



RECRISTALIZAÇÃO DO AÇO ABNT 1015 DEFORMADO POR PRENSAGEM EM CANAL ANGULAR¹

*Isnaldi Rodrigues de Souza Filho²
Maria José Ramos Sandim³
Maurício Ferrante⁴*

Resumo

Neste trabalho investigou-se a recristalização de um aço ABNT 1015 deformado por prensagem em canal angular (PCA). A deformação equivalente de von Mises (ϵ_{VM}) do material submetido a um único passe de PCA foi de 0,67. Após deformação o material foi recozido (sob vácuo) em diversas temperaturas até 800°C. A caracterização microestrutural foi feita por meio de medidas de microdureza Vickers e microscopias ótica (MO) e eletrônica de varredura (MEV). Observou-se que a recristalização do aço ABNT 1015 ocorre no intervalo 600-700°C. Além disso, observou-se que o início da recristalização é favorecido nas regiões adjacentes às colônias perlíticas.

Palavras-chave: Aços de baixo carbono; Prensagem em canal angular; Recristalização.

RECRYSTALLIZATION OF ABNT 1015 STEEL DEFORMED BY EQUAL CHANNEL ANGULAR EXTRUSION

Abstract

In this work the recrystallization of the ABNT 1015 steel deformed by equal channel angular extrusion (ECAP) was reported. The corresponding von Mises equivalent strain (ϵ_{VM}) of the material, after one unique ECAP pass was 0.67. After deformation the material was annealed (under vacuum) at several temperatures up to 800°C. The microstructural characterization was performed using Vickers microhardness tests and both optical (OM) and scanning electron (SEM) microscopies. Results showed that recrystallization of the ABNT 1015 steel takes place in the range 600-700°C. In addition, it was observed that the beginning of the recrystallization occurs, preferentially, at the vicinity of perlite colonies.

Key-words: low carbon steels; Equal channel angular extrusion; Recrystallization.

¹ *Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

² *Graduando em Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de Lorena.*

³ *Dr. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de Lorena, Departamento de Engenharia de Materiais.*

⁴ *Dr. Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia de Materiais.*



1 INTRODUÇÃO

Nas últimas duas décadas materiais com estrutura ultrafina de grãos obtidos por deformação plástica severa (DPS) têm sido amplamente investigados.^(1,2) Dentre as diversas técnicas de DPS, a prensagem por canal angular (PCA) é uma das mais utilizadas devido a sua facilidade de aplicação e capacidade de processamento de grandes quantidades de material. Por esta técnica, um tarugo de metal é pressionado através de uma matriz consistindo de dois canais de mesma seção transversal que se interceptam fazendo um ângulo Φ .^(3,4) O refinamento microestrutural do material durante PCA é uma consequência do intenso cisalhamento sofrido pelo material na intersecção entre os canais.⁽¹⁾ Para aumentar ainda mais a deformação sofrida pelo material este pode ser reintroduzido várias vezes na matriz, já que a sua seção transversal permanece a mesma.^(3,4)

A literatura mostra que existem muito mais trabalhos que reportam a aplicação da técnica de PCA a materiais com estrutura cfc (cúbica de face centrada) em comparação aos metais e ligas com estrutura ccc (cúbica de corpo centrado).^(4,5) Com relação ao ferro puro, poucos trabalhos foram reportados.⁽⁶⁻⁹⁾ Entretanto, ao final dos anos 90 surgiu um significativo interesse em se obter ligas à base de ferro severamente deformadas via PCA.⁽¹⁰⁾ Com relação aos aços de baixo carbono, diversos trabalhos foram reportados por Shin et al.⁽¹¹⁻¹³⁾ e Shin, Kim e Lavernia.⁽¹⁴⁾

