

# INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE LAMINAÇÃO A QUENTE NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM AÇO ARBL DA CLASSE 700 MPa DE LIMITE DE ESCOAMENTO<sup>1</sup>

Ailton Ribeiro de Avelar Júnior<sup>2</sup>  
Ronaldo Antônio Neves Marques Barbosa<sup>3</sup>  
Túlio Magno Fuzessy de Melo<sup>4</sup>

## Resumo

Foi avaliada a influência das condições de laminação a quente em escala industrial (temperaturas de reaquecimento de placas e de acabamento das tiras) nas propriedades mecânicas em tração, no dobramento e na dureza, de um aço ARBL laminado a quente da classe 700 MPa de limite de escoamento, com espessura de 9,50 mm. As propriedades mecânicas foram relacionadas com os parâmetros microestruturais obtidos, nas diferentes condições avaliadas. Verificou-se que a microestrutura, o tamanho de grão e os valores de limite de escoamento e de resistência foram afetados tanto pela temperatura de reaquecimento quanto pela de acabamento. O alongamento total e a dureza foram afetados apenas pela temperatura de reaquecimento de placas. Esses resultados podem estar relacionados à quantidade de precipitados dissolvidos e à fração volumétrica de segunda fase presente em cada condição. Para todas as condições testadas, os resultados dos ensaios de dobramento foram aprovados.

**Palavras-chave:** ARBL; Propriedades mecânicas; Estruturas automotivas; Laminação a quente.

## INFLUENCE OF HOT ROLLING CONDITIONS IN THE MECHANICAL PROPERTIES OF A HSLA STEEL OF 700 MPa CLASS OF YIELD STRENGTH.

### Abstract

It has been assessed the influence of hot rolling conditions on a industrial scale (slabs reheating and strips finishing temperatures) in the tensile mechanical properties, bending and hardness, of a hot rolled HSLA steel of 700 MPa yield strength class, with a thickness of 9.50 mm. The mechanical properties have been related to the microstructural parameters, in the different conditions evaluated. It has been found that the microstructure, grain size and yield and tensile strength values were affected by reheating and finishing temperatures. The elongation and hardness were affected only by the reheating temperature. Those results may be related to the amount of dissolved precipitated and the second phase volume fraction presented in each condition. For all conditions tested, the bending tests results were approved.

**Key words:** HSLA; Mechanical properties; Automotive structures; Hot rolled.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 50º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 18 a 21 de novembro de 2013, Ouro Preto, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Aluno de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica da UFMG; Gerência de Controle Integrado do Produto, Usiminas; Ipatinga, MG.

<sup>3</sup> Engenheiro Mecânico, M. Sc., PhD, Professor Adjunto do Demet da UFMG; Belo Horizonte, MG.

<sup>4</sup> Engenheiro Mecânico, Dr. - Ing., Gerência de Pesquisa e Desenvolvimento de Produtos, Usiminas; Ipatinga, MG.

# 1 INTRODUÇÃO

A siderurgia tem despendido recursos em pesquisa e desenvolvimento de aços de elevada resistência, visando a atender requisitos de qualidade cada vez mais desafiadores exigidos pelo setor automotivo. Os clientes têm mostrado interesse especial nos aços Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL), pois com a sua utilização, consegue-se uma redução do consumo de combustível dos veículos em razão da redução do seu peso. Além disso, esses aços oferecem boa conformabilidade e soldabilidade.

Os aços ARBL contêm teor de carbono relativamente baixo e microadições de Nb, V e/ou Ti. Devido ao alto preço do Nb e do V, o desenvolvimento de aços microligados ao Ti está atraindo muita atenção no momento.<sup>(1)</sup>

Uma importante característica dos aços ARBL é a variedade de microestruturas que podem ser obtidas alterando a composição química e as condições termomecânicas de seu processamento. Estes aços compreendem principalmente microestruturas ferrita-perlita, podendo também apresentar, bainita ou martensita.<sup>(2)</sup>

Para fornecer o aço ARBL da classe 700 MPa de limite de escoamento mínimo para os clientes, é necessário disponibilizá-lo em uma ampla faixa de espessura. Este é um desafio para as linhas de laminação a quente, pois o aumento da espessura dos produtos geralmente provoca uma redução dos valores de limite de escoamento e resistência, para uma mesma composição química.

A obtenção de propriedades mecânicas em aços ARBL dentro dos requisitos de especificação dos clientes depende do controle da composição química e das condições de laminação a quente.

