

AVALIAÇÃO DA EVOLUÇÃO MICROESTRUTURAL E DO COMPORTAMENTO MECÂNICO NA LAMINAÇÃO A FRIO DE UM AÇO BAIXO CARBONO

Pedro Kirk De Féo De Julio

Universidade Federal de São Carlos, Rod. Washington Luís, km 235, CEP 13.5650905, São Carlos, SP
pedrokirk@gmail.com

Antonio Lourenço Batista de Souza

lourencobatista@hotmail.com

Márcia Regina Osaki

mr.osaki@ufscar.br

Armando Ítalo Sette Antonialli

antonialli@ufscar.br

Resumo. *Esse trabalho busca aprofundar o estudo acerca da evolução das propriedades mecânicas de um aço doce, com foco nas mudanças ocorridas na morfologia do material, submetido a passes de laminação a frio. Em vista das características do processo, analisar o encruamento envolvido tem fator preponderante para obtenção de resultados concretos, de tal forma que buscou-se relacionar o comportamento do material com modelos que descrevem o comportamento mecânico, como por exemplo, o de Hollomon. Outro ponto de relevância é o de se tentar associar as mudanças microestruturais a fenômenos conhecidos, como por exemplo o descrito por Hall e Petch, no qual as propriedades mecânicas do material são associadas ao tamanho de grão de inicial. Ao invés de correlacionar as propriedades com tamanho de grão inicial, se buscou analisar a evolução das propriedades em função da deformação aplicada e as alterações na geometria e tamanho de grão. Destas análises, foi possível correlacionar a evolução das propriedades mecânicas, cujo comportamento é semelhante à curva de Hollomon, além de encontrar padrão semelhante ao descrito por Hall e Petch quanto à evolução do tamanho de grão transversal.*

Palavras chave: *Encruamento. Hollomon. Hall-Petch.*

1. INTRODUÇÃO

Durante a conformação mecânica a frio de materiais metálicos, parte da energia inerente ao processo é gasta na deformação plástica. Essa energia é armazenada na rede cristalina na forma de defeitos. O principal desses defeitos são as discordâncias (GERONIMO; BALANCIN, 2013). Ocorrem também alguns fenômenos como: mudança na forma dos grãos; orientação preferencial dos grãos, também conhecido como texturização; aumento da quantidade de contornos de grão por unidade de volume; além do aumento, em várias ordens de grandeza, dos defeitos puntiformes e de discordâncias por unidade de volume (PADILHA; SICILIANO JR., 2005).

Com o passar do tempo, a variação na densidade de discordâncias passa a estabilizar-se, até certo ponto no qual o material encontra-se com maior resistência à deformação plástica, característica essa conhecida como encruamento (MARTINELLI, 2010). A combinação desses fenômenos culmina na dificuldade de movimentação das discordâncias, de tal forma que para causar novas movimentações é necessário imprimirem-se maiores tensões.

O encruamento causa alteração em algumas propriedades mecânicas do material. Materiais encruados possuem maiores limites de resistência a tração e limite de escoamento, quando comparados ao estado recozido. Porém a ductilidade do material, ou seja, a capacidade de deformar-se plasticamente, é prejudicada, tornando-o mais frágil (DIETER et al., 1981).

Com relação ao tamanho de grão, materiais com estruturas cristalinas muito heterogêneas, ou com grãos grosseiros, tendem a ter maior facilidade para a movimentação de discordâncias, possuindo propriedades mecânicas inferiores. Já materiais com granulação refinada têm maior dureza e resistência mecânica, visto que esses possuem maior área total de contornos de grão, impedindo ou dificultando a movimentação das discordâncias (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2012).

O comportamento de materiais metálicos em função do tamanho de grão pode ser expresso por meio da Eq. (1), conhecida como Equação de Hall-Petch. Na mesma, é relacionado o aumento do limite de escoamento LE do material à diminuição do tamanho de grão médio d , sendo A e B constantes do modelo (JIANGUO; BALINT; PIETRZYK, 2012).

$$LE = A + B.d^{-1/2} \quad (1)$$

Neste trabalho, amostras de um aço baixo carbono foram submetidas a passes sequenciais de laminação a frio, nos quais foi monitorada a carga de laminação. Posteriormente, as mesmas foram submetidas a análise metalográfica com o objetivo de correlacionar evolução microestrutural e comportamento mecânico.

2. METODOLOGIA

Para o estudo proposto, partiu-se de uma barra chata de aço ABNT 1010 recozido, com tamanho médio de grão ASTM 8,0 nas direções transversal e longitudinal, além de dureza 133 HBW 2,5/187,5.

