

## AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE TÉRMICA DO AÇO AISI 409 LAMINADO A FRIO<sup>1</sup>

Diego Bueno Santana<sup>2</sup>  
José Carlos de Lacerda<sup>3</sup>  
Reny Angela Renzetti<sup>4</sup>

### Resumo

O aço AISI 409 é um aço inoxidável ferrítico destinado a aplicações que envolvem temperaturas mais elevadas, como o sistema de exaustão de automóveis, onde a recristalização durante a vida em serviço deve ser evitada. A recristalização envolve a formação de uma região livre de defeitos e a migração desta região consumindo regiões deformadas ou recuperadas. A estabilidade microestrutural do aço laminado a frio com três diferentes reduções de espessura (30%, 50% e 70%) foi avaliada por meio de medidas de microdureza Vickers. Para tanto, foram realizados tratamentos térmicos em diferentes amostras em temperaturas que variaram de 600°C a 900°C. Os tratamentos térmicos foram realizados em tempos de 15 min, 30 min e 60 minutos. De acordo com os resultados de microdureza, as amostras tratadas em 600 e 650°C não apresentaram amolecimentos significativos. As amostras tratadas nas temperaturas acima de 800°C apresentaram um maior amolecimento independente da redução de espessura, o que indica a ocorrência da recristalização.

**Palavras-chave:** Aço 409; Recristalização; Recuperação; Laminação.

### EVALUATION OF THE THERMAL STABILITY OF STEEL AISI 409 COLD ROLLED

#### Abstract

The steel AISI 409 ferritic stainless steel is intended for applications involving high temperatures, such as automobile exhaust system, where the recrystallization during service life must be avoided. Recrystallization involves forming a region free from defects, and migration of this deformed region or regions consuming recovered. The microstructural stability of cold rolled steel with three different thickness reductions (30%, 50%, 70%) was assessed by measuring the microhardness. For this, heat treatments were performed on samples at different temperatures ranging from 600°C to 900°C. The heat treatments were performed at various times of 2 to 60 minutes. According to the results of hardness, a sample treated at 600°C to 650°C was not observed significant softening. The samples treated at temperatures above 800°C showed a higher softening independent of the thickness reduction, which indicates the occurrence of recrystallization.

**Key words:** Steel 409; Recrystallization; Recovery; Lamination.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Aluno de Graduação, Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Campus Itabira, MG, Brasil.

<sup>3</sup> Professor, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Campus Itabira, MG, Brasil.

<sup>4</sup> Professora Dr<sup>a</sup>, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Campus Itabira, MG, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis ferríticos são utilizados em diversos setores da indústria. Eles são indicados para aplicações que exijam uma boa resistência a corrosão e apresentam uma boa relação custo/benefício. Comparando-os com os aços carbono, o tempo de vida útil dos aços inoxidáveis ferríticos é maior, o que compensa seu custo mais elevado. Porém quando comparados aos aços inoxidáveis austeníticos o custo é menor, o que os torna mais atrativos. Uma das aplicações para o aço AISI 409, um aço inoxidável ferrítico, é no sistema de exaustão de carros. Além da resistência à corrosão, o aço AISI 409 apresenta boa resistência mecânica em temperaturas mais elevadas. O aço também tem a vantagem de poder ser facilmente conformado. Esta característica permite obter peças com geometria mais complexas o que pode acarretar em altas tensões localizadas.<sup>(1-3)</sup>

A deformação plástica do aço causa um aumento na densidade de discordâncias. A densidade de discordâncias é a força motriz para processos termicamente ativados como a recuperação e recristalização. A recuperação envolve o rearranjo e a aniquilação das discordâncias. Com relação à recristalização, esta envolve a formação de uma região livre de defeitos e a migração desta região consumindo regiões deformadas ou recuperadas. Como a principal aplicação do aço envolve temperatura, torna-se de extrema importância avaliar a estabilidade microestrutural do aço frente a temperaturas mais elevadas e assim avaliar a integridade dos componentes durante a vida em serviço.<sup>(4-6)</sup>

A caracterização do material foi realizada por meio de medidas de dureza Vickers de amostras no estado deformado e recozido.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho foram utilizadas chapas de aços inoxidáveis ferríticos (AISI 409) laminadas a frio com 30%, 50% e 70% de redução da espessura. A Tabela 1 mostra a composição química do aço AISI409.

