

# ANÁLISE SUBESTRUTURAL DE AMOSTRAS DE AÇO COM BAIXO TEOR DE CARBONO SUBMETIDAS A PROCESSOS DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA<sup>1</sup>

*Elaine Carballo Siqueira Corrêa<sup>2</sup>  
Maria Teresa Paulino Aguilár<sup>3</sup>  
Waldemar Alfredo Monteiro<sup>4</sup>  
Paulo Roberto Cetlin<sup>3</sup>*

## **Resumo**

Neste trabalho, os aspectos subestruturais de amostras de aço com baixo teor de carbono tracionadas submetidas previamente a operações de deformação plástica distintas foram analisados. Quatro seqüências de processamento foram consideradas no estudo: tração, torção – tração, trefilação – tração e trefilação – torção – tração. A avaliação das peças foi conduzida através de microscopia eletrônica de transmissão. Os resultados foram comparados àqueles observados antes da tração do metal. Desenvolvimento de arranjos subestruturais similares após o ensaio mecânico final foram verificados em todas as amostras, independente da ocorrência e do tipo de pré-deformação.

**Palavras-chave:** Microscopia eletrônica de transmissão; Caminho de deformação; Subestrutura.

## **SUBSTRUCTURAL ANALYSIS OF LOW CARBON STEEL SAMPLES SUBJECTED TO PLASTIC DEFORMATION PROCESSES**

## **Abstract**

In this paper, the substructural aspects of low carbon steel samples subjected to several plastic deformation operations followed by tension have been analyzed. Four sequences of processing have been carried out in the investigation: pure tension, cyclic torsion – tension, single-pass drawing – tension and single-pass drawing – cyclic torsion – tension. The evaluation of the material has been conducted through transmission electron microscopy. The results have been compared with those related to the metal before the tensile test. Although different types and magnitudes of prestraining have been conducted in the metal, similar dislocation arrangements were observed in all samples subjected to tension.

**Key-words:** Transmission electron microscopy; Strain path; Substructure.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.*

<sup>2</sup> *Dr., Bolsista de Pós - Doutorado do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais - UFMG, BH - MG. elaine@demet.ufmg.br*

<sup>3</sup> *Dr., Professor do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção - UFMG, BH - MG.*

<sup>4</sup> *Dr., Pesquisador e Professor do Departamento de Engenharia de Materiais, IPEN, SP - SP.*

## 1 INTRODUÇÃO

O estudo do comportamento mecânico de metais submetidos a operações de deformação plástica a frio envolve, entre outros fatores, a análise dos aspectos subestruturais do material durante e após o processamento. Para o caso da deformação monotônica, a relação entre a resposta do metal ao esforço aplicado e as alterações internas associadas à mesma representam uma área de pesquisa já bem investigada, especialmente em materiais com estrutura cristalina cúbica de faces centradas.<sup>(1)</sup>

Por outro lado, considerando operações de deformação plástica sequenciais, ou seja, aquelas caracterizadas por mudanças no caminho de deformação,<sup>(2-12)</sup> podendo envolver inclusive esforços cíclicos, ainda que diversos trabalhos venham sendo desenvolvidos, a quantidade de variáveis no estudo (como, por exemplo, aspectos estruturais do próprio metal, condições de operação, tipo de processamento) e a diversidade de resultados apresentados (transientes no encruamento, amaciamento por deformação, entre outros) sugere a necessidade de mais investigações sobre o tema.

Dentro deste contexto, os aspectos subestruturais do aço com baixo teor de carbono trefilado em um passe e/ou torcido ciclicamente e posteriormente tracionado são comparados àqueles observados no metal deformado somente por tração através de microscopia eletrônica de transmissão.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

**Material** – Neste trabalho foram utilizadas barras de aço com baixo teor de carbono, cuja composição química (% em peso) pode ser observada na Tabela I. Testes de dureza Vickers e ensaios metalográficos foram realizados para o controle da homogeneidade das amostras e determinação dos parâmetros de tratamento térmico. Após a confecção, os corpos de prova (diâmetro = 6,40 mm e comprimento = 390 mm) foram recozidos à 850°C durante 2400 s à vácuo, apresentando valor de dureza final = 97±7 HV e tamanho de grão = 39,32±2,58 μm.