Após a deformação por PCA, a microestrutura final de aços de baixo carbono consiste de microbandas alongadas, independentemente da rota escolhida.⁽¹⁵⁾ Diversos trabalhos também reportaram sobre o efeito do recozimento na microestrutura de aços de baixo carbono após um ou múltiplos passes de PCA.⁽¹⁴⁻¹⁹⁾ Frente ao recozimento, a microestrutura de materiais deformados por PCA, incluindo os aços de baixo carbono, é instável devido a sua natureza de não-equilíbrio.⁽¹⁶⁾ Isso implica que a recristalização e o crescimento de grão ocorrem facilmente nesses materiais, dependendo da temperatura de recozimento, diminuindo a resistência mecânica devido à estrutura ultrafina de grãos.⁽¹⁶⁾ Por outro lado, para aplicações práticas, aços de baixo carbono severamente deformados necessitam ser submetidos a tratamentos térmicos para alívio de tensões internas.⁽¹⁷⁾ Portanto, para uma maior utilização das vantagens obtidas a partir de uma estrutura ultrafina de grãos é preciso assegurar a estabilidade térmica dos materiais severamente deformados.⁽¹⁶⁾ A fim de se encontrar alternativas para isso, é importante investigar o comportamento dos aços de baixo carbono deformados por PCA durante o recozimento. No presente trabalho, investigou-se a recristalização de um aço ABNT 1015 submetido a um único passe de PCA, em particular definiu-se qual é a temperatura de início da recristalização e quais os sítios mais efetivos para a nucleação dos novos grãos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Utilizou-se um aço ABNT 1015 com composição nominal 0,125 %pC, 0,703 %pMn e 0,217 %pSi. Uma barra do material com seção circular de diâmetro 10 mm e comprimento 70 mm foi prensada em temperatura ambiente numa matriz com canal angular cujo ângulo de intersecção é de 120°. A Figura 1 mostra um corte esquemático da matriz de PCA utilizada. Antes da deformação o material foi recozido em 700°C por 30 min. A deformação equivalente de von Mises (ϵ_{VM}) sofrida pelo material foi de 0,67.⁽²⁰⁾ Após a prensagem, o material foi cortado na forma de discos com espessura de 3 mm.

As amostras obtidas foram então recozidas isotermicamente (sob vácuo) em diversas temperaturas entre 300°C e 800 °C por 15 min. Para 600°C e 700 °C foram feitos tratamentos térmicos adicionais variando-se o tempo de recozimento de 5 min até 60 min. Medidas de microdureza Vickers nas amostras foram realizadas com cargas de 100 g na seção perpendicular à direção transversal. Imagens da microestrutura foram obtidas por meio de microscopias ótica (MO) e eletrônica de varredura (MEV).

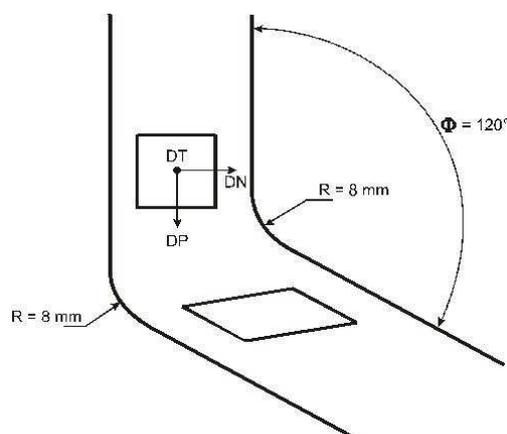


Figura 1. Corte esquemático da matriz de PCA utilizada. Na figura as direções DP, DN e DT representam a direção de prensagem, a direção normal à de prensagem e a direção transversal à de prensagem, respectivamente.

3 RESULTADOS

A Figura 2 mostra uma imagem da microestrutura do aço ABNT 1015 antes de passar pelo canal da matriz. Essa imagem foi obtida de um plano perpendicular à direção transversal. Nela é possível observar uma estrutura recristalizada e colônias perlíticas alinhadas. A Figura 3 mostra a microestrutura do material após deformação por um passe de PCA, a partir da qual se observa a presença de grãos fragmentados e de colônias perlíticas.

A curva de amolecimento do aço ABNT 1015 após um passe de PCA é mostrada na Figura 4. Nota-se que a dureza permanece praticamente constante até cerca de 500°C. A partir dessa figura, foi possível definir a faixa de temperaturas para o estudo da recristalização neste aço. A Figura 5 compara a cinética de amolecimento do material investigado recozido em 600°C e 700 °C. O amolecimento é mais pronunciado a 700°C e a recristalização praticamente se encerra após cerca de 10 min.

Com o objetivo de investigar o processo de recristalização do aço ABNT 1015, tendo em vista as curvas de amolecimento mostradas nas Figuras 4 e 5, foram obtidas imagens da microestrutura após o recozimento em 600°C em diversos tempos. Na Figura 6 é possível visualizar a microestrutura da amostra recozida em 600°C por 15 min. A Figura 6a mostra uma vista geral da microestrutura. Nota-se que a microestrutura encontra-se parcialmente recristalizada e os novos grãos encontram-se distribuídos de modo relativamente uniforme. Detalhes importantes sobre os mecanismos de nucleação são evidenciados na Figura 6b. É possível notar que os novos grãos surgem próximos às colônias perlíticas, sugerindo a ocorrência de nucleação estimulada por partículas (PSN).⁽²¹⁾ Após 1 h nesta mesma temperatura, a recristalização é completa (Figura 7). Nesta figura é possível identificar os grãos



recristalizados e as lamelas de cementita, algumas fragmentadas, outras parcialmente esferoidizadas.