**Tabela 1.** Composição química do aço 409 (% massa)

C	Mn	Si	P	Cr	Mo	Ni	Ti	Nb	O <sub>2</sub> (ppm)	N <sub>2</sub> (ppm)
0,01	0,16	0,39	0,027	11,35	0,01	0,13	0,173	0,004	48	81

As chapas de aço inoxidável ferrítico (AISI 409) foram laminadas a frio com 30, 50 e 70% da espessura inicial. Em seguida, extraíram-se amostras de tal forma a serem submetidas a tratamento térmico, em temperaturas de 600°C, 650°C, 700°C, 800°C e 900°C em tempos de 15, 30 e 60 min. Posteriormente, as amostras foram embutidas com resina fenólica, lixadas e polidas com solução de alumina de 1 µm. A carga utilizada nas medidas de microdureza foi de 0,2 kgf.

Com as amostras preparadas, iniciou-se a avaliação de microdureza Vickers (HV), com o auxílio de um microdurômetro Wilson 402 MVD, da qual para cada amostra, realizou-se dez medidas e calculou-se a média e o desvio padrão.

O microdurômetro é um equipamento que possui um endentador de diamante na forma de uma pirâmide reta de base quadrada e um ângulo de 136° em faces opostas, do qual a carga utilizada é inferior a 1kgf. Geralmente, um microscópio é acoplado ao microdurômetro para que a avaliação de microdureza seja efetuada. A medida de HV consiste na penetração do endentador de diamante na amostra

durante alguns segundos, obtendo-se, após a remoção da carga, duas diagonais que são medidas (com o auxílio de um microscópio) e calcula-se a dureza de acordo com a Equação 1.

$$HV = \frac{2.F.\text{sen}\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{d^2} \quad (1)$$

Onde F é a carga em kgf e d é a média aritmética entre as duas diagonais medidas após a remoção de carga em  $\mu\text{m}$ .

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Tabelas 2 e 3 são mostrados os valores de microdureza Vickers para as amostras no estado deformado e tratadas termicamente em diversas condições, respectivamente.

**Tabela 2.** Dureza Vickers para o aço AISI 409 laminado a frio com diversas reduções de espessura

Redução (%)	Média (HV)
30	225
50	236
70	251

De acordo com valores de dureza Vickers para as amostras apenas laminadas (Tabela 2), observou-se que quanto maior a redução da espessura maior é o valor de dureza Vickers. Isto se deve ao aumento na densidade de discordâncias para as chapas com maior redução de espessura. Desta forma, as amostras da chapa com 70% de redução da espessura terão mais energia acumulada para os processos termicamente ativados, como a recuperação e recristalização. Vale destacar que o potencial termodinâmico para os processos como recuperação e recristalização é a energia acumulada na forma de defeitos.

**Tabela 3.** Valores de dureza Vickers para o aço AISI 409 laminado a frio e tratado termicamente em 600, 650, 700, 800 e 900°C durante 15, 30 e 60 min

Redução (%)	Tempo (min)	Média (HV) 600°C	Média (HV) 650°C	Média (HV) 700°C	Média (HV) 800°C	Média (HV) 900°C
30	15	213	214	221	178	128
	30	229	229	203	161	127
	60	233	191	195	151	128
50	15	216	233	237	151	126
	30	233	233	232	171	131
	60	243	241	198	142	126
70	15	255	244	246	142	128
	30	255	251	231	141	131
	60	266	247	202	131	128

As Figuras 1 a 3 mostram as curvas de amolecimento do aço após diferentes reduções da espessura e diferentes temperaturas de tratamento térmico nos tempos de 15 min, 30 min e 60 min, respectivamente. Para a confecção das figuras foram utilizados os dados das Tabelas 2 e 3.

Com relação à Figura 1, é possível observar que o amolecimento significativo ocorreu para as amostras tratadas em 800°C, independente da redução de

espessura. O percentual de amolecimento determinado pela relação da variação de dureza da amostra antes e depois do tratamento térmico com o valor de dureza antes do tratamento foi determinado para as três condições e redução de espessura a 800°C. O percentual de amolecimento foi de aproximadamente 20%, 35% e 43% para as amostras com 30%, 50% e 70% de redução da espessura respectivamente. O amolecimento foi maior para a amostra com 70% de redução da espessura. Uma vez que para essa redução é introduzido mais defeitos, os quais são a forma motriz para a recristalização. Para as amostras tratadas em 900°C o valor de dureza Vickers é praticamente o mesmo, independente da redução de espessura. Para esta temperatura estima-se que o processo de crescimento de grão seja predominante.

