

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE AUSTENITIZAÇÃO NA DUREZA, RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E CAPACIDADE DE RECUPERAÇÃO DE FORMA DE LIGAS INOXIDÁVEIS ¹

Christian Egidio da Silva ²
Jorge Otubo ³

Resumo

O presente estudo foi desenvolvido no intuito de melhor compreender a influência do tratamento térmico e dos ciclos de treinamento em algumas propriedades mecânicas e na capacidade de recuperação de forma de ligas inoxidáveis. Para tanto, foram simulados, em laboratório, ciclos de austenitização em temperaturas diferentes. As amostras foram analisadas em microscópio ótico. Foram realizados ensaios de compressão e de dureza. Os resultados sugerem que a liga com menor tamanho de grão apresenta melhor capacidade de recuperação de forma. Evidenciou-se, também, que o aumento do número de ciclos de treinamento pode contribuir significativamente para a melhoria da habilidade de recuperação de forma. A máxima resistência à compressão aumentou com o aumento do número de ciclos de treinamento. O aumento da temperatura de austenitização proporcionou uma redução na resistência à compressão e da dureza. Observou-se uma recuperação de forma total para deformações entre 4% e 6%, resultados similares e até superiores aos encontrados na literatura.

Palavras-chave: Efeito de memória de forma; Aço inoxidável; Tratamento térmico; Resistência mecânica.

THE INFLUENCE OF AUSTENITIZING TEMPERATURE ON THE HARDNESS, MECHANICAL RESISTANCE AND SHAPE MEMORY RECOVERY OF STAINLESS STEEL

Abstract

It was simulated in laboratory different austenitizing cycles and the samples were analyzed on optical microscopy. It was conducted compression and hardness testing. The results suggest that the material with lower grain size presents better shape memory recovery. It was noted that the training cycles improve that shape recovery. The compression strength increased with the training cycles but decreased with the austenitizing temperature. The hardness decreased with the austenitizing temperature too. It was noted a total shape recovery for strain between 4% and 6%. These shape recovery results are quite similar or better than the results found on the references.

Key-words: Shape memory alloy; Stainless steel; Heat treatment; Mechanical resistance.

¹ Contribuição técnica ao 64° Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Doutorando; Engenheiro Químico – Gerdau Pindamonhangaba / PPG-EAM ITA.

³ Professor Adjunto; Doutor – Departamento de Tecnologia / PPG-EAM ITA.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Efeito de Memória de Forma

O efeito de memória de forma é o termo usado para descrever a capacidade de certos materiais, após serem deformados plasticamente, de voltarem ao estado original com o aquecimento em temperaturas acima da temperatura de fim da reversão da martensita em austenita (ou seja, acima de A_F). Quando um material “convencional” é deformado além do seu limite elástico, seja por tração, compressão ou dobramento, ele apresentará uma deformação plástica permanente, não retornando a sua forma original com posterior aquecimento. Sendo o mesmo procedimento aplicado a um material que apresenta “efeito de memória de forma”, ao ser posteriormente aquecido (desde que seja ultrapassada A_F), o mesmo voltará ao estado original.^(1,2)

1.2 Histórico do Desenvolvimento de Ligas Inoxidáveis com Efeito de Memória de Forma

Ao longo da década de 80 foi verificado que ligas à base de Ferro também exibiam o efeito de memória de forma sob certas condições. Podem ser citadas como exemplo as seguintes ligas: ferro-platina, ferro-paládio, ferro-níquel-cobalto-titânio, ferro-manganês-silício, ferro-manganês-cromo-níquel, entre outras combinações.^(1,3)

Na última década, os aços inoxidáveis com efeito de memória de forma têm sido estudados de forma intensa como substitutos às tradicionais ligas Ni-Ti, apresentando de uma forma geral menor custo, boa trabalhabilidade, boa usinabilidade e também boa soldabilidade. No entanto, ainda não têm sido plenamente empregados devido a sua menor recuperação de forma, quando comparadas às ligas Ni-Ti tradicionais. Muitas vezes estes aços inoxidáveis necessitam da realização de ciclos de treinamento, que para algumas geometrias mais complexas torna-se bastante complicado, encarecendo a liga. Isso explicita a importância de serem desenvolvidos materiais que não necessitem de treinamento para apresentarem uma capacidade de recuperação de forma considerável, possibilitando sua utilização na indústria de forma mais abrangente.⁽²⁻⁵⁾

Kajiwara⁽³⁾ reforça a necessidade de desenvolvimento de ligas que dispensem a utilização do “treinamento”, salientando que essa necessidade atualmente é o grande limitante para uma aplicação maior das ligas à base de “Fe-Mn-Si” no meio industrial. Segundo o autor, o emprego do “treinamento” no processo de fabricação acaba encarecendo o produto (por exemplo, juntas de tubulações), inviabilizando uma maior aplicabilidade destas ligas. Neste sentido, visando uma melhor compreensão do “efeito de recuperação de forma” nestes materiais, a literatura mostra que têm sido estudados ao longo da última década: a influência da resistência mecânica da matriz, influência de certos elementos químicos e teores, impacto da realização de ciclos de treinamento ao material em questão, influência de ciclos de tratamento termo-mecânico na capacidade de recuperação de forma, necessidade de existência de alta densidade de falhas de empilhamento pré-existent na estrutura, intensidade da pré-deformação aplicada.

