

# SIMULAÇÃO POR MEIO DE ENSAIOS DE TORÇÃO A QUENTE DO PROCESSO DA LAMINAÇÃO DO PRODUTO FIO-MÁQUINA PRODUZIDO A PARTIR DE AÇOS BAIXO E ULTRA-BAIXO CARBONO<sup>1</sup>

Aline da Costa Miranda Lima<sup>2</sup>  
Luciano Moreira Pessanha<sup>3</sup>  
Wilton Rogério Rozário<sup>4</sup>

## Resumo

Na laminação a quente de aços longos inicialmente os aços são reaquecidos até temperaturas elevadas para serem austenitizados e, em seguida, submetidos a sequências de deformações que envolvem as etapas de desbaste, intermediário, pré-acabamento e de acabamento, e posteriormente resfriados até a temperatura ambiente. O ensaio de torção a quente é uma técnica experimental capaz de reproduzir essas condições de processamento e partir do qual as curvas de fluxo podem ser obtidas em função dos parâmetros de processo de laminação. Os aços usados no estudo foram submetidos a ensaios de torção a quente para avaliação do comportamento do material durante a simulação das condições industriais de processo. Mesmo com simplificações necessárias a este tipo de metodologia obteve-se como resultado deste trabalho que os aços UBC suportaram as condições industriais impostas durante os ensaios de torção a quente, como temperatura de laminação, redução por passe e taxa de deformação.

**Palavras-chave:** Laminação; Aços longos; Ensaio de torção a quente.

## SIMULATION BY HOT TORSION TESTING OF THE ROLLING MILL PROCESS OF LOW CARBON AND ULTRA-LOW CARBON STEEL WIRE ROD PRODUCTS

### Abstract

In the hot rolling mill of long products, the billets are initially reheated to high temperatures to be austenized and then they are subjected to deformation passes, involving the steps of blooming, roughing, intermediate, pre-finishing, and finishing mill, and subsequently, cooled to room temperature. The experimental technique able to reproduce these processing conditions, taking into account these phenomena, is the hot torsion test from which the plastic flow curves can be obtained as a function of parameters of rolling mill. The steels used in the study were submitted to hot torsion testing to evaluate the material behavior during the simulation of industrial process conditions. Even with simplifications needed for this type of methodology, the result of this investigation pointed out that the Ultra Low Carbon steels supported industrial conditions imposed during the hot torsion tests, like temperature, reduction and deformation per pass.

**Key words:** Rolling mill; Long product; Hot torsion testing.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 67<sup>o</sup> Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> Engenharia Metalúrgica, Coordenador Técnico da Gerência Técnica, CSN Aços Longos, Volta Redonda, Brasil.

<sup>3</sup> D.Sc. Professor Associado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, RJ, Brasil.

<sup>4</sup> Engenharia Metalúrgica e Engenheiro Especialista em Processos de Laminação, Gerência Técnica, CSN Aços Longos, Volta Redonda, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Deformação a quente é aquela realizada a temperaturas de trabalho maiores que 60% da temperatura absoluta de fusão do material. A deformação aplicada a temperaturas tão elevadas leva a mudança de forma desejada e induz alterações metalúrgicas estruturais e subestruturais ativadas termicamente. A laminação é um dos principais processos industriais de conformação a quente sendo a mesma subdividida em dois grupos de acordo com o seu produto final, a saber, planos ou não-planos. Estes últimos são também conhecidos como produtos longos.<sup>(1)</sup> Há dois conceitos diferentes de processamento a quente para se produzir o refino do grão ferrítico: o de laminação controlada (LC) e laminação de recristalização (LR). Na laminação controlada, o resfriamento acelerado em conjunto com a deformação da austenita a baixas temperaturas, induz a precipitação de carbonitreto que inibem a recristalização e intensificam o refino de grão, enquanto que na laminação de recristalização o refino de grão é obtido pelo refino da austenita por sucessivas recristalizações.<sup>(1)</sup>