Neste sentido, este trabalho teve como objetivo avaliar a influência das condições industriais de laminação de tiras a quente, temperaturas de reaquecimento de placas e de saída do trem acabador de tiras a quente (acabamento), nas microestruturas e nas propriedades mecânicas de um aço ARBL da classe 700 MPa de limite de escoamento mínimo, com espessura de 9,50 mm.

## 2 METODOLOGIA

No trabalho proposto, a produção da corrida e o processo de laminação a quente foram realizados em escala industrial na Usiminas, usina de Ipatinga. O material utilizado foi um aço ARBL, microligado ao Nb e Ti, com a composição química mostrada na Tabela 1. Foram utilizadas seis placas com espessura de 250 mm para realização da experiência.

**Tabela 1** - Faixa de composição química (% massa) do aço ARBL

C	Mn	Si	Al	P	S	Nb	Ti	Cr	N
0,08	1,50	≤	0,015	≤	≤	0,050	0,080	0,30	≤
a	a	0,15	a	0,030	0,010	a	a	a	0,0080
0,12	1,80		0,080			0,080	0,120	0,60	

Foram visadas duas temperaturas de reaquecimento de placas (TRPs): 1200°C, geralmente utilizada, e 1240°C, para propiciar maior dissolução dos precipitados existentes. Para cada TRP foram visadas três temperaturas de acabamento (TAs), dentro da faixa de capacidade da Linha de Tiras a Quente: 850°C, 880°C e 910°C. Os demais parâmetros de processo foram controlados, podendo ser considerados constantes para as seis placas. As placas foram laminadas de 250 mm para

9,50 mm, representando uma condição desafiadora para a produção do aço ARBL de 700 MPa de limite de escoamento mínimo.

De cada bobina produzida foi retirada uma amostra no centro do comprimento e a ¼ da largura da tira. Essa posição de amostragem foi escolhida para minimizar a interferência de outras variáveis não estudadas. Os constituintes microestruturais presentes em cada amostra foram identificados através de microscopias ótica (MO) e eletrônica de varredura (MEV), após ataque com o reagente nital 4%. Foram determinadas também as frações volumétricas das fases presentes e o tamanho de grão ferrítico das amostras por meio de metalografia quantitativa. O tamanho de grão ferrítico foi medido através do método de interceptos, conforme a norma ASTM E-112/96.<sup>(3)</sup> Os testes de dureza foram realizados conforme a norma NBR NM 6507,<sup>(4)</sup> em escala Vickers, com carga de 10 kgf (HV<sub>10</sub>), em cinco posições sobre a face da espessura da tira.

De cada amostra foram retirados três corpos de prova (CPs) para realização dos ensaios de tração, conforme a norma NBR ISO 6892<sup>(5)</sup> e um para ensaio de dobramento, conforme a norma NBR 6153.<sup>(6)</sup> Foram usados CPs de tração com base de medida proporcional (5,65√So) e orientados transversalmente à direção de laminação. Os ensaios de dobramento foram realizados até o ângulo de 180°, sem calço (0E), em CPs transversais à direção de laminação.

