

ESTUDO DO ENVELHECIMENTO DINÂMICO EM UM AÇO Nb-Mn-Cr-Mo

Cynthia Serra Batista Castro ¹
Berenice Mendonça Gonzalez ²
Ronaldo Barbosa ³

Resumo

Neste projeto foi estudada a susceptibilidade ao envelhecimento dinâmico do aço resistente ao fogo e do mecanismo responsável pelo processo. Esta susceptibilidade foi determinada pela variação das propriedades mecânicas em tração com a temperatura e a taxa de deformação. Os testes foram feitos para temperaturas (T) variando entre 25°C e 600°C e para as seguintes taxas de deformação ($\dot{\epsilon}$): 10^{-1} , 10^{-2} e 10^{-3}s^{-1} . As energias de ativação aparentes associadas ao início do serrilhado nas curvas tensão-deformação e ao máximo na variação do limite de resistência, com a temperatura foram calculadas pela relação entre os valores de $\dot{\epsilon}$ e de T para os quais esses efeitos foram observados. O aço estudado apresentou manifestações típicas relacionadas ao DSA (Dynamic Strain Aging), como a presença de platô e de máximos na variação do limite de escoamento, σ_e , e do limite de resistência, σ_r , com T, e a presença de mínimos na variação do alongamento com T, bem como efeito PLC (Portevin-LeChatelier) para certas combinações de $\dot{\epsilon}$ e T. Os resultados indicam que o envelhecimento dinâmico do aço considerado, provavelmente associado à interação dinâmica entre deslocamentos e dipolos C-elemento de liga, é um importante fator na manutenção da resistência mecânica a alta temperatura.

Palavras-chave: Envelhecimento dinâmico; Aço resistente ao fogo; Aço estrutural.

DYNAMIC STRAIN AGING STUDY IN A Nb-Mn-Cr-Mo STEEL

Abstract

The dynamic strain aging susceptibility of the fire resistant steel was studied and the mechanism responsible for this strengthening process were determined by mean of tensile tests performed at different temperatures and strain rates. The tests were done in temperatures between 25°C and 600°C and strain rates of 10^{-1} , 10^{-2} e 10^{-3}s^{-1} . The values of the activation energies related to the appearance of the Portevin-LeChatelier effect and to maxima on the tensile strength versus temperature curves were determined by the relation between strain rate and the temperature. Typical features of DSA was observed, such as the presence of plateau, maximum in yield strength, ultimate tensile strength and a minimum elongation versus temperature curves. It was also observed the serrated flow in the stress-strain curves (the Portevin-LeChatelier – PLC effect), for some conditions of strain rates and temperatures. The results indicate also that dynamic strain aging of the fire steel is probably associated to the dynamic interaction between dislocations and interstitials-substitutional dipole. This strengthening mechanism is an important contribution to the fire steel mechanical properties in high temperature.

Key words: Dynamic strain aging; Fire resistant steel; Structural steel.

I INTRODUÇÃO

Em aços estruturais microligados, o envelhecimento dinâmico (*dynamic strain aging*, DSA) já foi apontado, desde o início dos anos 70, como um mecanismo efetivo de resistência à deformação em altas temperaturas, e, portanto, de resistência à fluência. A manutenção da resistência mecânica em temperaturas elevadas,

associada ao envelhecimento dinâmico, deve-se ao efeito conhecido como *ISSH* (*interaction solid-solution hardening*) relacionado à interação dinâmica entre *clusters* de substitucionais-intersticiais e deslocamentos. Em aços estruturais microligados ao Nb, a presença dos efeitos de DSA em temperaturas mais elevadas, entre 250°C e 600°C, do

¹Doutora. Pesquisadora em Ciência e Tecnologia – Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. Av. José Cândido da Silveira, 2000, 31170-000, Belo Horizonte, MG, Brasil. cynthia.serra@cetec.br.

