



# EFEITO MICROESTRUTURAL DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 409 APÓS DOBRAMENTO E RECOZIMENTO DE RECRISTALIZAÇÃO<sup>1</sup>

Valmir Dias Luiz<sup>2</sup>  
 José Carlos de Lacerda<sup>3</sup>  
 Marcelo Alves Fonseca<sup>4</sup>  
 Daniel da Silva Lanes<sup>5</sup>

## Resumo

O presente trabalho visa investigar o comportamento microestrutural do aço inoxidável AISI 409 e as conseqüentes mudanças nas propriedades mecânicas quando recozido após dobramento a frio. Os corpos de prova foram dobrados a 60, 90 e 120 graus, e submetidos a um recozimento isotérmico a temperatura de 860°C, sendo retirados do forno em intervalos periódicos de 15 em 15 minutos, seguidos de resfriamento acelerado. Foram analisadas as mudanças microestruturais da região central e da região periférica, observando-se os fenômenos de recristalização e crescimento de grãos. Por fim, foram detectadas significativas modificações quanto ao tamanho dos grãos ferríticos do aço AISI 409 em função do tempo de recozimento, e marcantes diferenças microestruturais entre a região central e a região periférica dos corpos de prova também foram observadas.

**Palavras-chave:** Recozimento; Dobramento; Aço AISI 409.

## MICROSTRUCTURAL EFFECT OF AISI 409 STAINLESS STEEL AFTER BENDING AND ANNEALING RECRYSTALLIZATION

### Abstract

This study aims to investigate the microstructural behavior of stainless steel AISI 409 and the resulting changes in mechanical properties when annealed after cold bending. The specimens were bent to 60, 90 and 120 degrees, and submitted to an isothermal annealing temperature of 860°C, being removed from the oven at periodic intervals from 15 to 15 minutes, followed by accelerated cooling. We analyzed the microstructural changes in central and peripheral region, observing the phenomena of recrystallization and grain growth. Finally, significant changes were detected on the grain size of ferritic steel AISI 409 as a function of annealing time, and striking differences between microstructural the central and peripheral region of the specimens were also observed.

**Key words:** Annealing; Bending; AISI 409 steel.

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

<sup>2</sup> Membro da ABM; Engenheiro Mecânico, M.Sc., CTM, Professor Efetivo do Curso Técnico de Metalurgia do CEFET-MG-Campus VII-Timóteo, MG.

<sup>3</sup> Membro da ABM; Engenheiro Mecânico, M.Sc., CEM, Professor Efetivo do Curso de Engenharia Mecânica da UNIFEI-Itabira, MG.

<sup>4</sup> Engenheiro Metalurgista, M.Sc., CEM, DCX, Professor do Departamento de Ciências Exatas do UnilesteMG, Coronel Fabriciano, MG.

<sup>5</sup> Graduando em Engenharia Mecânica, CEM, DCX, Graduando do Departamento de Ciências Exatas do UnilesteMG, Coronel Fabriciano, MG.

## 1 INTRODUÇÃO

O presente projeto versa sobre os princípios básicos e os fenômenos fundamentais envolvidos no recozimento dos metais deformados a frio, especialmente no dobramento do aço inoxidável ferrítico AISI 409.

A ótima resistência a corrosão e o custo relativamente baixo do que os demais aços inoxidáveis, devido principalmente a ausência de níquel na sua composição, torna o aço inoxidável ferrítico AISI 409 um material muito versátil e em crescente utilização na Engenharia, especialmente na indústria automobilística para fabricação de tubos de escapamentos. Os aços inoxidáveis ferríticos apresentam ótima qualidade superficial, ductilidade, resistência mecânica e tenacidade adequadas para suas principais aplicações. Apresenta ótima resistência à corrosão, boa soldabilidade e boa estampabilidade devido a sua composição e microestrutura.