Pouquíssimos estudos têm avaliado a influência do tamanho de grão austenítico e orientações cristalográficas na capacidade de recuperação de forma de certos aços inoxidáveis. Trabalhos desenvolvidos pelo grupo têm mostrado que o

tamanho de grão austenítico varia significativamente com a temperatura de austenitização. Além disso, existem evidências que a capacidade de recuperação de forma depende do tamanho de grão austenítico e da orientação cristalográfica.⁽⁶⁻¹⁰⁾

1.3 Influência da Temperatura de Austenitização na Dureza e na Resistência à Compressão

Trabalhos anteriores do grupo sugerem que uma granulometria fina favoreça uma melhor recuperação de forma.^(6,7) Segundo Bergeon *et al.*,⁽¹¹⁾ se a deformação for grande ou então se o grão for grosseiro, mais do que uma variante necessita ser ativada para acomodar a deformação de escorregamento. Como consequência disso, necessita-se de uma tensão muito maior para induzir a martensita. Conseguindo-se ativar apenas uma variante da martensita, o movimento das discordâncias parciais de *Shockley* será facilitado, logo, a recuperação de forma também poderá ocorrer mais fácil para granulometria mais fina.

Estudando 3 ligas inoxidáveis que apresentam recuperação de forma, Silva *et al.*^(8,9,10) evidenciaram que até a temperatura de austenitização de 900°C nenhuma alteração do tamanho de grão austenítico ocorreu, mantendo-se em torno de 30µm. Visualizaram ainda um crescimento abrupto do tamanho de grão entre as temperaturas de austenitização de 900°C e 1.050°C, atingindo-se valores da ordem de 60µm. A liga que apresentava menor conteúdo de manganês e maior conteúdo de cromo foi a que apresentou menor crescimento de grão para todas as temperaturas avaliadas (de 900°C a 1.050°C). A temperatura de austenitização mostrou-se muito mais eficiente na alteração do tamanho de grão do que o tempo de austenitização: um incremento de apenas 50°C (variando a temperatura de austenitização de 1.000°C para 1.050°C) proporcionou um aumento no tamanho de grão de 24%, enquanto que um incremento de 15h na duração da austenitização à temperatura de 1.050°C (variando o tempo de austenitização de 1h para 16h) conduziu a um aumento no tamanho de grão de 18%).

Através da presente pesquisa, objetiva-se avaliar a influência da temperatura de austenitização na dureza, na resistência à compressão e na capacidade de recuperação de forma de ligas inoxidáveis que apresentam recuperação de forma, complementando, assim, os trabalhos anteriores do grupo acerca do mecanismo de crescimento de grão e capacidade de recuperação de forma destas ligas inoxidáveis com efeito de memória de forma.⁽⁸⁻¹⁰⁾

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Procedimento Experimental

O material de partida utilizado para o presente estudo foi elaborado em forno de indução a vácuo. Foram fabricados lingotes de dimensões preliminares 65mm x 65mm de seção transversal, sendo posteriormente aquecidos a 1.180°C e submetidos a um forjamento a quente até atingir a seção transversal de 40 mm x 40 mm. A composição química dos lingotes utilizados no presente estudo encontra-se na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química dos lingotes utilizados no presente estudo (% peso).

Liga	Cr	Ni	Mn	Si	C	Fe
A	9,9	4,9	10,3	5,3	0,006	Balanço
B	8,6	5,1	13,7	5,6	0,014	Balanço
C	8,8	4,6	14,2	5,3	0,008	Balanço

As barras obtidas foram ainda submetidas a um seccionamento longitudinal, de forma que a sua seção transversal passasse a apresentar as dimensões 20 mm x 20 mm, sendo novamente reaquecidas, porém a uma temperatura de 1.100°C por um período de uma hora, e em seguida, submetida a uma nova operação de conformação para arredondamento dos cantos-vivos. Para maiores detalhes sobre a elaboração das ligas, veja Otubo *et al.*^(1,12,13)

Da barra originalmente obtida, que apresentava diâmetro de 20 mm, foram cortadas amostras (tipo “moedas”) com espessura de aproximadamente 5 mm. Estas amostras foram utilizadas para simular o tratamento térmico para posterior caracterização de dureza. Estudos anteriores⁽⁸⁻¹⁰⁾ do grupo evidenciaram que abaixo de 900°C nenhum crescimento de grão é verificado. Em função disso, foram adotadas as seguintes temperaturas de patamar para a solubilização das amostras: 900°C, 1.050°C e 1.200°C, sempre as mantendo na respectiva temperatura por 2.400s (40 min), seguido de têmpera em água à temperatura ambiente.