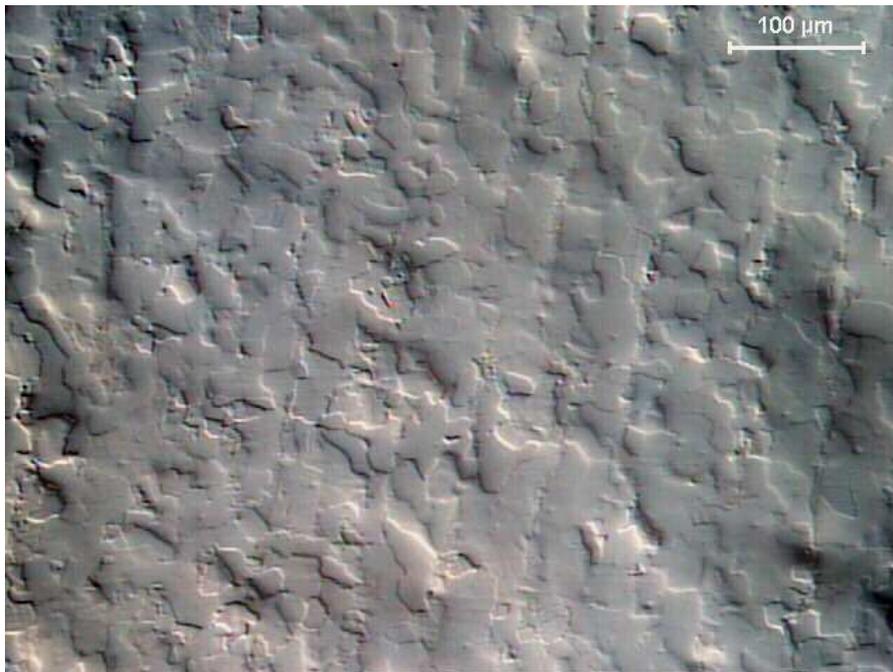


Figura 2. Microestrutura do material de partida. Imagem de um plano da amostra, perpendicular à direção transversal (MO).

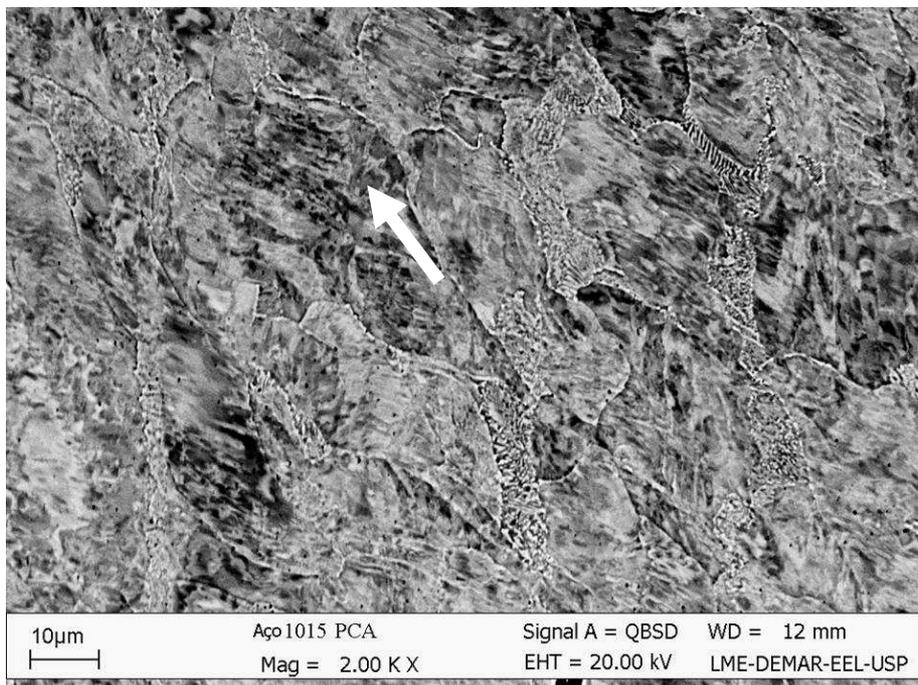


Figura 3. Microestrutura do aço ABNT 1015 deformado por um passe de PCA (MEV). A seta indica a direção de prensagem (DP).

