

Atrito interno em aços inoxidáveis austeníticos contendo cobre

Internal friction in austenitic stainless steels with copper

Resumo

Nesse trabalho, estudaram-se a influência dos tipos e as quantidades de martensitas induzidas por deformação nas curvas de atrito interno de um aço inoxidável do tipo ABNT 304 contendo cobre. Corpos-de-prova foram deformados por tração de 3 a 12% de deformação verdadeira em temperaturas no intervalo de 50 a 20°C, visando à obtenção de diferentes quantidades das fases martensíticas ϵ (HC) e α' (CCC). Medidas magnéticas e ensaios dilatométricos foram realizados para avaliar as quantidades induzidas. Verificou-se que α' aumenta com a deformação, para uma mesma temperatura, e diminui à medida que a temperatura aumenta com deformação constante. Os ensaios de atrito interno foram realizados em um pêndulo de torção invertido em temperaturas de 40 a 400°C. A influência de ϵ , no atrito interno do aço, ficou bem estabelecida pela ocorrência de um pico nas temperaturas de reversão dessa martensita em torno de 100°C. A presença de α' parece estar relacionada a dois outros picos observados em torno de 220 e 350°C.

Palavras-chave: Aços inoxidáveis austeníticos, martensita induzida por deformação, dilatometria, atrito interno.

Maurício Silva Simões

Bolsista de Iniciação Científica
FAPEMIG/CETEC
Curso de Graduação em Engenharia
Mecânica/Mecatrônica, PUC-MG
E-mail: mausimoes@oi.com.br

Ana Luiza Resende de Castro

Pesquisadora, Fundação Centro
Tecnológico de Minas Gerais - CETEC
E-mail: ana.luiza.castro@cetec.br

Margareth Spangler Andrade

Pesquisadora, Fundação Centro
Tecnológico de Minas Gerais - CETEC
E-mail: margareth.spangler@cetec.br

Abstract

The influence of the different types and amounts of strain induced martensite in AISI 304 austenitic steel with copper in internal friction behavior was studied. Specimens were deformed by tension from 0.03 to 0.12 of true strain at temperatures in the range -50 to 20°C, in order to obtain different volumetric fractions of ϵ (HCP) and α' (BCC) strain induced martensites. Magnetic measurements and dilatometry were conducted to assess the quantities of induced martensite. It was found that α' increases with deformation at constant temperature, and decreases as the temperature increases at constant deformation. Internal friction tests were performed in an inverted torsion pendulum in temperatures in the range of 40 to 400°C. The occurrence of an internal friction peak around 100°C was well established and related to the ϵ martensite reversion. The presence of other two peaks around 220 and 350°C was associated to the α' present in the sample.

Keywords: Austenitic stainless steel, strain-induced martensite, dilatometry, internal friction.

1. Introdução

Os aços inoxidáveis são utilizados, atualmente, em uma gama extensa e variada de aplicações, que vão desde equipamentos industriais, passando por eletrodomésticos, insumos da construção civil e de decoração, entre outros. Na maioria dos casos, sua versatilidade tem como característica mais relevante a excelente resistência à corrosão. Além disto, esses aços possuem outras características como: resistência mecânica elevada, boa conformação mecânica, facilidade de reciclagem, versatilidade, forte apelo estético, higiene/asepsia, facilidade de limpeza e longo ciclo de vida, o que os tornam, em vários casos, a melhor e mais confiável opção para diversas aplicações tecnológicas (Pickering, 1976; Peckner & Bernstein, 1977).

Entre os tipos de aços inoxidáveis disponíveis, tais como os aços austeníticos, ferríticos, superferríticos, martensíticos e endurecíveis por precipitação, os aços inoxidáveis austeníticos se destacam como os mais utilizados (Peckner & Bernstein, 1977; Padilha & Guedes, 1994). Suas altas taxas de encruamento lhes conferem ótima resistência mecânica. Possuem, ainda, alta tenacidade, boas soldabilidade e conformabilidade a frio, além de serem um dos aços inoxidáveis com melhor resistência à corrosão. A destacável conformabilidade e a boa soldabilidade dos aços austeníticos fazem deles materiais ótimos para serem cortados, furados, dobrados, estampados, curvados e soldados, gerando peças com grande precisão e reprodutibilidade.

