

SIMULAÇÃO FÍSICA DA LAMINAÇÃO A QUENTE DE FIO-MÁQUINA DE AÇOS BAIXO E ULTRABAIXO CARBONO*

Patrícia de Fátima Rodrigues¹
Luciano Pessanha Moreira²
Ricardo Santos Nascimento³

Resumo

Neste trabalho, a técnica de ensaios de torção a quente foi utilizada na simulação física do processo de laminação a quente do produto fio-máquina. Foram realizados ensaios em dois tipos de aços, a saber, um aço baixo carbono (BC) e outro aço ultrabaixo carbono (UBC). A realização dos ensaios de torção a quente, sob condições próximas ao processamento industrial, ou seja, utilizando parâmetros de processo como taxa de deformação, temperatura e tempo entre passes, fornecidos pelo fabricante do laminador, possibilitou evidenciar os mecanismos de amaciamento destes aços. Foram obtidas as curvas de escoamento para as condições propostas e realizadas análises metalográficas para avaliar as microestruturas resultantes. A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que ambos os aços apresentaram bom desempenho na laminação do fio-máquina. Em particular, o aço ultrabaixo carbono mostrou-se capaz de suportar as condições de processamento impostas nas simulações, o que torna viável sua possível aplicação no mercado de produtos de aços longos.

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

PHYSICAL SIMULATION OF THE WIRE ROD HOT ROLLING OF LOW AND ULTRA-LOW CARBON STEELS

Abstract

In this work, the hot torsion test technique is used to the physical simulation of the hot rolling mill process of the wire rod product. The aim of this study was to perform hot torsion tests on two types of steel: a low carbon steel, already widely used in long steel rolling mill and a ultra-low carbon steel in order to investigate the performance of the latter in relation to the mechanical behavior and microstructural evolution. The hot torsion tests, carried out under conditions close to the industrial processing, that is, using process parameters such as strain-rate, temperature and interpass time, provided by the rolling mill manufacturer, have highlighted the softening mechanisms of these steels. After the hot torsion tests, the flow curves for the proposed conditions were obtained and metallographic analyses were performed to verify the resulting microstructures. From the results obtained, it can be concluded that both steels showed good performance wire-rod hot rolling. In particular, the ultra-low carbon steel showed to be able to withstanding the imposed conditions during the physical simulations, which makes its use feasible to apply in the long steel market.

Keywords: Hot torsion test; Hot rolling; Long steels.

¹ Engenheiro Metalúrgico, M.Sc., Analista de Consolidação de Informações Pleno, Gerência Técnica, Companhia Siderúrgica Nacional, Volta Redonda, RJ, Brasil.

² Engenheiro Mecânico, D.Sc., Professor Associado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, RJ, Brasil.

³ Engenheiro Metalúrgico, Analista de Consolidação de Informações Sênior, Gerência de Programação, Companhia Siderúrgica Nacional, Volta Redonda, RJ, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A laminação a quente de aços longos consiste, inicialmente, em aquecer o material até a temperatura de encharque para a austenitização, realizar deformações programadas nas etapas entre o desbaste e o acabamento e em seguida promover o resfriamento controlado do material. A etapa de acabamento, durante o processo de laminação é realizada com curtos tempos de espera entre passes. Sendo o intervalo entre passes pequenos, a recristalização estática não se completa, podendo ter o acúmulo de deformação de um passe para o outro e, conseqüentemente, 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. Assim, o estudo do comportamento dos aços durante seu processamento exige a utilização de técnicas experimentais que possam detectar e medir os efeitos dos parâmetros que atuam durante a deformação e nos intervalos entre passes. A técnica de ensaio de torção a quente é capaz de reproduzir estas condições de processamento e possibilita investigar os mecanismos de deformação que estão operando através das curvas de escoamento plástico e do acompanhamento microestrutural [1-3].

Neste trabalho, será simulado o processo de laminação do fio-máquina para a bitola de Ø5,5mm sendo que para obter este produto o material é deformado até a bitola final passando sucessivamente por cilindros que têm usinados canais de formas determinadas.