No caso da laminação a quente de longos, os tarugos são reaquecidos até temperaturas elevadas para sua austenitização. Em seguida, são submetidos a sequências de deformações que envolvem as etapas de desbaste, intermediário, pré-acabamento e acabamento, e finalmente resfriados até a temperatura ambiente. Sendo os intervalos de tempo entre os passes pequenos, a recristalização estática não se completa, podendo ter o acúmulo de deformação de um passe para o outro. Por conseguinte, o processo passa a ser controlado pela recristalização dinâmica ou metadinâmica, quando os últimos passes são efetuados no campo austenítico e ou pela recuperação dinâmica no campo ferrítico. Este trabalho visa antecipar modificações que se façam necessárias às variáveis de processo de laminação a quente, antecipando problemas operacionais, contribuindo para o alto desempenho do comissionamento e posta em marcha da nova unidade CSN.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Materiais

Para a realização deste trabalho foram adotados dois aços ultra-baixo carbono (UBC) e um aço baixo carbono (BC) fornecidos pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN). A rota de fabricação utilizada para a produção dos aços contempla aciaria LD e desgaseificador a vácuo, sendo os dois graus de aço UBC estabilizados ao Ti. Na Tabela 1 estão representadas as composições químicas típicas dos graus que foram empregados no estudo, apresentando a composição química dos aços BC e UBC.

**Tabela 1.** Composição química dos materiais adotados (% em peso)

GRAU	%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Cu	%Ni	%Cr	%Mo	%Sn	%Al	%N	%Nb	%Ti	%B	%V
AÇO A - BC	0,0500	0,35	0,020 MAX	0,025 MAX	0,020 MAX	0,06 MAX	0,04 MAX	0,06 MAX	0,020 MAX	0,020 MAX	0,050	0,0060 MAX	0,005 MAX	0,005 MAX	0,0008 MAX	0,008 MAX
AÇO B - UBC	0,0030 MÁX	0,16	0,015 MAX	0,012 MAX	0,030 MAX	0,04 MAX	0,04 MAX	0,04 MAX	0,020 MAX	0,020 MAX	0,060	0,0045 MAX	0,004 MÁX	0,070	0,0004 MAX	
AÇO C - UBC	0,0050 MÁX	0,20	0,020 MAX	0,015 MAX	0,020 MAX	0,06 MAX	0,04 MAX	0,06 MAX	0,020 MAX		0,070	0,0050 MAX	0,005 MAX	0,100	0,0005 MAX	

Todas as simulações foram baseadas na laminação de fio-máquina nas dimensões finais de  $\varnothing$  5,50 mm de diâmetro, ou seja, considerando 32 passes de redução. Após aprovação pelo controle de qualidade no lingotamento contínuo da CSN foi realizada uma sequência de cortes para obtenção dos corpos de prova empregados nos ensaios de torção a quente (Figura 1).

