



PROCESSAMENTO TERMOMECÂNICO DE LAMINAÇÃO A MORNO PARA REFINO DE GRÃO EM UM AÇO 0,16%C¹

Luciana Montanari²

Cleiton Lazaro Fazolo de Assis³

Alessandro Roger Rodrigues⁴

Otávio Villar da Silva Neto⁵

Juno Gallego⁶

Resumo

O objetivo deste trabalho foi desenvolver uma rota de processamento por laminação a morno e tratamentos térmicos visando à obtenção de microestrutura ferrítica com grãos ultrafinos. O material utilizado foi um aço baixo carbono com 0,16%C. Corpos de prova foram austenizados a 900°C por 30 minutos e resfriados em água com agitação, na etapa seguinte foram laminados em 3 passes sucessivos, com retorno ao forno entre os passes, a temperatura de trabalho foi de 740°C e em cada passe a redução da espessura foi de 20%. Após o último passe de laminação, as amostras foram resfriadas ao ar. As análises das micrografias revelaram microestrutura ferrítica ultrafina em toda seção do material, com formação de cementita globulizada nos contornos dos grãos. Os grãos ferríticos foram reduzidos de 11 µm para 0,9 µm. Ensaios de tração convencional e de impacto verificaram as mudanças ocorridas nas propriedades mecânicas do material após o processamento termomecânico em comparação ao material “como recebido”. A resistência mecânica aumentou de 630 MPa para 663 MPa e a tenacidade foi elevada de 176 J para 285 J.

Palavras-chave: Processamento termomecânico; Laminação a morno; Grãos ultrafinos.

WORM ROLLING THERMOMECHANICAL PROCESSING TO GRAIN REFINE OF A 0,16C% STEEL

Abstract

Grain size refinement has been considered as one of the more efficient strengthening mechanisms for increase simultaneously mechanical properties and toughness in HSLA steels. In this work a thermomechanical processing route was carried out involving warm rolling and heat treating to obtaining ultra-fine ferrite grains in a low-carbon commercial steel (0.16wt%). Samples were austenitized at 900°C for 30 minutes, following fast cooling in water with agitation. Warm rolling was applied by three successive passes of 20% at 740°C, following air-cooling to room temperature. Microstructural characterization was performed by SEM, which was able to reveal ultra-fine grain size close to 0.9µm after quantitative analysis. Small cementite particles were observed in all samples and can probably show some pinning effect. The significant grain size refinement obtained after experimental route have been able to increase both tensile strength and Charpy impact energy from 630MPa to 663MPa and 176J to 285J respectively, if compared to as received condition.

Key-words: Low-carbon steel; Warm rolling; Heat treating; Ultra-fine grains.

¹ Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.

² Doutora em Engenharia Mecânica. Departamento de Engenharia Mecânica, USP – São Carlos.

³ Aluno de Doutorado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, USP – São Carlos.

⁴ Doutor em Engenharia Mecânica. Departamento de Engenharia Mecânica, UNESP – Ilha Solteira.

⁵ Doutor em Engenharia de Materiais. Instituto de Ciências e Tecnologia, UNIP – São José do Rio Preto.

⁶ Doutor em Engenharia de Materiais. Departamento de Engenharia Mecânica, UNESP – Ilha Solteira.



1 INTRODUÇÃO

Os aços com baixo teor de carbono ocupam hoje cerca de 70% da produção mundial de ligas ferrosas, objetivando aplicações industriais das mais variadas, desde imensos componentes estruturais até pequenas peças e dispositivos mecânicos. As necessidades tecnológicas do mercado vêm no sentido de se obter materiais com características especiais para vasta gama de aplicações. Para os aços destinados a fins estruturais, por exemplo, são requisitos mecânicos importantes a resistência à fadiga, ao desgaste, à corrosão atmosférica e resistência mecânica associada à boa tenacidade. Alguns aspectos inerentes aos processos de fabricação destes aços devem ainda ser considerados, tais como a conformabilidade e a soldabilidade.⁽¹⁾

