

# OTIMIZAÇÃO DE AÇO LAMINADO A QUENTE PARA ESTAMPAGEM SEVERA PELO USO DE DESGASEIFICADOR RH E ADIÇÕES DE MICROLIGA

Willy Ank de Morais <sup>1</sup>  
Lara Crysthine Paes Ret <sup>2</sup>  
Cláudio Pereira Diogo <sup>3</sup>  
Herbert Christian Borges <sup>4</sup>

## Resumo

O trabalho descreve a criação e uso de um aço laminado a quente com baixo carbono e semi estabilizado ao boro e titânio, elementos que visam reduzir a quantidade de nitrogênio intersticial e atuar como elementos de alteração de forma de inclusões. O material foi tratado em desgaseificador RH (Ruhrstahl-Heraeus) visando estreitar as faixas de variação da composição de carbono e manganês, bem como limitar os teores dos elementos residuais e para otimizar o uso desse equipamento. Como critério de desempenho, avaliam-se as propriedades mecânicas gerais, principalmente sua estampabilidade, estimada por uma equação semi-quantitativa. Acompanhou-se o desempenho no uso final do material em estampagem.

**Palavras-chave:** Propriedades mecânicas; Estampagem; Bobina a quente.

## OTIMIZATION OF HOT ROLLED STEEL DESTINATED TO DEEP DRAWING BY THE USE OF RH DEGASSER AND MICROALLOY ADDITIONS

### Abstract

This work describes the development and use of a hot-rolled low carbon steel, semi stabilized with boron-titanium to reduce interstitial nitrogen and to act as inclusion morphology agent. The RH vacuum degassing process was used to refine the content range of carbon and manganese, as well to limit the content of residual elements and to optimize the use of this equipment. As performance, criteria was evaluated the mechanical properties, mainly the drawnability, estimated by a semi-quantitative equation. The drawing final performance at customers was monitored.

**Key words:** Mechanical properties; Drawing; Hot coil.

## I INTRODUÇÃO

Aços laminados a quente com melhor ductilidade<sup>(1)</sup> tem sido usados para a fabricação de componentes estampados de maior espessura, especialmente para o setor automobilístico<sup>(2)</sup> ou no setor de linha branca. No caso de carcaças de compressores, estes componentes são obtidos pela estampagem relativamente profunda de uma chapa metálica de modo a obter a forma final, cuja integridade final (ausência de trincas ou defeitos de conformação)

pode ser relativamente difícil, devido à própria geometria da peça, como é o caso de um cárter de caminhão.<sup>(1)</sup>

É exigida uma boa conformabilidade dos aços descritos, que é uma característica normalmente quantificada por resultados obtidos de ensaios de tração, especialmente em aços laminados a frio.<sup>(3)</sup> Neste caso, a conformabilidade de um material está associada com os seguintes parâmetros obtidos a partir de um ensaio de tração simples:

<sup>1</sup>Doutorando, M.Sc., Engenheiro Metalurgista, Técnico em Metalurgia, Professor Faculdade de Engenharia, Universidade Santa Cecília – UNISANTA, Consultor Técnico da Inspebras, Diretor da Divisão Técnica “Aplicações de Materiais” da ABM, Especialista em Produto da Usiminas – Cubatão, Rod. Cônego Domênico Rangoni, s/n, Jardim das Indústrias, Cep 11573-900, Cubatão, SP, Brasil. E-mail: willy.morais@usiminas.com

<sup>2</sup>CQE/ASQ, Engenheira Metalurgista, Gerente do Acabamento e Expedição de Placas da Usiminas-Cubatão – Cubatão, Acabamento e Expedição de Placas, Rod. Cônego Domênico Rangoni, s/n, Jardim das Indústrias, Cep 11573-900, Cubatão, SP, Brasil. E-mail: lara.ret@usiminas.com

<sup>3</sup>Técnico em Metalurgia, Técnico de Assistência Técnica III, Assistência Técnica, Usiminas – Cubatão, Rod. Cônego Domênico Rangoni, s/n, Jardim das Indústrias, Cep 11573-900, Cubatão, SP, Brasil. E-mail: claudio.diogo@usiminas.com

<sup>4</sup>Mestrando, Engenheiro Metalurgista, Engenheiro de Produto Sênior, Usiminas – Cubatão, Rod. Cônego Domênico Rangoni, s/n, Jardim das Indústrias, Cep 11573-900, Cubatão, SP, Brasil. E-mail: herbert.borges@usiminas.com

- baixo limite de escoamento de engenharia ( $S_{LE} \downarrow$ );
- baixos valores da razão limite de escoamento/ limite de resistência ( $S_{LE}/S_{LR} \downarrow$ );
- grande alongamento (% Along.  $\uparrow$ ).