Utilizando-se ainda as barras de diâmetro 20 mm, parte das mesmas foram submetidas a uma seqüência de forjamento a quente seguido de forjamento a frio até atingir um diâmetro final de ~8 mm. Para realizar o forjamento a quente empregou-se 1.050°C como temperatura de solubilização antes do primeiro passe e entre os passes consecutivos, sendo utilizadas as seguintes matrizes de redução (diâmetro final): 18,542 mm, 16,002 mm, 13,843 mm, 11,938 mm, 10,414 mm e 9,525 mm. Na seqüência foi iniciado o forjamento a frio, utilizando-se para tal as seguintes matrizes de redução (diâmetro final): 8,763 mm e 7,620 mm. Em nenhum dos casos empregou-se uma redução de área superior a 40%. Em seguida as barras de ~8 mm de diâmetro foram submetidas a uma solubilização, por 2.400 s, nas seguintes temperaturas, seguido de têmpera em água à temperatura ambiente: 900°C, 950°C, 1.000°C e 1.050°C. Depois de finalizado o tratamento térmico, foram confeccionados corpos-de-prova de 6mm de diâmetro por 20 mm de comprimento, para realização do ensaio de compressão e realização dos ciclos de “treinamento” do material através da repetição de consecutivos ciclos de compressão-recuperação.

2.2 Dureza

Empregou-se um micro-indentador modelo *FM-700, Future Tech*, para avaliação da dureza das amostras tratadas em diferentes temperaturas, realizando-se uma varredura ao longo do raio das amostras com diâmetro de 20mm, da face externa até o centro da amostra, totalizando 20 medições por amostra. O afastamento entre medições foi de 0,5mm. Empregou-se uma carga de 0,49 N (50 gf) aplicada por 15 s.

2.3 Ensaio de Compressão e os Ciclos de Treinamento

Foi utilizada uma máquina *Instron*, modelo *5500R* instrumentada, para realização do ensaio de compressão, empregando-se uma velocidade de 0,6 mm/min. Os corpos-de-prova utilizados apresentavam diâmetro de 6 mm e comprimento de 20 mm.

Os ciclos de treinamento foram simulados através da repetição das seguintes etapas: (i) compressão com a deformação prevista (2%, 4% ou 6%); (ii) recuperação através de recozimento à temperatura de 600°C por 1.800s (30 min). Antes de submeter o corpo-de-prova à carga compressiva e após retirá-lo do forno, o comprimento final do corpo-de-prova foi medido para avaliar a capacidade e evolução da recuperação de forma do material à medida que estavam sendo realizados novos ciclos de treinamento.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Trabalhos anteriores dos autores evidenciaram que o tamanho médio de grão austenítico aumentou aproximadamente duas vezes em função da alteração da temperatura de austenitização: 31,70 μm para 900°C e 61,90 μm para 1.050°C. Abaixo de 900°C não foi observada qualquer alteração no tamanho médio de grão austenítico, apresentando-se próximo de 30 μm .⁽⁸⁻¹⁰⁾ Na Figura 1 podem ser encontradas algumas micrografias típicas obtidas após a austenitização de amostras da liga B. Em todas as amostras observou-se uma microestrutura heterogênea contendo maclas distribuídas dentro do grão austenítico.

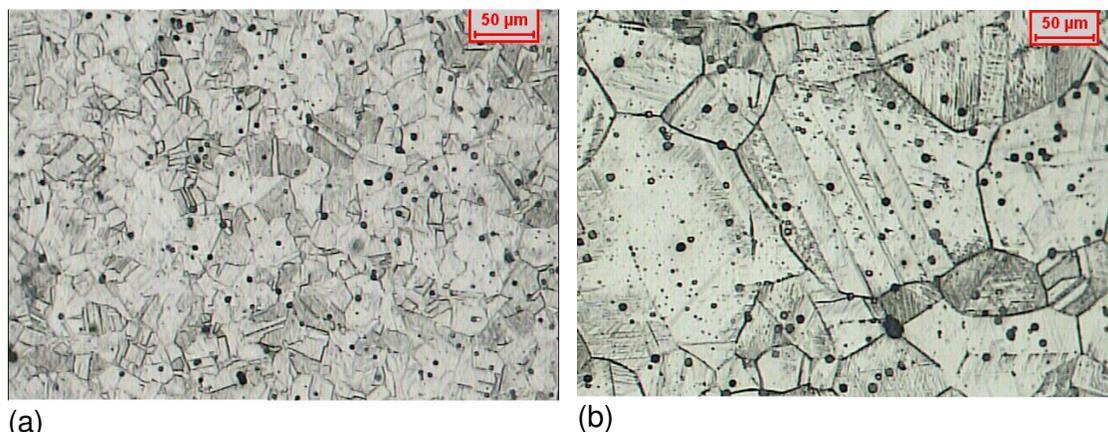


Figura 1. Micrografias típicas das regiões centrais de amostras da liga B submetidas à solubilização em temperaturas diferentes: (a) 900°C; (b) 1.050°C^(8,9,10). Solução de ataque: HNO₃ (150 cm³), HF (30 cm³) e água (250 cm³).

3.1 Dureza

Na Figura 2 podem ser encontrados os resultados da varredura de dureza Vickers com 0,49 N (50 gf) de carga para as três ligas estudadas.

Percebe-se que a dureza é menor para a temperatura de austenitização de 1.050°C em relação à temperatura de 900°C, para as três ligas estudadas. De acordo com Silva *et al.*,⁽⁸⁻¹⁰⁾ o tamanho médio de grão austenítico aumentou com o incremento da temperatura de austenitização. O comportamento observado para estas ligas – diminuição da dureza com aumento do tamanho de grão austenítico –

está compatível com o observado por Nascimento *et al.*,⁽¹⁴⁾ que estudaram uma liga inoxidável com efeito de memória de forma com a seguinte constituição: Fe-8,26%Mn-5,25%Si-12,81%Cr-5,81%Ni-0,009%C-11,84%Co.

