



EFEITO DO REFINAMENTO DO GRÃO DA FERRITA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM AÇO INOXIDÁVEL AISI 409¹

José Carlos de Lacerda²
Valmir Dias Luiz³
Rafael José da Cunha Deiró⁴

Resumo

Este trabalho tem como objetivo investigar o comportamento do refinamento do grão de um aço inoxidável AISI 409 e as conseqüentes alterações em suas propriedades mecânicas. Para o refinamento do grão, corpos de prova foram submetidos a cinco consecutivas torções a 180°, a frio, com tratamento térmico de recristalização a 850°C após cada uma das torções. Após cada uma das etapas de torção-recristalização, os corpos de prova foram submetidos a ensaios de tração, microdureza Vickers e análise micrográficas. Foi observado que com as deformações por torção ocorreu aumento na tensão de escoamento, aumento na resistência máxima à tração, ligeira redução na tenacidade à tração e refinamento do grão apenas nas bordas da seção transversal dos corpos de prova.

Palavras-chave: Tamanho de grão; Torção a frio; AISI 409.

EFFECT OF GRAIN REFINEMENT OF FERRITA IN THE MECHANICAL PROPERTIES OF A STAINLESS STEEL AISI 409

Abstract

This paper aims to investigate the behavior of the grain refinement of a stainless steel AISI 409 and the consequent changes in their mechanical properties. For the refinement of the grain, specimens were subjected to five consecutive twists to 180°, cold, and heat treated for crystallization at 850°C after each of the twists. After each step torsion-recrystallization, specimens were tested for strength, microhardness and micrographic analysis. It was observed that with the twist deformation increases in the yield stress, increase in maximum tensile strength, slight reduction in tensile toughness, grain refinement only at the edges of the cross section of the specimens.

Key words: Grain size; Cold twist; AISI 409.

¹ Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Membro da ABM; Engenheiro Mecânico, M.Sc., DCX, Professor da Área de Ciências Exatas do UnilesteMG, Coronel Fabriciano, MG.

³ Membro da ABM; Engenheiro Mecânico, M.Sc., DCX, Professor da Área de Ciências Exatas do UnilesteMG, Coronel Fabriciano, MG.

⁴ Engenheiro Mecânico, DCX, Graduando do Departamento de Ciências Exatas do UnilesteMG, Coronel Fabriciano, MG.



1 INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis ferríticos têm estrutura cúbica de corpo centrada e são caracterizados por uma grande tendência ao crescimento do grão da microestrutura quando expostos a altas temperaturas por tempo relativamente prolongado, conforme relatam Callister,⁽¹⁾ Shackelford⁽²⁾ e Vlack.⁽³⁾ Segundo Krysiak et al.,⁽⁴⁾ os aços inoxidáveis ferríticos recozidos com granulação fina apresentam condições satisfatórias de ductilidade e tenacidade à temperatura ambiente. Considerando o exposto, buscou-se neste trabalho realizar uma pesquisa para verificar os efeitos do refinamento do grão nas suas propriedade de tenacidade, microdureza e de resistência à tração, especificamente em um aço inoxidável ferrítico AISI 409. O refinamento do grão foi realizado a partir de sucessivas deformações por torção seguidas de tratamento de recristalização a 850°C.

De acordo com Modenesi⁽⁵⁾ o crescimento de grão de aços inoxidáveis ferríticos com 17% de cromo ocorre em temperaturas acima de aproximadamente 950°C e que o refinamento do grão de uma estrutura grosseira deste tipo de aço pode ser realizado por deformação plástica seguida de tratamento térmico de recristalização. Aços inoxidáveis ferríticos estabilizados com nióbio ou titânio formam precipitados de carbonitreto de nióbio ou titânio preferencialmente aos precipitados de cromo. Estes precipitados de nióbio ou titânio só se dissolvem na matriz ferrítica em temperaturas muito elevadas, aproximadamente acima de 1.200°C. Assim, aços inoxidáveis ferríticos adequadamente estabilizados tendem a manter estrutura completamente ferrítica uma vez que têm reduzido o efeito austenitizante de elementos intersticiais. Os elementos estabilizantes, nióbio e titânio, ao inibirem a formação de precipitados de cromo previnem o material quanto à corrosão intergranular quando exposto a temperaturas elevadas.