Segundo Callister,<sup>(1)</sup> Askeland e Phulé<sup>(2)</sup> o recozimento permite alterar a microestrutura e em consequência disso as propriedades da liga metálica, sobretudo, através do controle das variáveis de processo, tal como a taxa de deformação a frio preliminar ao recozimento, a temperatura de recozimento, o tempo de encharque, a taxa de resfriamento e a atmosfera na qual o processo é realizado. Com um controle adequado destas variáveis é possível reduzir ou eliminar o nível de tensões internas do material, com isso ocorre melhoria da ductilidade, da resistência à corrosão, modificações nas propriedades de condução térmica e na resistência ao calor, e principalmente melhoria da estampabilidade.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram preparados corpos de prova do aço inoxidável AISI 409 a partir de chapas laminadas a quente, confeccionados no sentido de laminação (SL), com seção de 5 mm x 5 mm e comprimento de 150 mm. A composição química do aço inoxidável AISI 409 é apresentada na tabela 1, que se refere a uma amostra fornecida pela Cia. ArcelorMittal, que foram produzidas na corrida 50384C, sendo a unidade metálica de número 503844C2200B.

**Tabela 1.** Composição química do aço inoxidável AISI 409 empregado no presente trabalho

C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Al	Nb	Ti
0,01	0,16	0,39	0,0275	0,0006	11,35	0,01	0,0057	0,004	0,173

Os corpos de prova foram cortados e dobrados com ângulos de 60 graus, 90 graus e 120 graus, respectivamente. Posteriormente, os corpos de prova foram identificados e separados para o tratamento térmico por recozimento, sempre em grupos de três de acordo com o ângulo de dobramento, conforme ilustrado na Figura 1.

Em seguida realizou-se o recozimento isotérmico em um forno elétrico do tipo Mufla EDG, conforme observa-se na Figura 2. O recozimento isotérmico foi realizado a temperatura de 860°C em todas as amostras a serem tratadas, e o tempo de recozimento foi em diferentes intervalos de tempo, 30 minutos, 45 minutos, 60 minutos, 75 minutos e 90 minutos, respectivamente, seguido de resfriamento rápido em água fria com agitação manual.



**Figura 1.** Fotografia de um conjunto de três amostras do material com os graus de dobramento aplicados.



**Figura 2.** Forno tipo mufla EDG.

As imagens micrográficas foram obtidas utilizando-se um microscópio Leica DMRM. As microestruturas das amostras foram reveladas com reagente Vilella (95 ml de álcool etílico, 5 ml de ácido clorídrico e 1 g de ácido pícrico), por imersão.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

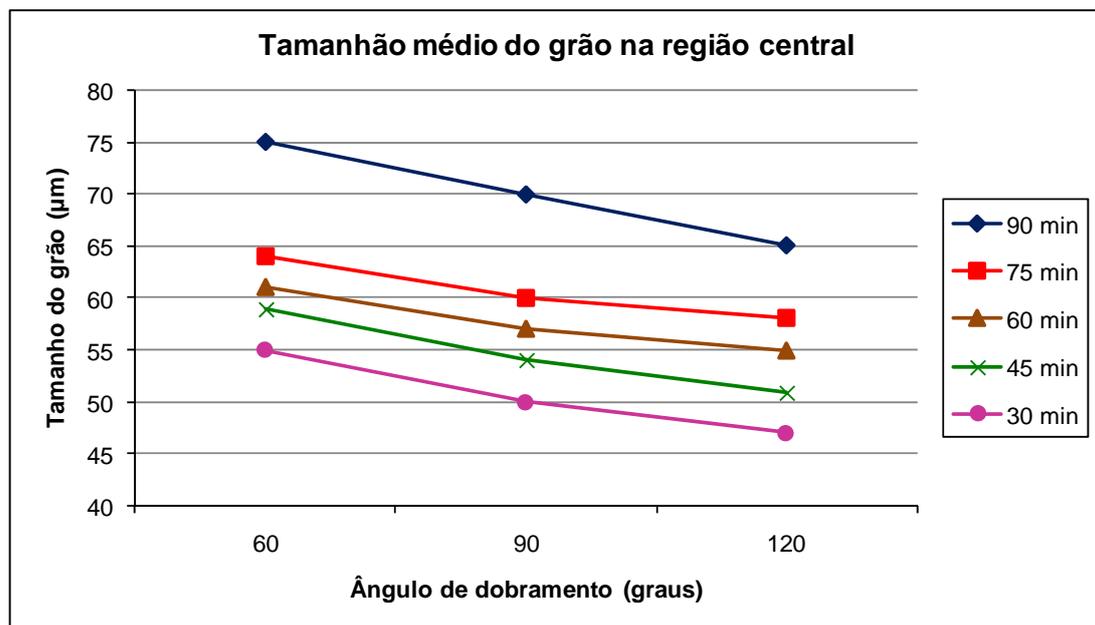
A influência do tempo de recozimento a temperatura constante concomitantemente à variação do ângulo de dobramento e as conseqüentes mudanças na microestrutura são mostradas e comentadas a seguir.