Para obter estas características, é importante que o material possua um projeto de liga adequado. O tipo de processamento do aço também auxilia bastante, por exemplo, quando o aço sofre tratamento de modificação da morfologia de inclusões (globulização), obtido eficientemente com adições de cálcio-silício (Ca-Si) em fios diretamente no metal líquido, o que leva a um aumento na ductilidade obtida para um determinado grau de resistência. O processamento na laminação também influencia os valores das propriedades mecânicas no produto final e, conseqüentemente, de sua ductilidade. Esquemas de passe, temperaturas de laminação e métodos de resfriamento mais adequados devem ser utilizados apropriadamente, de forma a garantir uma boa conformabilidade do material.

Adicionalmente, a estampabilidade é um tipo particular de conformabilidade característica de materiais que apresentam ductilidade adequada para conformação por um processo de estampagem, sem gerar rupturas e/ou defeitos que impeçam seu uso final. Além do limite de escoamento e do alongamento, existem duas variáveis de extrema importância para a análise da estampabilidade de chapas: o expoente de encruamento ( $n$ ) e o coeficiente de anisotropia plástica ( $R$ ), também conhecido como coeficiente de Lankford. Estas variáveis,  $R$  e  $n$ , descrevem o comportamento do material ao longo do processo de conformação e são empregados para quantificar o desempenho de chapas para estampagem.<sup>(4-6)</sup>

Muitos critérios têm sido propostos para avaliar a estampabilidade ( $F$ ) de uma liga.<sup>(4)</sup> Um deles leva em consideração uma série de propriedades mecânicas, podendo ser descrito por uma equação semi-quantitativa (Equação 1)<sup>(5)</sup>:

$$F = \varepsilon_u \cdot R_m \cdot n \cdot \left( \frac{S_{LR}}{S_{LE}} \right) \cdot \frac{1}{2^\lambda} \quad (1)$$

onde:  $\varepsilon_u$  é a deformação uniforme, até o início da estricção (em tração pura  $\varepsilon_u = n$ );  $R_m$  é o coeficiente de anisotropia médio;  $n$  é o expoente de encruamento;  $S_{LR}$  é o limite de resistência;  $S_{LE}$  é o limite de escoamento e  $\lambda$  é o grau de dificuldade relativo para se conformar a peça. Apesar da Equação 1 ser apenas uma fórmula semi-quantitativa, ela apresenta sinteticamente a importância de cada propriedade mecânica para materiais destinados a operações de estampagem profunda.

Valores mais elevados do coeficiente de anisotropia são importantes para melhorar o desempenho em operações de estampagem profunda,<sup>(6)</sup> porém não é possível obtê-los em aços laminados a quente<sup>(7,8)</sup> os valores elevados obtíveis em aços laminados a frio ( $R > 1,50$ ).<sup>(3)</sup> Nestes aços, os valores do coeficiente de anisotropia

são próximos da unidade,<sup>(6)</sup> devido ao tipo de textura cristalina do material.<sup>(9)</sup> Para compensar esta limitação dos aços laminados a quente, busca-se aumentar ao máximo os valores de alongamento e expoente de encruamento que podem ser obtidos. O objetivo deste trabalho é criar um projeto de aço laminado a quente de alta conformabilidade com baixos teores de carbono (%C < 0,03%). O aço apresentado neste trabalho foi produzido industrialmente e tratado em um desgaseificador RH, com adições de titânio e boro.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

O aço foi criado como uma adequação mais aprimorada, em termos de controle químico e de propriedades mecânicas, do grau EPA da norma NBR 5906<sup>(7)</sup>. Esta norma apresenta três graus com crescente grau de estampabilidade: EM, EP e EPA. Todos estes graus devem ser produzidos com aço acalmado ao alumínio, com teor mínimo de alumínio metálico de 0,020% no caso de não serem usados outros elementos para fixação de nitrogênio. O uso final típico deste aço é a produção de peças estampadas de maior espessura, empregáveis em componentes automobilísticos e para a linha branca, especialmente para corpos de compressores.