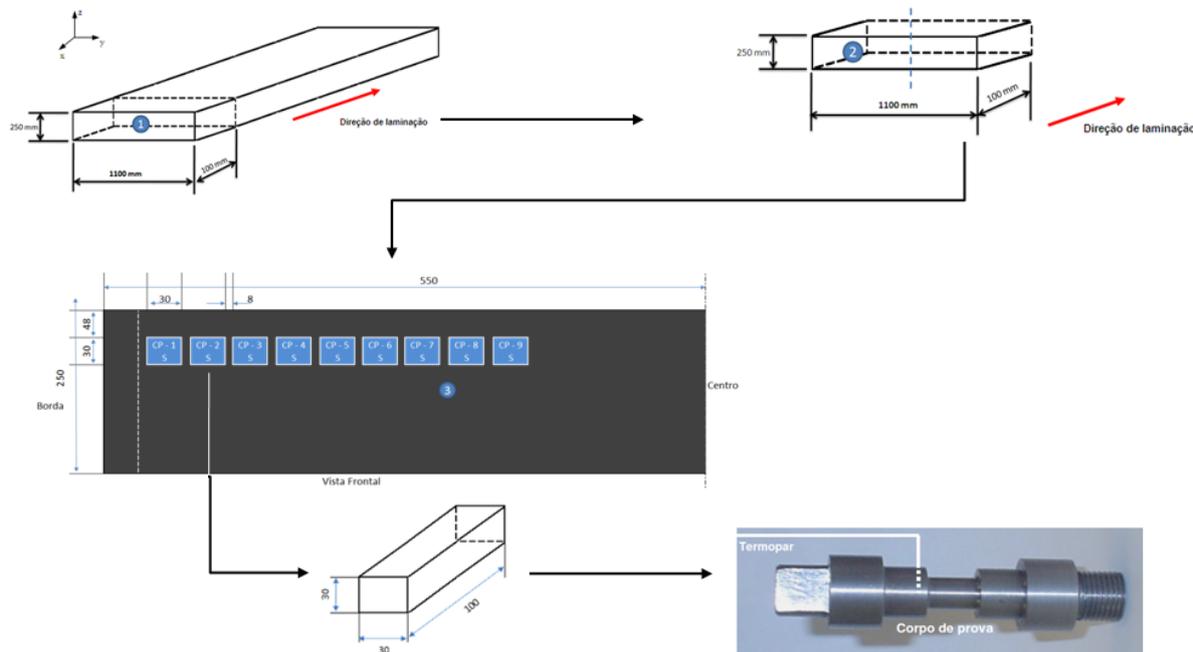
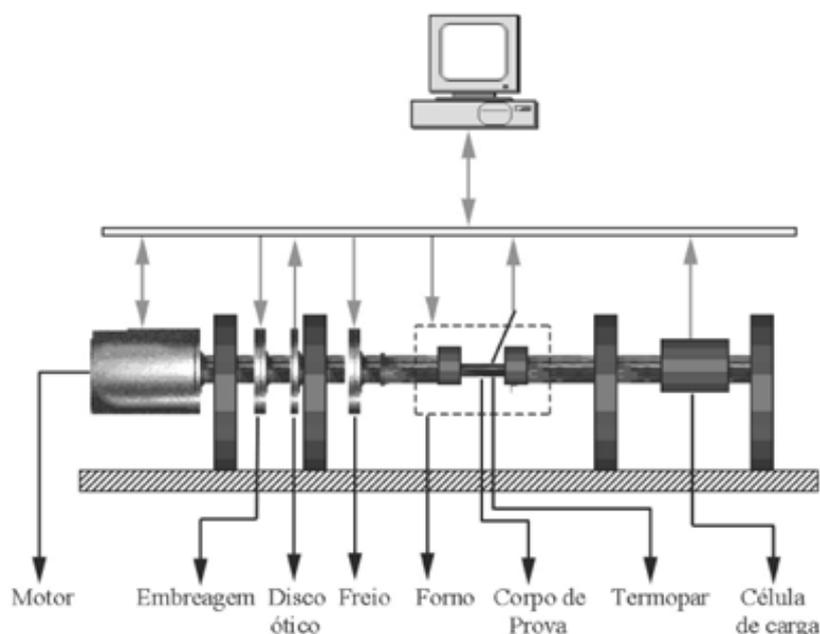


Figura 1. Preparação dos corpos de prova para o ensaio de torção a quente.

## 2.2 Metodologia

### 2.2.1 Ensaios de torção a quente

Na máquina de ensaios de torção a quente do Laboratório de Tratamentos Termomecânicos – DEMa – UFSCar, os esforços mecânicos são aplicados às amostras por um servo motor elétrico de 6 kVA com velocidade variável de 1 rpm a 2.000 rpm, e são medidos por uma célula de carga com capacidade de 1.000 kgf x cm. As amostras são aquecidas por um forno de radiação infravermelho de 6 kW acoplado à máquina. A deformação e a taxa de deformação são calculadas a partir de medidas do ângulo de rotação realizadas por um transdutor de rotação. A aquisição de dados é realizada por um computador interligado à máquina que controla os ensaios impondo a temperatura, a deformação, a taxa de deformação e o tempo de espera entre deformações. A Figura 2 mostra uma representação esquemática e a foto do equipamento utilizado.<sup>(2)</sup>



**Figura 2.** Representação esquemática da máquina de ensaios de torção a quente da UFSCar.

Para a realização do ensaio de torção a quente foi levado em consideração a temperatura de desenformamento, taxa de deformação, taxa de resfriamento e intervalo entre passes. Durante a simulação a última deformação foi repetida para que seja possível verificar o perfil de tensão x deformação desta gaiola de laminação.

Em virtude das grandes velocidades de processamento e taxas de deformação do laminador acabador (acima de  $1.000 \text{ s}^{-1}$ ), valores estes que não são alcançados por equipamentos de laboratórios,<sup>(3,4)</sup> faz-se necessário a utilização de modelo de ajuste para o intervalo entre passes, conforme proposto por Cetlin et al.,<sup>(5)</sup> vide Eq. (1), obtendo o tempo entre passes de laboratório,  $t_{lab}$ , considerando  $\dot{\epsilon}_{lab} = 1$  e  $n = 1$ . Os tempos corrigidos estão apresentados na Tabela 2.

