

ALTERAÇÕES SUBESTRUTURAIS DECORRENTES DA TORÇÃO CÍCLICA EM AMOSTRAS DE AÇO 1012

E.C.S. Corrêa⁽¹⁾, M.T.P. Aguiar⁽²⁾, L.A. Silva⁽¹⁾, W.A. Monteiro⁽³⁾, P.R. Cetlir⁽¹⁾
Rua Espírito Santo nº 35 2º andar, Centro, Belo Horizonte/MG, CEP: 30160-030
elaine@demet.ufmg.br

⁽¹⁾ Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – UFMG

⁽²⁾ Departamento de Engenharia de Materiais e Construção – UFMG

⁽³⁾ Departamento de Engenharia de Materiais – IPEN/SP

RESUMO

O encruamento atípico de metais durante o processamento cíclico a frio tem levado ao desenvolvimento de uma série de trabalhos, cuja abordagem vai desde os aspectos mecânicos/macrocópicos do fenômeno até as características micro e subestruturais do mesmo. O eventual amaciamento verificado após a aplicação da deformação cíclica tem sido associado ora à reestruturação das discordâncias, ora à formação de bandas de cisalhamento no metal. Neste trabalho, os eventos estruturais observados durante um ciclo de torção em amostras pré-deformadas são investigados. Barras de aço baixo carbono previamente trefiladas são submetidas a ¼, ½ e 1 ciclo de torção. As alterações subestruturais provenientes desses esforços são analisadas através de microscopia eletrônica de transmissão. Os resultados são comparados àqueles observados para o metal trefilado e trefilado torcido ciclicamente – 10 ciclos, tanto em termos de rearranjo de distribuição de discordâncias como em comportamento mecânico à tração subsequente.

Palavras-Chave: Torção Cíclica, Subestrutura, Encruamento

INTRODUÇÃO

O estudo do encruamento dos metais durante processamento à frio tem sido conduzido a partir da análise do comportamento mecânico macroscópico do material e dos aspectos micro e subestruturais associados ao mesmo. Para o caso da deformação monotônica, a relação entre a resposta do metal ao esforço aplicado e os mecanismos estruturais de deformação plástica relativos à mesma representa uma área de pesquisa já amplamente investigada, especialmente em materiais com estrutura cúbica de faces centradas⁽¹⁾. Entretanto, no que se refere ao processamento cíclico, os trabalhos desenvolvidos parecem ainda não constituir informação suficiente para uma ampla descrição dos fenômenos observados. Deficiências em termos de análise quantitativa e de modelagem são apontadas⁽²⁾, assim como a limitação dos experimentos a caracterizações microestruturais e mecânicas sem aprofundamento nos mecanismos de movimentação/interação de discordâncias que controlam a deformação⁽¹⁾. Em adição aos fatores mencionados, a possível ocorrência de encruamento não usual durante a aplicação de esforços cíclicos – obtenção de estado de tensões constantes para valores relativamente baixos de deformação efetiva⁽³⁻⁵⁾ e amaciamento de materiais previamente processados^(4,6) - indica a relevância/conveniência de desenvolvimento de trabalhos neste tema.

Dentro deste contexto, os eventos estruturais associados ao encruamento atípico de barras metálicas deformadas ciclicamente são apresentados neste trabalho. Experimentos realizados anteriormente mostraram a ocorrência de amaciamento em barras de aço baixo carbono trefiladas e torcidas ciclicamente, conforme pode ser observado na figura 1^(7,8). O abaixamento da curva de escoamento à tração e a alteração nas propriedades mecânicas (redução dos limites de escoamento e resistência, e aumento no alongamento total), se comparados aos valores relativos ao metal apenas trefilado, caracterizam o fenômeno. O rearranjo subestrutural foi indicado como o mecanismo predominante na operação (figura 2)⁽⁸⁾. Diminuição na quantidade de emaranhados e reestruturação das células em tamanhos maiores e quase isentas de discordâncias em seu interior foram constatados. De forma a dar continuidade à análise dos resultados, a evolução/transformação da

estrutura do metal apenas trefilado (figura 2(a)) para aquela relativa ao mesmo após 10 ciclos de torção (figura 2(b)) é investigada neste trabalho. Para tal, as alterações subestruturais presentes durante o primeiro ciclo de deformação – ¼, ½ e 1 ciclo - são verificadas através de microscopia eletrônica de transmissão.