Evidencia-se ainda a existência de uma maior dispersão dos resultados de dureza para a liga "A". Conforme Silva *et al.*,⁽⁸⁻¹⁰⁾ esta liga foi a que apresentou menor tamanho de grão austenítico, independente da temperatura de austenitização utilizada. Esta diferença de dispersão deve-se ao menor tamanho de grão austenítico observado para a liga "A". Considerando-se que os grãos são menores, as indentações de dureza (impressões) ora atravessam os contornos de grãos, ora ficam contidas dentro de um único grão. Quando a impressão atravessa o contorno de grão, é perfeitamente possível que contemple fases distintas, e sendo a dureza das fases diferentes entre si, surge a dispersão dos resultados.

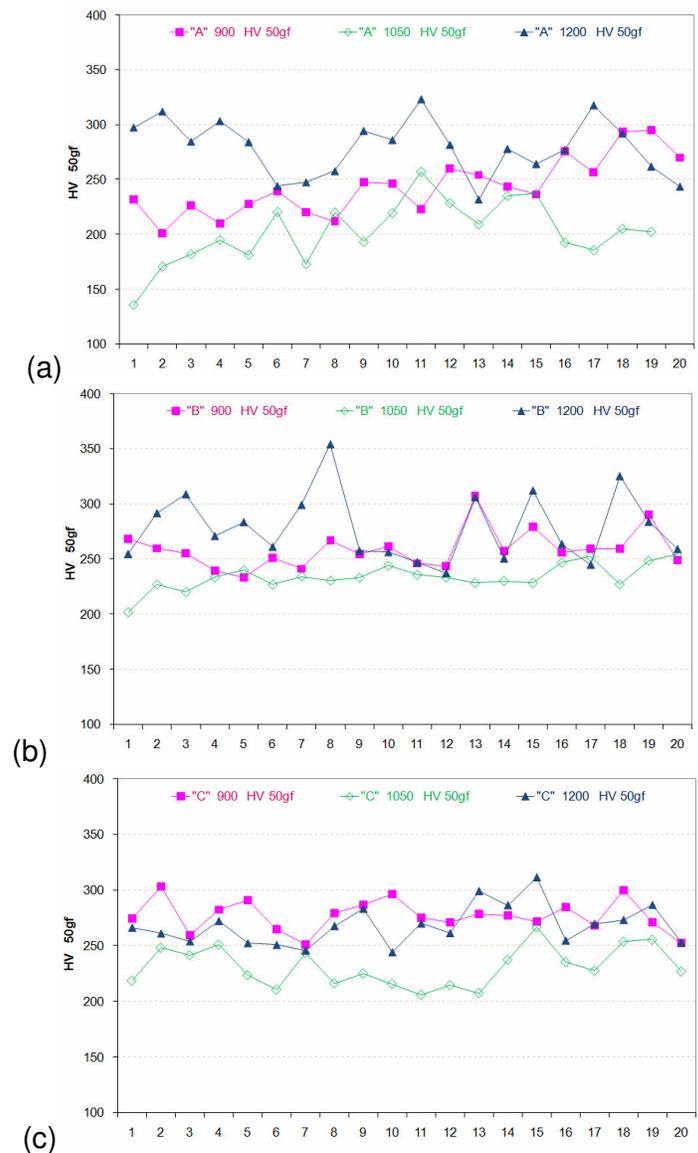


Figura 2. Resultados da varredura de dureza Vickers para as ligas A, B e C.

Na Figura 3, pode-se ver uma micrografia típica da liga A, após austenitização à temperatura de 1.200°C por 2.700s (45 min), seguido de resfriamento em água.

Utilizando-se um tipo de ataque químico que proporciona uma revelação diferenciada, podem ser vistas as fases presentes, em tons (cores) diferentes. Após varredura de dureza (nove medições para cada fase), encontraram-se os seguintes resultados: 255,8 HV ($\sigma=21,0$) para a fase que aparece em tom mais escuro, e 324,3 HV ($\sigma=12,4$) para a fase que aparece em tom mais claro. A diferença de resultados de dureza para as fases presentes explica a dispersão encontrada na varredura feita anteriormente, de forma aleatória.

Nascimento *et al.*⁽¹⁴⁾ realizaram medições de dureza de uma liga inoxidável que também apresenta efeito de memória de forma, porém empregando nano-indentação. Os autores evidenciaram que a dureza média das fases Martensita e Austenita era de 7,0 GPa e 3,0 GPa, respectivamente. Estes dados reforçam que a dispersão dos resultados de dureza deve-se, de fato, à presença de fases diferentes dentro da área de varredura (impressão) durante a aplicação da carga para medição da dureza.