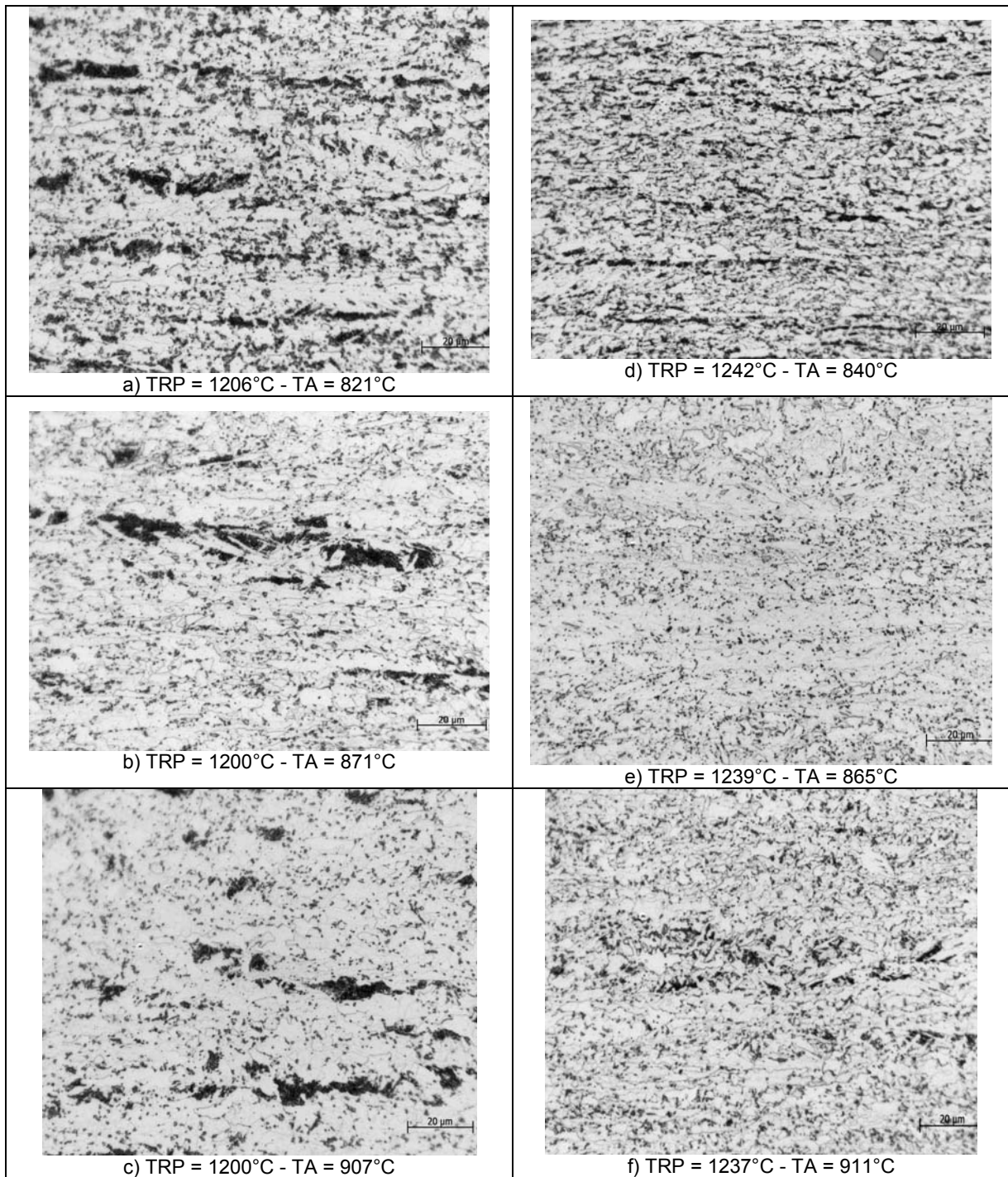
### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Microestrutura

As TRPs e TAs medidas na laminação industrial das seis placas deste estudo são apresentadas na Tabela 2, juntamente com resultados da análise metalográfica das amostras retiradas das tiras laminadas. A microestrutura das amostras, vista no MO, é formada basicamente por uma dispersão de segunda fase em matriz ferrítica, como mostrado nos exemplos da Figura 1.