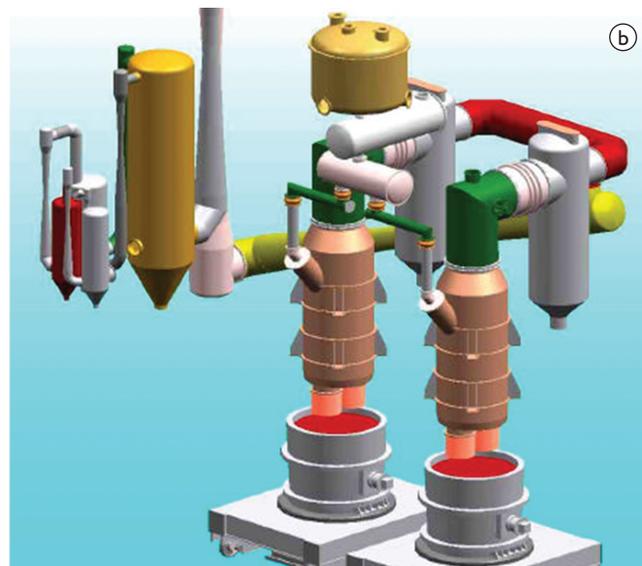
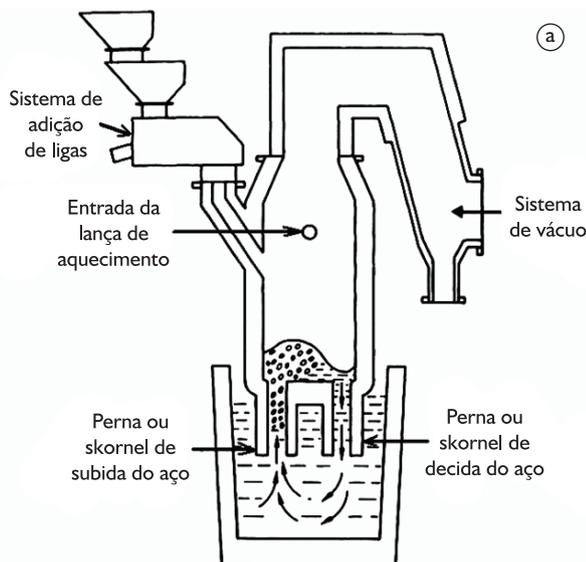
O aço foi processado no desgaseificador RH da Usiminas-Cubatão. A Figura 1 ilustra o aspecto do desgaseificador RH (Ruhrstahl-Heraeus) da Usiminas-Cubatão, equipamento chave utilizado neste trabalho. O modelo da Usiminas-Cubatão é do tipo RH *Twin*, de forma que dois vasos independentes utilizam o mesmo sistema de geração de vácuo.

Assim, criou-se um aço cuja composição química, definida pelo tratamento no desgaseificador RH, apresenta alguns diferenciais:

- obtenção e manutenção de baixos teores e faixas mais estreitas de carbono e manganês;
- maior limitação nos teores de fósforo, enxofre e nitrogênio;
- adição de boro e titânio.

As adições de boro e de titânio têm como objetivo melhorar a conformabilidade do aço, pois o boro e o titânio formam carbonitreto que tornam a estrutura mais homogênea. Além disso, o titânio pode reter o enxofre na forma de inclusões mais endurecidas e não alongadas, que são melhores para a ductilidade do metal. Isso pode ser melhor entendido analisando-se o produto de solubilidade ( $K_s$ ) destes elementos em relação aos demais presentes no aço. O produto de solubilidade ( $K_s$ ) pode ser quantificado pelo seu logaritmo (Equação 2):

$$\log(K_s) = \log([\%X] \times [\%Y]) = A - B/T \quad (2)$$



**Figura 1.** (a) Figura esquemática de um equipamento de desgaseificação RH; (b) Desenho esquemático do sistema de desgaseificação a vácuo RH Twin da Usiminas-Cubatão.

onde:  $[X]$  e  $[Y]$  são as concentrações dos elementos X e Y, formadores do composto  $XY_n$  no meio estudado; A e B constantes de correlação; T é a temperatura do meio, em kelvin e  $K_s$  é o produto de solubilidade ( $K_s = [X] \times [Y]$ ). Quanto mais baixo o produto de solubilidade, menor é a quantidade dos elementos puros (X e Y) e maior a quantidade do composto por eles formado ( $XY_n$ ) no meio.

Obtendo-se dados das constantes A e B da Equação 2 de várias fontes bibliográficas<sup>(10-15)</sup> é possível obter as curvas mostradas nos gráficos da Figura 2, calculadas como média das equações obtidas na bibliografia. Estes dados bibliográficos apontam que os primeiros compostos a se formar na estrutura austenítica, durante o resfriamento na laminação a quente são, nesta ordem: Ti+N, Ti+S, B+N, Mn+S, Ti+C.