²Doutora. Professora - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – UFMG. Rua Espírito Santo, 35, 30160-030, Belo Horizonte, MG, Brasil. gonzalez@demet.ufmg.br.

³Doutor. Professor - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – UFMG. Rua Espírito Santo, 35, 30160-030, Belo Horizonte, MG, Brasil. rbarbosa@demet.ufmg.br.

que aquelas observadas para os aços carbono, de 150°C a 400°C, foi atribuída a *clusters* de Mn-C e Mn-N^(1,2) e em aços microligados com vanádio, a *clusters* de V-C.⁽³⁾ Klueh⁽⁴⁾ relata que os efeitos de envelhecimento são decorrentes de interações entre átomos substitucionais e/ou intersticiais com as deslocações. No caso dos átomos intersticiais possuírem uma maior interação com os átomos substitucionais do que com as deslocações, haverá um forte efeito de endurecimento por solução sólida da ferrita pelos intersticiais, que poderá se prolongar até elevadas temperaturas. Na situação contrária, se a interação entre os átomos intersticiais com as deslocações for alta, ocorrerá também a manutenção das propriedades mecânicas a altas temperaturas devido aos efeitos do envelhecimento dinâmico, em consequência da redução da mobilidade das deslocações pelas atmosferas de Cottrell. De acordo com Leslie,⁽¹⁾ os dipolos provocam efeito de endurecimento por solução sólida, mas também interagem com as deslocações acarretando os efeitos de envelhecimento dinâmico. No que se refere aos aços resistentes ao fogo, o endurecimento por solução sólida e a presença de precipitados estáveis e finamente dispersos têm sido uma importante contribuição para a manutenção da resistência mecânica em temperaturas elevadas.^(5,6) Sendo assim, o objetivo desse trabalho é a caracterização do envelhecimento dinâmico em um aço resistente ao fogo a base de Nb-Mn-Cr-Mo de forma a identificar a contribuição deste processo como mecanismo de aumento de resistência em altas temperaturas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Estudou-se um aço de procedência comercial, recebido na forma de uma placa laminada com 12,7 mm de espessura, cuja composição química é: 0,092% C; 0,80% Mn; 1,21% Si; 0,038% P; 0,0045% S; 0,092% Cu; 0,10% Cr; 0,30% Mo; 0,020% Nb; 0,018% Al; 0,0052% N.

Corpos-de-prova de tração foram retirados da placa como recebida e usinados na direção de laminação, com dimensões especificadas, conforme a norma ASTM A370-97a para corpos-de-prova cilíndricos, *sub-size*.

Os ensaios de tração e a determinação das condições de aparecimento e desaparecimento do serrilhado das curvas foram realizados em uma máquina de ensaios mecânicos MTS, servo-hidráulica, em temperaturas variando de 25 a 600°C, para taxas de deformação de 10⁻¹, 10⁻² e 10⁻³s⁻¹. O tempo de aquecimento foi no máximo de 10 minutos e o sistema de controle da temperatura possibilitou que esta não variasse mais que 1°C. Considerando que a precisão na medida deste parâmetro é de 1°C, a incerteza no valor da temperatura foi de ±2°C. As propriedades mecânicas deste aço foram avaliadas em termos de limite de escoamento, σ_e , limite de resistência, σ_R , alongamento total, A_t , considerando uma média de três ensaios realizados nas mesmas condições. Os erros relativos nos valores das tensões e no alongamento foram inferiores a 3%. A determinação da susceptibilidade ao envelhecimento dinâmico e dos mecanismos envolvidos foi feita a partir das mudanças destas propriedades com a temperatura de envelhecimento.

3 RESULTADOS

As curvas tensão-deformação apresentam mudanças em seus aspectos com o aumento da temperatura em todas as taxas de deformação estudadas, como já observado em trabalhos anteriores.⁽⁷⁻⁹⁾

Essas curvas obtidas para o aço estudado em temperaturas variando entre 25°C e 600°C são mostradas na Figura 1 para uma taxa de deformação de 10⁻³s⁻¹.