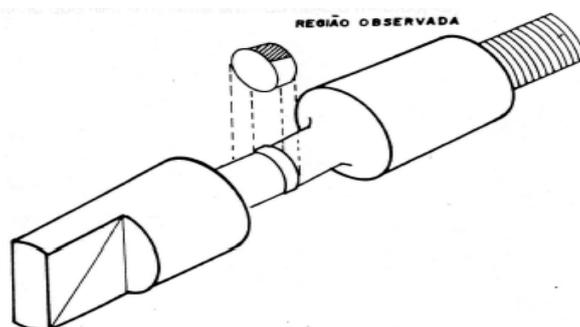
$$t_{lab} = t_{mill} \left[ \frac{\dot{\epsilon}_{mill}}{\dot{\epsilon}_{lab}} \right]^n \quad (1)$$

**Tabela 2.** Tempo entre passes corrigido para o laminador acabador

Gaiola	$\Delta t$ (s)	$\bar{\sigma}$	$t_{lab}$ (s)
19	0.07	505.24	61.3
20	0.05	490.83	48.3
21	0.04	848.89	69.9
22	0.03	847.34	58.2
23	0.03	1527.21	87.4
24	0.02	1661.80	78.8
25	0.02	3073.46	120.4
26	0.01	2916.39	92.3
27	0.01	5306.81	140.7
28	0	0	0

## 2.2.2 Análises metalográficas

Após as simulações experimentais por ensaios de torção a quente realizou-se metalografia da região útil dos corpos de prova para análise da microestrutura resultante da laminação, assim como tamanho de grão nas temperaturas simuladas. A região observada na análise metalográfica se concentra próximo à superfície (Figura 3), pois a transformação reduz radialmente. Os corpos de prova após as simulações foram seccionados em uma máquina de corte a disco de 2 mm de espessura sob refrigeração abundante para evitar o aquecimento e consequentemente alteração microestrutural. Todas as amostras foram embutidas em baquelite, lixadas, polidas e atacadas obedecendo aos procedimentos de preparação de amostras metalográficas via microscopia ótica.



**Figura 3.** Ilustração esquemática mostrando a região do corpo de prova observada nas análises metalográficas.

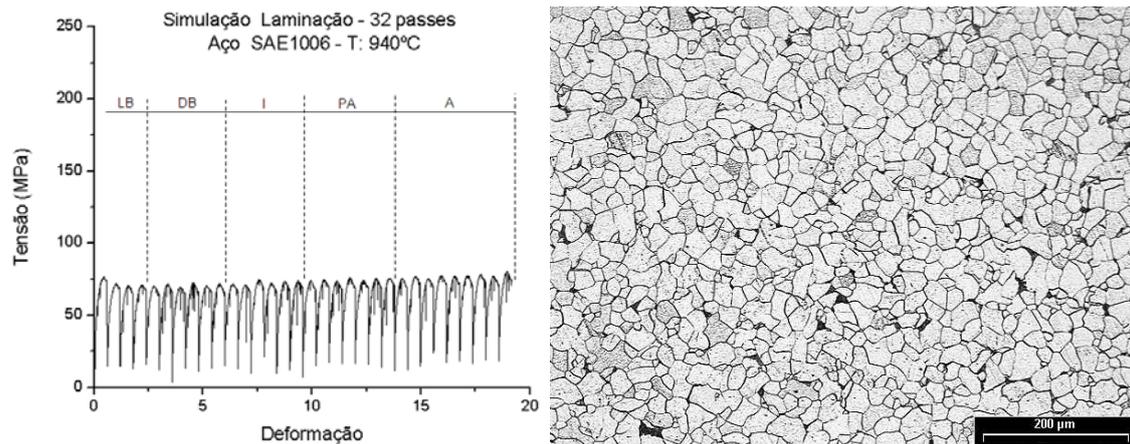
O desbaste grosseiro foi realizado em lixas sequenciais com granulometria de 220 *mesh*, 360 *mesh*, 600 *mesh* e 1.200 *mesh* e a preparação final em politriz dotada de prato giratório com pano fino utilizando pastas de diamante grossa (2  $\mu\text{m}$  a 6  $\mu\text{m}$ ) e fina (0  $\mu\text{m}$  a 2  $\mu\text{m}$ ) para obtenção de uma superfície espelhada e livre de deformações. As amostras de aço A-BC foram submetidas a ataque químico com o reativo Nital 3%, durante aproximadamente 10 s para a revelação da microestrutura. As amostras de aços UBC foram submetidas a ataque químico com o reativo Klemmy's, durante aproximadamente 10 s para a revelação da microestrutura. A determinação do tamanho médio de grãos foi realizada via analisador de imagem obedecendo à norma ASTM E 112.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos foram divididos por etapa de passes de laminação, a saber: laminador (1<sup>o</sup> ao 32<sup>o</sup> passe) e laminador acabador (23<sup>o</sup> ao 32<sup>o</sup> passe). Para cada etapa de laminação os resultados obtidos neste trabalho foram divididos em conjuntos associados aos ensaios de torção com múltiplas deformações, curvas  $\sigma \times \epsilon$  e análises metalográficas.