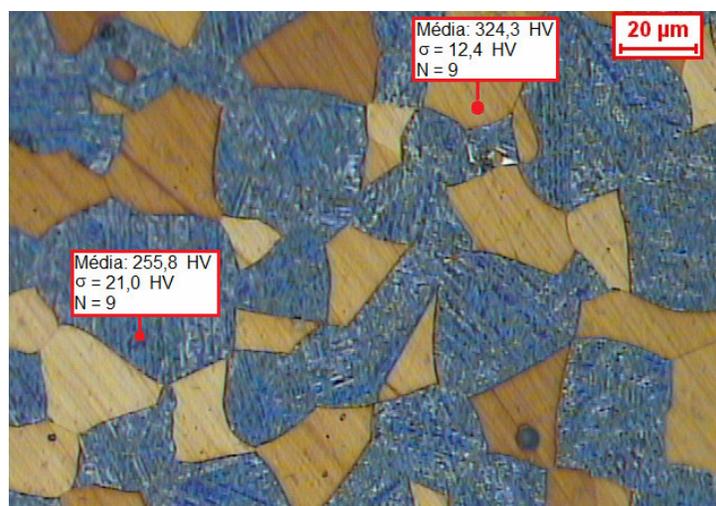


Figura 3. Micrografia típica da liga A após austenitização a 1.200°C por 2.700s. Solução de ataque: 1,2g K₂S₂O₅ + 0,8g NH₄HF₂ + 100ml H₂O.

As ligas “B” e “C” apresentaram menor dispersão de resultados, mantendo-se próximos para as duas ligas. Estas ligas apresentaram tamanho médio de grão austenítico similares, independente da temperatura de austenitização empregada, e superiores ao observado para a liga A.⁽⁸⁻¹⁰⁾

Para a temperatura de austenitização de 1.200°C percebe-se que os resultados de dureza, em especial para a liga “A”, apresentaram grande variabilidade (dispersão).

3.2 Ensaio de Compressão e os Ciclos de Treinamento

Na Figura 4 encontram-se os resultados do ensaio de compressão para diferentes deformações, temperaturas de austenitização e ciclos de treinamento, para as ligas A e C. Devido à similaridade de comportamento de crescimento de grão para as ligas B e C, conforme evidenciado por Silva *et al.*,⁽⁸⁻¹⁰⁾ optou-se por realizar o ensaio de compressão utilizando-se apenas as ligas A e C.

Vale lembrar que o treinamento consiste da aplicação de uma deformação, que no caso é um esforço compressivo com percentuais que variam de 2% a 6%,

seguido de tratamento térmico de recuperação, que para o presente estudo foi um recozimento de 600°C por 1.800 s (30 min).

Visando avaliar a influência do tamanho de grão na capacidade de recuperação de forma, foram utilizadas diferentes temperaturas de austenitização para as amostras ensaiadas. Trabalhos anteriores dos autores mostraram que o tamanho de grão austenítico praticamente dobra de tamanho de 900°C para 1.050°C: para a liga “A”, o tamanho de grão austenítico passou de 29,4 μm para 53,0 μm; para a liga “C”, o tamanho de grão austenítico passou de 30,2 μm para 55,7 μm.⁽⁸⁻¹⁰⁾

