

INFLUÊNCIA DO TAMANHO DE GRÃO NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE AÇO INOXIDÁVEL UNS S30100¹

Rodrigo Magnabosco²
Drumond de Mélo³

Resumo

O presente trabalho teve o objetivo de equacionar, em relações do tipo Hall-Petch, as propriedades mecânicas do aço inoxidável austenítico UNS S30100. O material foi submetido a recozimento a 1200°C entre 10 minutos e 24 horas, para a obtenção de diferentes tamanhos de grão, determinados segundo a norma ASTM E112-96. Ensaios de tração segundo a ASTM E8M-04 determinaram limites de resistência, escoamento e real de ruptura, alongamento total em 25mm, redução da área e deformação real na fratura, além dos parâmetros da equação de Ramberg-Osgood. As microestruturas obtidas apresentaram diferentes tamanhos de grão, e os resultados obtidos permitiram relacionar as propriedades mecânicas ao diâmetro médio espacial dos grãos das diferentes amostras. Constatou-se que os limites de escoamento e resistência, o alongamento total em 25mm e o coeficiente de resistência da equação de Ramberg-Osgood são dependentes do diâmetro médio espacial dos grãos, sendo que as relações de Hall-Petch obtidas para estas variáveis tem confiabilidade superior a 85%. Todavia, propriedades mecânicas associadas à fratura do material (limite real de fratura e deformação real na fratura) não dependem do tamanho de grão, observando-se inclusive que o limite real de fratura cresce linearmente com a deformação real na fratura, indicando que o intenso encruamento desta região dos corpos-de-prova é o fenômeno que governa estas propriedades. O expoente de encruamento da equação de Ramberg-Osgood também independe do tamanho de grão original do aço UNS S30100, provavelmente devido a indução de martensita α' , fenômeno que governaria os mecanismos de deformação plástica deste aço.

Palavras-chave: Aço inoxidável austenítico; UNS S30100; Tamanho de grão; Comportamento mecânico.

¹ Apresentado no 60° Congresso Anual da ABM – Internacional – Belo Horizonte, 25 a 28 de julho de 2005.

² Prof. Dr. do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Universitário da FEI, rodrimagn@fei.edu.br

³ Aluno do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Universitário da FEI, drumelo@terra.com.br

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho tem o objetivo de equacionar, em relações do tipo Hall-Petch, as propriedades mecânicas do aço inoxidável austenítico UNS S30100. A seguir encontra-se breve revisão de literatura sobre os temas que serão discutidos.

Comportamento plástico de estruturas policristalinas. A deformação plástica de materiais metálicos depende fortemente da movimentação de discordâncias; dificultar seu movimento, deste modo, leva a aumento da resistência mecânica. Contornos de grão presentes em materiais policristalinos agem como barreiras à movimentação de discordâncias, e portanto quanto menor o diâmetro médio dos grãos, maior é a superfície de contornos de grão agindo como barreira à movimentação de discordâncias, existindo assim endurecimento do material (HULL, 1985, p. 153). Hall e Petch, trabalhando independentemente na década de 1950, obtiveram a mesma relação matemática entre uma dada variável de resistência mecânica (por exemplo limite de escoamento ou de resistência) e o tamanho médio dos grãos de um policristal. Esta relação, mostrada na Eq. 1 para uma dada tensão de escoamento σ , é conhecida como *Relação de Hall-Petch* (REED-HILL, 1991, p. 192):

$$\sigma = \sigma_o + k.d^{-1/2} \quad (1)$$

Todavia, não é só a presença de mais superfície de contornos de grão a responsável pelo aumento de resistência mecânica. Para que seja possível a deformação de um dado grão cujos sistemas de escorregamento estejam favoravelmente orientados com o sentido de deformação, os grãos vizinhos devem se acomodar, e deste modo a deformação plástica de um grão fica limitada à possibilidade de deformação dos grãos adjacentes, sujeitos a diferentes orientações cristalográficas, dificultando o processo. Isto aumenta a energia necessária para a deformação (o que pode levar a aumento de tenacidade), inclusive devido à necessidade de criação de discordâncias *geometricamente necessárias* (HANSEN, 1985, P. 2167). A medição do tamanho médio de grão é normalizada internacionalmente pela ASTM E 112-96 (1996, p. 1).

