

# EFEITO DA TEMPERATURA DE ACABAMENTO E BOBINAMENTO NA MICROESTRUTURA E NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA COM ESTRUTURA FERRÍTICA BAINÍTICA <sup>1</sup>

Gleyson Marcos Barbosa <sup>2</sup>

Júlio Cezar Bellon <sup>3</sup>

Gladistone de Souza Guerra <sup>4</sup>

Dagoberto Brandão dos Santos <sup>5</sup>

## Resumo

O objetivo deste trabalho foi avaliar, em escala industrial, o efeito da temperatura de acabamento (TA) e temperatura de bobinamento (TB) na microestrutura e nas propriedades mecânicas de um aço laminado a quente com estrutura ferrítica bainítica. Constatou-se que, nas faixas avaliadas, o abaixamento da TA e TB resultaram em aumento do limite de resistência devido ao refinamento de grão e presença de microestruturas aciculares. Tendência de queda do LE foi observada quando TB estava menor que 440°C e TA maior que 860°C, sendo que este fato pode estar associado à geração de discordâncias móveis devido à formação das ilhas de bainita/martensita entre a matriz macia de ferrita e/ou devido à precipitação insuficiente de Nb(CN). O alongamento apresentou uma correlação forte com a TB, apresentando uma tendência de queda com o abaixamento deste parâmetro.

**Palavras-chave:** Laminação a quente; LTQ; Aços microligados; Aço ferrita bainita.

## EFFECT OF FINISHING DELIVERY TEMPERATURE AND COILING TEMPERATURE ON THE MICROSTRUCTURE AND ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH STRENGTH FERRITE BAINITE STEEL

### Abstract

The aim of this project was to evaluate, with an industrial scale experiment, the effect of finishing delivery temperature (FDT) and coiling temperature (CT) on the microstructure and mechanical properties of a hot rolled ferrite bainite steel. It was observed that the lowering of FDT and CT increases the UTS due to grain refinement and presence of acicular constituents. The YS was diminished when the CT was lower than 440°C and FDT higher than 860°C. This probably is due to the formation of martensite/bainite islands within the soft ferrite grains or due to incomplete NbCN precipitation. Elongation has presented a strong relationship with CT, getting lower when this parameter was decreased.

**Key words:** Hot rolling; Hot strip mill; Micro alloyed steel; Ferrite bainite steel.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 45º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 21 a 24 de outubro de 2008, Ipojuca - Porto de Galinhas - PE

<sup>2</sup> Engenheiro Metalurgista, M. Sc, Especialista em Laminação de Tiras a Quente da ArcelorMittal Tubarão

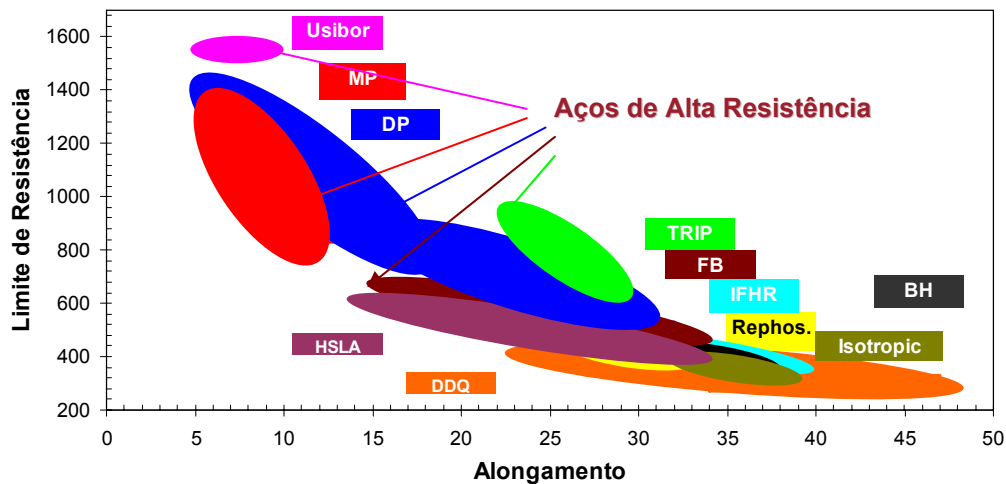
<sup>3</sup> Engenheiro Metalurgista, M. Sc, Especialista em Laminação de Tiras a Quente da ArcelorMittal Tubarão