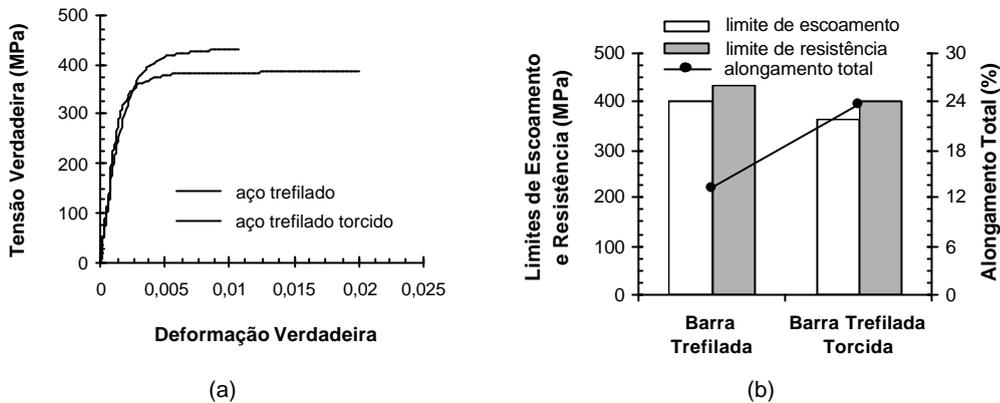


Figura 1 – Efeito da aplicação de esforços de torção cíclica (amplitude de deformação = 2,8%; número de ciclos = 10) no aço baixo carbono trefilado em 1 passe (semi-ângulo de fiavel = 8°; redução de área = 20%): (a) curva tensão-deformação verdadeiras e (b) propriedades mecânicas^(7,8).

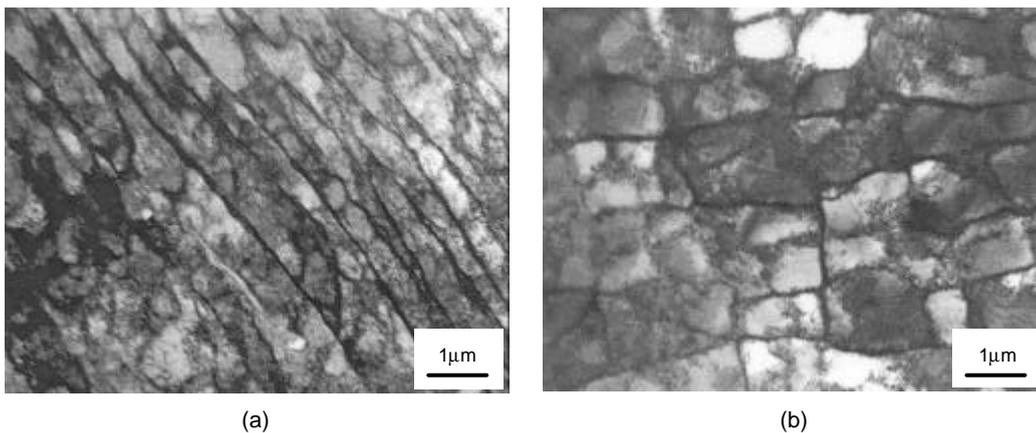


Figura 2 – Microscopia eletrônica de transmissão de amostras aço baixo carbono: (a) material trefilado e (b) material trefilado e torcido ciclicamente – 10 ciclos⁽⁸⁾.