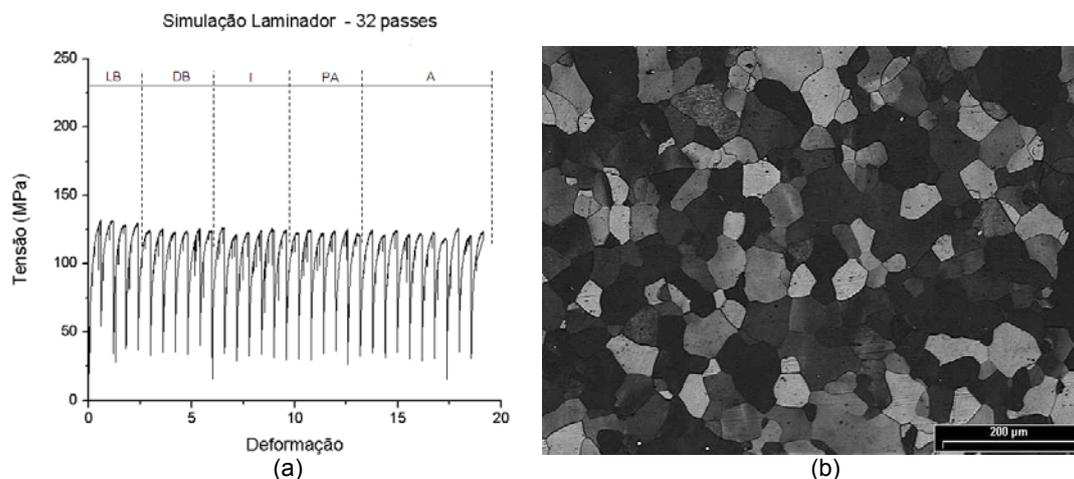
### 3.1 Laminador

Para a simulação do laminador das gaiolas 1 à 32, que contempla o laminador de blocos (LB), laminador de desbaste (DB), intermediário (I), pré-acabador (PA) e acabador (A) obtendo-se as seguintes curvas tensão – deformação e a metalografia resultante (Figura 4).



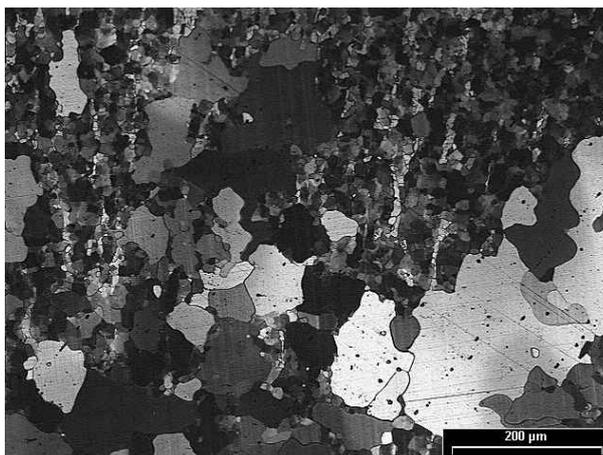
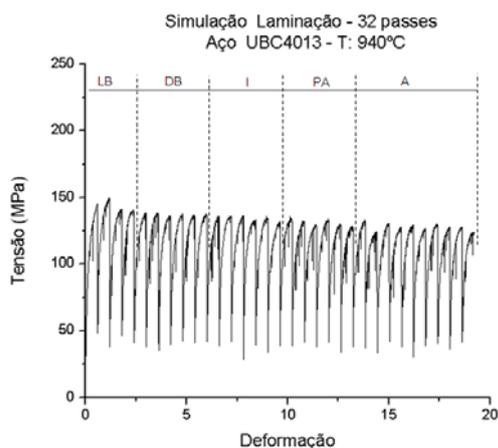
**Figura 4.** (a) Curva tensão – deformação resultante da simulação por torção a quente da laminação do aço A-BC; e (b) micrografias do aço A-BC resultantes do laminador.