#### 3.1 Análise do Tamanho de Grão

A região central próxima a linha neutra e a região próxima da borda apresentaram aspectos microestruturais distintos, sobretudo, com relação ao tamanho de grão, mas observou-se que todos os corpos de prova recozidos se apresentaram recristalizados na região central próxima da linha neutra e na região periférica.

Na Figura 3 são apresentadas as variações do tamanho médio dos grãos com o aumento do tempo de recozimento na região central próxima da linha neutra para cinco tempos de encharque e para três ângulos de dobramento diferentes. Observa-se que o crescimento dos grãos ocorreu com o aumento do tempo de recozimento. Segundo Reed-Hill,<sup>(3)</sup> isso se deve principalmente à temperatura de recozimento empregada (860°C) que é superior à temperatura de recristalização do aço AISI 409, que segundo a ASM,<sup>(4)</sup> é em torno de 760°C, fazendo com que a energia interna armazenada diminua com o crescimento dos grãos recristalizados. Guy<sup>(5)</sup> salienta que à medida que os grãos crescem em volume, a área total de contorno decresce, pois a energia associada ao volume é maior que a energia de superfície. Somando-se os dois fenômenos ocorrerá uma redução na energia total do metal. Esta energia é uma das forças motrizes para o crescimento de grão. Em temperatura alta e adequada a energia livre associada aos contornos de grão podem provocar a migração dos contornos, e portanto, o crescimento de grão.

Já as amostras que permaneceram por um mesmo tempo de recozimento, mas com ângulo de dobramento diferente, apresentaram tendência a diminuir o tamanho dos grãos. Portanto, confirmou-se na prática que para um mesmo tempo de recozimento, o aumento do ângulo de dobramento resulta em um tamanho médio dos grãos recristalizados menores. Este fato pode ser justificado por uma maior energia interna armazenada na deformação plástica, e portanto, maior potencial para ocorrer transformações no estado sólido do aço, promovendo uma maior frequência de nucleação de novos grãos recristalizados. Estes aspectos de mudança do tamanho de grão e microestrutural são também comentadas por Guy<sup>(5)</sup> e Shackelford.<sup>(6)</sup>

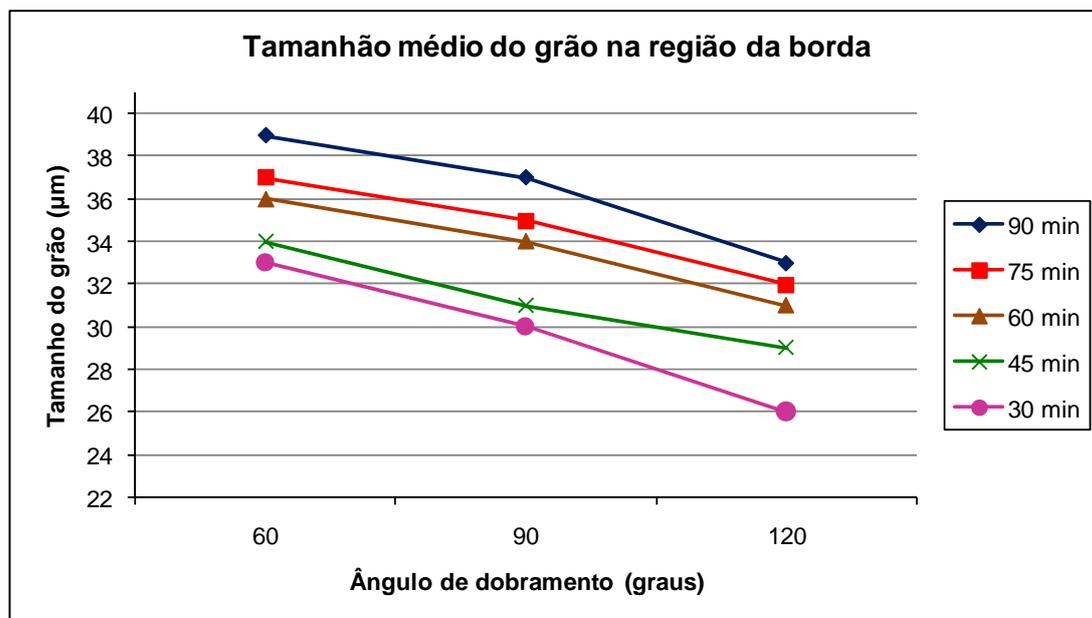


**Figura 3.** Variação do tamanho médio do grão com o tempo de recozimento e com o ângulo de dobramento na região central próxima da linha neutra.