MATERIAL E MÉTODOS

Material

Neste trabalho foram utilizadas barras de aço baixo carbono, cuja composição química 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 = 6,40mm e comprimento = 390mm) foram recozidos à 850°C durante 2400s à vácuo, apresentando valor de dureza = 97±7HV e tamanho de grão = 39,32±2,58μm.

Tabela I – Composição química do material (% em peso).

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

Trefilação

A trefilação das amostras foi realizada em um passe em uma banca hidráulica Bestlé, com as seguintes condições de processamento: semi-ângulo de fieira = 8° e redução de área = 20%. A escolha das mesmas se deu de acordo com os resultados obtidos em trabalhos desenvolvidos anteriormente ^(7,8). Os demais parâmetros da operação foram: velocidade = 17mm/s, taxa de deformação = $1,57s^{-1}$ e lubrificante = bissulfeto de molibdênio.

Torção

Os corpos de prova trefilados foram torcidos em uma bancada de torno especialmente adaptada para o processo, cujos detalhes foram descritos previamente ⁽⁹⁾. Foram realizados experimentos equivalentes a $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ e 1 ciclo de deformação, cuja representação esquemática é mostrada na figura 3. A amplitude de deformação utilizada foi de 2,8%, correspondendo a um ângulo de torção = 180° (assim como os parâmetros de trefilação, a escolha ocorreu em função de testes realizados anteriormente ^(7,8)).

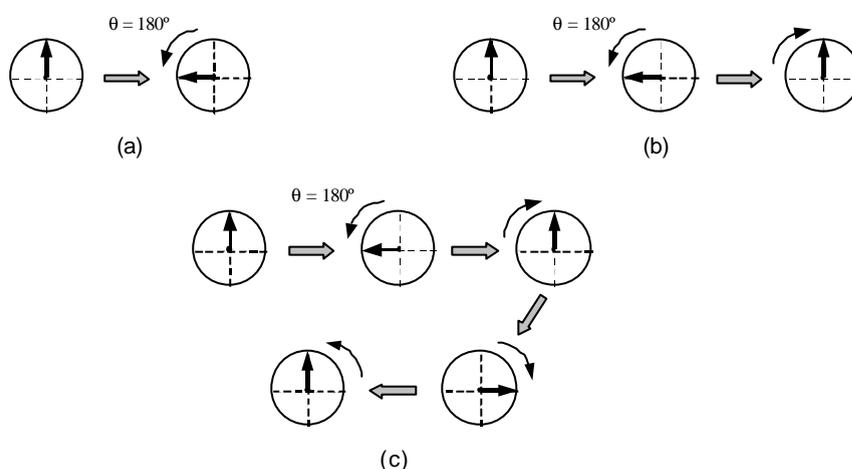


Figura 3 – Representação esquemática da torção cíclica aplicada nos corpos de prova trefilados: (a) $\frac{1}{4}$ ciclo, (b) $\frac{1}{2}$ ciclo e (c) 1 ciclo.

Microscopia Eletrônica de Transmissão

A análise por microscopia eletrônica de transmissão (MET) foi conduzida em um aparelho da marca JEOL JEM 200C, a uma tensão de aceleração de 200kV. As observações foram realizadas no metal trefilado e torcido em regiões próximas à superfície das amostras.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na figura 4 podem ser observados os aspectos subestruturais do aço trefilado submetido a $\frac{1}{4}$ de ciclo de torção. A análise das fotomicrografias apresentadas, em comparação com aquela relativa ao metal apenas trefilado (figura 2(a)), indica a ocorrência de consideráveis alterações na distribuição das discordâncias durante este primeiro estágio de torção. A presença de paredes com alta densidade de discordâncias (*dense dislocation walls* – DDW) ⁽¹⁰⁾ e microbandas de formas diversas (*paired dislocation sheets* - PDS, *strings of small pancake-shaped cells* - SPC) ⁽¹⁰⁾ delimitando blocos