Segundo Meyers et al.,⁽⁶⁾ severa deformação plástica quebra a microestrutura em finos grãos sendo os principais métodos empregados para este procedimento o ECAP (*Equal-Channel Angular Pressing*) e o HTP (*High-Pressure Torsion*). O tamanho do grão microestrutural tem um significativo efeito nas propriedades mecânicas dos materiais, sobretudo na sua tensão de escoamento. Para materiais policristalinos convencionais a tensão de escoamento pode ser prevista através da equação (1) de Hall-Petch.

$$\sigma_y = \sigma_0 + kd^{-1/2} \quad (1)$$

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Materiais

O material objeto deste estudo foi um aço inoxidável ferrítico AISI 409, laminado a quente sob a forma de chapa, com espessura de 6,3mm, cuja composição química se apresenta na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química do aço inoxidável AISI 409 (% peso).

| C | Mn | Si | P | Cr | Mo | Ni | Nb | Ti | O ₂ (ppm) | N ₂ (ppm) |
|------|------|------|--------|-------|------|------|-------|-------|-------------------------|-------------------------|
| 0.01 | 0.16 | 0.39 | 0.0275 | 11.35 | 0.01 | 0.13 | 0.004 | 0.173 | 48 | 81 |

As amostras foram extraídas das chapas e os corpos de prova foram confeccionados no sentido de laminação, conforme se apresenta na Figura 1.

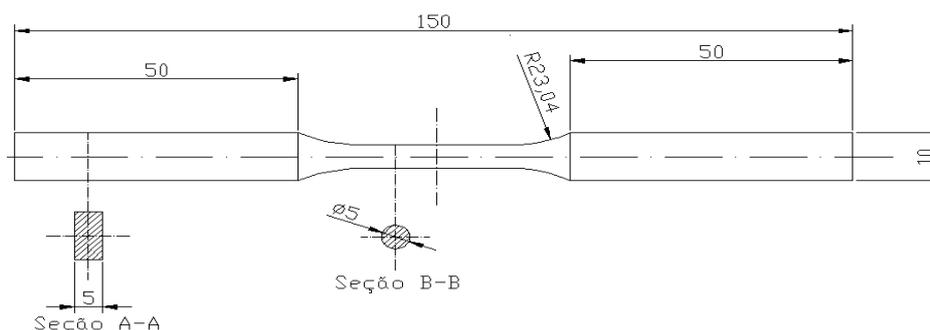


Figura 1. Corpo de prova para torção e tração.

Os corpos de prova para torção e tração, cujas dimensões são apresentadas na Figura 1, se apresentam como especiais para esta pesquisa, ou seja não estão em concordância com normas próprias para estes tipos de ensaios. Esta concepção foi motivada pelo fato da espessura das amostras disponíveis (6,3 mm) não permitirem a confecção dos corpos de prova de acordo com as referidas normas.

Para a deformação das amostras por torção foi desenvolvida uma máquina especial, conforme se apresenta na Figura 2.



Figura 2. Máquina de deformação por torção.

Para a realização dos tratamentos térmicos de recristalização foi utilizado um forno mufla dotado de controle de velocidade de aquecimento. Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina de tração instrumentalizada aplicando-se velocidade de 5mm/min. As imagens micrográficas foram obtidas utilizando-se um microscópio Leica DMRM. As microestruturas das amostras foram reveladas com reagente Vilella (95 ml de álcool etílico, 5 ml de ácido clorídrico e 1 g de ácido pícrico), por imersão.

2.2 Procedimento Experimental

No fluxograma da Figura 3 apresentam-se as etapas do procedimento experimental.