Na Figura 2 são mostrados os valores de dureza para as amostras tratadas durante 30 min. Para este tempo de tratamento térmico é possível observar que o amolecimento começa para as amostras tratadas em 700°C. Nas amostras tratadas em 15 min não houve amolecimento na temperatura de 700°C, indicando o processo de recuperação. Para as amostras tratadas em 800°C por 30 min a porcentagem de amolecimento foi de aproximadamente 30, 30 e 43% para as reduções da espessura de 30%, 50% e 70%. **(repete o mesmo valor na frase)**

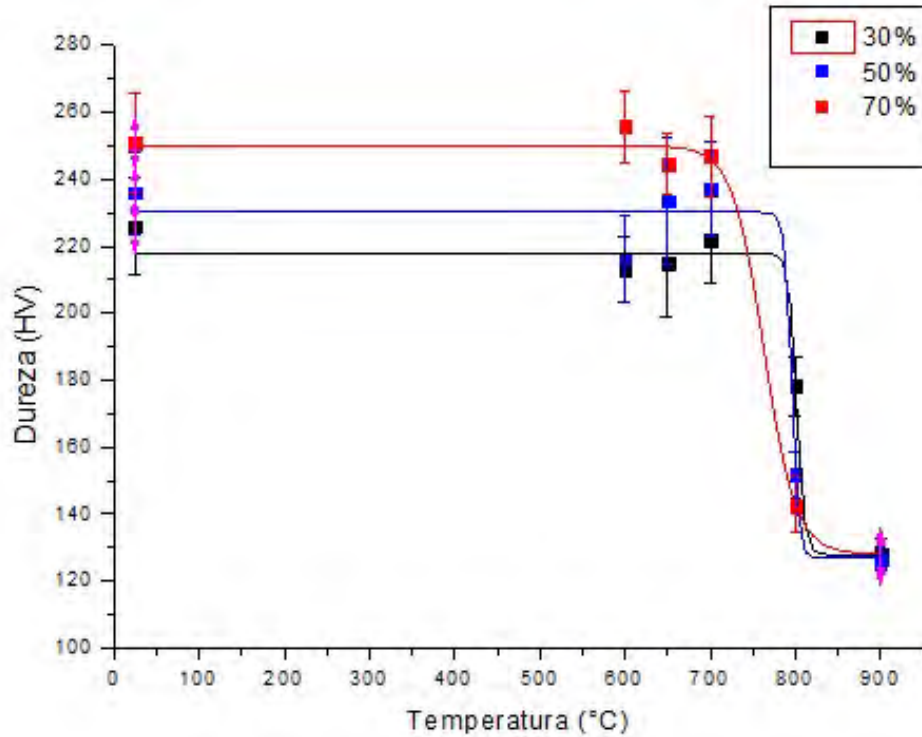
O amolecimento para as amostras tratadas durante 60 min (Figura 3), começou a ser observado para a temperatura de 650°C. Observa-se que com o aumento do tempo de tratamento térmico a temperatura na qual a recristalização se inicia é menor. A relação do tempo,  $t$ , com a fração recristalização,  $X_v$ , pode ser estimada pela equação de Avrami, ou modelo JMAK (Johnson–Mehl–Avrami–Kolmogorov), Equação 2.