**Tabela 1** - Composição química (% em peso) das barras de aço com baixo teor de carbono utilizadas no trabalho.

C	Mn	Si	P	S
0,12	0,47	0,07	0,016	0,013

**Trefilação** – A trefilação das barras foi conduzida em um passe em uma banca hidráulica Bestlé, a uma velocidade de 17 mm/s. O semi-ângulo de fieira  $\alpha$  e a redução de área  $r$  utilizados nos experimentos foram 8° e 20%, respectivamente. Neste caso, a deformação externa ou geométrica no processo  $\varepsilon$  foi de ~ 22,3%. Antes da operação, todas as peças foram lubrificadas com bissulfeto de molibdênio.

**Torção** – As barras recozidas e trefiladas foram torcidas ciclicamente em uma bancada de torno especialmente adaptada para o processo, cujos detalhes foram descritos previamente.<sup>(2)</sup> Foram considerados em todos os experimentos 10 ciclos de torção com amplitude de deformação de 2,8%, correspondendo a um ângulo de 160° para as amostras recozidas e 180° para as amostras trefiladas. A deformação efetiva após a operação correspondeu a ~ 65%.

**Tração** – Os ensaios de tração foram realizados nos corpos de prova recozidos, torcidos, trefilados e trefilados torcidos, em uma máquina de ensaios mecânicos Instron modelo 4482 com sistema de controle e aquisição de dados Série IX. A velocidade dos testes foi de  $5 \times 10^{-1}$  mm/s, levando a uma taxa de deformação inicial de  $2 \times 10^{-3}$  s<sup>-1</sup>. A magnitude de deformação nos ensaios variou de acordo com cada amostra utilizada, correspondendo ao máximo de deformação uniforme na tração das mesmas: metal recozido ~ 22%, metal torcido ciclicamente ~ 20%, metal trefilado ~ 1,2% e metal trefilado torcido ciclicamente ~ 2%.

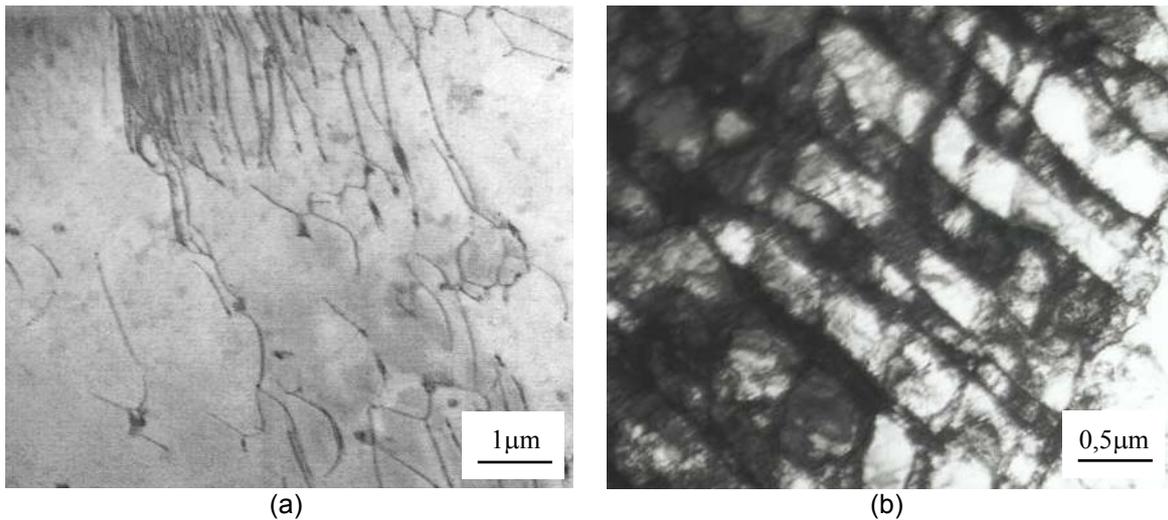
**Microscopia Eletrônica de Transmissão** – A análise por microscopia eletrônica de transmissão foi conduzida em um microscópio JEOL JEM 200C, a uma tensão de aceleração de 200 kV. Foram observadas amostras recozidas, torcidas, trefiladas e trefiladas torcidas após a tração, preparadas a partir de regiões próximas à superfície das barras deformadas plasticamente, no sentido longitudinal das mesmas.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