Analogamente à região central, a região próxima da borda apresentaram grãos recristalizados em todas as amostras ensaiadas. Entretanto, conforme observa-se na Figura 4, o tamanho dos grãos da borda foram bem menores do que os grãos da região central, conforme ilustra a Figura 3. Foi verificado também, que quanto maior o ângulo de deformação por dobramento maior será o refinamento dos grãos. A amostra que apresentou menor tamanho de grão foi aquela correspondente a um

menor tempo de recozimento com maior ângulo de deformação prévia por dobramento.

O Figura 4 apresenta a relação do tamanho de grão com as variáveis de tempo de recozimento e ângulo de dobramento referentes à região da borda do corpo de prova. Observa-se que para um mesmo tempo de recozimento o aumento do grau de dobramento resultou em um tamanho menor dos grãos recristalizados. Já para um mesmo ângulo de dobramento, constata-se que um aumento no tempo de recozimento resultou em um tamanho maior dos grãos recristalizados.

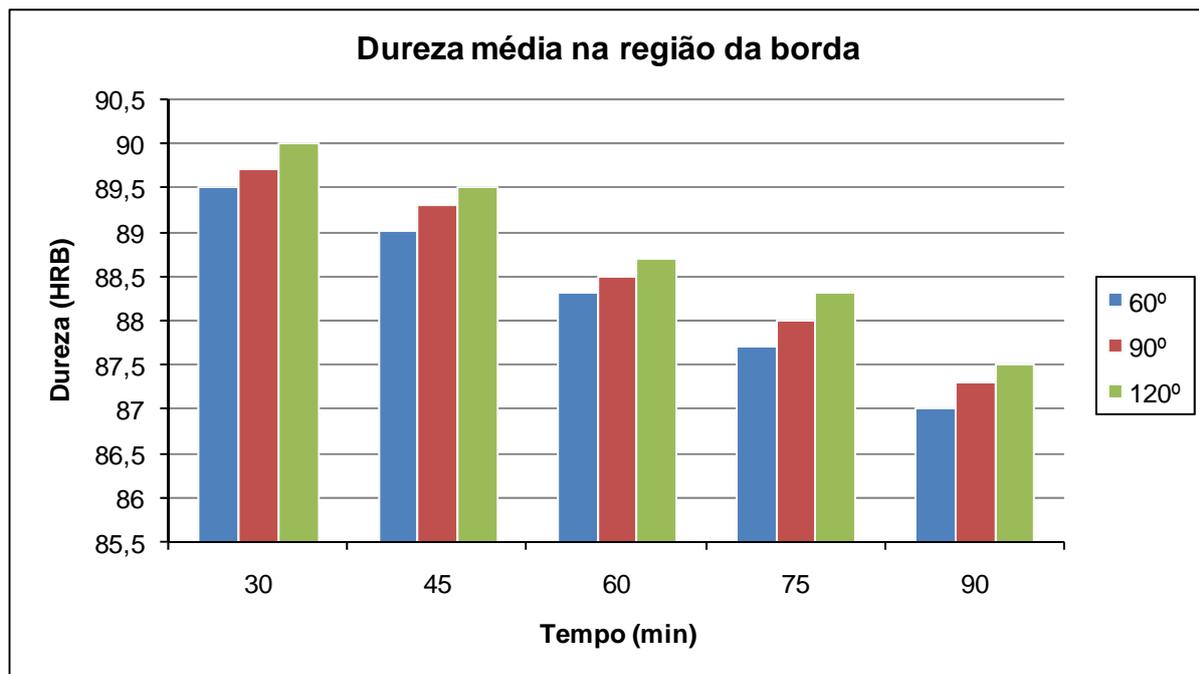


**Figura 4.** Variação do tamanho médio do grão com o tempo de recozimento e com o ângulo de dobramento na região próxima da borda.

