

# OTIMIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE PROCESSAMENTO NO RECOZIMENTO CONTÍNUO DOS AÇOS IF MICROLIGADOS COM Ti E ALTA RESISTÊNCIA BAIXA LIGA <sup>1</sup>

Aldo Henrique de Almeida Barbosa <sup>2</sup>

Rodrigo Rocha de Meira <sup>3</sup>

Wagner Varela Dias <sup>4</sup>

## Resumo

Perfuração em tubos radiantes é um dos grandes problemas no processo de recozimento contínuo, por causar perdas de produtividade, problemas de qualidade superficial, além de custo de manutenção com as trocas dos tubos. Visando minimizar esses problemas, definiu-se por avaliar a possibilidade de se limitar a temperatura das cinco zonas que compõem o forno de aquecimento em 900°C. Contudo, a adoção dessa prática exige a adequação de novos ciclos operacionais de processamento dos aços, para evitar prejuízos à produtividade da linha e alterações nas propriedades mecânicas dos produtos. Nesse sentido, foram avaliados ciclos térmicos alternativos para o recozimento contínuo de aços *interstitial free* microligados com titânio (IF-Ti) e de aços alta resistência baixa liga (ARBL). Essas avaliações foram realizadas através de simulações em escala de laboratório, variando-se o modelo de aquecimento e a temperatura de encharque. Os resultados indicaram novos ciclos térmicos para esses materiais, que possibilitaram além da minimização do problema com os tubos radiantes, a otimização das condições operacionais, com a diminuição da temperatura do forno de aquecimento, sem comprometimento da produtividade da linha.

**Palavras-chave:** Recozimento contínuo; Aços *Interstitial Free*; Aços ARBL.

<sup>1</sup> Contribuição Técnica ao 42º Seminário de Laminação - Processos e Produtos Laminados e Revestidos da ABM; Santos, SP, 25 a 26 de outubro de 2005.

<sup>2</sup> Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista, M.Sc., Gerência do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG.

<sup>3</sup> Engenheiro Metalurgista, Gerência de Laminação a Frio da Usiminas, Ipatinga, MG.

<sup>4</sup> Membro da ABM; Técnico em Metalurgia, Gerência de Laminação a Frio da Usiminas, Ipatinga, MG.

## 1 INTRODUÇÃO

A produção de aços no recozimento contínuo assumiu uma importância bastante significativa nas linhas de laminação a frio, tendo em vista a sua grande versatilidade. Nas linhas de recozimento, a seção de aquecimento destaca-se por ser uma das principais responsáveis pelas características dos produtos, e onde podem ser obtidos os melhores resultados de otimização da produtividade do processo. No recozimento contínuo da Usiminas, essa seção é composta por cinco zonas, todas com aquecimento por tubo radiante e controle individual de temperatura. Problemas com perfurações de tubos radiantes causam perdas de produtividade (com as paradas para as trocas) e problemas de qualidade superficial (com exposição da superfície da tira aos gases).

Visando minimizar os problemas acima citados definiu-se por avaliar a possibilidade de se reduzir a temperatura das cinco zonas que compõem o forno de aquecimento, limitando-as em 900°C.

Contudo, a limitação das temperaturas das zonas do forno de aquecimento, mantendo-se os ciclos térmicos dos materiais, só é possível com a redução da velocidade da linha, com prejuízos à produtividade. Além da queda na produtividade aumentariam-se, também, os riscos de problemas operacionais, como a maior incidência do defeito “enrugamento”, para algumas dimensões críticas, em qualidades de aço de menor resistência, principalmente os aços *interstitial free* microligados com Ti (IF-Ti). Com relação aos aços de maior resistência mecânica, a exemplo do alta resistência baixa liga (ARBL), que são mais susceptíveis às condições de tratamento, o maior problema seria a perda de resistência mecânica.

Nesse contexto, foram realizadas simulações em escala de laboratório de ciclos térmicos de recozimento contínuo, onde foram estabelecidas as condições operacionais adequadas (novos ciclos térmicos alternativos) para o processamento de aços IF-Ti e ARBL, buscando compensar os efeitos das reduções de temperatura do forno de aquecimento.