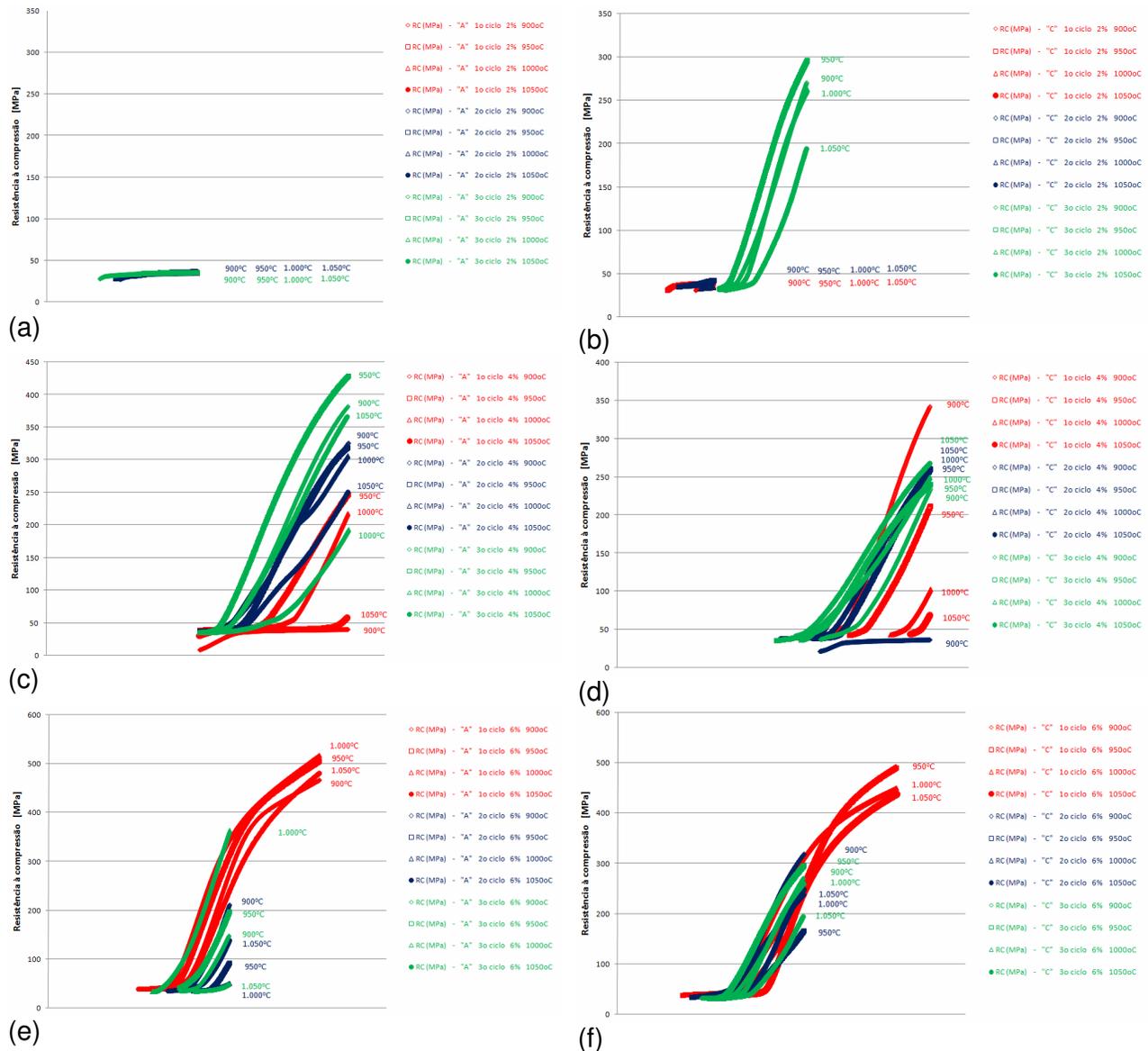


Figura 4. Resistência à compressão para deformações compressivas de 2%, 4% e 6% para as ligas “A” e “C” em função da temperatura de austenitização (900°C, 950°C, 1.000°C e 1.050°C) para os três primeiros ciclos de treinamento.

Analisando-se a máxima resistência à compressão obtida em relação ao número de ciclos de treinamento empregados, evidenciou-se que para a liga “A” a máxima resistência à compressão (RC) aumenta com o aumento do número de ciclos empregados, sendo muito mais expressiva para maiores deformações

(percentual de compressão maior: $RC_{6\%} \gg RC_{4\%} > RC_{2\%}$). Para a liga “C”, com o aumento do número de ciclos de treinamento, a máxima resistência à compressão obtida tende a estabilizar-se, sugerindo que o mecanismo de encruamento desta liga é totalmente diferente daquele observado para a liga “A”. Segue detalhamento:

- (i) 2% de deformação: Praticamente não se observa variação da resistência à compressão com o aumento do número de ciclos de treinamento para a liga “A”, sendo obtidos níveis de resistência insignificantes para todos os ciclos e temperaturas testadas. Para a liga “C” também são observados níveis de resistência à compressão insignificante, porém apenas para o 2º e 3º ciclos. Para o 1º ciclo, foram obtidos valores expressivos de resistência.
- (ii) 4% de deformação: Para a liga “A”, a resistência à compressão aumenta expressivamente com o aumento do número de ciclos. Para a liga “C”, a resistência à compressão apresenta-se consideravelmente elevada já para o 1º ciclo de treinamento para algumas temperaturas, mas tende a reduzir com o aumento do número de ciclos de treinamento, praticamente estabilizando-se para o 2º e 3º ciclos. Percebeu-se que as duas ligas estudadas suportam maiores deformações, antes de iniciar o encruamento, para menores quantidades de ciclos: $\epsilon_{(3^\circ \text{ ciclo})} < \epsilon_{(2^\circ \text{ ciclo})} < \epsilon_{(1^\circ \text{ ciclo})}$, sendo mais pronunciado este comportamento para a liga “A”.
- (iii) 6% de deformação: Para a liga “A”, os maiores valores de resistência mecânica foram obtidos para o 1º ciclo de treinamento, sendo que para o 2º e 3º ciclos a máxima resistência apresentou valores próximos – como se estivesse estabilizando do 2º para o 3º ciclo. Ainda para a liga “A”, observou-se que a resistência à compressão aumentou com o aumento da temperatura de austenitização, especificamente para o 1º e 2º ciclos. Para o 3º ciclo, não foi possível identificar um comportamento bem definido. Nota-se, ainda, que o aumento da resistência mecânica com o aumento da deformação (isto é, o encruamento), ocorre antes para o 1º ciclo. Para o 2º e 3º ciclos o encruamento ocorre praticamente junto – na mesma deformação. Para a liga “C”, o comportamento da máxima resistência à compressão em relação ao número de ciclos foi o mesmo observado para a liga “A”: maior resistência mecânica para o 1º ciclo e estabilização para do 2º para o 3º ciclos. No entanto, esta liga apresentou uma redução da resistência mecânica com o aumento da temperatura de austenitização, comportamento contrário ao observado para a liga “C”. Ainda para a liga “C”, o aumento da resistência mecânica com o aumento da deformação (encruamento) praticamente ocorre junto, independente do ciclo e da temperatura utilizada. Assim como foi observado para a liga “A”, os resultados da liga “C” também sugerem que deve estar existindo uma estabilização do seu comportamento entre o 2º e 3º ciclos de treinamento.