de células constituídos internamente por estrutura celular ordinária representam as principais características do metal trefilado como visto na figura 2(a). A aplicação da torção parece levar à dissolução parcial das células no interior dos blocos (figura 4(b)) e ao desenvolvimento de microbandas transversalmente àquelas presentes na estrutura original (figura 4(a)), exemplificadas através das setas. Ainda em relação à formação/ocorrência das mesmas, a interseção mútua entre as microbandas de direções opostas parece resultar no aparecimento de uma nova configuração de células ou subgrãos, conforme indicado com a letra A, na figura 4(a).

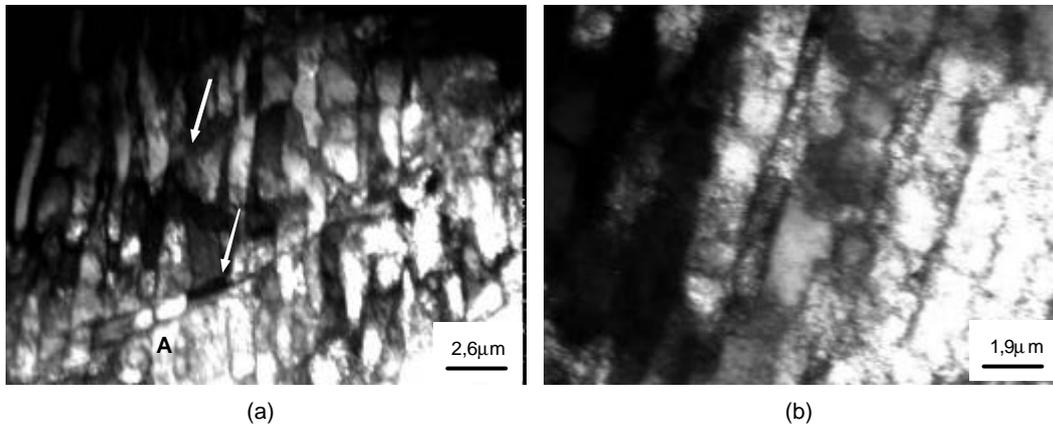


Figura 4 – Microscopia eletrônica de transmissão da barra de aço baixo carbono trefilada submetida a $\frac{1}{4}$ de ciclo de torção.

Os eventos constatados após a torção inicial do material ($\frac{1}{4}$ de ciclo) parecem ser acentuados na medida em que a aplicação da deformação cíclica é realizada, ou seja, a barra é torcida no sentido oposto, completando $\frac{1}{2}$ ciclo de deformação (figura 5). A dissolução parcial das células observada anteriormente parece ser acompanhada de uma diminuição na fração de emaranhados. Os blocos de células parecem se subdividir (figura 5(a)). A formação de microbandas ocorre em maior quantidade e de maneira mais homogênea, conforme evidenciado na figura 5(b). O rearranjo das discordâncias nessas regiões resulta em configurações de aspectos retangulares.