Os aços inoxidáveis austeníticos do tipo ABNT 304 possuem estrutura cúbica de face centrada (CFC) e, quando deformados, podem apresentar transformações martensíticas, o que aumenta sua resistência mecânica quando trabalhados a frio. Observa-se, nesses aços, a formação de uma martensita ϵ , de estrutura cristalina hexagonal compacta, e de uma martensita α' , de estrutura cúbica ou tetragonal de corpo centrado. (Andrade et alii, 2003; De et alii, 2006).

A quantidade e o tipo de fase que aparecem nesse aço dependem da tem-

peratura e da quantidade de deformação (Guy et alii., 1982, Santos, 2008). Além disto, pequenas alterações na composição química desses aços, como a substituição de parte de níquel por cobre, levam a alterações consideráveis no comportamento mecânico desses materiais (Gonzalez, 2003). Persistem muitas dúvidas, sobretudo no que se refere às transformações martensíticas induzidas por deformação nesse aço: quando aparecem e qual sua influência nas propriedades mecânicas.

A técnica de atrito interno é bastante sensível e capaz de detectar fenômenos como transformações de fase, movimento de interfaces, redistribuição de átomos intersticiais ou lacunas em uma estrutura cristalina. As medidas de atrito interno detectam mudanças na habilidade de um material amortecer vibrações com o tempo e com a temperatura, correspondentes a mudanças microestruturais ou subestruturais no estado sólido como, por exemplo, no caso do envelhecimento em aços carbono. O presente trabalho objetivou caracterizar o comportamento de atrito interno de um aço inoxidável do tipo ABNT 304 contendo cobre, deformado por tração, visando a uma melhor compreensão dos efeitos de deformações na estrutura desse material.

2. Materiais e Métodos

Foi utilizado um aço inoxidável austenítico do tipo ABNT 304, cuja composição química é mostrada na Tabela 1. O aço, de fabricação industrial, foi fornecido pela Companhia ArcelorMittal Inox Brasil na forma de chapa com 0,6mm de espessura.

Com o intuito de induzir diferentes quantidades de martensita no material, foram realizados ensaios de tração em

corpos-de-prova retirados das chapas na direção de laminação. Os corpos-de-prova, usinados na ArcelorMittal Inox Brasil, foram confeccionados conforme a norma ASTM E646. Os ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaios mecânicos da marca Instron, modelo 1125, dotada de câmara para condicionamento de temperaturas, modelo 3111. Para tal, a câmara possui resistências elétricas, responsáveis pelo aquecimento, e sistema de injeção de CO_2 para resfriamento do recinto. Os corpos-de-prova foram tracionados a uma velocidade de 2mm/min até atingirem as deformações verdadeiras de 3, 6, 9 e 12%, nas temperaturas de 50°C, 30°C, 10°C e 20°C, monitoradas por um termopar colocado próximo ao centro das amostras.

A fração volumétrica de martensita α' foi determinada através de um medidor de ferrita Ferritoscope® Fischer modelo MP3C. Foram feitas 5 medidas em cada corpo-de-prova e o erro das medidas foi inferior a 0,01. Foi utilizado o fator de conversão 2, conforme calibração anterior (Vilela et alii, 2001).

Ensaio dilatométrico foram realizados para identificar a presença de martensita ϵ e α' no corpo-de-prova deformado, avaliar sua quantidade relativa e medir as temperaturas nas quais ocorrem suas transformações reversas. Para esses ensaios, foram retiradas dos corpos-de-prova amostras medindo 12,0x2,0x0,6mm, cortadas na direção paralela à do ensaio de tração. O equipamento utilizado para os ensaios foi o dilatômetro da Adamel Lhomargy LK02, programado para varrer a faixa de temperaturas de 50°C a 1000°C, com taxa de aquecimento de 1,0°C/s.