Aços inoxidáveis austeníticos. Os aços inoxidáveis austeníticos recebem esta denominação por apresentarem a fase austenita (a estrutura CFC do ferro) estável inclusive em temperaturas inferiores à ambiente. Os mais comuns são modificações da clássica liga 18/8 (18% Cr e 8% Ni), o mais popular material resistente à corrosão por mais de 70 anos. Dentre os mais comuns, o UNS S30100 foi originalmente desenvolvido para aplicações que demandem, aliada a resistência à corrosão, alta resistência mecânica, a qual é obtida graças a grande capacidade de encruamento. Este aço inoxidável apresenta composição química nominal 18%Cr-8%Ni-2%Mn-1%Si-0,15%C, e como propriedades mecânicas típicas limite de escoamento de 276 MPa, limite de resistência 758 MPa e alongamento total em 50 mm de 60%(SEDRIKS, 1996, p. 13).

Durante a deformação plástica, o aço UNS S30100 apresenta endurecimento não só devido ao encruamento, mas também como resultado de transformação martensítica induzida por deformação, particularmente em temperaturas abaixo da ambiente, levando a diferentes comportamentos do limite de resistência em função do grau de deformação plástica para diferentes temperaturas de deformação, atingindo 1250 MPa se deformação de 40% for conduzida à temperatura ambiente, ou 1800 MPa se a deformação se der a -76°C (SEDRIKS, 1996, p. 13). Duas são as transformações induzidas por deformação experimentadas pela austenita, havendo formação de martensita ϵ , de estrutura hexagonal compacta, e a martensita α' , de estrutura

cúbica de corpo centrado e ferromagnética. Trabalho recente (PINTO, 2003, p. 3137) utilizando aço UNS S30400 (18% Cr – 8%Ni) indica que a fração volumétrica de martensita α' , medida por ferritoscópio após deformação verdadeira de 0,3, pode atingir valores de até 20%.

Para eliminar o encruamento e reverter a transformação martensítica, levando a uma estrutura de grãos de austenita, o aço UNS S30100 é recozido em temperaturas entre 1010°C e 1120°C. Isto evita a faixa de temperaturas onde é possível a precipitação de carbonetos de cromo (entre 425°C e 900°C), além de permitir a total dissolução de carbonetos deste tipo possivelmente presentes na estrutura. Tal procedimento, aliado a resfriamento rápido após o recozimento, mantém o carbono e o cromo em solução sólida, aumentando a resistência a corrosão, particularmente a intergranular. Nota-se também que em temperaturas superiores a 1095°C pode ocorrer crescimento indesejável dos grãos (ASM, 1994, p. 290).

2 MATERIAL E MÉTODOS

A composição química do material estudado encontra-se na Tabela 1. As barras de 19,05 mm de diâmetro foram usinadas, gerando corpos-de-prova para os ensaios de tração, respeitando as especificações da norma ASTM E 8M-04 (2004, p. 1).

Tabela 1. Composição química (% massa) do aço em estudo.

C	Cr	Si	Mo	Ni	Mn	S	P	Fe
0,046	17,66	0,28	0,25	7,91	1,44	0,029	0,026	balanço

Os corpos-de-prova foram recozidos a 1200°C entre 10 minutos e 24 horas, utilizando forno tubular e sob atmosfera de N₂ para evitar oxidação excessiva, com posterior resfriamento em água. O tamanho de grão das amostras foi determinado por estereologia quantitativa de amostras metalográficas polidas e atacadas eletroliticamente com solução 10% ácido oxálico a 6 Vcc por 30 segundos, utilizando-se sistema digital de análise de imagens e respeitando-se a ASTM E 112-96 (1996, p. 1). Foram realizadas medidas nas seções transversal e longitudinal das barras.

