austeníticas com EMF foi possível concluir que:

a) As curvas de carregamento força versus deformação obtidas nos testes de compressão apresentaram maior definição e, conseqüentemente, uma

deformação mais homogênea, quando a razão h_0/ϕ_0 foi aumentada em, aproximadamente, duas vezes.

- b) Medidas diretas realizadas nas dimensões dos corpos-de-prova permitiram estimar a recuperação elástica e a recuperação de forma para a liga II ($h_0/\phi_0 = 3,3$), em função do número de ciclos de treinamento.
- c) A recuperação elástica para todos os ciclos de treinamento foi de 25% enquanto que a recuperação de forma apresentou um aumento 81 % entre o primeiro e terceiro ciclo. No último ciclo, a recuperação de forma foi de, aproximadamente, 65 %.
- d) A recuperação total foi atribuída à contribuição das recuperações elástica e de forma. No quinto ciclo, foi obtida uma $R_T = 90(2)\%$, sendo a maior contribuição atribuída à recuperação de forma.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro das instituições CNPq, FAPESP e AEB.

7. Referências bibliográficas

- ARRUDA, G. J., BUONO, V. T. L., SANTOS, L. C., SILVA, M. I. N., ANDRADE, M. S. Relação entre tratamento termomecânico, temperatura de transformação e microestrutura de ligas ferrosas com efeito de memória de forma. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METALURGIA, 55. *Anais...* Rio de Janeiro: ABM, 2000. p. 2270-2279.
- BERGEON, N., GÉRARD, G., ESNOUF, C. Characterization of the stress-induced martensite in a Fe-Mn-Si-Cr-Ni shape memory alloy: microstructural observation at different scales, mechanism of formation and growth. *Materials Science and Engineering*, v. A 238, p. 309-316, 1997.
- BERGEON, N., KAJIWARA, S., KIKUCHI, T. Atomic force microscope study of stress-induced martensite formation and its reverse transformation in a thermomechanically treated Fe-Mn-Si-Cr-Ni alloy. *Acta Metallurgica*, v. 48, p. 4053-4064, 2000.

- CETLIN, P. R., SANTOS, C. A. dos, AGUILAR, M. T. P. Textura e relações de orientação “deformação plástica, recristalização, crescimento de grão”. In: TSCHIPTSCHIN, A. P., PADILHA, A. F., SCHON, C. G., LANDRAF, F. J. G., FALLEIROS, I. G. S., LIMA, N. B. de. *Heterogeneidades macroscópicas de deformação associadas ao atrito matriz/material*. (2. ed.). São Paulo: IPEN/2003, cap.01. p. 07-11.
- CETLIN, P. R., SANTOS, C. A. dos, AGUILAR, M. T. P. Textura e relações de orientação “deformação plástica, recristalização, crescimento de grão”. In: TSCHIPTSCHIN, A. P., PADILHA, A. F., SCHON, C. G., LANDRAF, F. J. G., FALLEIROS, I. G. S., LIMA, N. B. de. *Heterogeneidades macroscópicas de deformação associadas à formação de estricções*. (2. ed.). São Paulo: IPEN/2003, cap.01. p. 06-08.
- CHEN, J. Z. S., LI, L., HSU, T. Y. Analysis of the stress-strain curves of a Fe-Mn-si shape memory Alloy. *Materials Characterization*, v. 40, p. 37-41, 2000.
- HELMAN, H. CETLIN, P. R. Tensões e deformações. In: _____. *Fundamentos da conformação mecânica dos metais*. (2. ed.). Belo Horizonte: UFMG, 1993. cap. 01. p. 01-20.
- JANG, W. Y., GU, Q., HUMBEECK, J. V., DELAEY, L. Microscopic observation of γ -phase and ϵ - and α' -martensite in Fe-Mn-Si-based shape memory alloys. *Materials Characterization*, v. 34, p. 67-72, 1995.
- KAJIWARA, S. Characteristic features of shape memory effect and related transformation behavior in Fe-based alloys. *Materials Science and Engineering A*, v. 273, p. 67-88, 1999.
- MATSUMURA, O., SUMI, T., TAMURA, N., SAKAO, K., FURUKAWA, T., OTSUKA, H. Pseudoelasticity in the Fe-28Mn-6Si-5Cr shape memory alloy. *Materials Science and Engineering A*, v. 279, p. 201-206, 2000.
- NASCIMENTO, F. C. *Ligas austeníticas com memória de forma: influência da microestrutura nas propriedades mecânicas e na recuperação de forma*. São Paulo: Edgar Blucher, 2008. 172p.
- NASCIMENTO, F. C., MEI, P. R., OTUBO, J. O. Effects of grain size on the shape recovering properties of a stainless SMA. In: International Conference on Advances in Materials and Processing Technology, AMPT2003. *Proceedings...* Dublin, Ireland, v. 2, p. 1436-1439. July 8-11, 2003.
- OHTSUKA, H., KAJIWARA, S., ISHIHARA, T. Effect of transformations on the shape memory characteristics of and Fe-Mn-Si-Cr-Ni Alloy. *Materials Characterization*, v. 32, p. 229-235, 1994.
- OTUBO, J. *Desenvolvimento de ligas inoxidáveis com efeito de memória de forma: elaboração e caracterização*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica - Universidade Estadual de Campinas, 1996, 210p. (Tese de Doutorado).
- OTUBO, J., NASCIMENTO F. C., MEI, P. R., PAVIE, L. C., KAUFMAN, M. J. The influence of austenite grain size on the mechanical properties of stainless SMA. *Materials Transactions, JIM*, v. 43, n. 5, 2002, p. 916-019, 2002.
- WANG, X.X., WANG, W.X., ZHAO, L. The effect of thermal mechanical treatment on stress induced $\gamma \rightarrow \epsilon$, martensitic transformation and shape memory effect in a Fe-Mn-Si-Ni-Co alloy. In: International Conference on Martensitic Transformations. *Proceedings...* USA: California, 1992. p. 1199-1204.

Artigo recebido em 26/01/2009 e aprovado em 08/04/2010.

A REM tem novo endereço:

FUNDAÇÃO GORCEIX - REM

Rua Carlos Walter Marinho Campos, 57

Bairro: Vila Itacolomy

35400-000 - Ouro Preto - MG

(31) 3551-4730 (31) 3559-7408

www.rem.com.br