Na década de 1950, dois autores estabeleceram, de forma independente e inovadora, uma correlação entre a resistência mecânica e a microestrutura, mais especificamente o tamanho de grão. Em 1951, na Universidade de Sheffield, Reino Unido, Hall escreveu três artigos que apareceram no volume 64 do *Proceedings of the Physical Society*.⁽²⁻⁴⁾ Em seu terceiro artigo, Hall demonstrou que o comprimento das bandas de deslizamento corresponde à ordem de tamanho de grão e, dessa forma, estabeleceu relação entre estas variáveis, concentrando seu estudo em aços com baixo teor de carbono.

Baseado em seu trabalho experimental realizado em 1946-1949, Petch, da Universidade de Leeds, Inglaterra, publicou um artigo em 1953,⁽⁵⁾ independente de Hall. O trabalho de Petch visou o estudo da fratura frágil. Ao medir a variação da tensão de clivagem com relação ao tamanho de grão ferrítico em temperaturas muito baixas, Petch encontrou uma relação exata para o fenômeno que Hall descrevera anteriormente. Assim, com base nesses estudos sobre o efeito do tamanho de grão na resistência mecânica de aços baixo-carbono, foi proposta a relação de Hall-Petch que descreve a relação entre limite de escoamento e tamanho de grão.⁽⁶⁾

O desenvolvimento de aços de alta resistência mecânica com grãos ultrafinos tem sido objeto de pesquisa, principalmente em países asiáticos. O refino de grão é um método eficiente para o aumento da resistência mecânica, tenacidade, resistência à fratura e resistência à fadiga.⁽⁷⁾ Um dos pontos-chave no desenvolvimento desses aços é o refinamento da ferrita, geralmente conseguido pela interação entre processamentos termomecânicos e tratamentos térmicos.⁽⁸⁾

Aços com grãos ultrafinos, com composições relativamente simples, têm grande potencial para o aumento da resistência mecânica convencional de aços baixa-liga. Os benefícios atraentes desta abordagem são: evitar adições de elementos de liga, facilitando assim a reciclagem; evitar tratamentos térmicos adicionais como a têmpera, reduzindo assim o custo do produto, bem como tornar o processo ambientalmente sustentável; melhorar a soldabilidade com a adição de menor teor de carbono e de elementos de liga; e a obtenção de superplasticidade à altas taxas de deformação em temperaturas moderadas.⁽⁹⁾

O objetivo deste trabalho é apresentar uma rota de processamento envolvendo laminação a morno e os tratamentos térmicos necessários para a obtenção de uma microestrutura ferrítica com grãos ultrafinos em um aço 0,16%C, visando o aumento simultâneo da resistência mecânica e tenacidade do material.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O material utilizado nos ensaios termomecânicos é um aço baixo-carbono, fornecido em forma de chapa de espessura 25 mm, com resistência mecânica de 630 MPa, limite de escoamento de 530 MPa, alongamento de 26% e energia Charpy de 176 J a 0°C. A composição química do material pode ser visualizada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química do material (% em peso)

| C | Mn | P | S | Si | Al | Cu | Cr | Ni | Nb | V | Ti | Ceq |
|------|------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 0,16 | 1,49 | 0,027 | 0,009 | 0,27 | 0,046 | 0,005 | 0,276 | 0,008 | 0,048 | 0,044 | 0,016 | 0,40 |

Corpos de prova com dimensões 25x25x100 mm, extraídos da chapa grossa por usinagem, foram austenizados a 900°C em forno de resistência elétrica por 30 minutos com posterior resfriamento em água. Após o processo de têmpera, as peças foram reaquecidas a 740 °C e laminadas em três passes com retorno ao forno entre os passes para manutenção da temperatura de laminação a morno e, ao final, as peças foram resfriadas ao ar. A Figura 1 ilustra esquematicamente a rota de processamento utilizada.

