

# INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE RECOZIMENTO NA MICROESTRUTURA DO AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO DURANTE A RECRISTALIZAÇÃO\*

Ariane Neves de Moura<sup>1</sup>  
Daniella Gomes Rodrigues<sup>2</sup>  
Tarcísio Reis de Oliveira<sup>3</sup>  
Claudio Moreira de Alcantara<sup>4</sup>  
Ketly Pontes<sup>5</sup>  
André Itman Filho<sup>6</sup>

## Resumo

As mudanças microestruturais que ocorrem ao longo do recozimento com o aumento da temperatura de recozimento foram observadas no aço inoxidável ferrítico por microscopia ótica. As amostras foram laminadas a frio e recozidas a temperatura de 700°C a 1.000°C, com variação de 50°C. Foram realizadas medidas de tamanho de grão e dureza. Os resultados indicam que o recozimento efetuado a partir de 850°C proporcionou recristalização completa. A maior diminuição da dureza foi observada para a amostra recozida a 800°C devido ao início da recristalização. O tamanho de grão encontrado para as amostras recozidas a 850°C e 1.000°C foi 12,6 µm e 28 µm, respectivamente.

**Palavras-chave:** Aço inoxidável ferrítico; Recozimento; Recristalização.

## INFLUENCE OF ANNEALING TEMPERATURE ON MICROSTRUCTURE OF FERRITIC STAINLESS STEEL DURING RECRYSTALLIZATION

### Abstract

The changes that occur on the microstructure during the annealing with the increase of the temperatures were observed in the ferritic stainless steel by optical microscopy. The samples were cold rolled and annealed at 700°C to 1,000°C, ranging from 50°C. Grain size and hardness measurements were performed. The results indicated that annealing performed from 850°C provided complete recrystallization. Greater reduction in hardness was observed for the sample annealed at 800°C due to the beginning of recrystallization. The grain size observed for the samples annealed at 850°C and 1,000°C was 12,6 µm and 28 µm, respectively.

**Keywords:** Ferritic stainless steel; Annealing; Recrystallization.

<sup>1</sup> Engenheira de Materiais, Estudante de mestrado, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Instituto Federal do Espírito Santo (IFES), Vitória, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheira de Materiais, Mestre em Metalurgia Física, Estudante de doutorado, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro Mecânico, Doutor, Pesquisador, Aperam South America, Timóteo, MG, Brasil.

<sup>4</sup> Tecnólogo em Normalização em Qualidade industrial, Analista Técnico, Aperam South America, Timóteo, MG, Brasil.

<sup>5</sup> Engenheira de Materiais, Estudante de mestrado, Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano (IMA), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, Brasil.

<sup>6</sup> Engenheiro de Materiais, Doutor, Professor, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Instituto Federal do Espírito Santo (IFES), Vitória, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis ferríticos são ligas de ferro, cromo (10,5 a 30%) e baixo carbono (teor abaixo de 0,1%) [1]. Estas ligas são as mais utilizadas em ambientes corrosivos em elevada e temperatura ambiente [2]. A conformação, microestrutura e propriedades dos metais podem ser otimizadas conhecendo-se os fenômenos de encruamento, recuperação, recristalização e crescimento de grão [3].

Os procedimentos de deformação provocam várias mudanças na microestrutura dos metais; os grãos tornam-se alongados, aumento da área dos contornos e o surgimento de uma subestrutura dentro dos grãos. O processo de recozimento é composto pelas etapas de recuperação, recristalização e crescimento de grãos. A primeira etapa, recuperação, consiste nos processos de aniquilação e rearranjo de discordâncias em uma configuração de baixa energia [4]. A recristalização é definida como a formação e migração de contornos de alto ângulo. Nesta etapa ocorre a formação de novos grãos isentos de deformação [4,5]. Após a recristalização, ocorre o crescimento do grão recristalizado, sendo a força motriz a redução da energia dos contornos. As propriedades mecânicas dos metais são fortemente influenciadas pela morfologia microestrutural [3].

O objetivo desse estudo consiste em investigar o efeito da temperatura de recozimento na recristalização do aço inoxidável ferrítico por meio de microscopia ótica e correlacionar o progresso da recristalização com a dureza.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para realização dos experimentos foram utilizadas amostras do aço inoxidável ferrítico estabilizado ao nióbio, tipo ASTM 430, produzido pela Aperam South America, cuja composição química é dada por: 0,02%C, 0,02%N, 16%Cr, 0,3%Nb, 0,04%Ti, 0,1%Mn e 0,3%Si. As amostras foram retiradas após a laminação a quente na planta industrial.