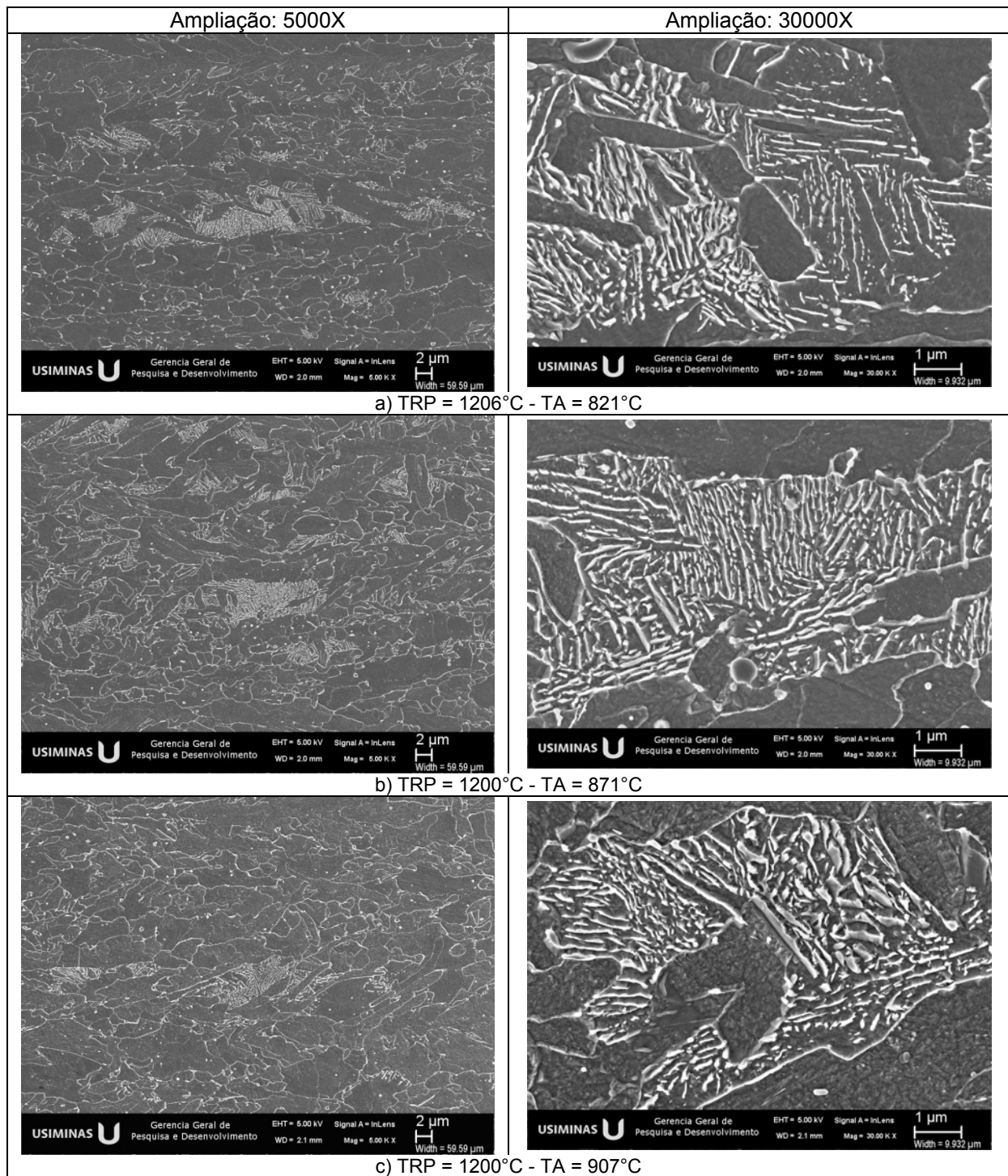
**Tabela 2** - Temperaturas de reaquecimento de placas e de acabamento obtidas para a fração de ferrita presente e tamanho de grão ferrítico (d)

Condição	Amostra	TRP (°C)	TA (°C)	Fração de ferrita(%)		d (µm)	
				Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
1	M1	1206	821	93,8	1,8	2,60	0,14
2	M2	1200	871	91,8	1,0	2,68	0,18
3	M3	1200	907	88,4	3,8	2,71	0,11
4	M4	1242	840	91,0	0,8	2,34	0,16
5	M5	1239	865	94,8	1,2	2,54	0,07
6	M6	1237	911	86,4	2,6	1,91	0,14