Para a modelagem de seu comportamento mecânico, procedeu-se com um ensaio de tração conforme a norma ASTM E8/E8M (2016), a partir do qual foi possível traçar não somente a curva tensão-deformação convencional (ou de engenharia), que apontou para limite de escoamento 363 MPa, limite de resistência à tração 458 MPa e alongamento percentual 38 %, mas também a curva tensão-deformação verdadeira, conforme a ASTM E646 (2016), a qual originou as Eqs. (2), referente ao modelo de Hollomon e (3), para o modelo de Ludwig, sendo σ e ε respectivamente tensão e deformação verdadeiras. Ambas as curvas foram obtidas por regressão linear conforme apresentado por Dieter et al. (1981).

$$\sigma = 873.\varepsilon^{0,23} \quad (2)$$

$$\sigma = 363 + 873.\varepsilon^{0,23} \quad (3)$$

As amostras para laminação apresentavam dimensões aproximadas de 50 x 25 x 5 mm. Cada uma delas foi submetida a até cinco passes sequenciais de laminação à temperatura ambiente em um laminador duo reversível, com reduções da ordem de 20 a 40 % por passe. Considerando um estado de tensão uniaxial de compressão direta, a deformação verdadeira em cada passe pode ser calculada pela Eq. (4), em que t_{i-1} e t_i são, respectivamente, a espessura da amostra antes e após a operação de laminação. Deve-se considerar deformação acumulada para passes sequenciais. O limite de escoamento médio LE , por sua vez, é determinado pelo quociente entre a integral da tensão verdadeira σ pela deformação verdadeira $d\varepsilon$ e a deformação ao fim de cada passe ε_i , ou ainda pelo quociente entre a carga de laminação F pelo produto entre a largura da amostra w e o comprimento de contato L entre cada um dos cilindros de laminação e a amostra, conforme a Eq. (5). Dessa forma, o produto entre o limite de escoamento médio e a deformação corresponde ao trabalho específico de deformação. As avaliações dimensionais foram realizadas com o auxílio de um paquímetro com resolução de 0,02 mm, enquanto a carga de laminação foi aferida a partir de duas células de carga posicionadas nos mancais do laminador.

$$\varepsilon = \ln (t_{i-1} / t_i) \quad (4)$$

$$LE = 1/\varepsilon_i . \int \sigma d\varepsilon = F / (w.L) \quad (5)$$

A evolução microestrutural promovida pela laminação foi avaliada por meio de análise metalográfica em microscópio óptico das seções transversal e longitudinal das amostras após cada passe considerando a norma ASTM E112 (2013), após preparação que envolveu embutimento em baquelite, lixamento com granulometria progressiva até 1200, polimento em solução de alumina e ataque químico com Nital 2 %. O recurso computacional de domínio público ImageJ foi empregado na medida dos tamanhos de grão.

3. RESULTADOS

A Figura 1 contém os modelos de Hollomon e Ludwig, correspondentes às Eqs. (2) e (3) respectivamente, bem como os dados experimentais de limite de escoamento médio versus deformação verdadeira acumulada para os diversos passes de laminação (LE x ε), calculados pelas Eqs. (4) e (5). Percebe-se um ajuste mais próximo entre os valores reais e o modelo de Hollomon, a partir do qual, por regressão simples, obteve-se a Eq. (6) com um coeficiente de correlação da ordem de 98 %, embora ligeiramente distinta da Eq. (2) apresentada na seção Metodologia.