Os ensaios de atrito interno foram realizados em amostras medindo 50x3x0,6mm, retiradas dos corpos-de-

Tabela 1 - Composição química do aço tipo ABNT 304 (% em peso).

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	P	S	N ⁽¹⁾
0,068	0,700	1,564	17,33	6,630	0,179	1,769	0,034	0,001	330

¹⁾ N em ppm

prova deformados, cortadas na direção paralela à dos ensaios de tração. Os espectros de atrito interno foram obtidos em pêndulo de torção invertido do tipo Kê, no intervalo de temperaturas de 40°C a 400°C, com taxa de aquecimento de, aproximadamente, 10,0°C/min e com frequência de vibração de, aproximadamente, 1Hz.

3. Resultados e discussão

Uma curva dilatométrica típica das amostras deformadas é apresentada na Figura 1. Nesse gráfico, a curva (a), em preto, mostra a variação da dilatação do material em função da temperatura e a curva (b), em azul, representa a derivada de (a), em função da temperatura, para uma amostra deformada de 12% a -30°C.

Pode-se observar a presença de duas transformações de fase, relacionadas, respectivamente, com as reversões $\epsilon \rightarrow \gamma$ e $\alpha' \rightarrow \gamma$, acontecendo nos intervalos de temperatura de 50 a 200°C, com pico em torno de 100°C, e de 500 a 800°C, e pico em torno de 680°C.

A superposição das curvas dilatométricas das amostras deformadas por tração em uma mesma temperatura mostra que a quantidade de martensita α' aumenta à medida que a deformação aumenta, conforme apresentado na Figura 2. Observa-se, no gráfico, que a quantidade de martensita α' transformada em γ aumenta durante o aquecimento.

Por outro lado, essa relação direta não é observada para a quantidade de ϵ transformada em γ . Esse resultado é uma indicação clara de que podem ocorrer, durante as deformações, de 3, 6, 9 e 12%, transformações martensíticas na seqüência $\gamma \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha'$, na temperatura de -50°C.

Nos ensaios dilatométricos das amostras deformadas a -30°C, -10°C e 20°C, também foi observado que a quantidade de martensita α' cresce com o aumento da deformação. E, da mesma forma que a 50°C, a reversão da marten-

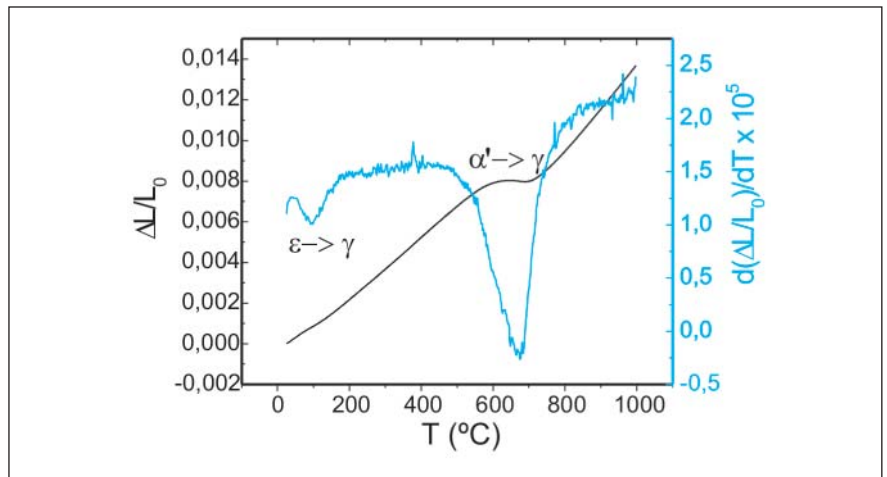


Figura 1 - Curva de dilatação em função da temperatura para uma amostra do aço inoxidável austenítico ABNT 304 contendo cobre deformada de 12% a -30°C (em preto), e sua derivada (em azul).