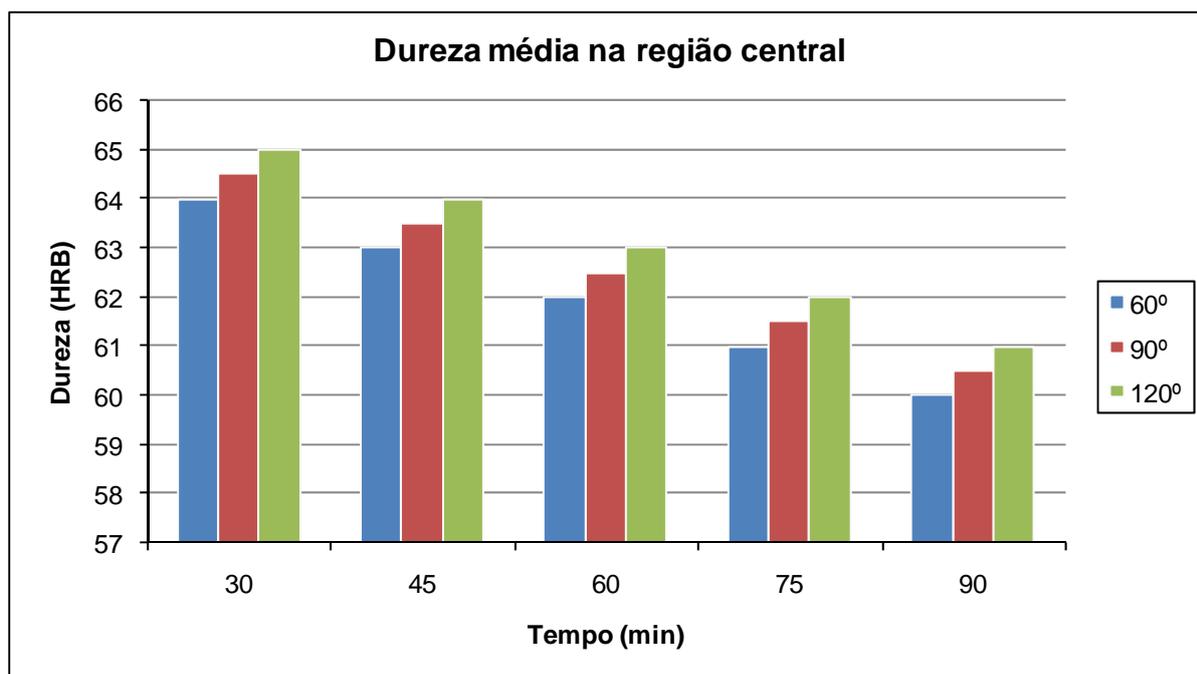
Ao analisar a Figura 4, constata-se também que, com o aumento do ângulo de dobramento, para um mesmo tempo de permanência e a temperatura constante, obtêm-se um maior refinamento dos grãos. Analogamente à figura 3, essa variação de tamanho de grão observada na figura 4 são comentadas por Reed-Hill,<sup>(3)</sup> Guy,<sup>(5)</sup> Shackelford<sup>(6)</sup> e também por Coutinho et al.<sup>(7)</sup>

### 3.2 Análise da Dureza

A dureza obtida após o dobramento dos corpos de prova na região da borda foram em média em torno de 88,5 HRB, conforme observa-se na Figura 5, enquanto que nas proximidades da região central foram em média 62,5 HRB, conforme observa-se na Figura 6. Nota-se que em ambas as regiões ocorreram reduções sucessivas de dureza com o tempo de recozimento isotérmico. Entretanto, observa-se que quanto maior o ângulo de dobramento, ou seja, quanto maior a deformação prévia, maior será a dureza apresentada pelo material, comprovando a premissa de que quanto menor o tamanho de grão maior será a dureza obtida. Esse aumento de dureza se deve principalmente ao fenômeno do encruamento, pois aumenta a resistência mecânica do metal, entretanto, são reduzidas outras propriedades relevantes tal como a condutividade térmica e elétrica do metal e a resistência à corrosão.