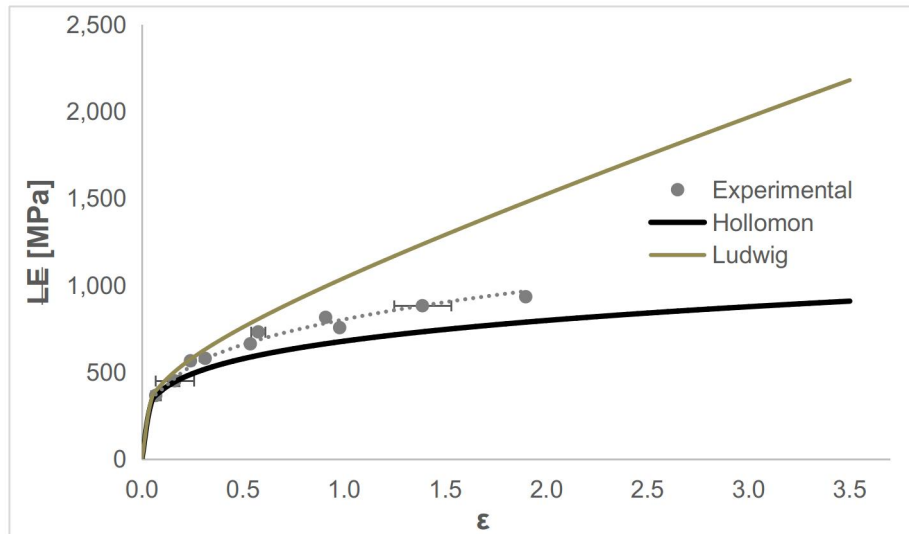


Figura 1. Modelos de Hollomon e Ludwig comparados aos dados experimentais para os diversos passes de laminação

$$\sigma = 804 \cdot \varepsilon^{0,29} \quad (6)$$

A Figura 2 ilustra o efeito da laminação sobre a microestrutura de uma amostra submetida a cinco passes de laminação em corte transversal (Fig. 2(a)) e longitudinal (Fig. 2(b)). A partir da medida do tamanho de grão da seção transversal de cada um dos corpos de prova (d), foi possível avaliar a relação dessa grandeza com o limite de escoamento médio a partir de uma perspectiva inspirada em Hall-Petch, apresentada na Eq. (1) como pode ser visto na Fig. 3, obtendo-se um coeficiente de correlação de 87 %.