## 2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O trabalho experimental consistiu na avaliação de ciclos térmicos alternativos para o recozimento contínuo de aços IF-Ti e ARBL, através de simulações em escala de laboratório (em uma máquina de ensaios termomecânicos Gleeble), variando-se o padrão de aquecimento da tira (através de alterações nas temperaturas das cinco zonas que compõem o forno de aquecimento), a velocidade de processamento da linha e a temperatura de encharque.

Os materiais utilizados nestas simulações foram processados industrialmente até a laminação a frio e amostrados na entrada do recozimento contínuo, após descarte da ponta inicial. As composições químicas desses aços são apresentadas na Tabela 1.

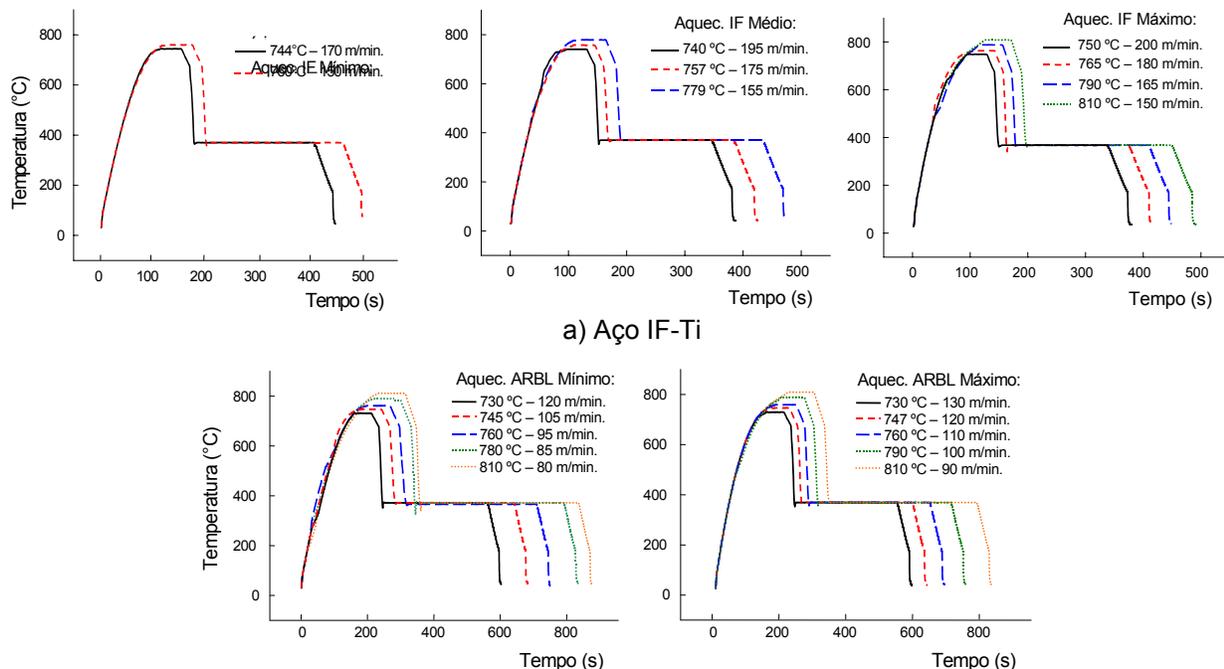
**Tabela 1.** Faixas de composição química dos aços IF-Ti e ARBL.

Qualidade	Composição química (% em massa)						
	C	Mn	Si	P	S	Ti	Nb
IF-Ti	≤0,02	≤0,35	≤0,03	≤0,020	≤0,020	≤0,30	-
ARBL	<0,10	≤1,30	≤0,6	≤0,06	≤0,025	-	0,02-0,07

A escolha dos padrões de aquecimento foi feita adotando-se a premissa de não se ultrapassar a temperatura de 900°C em nenhuma das zonas do forno. Baseado na prática industrial, foram determinados três padrões de aquecimento para o aço IF-Ti (condição de aquecimento mínimo, médio e máximo), e dois outros padrões, distintos dos primeiros, para o aço ARBL (mínimo e máximo). Esses padrões de aquecimento consistiram em alterar as temperaturas de cada uma das zonas que compõem o forno de aquecimento.