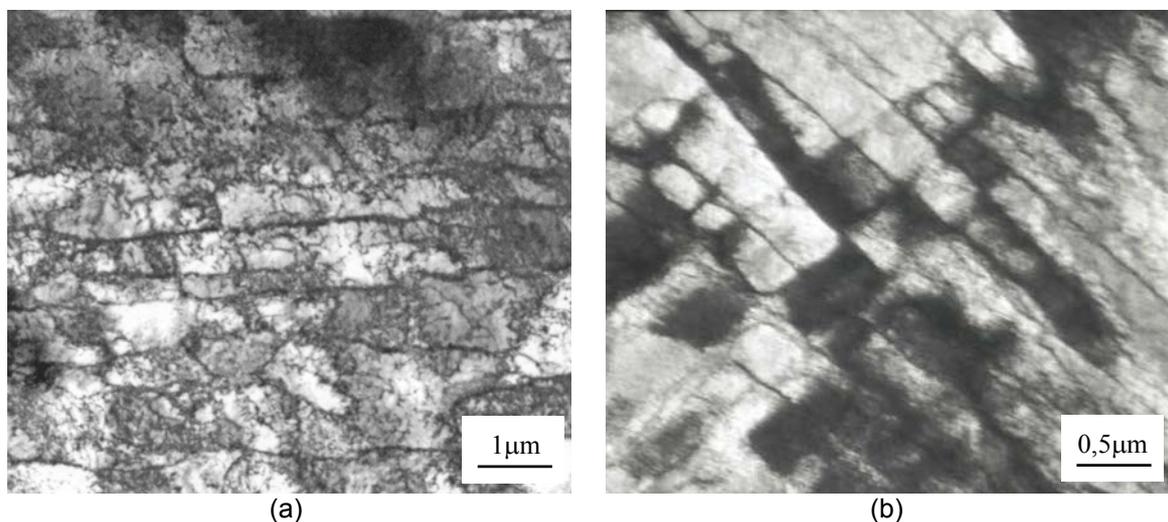
Nas Figuras 1 a 4 podem ser observados os aspectos subestruturais das amostras de aço com baixo teor de carbono deformadas em diferentes processos e magnitudes submetidas posteriormente à tração. São exibidas também as imagens do material antes destes ensaios mecânicos, avaliadas anteriormente em outro trabalho, complementando a presente análise.<sup>(3,13)</sup>

Em relação ao metal apenas tracionado (Figura 1(b)) observa-se que, a partir de uma quantidade relativamente pequena de discordâncias, distribuídas de maneira aleatória (material recozido – Figura 1(a)), a tração leva ao desenvolvimento de uma estrutura com elevada densidade desses defeitos lineares, organizados como subgrãos ou blocos de células, delimitados por paredes de alta densidade de discordâncias (*dense dislocation walls* – *DDW*) e microbandas.<sup>(14)</sup> Neste caso, no interior dos subgrãos ou blocos, estrutura celular um pouco difusa e regiões de emaranhados são verificadas, além de arranjos irregulares situados de modo perpendicular à distribuição descrita inicialmente.

O ensaio de tração da amostra torcida (Figura 2(b)) também levou a uma alteração considerável na configuração interna do material em comparação com os resultados do mesmo apenas deformado ciclicamente (Figura 2(a)). Presença de paredes de alta densidade de discordâncias e microbandas circundando células e emaranhados é verificada no metal torcido. Após a tração, esses arranjos estendidos parecem se tornar mais regulares, definidos e alinhados, com blocos de células mais finos. Essa estrutura é relativamente similar à que foi exibida pelo aço conformado exclusivamente por tração (Figura 2(b)), apresentando também células de discordâncias um pouco difusas e emaranhados no interior, além de arranjos estabelecidos transversalmente às *DDWs*.