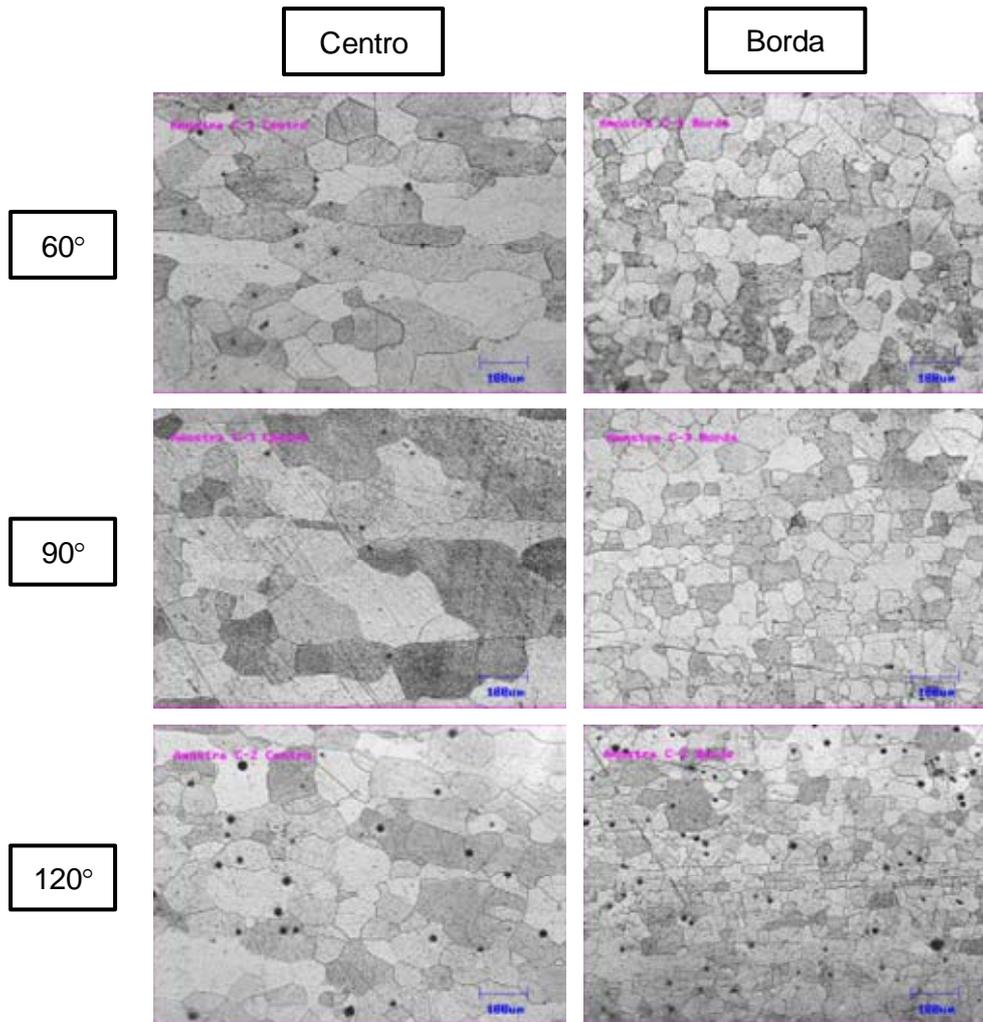
**Figura 5.** Variação de dureza na escala HRB da região da borda obtida em função do tempo de recozimento e do ângulo de dobramento.



**Figura 6.** Variação de dureza na escala HRB da região central obtida em função do tempo de recozimento e do ângulo de dobramento.