Com relação às mudanças na velocidade da tira e na temperatura de encharque, procurou-se estabelecer limites críticos de operação, considerando valores extremos de produtividade (eliminando-se as baixas velocidades da tira, impraticáveis por limitação de produtividade) e de propriedades mecânicas (eliminando-se as temperaturas de encharque extremamente baixas, impraticáveis por problemas de aplicação do produto). Para determinação desses limites utilizou-se um modelo matemático desenvolvido na Usiminas, que descreve o comportamento térmico da tira no interior do forno, permitindo determinar os ciclos em função das velocidades objetivadas e das dimensões das bobinas. No desenvolvimento desse modelo foram levadas em consideração as características físicas do forno, como por exemplo a disposição dos tubos radiantes em relação às bobinas, a quantidade de passes e de regiões de aquecimento, o comprimento do equipamento, entre outras.

As condições de aquecimento simuladas na Gleeble e as demais etapas dos ciclos operacionais de recozimento, baseadas em parâmetros industriais, são mostradas esquematicamente na Figura 1.



**Figura 1.** Esquema de simulações dos ciclos térmicos de recozimento contínuo.

Conforme pode ser notado nessa figura, mantendo-se fixo o padrão de aquecimento do forno, quanto maior a velocidade da tira menor será a temperatura que ela alcança ao final do aquecimento.

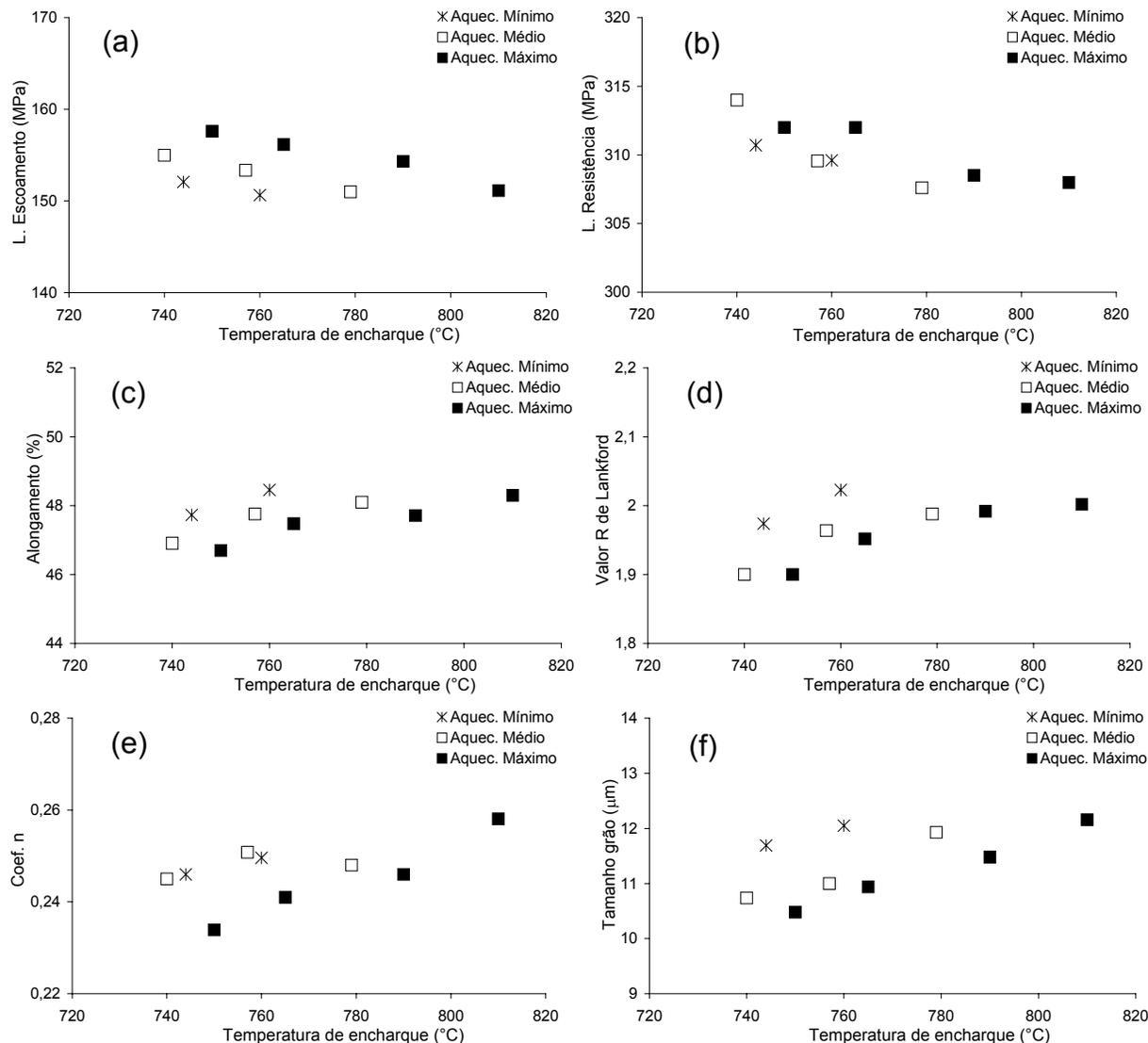
Em todos os experimentos foram feitas caracterizações dos materiais através de ensaios mecânicos e metalográficos (para determinação dos tamanhos de grãos). Os ensaios mecânicos foram realizados obedecendo-se a norma ASTM-A-370 *sub-size*. Os valores das propriedades mecânicas (limites de escoamento - LE e de resistência - LR, alongamento total - AL, valor R de Lankford e coeficiente n) foram determinados pela média dos resultados de nove corpos-de-prova, três em cada uma das direções 90°, 45° e 0° ao de laminação. Esses materiais foram ensaiados sem sofrerem nenhum tipo de pré-deformação (laminação de encruamento ou em tração). A base de medida utilizada para determinação do alongamento total foi de 25 mm.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 mostra a influência da temperatura de encharque nas propriedades mecânicas de tração, no valor R de Lankford, no coeficiente n e no tamanho de grão do aço IF-Ti como produto final. Nota-se que as propriedades mecânicas estão dentro da faixa estipulada para aplicação desse produto ( $LE \leq 180$  MPa;  $270 \leq LR \leq 350$  MPa;  $AL \geq 39,0\%$ ; Valor R de Lankford  $\geq 1,70$  e coeficiente  $n \geq 0,20$ ). No entanto, é importante destacar que estes valores foram obtidos sem o passe de encruamento, cuja utilização proporcionaria para esse aço, um pequeno acréscimo no LE e reduções no AL e no coeficiente n.