Para analisar a caracterização do aço A-BC após a simulação da laminação sob a temperatura média de 940°C, as metalografias das amostras correspondentes ao produto acabado foram obtidas. Na Figura 4b é possível verificar a região superficial da amostra onde está localizada a região de menor tamanho de grão e a homogeneidade do tamanho de grão ao longo de toda a região analisada com dimensão da ordem de 13,8 μm ou ASTM 9. A microestrutura resultante é ferrita e perlita. Após a simulação da laminação do aço B-UBC foi obtida a curva tensão (Figura 5).



**Figura 5.** (a) Curvas tensão – deformação resultante da simulação por torção a quente da laminação do aço B-UBC; e (b) micrografias do aço B-UBC resultantes do laminador.

Pela micrografia do aço B-UBC após a simulação da laminação é possível verificar a homogeneidade apresentada pela região próxima a superfície da amostra com tamanho de grão da ordem de 15 μm ou ASTM 9. A Figura 6 apresenta as curvas tensão-deformação determinadas para o aço C-UBC.

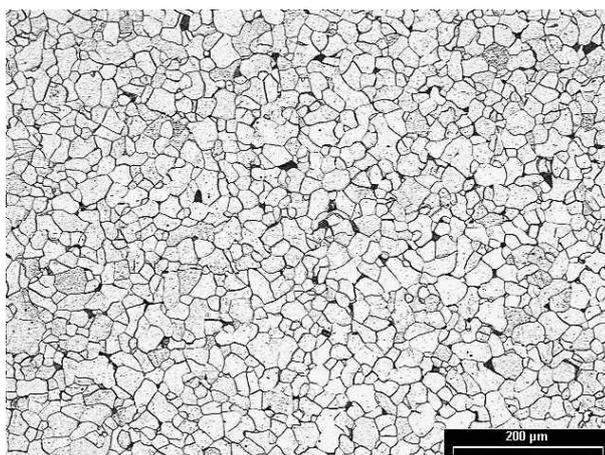
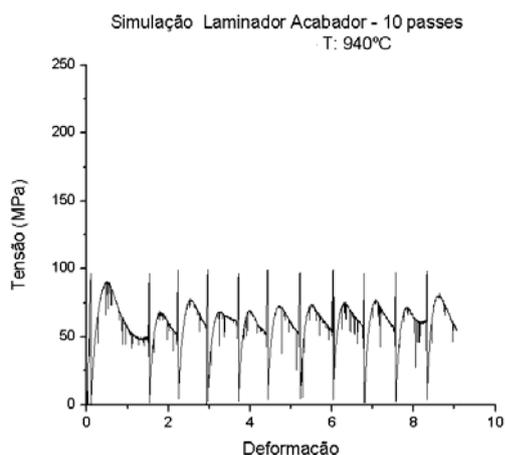


**Figura 6.** (a) Curva tensão – deformação resultante da simulação por torção a quente da laminação do aço C-UBC; e (b) micrografia do aço C-UBC resultante do laminador: variação de tamanho de grão em direção a superfície do corpo de prova (ampliação 100x).