### 3.3 Análise da microestrutura

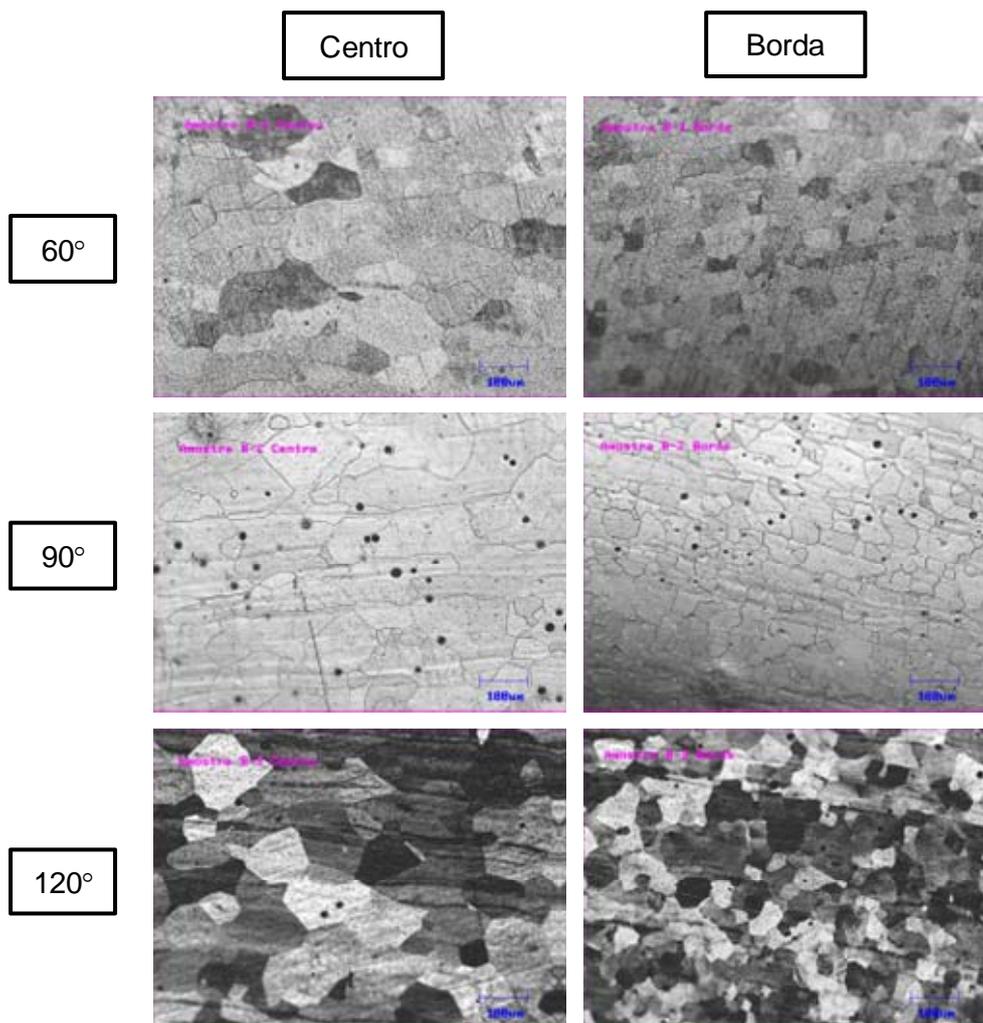
Algumas das fotomicrografias obtidas das amostras preparadas e atacadas são apresentadas na Figuras 7 e 8. Elas referem-se à região central e de borda para o tempo de encharque de 60 min e 75 min, respectivamente.



**Figura 7.** Micrografia da amostra recozida por 60 min à 860°C, após submetida ao dobramento livre. A foto da esquerda corresponde ao centro e a da direita a região da borda. Ampliação: 188X

Conforme observa-se na micrografia da Figura 7 e 8, o tamanho do grão no centro é maior do que na borda, fato este que dependendo da aplicação pode ser positivo ou negativo, pois o crescimento dos grãos recristalizados torna o metal mais dúctil já que a superfície específica dos contornos de grãos que servem como barreiras para a movimentação dos planos vão diminuindo à medida que o grão cresce.

Entretanto, de acordo com Coutinho,<sup>(8)</sup> o crescimento de grão conforme a aplicação pode ser indesejável, pois compromete a resistência mecânica e a tenacidade a baixas temperaturas, reduzindo a tensão de escoamento e elevando a temperatura de transição dúctil-frágil. Além disso, grãos grosseiros prejudicam a qualidade superficial de chapas estampadas, podendo provocar defeitos conhecidos como “casca de laranja” conforme comenta Colpaert<sup>(9)</sup> e Chiaverini.<sup>(10)</sup>



**Figura 8.** Micrografia da amostra recozida por 75 min à 860°C, após submetida ao dobramento livre. A foto da esquerda corresponde ao centro e a da direita a região da borda. Ampliação: 188X