Analisando-se a máxima resistência à compressão em relação ao percentual de deformação aplicado (percentual de compressão), evidenciou-se que para a liga “A” a resistência à compressão aumenta com o percentual de compressão aplicado, sendo mais expressivo entre o 1º e 2º ciclos de treinamento do que entre o 2º e 3º ciclos. Para a liga “C”, a resistência mecânica também aumenta com o aumento da deformação compressiva aplicada, porém os resultados sugerem que a resistência à compressão tende a estabilizar-se no 3º ciclo de treinamento. Segue detalhamento:

- (i) Liga “A”: ~0 MPa (2%) → ~30 MPa (4%) → ~250 MPa (6%) para o 1º ciclo de treinamento; ~30 MPa (2%) → ~300 MPa (4%) → ~350 MPa (6%) para o 2º ciclo de treinamento; ~30 MPa (2%) → ~380 MPa (4%) → ~450 MPa (6%) para o 3º ciclo de treinamento.
- (ii) Liga “C”: aparentemente, a resistência à compressão mantém-se para 4% e 6% de deformação, independente do ciclo de treinamento em questão. Para o 1º ciclo de treinamento a resistência à compressão não ultrapassa os 30 MPa, e para o 2º e 3º ciclos de treinamento, a resistência máxima à compressão estabiliza-se, respectivamente, em ~250 MPa (4%) e ~420 MPa (6%).

Analisando-se a temperatura de austenitização empregada com a máxima resistência à compressão, visualizou-se que, de uma maneira geral, a resistência à compressão diminui com o aumento da temperatura de austenitização empregada. Para a liga “C” este comportamento estava muito mais nítido do que para a liga “A”. Para a deformação compressiva de 2%, não existiu variação da resistência mecânica de forma significativa. Já para as deformações compressivas de 4% e 6%, o comportamento mencionado estava muito mais explícito.

Na Tabela 2 encontram-se os percentuais de recuperação de forma (que no caso, trata-se de recuperação do comprimento) dos corpos-de-prova das ligas “A” e “C” submetidos a cargas compressivas (2%, 4% e 6%) após realização de recozimento a 600°C, para diferentes temperaturas de austenitização e em função do ciclo de treinamento realizado.

Tabela 2. Percentual de recuperação de forma das ligas “A” e “C” após realização do recozimento para diferentes temperaturas de austenitização e diferentes percentuais de deformação compressiva, em função do ciclo de treinamento

Deformação	Liga	900°C			950°C			1.000°C			1.050°C		
		1º ciclo	2º ciclo	3º ciclo	1º ciclo	2º ciclo	3º ciclo	1º ciclo	2º ciclo	3º ciclo	1º ciclo	2º ciclo	3º ciclo
2%	A ^(2%)	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	C ^(2%)	99,90%	99,90%	99,80%	100%	(*)	100%	100%	100%	99,80%	100%	100%	99,90%
4%	A ^(4%)	100%	100%	100%	99,90%	100%	(*)	100%	100%	99,90%	100%	99,90%	99,90%
	C ^(4%)	100%	100%	99,80%	100%	100%	99,70%	100%	100%	99,70%	100%	100%	99,80%
6%	A ^(6%)	98,80%	100%	99,60%	98,90%	99,90%	99,60%	98,60%	99,90%	99,20%	98,90%	99,90%	99,80%
	C ^(6%)	99,80%	99,70%	99,70%	99,60%	99,80%	99,50%	99,40%	99,80%	99,50%	99,60%	99,90%	99,70%

(*) *Corpo-de-prova danificado durante teste.*

Pode-se observar que para os ensaios realizados com 2% de deformação de compressão a liga “A” não apresentou deformação plástica, visto que os valores de recuperação sempre foram de 100%. Os corpos-de-prova da liga “C”, para algumas situações, apresentaram uma sutil deformação plástica, não recuperando na sua totalidade seu comprimento original após o recozimento aplicado.

Já para os ensaios realizados com 4% de deformação de compressão, percebe-se que ocorreu de fato uma deformação plástica para os dois materiais estudados. Pode-se visualizar que os níveis de deformação plástica mantiveram-se entre 0,1% e 0,3%, para ambos os materiais. Observa-se que a deformação plástica aumenta com o aumento do número de ciclos de treinamento. A influência da temperatura de austenitização na deformação plástica não está clara. Os resultados da Tabela 2 sugerem que a capacidade de recuperação de forma é praticamente total quando se submete ambos os materiais a uma deformação compressiva de 4%.

Para os ensaios realizados com 6% de deformação de compressão, a deformação plástica medida foi consideravelmente superior àquela observada para

os ensaios conduzidos com 4% e 2% de deformação compressiva, para as duas ligas estudadas. Em algumas situações, atingiu-se quase 2% de deformação plástica. Está claro que a recuperação de forma aumentou com o aumento do número de ciclos de treinamento para a liga "A". Para a liga "C", a recuperação de forma apresentou-se estável de uma maneira geral ao longo dos ciclos de treinamento aplicados. Também não foi possível identificar uma correlação da temperatura de austenitização com a capacidade de recuperação de forma. A influência da temperatura de austenitização na capacidade de recuperação também não ficou clara para este nível de deformação aplicado.

4 CONCLUSÃO

O aumento da temperatura de austenitização, de 900°C para 1.050°C, proporcionou uma redução do nível de dureza dos materiais estudados. Observou-se, também, que o aumento da temperatura de austenitização proporcionou um aumento de duas vezes no tamanho médio de grão austenítico para todas as ligas estudadas.