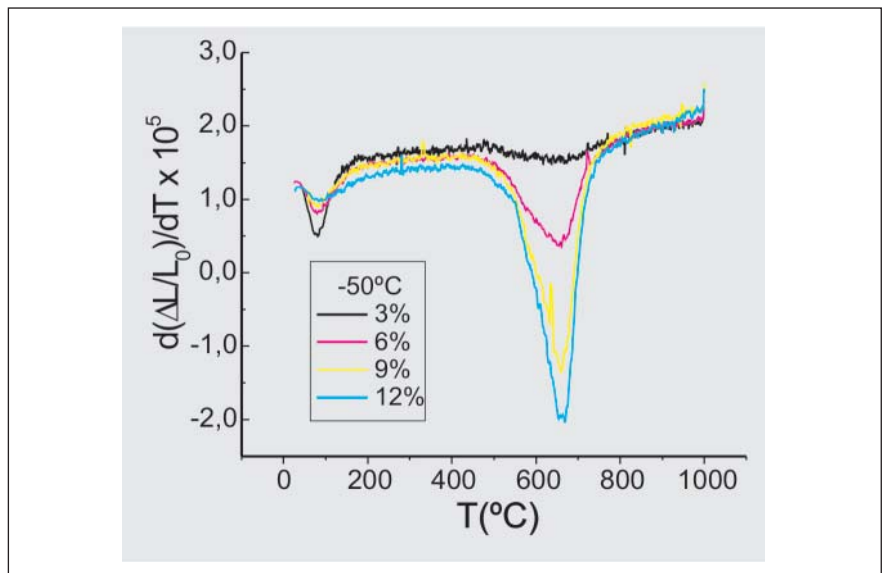


Figura 2 - Curvas das derivadas das dilatações em função da temperatura das amostras de aço inoxidável tipo ABNT 304 contendo cobre deformadas de 3, 6, 9 e 12% a 50°C.

sita ϵ tem comportamento variável. Nas amostras deformadas a 30°C e -10°C a quantidade mínima de ϵ foi observada para 3 e 12% de deformação, respectivamente. Para as outras deformações, a quantidade de ϵ revertida é semelhante. Portanto, ficou evidente a ocorrência de transformação $\gamma \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha'$ também para as temperaturas de -30°C e 10°C. Nas amostras deformadas a 20°C não foi possível determinar os picos de reversão da martensita ϵ devido à pequena quantidade formada dessa fase.

A Tabela 2 mostra as frações volumétricas de martensita α' medidas com o ferritoscópio. A fase ϵ é paramagnética, como a austenita, e, portanto, não é possível de ser medida por essa técnica.

Observa-se o aumento da fração volumétrica de martensita α' em função da deformação para uma mesma temperatura, conforme analisado por dilatometria. Nota-se, também, o decréscimo da fração volumétrica de martensita α' com o aumento da temperatura de deformação. A maior quantidade de martensita

α' foi obtida para a amostra deformada de 12% à temperatura de -50°C . A menor fração volumétrica foi obtida para a amostra deformada de 3% a 20°C .

A Figura 3 apresenta curvas de atrito interno em função da temperatura para amostras contendo pequena quantidade de martensita α' , ou seja, amostras deformadas de 3% nas temperaturas de 10°C , 30°C e 50°C .

Dois picos são identificados nessas curvas: o primeiro em torno de 100°C e o segundo em torno de 350°C . A faixa de temperatura de ocorrência do primeiro pico coincide com a da transformação reversa $\varepsilon \rightarrow \gamma$ determinada por dilatométrica: $50\text{-}200^{\circ}\text{C}$. A altura e a temperatura desse pico parecem aumentar com a quantidade de deformação, mas, como se verá mais adiante, esses efeitos estão relacionados à elevação da quantidade de martensita α' induzida com o aumento da deformação aplicada no corpo-de-prova.

A Figura 4 mostra que a posição do segundo pico, aproximadamente 350°C , é influenciada pela quantidade α' induzida: Q^{-1} aumenta e o pico tende a se tornar mal definido com a diminuição da temperatura e o aumento da quantidade de deformação. Comportamento similar foi observado em um aço inoxidável austenítico tipo ABNT 304 sem adição de cobre submetido às mesmas quantidades e temperaturas de deformação (Santos, 2007).