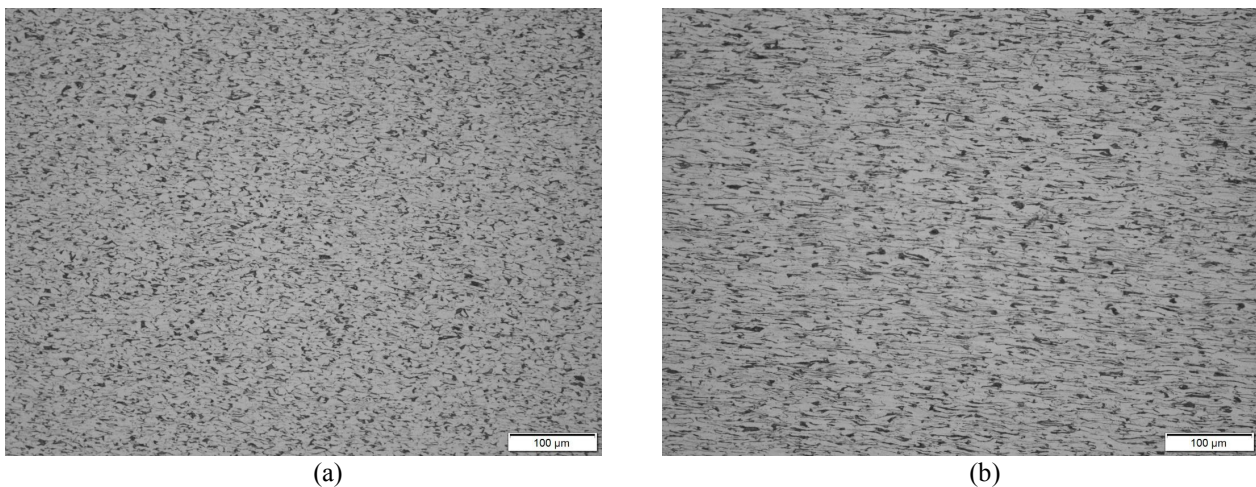


Figura 2. Análise metalográfica: (a) seção transversal e (b) seção longitudinal

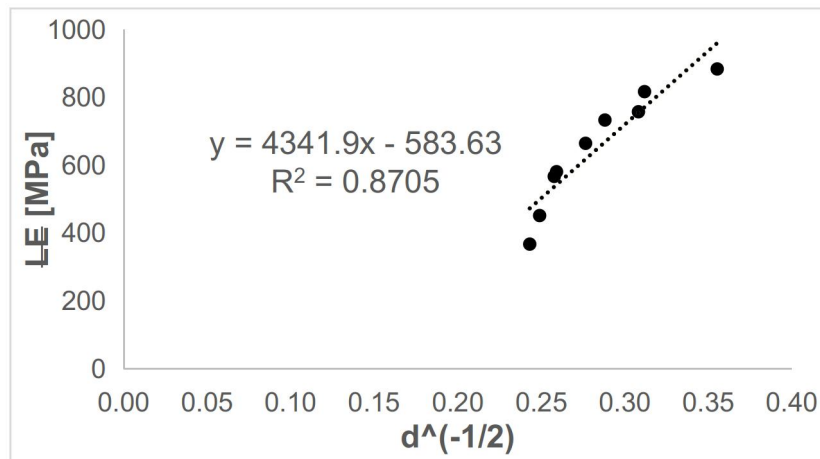


Figura 3. Relação entre tamanho de grão e limite de escoamento médio

4. CONCLUSÕES

Com base nas laminações realizadas e o embasamento oriundo dos modelos disponíveis na literatura, foi tangível comparar o comportamento esperado com o comportamento real do material, verificando que para os ensaios realizados, o modelo de Hollomon descreve de forma mais assertiva a tensão e deformação esperada.

Pela análise da deformação dos grãos durante os passes de laminação, pôde-se comprovar que o fenômeno do encruamento se relaciona com o limite de escoamento médio de forma semelhante ao descrito por Hall e Petch.

Fica em aberto para estudos posteriores a evolução do encruamento ao longo da deformação, visto que o mesmo não é constante ao longo de todo o processo. Também há possibilidade de se analisar as alterações no comprimento do grão nas amostras longitudinais, relacionando-as com as propriedades mecânicas do material.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores prestam seus agradecimentos ao Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa) e ao Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais (CCDM) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) pelo espaço e estrutura cedidos para realização dos experimentos referentes a este trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- American Society for Testing and Materials, 2013. *ASTM E112-13: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*. West Conshohocken, 28 p.
- American Society for Testing and Materials, 2016. *ASTM E646-16: Standard Test Method for Tensile Strain-Hardening Exponents (n -Values) of Metallic Sheet Materials*. West Conshohocken, 9 p.
- American Society for Testing and Materials, 2016. *ASTM E8/E8M-16a: Standard Test Methods for Tension Test of Metallic Materials*. West Conshohocken, 30 p.
- Callister Jr., W.D. e Rethwisch, D.G., 2012. *Ciência dos materiais*. Grupo Editorial Nacional, Rio de Janeiro, 8ª edição.
- Dieter, G.E., 1981. *Metalurgia Mecânica*. Editora Guanabara, Rio de Janeiro, 2ª edição.
- Geronimo, F.H.C. e Balancin, O. 2013. “Competição entre recuperação e recristalização dinâmica do aço inoxidável austenítico ASTM F 138 utilizado em implantes ortopédicos”. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, Vol. 10, p. 162–169.
- Jianguo, P.M.B.D.L., Balint, D. e Pietrzyk, M., 2012. *Microstructure Evolution in Metal Forming Processes: Modelling and Applications*. Woodhead Publishing, Cambridge, 1ª edição.
- Martinelli, I.M., 2010. *Influência do recozimento na recuperação e recristalização de tiras de aço baixo carbono dobradas por deformação a frio*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Padilha, A.F. e Siciliano Jr., F., 2005. *Encruamento, Recristalização, Crescimento de Grão e Textura*. ABM, São Paulo, 1ª edição.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

EVALUATION OF MICROSTRUCTURAL EVOLUTION AND MECHANICAL BEHAVIOR ON COLD ROLLING OF A LOW CARBON STEEL

Pedro Kirk De Féo De Julio

Federal University of São Carlos, Rod. Washington Luís, km 235, CEP 13.5650905, São Carlos, SP
pedrokirk@gmail.com

Antonio Lourenço Batista de Souza

lourencobatista@hotmail.com

Márcia Regina Osaki

mr.osaki@ufscar.br

Armando Ítalo Sette Antonialli

antonialli@ufscar.br

Abstract. *The present paper aims to go further in the study of the mechanical properties evolution of a low carbon steel, analyzing the material morphology changes, in cold rolling working. Due to the process characteristics, studying the strain hardening involved is very important to achieve solid results, in such way that is proposed to relate the material behavior to mathematical models, like, for example, the Hollomon one. As well as trying to associate the microstructure changes to known phenomena, for example the one described by Hall and Petch, in which the material mechanical properties are associated with the initial grain size. Instead of relating the properties with the initial grain size, the aim is to analyze the evolution of the properties due the applied deformation and the changes in the geometry and grain size. Due these analyses it was possible to correlate the evolution of the properties, which behavior is similar the one Hollomon proposed, and also find the same pattern described for Hall and Petch for the transversal grain evolution.*

Keywords: *Strain hardening. Hollomon. Hall-Petch.*

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.