<sup>4</sup> Engenheiro Metalurgista, M. Sc, Especialista da Gerência de Metalurgia da ArcelorMittal Tubarão

<sup>5</sup> Engenheiro Metalurgista, Doutor, Prof. Ass. do Departamento de Metalurgia e de Materiais da EEUFMG

# 1 INTRODUÇÃO

O cenário de aquecimento global e aumentos do preço do petróleo bruto têm implicado no crescimento da utilização de aços de alta resistência na indústria automobilística que, com isto, busca a diminuição do peso veicular, a redução do consumo de combustível e viabilização da implementação de novos itens de segurança. Neste contexto, os aços com estrutura ferrítica bainítica têm se mostrado uma opção promissora por combinar alta resistência com alongamento, atendendo assim os requisitos de aplicação para partes que exigem boa conformabilidade.<sup>(1)</sup> Conforme esquematizado na Figura 1, aços com estrutura ferrítica bainítica permitem a obtenção de maior resistência mecânica do que aços HSLA convencionais para a mesma faixa de alongamento.



**Figura 1** - Mix de aços da ArcelorMittal. Aços da família FB (Ferrita Bainita) apresentam maior resistência mecânica que aços HSLA convencionais, para uma mesma faixa de alongamento.

Oportunamente, a ArcelorMittal Tubarão iniciou pesquisa para desenvolvimento de aços laminados a quente que permitam conciliar o atendimento da demanda supracitada com otimização do processo de fabricação. Nesta linha, tem sido buscada a obtenção de alta resistência mesmo com a diminuição de elemento de ligas, de forma a aumentar flexibilidade da produção na aciaria e requerer menores forças de laminação para o processo de laminação a quente. Para isto, entretanto, é aumentada a responsabilidade da etapa de resfriamento acelerado que passa a ter maior relevância na obtenção de microestruturas adequadas para conferir alta resistência no aço produzido.

Trabalhos recentes desenvolvidos com experimentos laboratoriais mostram como a microestrutura é refinada e modificada para diferentes formas bainíticas em aços microligados e com baixo carbono pelo aumento da deformação em temperaturas abaixo da  $T_{nr}$ ,<sup>(2-4)</sup> pelo abaixamento da temperatura final de resfriamento<sup>(5)</sup> e pelo aumento da taxa de resfriamento.<sup>(4-7)</sup> A mudança da microestrutura contendo ferrita poligonal com perlita para microestrutura contendo ferrita bainítica, perlita degenerada e menor quantidade de ferrita poligonal, mudança ocasionada pelo aumento da taxa de resfriamento, implica também em elevação da resistência mecânica sem prejuízo do alongamento.<sup>(6)</sup> De fato, a presença de ferrita acicular (bainítica) confere excelente combinação de resistência e tenacidade.<sup>(8)</sup>

Este trabalho objetivou determinar, com abordagem industrial, a influência da temperatura de acabamento (TA) e bobinamento (TB), parâmetros de processo de laminação a quente, na microestrutura e propriedades mecânicas de um aço de alta resistência com estrutura ferrítica-bainítica.

## 2 DESENVOLVIMENTO

Para este trabalho, foram utilizadas 6 placas de uma mesma corrida de aço microligado ao Nb contendo  $C_{m\acute{a}x}$  de 0,10%,  $Mn_{m\acute{a}x}$  de 1,60% e  $Si_{m\acute{a}x}$  de 0,15%.

Foi realizada laminação a quente experimental, em escala industrial, conforme esquematizado na Figura 2, considerando como  $T_{nr}$  e  $A_{r3}$  as temperaturas de transformação calculada segundo equações encontradas na literatura.<sup>(2,3)</sup> A espessura final de laminação foi de 3,0 mm (86,9% redução de espessura) e a taxa de resfriamento média da ordem de 40°C/s.