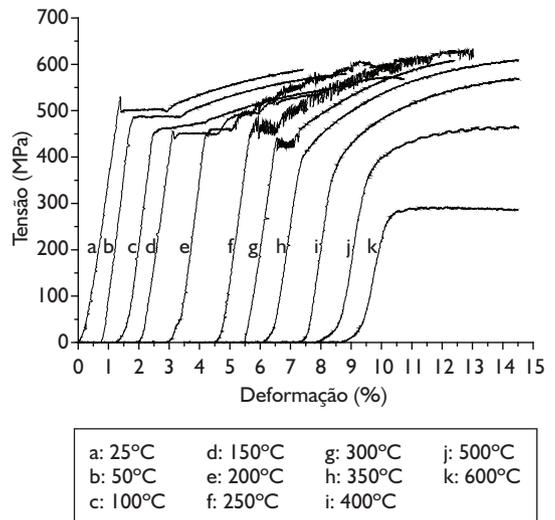


Figura 1. Curva tensão-deformação para várias temperaturas a uma taxa de deformação de 10⁻³s⁻¹.

Pode-se observar a presença de serrilhados em algumas curvas, dependendo da temperatura, caracterizando o escoamento plástico descontínuo (efeito Portevin-LeChatelier, PLC). Este serrilhado ocorre para temperaturas superiores a 150°C. Na verdade, o fluxo plástico descontínuo aparece aproximadamente entre 107°C e 110°C sendo que com o aumento da temperatura, a sua amplitude e frequência aumentam até uma temperatura de 250°C. Em temperaturas mais elevadas, o serrilhado começa a desaparecer gradativamente até desaparecer por completo por volta de 350°C. O mesmo efeito ocorre para as outras taxas de deformação estudadas; porém, como pode ser visto na Figura 2, aumentando a taxa de deformação, as temperaturas de aparecimento e desaparecimento do serrilhado deslocam-se para temperaturas mais elevadas e a sua frequência e amplitude diminui, característica típica do efeito PLC em aços baixo carbono.^(7,8)

A Figura 3 mostra a variação do limite de resistência, σ_R e do limite de escoamento, σ_e , com a temperatura para as três taxas de deformação consideradas. Esta figura mostra máximos

em σ_R com a temperatura cuja posição é deslocada para valores mais altos de temperatura à medida que se aumenta $\dot{\epsilon}$. A intensidade desses máximos diminui com o aumento de $\dot{\epsilon}$, o que confirma os resultados obtidos por Roesh⁽¹⁰⁾ e Tsuzaki et al.⁽¹¹⁾. As curvas de σ_e apresentam um platô no intervalo de temperatura no qual se observa um máximo em σ_R . A temperatura de início do platô aumenta com o aumento da taxa de deformação.

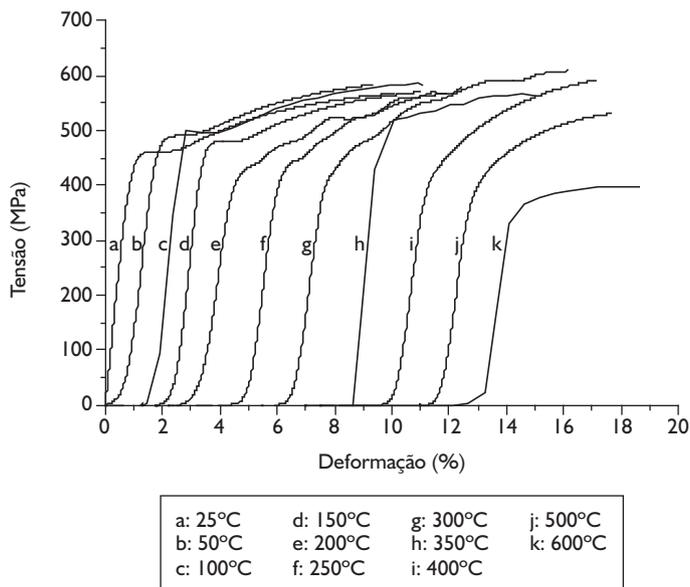


Figura 2. Curva tensão-deformação para várias temperaturas a uma taxa de deformação de $10^{-1} s^{-1}$.