O foco do trabalho foi simular fisicamente as condições de deformação do material durante os passes de laminação de aços longos, ou seja, foram reproduzidas as condições de laminação até o laminador de acabamento [4].

A partir dos resultados dos ensaios de torção a quente, objetiva-se avaliar o desempenho do aço ultrabaixo carbono sob condições isotérmicas e reais de processamento. As condições dos ensaios, muito próximas ao processamento industrial, permitirão evidenciar o encruamento e mecanismos de amaciamento que podem ter lugar no processamento deste aço. O desenvolvimento deste estudo proporcionará a avaliação da viabilidade de aplicação deste tipo de aço que atualmente não é utilizado no mercado de aços longos.

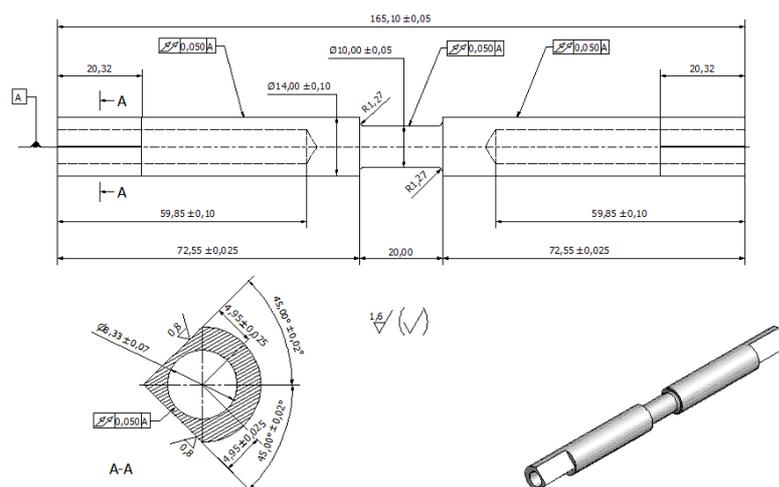
2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os dois tipos de aços utilizados neste trabalho foram o aço ultra-baixo carbono (UBC) do tipo IF (livre de intersticiais) estabilizado ao Ti e o aço baixo-carbono (BC). Ambos foram produzidos e fornecidos pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN). A escolha destes aços para a simulação do processo de laminação do fio-máquina teve como base dois critérios, a saber: (1) a qualidade dos aços produzidos com altos padrões de processamento, o que posteriormente pode garantir um produto de alta qualidade e (2) sua disponibilidade de fornecimento para a linha de aços longos na forma de blocos. A composição química dos aços BC e UBC, ambos produzidos por refino em aciaria LD de aços planos, está listada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química dos aços BC e UBC (% em peso)

Aço	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni
BC	0,053	0,279	0,014	0,016	0,007	0,005	0,007
UBC	0,029	0,122	0,012	0,009	0,008	0,006	0,005
Aço	Cr	Sn	Al	N	Nb	Ti	V
BC	0,012	0,001	0,038	0,0041	0,001	0,002	-
UBC	0,013	0,009	0,043	0,0045	0,002	0,053	0,001

Para amostragem foram selecionadas duas placas, previamente aprovadas pelo controle de qualidade da área produtiva e, em seguida, encaminhadas primeiro para o processo de oxicorte onde foi efetuado o corte transversal obtendo-se dois blocos com dimensões iguais a 210 mm (Comprimento = Direção de Laminação) X 1.100 mm (Largura) e X 250 mm (Espessura). Estes blocos foram cortados em uma máquina de serra em dimensões 210 mm X 550 mm x 250 mm de modo a obter-se esboços para usinagem dos corpos de prova de torção a quente. Foram amostrados dez esboços com dimensões 210 mm X 25 mm X 25 mm para cada tipo de aço, respeitando-se o sentido de laminação e certas precauções para evitar as regiões de defeitos superficiais e segregação central da placa. As dimensões e tolerâncias de usinagem dos corpos de prova de torção a quente estão apresentadas na Figura 1.