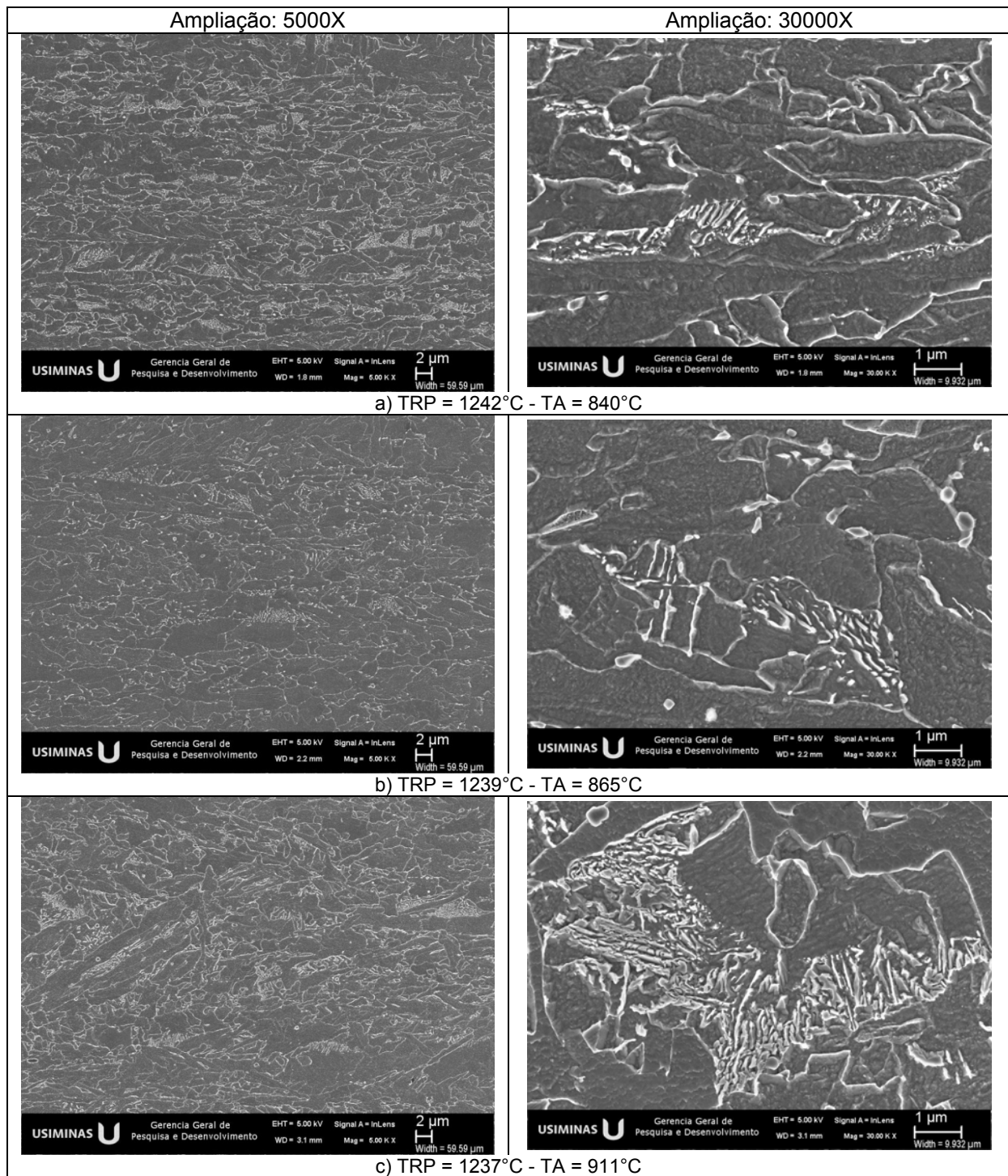
**Figura 1.** Aspecto microestrutural (MO) das amostras de tiras processadas após reaquecimento próximo a 1200 e 1240°C. Ataque: Nital 4%, ampliação: 1000X, ¼ da espessura.

Na análise microestrutural no MEV, verificou-se que, em todas as amostras, a segunda fase é constituída de perlita e/ou bainita (Figuras 2 e 3). Comparando-se as micrografias dessas figuras nota-se que, para o reaquecimento em torno de 1200°C, a microestrutura é mais bandeada, com grãos ferríticos e ilhas de segunda fase um pouco maiores. Já para o reaquecimento mais alto, próximo a 1240°C, os grãos ferríticos e a segunda fase são mais refinados e estão distribuídos de forma mais homogênea.



**Figura 2.** Aspecto microestrutural (MEV) das amostras de tiras processadas após reaquecimento próximo a 1200°C. Ataque: Nital 4%, ¼ da espessura.





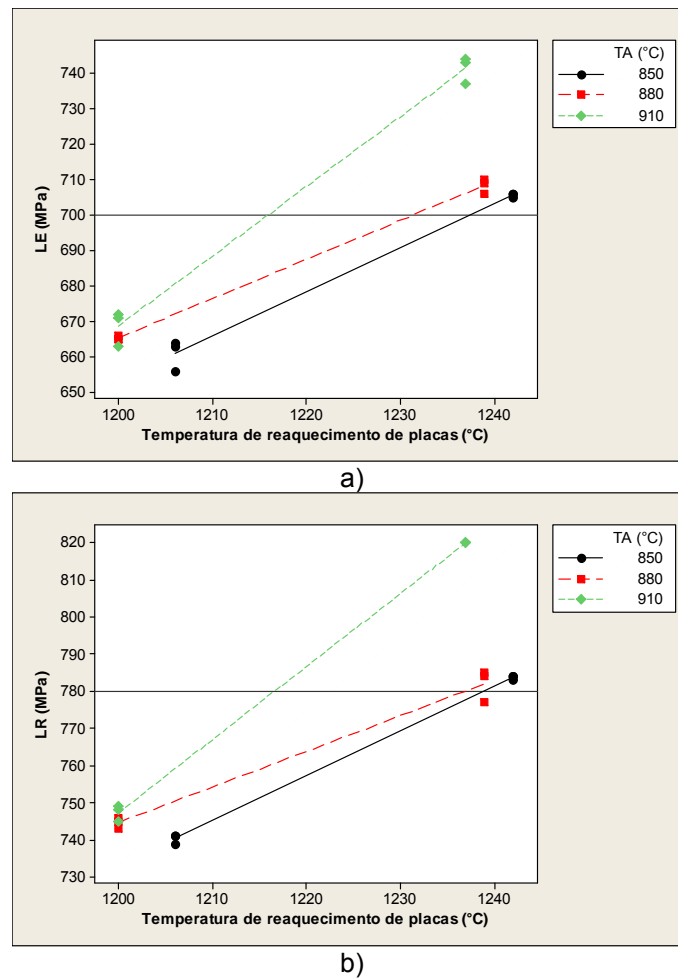
**Figura 3.** Aspecto microestrutural (MEV) das amostras de tiras processadas após reaquecimento próximo a 1240°C. Ataque: Nital 4%, ¼ da espessura.