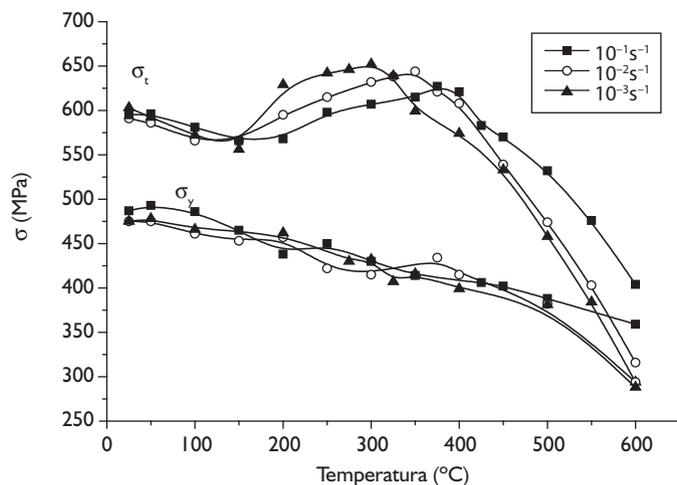


Figura 3. Variação do limite de resistência e do limite de escoamento com a temperatura para o aço resistente ao fogo para as três taxas de deformação consideradas.

A variação do alongamento total, A_t , com a temperatura para as três taxas de deformação estudadas é mostrada na Figura 4. Pode-se observar que A_t diminui com a temperatura passando por um mínimo cuja temperatura aumenta com o aumento da taxa de deformação.

A presença do efeito Portevin-LeChatelier nas curvas $\sigma \times \epsilon$, dos máximos nas curvas de variação das tensões com a temperatura, dos mínimos nas curvas de variação do alongamento total, bem como a variação da intensidade e posição desses máximos na escala de temperaturas com a taxa de deformação, são aspectos clássicos do envelhecimento dinâmico observados nos aços de baixo teor de carbono (BTC),⁽¹²⁾ o que indica que nos aços resistentes ao fogo o envelhecimento dinâmico tem características semelhantes.

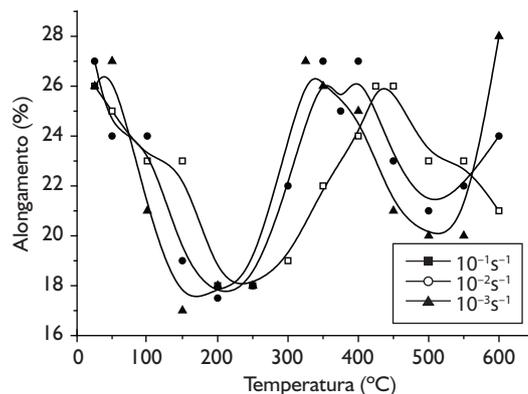


Figura 4. Variação do alongamento com a temperatura para o aço resistente ao fogo para as três taxas de deformação consideradas.

De acordo com a literatura,^(7,8) a energia de ativação associada ao efeito Portevin-LeChatelier pode ser obtida a partir da variação da temperatura em que aparece o serrilhado na curva tensão-deformação, T , com a taxa de deformação $\dot{\epsilon}$, pela equação:

$$\dot{\epsilon} = \frac{B \rho_m b l}{T} \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (1)$$

onde o termo $B \rho_m b l$ pode ser considerado constante, Q é a energia de ativação associada ao aparecimento do efeito Portevin-LeChatelier e R é a constante universal dos gases.