A análise das Figuras 4, 5 e 6, revela a ocorrência de um terceiro pico, situado entre os dois picos já descritos, em, aproximadamente, 220°C . Este só foi claramente detectado na curva $Q^{-1} \times T$, quando a quantidade de α' induzida na amostra é expressiva. No aço em estudo, isto se deu quando a deformação aplicada foi de no mínimo 12% a -30°C , e 9 e 12% a 50°C , resultando em frações volumétricas de α' igual ou superior a 30%.

À medida que a quantidade de α' aumenta na amostra, o pico de 220°C se eleva passando a dominar o comportamento da curva $Q^{-1} \times T$. Há elevação da

Tabela 2 - Frações volumétricas de martensita α' (%) em função da temperatura e da deformação por tração medidas pelo detector de ferrita.

Temperatura de deformação ($^{\circ}\text{C}$)	Deformação (%)			
	3	6	9	12
20	0,1	0,2	0,3	0,6
-10	0,3	1,9	5,8	13,3
-30	1,2	7,6	18,3	30,2
-50	2,6	16,4	30	40,4

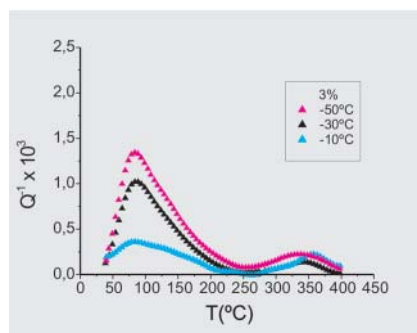


Figura 3 - Curvas de atrito interno em função da temperatura das amostras deformadas de 3% a 10°C , 30°C e 50°C .

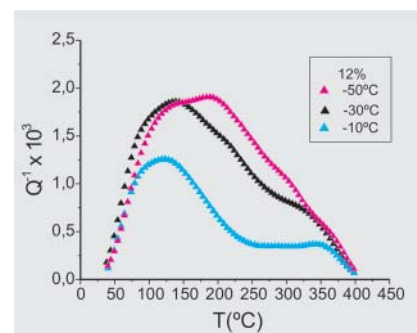


Figura 4 - Curvas de atrito interno em função da temperatura das amostras deformadas de 12% a 10°C , 30°C e 50°C .

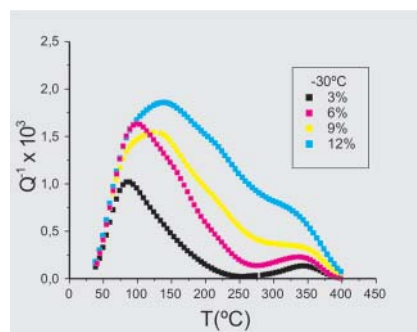


Figura 5 - Curvas de atrito interno em função da temperatura das amostras deformadas de 3, 6, 9 e 12% a 10°C .

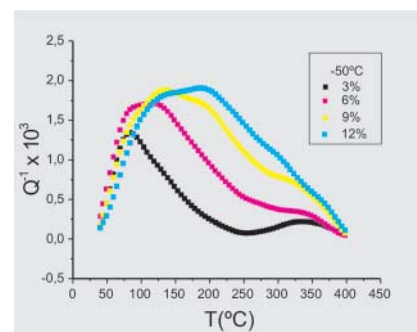


Figura 6 - Curvas de atrito interno em função da temperatura das amostras deformadas de 3, 6, 9 e 12% a 50°C .

curva, tanto do lado esquerdo, quanto do direito. Cita-se, como exemplo: o atrito aumenta para as amostras deformadas de 3 para 6% a 50°C (Figura 6). Nessa situação, a quantidade de ε é menor para 6% de deformação e o atrito deveria estar mais baixo. É a componente associada ao atrito interno de α' na amostra, cuja fração volumétrica aumenta de

2,6 a 16,4%, para essas deformações (Tabela 2), que provoca a elevação do nível da curva total $Q^{-1} \times T$. A análise das curvas apresentadas nas Figuras 5 e 6 revela esse comportamento com nitidez, uma vez que as amostras deformadas em 50°C contêm maior quantidade de martensita α' que aquelas deformadas em -30°C .