O titânio tende a reagir e estabilizar o nitrogênio já em altas temperaturas, mais do que o boro ou o alumínio, conforme pode ser visto no gráfico da Figura 2a. À medida que a temperatura diminua, o boro também passa a reagir com o nitrogênio, deixando que um eventual excesso de titânio reaja com o enxofre, conforme mostrado na Figura 2b, caso isto já não tenha ocorrido antes, durante a solidificação e o reaquecimento. É interessante observar que a estabilidade do TiS é maior do que o MnS, conforme pode ser visto na Figura 2c. Estas observações estão apresentadas no gráfico da Figura 2d.

O material produzido foi testado internamente na Usiminas-Cubatão, para verificar o atendimento e a superação dos requisitos da norma NBR 5906.<sup>(7)</sup> Além disso, algumas das bobinas laminadas a quente produzidas com a nova composição e rota de processamento no refino secundário foram inspecionadas antes do envio final aos clientes. O processamento em alguns clientes também foi acompanhado para averiguar o desempenho final do

material. Essas atividades tiveram o propósito de oferecer melhores dados para otimizar o processamento nos clientes e também servir de base para eventuais ajustes e melhoria no produto na Usiminas-Cubatão.

### 3 RESULTADOS

Ao longo do ano de 2010, foram vazadas quatro corridas, totalizando cerca de 600 t de placas. Algumas características da composição química dessas corridas estão ilustradas na Tabela 1. Nesta tabela é visível que a relação Ti:N é aproximadamente cinco vezes maior que a B:N. Isto é feito para permitir que, quando o boro iniciar a precipitação com o nitrogênio, deixe o titânio em excesso atuar na retenção de enxofre, como pode ser visto no gráfico da Figura 2b. O excesso relativamente grande de alumínio visa reduzir o envelhecimento posterior do aço. Deve-se salientar que as concentrações de carbono e nitrogênio são muito baixas, apesar de não descritas na Tabela 1.

A partir dessas 600 t de placas, produziu-se um total de 18 bobinas, todas comercializadas na qualidade NBR 5906 EPA.<sup>(7)</sup> As bobinas foram processadas em uma das duas linhas de decapagem ou em uma linha preparadora de bobinas da Usiminas-Cubatão. Os dados da Tabela 1 podem ser combinados com algumas propriedades mecânicas, abrangidas pela equação de conformabilidade (Equação 1), de tal forma a oferecer uma visão da dependência entre o desempenho do aço e os parâmetros de composição química. Os gráficos da Figura 3 ilustram essa dependência, cujos resultados são similares a outros disponíveis na bibliografia, como os publicados por De et al.<sup>(16)</sup> e Paju.<sup>(17)</sup>

