

SIMULAÇÃO DO PROCESSO ACCUMULATIVE ROLL-BONDING ATRAVÉS DE ENSAIO DE TORÇÃO A MORNHO*

Lumena Glória de Souza Nunes¹
Marcelo Lucas Pereira Machado²

Resumo

Objetivo deste trabalho foi simular o processo de deformação plástica severa, mais especificadamente o processo de colaminação acumulativa (*Accumulative Roll-Bonding*-ARB) em aço baixo carbono, por ensaio de torção a morno. Os corpos de prova foram inicialmente recozidos à 900°C por 5 min e resfriados dentro do forno com potência desligada. Realizou-se o ensaio de torção à 500°C aplicando cinco passes de deformação de 0,8, totalizando uma deformação verdadeira de 4, à uma taxa de deformação de 0,1s⁻¹, bem como deformações intermediárias de 0,8; 1,6; 2,4 e 3,2. Para verificar a influencia da temperatura no processo, realizou-se o ensaio também nas temperaturas de 600 e 700°C. As micrografias mostraram que ocorreu refino do grão, típico do processo estudado. Ensaio de nanodureza Vickers mostraram um aumento considerável na dureza, mostrando que o teste de torção é uma ferramenta eficiente para simulação do processo ARB.

Palavras-chave: Ensaio de Torção; Deformação Plástica Severa; Accumulative Roll-bonding; ARB.

SIMULATION OF THE ACCUMULATIVE ROLL-BONDING PROCESS THROUGH WARM TORSION TEST

Abstract

The objective of this work was simulating the process of severe plastic deformation, specifically the Accumulative Roll-Bonding process (ARB) in low carbon steel, by warm torsion test, using the typical ARB process parameters. The torsion test was performed at 500°C, using a total equivalent strain of 4.0, with increment of 0.8 per pass and keeping the constant strain rate of 0.1s⁻¹, as well as intermediate strains of 0.8, 1.6, 2.4 and 3.2. The tests were also carried out at temperatures of 600 and 700°C to analyzed the effect of temperature in the process. The micrographs showed that grain refining typical of the process studied occurred. Vickers hardness tests showed a considerable increase in hardness, showing that the torsion test is an efficient tool for simulating ARB process.

Keywords: Torsion test; Severe Plastic Deformation; Accumulative Roll-bonding; ARB.

¹ Aluno de mestrado, Programa de pós-graduação em metalurgia e materiais, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória-ES, Brasil.

² Doutor em Metalurgia e Materiais, Departamento de metalurgia e materiais, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória-ES, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Recentemente, muita atenção está sendo direcionada para o ultra refino de grãos em materiais metálicos, onde o diâmetro médio do grão é reduzido para valores menor que $1\ \mu\text{m}$. Isso ocorre devido ao fato que a redução do tamanho do grão para escala submicrométrica resulta em um material de alta resistência sem perder tenacidade na temperatura ambiente [1,2].

No caso de aços, existem duas rotas de fabricação de metais de grãos ultrafinos: por processos termomecânicos, onde baixa temperatura de processamento e alta taxa de deformação são usadas, ocorrendo transformações de fase, como no processo de laminação controlada e pelo método de deformação plástica severa [2]. Porém, nota-se que mesmo com tamanho médio de grãos com valores aproximados, aços processados por deformação plástica severa apresentam maior limite de escoamento, isto ocorre devido à formação de uma microestrutura com alto percentual de contornos de grão de baixo ângulo e devido à presença de cementita esferoidizada, que formam barreiras dificultando o escoamento de discordâncias [1]. O processo Accumulative Roll-Bonding (ARB) foi inicialmente desenvolvido por Saito et al. [3] e constitui basicamente na laminação de duas chapas metálicas sobrepostas de mesmas dimensões a uma alta taxa de deformação, superior a 10s^{-1} e com uma taxa de redução em torno de 50% a cada passe de laminação, o que equivale a 0,8 de deformação verdadeira, para que haja subdivisão granular e coesão entre as chapas.