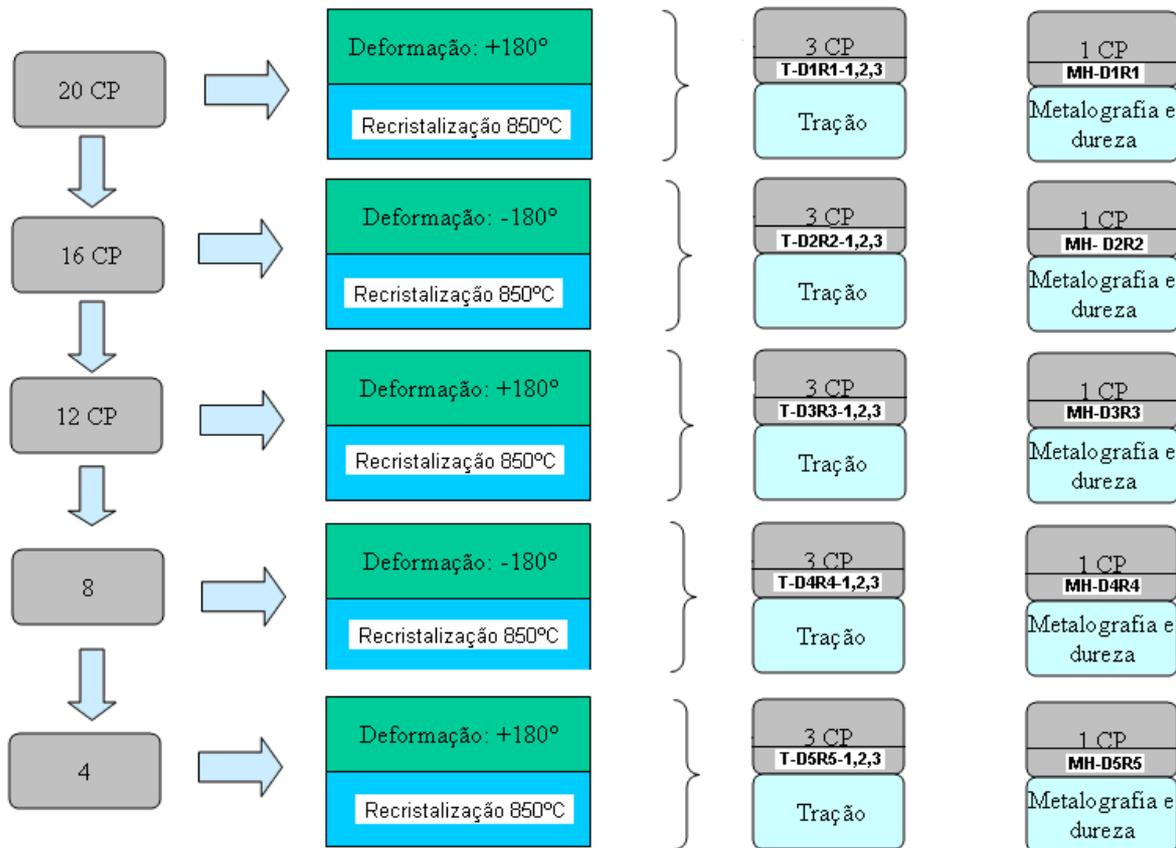


Figura 3. Fluxograma de deformação-recristalização.

No fluxograma apresentado na Figura 3 mostram-se as etapas seguidas para a obtenção das amostras para a realização da pesquisa. No procedimento experimental foram utilizados 20 corpos de prova (CP) os quais foram submetidos a 5 etapas de torção-recristalização realizadas respectivamente a 180° e 850°C. As torções foram realizadas no sentido horário (+) e sentido anti horário (-) conforme indicado no fluxograma. Em cada uma das etapas de torção-recristalização foram retirados 3 corpos de prova para ensaios de tração e 1 corpo de prova para análises micrográficas e ensaios de microdureza.

3 RESULTADOS

Como resultados da pesquisa são apresentadas as curvas tensão x deformação obtidas a partir dos ensaios de tração nas amostras em todas as condições de deformação por torção e tratamento de recristalização, assim como as amostras que não foram deformadas. Foram realizados ensaios de microdureza Vickers na seção transversal das amostras a fim de se verificar a variação desta propriedade nas várias condições de deformação das amostras, assim como também são apresentadas algumas imagens microestruturas a fim de se observar a evolução da variação do tamanho do grão da ferrita face às deformações e tratamentos de recristalização sucessivos a que o material foi submetido.