A etapa de laminação a frio foi realizada em um laminador piloto na configuração duo. A espessura das amostras foi reduzida em 11 passes de 4,22 mm para 0,62 mm, equivalendo a uma redução total de 85%.

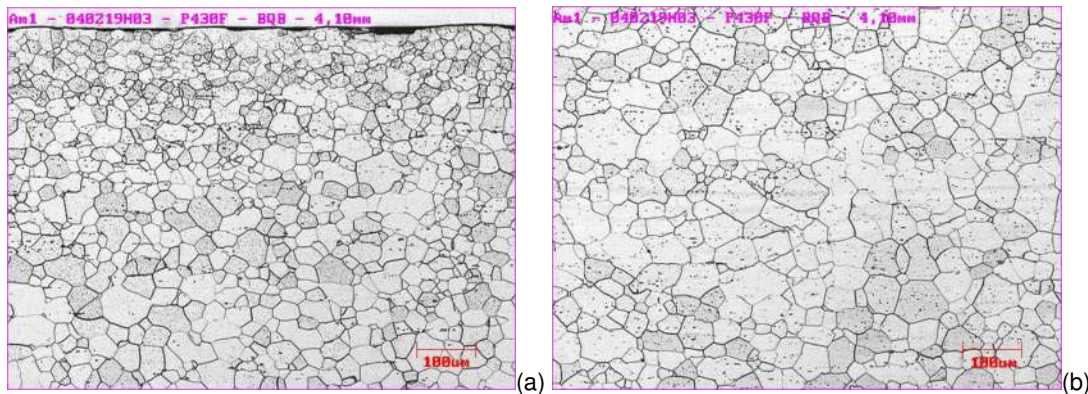
O recozimento foi realizado em um forno da marca Combustol, com aquecimento por resistência elétrica e temperatura máxima de operação de 1400°C. O tratamento térmico consistiu em variar a temperatura de recozimento em 700°C, 750°C, 800°C, 850°C, 900°C, 950°C e 1000°C com tempo de encharque fixo de 25 segundos. A temperatura e tempo de aquecimento foram monitorados por meio de um termopar do tipo K fixado na região central das amostras.

As amostras laminadas a frio e recozidas foram caracterizadas por microscopia ótica ao longo da espessura na seção longitudinal. A preparação foi realizada conforme os métodos metalográficos convencionais. Utilizou-se um microscópio ótico da marca LEICA. O tamanho de grão foi medido de acordo com a norma ASTM E112-3. O ensaio de dureza foi realizado conforme a norma ASTM E18 no durômetro da marca Instron, modelo Wolpert 930.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

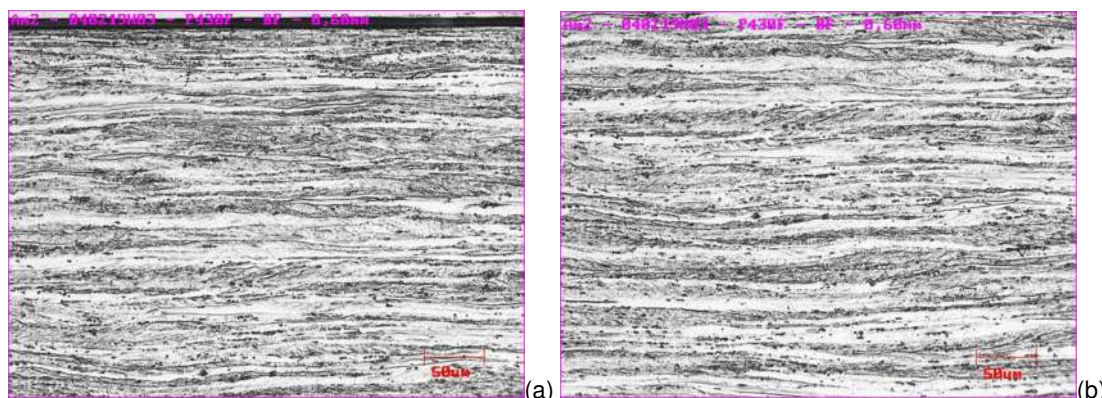
A Figura 1 apresenta a condição inicial da bobina laminada a quente, sendo na Figura 1(a) a região próxima à superfície e na Figura 1(b) a região central. Observa-se nesta microestrutura heterogeneidade no tamanho de grão ao longo da