Nota-se que a dispersão dos resultados de dureza para a liga "A" (menor tamanho de grão) é superior àquela observada para as ligas "B" e "C", o que deve estar associado, muito provavelmente, à diferença do tamanho de grão austenítico.

Para a liga "A" a máxima resistência à compressão aumenta com o aumento do número de ciclos de treinamento. Para a liga "C", a resistência à compressão tende a estabilizar-se com o aumento do número de ciclos de treinamento.

O aumento do percentual de compressão aplicado proporciona um incremento na resistência à compressão tanto para a liga "A" quanto "C", sendo que para a liga "C" a resistência tende a estabilizar-se entre o 2º e 3º ciclos de treinamento.

De maneira geral, salvo algumas exceções, o aumento da temperatura de austenitização proporcionou uma redução na resistência à compressão, sendo este comportamento mais nítido para a liga "C". Não foi possível encontrar uma correlação da capacidade de recuperação de forma com a temperatura de austenitização utilizada.

Os resultados da variação de comprimento dos corpos-de-prova após o recozimento a 600°C sugerem que a liga "A" tem melhor capacidade de recuperação de forma do que a liga "C". Evidencia-se que a capacidade de recuperação de forma melhora com o aumento do número de ciclos de treinamento – especialmente para a liga "A" – e que as ligas estudadas podem apresentar recuperação de forma total para deformações aplicadas de 4% a 6%, resultados estes similares e até superiores aos encontrados na literatura.

REFERÊNCIAS

- 1 OTUBO, J.; MEI, P. R.; KOSHIMIZU, S. Desenvolvimento de novos aços inoxidáveis com efeito de memória de forma. In: IV Seminário Brasileiro do Aço Inoxidável – INOX'94, 1994, São Paulo, SP.
- 2 OTUBO, J.; MEI, P. R.; KOSHIMIZU, S. Materiais com efeito de memória de forma: características principais e possíveis aplicações. In: XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica – COBEM, 1997, Bauru, SP.
- 3 KAJIWARA, S. Characteristic features of shape memory effect and related transformation behavior in Fe-based alloys. **Materials Science and Engineering A** **273-275**, p.67-88,1999.

- 4 WEN, Y. H.; YAN, M.; LI, N. Remarkable improvement of shape memory effect in Fe-Mn-Si-Cr-Ni-C alloy by ageing with deformation. **Scripta Materialia**, 50, p.835-838, 2004.
- 5 JEE, K. K.; HAN, J. H.; JANG, W. Y. Measurement of volume fraction of \square martensite in Fe-Mn based alloys. **Materials Science and Engineering A** 378, p.319-322, 2004.
- 6 OTUBO, J.; NASCIMENTO, F. C.; MEI, P. R.; CARDOSO, L. P.; KAUFMAN, M. J. Influence of austenite grain size on mechanical properties of stainless SMA. **Materials Transactions**, v.43, n.5, p.916-919, 2002.
- 7 OTUBO, J.; MEI, P. R.; LIMA, N. B.; SERNA, M. M.; GALLEGO, E. O efeito do tamanho de grão austenítico no número de orientações das variantes de martensita em ligas inoxidáveis com efeito de memória de forma. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, MG. p.129-134, Jan-Mar 2007.
- 8 SILVA, C.E.; JÚNIOR, A.R.; OTUBO, J. The influence of austenitizing temperature and chemical composition on the microstructure of stainless shape memory steel. In: 18º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECiMat, 2008, Porto de Galinhas, PE. p.5875-5882.
- 9 SILVA, C. E.; OTUBO, J. Influência da temperatura de solubilização no tamanho de grão austenítico de ligas à base de Fe-Mn-Si com efeito de memória de forma: resultados preliminares. In: 63º Congresso Anual da ABM, 2008, Santos, SP. p.2613-2621.
- 10 SILVA, C.E.; OTUBO, J.; JÚNIOR, A.R. A influência do tempo e temperatura de austenitização e da composição química na microestrutura de ligas inoxidáveis com efeito de memória de forma. In: IX Seminário Brasileiro do Aço Inoxidável – INOX'2008, 2008, São Paulo, SP. p.42-48.
- 11 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 Materialia**, v.48, n.16, p.4053-4064, 2000.
- 12 OTUBO, J.; MEI, P.R.; KOSHIMIZU, S. Caracterização de aços inoxidáveis com efeito de memória de forma. In: 11º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECiMat, 1994, Águas de São Pedro, SP. p.219-222.
- 13 OTUBO, J.; MEI, P.R.; KOSHIMIZU, S. Desenvolvimento de aços inoxidáveis com efeito de memória de forma. In: 50º Congresso Anual da ABM, 1995, São Pedro, SP. p.15-27.
- 14 NASCIMENTO, F.C.; BUENO, J.C.; LEPIENSKI, C.M.; OTUBO, J.; MEI, P.R. Determinação das propriedades mecânicas da martensita \square por indentação instrumentada em ligas inoxidáveis com memória de forma. In: IX Seminário Brasileiro do Aço Inoxidável – INOX'2008, 2008, São Paulo, SP. p.65-71.