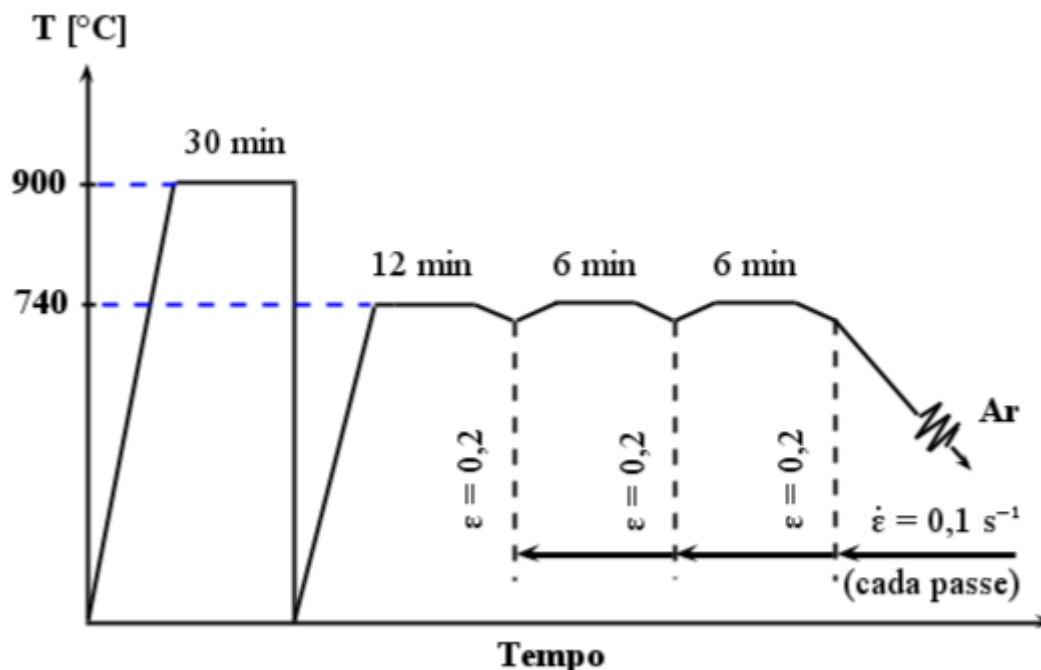


Figura 1. Diagrama esquemático do processo de refino de grão.

Após o condicionamento microestrutural e o processo de laminação, as amostras foram cortadas na seção longitudinal de laminação para preparação metalográfica e análise da microestrutura. As amostras foram lixadas sequencialmente com granulometria 120, 220, 320, 400, 600 e 1.000, polidas com alumina 1 μm e pasta de diamante $\frac{1}{4}$ μm , e atacadas com solução de Nital 2% em sucessivos ataques. As imagens foram obtidas com auxílio de um microscópio eletrônico de varredura da marca Philips, modelo XL30-TMP, usando-se contraste de elétrons secundários para a visualização dos contornos de grão ferríticos. Para as medidas de tamanho médio de grão ferrítico, foi utilizada a técnica do intercepto linear (Heyn), descrita na norma ASTM E112-96,⁽¹⁰⁾ em três orientações distintas de cinco micrografias aleatórias.

