



ADEQUAÇÃO DE UM AÇO LAMINADO A QUENTE DE BAIXO CARBONO COM ADIÇÕES DE TI E B PARA ESTAMPAGEM PROFUNDA E COM OTIMIZAÇÃO DO USO DO DESGASEIFICADOR RH¹

Willy Ank de Moraes²
Lara Crysthine Paes Ret³
Claúdio Pereira Diogo⁴
Herbert Christian Borges⁵

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. As principais análises realizadas foram: a avaliação da variação dimensional do material, quando foi obtido o perfil de espessuras ao longo de todo o comprimento e largura da bobina e as propriedades mecânicas gerais, com destaque para sua ductilidade. Acompanhou-se o desempenho no uso final do material em estampagem.

Palavras-chave: Propriedades mecânicas; Estampagem; Aço plano.

ADEQUACY OF A LOW CARBON HOT ROLLED STEEL WITH ADDITIONS OF TI AND B DESTINATED TO DEEP DRAWING AND TO OTIMIZATES RH DESGASSER OPERATION

Abstract

This work describes the creation and use of a low carbon steel specification semi stabilized by boron-titanium addition to reduce interstitial nitrogen and to act as inclusion geometry modifier agent. Vacuum degassing RH (Ruhrstahl-Heraeus) process was used to sharpen the chemical composition range of carbon and manganese as well to limitate residuals contents. The main analyses were: dimensional evaluation of the material, when was obtained the thickness profile over all coil length and wide, and the general mechanical properties, with prominence to its ductility. The drawing final performance was accompanist.

Key-words: Mechanical properties; Drawing; Flat steel.

¹ Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.

² Doutorando, MSc., Eng^o Metalurgista, Téc. em Metalurgia. Engenheiro de Produto Sênior da Usiminas-Cubatão, Prof. Faculdade de Engenharia da UNISANTA e Diretor da divisão técnica "Aplicações de Materiais" da ABM. E-mail: willyank@unisanta.br ou willy.morais@usiminas.com.

³ CQE/ASQ, Eng^a Metalurgista. Especialista de Processos da Usiminas-Cubatão. E-mail: lara.ret@usiminas.com

⁴ Téc. em Metalurgia. Técnico de Assistência Técnica III. E-mail: claudio.diogo@usiminas.com

⁵ Mestrando, Eng^o Metalurgista, Engenheiro do Produto Pleno. E-mail: herbert.borges@usiminas.com

1 INTRODUÇÃO

Têm-se usado aços laminados a quente com ductilidade melhorada para a fabricação de componentes estampados de maior espessura, tais como cárter ou caixas de embreagens no setor automobilístico ou no setor de linha branca, 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.⁽¹⁾ A Figura 1 ilustra dois exemplos destes tipos de componentes.



(a)



(b)

Figura 1. Duas aplicações de estampagem de aços laminados a quente: (a) carcaça de compressores de geladeiras e (b) carcaça de caixa de embreagem automotiva.

Adicionalmente, é cada vez mais comum o uso de aços laminados a frio do tipo *Intersticial Free* (IF), tanto os estabilizados ao titânio (Ti) quanto ao titânio-nióbio (Ti-Nb). O emprego destes aços iniciou-se nas estamparias das grandes montadoras e agora está sofrendo uma consolidação também entre os produtores de autopeças e em outros setores conforme demonstra a experiência da empresa.

É exigida uma boa conformabilidade dos aços descritos, que é uma característica normalmente quantificada por resultados obtidos de ensaios de tração. Neste caso, a conformabilidade de um material está associada com os seguintes parâmetros obtidos a partir de um ensaio de tração simples:

- baixo Limite de escoamento (LE↓);
- baixos valores da razão Limite de escoamento / Limite de Resistência (LE/LR↓);
- grande alongamento (%Along.↑).

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 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, conforme ilustrado pela Figura 2.