Sob maior aumento (30000X) no MEV, nota-se que a diminuição da temperatura de acabamento pode ter resultado em microestruturas mais aciculares e um pouco mais refinadas, tanto para o reaquecimento em torno de 1200°C (Figura 2), quanto de 1240°C (Figura 3). Especialmente para a condição com os valores mais elevados das temperaturas de reaquecimento e de acabamento, respectivamente 1240°C e 910°C, observou-se a tendência de formação de bainita em substituição à perlita, como mostrado no exemplo da Figura 3 (c).

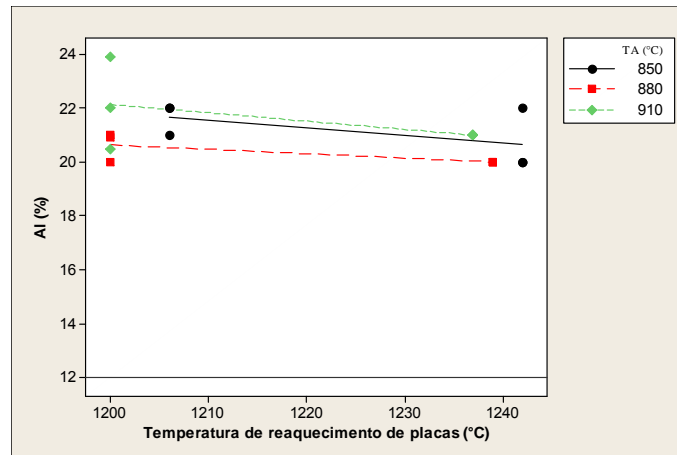
As observações microestruturais discutidas acima foram confirmadas pelos resultados de tamanho de grão ferrítico e fração de ferrita, apresentados na Tabela 2. Embora os tamanhos de grão sejam similares e bastante reduzidos para todas as condições analisadas, obteve-se um valor médio ligeiramente menor no material com as temperaturas de reaquecimento e de acabamento mais altas. Também foi notada uma tendência de aumento da quantidade de segunda fase com a elevação de ambas as temperaturas.

### 3.2 Propriedades Mecânicas

A influência da temperatura de reaquecimento de placas nas propriedades mecânicas em tração do aço estudado, para as temperaturas de acabamento utilizadas, é mostrada nas Figuras 4 e 5.



**Figura 4.** Efeito da temperatura de reaquecimento de placas nos limites de a) escoamento e b) resistência do aço estudado, para cada temperatura de acabamento utilizada.



**Figura 5.** Efeito da temperatura de reaquecimento de placas no alongamento total do aço estudado para cada temperatura de acabamento utilizada.

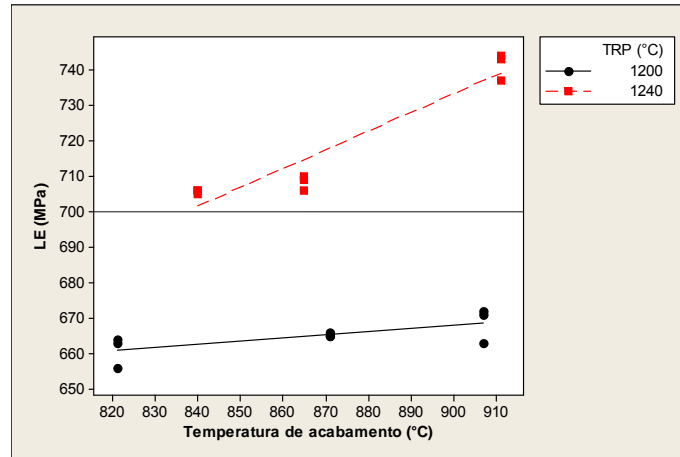
Os limites de escoamento e de resistência do aço avaliado aumentaram com a elevação da temperatura de reaquecimento de placas, independentemente da temperatura de acabamento utilizada, conforme a Figura 4. Esse efeito pode ser atribuído à maior quantidade de precipitados dissolvidos à temperatura mais elevada,<sup>(7)</sup> o que contribui para o endurecimento por precipitação durante a laminação e principalmente ao longo da transformação da austenita para a ferrita.<sup>(8)</sup> Já o alongamento total mostrou uma pequena redução com o aumento da temperatura de reaquecimento de placas (Figura 5), coerente com o aumento nos limites de escoamento e resistência, provavelmente devido à microestrutura mais refinada.<sup>(2)</sup>