Corpos de prova foram usinados nas condições “como recebido” e processados termomecanicamente, com o propósito de comparar o efeito do refino de grão ferrítico sobre o limite de resistência à tração e da energia absorvida dos materiais. Os ensaios de tração foram realizados segundo a norma ASTM E8M-01⁽¹¹⁾ e foi utilizada uma máquina de ensaios da marca EMIC, modelo DL 10000. Os ensaios de impacto foram conduzidos, segundo a norma ASTM E23,⁽¹²⁾ numa máquina de ensaio Charpy instrumentado da marca Heckert, com capacidade padrão de 300 J.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 mostra a microestrutura da amostra “como recebido” obtida por microscopia eletrônica de varredura. Na imagem observa-se que a microestrutura apresenta matriz predominantemente composta por grãos ferríticos e esparsas colônias de perlita. O ataque metalográfico revelou contornos de grão bem definidos, mesmo na interface ferrita-ferrita, tornando possível a determinação quantitativa do tamanho de grão médio. Em geral, a morfologia dos grãos de ferrita e das colônias de perlita pode ser classificada como poligonal ou equiaxial, com ocorrência de microconstituintes alongados, especialmente as colônias de perlita, em faixas estreitas (direcionadas horizontalmente na micrografia), efeito causado pela laminação da matéria-prima, o que também explica o bandeamento da microestrutura, gerando este padrão de distribuição entre a ferrita e a perlita.



Figura 2. Microestrutura do material “como recebido” (Nital 2%).

Na Figura 3 é apresentada a matriz microestrutural do material processado termomecanicamente para refino de grão, também obtida por microscopia eletrônica de varredura. Observam-se contornos de grão bem delineados e morfologia equiaxial dos constituintes. A microestrutura mostra aparente alinhamento causado pela laminação, onde há fraco contraste da subestrutura. Estudo anterior realizado por EBSD (*electron backscatter diffraction*) em aço processado de maneira similar mostrou que esta subestrutura apresenta significativo desajuste cristalográfico, podendo na maioria deles ser classificados como grãos ferríticos.⁽¹³⁾ Houve a

nucleação de cementita globulizada nos contornos de grão, formada pela transformação da perlita em decorrência da temperatura de trabalho ser menor que a temperatura eutetóide, associada aos níveis de deformação. Essa transformação na morfologia ocorreu devido à difusão de carbono, sem que tenha havido mudança significativa na fração volumétrica de cementita. A força motriz para essa transformação foi a redução da energia de superfície, causada pela globulização da cementita na área dos contornos de grão da ferrita.⁽¹⁴⁾

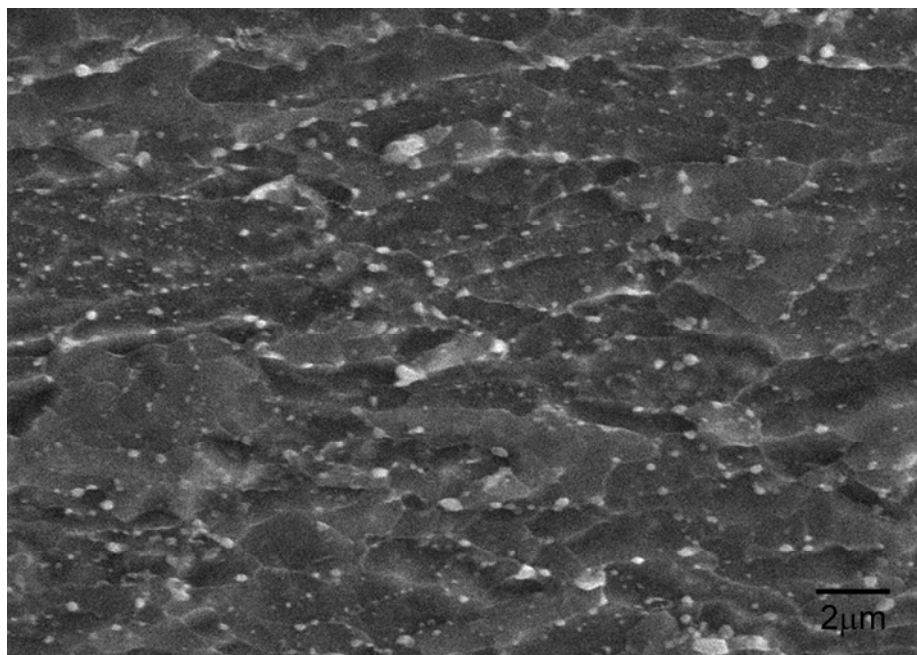


Figura 3. Microestrutura do material processado termomecanicamente (Nital 2%).