**Figura 1.** Geometria e dimensões do corpo de prova de torção a quente.

Para a realização da simulação física do laminador de aços longos por meio de ensaios de torção a quente, foram adotados os dados fornecidos pelo fabricante do laminador (Tabela 2). Para os dois aços, o taxa de aquecimento é 9,4°C/s, a temperatura do forno de reaquecimento de blocos é 1.150°C, o tempo de encharque é de 120s e o intervalo de tempo entre a saída do bloco do forno e entrada no primeiro passe do laminador de blocos é 16 s, com taxa de resfriamento $\dot{q} = 1,96^\circ\text{C/s}$. Nesta tabela, os valores de deformação plástica equivalente ε foram calculados no sentido do critério isotrópico de von Mises conforme método da seção retangular equivalente proposto por Lee et al. [5].

Os ensaios de torção a quente foram realizados com auxílio do simulador termomecânico Gleeble 3800 disponível no Laboratório de Nanotecnologia (LNNano), Centro Nacional de Pesquisas em Energia e Materiais (CNPEM). Antes dos ensaios, os corpos de prova passaram por limpeza com detergente adequado para remoção do óleo utilizado após a usinagem. Após limpeza e secagem, foram soldados termopares do tipo S na região central dos corpos de prova. Os

termopares do tipo S são apropriados para ensaios conduzidos a temperaturas acima de 1.100°C [6].

Tabela 2. Dados do processo de laminação de aços longos

Laminador	Passe	T (°C)	t (s)	$\dot{\epsilon}$ (°C/s)	$\bar{\epsilon}$
Blocos	1	1.118,6	20	1,36	0,22
	2	1.091,5	15,83	1,22	0,40
	3	1.072,2	10,86	0,69	0,40
	4	1.064,7	57,7	1,96	0,35
Desbaste	1H	918,8	18,33	1,31	0,30
	2V	894,7	14,67	0,95	0,46
	3H	880,8	9,57	0,78	0,76
	4V	873,3	7,10	0,04	0,74
	5H	873,6	4,89	2,15	0,74
	6V	884,1	12,70	0,40	0,86
Intermediário	7H	889,2	2,41	2,41	0,86
	8V	895,0	1,83	4,58	0,84
	9H	903,4	1,35	5,70	0,83
	10V	911,1	1,03	7,86	0,66
	11H	919,2	1,00	7,05	0,65
	12V	913,8	4,39	1,25	0,62
Pré-acabador	13H	919,3	1,09	3,85	0,61
	14V	923,5	1,00	7,56	0,84
	15H	930,4	1,00	9,73	0,83
	16V	937,6	1,00	8,11	0,70
	17H	942,7	1,00	16,45	0,70
	18V	951,2	5,00	8,18	0,70
Acabador	19	910,3	1,00	153,66	0,72
	20	920,3	1,00	128,29	0,76
	21	927,1	1,00	235,91	0,71
	22	937,0	1,00	311,45	0,79
	23	947,9	1,00	429,40	0,81
	24	959,7	1,00	464,82	0,77
	25	970,2	1,00	740,84	0,77
	26	983,2	1,00	898,03	0,76
	27	996,0	1,00	1.386,88	0,76
	28	1.011,6	1,00	--	0,48

Para a realização das simulações foram programados ensaios isotérmicos à 840°C (região de transição Fe- γ e Fe- α) para os aços BC e UBC e também foram realizados ensaios sob condições de processo para os 32 passes de laminação do aço UBC com temperaturas e tempo de espera entre passes de acordo com os dados do processo de laminação do fio-máquina \varnothing 5,5mm. A taxa de deformação empregada foi de 1s⁻¹. A Figura 2 apresenta os ciclos termomecânicos empregados para as simulações da laminação de aços longos.