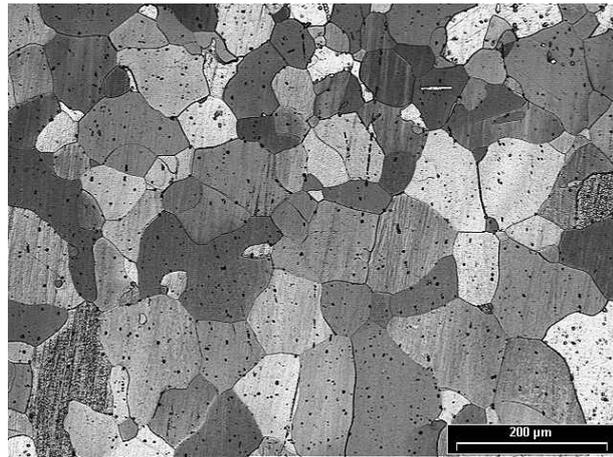
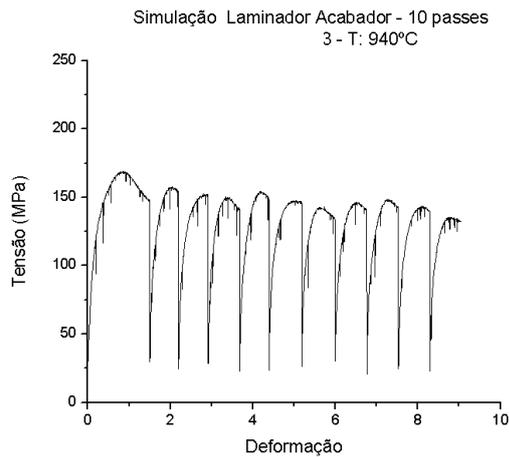
### 3.1.1 Laminador acabador

Para a simulação do laminador acabador foi adotada a temperatura de 940°C para os três aços adotados na simulação experimental por torção a quente, onde se pode comparar relativamente à tensão - deformação necessária a cada um deles, respectivamente. A partir da caracterização metalográfica do aço A-BC (Figura 7), após a simulação do laminador acabador, cujo tempo entre passes foi corrigido pelo emprego da Equação 1, verifica-se homogeneidade no tamanho de grão na região próxima a superfície da amostra (ASTM 10). Para o aço B-UBC verifica-se homogeneidade no tamanho de grão (ASTM 6) na região próxima a superfície da amostra (Figura 8).

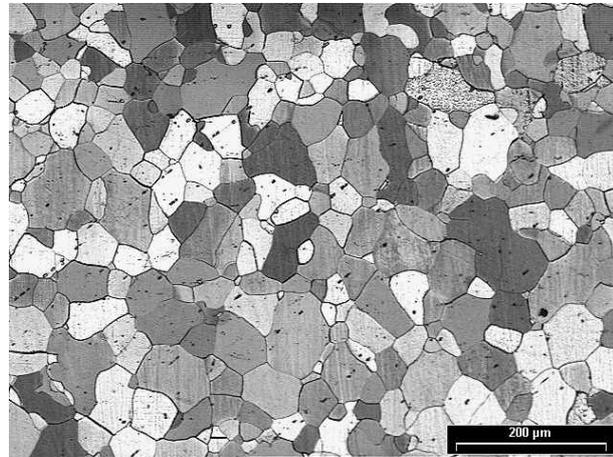
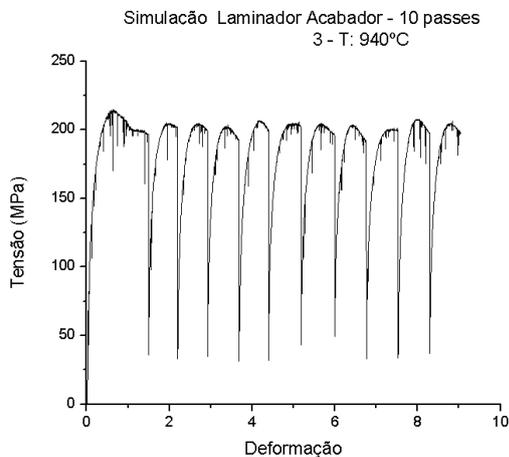
Para o aço C-UBC após a simulação referente ao laminador tipo acabador (Figura 9), a homogeneidade no tamanho de grão na região próxima a superfície da amostra (ASTM 9).



**Figura 7.** Simulação por torção a quente do laminador acabador para o aço A-BC: (a) curvas tensão – deformação; e (b) variação de tamanho de grão em direção a superfície do corpo de prova (ampliação 100x).