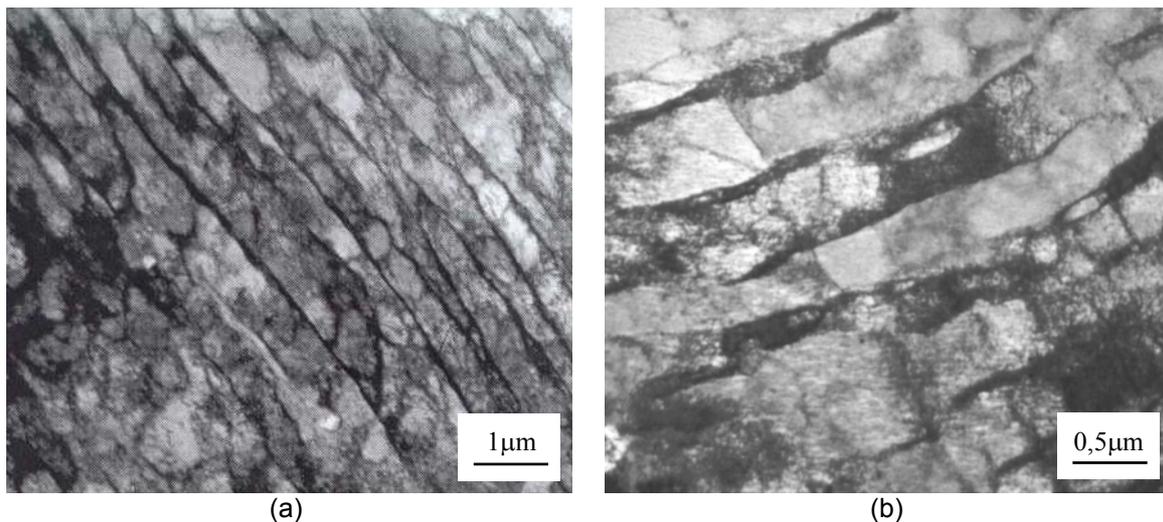


**Figura 1** – Aspectos subestruturais do aço com baixo teor de carbono - microscopia eletrônica de transmissão: (a) metal recozido antes da tração (3,13) e (b) após a tração.



**Figura 2** – Aspectos subestruturais do aço com baixo teor de carbono - microscopia eletrônica de transmissão: (a) metal torcido ciclicamente antes da tração<sup>(3,13)</sup> e (b) após a tração.