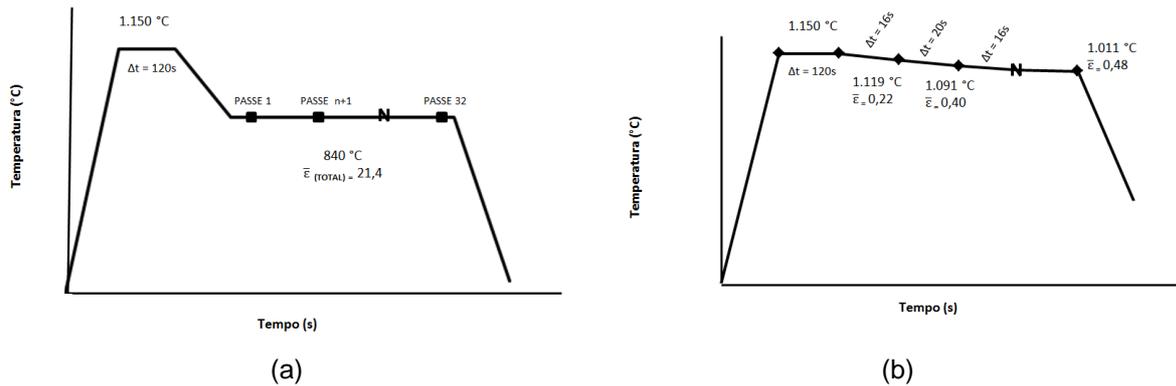


Figura 2. Ciclos termomecânicos para as simulações físicas da laminação a quente do fio-máquina: (a) laminação sob condições isotérmicas e (b) laminação sob condições de processo.

Para investigação da microestrutura resultante dos aços utilizados nas simulações experimentais foram retiradas amostras da região útil dos corpos de prova para realização de análises metalográficas. A Figura 3 apresenta detalhes da região do corpo de prova que foi seccionada para realização das observações microestruturais.

A preparação das amostras para a metalografia iniciou pelo corte das mesmas em uma máquina de corte que utiliza disco abrasivo de 1,5mm de espessura. Durante o corte, a refrigeração foi contínua para evitar aquecimento que poderia acarretar em transformações microestruturais. Após o corte as amostras foram embutidas em baquelite e lixadas numa sequência de lixas de 320, 400, 600 e 1.200 mesh a fim de se obter uma superfície plana para observação. Depois de lixadas foi realizado o polimento utilizando pastas de diamante de 6, 3 e 1 μm para alcançar uma superfície espelhada livre de riscos.

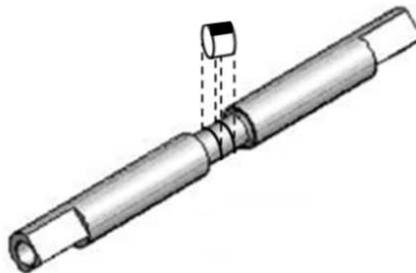


Figura 3 Desenho esquemático do CP destacando a região longitudinal onde foram realizadas as análises metalográficas.

O ataque por reagente químico foi realizado da mesma forma para os dois tipos de aço: primeiro atacou-se as amostras com Nital 3% durante aproximadamente 15 segundos seguido de um polimento com alumina 0,05 μm . A seguir as amostras foram atacadas com reagente Klemm por aproximadamente 15 segundos. Após toda a preparação foi realizada a observação das microestruturas obtidas por microscopia ótica utilizando o microscópio Olympus GX51. A determinação do tamanho médio de grãos foi realizada conforme a norma ASTM E112.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios de torção a quente reproduziram as condições de deformação, tempo e temperatura de cada etapa de processamento com base em dados industriais

fornecidos pelo fabricante do equipamento. As medidas experimentais observadas durante os ensaios foram o torque e a distorção angular (torção) do corpo de prova em função do tempo. Os resultados são apresentados em dois grupos de acordo com as simulações realizadas:

- (1) simulação isotérmica dos 32 passes de laminação para os aços BC e UBC;
- (2) simulação dos 32 passes de laminação nas condições de processo para o aço UBC.