Com relação ao tamanho médio dos grãos ferríticos, a Tabela 2 mostra os resultados comparativos do material antes e após o processo de refino de grão empregado.

Tabela 2. Metalografia quantitativa das amostras

| Condição da Amostra | Tamanho de Grão [μm] |
|----------------------------|---|
| Como Recebido | $10,8 \pm 3,8$ |
| Grãos Ultrafinos | $0,9 \pm 0,5$ |

Pode-se constatar que o tamanho de grão médio da amostra com grãos ultrafinos é cerca de 12x menor que o do material na condição “como recebido”. O processo de laminação a morno, associado a ciclos de tratamentos térmicos, permitiu alcançar níveis de tamanho de grão em torno de 1 μm , conforme observa-se também no gráfico de frequência de tamanho de grão ferrítico da Figura 4. A microestrutura ultrafina foi obtida em toda seção transversal das amostras laminadas, as quais, ao final do processo, apresentavam cerca de meia polegada de espessura, indicando que o processamento termomecânico do material na condição “como recebido” gerou grãos ultrafinos em espessuras maiores que as apresentadas pela literatura, como bobinas a quente e tubos de paredes finas, também envolvendo processos de laminação.

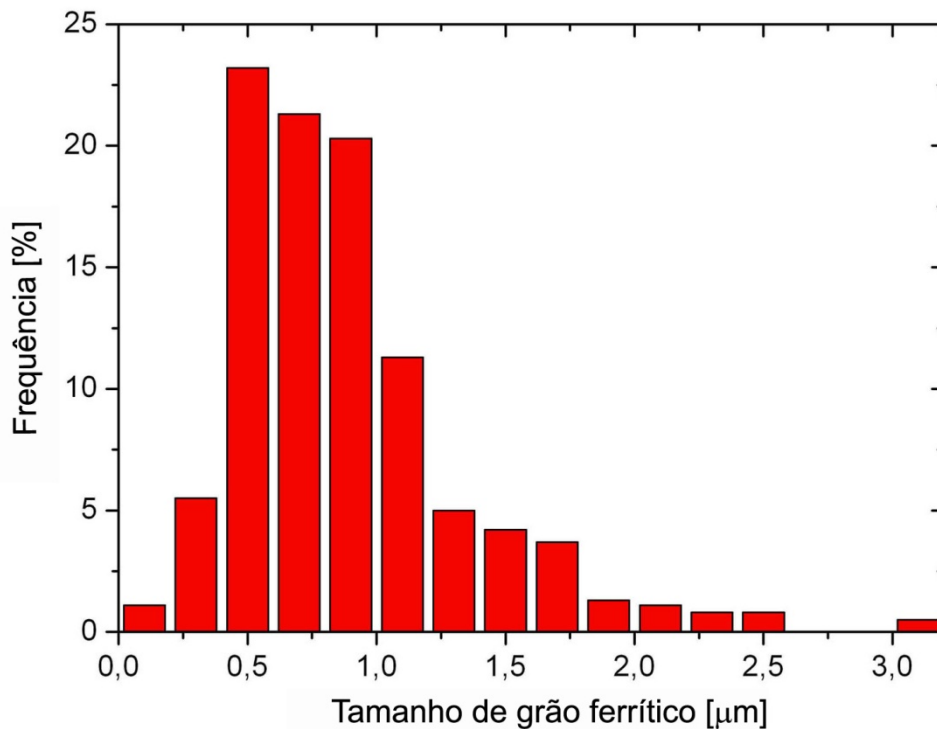


Figura 4. Distribuição das frequências de tamanho de grão ferrítico.