As simulações dos ciclos térmicos indicam, de maneira geral, que essas propriedades são pouco afetadas pelas variações da temperatura de encharque, uma vez que reduções de 810°C para 740°C produziram apenas pequenas deteriorações na ductilidade (aumento do LE e diminuição no AL), e nos valores de LR, R de Lankford e coeficiente n. De acordo com Barbosa et al.<sup>(1)</sup>, essas pequenas variações já eram esperadas, uma vez que o efeito da temperatura de encharque só se torna significativo acima de 810°C, principalmente para o LE, quando ocorre coalescimento dos precipitados de titânio.

O efeito do tempo de recozimento também pode ser percebido na Figura 2, embora de forma menos evidente que o da temperatura, por estar associado aos padrões de aquecimento do forno. O aumento da velocidade de aquecimento permite que as temperaturas de encharque sejam alcançadas mais rapidamente, diminuindo o tempo de exposição da tira a essas temperaturas. Nota-se que a redução do tempo, obtido com a adoção do aquecimento máximo, também não produziu prejuízos significativos à ductilidade, ao valor R e ao coeficiente n desse aço IF-Ti.



**Figura 2.** Resultados de propriedades mecânicas de tração e de tamanho de grão do aço IF-Ti, obtidos com os ciclos de recozimento simulados na Gleeble.

Esse comportamento das propriedades mecânicas, principalmente do LE e do valor R, está normalmente relacionado ao tamanho de grão, que por sua vez, não foi afetado significativamente pelas condições de encharque. Reduções tanto na temperatura quanto no tempo, esse último parâmetro obtido com a adoção do aquecimento máximo, Figura 2f, provocaram apenas diminuições discretas no tamanho de grão, compatíveis com as variações de propriedades mecânicas obtidas.

A pequena deterioração das propriedades pode ser atribuída à diminuição da temperatura de encharque, aproximando-a da temperatura de recristalização<sup>(2)</sup>, e pelo

menor tempo para crescimento de grãos (nesse estudo, a redução da temperatura está condicionada ao aumento de velocidade e, conseqüentemente, à diminuição no tempo).