A influência da temperatura de acabamento nas propriedades mecânicas em tração do aço estudado, em cada temperatura de reaquecimento de placas utilizada é mostrada nas Figuras 6 e 7.

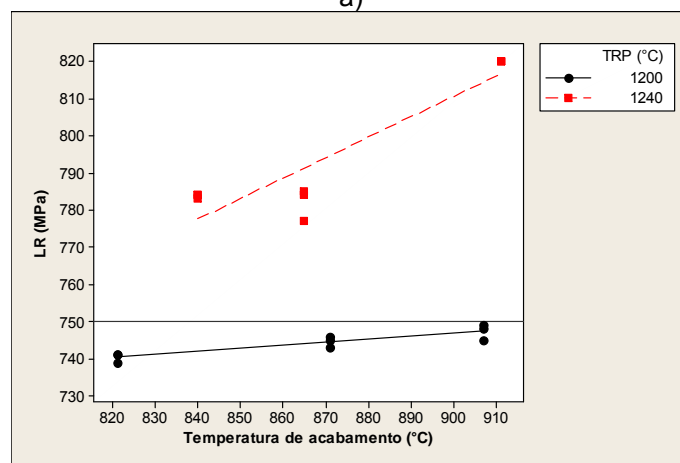
De maneira geral, houve um aumento dos limites de escoamento e de resistência com o aumento da temperatura de acabamento, independente da temperatura de reaquecimento de placas utilizada. Temperaturas de acabamento mais altas levam à formação de grãos austeníticos maiores e mais temperáveis. Isto pode contribuir para a formação de constituintes mais duros que a perlita, tais como a bainita e a martensita.<sup>(9)</sup> Já a utilização de temperaturas de acabamento mais baixas resulta em aumento da deformação residual após a laminação, que acelera o processo de nucleação da ferrita, pela presença mais acentuada de sítios favoráveis.<sup>(10)</sup> Não foi observado efeito da temperatura de acabamento sobre o alongamento total, como se vê na Figura 7.

Todos os CPs testados em dobramento foram aprovados, não apresentando trincas visíveis após os ensaios, independentemente da condição de laminação utilizada.



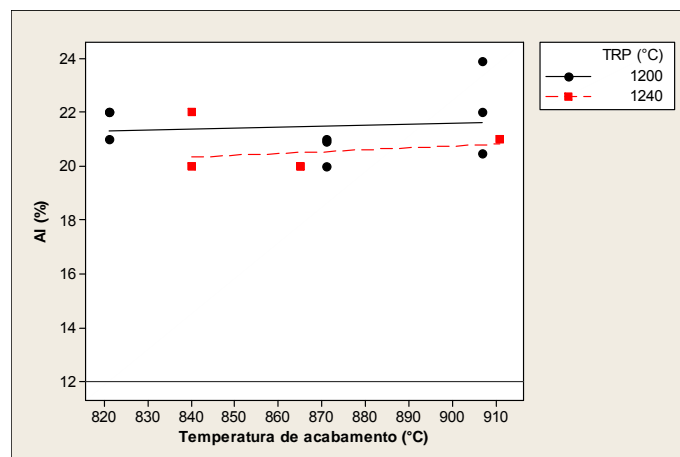


a)



b)

**Figura 6.** Efeito da temperatura de acabamento nos limites de a) escoamento e b) resistência do aço estudado para cada temperatura de reaquecimento de placas utilizada.