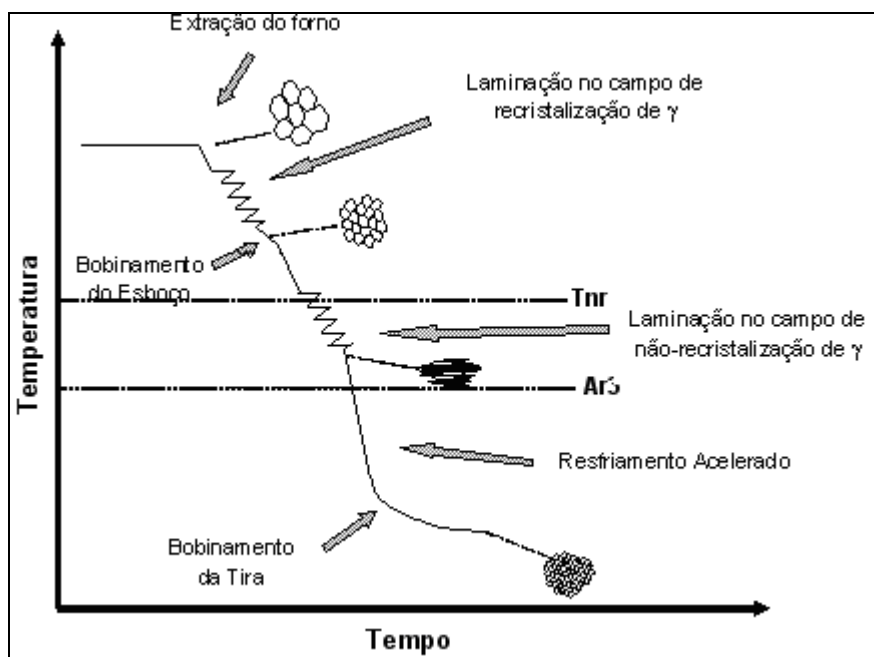


Figura 2 – Representação esquemática do processo de laminação a quente realizado.

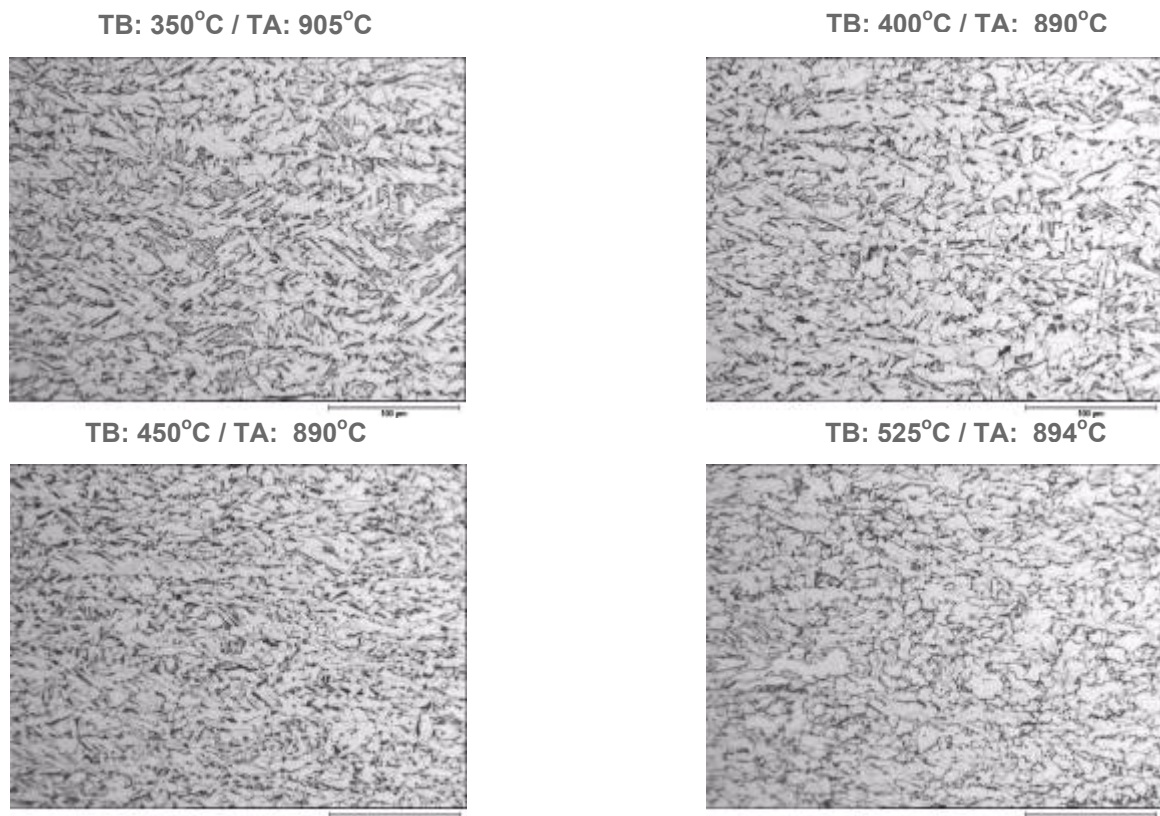
Foram visados 2 níveis de Temperatura de Acabamento (TA) e 3 níveis de Temperatura de Bobinamento (TB). Após laminação experimental em escala industrial, foram selecionadas regiões representativas da tira, tendo como critério a existência de TA e TB estáveis em pelo menos 20 metros contínuos. A amostragem foi realizada numa linha de tesoura, cujo controle de *tracking* permitiu a identificação das regiões pré-selecionadas para amostragem. Buscou-se realizar amostragem no meio da tira (posição transversal) por ser esta a região de leitura de temperatura durante o processo de laminação a quente.