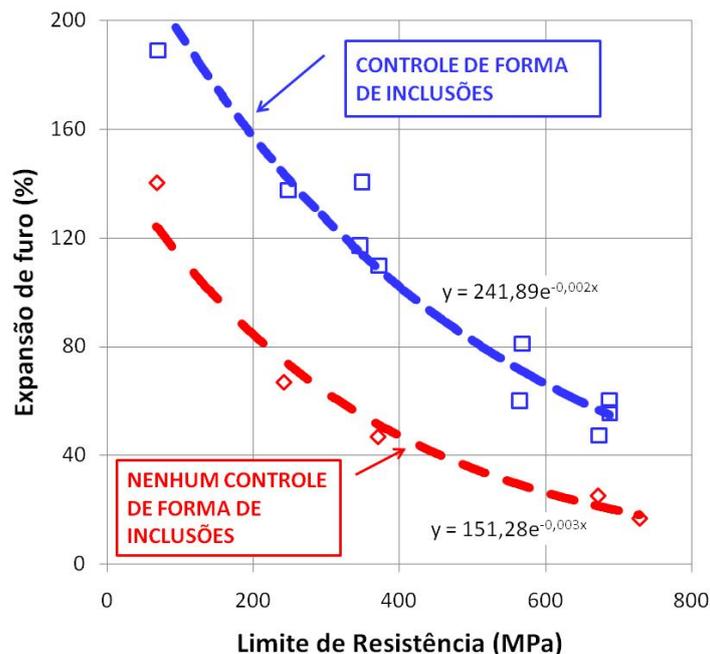


Figura 2. Exemplo da relação resistência versus ductilidade.⁽²⁾

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 (LE) e do alongamento (%Along.), 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 destinadas à estampagem. Os valores de n são definidos a partir do ajustes de dados de ensaios mecânicos por meio da equação de Hollomon:

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^n \quad (\text{Eq.1})$$

Onde: σ é a tensão verdadeira, calculada em relação à área real instantânea do material, e ε é a deformação verdadeira ou logarítmica, calculada como o logaritmo da relação real entre o comprimento final e o comprimento original. O expoente de encruamento define a taxa pela qual o material deverá encruar, ou seja, terá a sua resistência mecânica aumentada com o incremento da deformação plástica.

Já o coeficiente de anisotropia correlaciona a capacidade de o material deformar-se com uma menor redução de espessura. Os valores de R quantificam a razão entre a deformação verdadeira na largura (b) e na espessura (e) de uma chapa, conforme:

$$R = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_e} \quad (\text{Eq.2})$$

Onde: R é o coeficiente de anisotropia; ε_b a deformação verdadeira na largura e ε_e a deformação verdadeira na espessura de um CP de tração. Neste sentido é costumeiro definir um valor médio (R_m) que é obtido a partir da média ponderada dos diferentes valores de R, medidos em CPs retirados a partir de três diferentes direções em relação à direção de laminação do material (0°, 45° e 90°), conforme:

$$R_m = (R_{0^\circ} + 2R_{45^\circ} + R_{90^\circ})/4 \quad (\text{Eq.3})$$

Normas de aços de maior estampabilidade geralmente estabelecem limites mínimos para os valores de R e n, tanto mais restritos quanto maior for o grau de conformabilidade necessário. Isto é ilustrado na Tabela 1 para a norma NBR 5915,⁽³⁾ que foi recentemente revisada de forma a contemplar dois graus (EEP G3 e EEP G4) que apresentam características típicas de aços livre de intersticiais (IF - *Interstitial Free*).

Tabela 1. Resumo dos requisitos mecânicos da norma NBR 5915,⁽³⁾ aplicáveis para aços laminados a frio. Os dois últimos graus são considerados aços IF

USO: ESTAMPAGEM		NBR 5915 (2008)						
GRAUS		EM	EP	EEP G1	EEP G2	EEP G3	EEP G4	
PROPRIEDADES MECÂNICAS								
LE (Direção Transversal) MPa	$e \leq 0,50$	320 máx.	300 máx.	140–270	140–250	140–220	120–200	
	$0,50 < e \leq 0,70$	300 máx.	280 máx.	140–250	140–230	140–200	120–180	
	$0,70 < e \leq 3,00$	280 máx.	260 máx.	140–230	140–210	140–180	120–160	
LR (Direção Transversal) MPa		270–390	270–370	270 – 350		270–330	250–330	
Alongamento mín. (%)	Lo= 50 mm	$e \leq 0,50$	26	31	34	35	36	38
		$0,50 < e \leq 0,70$	28	33	36	37	38	40
		$0,70 < e \leq 3,00$	30	35	38	39	40	42
	Lo= 80mm	$e \leq 0,50$	24	29	32	33	34	36
		$0,50 < e \leq 0,70$	26	31	34	35	36	38
		$0,70 < e \leq 3,00$	28	33	36	37	38	40
R_{90° mín.	$0,50 \leq e < 2,00$	-	1,3	1,7	1,9	2,1	2,3	
n_{90° mín.		-	0,19	0,20	0,22	0,23		
Dureza HRB (máx.)		65	57	50		48		