$$X_v = 1 - e^{-kt^n} \quad (2)$$

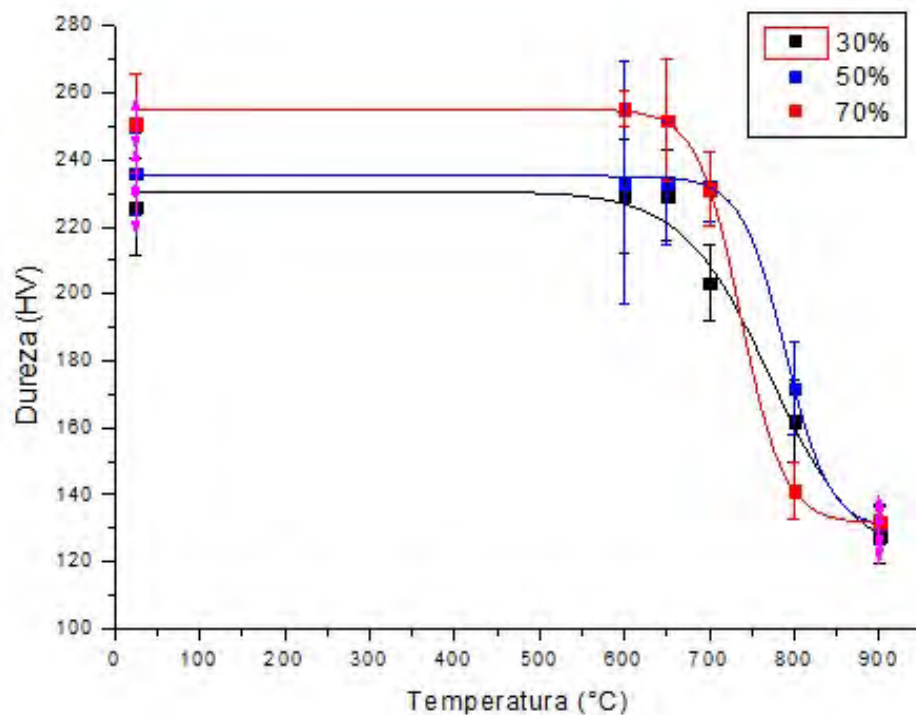
Onde  $k$  e  $n$  são constantes.<sup>(6)</sup> O percentual de amolecimento para as amostras tratadas em 800°C foi de aproximadamente 33, 40 e 47% para as reduções de 30%, 50% e 70% da espessura.

A recristalização do aço AISI409 é dificultada pela presença de Ti na composição química do mesmo. O Ti forma carbonetos estáveis no aço que retardam o processo de recristalização. A recristalização consiste na nucleação de um novo grão e crescimento do mesmo no metal deformado ou recuperado. O crescimento do novo grão ocorre pela migração dos contornos de alto ângulo. A presença de partículas estáveis de Ti contribui para dificultar o crescimento dos novos grãos, dificultando a migração dos contornos de altos ângulos dos mesmos. Desta forma o processo de recristalização é dificultado e a estabilidade térmica do aço é aumentada. De acordo com os resultados observa-se que a partir de 800°C a recristalização ocorre, ou seja, as partículas não são capazes de retardar o processo, independente da redução da espessura e tempo de exposição na temperatura. A presença das partículas é capaz de dificultar a recristalização nas temperaturas mais baixas e em tempos de exposição menores.

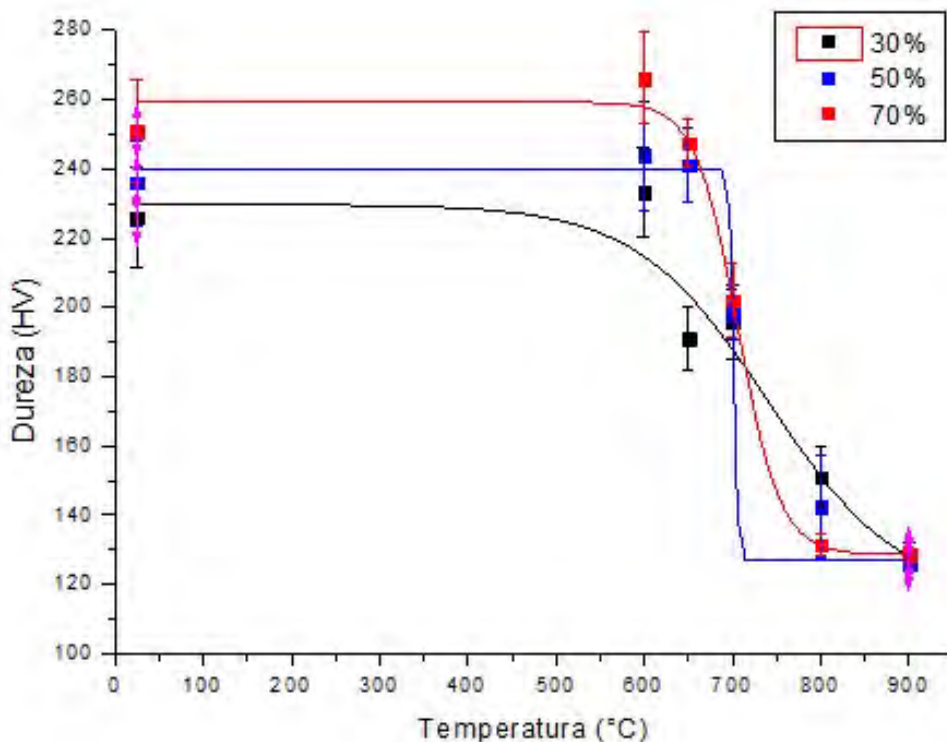
Como pode ser observado nas Figuras 1 a 3, as amostras tratadas termicamente em 900°C apresentou um comportamento muito similar independente da redução da espessura e tempo. Estima-se que para essa temperatura as amostras já estejam totalmente recristalizadas e o amolecimento significativo do processo de recristalização já tenha sido obtido. Para esta temperatura o processo de crescimento de grão seria o predominante e o potencial termodinâmico para que ocorra é a redução na quantidade total de contorno de grão.