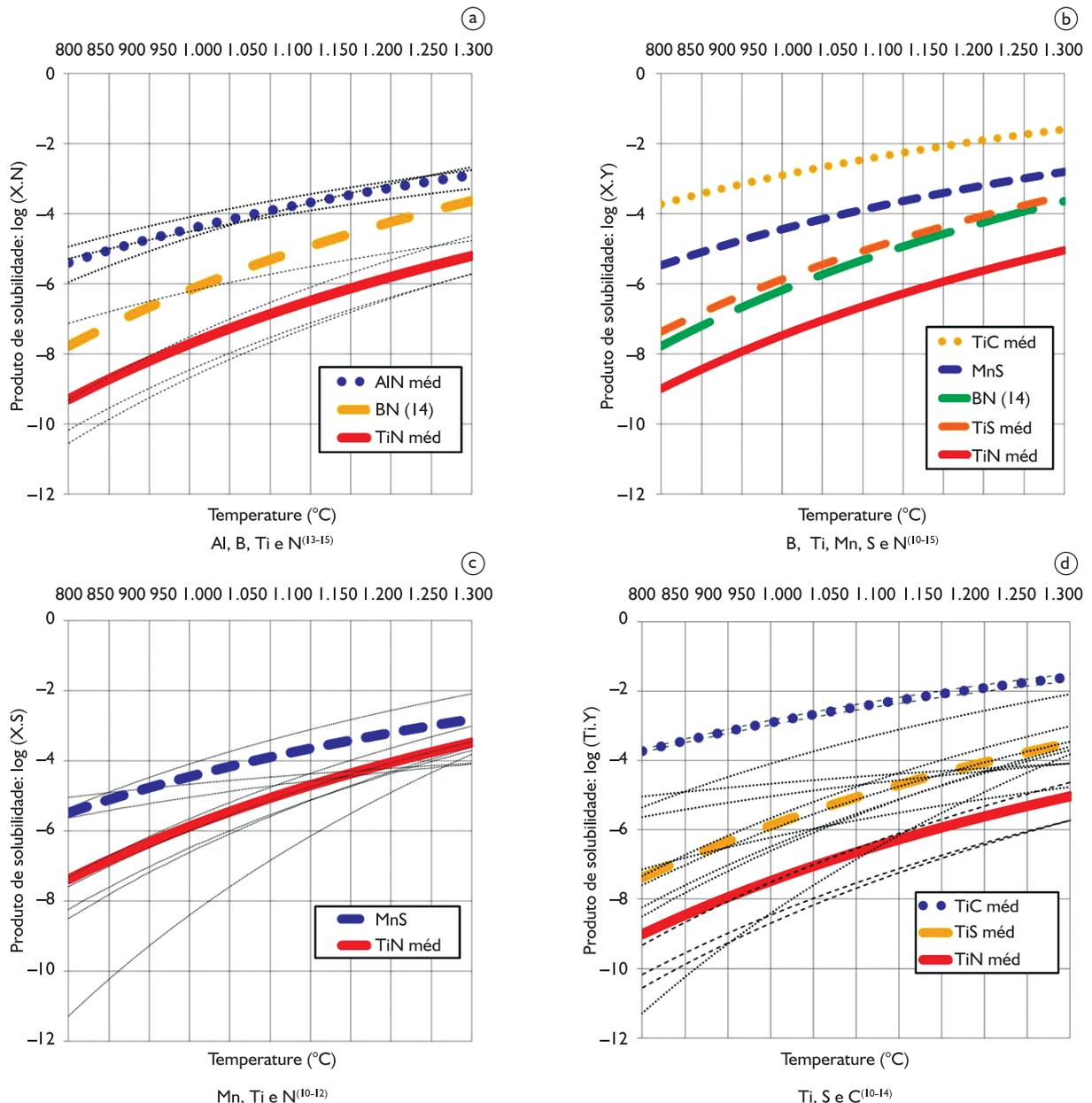


Figura 2. Produtos de solubilidade em função da temperatura para alguns elementos metálicos (Al, B, Mn, Ti) e não metálicos (C, N e S) na austenita. As curvas em destaque são as médias e as curvas mais finas, os resultados das equações individuais obtidas na bibliografia.<sup>(10-14)</sup>

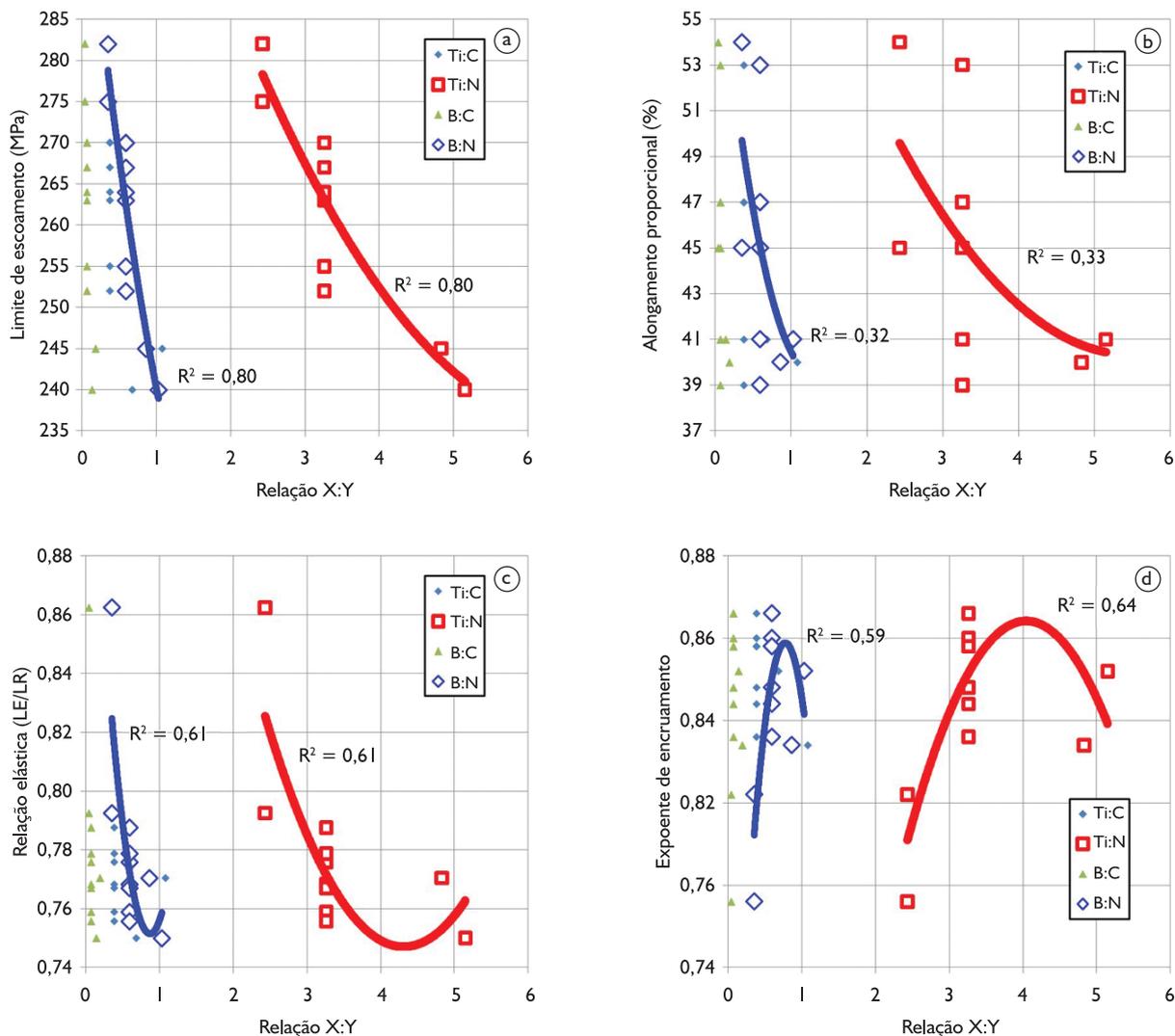
Tabela I. Algumas características de composição química das corridas produzidas com o aço estudado