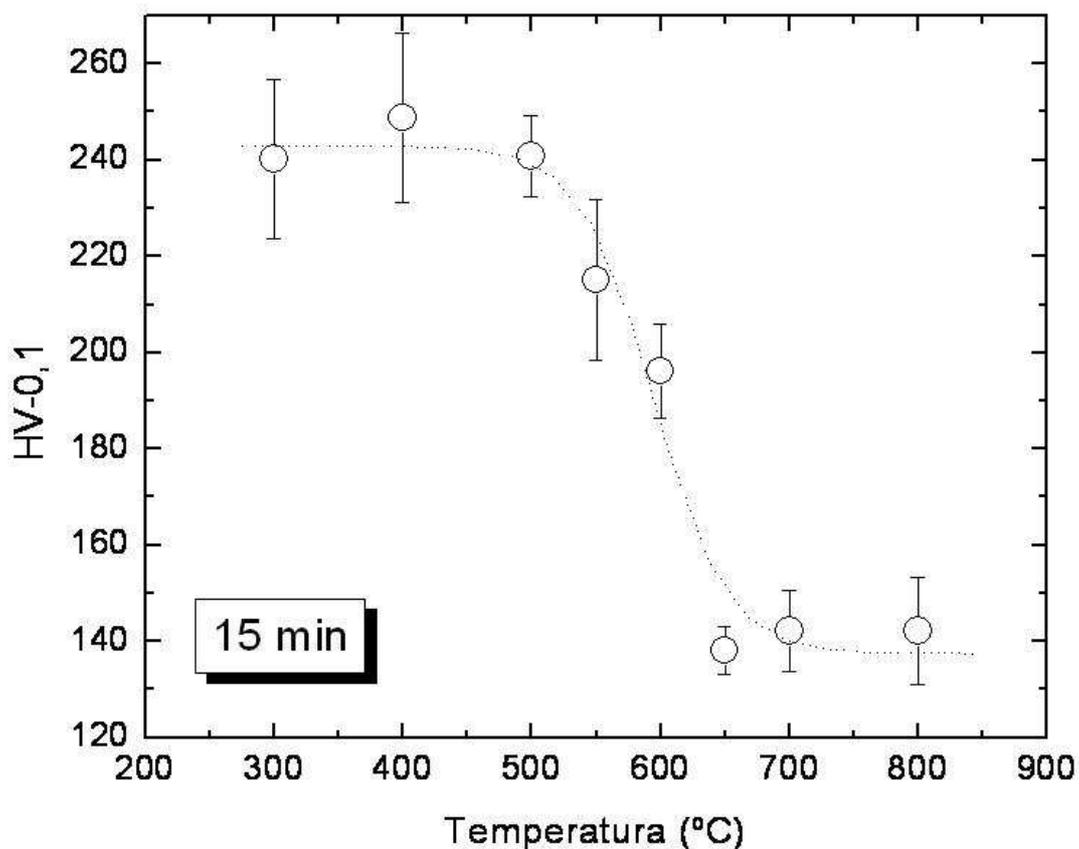


Figura 4. Curva de amolecimento do aço ABNT 1015 deformado por PCA (patamar de 15 min).