Com relação ao limite de resistência à tração, verifica-se, através do gráfico da Figura 5, elevação da resistência mecânica do material em comparação aos dados fornecidos pelo fabricante. Nesse contexto, a resistência à tração do material foi elevada de 630 MPa para $663,40 \pm 18,35$ MPa, ou aproximadamente 5%. A aparente discrepância entre o refino de grão ferrítico e o ganho de resistência à tração obtidos pelo processamento experimental foi atribuída à dispersão de cementita, cujo tamanho foi considerado qualitativamente grosseiro e que deve ser reduzido na continuidade desta pesquisa.

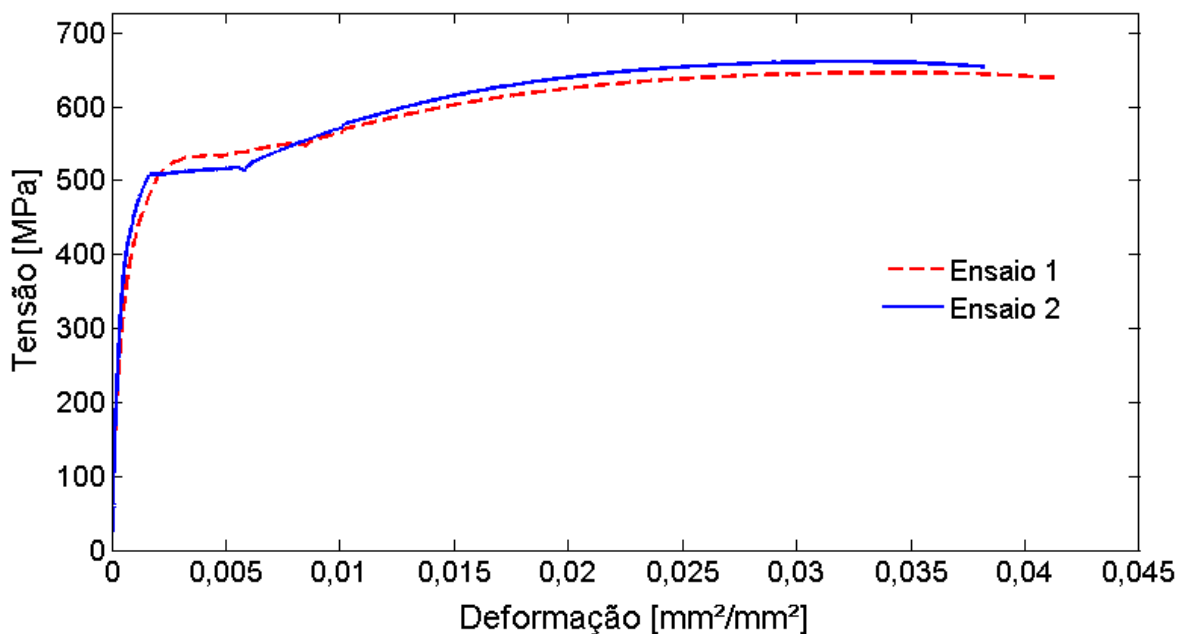


Figura 5. Gráfico tensão-deformação do material submetido ao refino de grão.

A Tabela 3 fornece os dados referentes aos ensaios de impacto, cujo propósito foi avaliar a energia absorvida do material “como recebido” e após processo para refino de grão. Conforme analisado, a energia absorvida no ensaio de impacto Charpy elevou-se aproximadamente 62%, colaborando para o aumento da tenacidade do material.

Tabela 3. Resultados referentes aos ensaios de impacto

| Condição da Amostra | Energia Absorvida [J] |
|----------------------------|------------------------------|
| Como Recebido | 176 ± 4,5 |
| Grãos Ultrafinos | 285 ± 5,0 |

Tanto os resultados de resistência à tração quanto os de impacto comprovam a elevação simultânea da resistência e tenacidade do material por meio do refinamento dos grãos da microestrutura. Provavelmente, estes resultados também sofreram influência da cementita globulizada formada nos contornos de grão após o processamento termomecânico do material. Existe menor área de interface por unidade de volume na cementita globulizada e, conseqüentemente, a deformação plástica não é tão restrita, o que dá origem a um material relativamente dúctil e pouco resistente.⁽⁷⁾ Neste caso, houve a associação dos efeitos gerados pela cementita globulizada e do refino de grão, culminando na menor elevação da resistência e maior aumento da tenacidade numa comparação relativa entre estes dois parâmetros.