Corrida	%Ce <sub>q</sub> (*)	%P	%S	%O	Ti:C	Ti:N	B:C	B:N	Al:N	Al:C
065810	0,066	0,010	0,012	0,0037	0,29	2,43	0,04	0,35	9,18	1,45
071558	0,070	0,012	0,008	0,0033	0,68	5,15	0,14	1,03	6,61	1,48
071565	0,047	0,011	0,009	0,0029	1,08	4,83	0,19	0,86	13,9	1,92
073848	0,079	0,018	0,005	0,0046	0,38	3,26	0,07	0,59	21,7	1,30
<b>Média</b>	<b>0,065</b>	<b>0,013</b>	<b>0,008</b>	<b>0,0036</b>	<b>0,61</b>	<b>3,92</b>	<b>0,11</b>	<b>0,71</b>	<b>12,8</b>	<b>1,53</b>

(\*)Conforme Código AWS.<sup>(18)</sup>

O processamento do material foi acompanhado junto a dois clientes (A e B). Um dos clientes acompanhados (A) aplicou o aço na estampagem de corpos de compressores de sistemas de refrigeração, com a emissão de um relatório que aponta um bom desempenho do

material, porém fazendo restrições ao tipo de oleamento em algumas bobinas, prejudicando um pouco o processo de estampagem do material. Foram feitas algumas reuniões sobre o assunto com as áreas operacionais, de suporte técnico e com a Assistência Técnica para oferecer



**Figura 3.** Variação dos resultados de ductilidade em função de parâmetros da composição química obtida no aço estudado. As curvas são do tipo  $y = ax^2 + bx + c$  e  $R^2$  é o coeficiente de determinação. Resultados similares aos de Paju.<sup>(17)</sup>

uma possível solução. A alternativa adotada foi restringir o material para passar apenas em um das duas linhas de decapagem e somente utilizar a outra linha quando esta estivesse na condição mais adequada para a aplicação especificada.