A manutenção de uma microestrutura praticamente inalterada ao longo do encharque, mesmo em condições favoráveis de temperatura e tempo para crescimento de grãos, evidencia que a menor susceptibilidade desse aço IF-Ti às variações no encharque se deve ao fato de possuírem contornos de grãos extremamente limpos (quando comparados com outras concepções de aços microligados<sup>(4)</sup>), fazendo com que atinjam uma microestrutura próxima da definitiva com tempos muito curtos<sup>(1)</sup>.

Outro efeito importante a ser analisado é o aumento de velocidade da linha na temperatura de recristalização. A alta energia armazenada pelo atraso na recristalização, em função do aumento da velocidade, promove uma elevação na taxa de nucleação de novos grãos que, associada à menor diferença entre as temperaturas de encharque e recristalização e à exiguidade de tempo nesse processo, produzem uma microestrutura de grãos mais finos<sup>(3)</sup>.

Ainda pela Figura 2, percebe-se que as condições de processo até a etapa de encharque não foram suficientes para provocar alterações significativas no valor R de Lankford e, conseqüentemente, comprometimento na aplicação do produto. As elevadas taxas de aquecimento praticadas com o padrão máximo de aquecimento e/ou baixas temperaturas de encharque promovem, conforme já mencionado, um atraso na recristalização do material. Como o crescimento do grão é considerado acontecer somente após o término da recristalização, pode-se deduzir que materiais processados com taxas de aquecimento mais altas possuam menos tempo para algum crescimento de grão. Como os grãos com orientação (111) crescem preferencialmente aos grãos nucleados segundo o plano (100), quanto piores forem as condições para crescimento de grão, menores serão os valores do coeficiente R de Lankford. Outro aspecto importante é que o tempo disponível para nucleação dos grãos (111) é inversamente proporcional à taxa de aquecimento<sup>(3)</sup>.

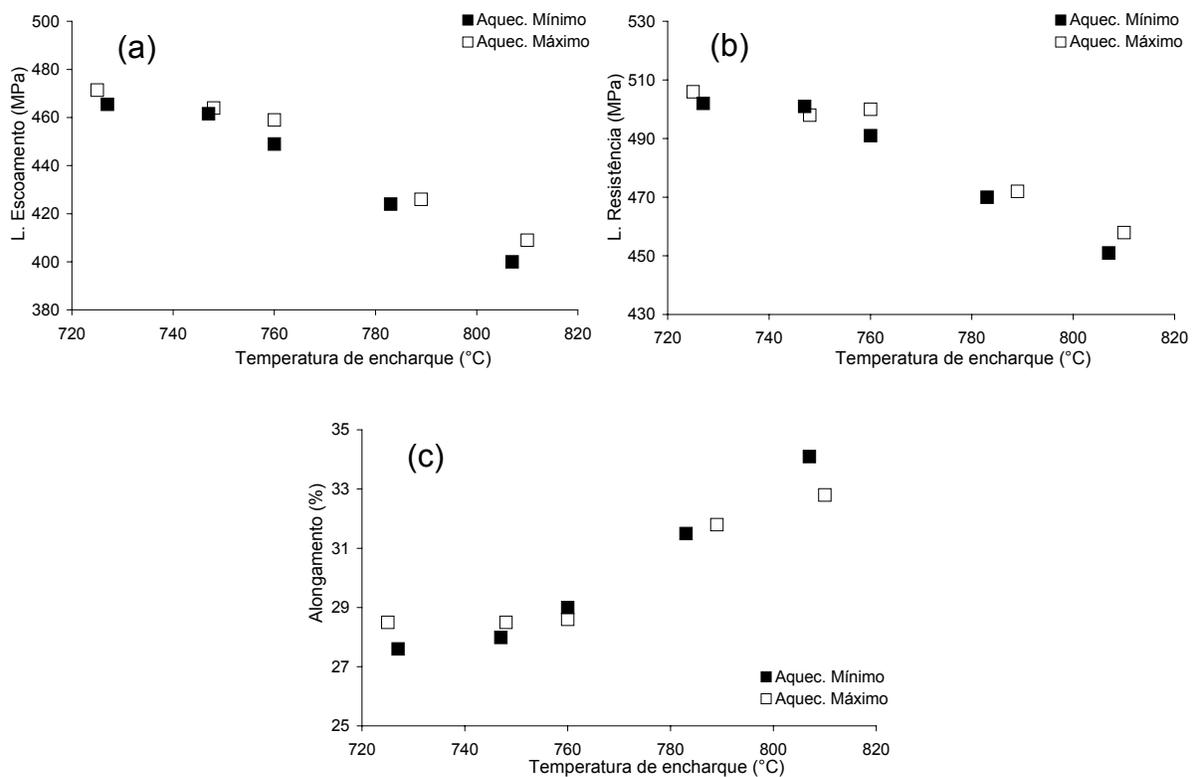
Esses resultados indicam a possibilidade de se processar esse material com temperaturas de encharque bastante reduzidas, próximas à temperatura de 740°C, sem comprometimento da aplicação do produto e da produtividade do forno. Esses resultados estão sendo validados em escala industrial.