1.1 Ensaios de Tração

Na Figura 4 são apresentadas as curvas tensão x deformação obtidas a partir dos ensaios de tração.

(
Figura 4. Curvas tensão x deformação obtidas em ensaios de tração

A partir das curvas tensão x deformação apresentadas na Figura 4 pode ser observado um pequeno aumento na resistência máxima do material, desde aproximadamente 420 MPa das amostras que não foram submetidas à torção (TD0R0) até a aproximadamente 470 MPa das amostras que foram submetidas a 5 torções de 180° reversíveis com tratamentos de recristalização a 850°C após a cada uma das etapas de torção (T-D5R5). Outra constatação possível de ser observada foi o aumento da tensão de escoamento média que ocorreu desde as amostras que não foram submetidas à torção (280 MPa) até a tensão de escoamento média de escoamento (385 MPa) das amostras que foram submetidas a 5 ciclos de torção com tratamentos de recristalização intermediários.

A partir da área total sob as curvas tensão x deformação, determinada a partir da equação (2), conforme Garcia,⁷, em função dos valores médios de resistência máxima (σ_u) e da deformação (ϵ_f), foram calculados os valores das tenacidades médias obtidas para cada uma das condições de torção e tratamentos de recristalização a que as amostras foram submetidas.

$$U_t = 2/3 \cdot \sigma_u \cdot \epsilon_f \quad (2)$$

No gráfico da Figura 5 são apresentados os resultados médios de tenacidade à tração das amostras de acordo com as suas condições: sem torção comparado com as 5 demais condições em que os corpos de prova foram submetidos às torções a frio de 180° reversíveis intermitentemente, no sentido horário e anti-horário, com tratamentos térmicos de recristalização a 850°C após cada uma das torções.

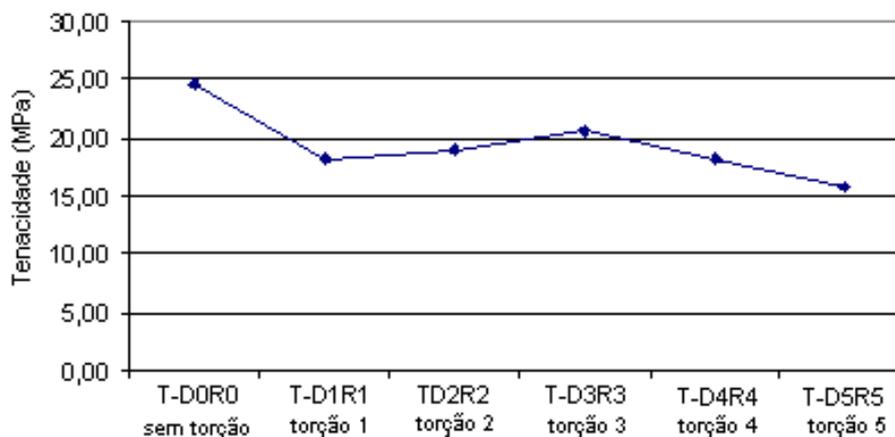


Figura 5. Curvas de variação da tenacidade à tração das amostras.

Observa-se que, ainda que pouco significativo, pode-se constatar a tendência na redução da tenacidade à tração das amostras à medida que foram submetidas às sucessivas deformações por torção a 180° reversíveis intermitentemente, no sentido

horário e anti-horário, com tratamentos térmicos de recristalização a 850°C após cada uma das torções.

1.2 Ensaios de Microdureza Vickers

Foram realizados ensaios de microdureza Vickers na seção transversal das amostras nas 5 condições de deformação por torção citadas anteriormente e na condição sem torção. No ensaio de microdureza Vickers foi utilizada uma carga de 100g e as durezas foram obtidas na extremidade, centro e na posição central do raio da seção transversal das amostras, conforme se apresenta na Figura 6.