As amostras tiveram a microestrutura caracterizada com microscopia óptica e eletrônica de varredura a  $\frac{1}{4}$  da espessura. Foi realizado ensaio de dobramento (180°) e de tração, focando a identificação do Limite de escoamento (LE), Limite de Resistência (LR) e Alongamento Total (AI). Cada condição é representada pela média dos resultados de 3 ensaios de tração.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Efeito da TB na Microestrutura

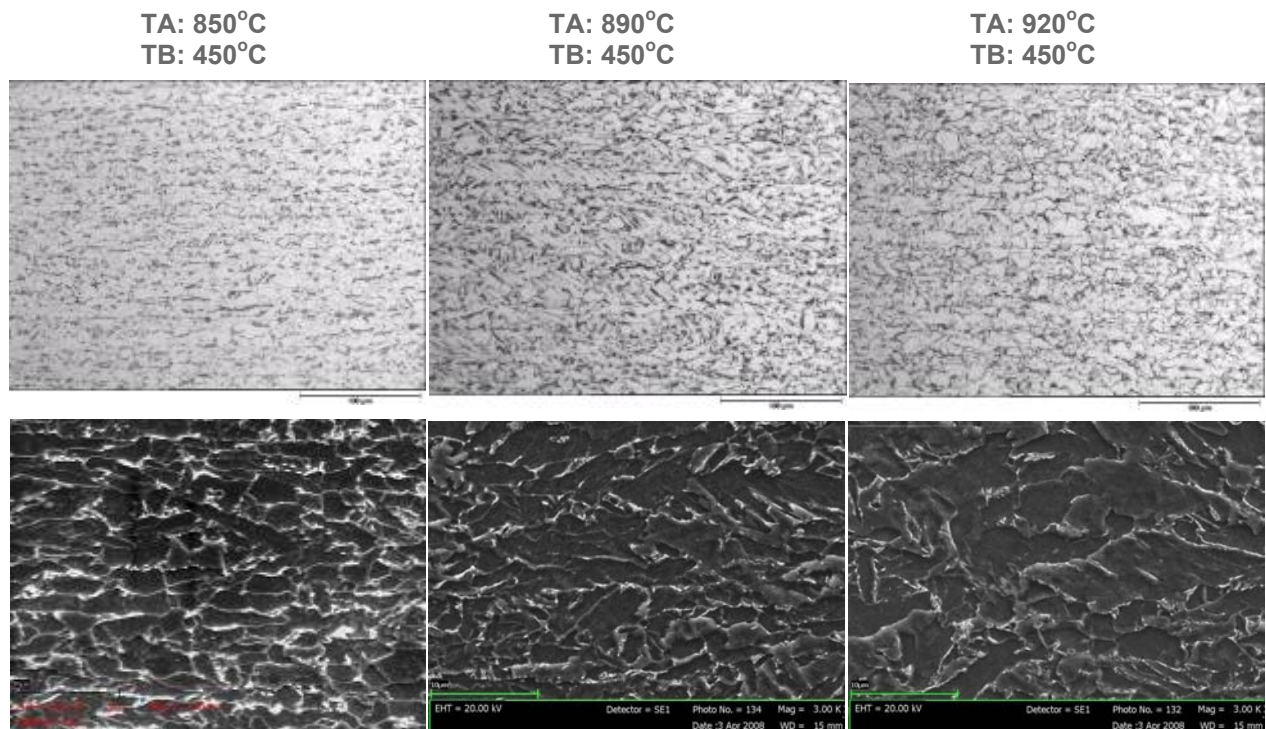
A Figura 3 mostra as microestruturas obtidas para diferentes TB (350°C, 400°C, 450°C e 525°C) e TA similares (variação entre 890°C a 905°C). O abaixamento da temperatura de bobinamento (TB) ocasionou diminuição do tamanho de grão ferrítico, devido aumento na taxa de nucleação de ferrita, e favoreceu a formação de constituintes aciculares. Percebe-se que a ferrita poligonal predominante na condição de TB=525°C perdeu espaço para constituintes aciculares com o abaixamento da TB.