Inicialmente as chapas são preparadas superficialmente (lixamento para aumento da rugosidade, decapagem mecânica e aplicação de solvente), para melhorar a aderência entre as peças, depois são laminadas de forma sobrepostas, obtendo-se uma chapa única, que é seccionada em duas partes iguais. As tiras são novamente lixadas, tratadas superficialmente, empilhadas e laminadas. O processo completo é então repetido várias vezes. Todo o processo é realizado em temperatura abaixo da temperatura de recristalização, para que os processos de recristalização e amaciamento não ocorram e cancelem o efeito da deformação acumulada.

A evolução microestrutural e a formação de grãos ultrafinos após o processo de colaminação acumulativa ainda não são bem compreendidas. Tsuji et al [4] diz que a formação de grãos ultrafinos ocorre devido a um processo de recristalização dinâmica contínua, fenômeno caracterizado pela subdivisão do grão, recuperação e migração de contornos de grão.

Este processo de aumento contínuo da desorientação de contornos é diferente do que ocorre na recristalização descontínua tradicional, que se origina e prossegue por nucleação e crescimento de novos grãos rodeados por contornos de alto ângulo. Entretanto, a microestrutura resultante é similar à estrutura recristalizada [5].

Estudos sobre refino de grão obtido através do processo ARB em aços carbono é escasso, devido à necessidade de grandes tensões para deformá-los, o que se torna um gargalo para diversos pesquisadores, devido às limitações laboratoriais. Entretanto, aços carbono convencionais, endurecidos por refino de grão, possuem grande potencial para substituir os aços carbono de alta resistência e baixa liga, que tem maior custo industrial e dificuldade de reciclagem, devido à presença de elementos de liga, o que tornaria o processo mais sustentável.

O ensaio de torção tem sido utilizado amplamente para simular condições de laminação convencional [5,6,7]. Assim, o objetivo deste trabalho é verificar se, utilizando as condições de processamento do método *Accumulative Roll-bonding*, pode-se simulá-lo através de ensaio de torção a morno.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O material usado no trabalho foi um aço 0,16%C, obtido no mercado comercial. Para realizar os ensaios de torção os corpos de prova foram usinados com diâmetro útil de 5 mm e comprimento útil de 20 mm, a partir de uma barra redonda de 5/8" de diâmetro.

Os ensaios de torção foram realizados em uma máquina horizontal de torção a quente INSTRON, modelo 55MT do laboratório de conformação mecânica do Ifes. A máquina está conectada a um microcomputador que, via software, permite aquisição dos dados e controle do processo de torção, fornecendo resultados na forma de gráfico momento torsor versus ângulo de rotação. A velocidade de rotação do equipamento varia de 0 a 120rpm e os esforços são medidos por uma célula de carga que possui capacidade máxima de leitura de 22Nm.

Os corpos de prova foram aquecidos utilizando-se um forno de indução INDUCTOTHERM, com potência máxima de 10KW e capacidade de aquecimento de até 1600°C. Sendo a temperatura monitorada através de um termopar do tipo K (Cromel-Alumel). As amostras foram mantidas em um tubo de quartzo com passagem contínua de gás argônio, para evitar a corrosão.

Na busca de que as microestruturas do material sejam as mais idênticas e homogêneas possíveis, foram realizados tratamentos de recozimento em cada corpo de prova antes do início de cada ensaio. Os corpos de prova foram aquecidos a uma taxa de 3°C/s até a temperatura de 900°C, utilizando um tempo de encharque de 5min para homogeneização e resfriados dentro do forno desligado.

Para simular o processo *Accumulative Roll-Bonding*, os corpos de prova foram aquecidos à 500°C uma taxa de 3°C/s e submetidos a cinco passes de torção, com deformação equivalente de 0,8 por passe, totalizando 4,0, ao final do quinto passe com taxa de deformação de 0,1 s⁻¹. Após cada passe os corpos de prova foram deixados resfriar dentro do forno desligado até a temperatura ambiente, conforme mostra a Figura 1. Com o objetivo de verificar a influencia da temperatura, realizou-se o ensaio também nas temperaturas de 600 e 700°C.