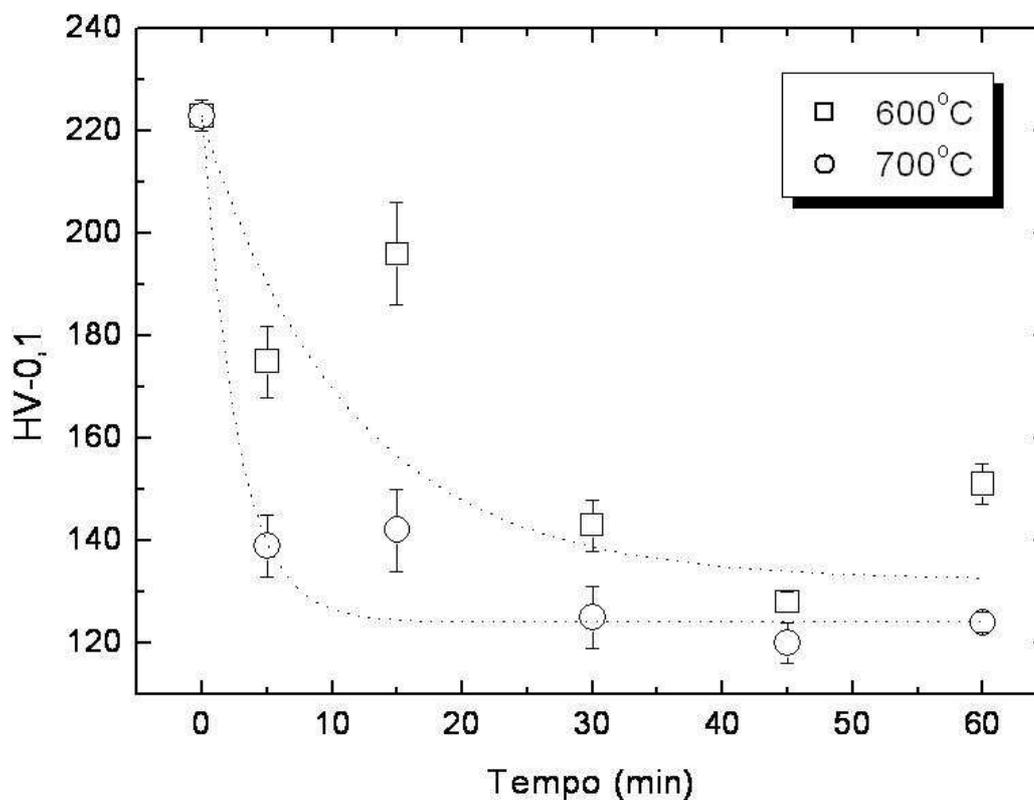
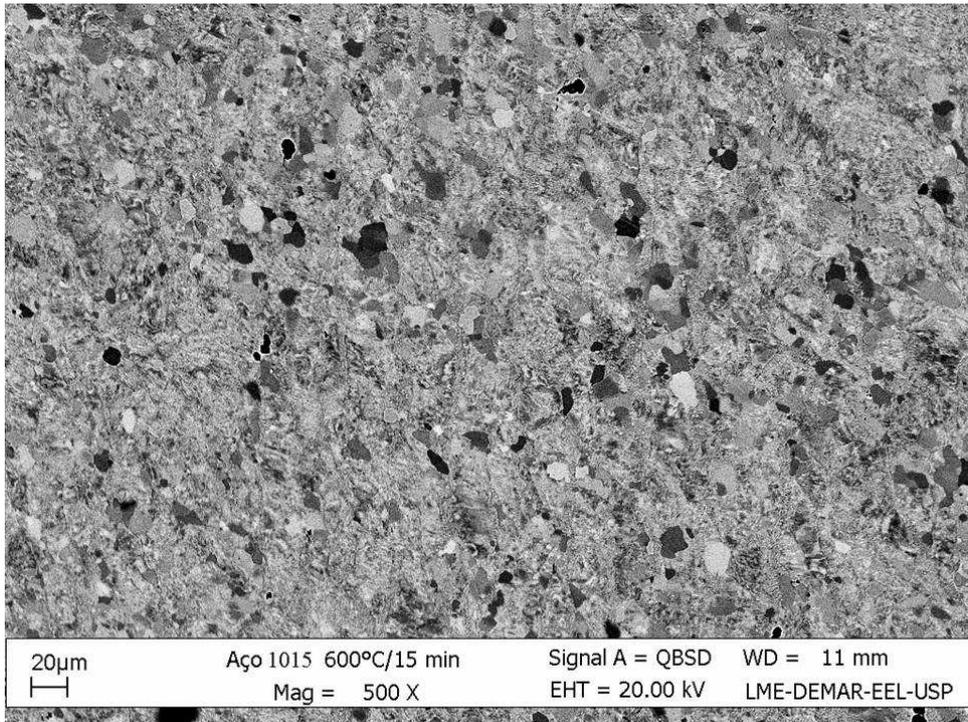
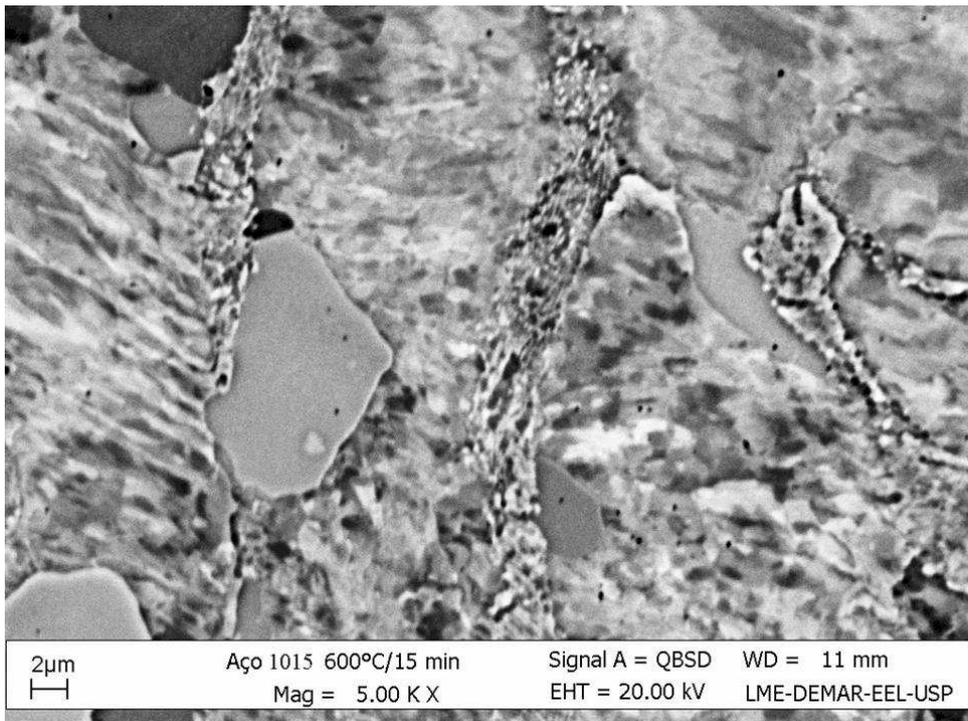