Ensaio de tração segundo a ASTM E8M-04 (2004, p. 1) foram conduzidos em corpos-de-prova de tração polidos em seu comprimento útil com o intuito de se determinar resistência mecânica (limite de escoamento - LE, limite de resistência - LR), ductilidade (alongamento total em 25 mm – AT_{25mm} e redução de área – RA), coeficiente de resistência (H) e expoente de encruamento (n) da equação de Ramberg-Osgood (Eq. 2, onde E é o módulo de elasticidade, $\tilde{\epsilon}$, $\tilde{\epsilon}_e$, $\tilde{\epsilon}_p$ e $\tilde{\sigma}$ são respectivamente deformação real total, deformação real elástica, deformação real plástica e tensão real), deformação real na fratura, (calculada pela Eq. 3) e limite real de fratura, corrigido através da relação de Bridgman ($\tilde{\sigma}_f$), descrita na Eq. 4, onde F_f e A_f são respectivamente a força e área no instante da fratura, R é o raio de curvatura da estrição e D_{min} é o menor diâmetro da seção transversal da estrição formada (STEPHENS, 2001, p. 95).

$$\tilde{\epsilon} = \tilde{\epsilon}_e + \tilde{\epsilon}_p = \frac{\tilde{\sigma}}{E} + \left(\frac{\tilde{\sigma}}{H} \right)^{1/n} \quad (2)$$

$$\varepsilon_f = \ln\left(\frac{100}{100 - RA}\right) \quad (3)$$

$$\tilde{\sigma}_f = \frac{\frac{F_f}{A_f}}{\left(1 + \frac{4R}{D_{min}}\right) \cdot \ln\left(1 + \frac{D_{min}}{4R}\right)} \quad (4)$$

Após os ensaios mecânicos, foi efetuada a medida de fração volumétrica de martensita α' através de ferritoscópio, na região de máxima estrição após os ensaios de tração, e em seção longitudinal dos corpos-de-prova. Todos os resultados foram analisados em função do tamanho de grão do material, utilizando expressões como a Eq. 1.

3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A Figura 1 mostra os diferentes tamanhos de grão obtidos nas amostras após o recozimento a 1200°C entre 10 minutos e 24 horas. A medição de tamanho de grão, realizada por medição de interceptos médios nas seções longitudinal e transversal, levou ao cálculo do diâmetro médio espacial dos grãos, indicado neste trabalho por d .

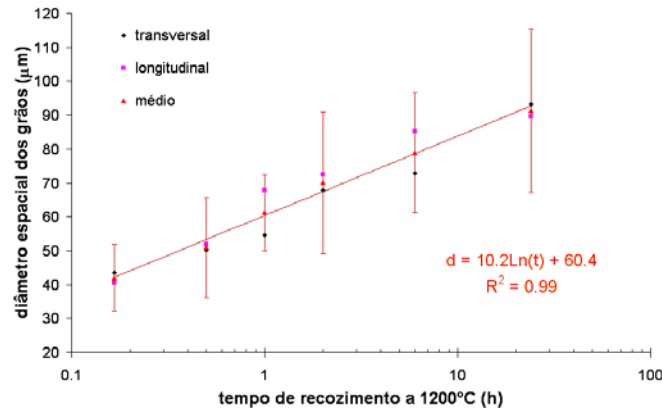


Figura 1. Diâmetro espacial dos grãos medido nas seções longitudinal e transversal das barras em estudo, e valor médio do diâmetro espacial dos grãos, em função do tempo de recozimento a 1200°C.

Corpos-de-prova foram submetidos a ensaios de tração, e os valores de resistência mecânica, ductilidade e os coeficientes de resistência e expoentes de encruamento em função dos diferentes diâmetros médios espaciais de grão (d) são mostrados nas Figuras 2 a 8. Nota-se que os valores de limite de escoamento e resistência (Figuras 2 e 3) aumentam com o inverso da raiz quadrada do diâmetro espacial dos grãos; nas Figuras 2 e 3 tem-se as equações de Hall-Petch para estas duas propriedades, e nota-se que a confiabilidade destas expressões é próxima de 90%.

O alongamento total em 25 mm é outra propriedade dependente do inverso da raiz quadrada do diâmetro espacial dos grãos (Figura 4), mas nota-se redução da ductilidade com o aumento do tamanho médio dos grãos; expressão que prevê esta propriedade em função do diâmetro médio espacial dos grãos apresenta 95% de confiabilidade.