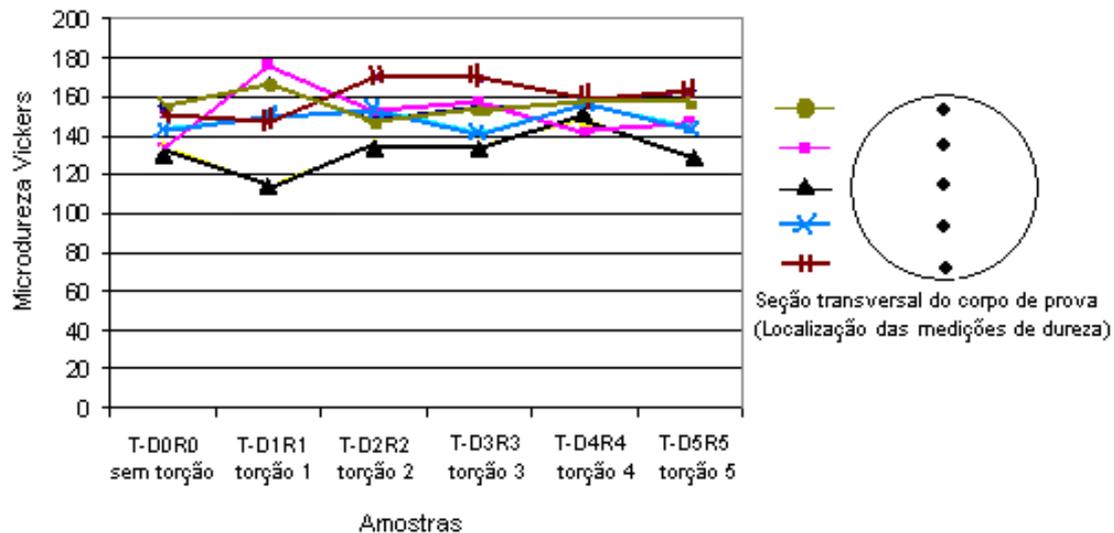


Figura 6. Perfil de microdureza Vickers na seção transversal das amostras.

Através da observação dos perfis de microdurezas Vickers ao longo das seções transversais das amostras, conforme apresentado na Figura 6, pode-se constatar que no centro das amostras, houve a predominância de menores valores de microdureza comparados com os mesmos na periferia. Quanto às microdurezas observadas na periferia das amostras, respectivamente submetidas às sucessivas etapas de deformação por torção, pode-se observar que foi pouco significativa a variação de seus valores.

1.3 Metalografia e Tamanho de Grão

A partir das análises metalográficas foram identificados os tamanhos de grãos ASTM 4/3 para a ferrita na amostra na condição sem torção tanto nas bordas quanto no centro. Nas amostras relativas às 5 condições de torção sucessivas foram identificados diferentes tamanhos de grão ASTM nos centros e bordas das amostras, cujos valores são apresentados na Tabela 2.



Tabela 2. Valores de tamanho de grão ASTM das amostras

| Amostras | Tamanho do grão ASTM (borda) | Tamanho do grão ASTM (centro) |
|----------------------|------------------------------|-------------------------------|
| MHD1R1 (Torção 1) | 6/5 | 4/5 |
| MHD2R2 (Torção 2) | 6/7 | 4/3 |
| MHD3R3 (Torção 3) | 6/5 | 4/5 |
| MHD4R4 (Torção 4) | 6/7 | 4/3 |
| MHD5R5 (Torção 5) | 6/5 | 4/5 |

Conforme pode ser observado na Tabela 2 houve redução no tamanho médio do grão da ferrita nas bordas em relação aos centros dos corpos de prova que foram submetidos às torções sucessivas.

Na Figura 7 são apresentadas as imagens micrográficas das amostras submetidas às deformações de torção e da amostra na condição original.