Tendo em vista que esses aços representam uma grande parcela da produção no recozimento contínuo, a adoção dessa prática já contribuiu para minimizar o consumo de energia, os problemas de perfuração de tubos radiantes e, conseqüentemente, oxidação advinda da exposição da tira aos gases do queimador, as trocas de tubos radiantes durante as paradas para manutenção e evitar a ocorrência de defeitos como “enrugamento” em dimensões críticas nos aços IF

Embora a influência das mudanças dos ciclos térmicos no recozimento sobre as propriedades do aço IF-Ti seja perceptível, é evidente também, que não é tão significativa quando comparada com a do aço ARBL. A Figura 3 mostra o efeito da temperatura de encharque nas propriedades mecânicas do aço ARBL. Percebe-se que um pequeno aumento da temperatura de encharque provoca uma sensível queda da resistência desse aço.

De um modo geral as razões para a queda de resistência estão associadas ao coalescimento de carbonetos de nióbio (NbC) e ao aumento, mesmo que pequeno, do tamanho de grão. O nível de resistência é obtido com uma microestrutura extremamente refinada, associada à precipitação de carbonitretos formados com estas

ligas e pela adição de elementos que provocam um endurecimento adicional por solução sólida. Contudo, a adição de ligas é limitada pelo fato de aumentar a temperatura de recristalização, requerendo por isto, elevadas temperaturas de encharque no recozimento contínuo. Embora o recozimento contínuo seja o processo mais adequado para a produção destes aços, essa necessidade de aumento da temperatura de encharque provoca uma grande diminuição na resistência, em função do coalescimento dos precipitados. Isto faz com que as variáveis operacionais tenham que ser mantidas dentro de faixas bastante estreitas, uma vez que podem provocar heterogeneidades de propriedades ao longo do comprimento das bobinas, ou entre bobinas subseqüentes, em função de um possível gradiente térmico formado nos fornos.



**Figura 3.** Resultados de propriedades mecânicas de tração do aço ARBL, obtidos com os ciclos de recozimento simulados na Gleeble.

Esses resultados indicam, a exemplo dos aços IF-Ti, também a possibilidade de se limitar a temperatura dos fornos de aquecimento para esse aço. Nesse contexto, estão sendo realizados testes industriais para validação desses resultados, com o processamento dessa qualidade de aço na temperatura média de encharque de 780°C, com o comprometimento dos níveis mínimos de resistência especificados. Pela Figura 3, observa-se que todas as propriedades mecânicas estão dentro da faixa estipulada por norma para aplicação desse produto ( $340 \leq LE \leq 440$  MPa e  $410 \leq LR \leq 530$  MPa). Vale enfatizar que esses valores foram obtidos sem o passe de encruamento, cuja

utilização, nesse tipo de aço, proporcionaria uma diminuição de aproximadamente 40 MPa no limite de escoamento.

#### **4 CONCLUSÕES**

As simulações dos ciclos térmicos de recozimento contínuo de aços IF-Ti permitiram concluir que as variações de propriedades mecânicas desse aço não são tão susceptíveis às alterações da temperatura no encharque. Por isso, é possível processar esses aços com temperaturas de encharque próximas de 740°C, portanto, mais baixas do que as normalmente praticadas para essa qualidade, sem comprometimento da aplicação do produto e de produtividade do forno. Tendo em vista que esses aços representam uma grande parcela da produção no recozimento contínuo, a adoção dessa prática já contribuiu para minimizar o consumo de energia no recozimento contínuo, os problemas de perfuração de tubos radiantes e, conseqüentemente, oxidação advinda da exposição da tira aos gases do queimador e a ocorrência de defeitos como “enrugamento” em dimensões críticas nos aços IF.