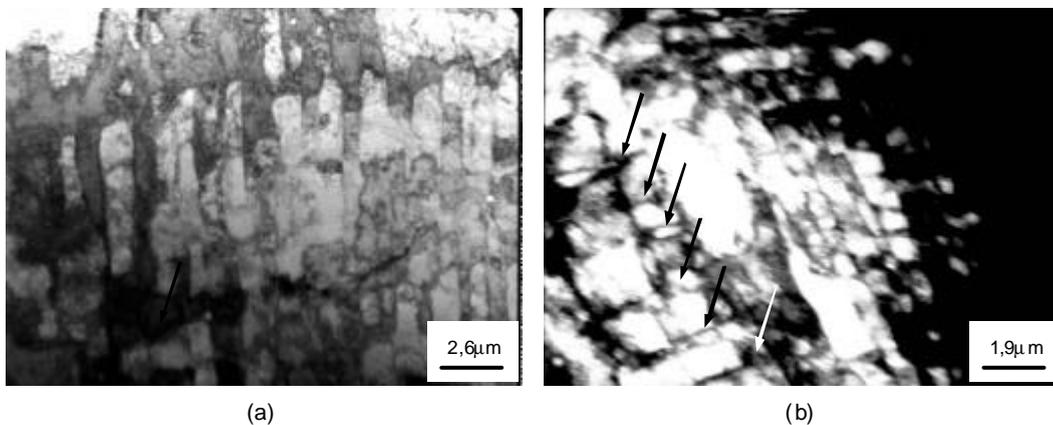


Figura 5 – Microscopia eletrônica de transmissão da barra de aço baixo carbono trefilada submetida a $\frac{1}{2}$ de ciclo de torção.

Na figura 6 são apresentadas as fotomicrografias referentes à barra de aço trefilada e torcida em 1 ciclo. Células/subgrãos alongados e de aspecto retangular são observados, assim como regiões

relativamente isentas de discordâncias em seu interior. Alguma similaridade entre estes resultados e aqueles mostrados na figura 2(b) é verificada.

Aspectos estruturais similares foram observados em amostras de alumínio processadas por compressão/extrusão^(11,12). A aplicação da deformação cíclica também resultou na formação de microbandas situadas de maneira transversal à subestrutura inicialmente obtida, além do desenvolvimento de pequenos subgrãos equiaxiais nas regiões de interseção das mesmas. Na medida em que o processamento cíclico prosseguia, a ocorrência desses subgrãos no material se tornava mais homogênea. Por fim, coincidindo com o valor de deformação relativo à obtenção do estado de tensões constantes, o material apresentava uma configuração de discordâncias com aspecto “quadriculado” (*chess-board like microstructure*), com células em forma de losangos (*diamond shaped cells*).

Em vista dos resultados apresentados neste trabalho, e daqueles observados em outras investigações^(11,12), a ocorrência contínua dos fenômenos descritos nas figuras 4 a 6, em função da aplicação de novos esforços de torção cíclica, parece levar à configuração de discordâncias verificada para o material trefilado e torcido - 10 ciclos.

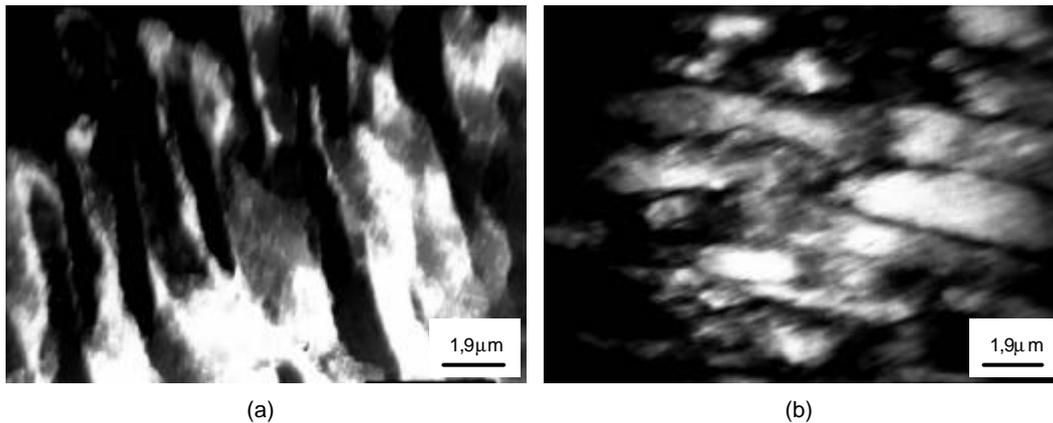


Figura 6 – Microscopia eletrônica de transmissão da barra de aço baixo carbono trefilada submetida a 1 de ciclo de torção.