Figura 5. Cinética de amolecimento do aço ABNT 1015 deformado por PCA recozido nas temperaturas de 600 e 700°C.



(a)



(b)

Figura 6. Microestruturas do aço ABNT 1015 deformado por PCA e recozido em 600°C por 15 min obtidas sob duas magnificações (a) 500 X e (b) 5.000 X (MEV, elétrons retroespalhados).

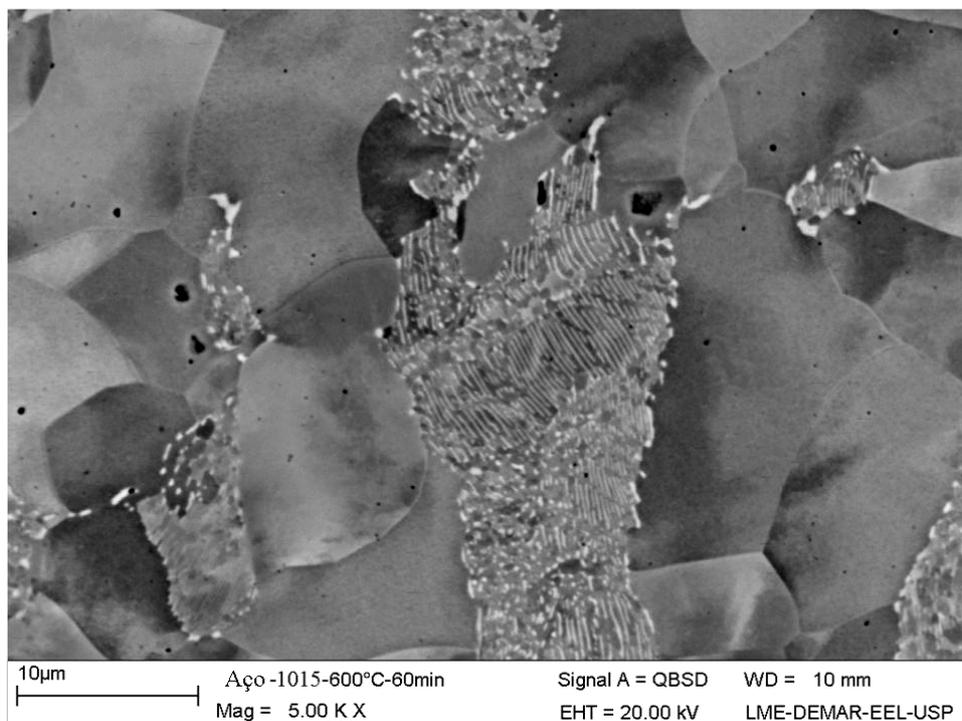


Figura 7. Microestrutura do aço ABNT 1015 deformado por PCA e recozido em 600°C por 1 h evidenciando as colônias perlíticas e os grãos recristalizados (MEV, elétrons retroespalhados).

4 DISCUSSÃO

Na Figura 2 observou-se que o material de partida apresenta grãos grosseiros, sendo possível identificar a presença de colônias perlíticas na microestrutura. Esta microestrutura é típica de aços de baixo carbono laminados a quente. O recozimento prévio em 700°C por 30 min promoveu o crescimento de grão no material. O tamanho médio de grão, neste caso, é da ordem de 20 μm -30 μm. Com relação ao material deformado, a Figura 3 mostra a presença de grãos fragmentados e ligeiramente alinhados com a direção de prensagem. A extensão da fragmentação e a natureza da subestrutura variam de grão para grão evidenciando efeitos de orientação.