**Figura 3**– Morfologia obtida com diferentes TB's e mesma faixa de TA. Microscopia óptica com aumento de 1000x. Ataque nital 2%.

#### 3.2 Efeito da TA na Microestrutura

O abaixamento da Temperatura de Acabamento implicou no refinamento da matriz ferrítica, conforme pode ser visto na Figura 4. A redução da temperatura de acabamento poder ser traduzida como um aumento do grau de deformação abaixo da  $T_{nr}$  que, pelo aumento da área interfacial por unidade de volume de austenita, aumenta os sítios para nucleação da ferrita durante a transformação.



**Figura 4**– Morfologia obtida com diferentes TA's e mesma TB. Microscopia eletrônica de varredura com aumento de 3000x. Ataque Nital 2%.

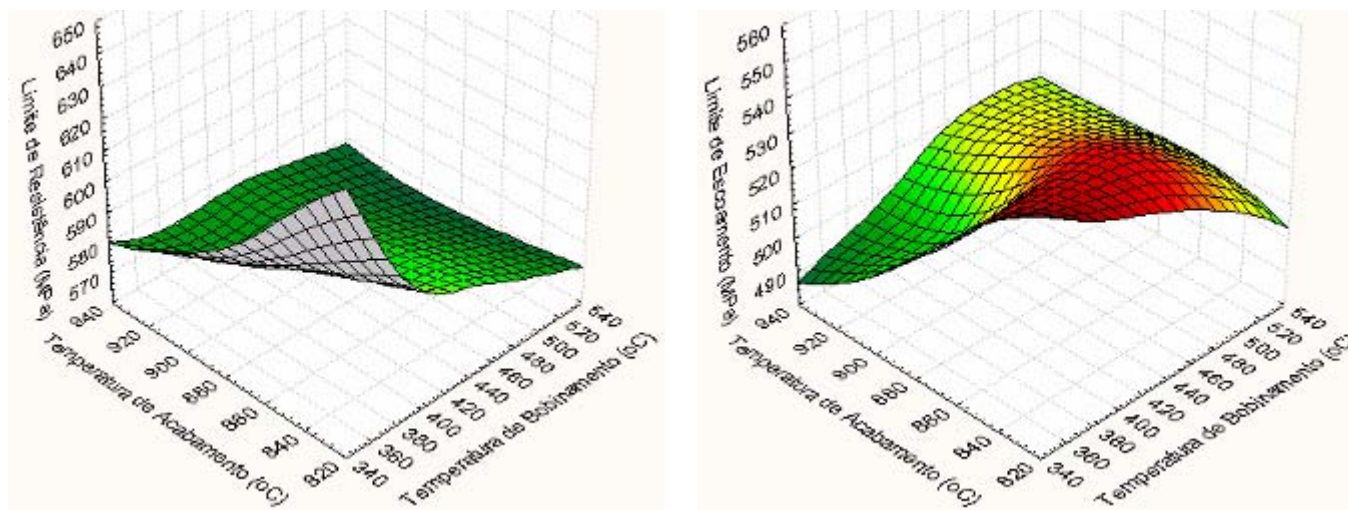
### 3.3 Efeito da TA e TB nas Propriedades Mecânicas