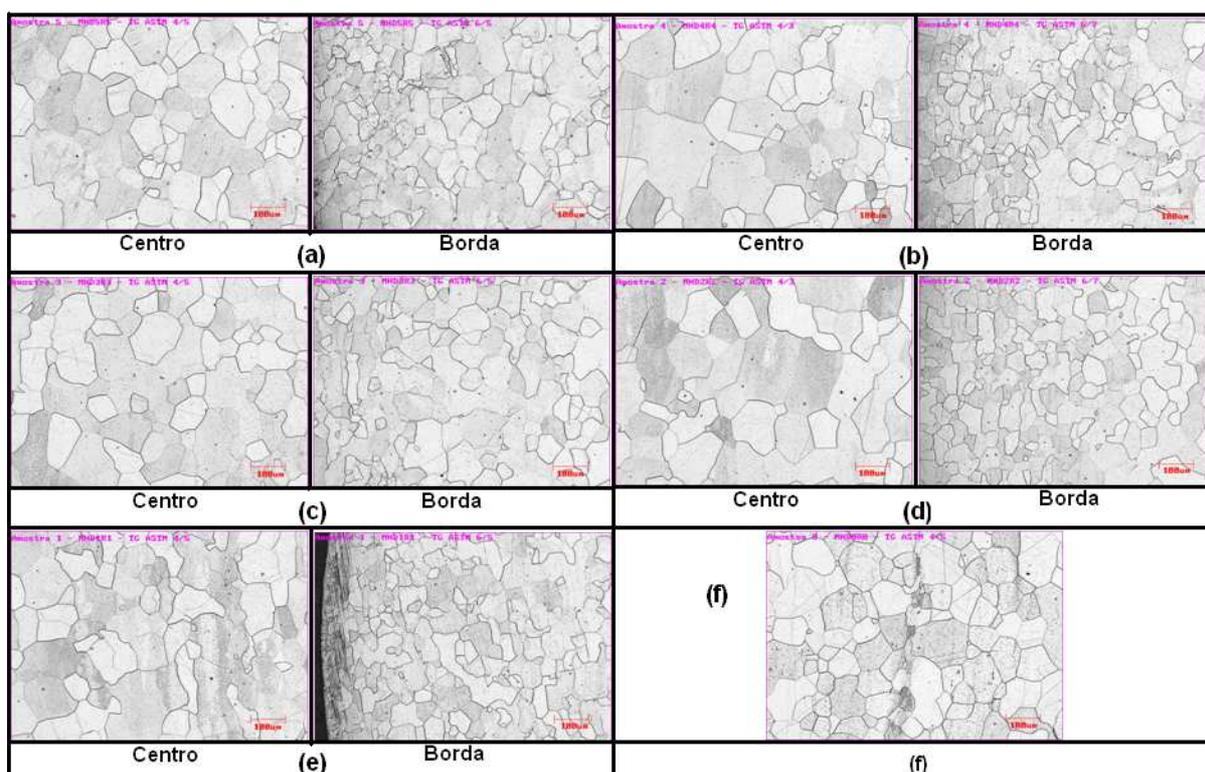


Figura 7 – Microestruturas das amostras: (a) 5ª etapa de torção; (b) 4ª etapa de torção; (c) 3ª etapa de torção; (d) 2ª etapa de torção; (e) 1ª etapa de torção; (f) Amostra na condição original, sem torção.

De acordo com as imagens apresentadas na Figura 7, em todas as condições das amostras, quer sejam aquelas que foram submetidas às deformações por torção assim como aquela na condição original, sem torção, as microestruturas se apresentam predominantemente ferríticas. A partir das imagens fica evidenciado o refinamento do grão da ferrita apenas nas bordas das amostras que foram submetidas às sucessivas deformações por torção, coerentemente com o apresentado na Tabela 2.

4 DISCUSSÃO

O aumento observado na tensão de escoamento com as sucessivas etapas de torção seguidas de tratamento de recristalização está coerente com a teoria de Hall-Petch que apresenta através de sua equação (1), citada anteriormente, a indicação do aumento da tensão de escoamento com a redução do tamanho do grão microestrutural em materiais policristalinos. Assim, como houve uma redução média no tamanho do grão da ferrita nas sucessivas etapas de torção-recristalização conseqüentemente ocorreu aumento na tensão de escoamento.