Para algumas aplicações, como na construção civil, é necessário que o aço inoxidável ferrítico AISI 409 tenha uma determinada resistência mecânica após ser recozido. Para se conseguir uma resistência mecânica adequada, pode-se então controlar o tamanho de grão, e, portanto, a temperatura, o tempo de recozimento e principalmente a deformação plástica prévia do aço conforme comenta Reed-Hill,<sup>(3)</sup> Dieter,<sup>(11)</sup> Modenesi<sup>(12)</sup> e Padilha.<sup>(13,14)</sup>

#### 4 CONCLUSÕES

Através do presente trabalho realizado com o aço inoxidável AISI 409 foi possível comprovar na prática os principais efeitos do tratamento térmico de recozimento no que diz respeito à microestrutura e à dureza deste material.

Foi possível relacionar as variáveis de processo com o grau de deformação plástica inicial e o tempo de recozimento com variáveis de produto, tal como o tamanho de grão e a dureza. Os tamanhos de grãos das microestruturas obtidas com o tempo de recozimento apresentaram comportamento previsível conforme investigado na literatura consultada, especialmente na região da periferia da secção transversal dos corpos de prova.

Os efeitos microestruturais especialmente quanto ao tamanho médio dos grãos ferríticos do aço inoxidável AISI 409 demonstraram-se mais evidente na região da



periferia da secção transversal dos corpos de prova. As tensões e deformações após dobramento são máximas na região da periferia enquanto na região próxima ao centro estas são mínimas, sendo teoricamente nulas quando for exatamente coincidente com a linha neutra. Ressalta-se ainda que o recozimento isotérmico foi realizado em tempos relativamente longos e a temperatura constante de 860°C, portanto, tais resultados foram obtidos a uma temperatura suficientemente acima da temperatura mínima exigida para a recristalização do aço inoxidável AISI 409.

É hoje amplamente aceito que, num metal totalmente recristalizado, a força motriz para o crescimento dos grãos é devida a energia superficial dos contornos de grão. Quando os grãos crescem em tamanho e decrescem em número, a área do contorno de grão diminui e, assim, a energia total de superfície decresce.

Temos que observar que grãos grosseiros, quando na fabricação de peças por estampagem levam ao defeito mais conhecido como casca de laranja, daí a importância que se conhecer as propriedades do aço inoxidável AISI 409.

## REFERÊNCIAS

- 1 CALLISTER JR., W.D. **Ciências e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. Tradução da 5ª edição. Rio de Janeiro: Editora L.T.C., 2001.
- 2 ASKELAND, R.D & PHULÉ, P.P. **Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: editora Cengage learning; 2008.
- 3 REED-HILL, R.E. **Princípios de Metalurgia Física**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois S.A, p. 776, 1982;
- 4 ASM Handbook. **Heat Treating**. New York: Editora ASM, v.4, 1999.
- 5 GUY, A. G. **Ciência dos Materiais**. São Paulo: Editora LTC / EDUSP, 1980
- 6 SHACKELFORD, J.F. **Introduction to Materials Science for Engineers**, 5ª ed. New Jersey, USA: Prentice-Hall, Inc. 2000.
- 7 COUTINHO, C.B., PEDRAZA, J. e SILVA, E.M.P. **Tratamentos Térmicos dos Aços**. Belo Horizonte: editora da Fundação Cristiano Otoni, UFMG, 1979.
- 8 COUTINHO, C.B. **Materiais Metálicos para Engenharia**. Belo Horizonte: editora da Fundação Cristiano Otoni /UFMG, Belo Horizonte, 1994.
- 9 COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 4ª Ed. Revista e Atualizada. SP: Edgard Blucher, 2008, 672p.
- 10 CHIAVERINI, V. **Tratamento Térmico das Ligas Ferrosas**. São Paulo: editora ABM, 1987.
- 11 DIETER, George E. **Mechanical Metallurgy**. 4 ed., Singapura: editora McGraw-Hill, 1988.
- 12 MODENESI, P.J. **Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis**. São Paulo: SENAI-SP, v. 1, 2001.
- 13 PADILHA, A.F. **Materiais de Engenharia: Microestrutura e Propriedades**. 1ª ed. Curitiba: Editora Hemus, 2000.
- 14 PADILHA, A.F. e AMBRÓZIO, L. **Técnicas de Análise Microestrutural**. São Carlos: Editora Hemus, 1987.