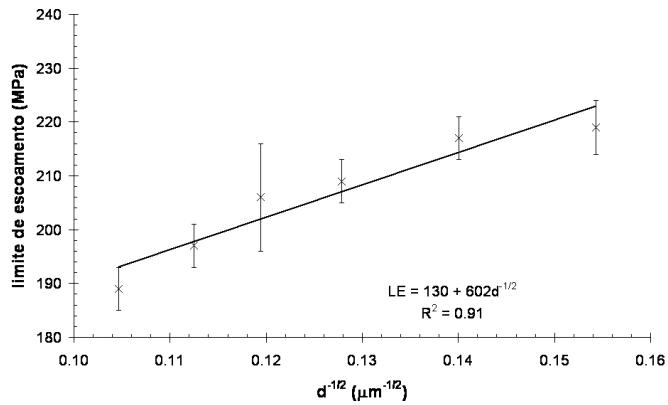


Figura 2. Limite de escoamento do aço UNS S30100 recozido em função do diâmetro médio dos grãos.

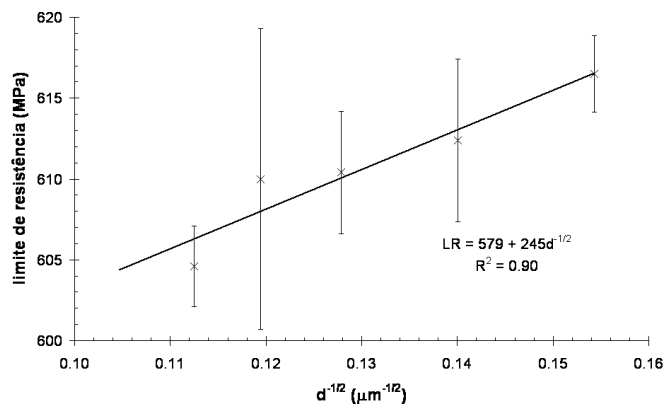


Figura 3. Limite de resistência do aço UNS S30100 recozido em função do diâmetro médio dos grãos.

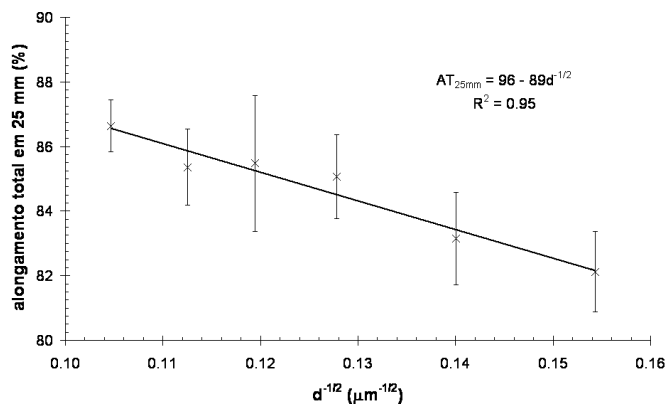


Figura 4. Alongamento total em 25 mm do aço UNS S30100 recozido em função do diâmetro médio dos grãos.

Nota-se no entanto que propriedades mecânicas relacionadas à fratura dos corpos-de-prova no ensaio de tração, como o limite real de fratura e a redução de área na estricção, não dependem do diâmetro médio dos grãos, como mostram as Figuras 5 e 6. Do mesmo modo, constata-se que o valor do expoente de encruamento (n) também independe do diâmetro de grão original do material (Figura 8). O coeficiente

de resistência (H), contudo, aumenta com o inverso da raiz quadrada do diâmetro espacial dos grãos (Figura 7), como os valores de limite de escoamento e resistência.