De acordo com Callister,⁽¹⁾ com o refinamento do grão da ferrita é coerente que haja aumento na resistência máxima do material, o que ocorreu ainda que pouco significativamente, conforme relatado nos resultados. Constatou-se um pequeno aumento na resistência máxima do material, de aproximadamente 420 MPa das amostras que não foram submetidas à torção para aproximadamente 470 MPa das amostras que foram submetidas à 5ª e última etapa de torção.

A pequena redução na tenacidade à tração observada entre as amostras na condição original, sem torção, e as amostras submetidas à torção, ocorreu principalmente devido à diminuição na deformação com as sucessivas etapas de torção-recristalização.

Os maiores valores de microdureza Vickers constatados nas bordas das amostras comparados com os valores do centro das mesmas ocorreram devido a existência de menores tamanhos de grão de ferrita nas bordas em comparação com o centro. De acordo com Meyers,⁽⁶⁾ com o refinamento do grão há conseqüentemente aumento na dureza.

De acordo com Garcia,⁽⁷⁾ na torção, a intensidade na deformação nas bordas é muito superior àquela que ocorre no centro de um corpo de prova. Levando-se em consideração que ao se aplicar uma torção gera-se um momento torsor em relação ao centro do corpo de prova, pode-se concluir que quanto mais se afasta do centro do corpo de prova maior é a força e conseqüentemente a deformação atuante naquele ponto do material. Esta pode ser a razão que explica a constatação da ocorrência do refinamento do grão mais intensamente nas bordas dos corpos de prova submetidos às torções, estando coerente com Meyers et al.,⁽⁶⁾ ao afirmar que severa deformação plástica quebra a microestrutura em finos grãos.

5 CONCLUSÕES

Foi observado um pequeno aumento na resistência máxima do material, de 420 MPa para 470 MPa entre as amostras na condição original, sem torção e as amostras submetidas à 5ª e última etapa de torção-recristalização.

Constatou-se aumento da tensão de escoamento média do material de 280 MPa para 385 MPa entre as amostras na condição original, sem torção e as amostras submetidas à 5ª e última etapa de torção-recristalização.

Pode ser observada uma tendência na redução da tenacidade à tração do material com as sucessivas etapas de torção-recristalização em comparação com o material na condição original, sem torção.

Em todas as etapas de torção-recristalização constatou-se a predominância de maior microdureza Vickers nas bordas da seção transversal dos corpos de prova em comparação com os centros dos mesmos.

O refinamento do grão ocorreu predominantemente nas bordas dos corpos de provas submetidos à torção, não tendo sido constatado refinamento do grão no centro dos mesmos.

Agradecimentos

À FAPEMIG, à ArcelorMittal Inox Brasil S.A. e ao Unileste-MG pelo apoio, respectivamente, com bolsa de iniciação científica, com a realização de ensaios de laboratório em seu centro de pesquisas e pela disponibilização de seus laboratórios de tecnologia mecânica e tratamentos térmicos.

REFERÊNCIAS

- 1 CALLISTER, W. D. JR. Materials Science and Engineering an Introduction. 6^a ed. USA: John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- 2 SHACKELFORD, J. F. Introduction to Materials Science for Engineers, 5^a ed. New Jersey, USA: Prentice-Hall, Inc. 2000.
- 3 VLACK, L. H. V. Elements of Materials Science and Engineering. 6^a ed. USA: Addison-Wesley Publishing Company. 1990.
- 4 KRYSIK, H. F.; GRUBB, J. F.; POLLARD, B. e CAMPBELL, R. D. Selection of Wrought Ferritic Stainless Steels. In: Metal Handbook, Welding, Brazing and Soldering. USA: ASM International, v. 6, p.1139-1169. 1993.
- 5 MODENESI, P. J. Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis. São Paulo: SENAI-SP, 2001. v. 1.
- 6 MEYERS, M. A; MISHRA, A; BENSON, D. J. Mechanical Properties of anocrystalline materials. USA: Progress in Materials Science. 2005.
- 7 GARCIA, A; SPIM, J. A; SANTOS, C. Ensaios dos Materiais. LTC- Livros Técnicos e Científicos. Editora S.A. (2002).