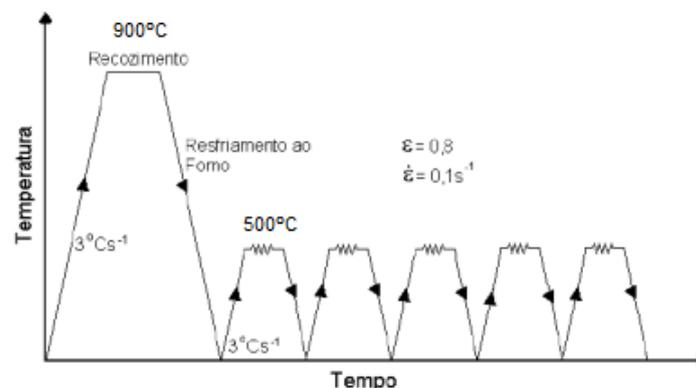


Figura 1: Representação esquemática da programação dos ensaios

Para verificar a evolução da dureza do aço com a deformação, foram realizados testes com deformações intermediárias (0,8, 1,6, 2,4 e 3,2).

Com o objetivo de comparar as propriedades mecânicas, realizou-se ensaio de torção na temperatura ambiente da amostra recozida e após ensaio de torção à 500°C.

Após os ensaios de torção, as amostras foram cortadas na seção longitudinal para preparação metalográfica e análise da microestrutura. Em seguida foram lixadas sequencialmente com granulometria 120, 220, 320, 400, 600 e 1000, polidas com alumina 1 µm e atacadas com solução de Nital 2%.

Realizou-se ensaio de nanodureza vickers utilizando dez identificações com uma carga de 0,5Kgf.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 mostra os resultados obtidos através de ensaio de torção à 500°C utilizando uma taxa de deformação de $0,1s^{-1}$, com cinco passes de deformação de 0,8, totalizando uma deformação de 4. Nota-se que estas curvas possuem características de metais que sofreram encruamento durante deformação plástica seguido de recuperação dinâmica, apresentando um pico de tensão seguido de um decréscimo da mesma até sua estabilização em um valor denominado tensão de estado estacionário. Isto ocorre devido à alta taxa de deformação associada à baixa temperatura do ensaio, o que favorece o rearranjo das discordâncias para uma forma mais reorganizada. A característica diferente da primeira curva (primeiro passe de torção) deve-se ao encruamento inicial que o corpo de prova sofreu durante a deformação, o que também foi observado no trabalho de Calado e Barbosa [8].

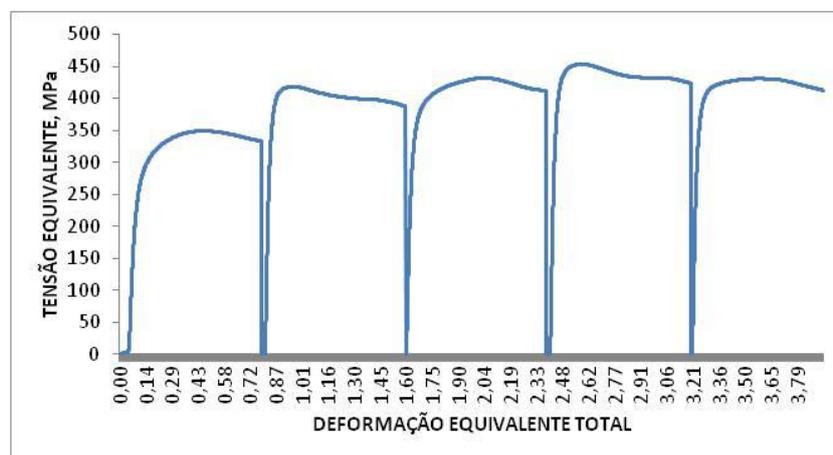


Figura 2: Curvas tensão x deformação obtida através de ensaio de torção a 500°C a taxa de deformação de $0,1s^{-1}$.