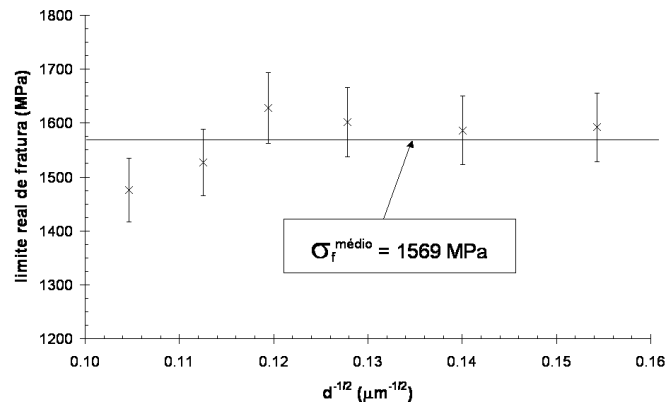


Figura 5. Limite real de fratura do aço UNS S30100 recozido em função do diâmetro médio dos grãos.

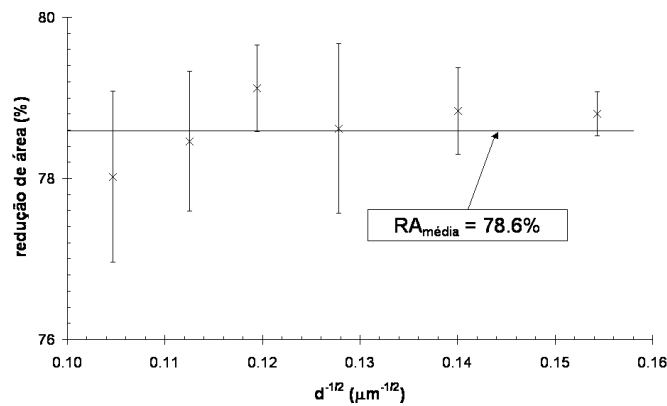


Figura 6. Redução de área na estrição de corpos-de-prova de tração do aço UNS S30100 recozido em função do diâmetro médio dos grãos.

Na Figura 9 a fração volumétrica de martensita α' , ferromagnética, formada nos corpos-de-prova após o ensaio de tração é mostrada em função de deformação real aplicada e do tamanho de grão da amostra anterior ao ensaio. Observa-se que não há relação direta da fração de martensita α' formada nem com o inverso da raiz quadrada do tamanho de grão original das amostras, nem com a deformação real na fratura imposta.

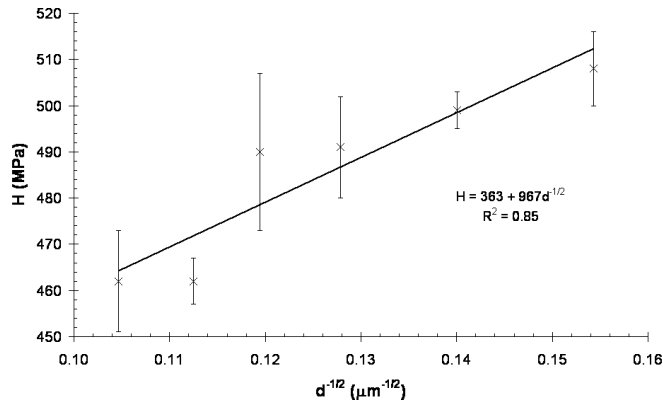


Figura 7. Coeficiente de resistência (H) do aço UNS S30100 recozido em função do diâmetro médio dos grãos.

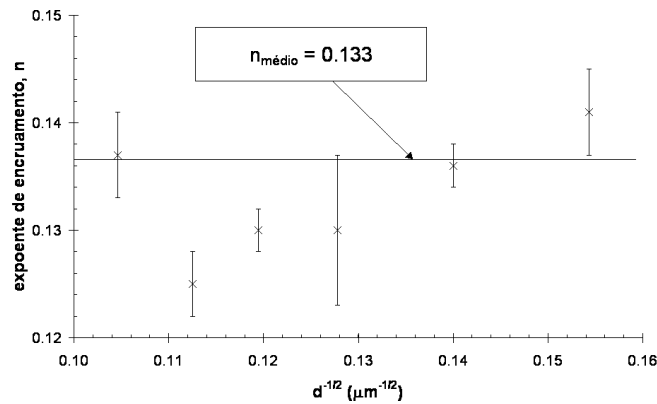


Figura 8. Expoente de encruamento (n) do aço UNS S30100 recozido em função do diâmetro médio dos grãos.