A curva de amolecimento mostrada na Figura 4 mostra que a recuperação do aço ABNT 1015 deformado por um passe de PCA ocorre em temperaturas de até 500°C. Entre 500 e 700°C observou-se uma queda acentuada da microdureza, indicando a ocorrência de recristalização estática no material. Com base nestas informações, foi possível realizar um estudo cinético no campo ferrítico em duas temperaturas distintas (600°C e 700 °C).

A Figura 5 compara a cinética de amolecimento do material investigado recozido em 600°C e 700 °C. Em 700°C o aço ABNT 1015 atinge a completa recristalização já nos primeiros 10 min de recozimento ao passo que em 600°C a saturação da curva de amolecimento somente é atingida após 60 min de recozimento. O maior espalhamento dos resultados experimentais em 600°C sugere que a microestrutura encontra-se mais heterogênea, ou seja, as medidas refletem a coexistência de regiões recuperadas e recristalizadas.

Características do início da recristalização podem ser observadas a partir da Figura 6, a qual mostra a microestrutura do material recozido em 600°C por 15 min. Novos grãos recristalizados podem ser observados distribuídos de modo uniforme em toda a microestrutura, como mostrado na Figura 6a. Sob maior ampliação,



entretanto, observa-se que o início da recristalização é favorecido nas regiões adjacentes às colônias perlíticas (Figura 6b). As partículas de cementita favorecem a formação de zonas de deformação ao seu redor propiciando um aumento local da energia armazenada na forma de discordâncias. Durante o recozimento, subgrãos se formam e atingem desorientações superiores a 15° atuando como núcleos da recristalização. Estes contornos têm maior dificuldade de migrar para o interior das colônias perlíticas e acabam consumindo a matriz dos grãos adjacentes. O comportamento destas colônias perlíticas frente ao recozimento não será discutida no presente trabalho. Técnicas complementares de caracterização como a difração de elétrons retroespalhados (EBSD) poderiam contribuir para este entendimento. Ao término da recristalização, por exemplo, em 600°C por 1 h, como mostrado na Figura 7, observa-se a presença de grãos ferríticos recristalizados e colônias perlíticas fragmentadas. As imagens de elétrons retroespalhados no microscópio eletrônico de varredura permitem visualizar estruturas dentro destas colônias (contraste por orientação). Ainda assim, é possível notar que estas estruturas de grãos são mais finas. De acordo com Shin et al.,⁽¹⁸⁾ isso se deve ao fato de que, na fase perlítica, as partículas de cementita esferoidizadas atuam como uma barreira à livre movimentação dos contornos de grão.

5 CONCLUSÃO

Com base no estudo da recristalização de um aço ABNT 1015 deformado por um único passe de PCA, as principais conclusões obtidas foram:

- a recristalização do material ocorre entre 600 e 700°C ;
- em 700°C o material atinge a completa recristalização já nos primeiros 10 min de recozimento ao passo que em 600°C a saturação da curva de amolecimento somente é atingida após 60 min de recozimento; e
- a recristalização ocorre de modo relativamente uniforme e a nucleação é favorecida nas regiões adjacentes às colônias perlíticas.

Agradecimentos

Os autores agradecem Hugo R. Z. Sandim (DEMAR-EEL-USP) por valiosas discussões. Isnaldi R. Souza Filho agradece ao CNPq-PIBIC pela Bolsa de Iniciação Científica.

REFERÊNCIAS

- 1 AIDA, T.; MATSUKI, K.; HORITA, Z.; LANGDON, T. G. Estimating the equivalent strain in equal channel angular pressing. *Scripta Materialia*, v. 44, p. 575–579, 2001.
- 2 FUKUDA, Y.; OH-ISHI, K.; FURUKAWA, M.; HORITA, Z.; LANGDON, T. G. The application of equal-channel angular pressing to an aluminum single crystal. *Acta Materialia*, v. 52, p. 1387-1395, 2004.
- 3 LI, S.; BEYERLEIN, I. J.; BOURKE, M. A. M. Texture formation during equal channel angular extrusion of fcc and bcc materials: comparison with simple shear. *Materials Science and Engineering A*, v. 394, p.66-77, 2005.
- 4 SANDIM, H. R. Z.; BERNARDI, H. H.; VERLINDEN, B.; RAABE, D. Equal channel angular extrusion of niobium single crystals. *Materials Science and Engineering A*, v. 467, p. 44-52, 2007.