Os resultados dos ensaios de tração realizados indicaram um aumento do limite de resistência com o abaixamento da TA e TB, conforme mostrado na Figura 5a. Este fato está associado ao refinamento da matriz ferrítica<sup>(9)</sup> e ao aumento de constituintes aciculares.<sup>(6)</sup>

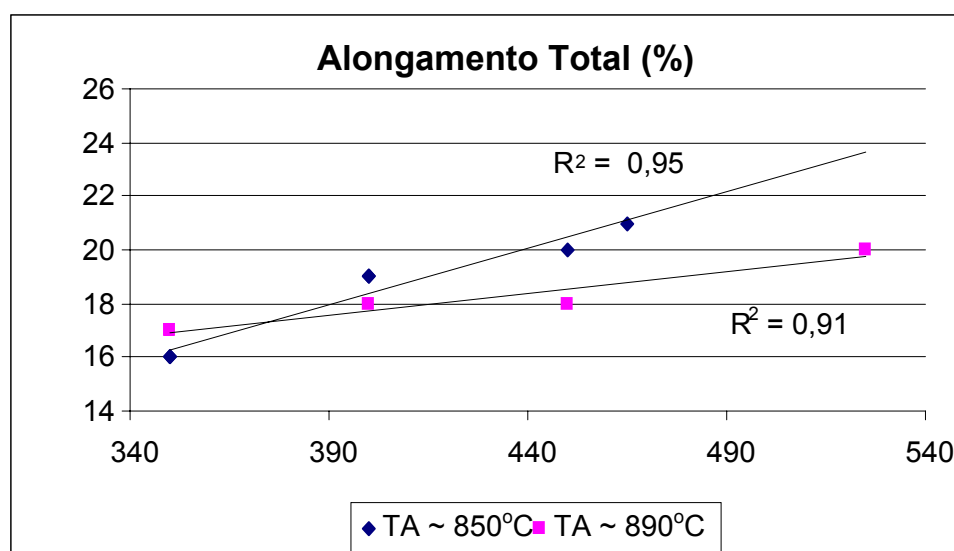
A contribuição da temperatura de bobinamento dependerá da competição entre os efeitos contrários sobre a resistência mecânica decorrentes do endurecimento por precipitação, dos elementos de liga e do amaciamento pelo crescimento do tamanho de grão ferrítico.<sup>(10)</sup> Com isto, o LE, representado pela superfície na Figura 5b apresenta uma tendência mais complexa. A tendência de queda na região de TB menor que 440°C e TA maior que 860°C pode estar associada a geração de deslocações móveis na matriz macia de ferrita, devido ao cisalhamento que ocorre durante a formação das ilhas de bainita/martensita<sup>(11)</sup> e/ou devido a precipitação insuficiente de Nb(CN).<sup>(9)</sup>

O alongamento apresentou uma tendência de queda linear com o abaixamento da temperatura de bobinamento. Este fato está associado ao refinamento da microestrutura e presença de constituinte “MA”. A análise metalográfica com ataque pelo reativo de LePera permitiu a identificação de traços de constituintes “MA”, que estavam mais visíveis nas amostras com TB = 350°C.

O teste de dobramento foi aprovado para todas as condições de processamento avaliadas neste trabalho.



(a) Limite de Resistência (b) Limite de Escoamento  
**Figura 5-** Efeito combinado da TA e TB na resistência mecânica.