Muitos critérios têm sido propostos para avaliar a estampabilidade (F) de uma liga.⁽⁴⁾ Um deles leva em consideração uma série de propriedades mecânicas, podendo ser escrito conforme uma equação semi-quantitativa:⁽⁵⁾

$$F = \varepsilon_u \cdot R_m \cdot n \cdot \left(\frac{LR}{LE} \right) \cdot \frac{1}{2^\lambda} \quad (\text{Eq.4})$$

Onde: ε_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; LR é o Limite de Resistência; LE é o Limite de Escoamento e λ é o grau de dificuldade relativo para se conformar a peça. Apesar da Eq. 4 ser apenas uma fórmula semi-quantitativa, ela mostra 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,⁽⁶⁾ porém não é possível obter nos aços laminados a quente os valores elevados obtíveis em aços laminados a frio ($R > 1,50$, vide Tabela 1). Nestes aços, os valores do coeficiente de anisotropia são próximos à unidade,⁽⁶⁾ devido ao tipo de textura microestrutural do material.⁽⁷⁾ Para compensar esta limitação dos aços laminados a quente busca-se aumentar ao máximo os valores de alongamento que podem ser obtidos. O objetivo deste trabalho foi criar um projeto de aço laminado a quente de alta conformabilidade (alongamento) 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.⁽⁸⁾ 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. As principais características deste aço estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2. Resumo dos requisitos químicos e mecânicos da norma NBR 5906, aplicável para aços laminados a quente⁽⁸⁾

USO: ESTAMPAGEM		NBR 5906 (2008)				
GRAUS (*)		EM	EP	EPA		
COMPOSIÇÃO QUÍMICA						
C Máx.		0,10	0,08			
Mn Máx.		0,45	0,40	0,35		
P e S Máx.		0,040	0,030	0,025		
PROPRIEDADES MECÂNICAS (Tração na direção Transversal)						
LE (MPa)	e ≤ 2,00		-	320 Máx.		
	2,00 < e ≤ 3,00			300 Máx.		
	3,00 < e ≤ 10,00			280 Máx.		
LR (MPa)	e ≤ 2,00		450 Máx.	430 Máx.	420 Máx.	
	2,00 < e ≤ 10,00		430 Máx.	410 Máx.	400 Máx.	
%Alongamento (*)	L ₀ =50 mm(**)	e ≤ 2,00		25	27	30
		2,00 < e ≤ 3,00		28	30	33
		3,00 < e ≤ 10,00		30	34	35
	L ₀ =80 mm	e ≤ 2,00		23	25	28
		2,00 < e ≤ 10,00		26	28	31

(*) Admite-se redução de uma unidade no valor constante na Tabela para material decapado por processo contínuo ou com passe de laminação de acabamento. (**) Salvo quando solicitado, a referência é a base de medida L₀ = 50mm.

O aço foi processado no desgaseificador RH da Usiminas-Cubatão, que já foi empregado anteriormente para produzir aços laminados a quente destinados à conformação. Neste sentido, por exemplo, já havia sido criada e desenvolvida uma especificação de projeto de liga para a qualidade DIN 1614 Stw24 P2⁽⁹⁾ visando o atendimento do mercado de tubos conformados por hidroconformação. A Figura 3 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.