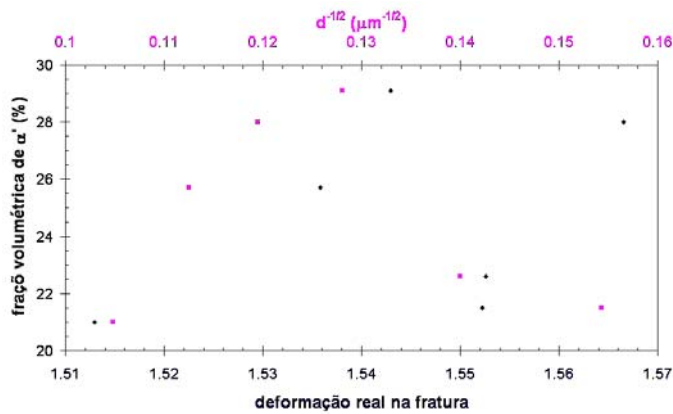


Figura 9. Fração volumétrica de martensita α' do aço UNS S30100 em função da deformação real na fratura e do inverso da raiz quadrada do diâmetro médio dos grãos anterior à deformação.

4 DISCUSSÃO

Das propriedades mecânicas estudadas, os limites de escoamento e resistência (Figuras 2 e 3), o alongamento total em 25mm (Figura 4) e o coeficiente de resistência (Figura 7), são dependentes do diâmetro médio espacial dos grãos do

aço UNS S30100, sendo que as relações de Hall-Petch obtidas para estas variáveis são mostradas nas Figuras 2, 3, 4 e 7, e tem confiabilidade superior a 85%, confirmando o efeito do aumento da superfície de contornos de grão em dificultar o movimento de discordâncias, e portanto dificultando a deformação plástica, obtendo-se o aumento de resistência e a diminuição de ductilidade com a diminuição do diâmetro médio espacial dos grãos.

Propriedades mecânicas associadas ao fenômeno de fratura, por outro lado, não são afetadas pelo tamanho de grão das amostras, como mostra a análise das Figuras 5 e 6, obtendo-se limite real de fratura médio de 1569 MPa e redução de área na fratura de 78,6%. Tal comportamento pode estar associado à intensa deformação plástica sofrida na região de fratura, indicando que a interação entre discordâncias, e o encruamento decorrente desta interação, é o fenômeno que governa estas propriedades. Confirmando esta hipótese, tem-se na Figura 10 que o limite real de fratura cresce linearmente com a deformação real na fratura, indicando a influência do encruamento nas propriedades mecânicas associadas à fratura.

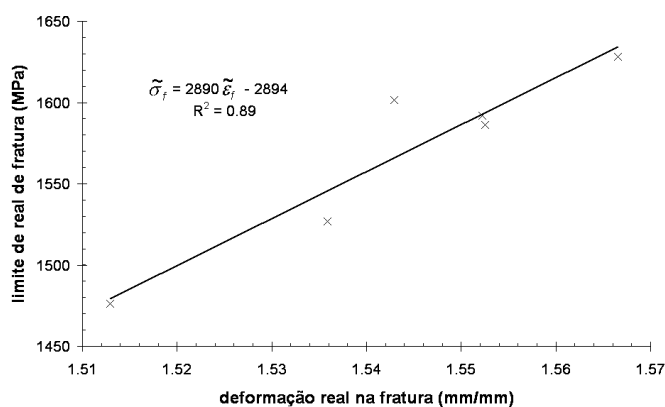


Figura 10. Limite real de fratura em função da deformação real na fratura para o aço UNS S30100.

Também independe do tamanho de grão original do aço UNS S30100 o expoente de encruamento, assumindo valor médio de 0,133 (Figuras 8). Isto pode ser explicado pela formação de martensita α' induzida por deformação, mostrada na Figura 9, que governaria os mecanismos de deformação plástica deste aço. Contudo, não há indícios da relação direta entre a fração de martensita α' formada e o tamanho de grão original das amostras, e do mesmo modo não se pode relacionar a fração de martensita α' com a deformação imposta. Assim, novos estudos sobre a formação de martensita α' podem ser justificados.