A inclinação da reta que representa a variação de $\ln(\dot{\epsilon} \times T)$ com $1/T$, Figura 5, é igual a $-Q/R$. O valor de Q obtido é igual a 176 kJ/mol. Este valor é significativamente superior aos valores das energias de ativação para difusão do nitrogênio e carbono na ferrita, 77,9 kJ/mol e 84,2 kJ/mol, respectivamente, o que sugere que no aço resistente ao fogo o efeito Portevin-LeChatelier não é controlado pelo ancoramento das deslocções por átomos de carbono ou nitrogênio em solução

sólida na ferrita. Este valor mais alto obtido para a energia de ativação, sugere que o efeito Portevin-LeChatelier, decorre da interação dinâmica entre *clusters* de substitucionais-intersticiais, Mn-C e Mn-N e deslocamentos.⁽²⁾

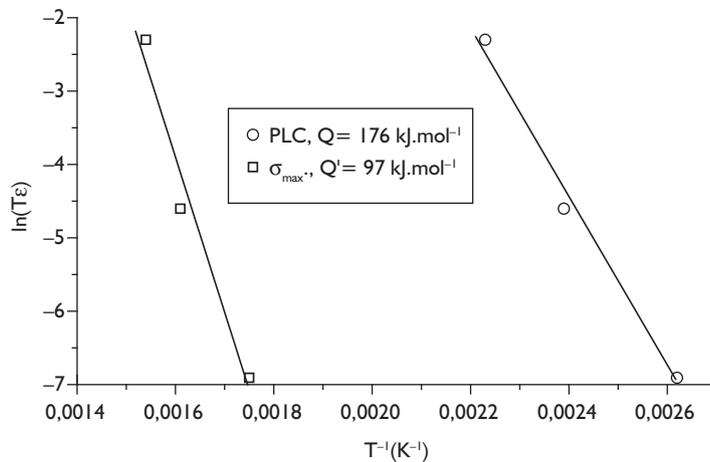


Figura 5. Temperaturas e taxas de deformação para as quais o efeito Portevin-LeChatelier e os máximos na tensão de fluxo plástico são observados.

A energia de ativação relacionada ao máximo na variação da tensão de fluxo plástico com a temperatura pode ser obtida a partir da variação da temperatura em que se observa o máximo na tensão, T , com a taxa de deformação, $\dot{\epsilon}$, por uma equação semelhante à equação 1:

$$\dot{\epsilon} \cdot T = K' \exp\left(\frac{-Q'}{RT}\right) \quad (2)$$

onde K' é uma constante, Q' é a energia de ativação associada ao máximo na tensão de fluxo plástico e R tem o significado anteriormente mencionado.

A variação do $\ln(\dot{\epsilon} \cdot T)$ com $1/T$ para as condições de $\dot{\epsilon}$ e T relativas ao máximo em σ_R também é mostrada na Figura 5 e a energia de ativação determinada a partir da inclinação da reta é igual a 97 kJ/mol. Este valor mais alto, como mencionado anteriormente, está relacionado à formação de *clusters* de MnC e Mn-N.

Nos aços de baixo teor de carbono, a energia de ativação associada ao máximo nas tensões é igual a soma da energia de ativação para o aparecimento do efeito Portevin-LeChatelier e da energia de ligação intersticial-deslocamento. Neste trabalho, a dife-

rença entre a energia de ativação para o efeito Portevin-LeChatelier, 176 kJ/mol, e a energia de ativação relacionada ao máximo em σ_R , 97 kJ/mol, é igual a 79 kJ/mol, ou seja, 0,82 eV, um valor próximo ao da energia da energia de interação carbono-deslocamento, 0,75 eV,⁽²⁾ indicando que o envelhecimento dinâmico neste aço está relacionado ao ancoramento de deslocamentos por atmosferas de átomos de C que tem sua mobilidade reduzida devido à interação intersticial-substitucional.