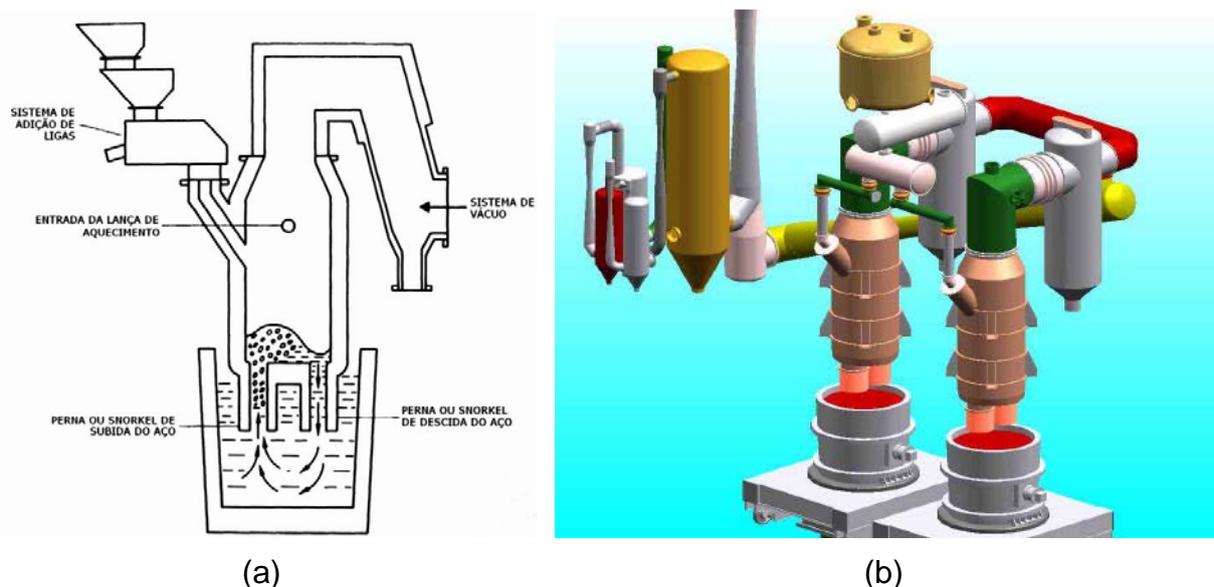


Figura 3. (a) Figura esquemática de um equipamento de desgaseificação RH. (b) Desenho esquemático do sistema de desgaseificação a vácuo RH Twin da Usiminas-Cubatão.

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 de carbono e Manganês;
- maior limitação nos teores de Fósforo, Enxofre e nitrogênio;
- adição de boro e titânio.

A adição de boro, assim como a de titânio tem como objetivo melhorar a conformabilidade do aço, pois o boro e o titânio formam carbonitretos 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 através do seu logaritmo:

$$\log (K_S) = \log ([\%X] \cdot [\%Y]) = A - B/T \quad (\text{Eq.5})$$

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 ($K_S = [\%X] \cdot [\%Y]$). 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 Eq. 5 de várias fontes bibliográficas⁽¹⁰⁻¹⁵⁾ foi possível obter as

curvas mostradas nos gráficos da Figura 4, calculadas como uma 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.