**Figura 1.** Valores de dureza Vickers para o aço AISI409 laminado a frio com 30%, 50% e 70% de redução da espessura e tratado termicamente em diferentes temperaturas por 15 min.



**Figura 2.** Valores de dureza Vickers para o aço AISI409 laminado a frio com 30%, 50% e 70% de redução da espessura e tratado termicamente em diferentes temperaturas por 30 min.



**Figura 3.** Valores de dureza Vickers para o aço AISI409 laminado a frio com 30%, 50% e 70% de redução da espessura e tratado termicamente em diferentes temperaturas por 60 min.

#### 4 CONCLUSÕES

- O aumento nas reduções da espessura do aço contribuiu para aumentar a dureza do mesmo. Isto deve ser devido ao aumento na densidade de discordâncias ocasionado pelo trabalho a frio;
- para as amostras com menor redução de espessura o amolecimento significativo só foi observado para as amostras tratadas acima de 800°C. Ou seja, para as amostras tratadas em temperaturas inferiores o processo de recuperação foi o responsável pelo pequeno amolecimento;
- independente da redução e do tempo de tratamento térmico, as amostras apresentaram um amolecimento significativo para as temperaturas acima de 800°C. Isto evidencia que acima desta temperatura a presença de Ti não mais contribui para dificultar o processo de recristalização; e
- a 900°C, as amostras reduzidas em 30%, 50% e 70% apresentaram o mesmo valor de dureza Vickers. Para esta temperatura e para temperaturas mais elevadas o processo de crescimento de grão estaria operando.

#### REFERÊNCIAS

- 1 CAVAZOS, J. L.; GUERRERO-MATA, P. M.; ZAMBRANO, P. Annealing of a ferritic stainless steel 409 stabilized with titanium and Zirconium additions. *Revista de Metalurgia*, v. 47, p. 38-47, 2011.
- 2 FORONI, F. D.; MENEZES, M. A.; MREIRA FILHO, L. A. Uso do aço AISI 409 para fabricação de pás para ventiladores. 17<sup>o</sup> CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 15 a 19 de Novembro de 2006, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.

- 3 SIQUEIRA, R. P.; RODRIGUES, C. E. M.; SANDIM, H. R. Z.; BALDAN, C. A.; de OLIVEIRA, T. R. Recristalização do aço AISI 430 com estrutura colunar de grãos. REM: R. Esc. Minas, v. 60, p. 117-122, 2007.
- 4 COTTERILL, P.; MOULD, P. R. Recrystallization and grain growth in metals. London: Surrey University Press, 1976.
- 5 DOHERTY, R. D.; HUGHES, D. A.; HUMPHREYS, F. J.; JONAS, J. J.; JUUL JENSEN, D.; KASSNER, M. E.; KING, W. E.; McNELLEY, T. R.; McQUEEN, H. J.; ROLLETT, A. D. Current issues in recrystallization: a review. Materials Science and Engineering A, v. 238, p. 219-274, 1997.
- 6 HUMPHREYS, F. J.; HATHERLY, M. Recrystallization and related annealing phenomena. 2<sup>nd</sup> ed. Amsterdam: Elsevier Ltd., 2004.