**Figura 8.** Simulação por torção a quente do laminador acabador para o aço B-UBC: (a) curvas tensão – deformação; e (b) variação de tamanho de grão em direção a superfície do corpo de prova (ampliação 100x).



**Figura 9.** Simulação por torção a quente do laminador acabador para o aço C-UBC: (a) curvas tensão – deformação; e (b) variação de tamanho de grão em direção a superfície do corpo de prova (ampliação 100x).

### 3.2 Discussão

O estado de tensões atuante nas simulações por torção a quente permite aplicar grandes graus de deformação ao corpo de prova, da ordem de 400% a 500%, sem a ocorrência de estricção ou qualquer instabilidade plástica, além do fato dos corpos de prova, que são relativamente pequenos, permitirem aquecimento rápido. A desvantagem do ensaio de torção a quente é o gradiente de deformação cisalhante ao longo do raio do corpo de prova, o que resulta que a análise metalográfica seja realizada somente na região próxima a superfície dos corpos de prova.

Com auxílio destas curvas de fluxo é possível determinar o tipo de processo de restauração que atua durante a deformação a quente, visando o controle dos fenômenos metalúrgicos atuantes no processamento termomecânico. Devido ao fato da tensão presente nos ensaios de torção ser cisalhante e na laminação de longos, as tensões predominantes são compressivas, é possível afirmar que os três aços avaliados experimentalmente não apresentarão problemas de ruptura durante a laminação uma vez os mesmos não apresentaram nenhum tipo de instabilidade sob torção.

## 4 CONCLUSÕES

Neste trabalho, procurou-se reproduzir a laminação do fio-máquina  $\varnothing$  5,50 mm de um aço baixo carbono e dois aços ultra-baixo carbono empregando ensaios de torção a quente. A aplicação de técnicas experimentais permitiu investigar os mecanismos de amaciamento que atuam em condições próximas às do processamento industrial. O presente estudo mostrou que a recristalização ocorre em todos os passes na laminação de fio-máquina, principalmente devido às altas reduções e baixos intervalos entre passes. O processo de laminação a quente de fio-máquina em aços UBC e BC pôde ser simulado experimentalmente.

Finalmente, pode-se concluir que, com a utilização da metodologia aqui proposta e aplicada no presente trabalho, isto é, simulação física foi possível modelar alterações no processo de laminação, visando aumentos de produtividade, melhorias nas propriedades mecânicas, reduções de custo e de tempo investido no desenvolvimento utilizando a linha industrial para apuração do modelo. Ao final deste trabalho recomenda-se um estudo mais detalhado da influência dos parâmetros de processos como velocidades de resfriamento e rotas de tratamentos térmicos sobre a evolução da microestrutura dos aços ultra-baixo carbono destinados a produção de fio-máquina.

## Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Professor Oscar Balancin (PPGCEM/UFSCar) pelo apoio na realização dos ensaios de torção. LPM agradece ao CNPq (Bolsa de Produtividade) e a FAPERJ (JCNE 2008).

## REFERÊNCIAS

- 1 BARBOSA, R; Desenvolvimento e perspectivas da pesquisa em metalurgia física aplicada à Laminação a Quente de Aços; Produção de Aço - Perspectivas para os próximos 10 anos; p.11; 2008
- 2 BALANCIN, O; A. M. JORGE. Jr.; Influência da microestrutura no comportamento plástico de aços ferríticos e austeníticos deformados em altas temperaturas através de ensaio de torção; 2<sup>o</sup> Workshop de textura e relação de orientação, pg: 163; EPUSP – IPEN - IPT, 2003.
- 3 LEE, Y., CHOI, S., HODGSON, P.D.; Integrated model for thermo-mechanical controlled process in rod (or bar) rolling; Plate, Rod and Welding Group, POSCO Technical Research Laboratories, Journal of Materials Processing Technology 125-126 (2002) 678-688.
- 4 HODGSON, P. D., JONAS, J. J., MACCAGNO, T.M.; Spreadsheet Modelling of Grain Size Evolution during Rod Rolling; ISIJ International, vol. 36, n<sup>o</sup> 6, pp. 720-728, Jan. 1996.
- 5 CETLIN, P. R.; YUE S. and JONAS J. J.; Influence of strain rate on interpass softening during the simulated warm rolling of interstitial-free steels; Metallurgical Transactions A; Vol. 24A; p. 1543; July, 1993.