CONCLUSÕES

Uma análise geral das fotomicrografias evidencia a ocorrência de consideráveis alterações no aço baixo carbono trefilado já no primeiro ciclo de deformação, indicando os possíveis mecanismos pelos quais o mesmo passa a apresentar a distribuição de discordâncias em estudo. Desenvolvimento e interseção de microbandas, dissolução parcial da estrutura inicialmente gerada, formação de novas células/subgrãos, redução da fração de emaranhados e obtenção de uma distribuição de discordâncias de aspecto “retangular” foram os fenômenos observados.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

1. G.C. Kaschner, J.C. Gibeling, *Acta Materialia* **50**(2002) 953-662.
2. P.Lukás, L. Kunz, *Materials Science and Engineering A* **322** (2002) 217-227.
3. V.S. Sarma, K.A. Padmanabhan, *Journal of Materials Science Letters* **16** (1997) 1495-1498.
4. P.E. Armstrong, J.E. Hockett, O.D. Sherby, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **30** (1982) 37-58.
5. M. Richert, J. Richert, J. Zasadzinski, H. Dybiec, *Z. Metallkde* **79**(1988) 741-745.
6. L.F. Coffin, J.F. Tavernelli, *Transactions of the Metallurgical Society of AIME* **215** (1959) 794-807.
7. M.T.P. Aguilár, E.C.S. Corrêa, A.P. Silva, P.R. Cetlin, W.A. Monteiro, *Proceedings of the 8th International Conference on Metal Forming – Metal Forming 2000*, Krakow, Poland, September 2000. 609-613.
8. M.T.P. Aguilár, E.C.S. Corrêa, W.A. Monteiro, N.A.M. Ferreira, P.R. Cetlin, *Materials Research* **4** **2** (2001) 87-91.
9. M.T.P. Aguilár, P.R. Cetlin, P.E. Valle, E.C.S. Corrêa, J.L.L. Rezende, *Journal of Materials Processing Technology* **80/81** (1998) 376-379.
10. B. Bay, N. Hansen, D.A. Hughes, D. Kuhlmann-Wilsdorf, *Acta Metallurgica et Materialia* **40** **2** (1992) 205-219.
11. M. Richert, A. Korbel, *Journal of Materials Processing Technology* **53** (1995) 331-340.
12. M. Richert, H.J. McQueen, J. Richert, *Canadian Metallurgical Quarterly* **37** **5** (1998) 449-457.

**SUBSTRUCTURAL CHANGES RELATED TO THE
CYCLIC TORSION OF 1012 STEEL SAMPLES**

E.C.S. Corrêa⁽¹⁾, M.T.P. Aguiar⁽²⁾, L.A. Silva⁽¹⁾, W.A. Monteiro⁽³⁾, P.R. Cetlin⁽¹⁾
Rua Espírito Santo nº 35 2º andar, Centro, Belo Horizonte/MG, CEP: 30160-030
elaine@demet.ufmg.br

⁽¹⁾ Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – UFMG

⁽²⁾ Departamento de Engenharia de Materiais e Construção – UFMG

⁽³⁾ Departamento de Engenharia de Materiais – IPEN/SP

ABSTRACT

The atypical work hardening behavior of metals during cold cyclic processing has been leading to the development of various investigations, covering the mechanical/macrosopic aspects of the phenomenon, as well as the microstructural/substructural characteristics of the material. The occurrence of strain softening in pretrained metals has been associated with the rearrangement of the dislocation structure and with the nucleation/propagation of slip bands. In this paper, the structural events observed during the cyclic torsion of predrawn samples are studied. Low carbon steel drawn bars are subjected to $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ and 1 cycle of torsion. The substructural analysis is performed through transmission electron microscopy. The results are compared to those for drawn metal before and after cyclic torsion – 10 cycles, in terms of dislocation rearrangement and subsequent work hardening behavior in tension.

Key-words: Cyclic Torsion, Substructure, Work Hardening