5 CONCLUSÕES

Do presente trabalho pode-se concluir que:

- Os limites de escoamento e resistência, o alongamento total em 25mm e o coeficiente de resistência da equação de Ramberg-Osgood são dependentes do diâmetro médio espacial dos grãos do aço UNS S30100, sendo que as relações de Hall-Petch obtidas para estas variáveis tem confiabilidade superior a 85%.

- Propriedades mecânicas associadas à fratura do aço UNS S30100 (limite real de fratura e deformação real na fratura) não dependem do tamanho de grão, e o limite real de fratura cresce linearmente com a deformação real na fratura. Tal comportamento pode estar associado à intensa deformação plástica sofrida na região de fratura, indicando que a interação entre discordâncias, e o encruamento decorrente desta interação, é o fenômeno que governa estas propriedades.
- Os expoente de encruamento da equação de Ramberg-Osgood independe do tamanho de grão original do aço UNS S30100, provavelmente devido a indução de martensita α' , fenômeno que governaria os mecanismos de deformação plástica deste aço.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASTM E 112-96, **Standard test methods for determining average grain size**. ASTM – American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA, 1997, Committee E-4, 1996, p. 1-23.
2. ASTM E 8M-04, **Standard test methods for tension testing of metallic materials [Metric]**. ASTM – American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA, 2004, Committee E-28, 2004, p. 1-24.
3. HANSEN, N. Polycrystalline strengthening. **Met. Trans. A**, Vol. 16A, 1985, p. 2167-2190.
4. **Heat treating** In: ASM Specialty Handbook – Stainless Steels, ASM, Metals Park, USA, 1994, p. 290-313.
5. HULL, D.; BACON, D. J. **Introduction to dislocations**. Butterworth-Heinemann:Oxford, 3. Ed., 1985, p. 247-249.
6. PINTO, T. B.; GOMES, O. A.; VILELA, J. M. G.; ANDRADE, M. S.; SERRANO, A. L.; MORAES, L. M. D. **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. São Paulo:ABM, 2003. p. 3137-3144.
7. REED-HILL, R. E.; ABBASCHIAN, R. **Physical metallurgy principles**. PWS:Boston, 3. Ed., 1991, p. 192-194.
8. SEDRIKS, A. J. **Corrosion of stainless steels**. Wiley-Interscience: New York, 1996, p. 13-24.
9. STEPHENS, R. L. **Metal Fatigue in Engineering**. 2.ed Wiley-Interscience: USA, 2001, p. 95-96.

MECHANICAL BEHAVIOR OF UNS S30100 STAINLESS STEEL AND ITS RELATION TO GRAIN SIZE ¹.

Rodrigo Magnabosco²
Drumond de Mélo³

Abstract

This work describes the grain size influence on the mechanical behavior of UNS S30100 austenitic stainless steel. To obtain different grain sizes, the material was annealed at 1200°C between 10 minutes and 24 hours. Grain size measurements were done following ASTM E112-96. Tension tests following ASTM E8M-04 allowed the determination of yield strength, tensile strength and true fracture strength, total elongation in 25mm, area reduction, true fracture strain and the Ramberg-Osgood parameters. It was found that yield and tensile strength, total elongation in 25 mm and the strength coefficient of Ramberg-Osgood relationship are grain-size dependent properties. However, mechanical properties associated to fracture (true fracture stress, area reduction and consequently true fracture strain) are grain-size independent. True fracture strength grows linearly to true fracture strain, indicating that the intense strain hardening in the fracture region is mandatory for those properties. The strain hardening exponent is also grain-size independent, probably influenced by strain-induced α' martensite formed.

Key-words: Austenitic stainless steel; UNS S30100; Grain size; Mechanical behavior.

¹ Paper presented at 60th Annual International Congress of ABM – São Paulo, July 25th to 28th, 2005.

² Assistant Professor, Mechanical Engineering Department – FEI, rodrmag@fei.edu.br.

³ Student, Mechanical Engineering Department – FEI, drumelo@terra.com.br