A Figura 3 apresenta as microestruturas do aço após recozimento à 900°C e após simulação do processo ARB através de ensaio de torção. Verifica-se que antes do ensaio de torção, o aço possuía grãos equiaxiais de ferrita com uma pequena fração de perlita. Após o ensaio de torção à 500°C, não é possível distinguir os grãos por microscopia ótica, nota-se linhas escuras de cementita das lamelas de perlita que foram fragmentadas durante a deformação, microestrutura típica obtida por deformação plástica severa em um aço C-Mn obtida por Song et al [9] e em aço baixo carbono por Kubina e Gubis [10], indicando que a microestrutura obtida por

ensaio de torção foi similar à obtida por pesquisadores usando o processo *Accumulative roll-bonding*, o que indica que este ensaio foi eficaz para a simulação do processo em laboratório.

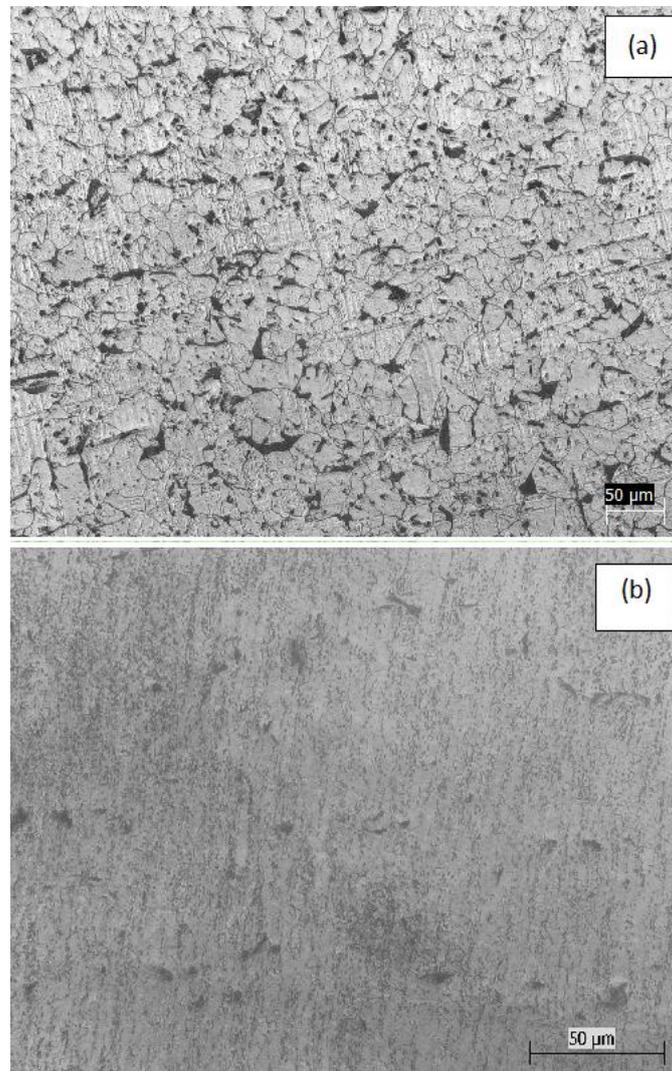


Figura 3: Microscopia ótica. (a) aço recozido à 900°C, (b) após ensaio de torção.

A Figura 4 mostra a evolução da nanodureza Vickers em função da deformação equivalente total, após ensaio de torção à 500°C e o aço sem deformação, apenas na condição de recozido.

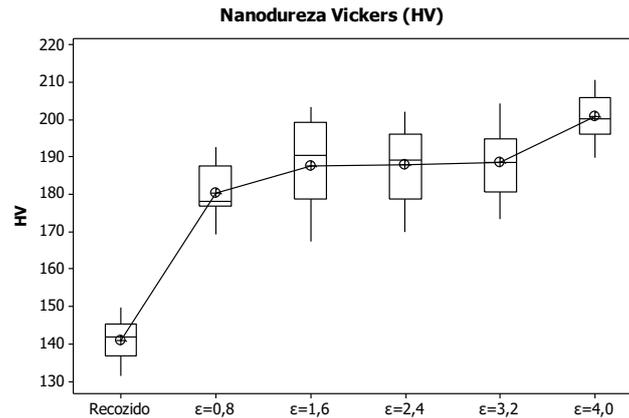


Figura 4: Evolução da nanodureza do aço com o grau de deformação plástica à 500°C.