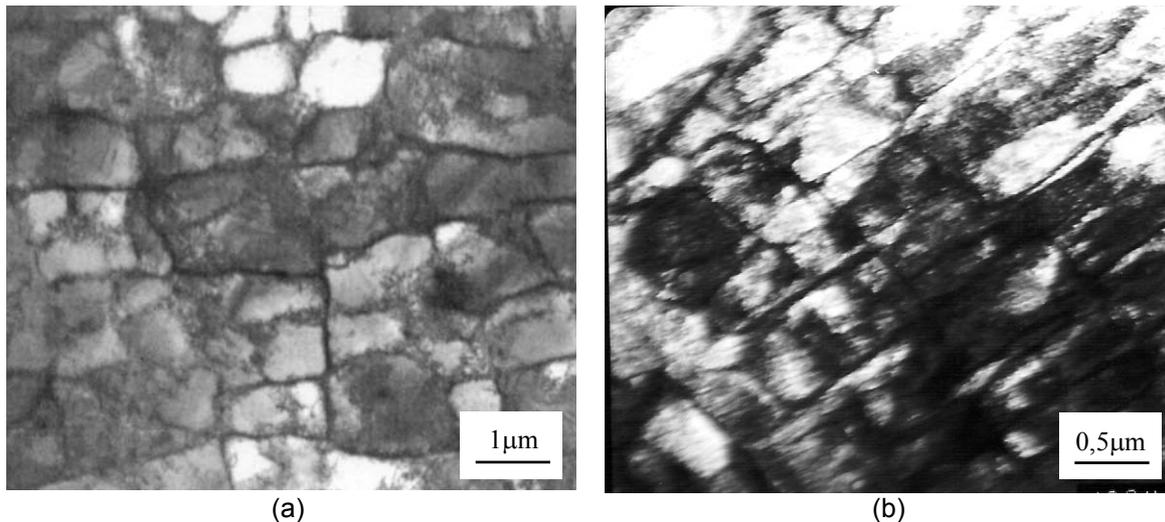
O metal trefilado (Figura 3(a)) exibe inicialmente um arranjo subestrutural composto de blocos de células ou subgrãos alongados com paredes de alta densidade de discordâncias e microbandas. Ainda que a natureza e também a magnitude da deformação sejam distintas, essas configurações são relativamente parecidas com aquelas observadas para as amostras tracionadas e torcidas tracionadas. Neste caso, entretanto, a estrutura celular formada dentro deste arranjo é verificada de uma maneira mais clara, com paredes de células definidas e uma menor quantidade de emaranhados, além da aparente ausência de bandas situadas perpendicularmente às demais estruturas. Após a tração (Figura 3(b)), em geral, a presença dos arranjos desenvolvidos na peça trefilada é ainda observada. No entanto, a estrutura celular interna aos blocos de células já não é tão definida e arranjos transversais àqueles formados anteriormente são mostrados, indicando similaridade com a distribuição de discordâncias das peças somente tracionada e torcida tracionada.



**Figura 3** – Aspectos subestruturais do aço com baixo teor de carbono - microscopia eletrônica de transmissão: (a) metal trefilado antes da tração<sup>(3,13)</sup> e (b) após a tração.

A torção cíclica do aço trefilado (Figura 4(a)) levou à formação de uma configuração de discordâncias com aspecto “quadriculado” (*chess-board like microstructure*),<sup>(11,12)</sup> composta por subgrãos com reduzida quantidade de discordâncias e áreas de emaranhado em seu interior. Comparando essa estrutura com aquelas relativas ao material trefilado (Figura 3(a)) e ao material apenas torcido (Figura 2(a)), verifica-se maior (ou alguma) similaridade com a última, ou seja, com aquela associada ao último tipo de esforço empregado. Comportamento análogo é observado com a tração do metal trefilado torcido ciclicamente (Figura 4(b)). O arranjo subestrutural desenvolvido no ensaio mecânico final é relativamente semelhante aos demais observados para o aço tracionado previamente deformado em outras operações ou apenas recozido.

A análise das imagens apresentadas nas Figuras 1 a 4 indica que, ainda que o metal tenha sido submetido previamente a distintas operações de conformação mecânica e, neste caso, com diferentes magnitudes de deformação (de maneira individual ou acrescentando os valores de cada etapa), ao ser processado posteriormente por tração, o arranjo subestrutural desenvolvido tende para aquele típico do último tipo de deformação utilizada. Resultados similares em termos de comportamento mecânico<sup>(4-6)</sup> e distribuição de discordâncias<sup>(7-10)</sup> foram verificados para outros metais e processos em investigações associadas aos efeitos de mudanças no caminho de deformação no encruamento subsequente de materiais deformados.



**Figura 4** – Aspectos subestruturais do aço com baixo teor de carbono - microscopia eletrônica de transmissão: (a) metal trefilado e torcido ciclicamente antes da tração<sup>(3,13)</sup> e (b) após a tração.

#### 4 CONCLUSÕES

Os resultados mostraram o desenvolvimento de arranjos subestruturais semelhantes em amostras de aço com baixo teor de carbono após a tração processadas previamente com distintas operações de conformação e magnitudes de deformação. A distribuição de discordâncias parece evoluir para aquela típica do último tipo de esforço mecânico aplicado.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro ao trabalho e ao CDTN/CNEN (Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear/Comissão Nacional de Energia Nuclear) e à Belgo Mineira Bekaert Artefatos pelo recozimento dos corpos de prova e pela doação das fieiras de trefilação, respectivamente.