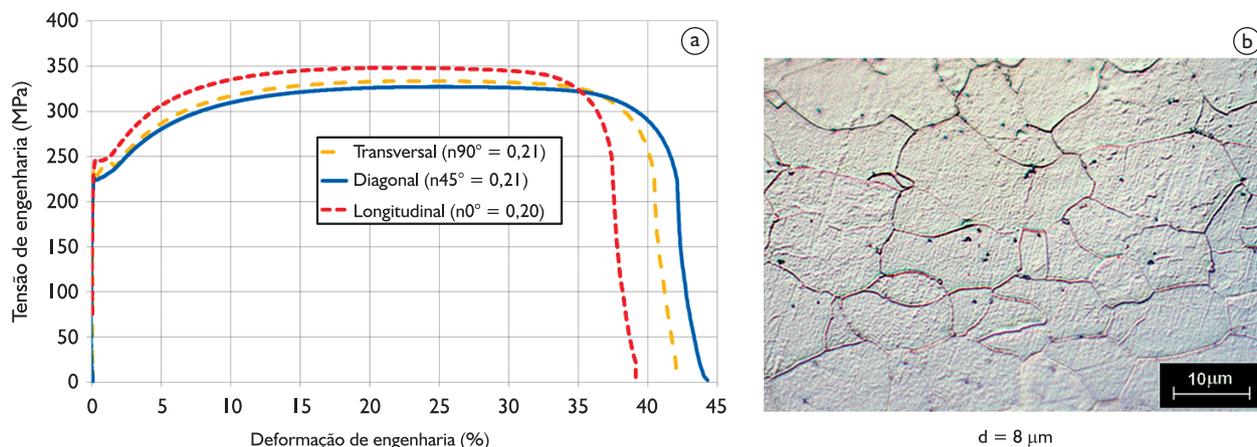
O outro cliente (B) recebeu material para a produção de tampas de filtros de óleo. O material acompanhado apresentou um bom desempenho no processo de estampagem, embora se deva levar em consideração que o processamento desse produto é mais simples.

#### 4 DISCUSSÃO

O tratamento de aços com baixos teores de C no equipamento RH é vantajoso, por serem obtidos aços com ótima ductilidade. Ainda melhora as condições

operacionais do RH, levando à maior limpeza dos aços IF. Os dados obtidos, especialmente de ductilidade (Along. Méd = 40%) apontam que o aço excede às exigências da norma NBR 5906 EPA<sup>(7)</sup> (Along.  $\geq 34\%$ ).

Deve-se destacar que se verifica o mesmo tipo de correlação indicado na bibliografia<sup>(16,17)</sup> entre as principais propriedades mecânicas do aço e as razões Ti:N e B:N. No caso do limite de escoamento e razão elástica ( $S_{LE}/S_{LR}$ ) há uma melhora nos valores desejados para estes parâmetros mecânicos, como estabelecido pela Equação 1. É detectada uma inflexão na tendência de aumento dos valores do coeficiente de encruamento ( $n$ ). Esta tendência também ocorre para a relação elástica, porém em menor grau. Já para o alongamento proporcional, apesar de maior dispersão dos resultados, é visível uma tendência contrária: o aumento nas razões Ti:N e B:N contribui para a obtenção de menores valores desta propriedade.



**Figura 4.** (a) Curvas tensão-deformação (de engenharia) obtidas a partir de ensaios de tração para corpos de prova retirados em diferentes direções do aço em análise; (b) Metalografia com ampliação óptica 1.000× e ataque Nital a 2%. Tamanho de grão em µm informado.

Aparentemente, o surgimento dos precipitados nesse aço efetivamente diminui a sua resistência e melhora a estabilidade no comportamento plástico<sup>(9,10)</sup>, traduzido pelos valores de  $n$ , até certo ponto. Contudo, estes precipitados também diminuem a capacidade de alongamento total do material. Como o alongamento uniforme está associado com o expoente de encruamento,<sup>(6)</sup> pode-se considerar que os precipitados estão atuando especialmente na fase de estricção do material, induzindo com mais eficiência a formação de microvazios que ocorrem nesta etapa.

Como forma de ilustrar o resultado destas análises, a dependência entre tensão e deformação de engenharia é apresentada na Figura 4. Estas curvas são obtidas em ensaios de tração de uma amostra do aço com composição química dentro das faixas ótimas apresentadas pelos gráficos da Figura 3a. Nesta figura estão ilustrados as curvas e os respectivos valores do expoente de encruamento ( $n$ ), obtidos a partir de corpos de prova de tração preparados nas direções transversal ( $90^\circ$ ), diagonal ( $45^\circ$ ) e longitudinal ( $0^\circ$ ) à direção de laminação do material.

A microestrutura obtida, ilustrada pela metalografia da Figura 4b, apresenta-se homogênea, inclusive nos extremos do material. O tamanho de grão obtido é

bem homogêneo ao longo da espessura e da largura do material, regiões onde tradicionalmente verificam-se anormalidades no tamanho de grão para aços laminados a quente de baixo carbono.<sup>(1,9,11)</sup>

## 5 CONCLUSÃO

A rota de produção via RH é considerada de interesse estratégico para a Usiminas-Cubatão, pois auxilia na manutenção do vaso do desgaseificador RH nas melhores condições de temperatura e limpidez para a produção de aços IF. Assim, utilizando esta rota para a produção do material aqui estudado, verifica-se uma melhoria de seu desempenho em termos de propriedades mecânicas e composição química.