- 5 LI, S. Y.; GAZDER, A. A.; BEYERLEIN, I. J.; PERELOMA, E. V.; DAVIES, C. H. J. Effect of processing route on microstructure and texture development in equal channel angular extrusion of interstitial free steel. *Acta Materialia*, v. 54, p. 1087-1100, 2006.
- 6 HAN, B. Q.; LAVERNIA, E. J.; MOHAMED, F. A. Dislocation structure and deformation in iron processed by equal-channel-angular pressing. *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 35A, p. 1343-1350, 2004.
- 7 SU-RYSZKOWSKA, M.; WEJRZANOWSKI, T.; PAKIE, Z.; KURZYD, K. J. Microstructure of ECAP severely deformed iron and its mechanical properties. *Materials Science and Engineering A*, v. 369, p.151-156, 2004.
- 8 BOLMARO, R. E.; RENZETTI, R. A.; SANDIM, M. J. R.; SANDIM, H. R. Z.; SIGNORELLI, J. W.; FERRANTE, M. ECAP of Fe: experiments and simulations of the in-elbow textures. *Zeitschrift für Kristallographie*, v. 30, p.117-122, 2009.
- 9 RENZETTI, R. A.; SANDIM, M. J. R.; SANDIM, H. R. Z.; HARTWIG, K. T.; BERNARDI, H. H.; RAABE, D. EBSD characterization of pure iron deformed by ECAE. *Materials Science Forum*, v. 638-642, p. 1995-2000, 2010.
- 10 UKUDA, Y; OH-ISHI, K; HORITA, Z; LANGDON, T. G. Processing of a low-carbon steel by equal-channel angular pressing. *Acta Materialia*, v. 50, p. 1359-1368, 2002.
- 11 SHIN, D. H.; KIM, B. C.; KIM, Y. S.; Park, K. T. Microstructural evolution in a commercial low carbon steel by equal channel angular pressing. *Acta Materialia*, v. 48, p. 2247-2255, 2000.
- 12 SHIN, D. H.; SEO, C. W.; KIM, J.; Park, K. T.; CHOO, W. Y. Microstructures and mechanical properties of equal-channel angular pressed low carbon steel. *Scripta Materialia*, v. 42, p. 695-699, 2000.
- 13 SHIN, D. H.; KIM, I.; KIM, J.; PARK, K. T. Grain refinement mechanism during equal-channel angular pressing of a low-carbon steel. *Acta Materialia*, v. 49, p. 1285-1292, 2001.
- 14 SHIN, D. H.; KIM, Y. S.; LAVERNIA, E. J. Formation of fine cementite precipitates by static annealing of equal-channel angular pressed low-carbon steels. *Acta Materialia*, v. 49, p. 2387-2393, 2001.
- 15 EDDAHBI, M.; RAUCH, E. F. Texture and microstructure of ultra low carbon steel processed by equal channel angular extrusion. *Materials Science and Engineering A*, v. 502, p. 13-24, 2009.
- 16 SHIN, D. H.; PARK, J. J.; CHANG, S. Y.; LEE, Y. K.; PARK, K. T. Ultrafine grained low carbon steels fabricated by equal channel angular pressing: microstructures and tensile properties. *ISIJ International*, v. 42, p. 1490-1496, 2002.
- 17 PARK, K. T.; KIM, Y. S.; LEE, J. G.; SHIN, D. H. Thermal stability and mechanical properties of ultrafine grained low carbon steel. *Materials Science and Engineering A*, v. 293, p. 165-172, 2000.
- 18 SHIN, D. H.; KIM, B. C.; PARK, K. T.; CHOO, W. Y. Microstructural changes in equal channel angular pressed low carbon steel by static annealing. *Acta Materialia*, v. 48, p. 3245-3252, 2000.
- 19 PARK, K. T.; SHIN, D. H. Annealing behavior of submicrometer grained ferrite in a low carbon steel fabricated by severe plastic deformation. *Materials Science and Engineering A*, v. 334, p. 79-86, 2002.
- 20 IWAHASHI, Y.; WANG, J.; HORITA, Z.; NEMOTO, M.; LANGDON, T. G. Principle of equal-channel angular pressing for the processing of ultra-fine grained materials. *Scripta Materialia*, v. 35, n. 2, p. 143-146, 1996.
- 21 HUMPHREYS, F.J.; HATHERLY, M. Recrystallization and related annealing phenomena. 2. ed., Elsevier Ltd, 2004.