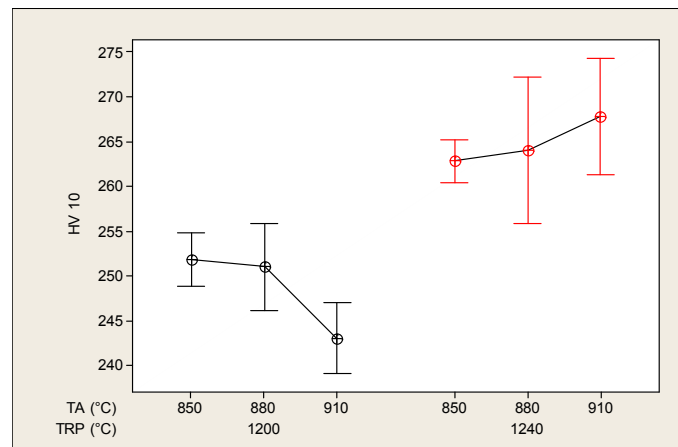


**Figura 7.** Efeito da temperatura de acabamento no alongamento total do aço estudado para cada temperatura de reaquecimento de placas utilizada.

### 3.3 Dureza

A influência das temperaturas de reaquecimento de placas e de acabamento sobre dureza do aço estudado, para todas as condições de laminação avaliadas, é mostrada na Figura 8. Foram obtidos valores de dureza ligeiramente mais altos para

a condição de reaquecimento de placa em torno de 1240°C, mostrando correlação com os valores de limites de escoamento e resistência obtidos.



**Figura 8.** Efeito das temperaturas de reaquecimento de placas e de acabamento na dureza do aço estudado.

Houve uma queda de dureza com o aumento da temperatura de acabamento, para o reaquecimento de placas a 1200°C, e um comportamento inverso para a temperatura de reaquecimento de 1240°C.

#### 4 CONCLUSÕES

A utilização da temperatura de reaquecimento de placas mais alta, levou a formação de grãos ferríticos e segunda fase mais refinados e distribuídos de forma mais homogênea.

Na condição de maiores temperaturas de reaquecimento de placas e de acabamento, (1240 e 910°C, respectivamente), observou-se a tendência de aumento da quantidade de segunda fase e de substituição da perlita por bainita.

Houve um aumento dos limites de escoamento e de resistência com o aumento das temperaturas de reaquecimento de placas e de acabamento.

Apenas a temperatura de reaquecimento de placas mostrou influência no alongamento total e na dureza. Foram obtidos valores de dureza ligeiramente mais altos e houve uma pequena redução do alongamento total com o aumento da temperatura de reaquecimento de placas. Para todas as condições testadas, os ensaios de dobramento foram aprovados.

#### REFERÊNCIAS

- 1 HAN, Y. et. al. TiC Precipitation Induced on Microstructure and Mechanical Properties in Low Carbon Medium Manganese Steel, *Materials Science and Engineering*, A530, 2011. P. 643-651.
- 2 REPAS, P. E., *Metallurgical Fundamentals for HSLA Steels*. In: MICROALLOYED HSLA STEELS, 1988, Chicago. Proceedings of Microalloying '88. Ohio: ASM International, 1988. P. 3-14.
- 3 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Philadelphia. ASTM E-112-96; Standard Test and Methods for Determining Average Grain Size, 2004. 26p.
- 4 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR NM ISO 6507-1, *Materiais Metálicos - Ensaio de Dureza Vickers Parte 1: Método de Ensaio*, 2008. 22p.

- 5 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR ISO 6892, Materiais Metálicos - Ensaios de tração à temperatura ambiente, 2002. 34p.
- 6 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR 6153, Produtos Metálicos - Ensaios de Dobramento Semi-Guiado, 1988. 11p.
- 7 PATEL, J.K. et. al. The Challenge to Produce Consistent Mechanical Properties in Nb - HSLA Strip Steels, Journal of Materials Processing Technology, n. 120, p. 316-321, 2002.
- 8 MELO, E. G. Efeito das Temperaturas de Reaquecimento de Placas e de Bobinamento nas Propriedades Mecânicas em Tração de um aço Microligado ao Nióbio Laminado a Frio. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2006. 59p. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica).
- 9 HULKA, K., GRAY, J. M. High Temperature Processing of Line-Pipe Steels. Proceedings of the International Symposium Niobium 2001, Dec. 2-5, 2001, Florida, USA, p. 587-612.
- 10 DOMINGUES, N. et. al. Estudo da Influência do Tempo de Reaquecimento de Placas sobre as Propriedades Mecânicas de Aço da Classe API-X70. Relatório Interno PPVP6498. Centro de Pesquisa da Usiminas: Ipatinga, 2008, 119p.