Após o primeiro passe de deformação, verifica-se um aumento na dureza do aço de 141 para 180HV, aumentando continuamente com o grau de deformação, até o valor de 201HV após cinco passes de torção, deformação verdadeira de 4.

A Tabela 1 mostra as tensões de limite de escoamento e de ruptura das amostras somente recozida e após simulação do processo ARB, obtidas através de ensaio de torção à temperatura ambiente. Verificou-se uma elevação de 71% na tensão limite de escoamento 10% na tensão de ruptura.

Tabela 1: Comparação entre a tensão limite de escoamento e ruptura das amostras somente recozida e após torção simulando o processo ARB.

	Amostra recozida	Amostra após torção
Tensão limite de escoamento	350MPa	600MPa
Tensão de ruptura	1149MPa	1040MPa

Os aços com grãos ultrafinos processados por ARB são, geralmente, processados em uma temperatura de 500°C, esta foi proposta inicialmente por Saito et al [3] devido a mesma estar abaixo da temperatura de recristalização, na qual impede o cancelamento da deformação acumulada através de recristalização e é suficiente para que ocorra a soldagem entre as chapas que serão colaminadas após uma redução de espessura de 50%.

Com o objetivo de verificar a influencia da temperatura de trabalho no refino de grão, realizou-se o ensaio nas temperaturas de 600 e 700°C, mantendo a mesma taxa de deformação de $0,1s^{-1}$ com cinco taxas de deformação de 0,8, totalizando a deformação equivalente de 4, como pode-se verificar na Figura 5.

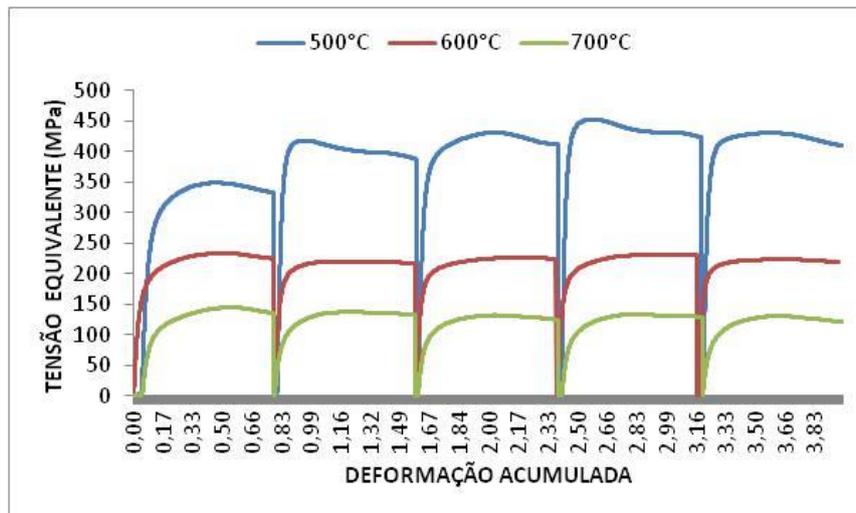


Figura 5: Curvas tensão deformação acumulada para o aço 1010 simulando o processo ARB por ensaio de torção nas temperaturas de 500, 600 e 700°C, com taxa de deformação de $0,1s^{-1}$ em cinco passes de deformação de 0,8, totalizando a deformação equivalente de 4.

Como esperado, verifica-se através da Figura 5 que com a elevação da temperatura para 600°C ocorre uma elevada redução na tensão limite de escoamento do aço estudado, sendo o mesmo de aproximadamente 400 MPa, ao final dos cinco passes de deformação, à 500°C, 200MPa à 600°C. Esta redução não é tão elevada com o aumento da temperatura para 700°, ficando com uma média de 125MPa. Nota-se também que há uma diferença no formato da curva à 500°C em relação às temperaturas mais altas. No ensaio à 500°C, ocorre um pico na tensão, no qual decresce atingindo uma tensão de estágio estacionário, característico de recristalização dinâmica contínua, já nas demais temperaturas verifica-se que o estágio estacionário é atingido logo no início do ensaio, mostrando que não ocorre recristalização dinâmica contínua, sendo o processo de recuperação mais pronunciado.