O acompanhamento realizado auxilia na determinação das condições nas quais o material pode ser processado de forma a apresentar uma condição superficial que atende às expectativas dos clientes. Assim, conclui-se que a atual especificação para aços laminados a quente de maior grau de estampabilidade deve ser atendida com os parâmetros levantados neste estudo.

## REFERÊNCIAS

- MORALES, C.; MOREIRA, P. S.; LOPES, M. M. G. Melhorias no processo de estampagem para aços baixo carbono. In: SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO, PROCESSOS E PRODUTOS LAMINADOS E REVESTIDOS, 40., 2003, Vitória. *Anais...* São Paulo: ABM, 2003, p. 298-304.
- DAVIES, R. G. High strength steels in automobiles. In: AUTOMOTIVE STEELS SEMINAR, 1988, Moscow. *Proceedings...* Moscow: TSNIIVHM & CBMM, 1988, p. 115-25.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5915: Chapas finas a frio de aço-carbono para estampagem. Rio de Janeiro, 2008.
- MAGNABOSCO, A. S. Resistência mecânica × conformabilidade. In: MORAIS, W. A.; MAGNABOSCO, A. S.; NETTO, E. B. M. *Metalurgia física e mecânica aplicada*. 2. ed. São Paulo: ABM, 2009. v. 2, p. 481-500.

- 5 FONSTEIN, N. M. Low-alloy dual-phase steels for cold forming applications. In: AUTOMOTIVE STEELS SEMINAR, 1988, Moscow. *Proceedings...* Moscow: TSNIIVHM & CBMM, 1988. p. 145-55.
- 6 MORAIS, W. A. et al. Estudo das variáveis de deformação plástica em aços através de ensaios de tração instrumentados. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 59., 2004, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABM, 2004. 1 CD-ROM.
- 7 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5906*: Chapas finas a quente de aço-carbono para estampagem. Rio de Janeiro, 2008.
- 8 DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. *DIN 1614*: Steel flat products; Hot rolled sheet and strip; Technical delivery conditions; Mild unalloyed steels for cold reducing. Berlin, 1986.
- 9 TOSAKA, A. et al. Hot rolled steel with good deep drawability and good anti-secondary working embrittlement property, "KFN5". *Kawasaki Steel Technical Report*, n. 43, p. 46-8, Oct. 2000.
- 10 DUPUIS, G.; HUBERT, R. A.; TAILLARD, R. A Detailed study of sulphide precipitation in Ti-IF Steels. In: MECHANICAL WORKING AND STEEL PROCESSING (MWSP) CONFERENCE, 40., 1998, Pittsburgh. *Proceedings...* Warrendale: ISS, 1998. p. 117-25.
- 11 YANG, X. et al. Solubility products of titanium sulphide and carbosulphide in ultra-low carbon steels. *ISIJ International*, v. 36, n. 10, p. 1286-94, 1996. <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.36.1286>
- 12 OIKAWA, K. et al. Solubility products of VS and NbS in iron alloys. *ISIJ International*, v. 49, n. 7, p. 942-6, 2009. <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.49.942>
- 13 MAGNABOSCO, A. S. Coeficientes de solubilidade na austenita. Anexo. In: MORAIS, W. A.; MAGNABOSCO, A. S.; NETTO, E. B. M. *Metalurgia física e mecânica aplicada*. 2. ed. São Paulo: ABM, 2009. v. 2, p. 925-7.
- 14 KRAUSS, G. Austenite in steels. In: \_\_\_\_\_. *Steels: processing, structure, and performance*. Materials Park: ASM International, 2005. p. 119-47.
- 15 INOUE, K. et al. Solubility product of TiN in austenite. *ISIJ International*, v. 38, n. 9, p. 991-7, 1998. <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.38.991>
- 16 DE, S. K. et al. Boron bearing high formable low carbon hot rolled steel for LPG cylinders. *Steel Times International*, v. 33, n. 3, p. 53-4, Apr. 2009.
- 17 PAJU, M. Effects of boron protection methods on properties of steel. *Ironmaking and Steelmaking*, v. 19, n. 6, p. 495-500, 1992.
- 18 AMERICAN WELDING SOCIETY. *AWS D1.1*: structural welding code: steel. Miami, 2010.

Recebido em: 02/03/2012

Aprovado em: 22/03/2012