**Figura 6-** Efeito combinado da TA e TB no alongamento.

#### 4 CONCLUSÕES

O presente trabalho permitiu identificar relações dos parâmetros de processamento no LTQ com as propriedades mecânicas estudadas, sendo que:

- O abaixamento das temperaturas de acabamento e bobinamento resultaram no aumento do limite de resistência mecânica do material. Este fato está associado ao refinamento da matriz ferrítica e ao aumento de constituintes;
- Há tendência de queda do limite de escoamento nas condições onde a TB é menor que 440°C e TA maior que 860°C. Tal fato pode estar associado à geração de discordâncias móveis na matriz macia de ferrita devido ao cisalhamento que ocorre durante a formação das ilhas de bainita/martensita e/ou devido a precipitação insuficiente precipitação de Nb(CN);
- O alongamento apresentou uma tendência de queda linear com o abaixamento da temperatura de bobinamento. Este fato está associado ao refinamento da microestrutura e presença de constituinte “MA”.

## REFERÊNCIAS

- 1 KLEIN, M.; SPINDLER, H.; LUGER A.; RAUCH, R., STIASZNY, P.; EIGELBERGER, M. High Strength And Ultra High Strength Hot Rolled Steel Grades – Products for Advanced Applications. Disponível em: <[www.msn.com.ac.uk/phase-trans/2005/link/138.pdf](http://www.msn.com.ac.uk/phase-trans/2005/link/138.pdf)> Acesso em 06 abr. 2008.
- 2 BORATTO, F. Effect of Chemical Composition on the Critical Temperatures of Microalloyed Steels. In: Int. Conf. on Physical Metallurgy of Thermo-Mechanical Processing of Steels and Other Metals, ISIJ, 1988, Tokyo. Proceedings...Tokyo: Tamura, I.(ed.); The ISIJ, 1988. p. 383-390.
- 3 SEKINE, H. Transformation Behaviour of Austenite after Thermomechanical Treatment. In: Thermomechanical Processing of High Strength Low Alloy Steels. London: Butterworths and Co. Ltd., 1st ed., 1988, chap. 8. 248 p.
- 4 COTA, A. B.; RODRIGUES, P. C. M.; BARBOSA, R. A. N. M.; SANTOS, D. B. Influência da deformação na região de não recristalização da austenita sobre a transformação em resfriamento contínuo em um aço bainítico de baixo carbono, Revista Metalurgia e Materiais, n. 58, p. 155-160, Abril 2005.
- 5 COTA, A. B.; SANTOS, D. B. Microstructural Characterization of Bainitic Steel Submitted to Torsion Testing and Interrupted Accelerated Cooling. Materials Characterization, n. 44, p. 291-299, 2000.
- 6 SHANMUGAM, S., RAMISETTI, N. K.; MISRA, R. D. K.; MANNNERING, T.; PANDA, D.; JANSTO, S. Effect of cooling rate on the microstructure and mechanical properties of Nb-microalloyed steels. Materials Science and Engineering A, v. 460-461, p. 335-343, 2007.
- 7 GORNI, A. A.; XAVIER, M. D.; GOLDENSTEIN, H.; TSCHIPTSCHIN, A. P. Transformação da Austenita em Aços Microligados com Microestrutura Ferrítica-Bainítica, 62º Congresso Anual da ABM, Vitória, 2007.
- 8 HULKA, K. The role of Niobium in low carbon bainitic HSLA steel. Disponível em: <[www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2005/link/10.pdfT](http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2005/link/10.pdfT)> Acesso em 06 abr. 2008.
- 9 Panigrahi, B. K. Processing of Low Carbon Steel Plate and Hot Strip – an Overview. Bulletin Materials Science, v. 24, n. 4, p. 361-371, August 2001.
- 10 GORNI, A. A.; XAVIER, M. D.; CHIVITES, B. D.; CAMPOS JUNIOR, M. D. Desenvolvimento de Aços Microligados com Alta Resistência Mecânica e Boa Ductilidade, 62º Congresso Anual da ABM, Vitória, 2007.
- 11 OHTANI, H.; OKAGUCHI, S.; FUJISHIRO, Y.; OHMORI, Y. Morphology and Properties of Low Carbon Bainite. Metallurgical Transactions A, v. 21A, p. 877-888, April 1990.