4 CONCLUSÕES

- As manifestações associadas ao envelhecimento dinâmico no aço resistente ao fogo estudado são, de maneira geral, semelhantes às aquelas observadas no aço de baixo teor de carbono; porém, estas manifestações ocorrem em temperaturas superiores às aquelas observadas nos aços carbono.
- Os valores de energia de ativação para o início do efeito Portevin-LeChatelier e para o máximo nas curvas tensão de fluxo *versus* temperatura, 176 kJ/mol e 97 kJ/mol, respectivamente, sugerem que o envelhecimento dinâmico no aço resistente ao fogo está associado à interação dinâmica entre deslocamentos e dipolos C-elemento de liga, o que indica que o envelhecimento dinâmico é um importante fator na manutenção da resistência mecânica a alta temperatura.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPEMIG e ao CNPq pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- 1 LESLIE, W. C. **The physical metallurgy of steels**. Tokyo: McGraw-Hill, 1982.
- 2 GUNDUZ, S. Dynamic strain aging effects in niobium microalloyed steel. **Ironmaking and Steelmaking**, v. 29, n. 5, p. 341-56, 2002.
- 3 GUNDUZ, S. COCHRANE, R.C. Effect of dynamic strain aging on mechanical properties of vanadium microalloyed steel. **Materials Science and Technology**, v. 19, n. 4, p.422-8, Apr. 2003.
- 4 KLUEH, R.L. Interaction solid-solution hardening in 2,25C-1Mo steel. **Materials Science and Engineering**, v. 35, n. 35, p. 239-53, Jan. 1978.

- 5 SHA, W.; KELLY, F.S.; BROWNE, P.; BLACKMORE, S.P.O.; Microstructure and properties of Nippon fire resistant steels. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 8, n. 5, p. 606-612, Oct. 2002.
- 6 SHA, W.; KELLY, F.S. Atom probe field ion microscopy study of commercial and experimental structural steels with fire resistant microstructures. **Materials Science and Technology**, v. 20, n. 4, p. 449-57, Apr. 2004.
- 7 KEH, A.S; NAKADAH, Y; LESLIE, W.C. Dislocation dynamics, In: ROSENFELD, A.R.; HAHN, G.T.; BEMENT JR., A.L.; JAFFEE, R.I. (editors). **Dislocation Dynamics**. Nova York: McGraw Hill, 1968. p. 81-7.
- 8 KARIMI TAHERI, A; MACCAGNO, T.M; JONAS, J.J. Dynamic strain aging and the wire drawing of low carbon steel rods. **ISIJ International**. v. 35, n. 12, p. 1532-40, June 1995.
- 9 GONZALEZ, B.M.; MARCHI, L.A.; FONSECA, E.J.; MODENESI, P.J.; BUONO, V.T.L. Measurement of dynamic strain aging in perlitic steels by tensile test. **ISIJ International**, v. 43, n. 3, p. 428-32, Mar. 2003.
- 10 ROESH, L. Developments in the drawing of metals. **The Metals Society International Conference**, v. 10, n. 4, p. 210-8, May 1983.
- 11 TSUZAKI, K.; MATSUZAKI, Y.; MAKI, T.; TAMURA, I. Fatigue deformation accompanying dynamic strain aging in a perlitic eutectoid steel. **Materials Science Engineering**, v. A142, n. 1, p. 63-70, Ago. 1991.
- 12 ESPÍNDOLA, M.; WEIDIG, C.; RODRIGUES, P.C.M.; ANDRADE, M.S.; GONZALEZ, B.M. Dynamic strain aging in low carbon steel rods. **Wire Journal International**, v. 28, n. 1, p. 82-5, Jan. 1995.

Recebido em: 15/08/08

Aceito em: 6/11/08

Proveniente de: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 62., 2007, Vitória, ES. São Paulo: ABM, 2007.