3.1 Simulação isotérmica do laminador

Na simulação isotérmica da laminação de aços longos, observa-se que o aço UBC apresentou as tensões de escoamento após o laminador de blocos, bem menores que o aço BC. Comparativamente o aço UBC apresentou menor resistência à deformação com tensão máxima de escoamento da ordem de 126 MPa, enquanto que o aço BC apresentou tensão de máxima de escoamento da ordem de 149 MPa. Pode-se afirmar que este resultado ocorreu pelo fato do aço UBC estar sendo deformado na região ferrítica, sendo esta, por sua vez, mais dúctil que a austenita. Nota-se que os maiores esforços de laminação acontecem no laminador de blocos para o aço UBC, onde as tensões de escoamento são maiores. E para o aço BC as maiores tensões são percebidas no laminador de desbaste.

O aço UBC no laminador de blocos possui tensões de escoamento crescentes indicando uma região de encruamento da austenita. A partir do laminador de desbaste apresenta uma queda significativa nas tensões de escoamento. Esse comportamento mecânico é típico de materiais que se recuperam dinamicamente, pois verifica-se um estado estacionário de tensões à medida que ocorre a deformação do material. A Figura 4 apresenta as curvas de escoamento e a respectiva análise metalográfica para a simulação do aço UBC.

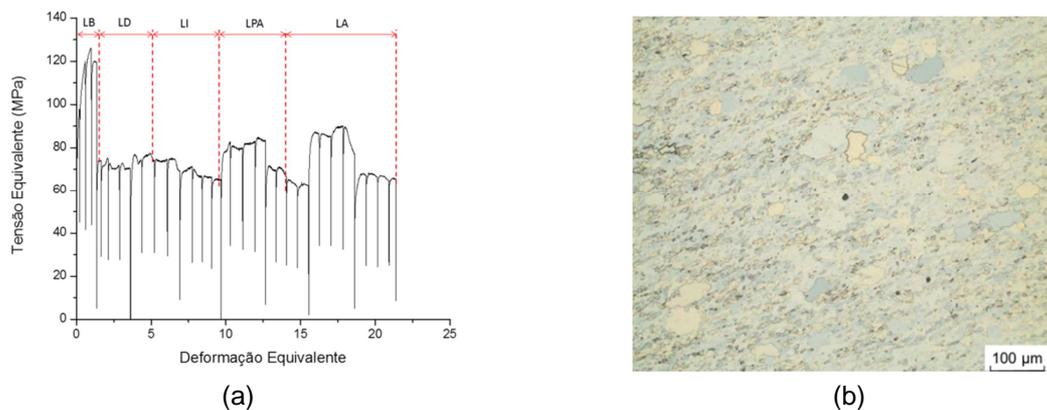


Figura 4. (a) Curvas de escoamento para o aço UBC obtidas a partir da simulação isotérmica do laminador sob condições isotérmicas e (b) Micrografia do aço UBC resultante após a simulação.

O aço BC apresenta um aumento contínuo da tensão de escoamento até o terceiro passe do laminador de desbaste indicando que ocorre encruamento do material, depois a tensão de escoamento sofre uma queda indicando processos de recristalização dinâmica. Nos últimos passes de laminação que ocorrem no laminador acabador, a tensão de escoamento continua a decrescer e as curvas obtidas indicam que nesta etapa do processo de conformação ocorre a recuperação da ferrita. A Figura 5 apresenta as curvas de escoamento e a respectiva análise metalográfica para a simulação do aço BC.