4 CONCLUSÕES

As propriedades mecânicas de um material, como resistência à tração e tenacidade, podem ser aprimoradas com intervenções na microestrutura. Nesse sentido o refino de grão ferrítico pode conjugar o aumento simultâneo destas duas propriedades. A análise microestrutural revelou redução média do tamanho dos grãos de 10,8 para 0,9 µm ao longo de toda seção do material, afetando diretamente o comportamento mecânico do material ao apresentar elevação na resistência mecânica de 630 MPa para 663 MPa e aumento da energia absorvida no ensaio de impacto de 176 J para 285 J. Após o processamento termomecânico houve formação de cementita globulizada nos contornos de grãos, gerando também influência sobre os resultados finais, diminuindo o efeito de aumento da resistência à tração em virtude da redução do tamanho dos grãos e aumentando a tenacidade.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, ao Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de São Carlos e ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira por ceder os equipamentos para realização dos ensaios termomecânicos e mecânicos dos corpos de prova, e a FAPESP e ao CNPq pelo fomento e concessão das bolsas de estudo.

REFERÊNCIAS

- 1 Abdalla, A. J. et al. Formação da fase bainítica em aços de baixo carbono. Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo, v. 25, n. 3, p.175-181, out. 2006.



- 2 Sylwestrowicz, W., Hall, E. O. The deformation and ageing of mild steel. Proceedings of Physical Society of London Section B, v. 64, n. 6, p. 495-502, June 1951.
- 3 Hall, E. O. The deformation and ageing of mild steel: II Characteristics of the Lüders deformation. Proceedings of the Physical Society of London Section B, v. 64, n. 9, p. 742-747, Sep. 1951.
- 4 Hall, E. O. The deformation and ageing of mild steel: III Discussion of results. Proceedings of the Physical Society of London Section B, v. 64, n. 9, p. 747-753, Sep. 1951.
- 5 Petch, N. J. The cleavage strength of polycrystals. Journal of the Iron and Steel Institute, v. 174, p. 25-28, 1953.
- 6 Weng, Y. Ultra-fine grained steels. Beijing: Metallurgical Industry Press; New York: Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- 7 Li, Q., Cui, X., Chen, H. Effect of deformation-induced transformation process on ferrite grain size and volume fraction in steel 12CR1MOV. International Journal of Modern Physics B, v. 23, n. 5-6, p.1197-1202, Sep. 2009.
- 8 Beladi, H. et al. The evolution of ultrafine ferrite formation through dynamic strain-induced transformation. Materials Science and Engineering A, v. 371, n. 1-2, p.343-352, Apr. 2004.
- 9 Narayana Murty, S. V. S. e Torizuka, S. Microstructure-mechanical properties correlation in ultrafine grained steels processed by large strain warm deformation. ISIJ International, v. 48, n. 8, p. 1088-1095, May 2008.
- 10 American Society for Testing and Materials. ASTM E112-96: Standard test methods for determining average grain size. West Conshohocken, 2004. 26 p.
- 11 American Society for Testing and Materials. ASTM E8M-01: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. West Conshohocken, 2001. 22 p.
- 12 American Society for Testing and Materials. ASTM E23: Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. West Conshohocken, 2002. 27 p.
- 13 Silva Neto, O. V. Obtenção de grãos ferríticos ultrafinos em aços baixo-carbono através do processamento subcrítico. 2006. 112f. Tese (Doutorado) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.
- 14 Callister, W. D. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. Rio de Janeiro: LTC, 2008.