espessura, grãos menores na superfície e maiores na região central, além da presença de precipitados distribuídos em toda a matriz. O tamanho de grão encontrado foi 28,7  $\mu\text{m}$ . Durante o processo de laminação a quente, a tensão de cisalhamento é heterogênea ao longo da espessura e causa a não uniformidade do tamanho dos grãos [6].



**Figura 1.** Micrografia da bobina laminada a quente: (a) região próxima à superfície e (b) região central da espessura.

A microestrutura da amostra laminada a frio é apresentada na Figura 2. Para este percentual de redução, observa-se que os grãos estão alongados na direção de laminação.

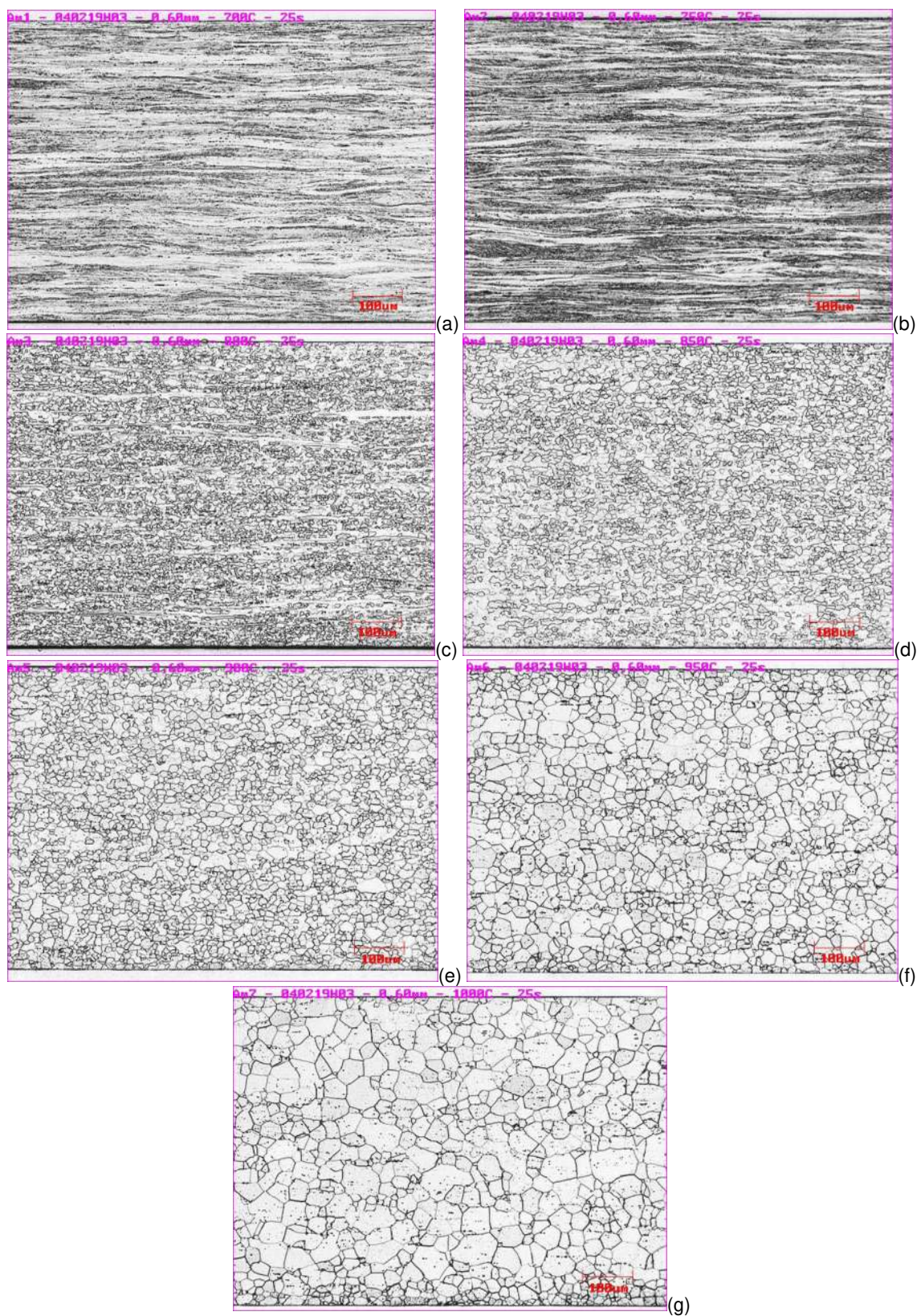


**Figura 2.** Micrografia da amostra laminada a frio: (a) região próxima à superfície e (b) região central da espessura.

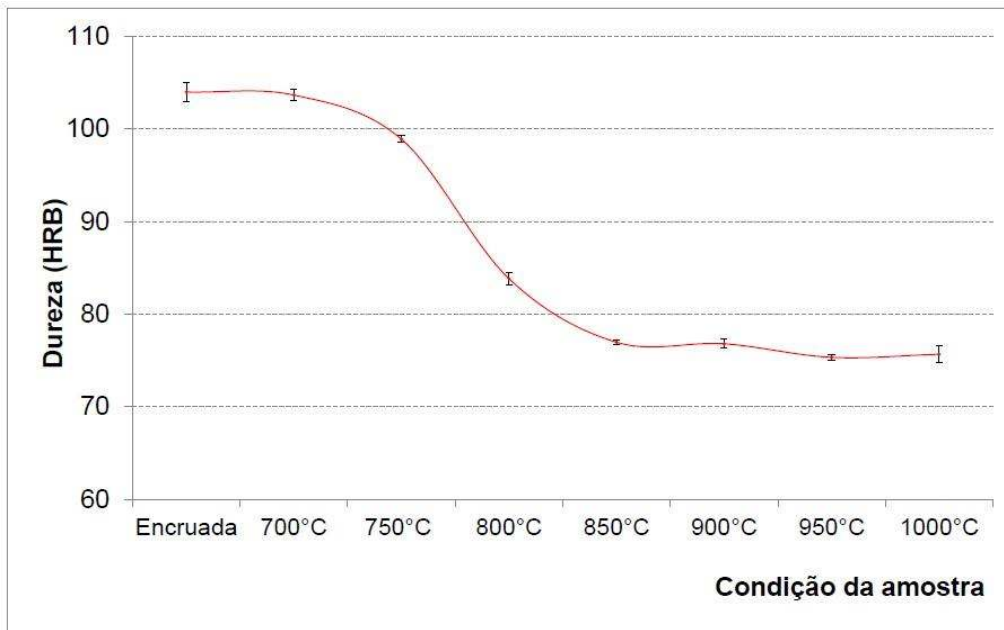
A Figura 3 apresenta as micrografias referentes ao material laminado a frio 85 % e recozido a 700°C, 750°C, 800°C, 850°C, 900°C, 950°C e 1000°C e na Figura 4 a variação na dureza com a temperatura de recozimento. As microestruturas das amostras recozidas a 700°C e 750°C apresentam grãos alongados característicos do estado deformado, mesmo após o recozimento. A dureza da amostra recozida a 700°C foi igual ao material deformado, indicando que a recuperação e recristalização não aconteceram para essa temperatura de recozimento. Observa-se pequena redução na dureza na amostra recozida a 750°C, indicando que nesta etapa ocorreu uma redução da energia armazenada causada pelo início da recuperação. Este processo não causa uma sensível modificação microestrutural quando analisado por microscopia ótica [4]. A amostra recozida a 800°C exibiu uma microestrutura parcialmente recristalizada, com a fração recristalizada superior a não recristalizada. Os grãos nucleados estão distribuídos em toda a matriz e os grãos da região não recristalizada ainda estão alongados na direção de laminação. A ocorrência dessas



modificações microestruturais provocou uma queda brusca na dureza, já que a etapa da recristalização é caracterizada por alta liberação de energia armazenada [7]. A partir da temperatura de 850°C, todas as amostras apresentaram a microestrutura completamente recristalizada e com grãos equiaxiais.