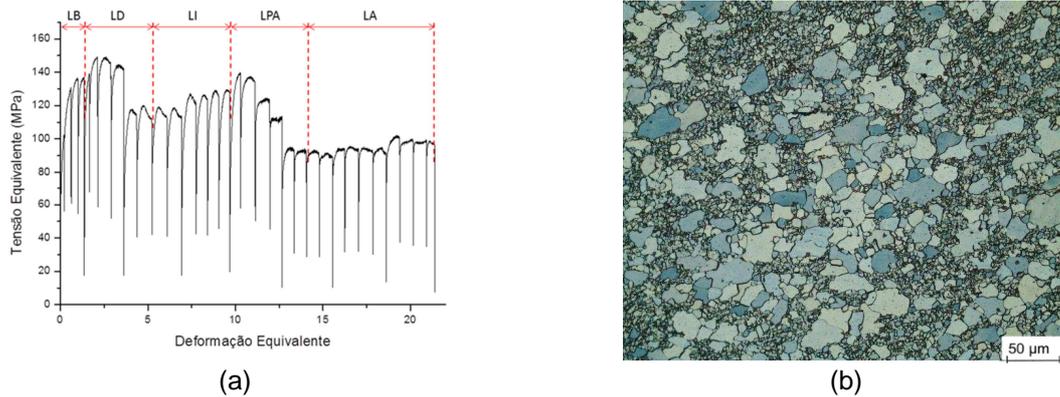


Figura 5. (a) Curvas de escoamento para o aço BC obtidas a partir da simulação isotérmica do laminador sob condições isotérmicas e (b) Micrografia do aço BC resultante após a simulação.

A micrografia apresentada na Figura 5 (b) para o aço BC deformado sob condições isotérmicas apresenta grande heterogeneidade de tamanho de grãos. Observam-se regiões com grãos mais refinados circundados por grãos maiores. Os tamanhos de grão medidos foram ASTM 8 (18,95μm) para os grãos maiores e ASTM 11 (7μm) para os grãos mais refinados. Para a simulação isotérmica do aço UBC, apresentada na Figura 4 (b) também observa-se grãos heterogêneos na região superficial da amostra (longitudinal). Também nota-se a presença de nitretos de titânio. Os tamanhos de grão medidos foram ASTM 10,5 (7,73μm).

Este aspecto microestrutural evidencia a ocorrência da recristalização incompleta da austenita entre passes. Quando se pratica a laminação controlada para obtenção do refino do grão ferrítico deve-se evitar determinadas faixas de temperaturas, a temperatura de não-recristalização da austenita (T_{nr}).

3.2 Simulação nas condições de processo para o aço UBC

Nas curvas correspondentes à simulação do laminador de blocos pode-se observar que a tensão de escoamento aumenta com a diminuição da temperatura indicando a recristalização da austenita. Observa-se que ocorre a maior tensão de escoamento na entrada do laminador de desbaste (5º passe de laminação). A possibilidade deste acontecimento é o fato de que quando o material passa pelo último passe do laminador de blocos (4º passe de laminação), o mesmo é deslocado por uma mesa de transferência e leva aproximadamente 57 segundos para entrar no primeiro passe do laminador de desbaste. Neste percurso ocorre um decréscimo de temperatura de aproximadamente 150°C. Isto pode acarretar em diminuição de energia de ativação para deslocamento das discordâncias, o que implica na necessidade de esforços maiores de laminação para conformação do material. No entanto, nos passes seguintes do laminador de desbaste, nota-se que a tensão de escoamento diminui quando a temperatura fica em torno dos 900° C, indicando que o material está entrando na região intercrítica ($\gamma+\alpha$) ou em Ar_3 .

As simulações para os laminadores intermediários e pré-acabador mostram que as tensões de escoamento se mantêm num estado estacionário onde ocorrem mecanismos de recuperação dinâmica. Para o laminador acabador pode-se afirmar que as condições de laminação são muito complexas, apresentando altas velocidades de deformação, altas taxas de resfriamento e temperaturas de trabalho que oscilam entre passes pela própria variação de energia interna do material deformado.

Na simulação realizada para o laminador acabador os primeiros passes iniciam com uma tensão média de 50 MPa que decresce com a deformação atingindo uma tensão média de 37 MPa no passe 23. A partir desse ponto as tensões médias de escoamento aumentam até o último passe de laminação.