4. Conclusões

- O comportamento de atrito interno em função da temperatura de aços inoxidáveis tipo ABNT 304 contendo cobre é complexo e está relacionado ao produto das transformações martensíticas induzidas por deformação que ocorrem nesses materiais.
- Foi observada a presença de até três picos na curva $Q_1 \times T$ em corpos-de-prova deformados por tração de 3 a 12% de deformação verdadeira, nas temperaturas de 20, -10, -30, -50°C.
- Os picos detectados situam-se em torno das temperaturas de 100, 220 e 350°C. O primeiro está associado à presença de fase ϵ . Os outros dois picos estão relacionados à ocorrência de martensita α' nas amostras.
- Os três picos se sobrepõem gerando uma curva complexa, que deve ser deconvoluída para melhor compreensão dos processos de dissipação da energia mecânica que ocorrem nos aços inoxidáveis austeníticos deformados.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPEMIG pelo apoio financeiro. Maurício S. Simões e Margareth S. Andrade agradecem à FAPEMIG pelas bolsas de Iniciação Científica e de Incentivo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Tecnológico, respectivamente.

6. Referências bibliográficas

- ANDRADE, M.S. et alii. Reversão da martensita em aços inoxidáveis tipo ABNT 304. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 58, 2003. Rio de Janeiro. *Anais...* São Paulo: ABM, 2003. p.3155-3164.
- DE, A.K. et alii. Deformation-induced phase transformation and strain hardening in type 304 austenitic stainless steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 37A, p. 1875-1886, 2006.
- GONZALEZ, B.M. et alii. The influence of copper addition on the formability of AISI 304 stainless steel. *Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, Estados Unidos, v. 343, n. 1-2, p. 51-56, 2003.
- GUY, K. et alii. ϵ and α' martensite formation and reversion in austenitic stainless steels. *Journal de Physique*, v. 43, p. 575, 1982.
- PADILHA, A.F. & GUEDES, L.C. *Aços Inoxidáveis Austeníticos: Microestrutura e Propriedades*. São Paulo: Ed. Hemus, 1994. 170p.
- PECKNER, D., BERNSTEIN, I. M. *Handbook of Stainless Steels*. USA: McGraw-Hill Book Company, 1977. p. 1.1-1.9.
- PICKERING, F.B. Physical metallurgical development of stainless steels. *International Metals Reviews*, p. 227-268, 1976.
- PINTO, T. B. et alii. Correlação entre o atrito interno e a quantidade de martensita induzida por deformação em um aço tipo ABNT 304. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 58, 2003, Rio de Janeiro. *Anais...* São Paulo: ABM, 2003.
- PINTO, T.B. *Estudo das transformações de fases e dos mecanismos de deformação de aços inoxidáveis do tipo AISI 304*. Belo Horizonte: CETEC. 2002. 22p. (Relatório Técnico de Bolsa Recém-Doutor CNPq).
- SANTOS, T.F.A. *Atrito interno em aços inoxidáveis austeníticos contendo martensita induzida por deformação*. Belo Horizonte: REDEMAT/CETEC/UFOP. 2007. 84p. (Dissertação de Mestrado).
- SANTOS, T.F.A., ANDRADE, M.S. Avaliação dilatométrica da reversão das martensitas induzidas por deformação em um aço inoxidável austenítico do tipo ABNT 304. *Revista Matéria*, 2008. (aceito para publicação).
- TALONEN, J., HÄNNINEN, H. Damping properties of austenitic stainless steels containing strain-induced martensite. *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 35A, p. 2401-2406, 2004.
- VILELA, J.M.C. et alii. Análise metalográfica em aço inoxidável austenítico após deformação em diferentes temperaturas. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 56, 2001, Belo Horizonte. *Anais...*São Paulo: ABM, 2001. p 510-519, 2001.

Artigo recebido em 07/08/2009 e aprovado em 19/01/2010.

Rem
Novo endereço eletrônico para submissão
de artigos:

<http://submission.scielo.br/index.php/rem/index>

www.rem.com.br