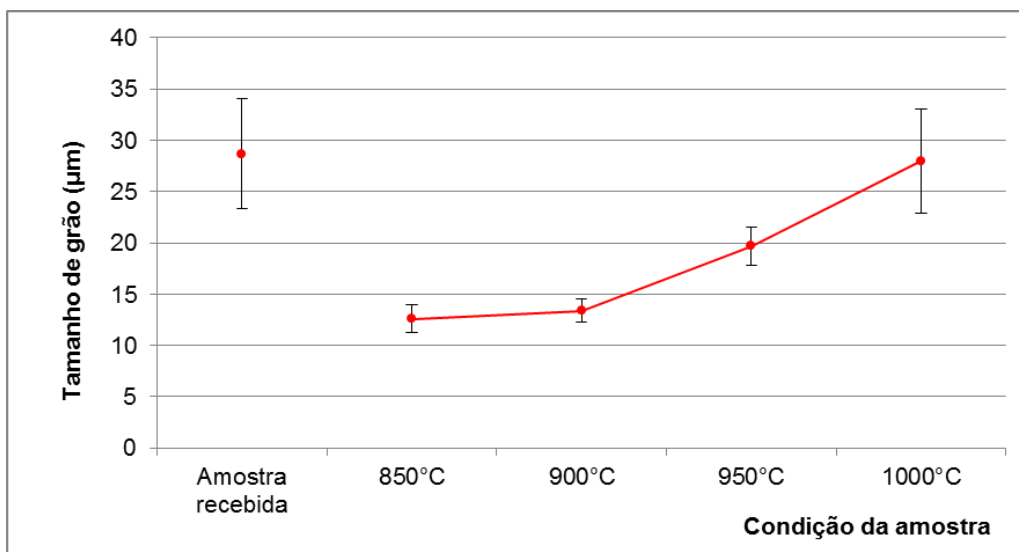


**Figura 3.** Micrografia da espessura completa da amostra recozida a: (a) 700°C. (b) 750°C, (c) 800°C, (d) 850°C, (e) 900°C, (f) 950°C e (g) 1000°C.



**Figura 4.** Influência da temperatura de recozimento na dureza. Para comparação, o gráfico inclui a dureza da amostra após laminação a frio.

A principal mudança a partir do recozimento realizado a 850°C foi o crescimento do grão recristalizado, Figura 5, e os valores de dureza observados foram aproximadamente constantes.



**Figura 5.** Influência da temperatura de recozimento no tamanho de grão. Para comparação, o gráfico inclui o tamanho de grão da bobina laminada a quente.

#### 4 CONCLUSÃO

A temperatura de recozimento é um parâmetro importante para a recristalização dos aços. Perante os resultados obtidos, a recuperação aconteceu em uma temperatura superior a 700°C, ou seja, no intervalo entre 700°C a 750°C. A redução expressiva da dureza foi observada para o processo de recozimento realizado a 850°C, consequência do progresso da recristalização. Portanto, a completa recristalização do aço inoxidável ferrítico ocorreu no intervalo entre 800°C a 850°C. O tamanho de grão variou de 12,6 µm a 28 µm no intervalo 850°C a 1000°C.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à Aperam South America pelo fornecimento das amostras, à FAPES, FINEP e CAPES pelo apoio financeiro.

## REFERÊNCIAS

- 1 DAVIS, J. R. Stainless steels, ASM Specialty Handbook. ASM International, 1996.
- 2 BHADESHIA, H. K. D. H.; HONEYCOMBE, S. R. Steels: Microstructure and Properties. 3<sup>a</sup>. ed. Oxford: Elsevier Ltd, 2006.
- 3 PADILHA, A. F.; SICILIANO JR, F. Encruamento, recristalização, crescimento de grão e textura. 3<sup>a</sup>. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais; 2005.
- 4 HUMPHREYS, F. F.; HATHERLY, M. Recrystallization and related annealing phenomena. 2<sup>a</sup>. ed. Kidlington: Elsevier; 2004.
- 5 DOHERTY, R. D. et al. Current issues in recrystallization: a review. Materials Science and Engineering A. 1997; volume (238): p. 219-274.
- 6 SAKAI, T. et al. Inhomogeneous texture formation in high speed hot rolling of ferritic stainless steel. ISIJ International. 1991, volume (31): p. 86-94.
- 7 HUH, M. Y.; ENGLER, O. Effect of intermediate annealing on texture, formability and ridging of 17%Cr ferritic stainless steel sheet. Materials Science and Engineering A. 2001, volume (308): p. 74–87.