Também é possível limitar a temperatura dos fornos de aquecimento para o processamento de aços ARBL, visando reduzir a temperatura média de encharque para 780°C, sem comprometimento dos níveis de resistência especificados para essa qualidade de material. Contudo, em função do forte efeito que exerce sobre as propriedades mecânicas desse aço, o controle da temperatura de encharque deve ser bastante rigoroso e dentro de uma faixa estreita.

#### **REFERÊNCIAS**

- 1 BARBOSA, A. H. A.; PEREIRA, J. F. B.; RIBEIRO, C. F. Influência das Condições de Encharque no Recozimento Contínuo nas Propriedades Mecânicas de Aços Interstitial Free-IF Microligados com Ti, 56° Congresso Anual da ABM, Belo Horizonte, Julho, 2001.
- 2 TSUNOYAMA, K.; SATOH, S. Recent Advance in Interstitial Free Steels for Formable Cold Rolled Sheet Application - Metallurgy of Vacuum Degassed Steel Products, November, 1993, p. 127-141.
- 3 MIZUI, N. Precipitation Control and Related Mechanical Property in Ultra-Low Carbon Sheet Steels. In: International Symposium Modern LC and ULC Sheet Steels for Cold Forming: Processing and Properties, v. 1, pp.: 169-178, March, 1998.
- 4 BARBOSA, A. H. A.; PEREIRA, J. F. B.; RIBEIRO, C. F. Influência dos Parâmetros de Recozimento Contínuo na Produção de Aços ARBL Laminados a Frio, 38° Seminário de Laminação - Processos e Produtos Laminados e Revestidos da ABM; Florianópolis, SC, Outubro, 2001.
- 5 PRADHAN, R.; TAYLOR, K. A. Status of ELC, ULC and IF Cold Rolled Sheet in the US Automotive Industry. In: International Symposium of Modern LC and ULC Sheet Steels for Cold Forming: Processing and Properties, v. 1, pp.: 15-26, March, 1998.

# OPTIMIZATION OF CONTINUOUS ANNEALING CONDITIONS OF ULTRA-LOW CARBON INTERSTITIAL FREE-Ti STABILIZED AND COLD ROLLED HIGH STRENGTH LOW ALLOY STEELS<sup>1</sup>

Aldo Henrique de Almeida Barbosa<sup>2</sup>  
Rodrigo Rocha de Meira<sup>3</sup>  
Wagner Varela Dias<sup>4</sup>

## Abstract

One of the worst problems in continuous annealing process is the constant perforation on radiant tubes, located in the heating furnace. This problem causes lost in productivity and poor surface quality on the products. In order to minimize these problems, Usiminas has defined to decrease the temperature of the furnaces on heating zone to 900°C. So, is extremely necessary the knowledge of continuous annealing process in order to optimize quality and mechanical properties of these products. This study discusses the influence of continuous annealing conditions on the mechanical properties of ultra-low carbon interstitial free-Ti stabilized and cold rolled high strength low alloy steels. The annealing simulation, with different thermal cycles, was performed in laboratory scale with a Gleeble machine. The effects of the process variables on the mechanical properties have been analyzed and results explained mainly by microstructure characteristics. The results showed the possibility to save operational costs, with the reduction of temperature on heating and soaking furnaces for both steels without loss of productivity on continuous annealing line.

**Key words:** Continuous annealing; Interstitial free steel; High strength low alloy steel.

<sup>1</sup> Paper presented at 42<sup>th</sup> Rolling Seminar Processes, Rolled and Coated Products of Brazilian Society for Metallurgy and Materials, ABM; Santos, SP, October 25 to 26, 2005.

<sup>2</sup> Member of the ABM; Metallurgical Engineer, M.Sc., Research and Development Center, Usiminas; Ipatinga, MG, Brazil.

<sup>3</sup> Metallurgical Engineer, Department of Cold Rolling Process, Ipatinga, MG, Brazil.

<sup>4</sup> Member of the ABM; Metallurgical Technician, Department of Cold Rolling Process, Ipatinga, MG, Brazil.