#### REFERÊNCIAS

- 1 KASCHNER, G.C., GIEBELING, J.C. Evolution of Dislocation Glide Kinetics During Cyclic Deformation of Copper. *Acta Materialia*, v. 50, p. 653-662, 2002.
- 2 AGUILAR, M.T.P., CETLIN, P.R., VALLE, P.E., CORRÊA, E.C.S. Influence of Strain Path in the Mechanical Properties of Drawn Aluminum Alloy Bars. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 80/81, p. 376-379, 1998.
- 3 CORRÊA, E.C.S., MELO FILHO, L.D.R., AGUILAR, M.T.P., MONTEIRO, W.A., CETLIN, P.R. The Effect of Cyclic Straining on the Drawing Stress of Low Carbon Steel Bars. *Materials Chemistry and Physics*, v. 94, p. 376-381, 2005.
- 4 WAGONER, R.H., LAUKONIS, J.V. Plastic Behavior of Aluminum-Killed Steel Following Plane-Strain Deformation. *Metallurgical Transactions*, v. 14A, p. 1487-1495, July 1983.
- 5 DOUCET, A.B., WAGONER, R.H. Transient Tensile Behavior of Interstitial-Free Steel and 70/30 Brass Following Plane-Strain Deformation. *Metallurgical Transactions*, v. 20A, p. 1483-1493, August 1989.

- 6 WILSON, D.V., ZANDRAHIMI, M., ROBERTS, W.T. Effects of Changes in Strain Path on Work Hardening in Cp Aluminium and an Al-Cu-Mg Alloy. *Acta Metallurgica et Materialia*, v. 38, n. 2, p. 215-226, 1990.
- 7 FERNANDES, J.V., VIEIRA, M.F. Strain Distribution in Copper Tensile Specimens Prestrained in Rolling. *Metallurgical and Materials Transactions*, v. 28A, p. 1169-1778, May 1997.
- 8 VIEIRA, M.F., FERNANDES, J.V. Complex Strain Paths in Polycrystalline Copper: Microstructural Aspects. *Materials Research*, v. 2, n. 3, p. 185-189, 1999.
- 9 RAUCH, E.F., GRACIO, J.J., BARLAT, F., LOPES, A.B., DUARTE, J.F. Hardening Behavior and Structural Evolution Upon Strain Reversal of Aluminum Alloys. *Scripta Materialia*, v. 46, p. 881-886, 2002.
- 10 BARLAT, F., FERREIRA DUARTE, J.M., GRACIO, J.J., LOPES, A.B., RAUCH, E.F. Plastic Flow for Non-Monotonic Loading Conditions of an Aluminum Alloy Sheet Sample. *International Journal of Plasticity*, v. 19, p. 1215-1244, 2003.
- 11 RICHERT, M., KORBEL, A. The Effect of Strain Localization on Mechanical Properties of Al99,992 in the Range of large Deformation. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 53, p. 331-340, 1995.
- 12 RICHERT, M., MCQUEEN, H.J., RICHERT, J. Microband Formation in Cyclic Extrusion Compression of Aluminum. *Canadian Metallurgical Quarterly*, v. 37, n. 5, p. 449-457, 1998.
- 13 AGUILAR, M.T.P., CORRÊA, E.C.S, MONTEIRO, W.A., CETLIN, P.R. The Effect of Cyclic Torsion on the Dislocation Structure of Drawn Mild Steel. *Materials Research*, v. 9, p. 345-348, 2006.
- 14 BAY, B., HANSEN, N., HUGHES, D.A., KUHLMANN-WILSDORF, D. Evolution of FCC Deformation Structures in Polyslip. *Acta Metallurgica et Materialia*, v. 40, n. 2, p. 205-219, 1992.