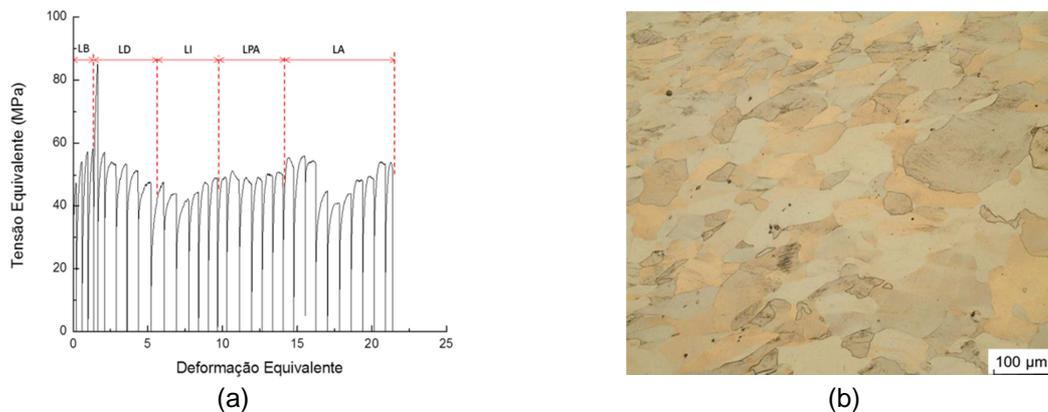


Figura 6. (a) Curvas de escoamento para o aço UBC obtidas a partir da simulação do laminador sob condições isotérmicas e (b) Micrografia do aço UBC resultante após a simulação.

Na Figura 6 (b) é apresentada a micrografia obtida a partir da simulação das condições de processo para o aço UBC. No canto esquerdo superior da figura pode-se verificar a presença de grãos deformados, isto porque esta região é a região superficial onde efetivamente ocorre a torção do material, também ocorre a presença de nitretos de titânio na matriz ferrítica.

4 CONCLUSÃO

Neste trabalho buscou-se reproduzir as condições industriais de laminação do produto fio-máquina Ø5,5 mm para o aço ultrabaixo carbono comparativamente com o aço baixo carbono, este último já empregado no mercado de aços longos. Para tanto, foi adotada a técnica de ensaios de torção a quente para simulação física do processamento termomecânico de aços longos. Na simulação isotérmica, de maneira geral, o comportamento do aço UBC apresentou resultados de tensões de escoamento em média 30% menores que as tensões de escoamento do aço baixo carbono. O aço UBC apresentou uma ótima performance em todos os programas da simulação, mostrando excelente capacidade de deformação a quente na reprodução do processamento do fio-máquina. Na maioria dos passes de laminação as tensões de escoamento foram inferiores às do aço baixo carbono. Isto na prática pode trazer ao processo a necessidade de menores esforços de laminação e a economia de energias mecânica e térmica. Porém, nos ensaios não foram simulados os tratamentos térmicos que o material sofre em linha, logo, este é um ponto a ser considerado em estudos posteriores.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPEM/LNNano e à CSN pelo apoio na realização dos ensaios de torção a quente. LPM agradece a FAPERJ (JCNE 2012) e ao CNPq (Bolsa de Produtividade em Pesquisa) pelo fomento à pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 1 CISDI Engineering Co; Technical Proposal For Wire Rod & Bar Mill; Chapter 4, CSN, 2007.
- 2 Dieter, G. E.; Metalurgia Mecânica; 2ª ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara , 1981. Capítulo 10, p. 322-331.
- 3 Regone, W.; Simulação da laminação a quente de um aço livre de intersticiais (IF) através de ensaios de torção; Dissertação de Mestrado, Orientador: Prof. Dr. Oscar Balancin, Programa de pós-graduação em Ciências e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, SP, 2001.
- 4 Padilha, Â. F., Siciliano Jr, F.; Encruamento, Recristalização, Crescimento de Grão e Textura; 3ª ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005. Capítulo 2, p. 12-23; Capítulo 3, p.29-42, Capítulo 10, p. 132-146.
- 5 Lee Y., Choi S., Hodgson P.D. Integrated model for thermo-mechanical controlled process in rod (or bar) rolling. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 125-126 (9): 678-688.
- 6 Lima, A. C. M.; 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; Dissertação de Mestrado, Orientador: Prof. Luciano Pessanha Moreira, D.Sc., Programa de pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal Fluminense; Volta Redonda, RJ, 2011.