Outro fator a ser destacado é que na temperatura de 500°C não ocorre amaciamento pronunciado entre os passes, na qual a tensão após o término de um passe é aproximadamente igual a tensão de início do passe seguinte. Porém nas temperaturas superiores é perceptível o amaciamento entre os passes, principalmente nos ensaios realizados à 700°C.

4 CONCLUSÃO

A partir dos resultados do presente trabalho, foi possível concluir que:

1. As curvas tensão versus deformação obtidas por ensaio de torção mostrou um comportamento típico de aços que sofreram recristalização dinâmica contínua, mecanismo de refino de grão descrito por pesquisadores do processo em estudo.
2. A análise microestrutural revelou uma microestrutura similar as encontradas em estudos do processo ARB com redução do tamanho dos grãos
3. O refino de grão mostrou que afeta diretamente o comportamento mecânico do material ao apresentar elevação na tensão limite de escoamento de

aproximadamente 350 MPa para 600 MPa e aumento da dureza de 141 para 201HV.

4. Os ensaios à 600 e 700°C mostraram que o processo de amaciamento por recristalização dinâmica contínua não ocorre e sim por recuperação dinâmica.
5. O ensaio de torção mostrou ser efetivo para a simulação em laboratório do processo ARB.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Capes pela concessão de bolsa de estudo.

REFERÊNCIAS

- 1 Song, R., Ponge, D.; Raabe, D.; Speer, J.G.; Matlock, D.K. Overview of processing, microstructure and mechanical properties of ultrafine grained bcc steels. *Materials Science and Engineering*. 2006; A 441: 1–17.
- 2 Tsuji, N., Saito, Y., Utsunomiya, H. Tanagawa, S. Ultra-Fine Grained Bulk Steel Produced By Accumulative Roll-Bonding (ARB) Process. *Scripta Materialia*. 1999; v.40, n. 7: 795-800.
- 3 Saito, Y., Utsunomiya H., Tsuji, N., Sakai, T. Novel Ultra-High Straining Process for Bulk Materials-Development of the Accumulative Roll-Bonding (ARB) Process. *Acta Materialia*. 1999; v. 47, n. 2: 579-583.
- 4 Tsuji, N., Ito, Y., Saito, Y., Minamino Y. Strength and Ductility of Ultrafine Grained Aluminum and Iron Produced by ARB and Annealing. *Scripta Materialia*. 2002; v. 47: 893-899.
- 5 A. R. Geittens, O. Balancin, A. M. Jorge Jr. Evidencias de recristalização dinâmica contínua em um aço carbono processado em condições similares as do processamento industrial. Congresso Brasileiro de engenharia e ciências dos materiais. Natal, 2002
- 6 Jorge Jr, A. M.; Balancin, O. Ensaio de Torção: Um Método para o Estudo da Trabalhabilidade a Quente dos Materiais Metálicos. *REM*. 1993 v. 46, n. 1/3: 128-135.
- 7 Silva, F. H. A. Avaliação do amaciamento em aço inoxidável ferrítico por ensaio de torção a quente. Ouro Preto: UFOP, 2008.
- 8 Calado, W. R.; Barbosa, R. Ultra Grain Refinement in a Plain Carbon Steel by Means of Warm Torsion Testing. *ISIJ International*. 2010. v. 50:1471–1475.
- 9 Song, R., Ponge, D. Raabe, D. Mechanical Properties of an Ultrafine Grained C-Mn Steel Processed by Warm Deformation and Annealing. *Acta Materialia*. 2005 v. 53: 4881-4892.
- 10 Kubina, T.; Gubis, J. Potencial for obtaining an ultrafine microstructure of low-carbon steel using Accumulative Roll-Bonding. *Materials and technology*. 2015 v. 49: 521–525.