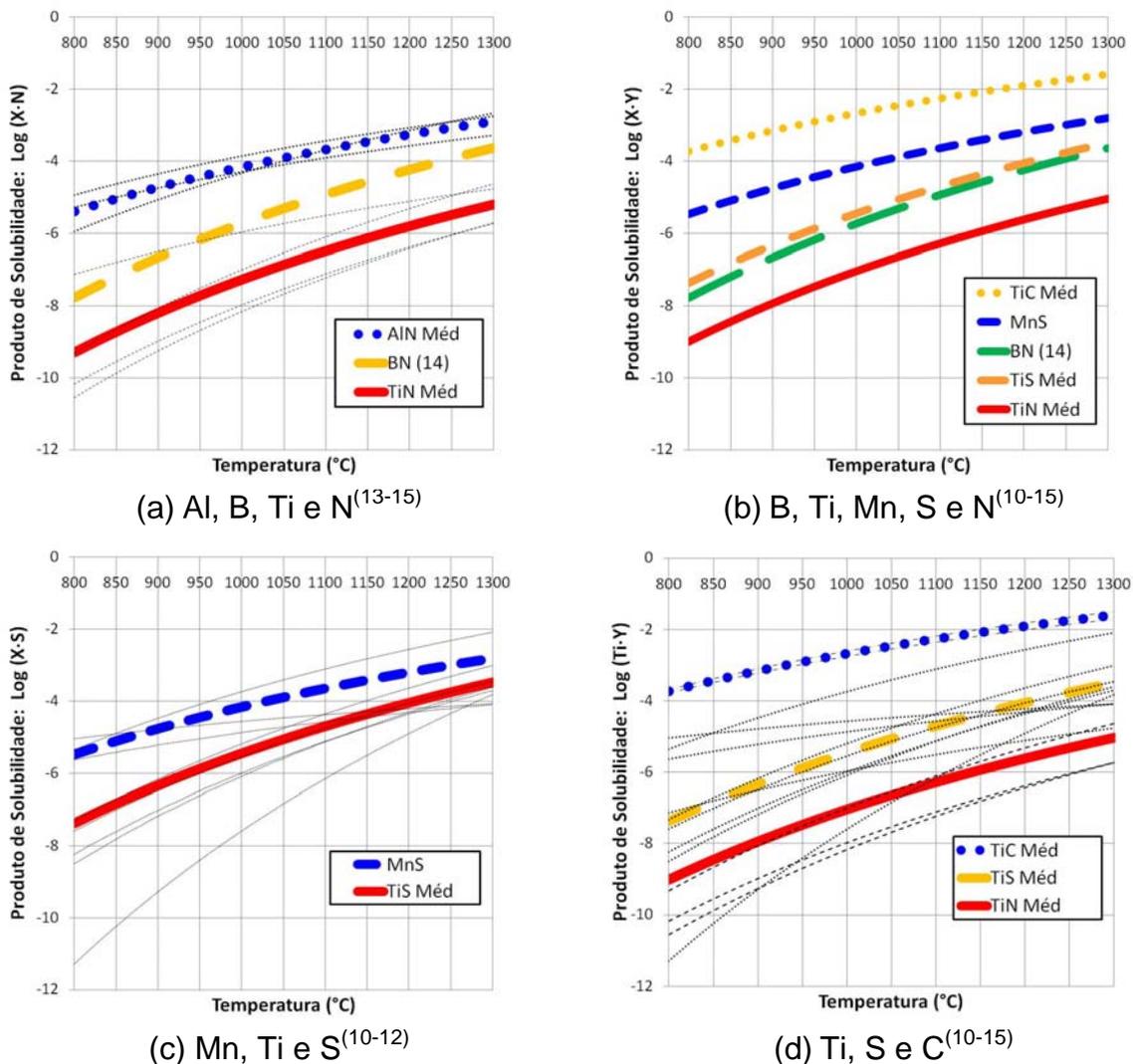


Figura 4. Produtos de solubilidade em função da temperatura para alguns elementos metálicos (Al, B, Mn, Ti) e não metálicos (C, N e S) na austenita. As curvas em destaque são as médias e as curvas mais finas os resultados das equações individuais obtidas na bibliografia.⁽¹⁰⁻¹⁵⁾

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 4.a. À medida que a temperatura diminui, o boro também passa a reagir com o nitrogênio, deixando que um eventual excesso de titânio reaja com o enxofre, conforme Figura 4.b, 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 4.c. Tudo isto está resumido no gráfico da Figura 4.d.

O material produzido foi testado internamente na Usiminas-Cubatão, para verificar o atendimento e a superação dos requisitos da norma NBR 5906. 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. Estas 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 toneladas de placas. Algumas características da composição química destas corridas estão ilustradas na Tabela 3. Nesta tabela é visível que a relação titânio:nitrogênio é aproximadamente cinco vezes maior que a boro:nitrogênio, 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 4.b. O excesso relativamente grande de alumínio visa reduzir o envelhecimento posterior do aço. Deve-se salientar que as quantidades de carbono e nitrogênio, apesar de não descritas na Tabela 3, são muito baixas.

Tabela 3. Algumas características de composição química das corridas produzidas com o aço estudado

Corrida	%Ceq ⁽¹⁶⁾	%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
Média	0,065	0,013	0,008	0,0036	0,61	3,92	0,11	0,71	12,8	1,53

A partir destas placas, produziram-se um total de 18 bobinas, todas comercializadas na qualidade NBR 5906 EPA. As bobinas foram processadas em uma das duas linhas de decapagem ou em uma linha preparadora de bobinas. As principais propriedades mecânicas obtidas em testes mecânicos de tração e dureza em algumas amostras destas bobinas estão apresentadas na Tabela 4. Os dados da Tabela 3 e 4 podem ser combinados para oferecer uma visão da dependência entre os resultados das propriedades mecânicas e os parâmetros de composição química. Os gráficos da Figura 5 ilustram essa dependência, cujos resultados são similares a outros disponíveis na bibliografia, como os publicados por De et al.⁽¹⁷⁾ e Paju.⁽¹⁸⁾

As bobinas laminadas a quente produzidas na Usiminas-Cubatão têm sua espessura registrada por um equipamento de raios-X, localizado na saída do laminador de tiras a quente. Algumas das bobinas produzidas foram subdivididas em 5 rolos através de corte longitudinal por tesoura rotativa (*sliter*). Ao longo desta operação de corte, com o auxílio de um micrômetro manual, foi possível medir a espessura das duas bordas e do centro de cada um dos rolos cortados, de tal forma a obter-se um perfil de 15 pontos de medição de espessura ao longo da largura das bobinas analisadas. Estes dados permitiram obter uma descrição da variação da espessura da tira em relação a sua largura, como mostrado no gráfico da Figura 6.a.

Tabela 4. Algumas características mecânicas das bobinas de aço produzidas

e (mm)	L (mm)	LE (MPa)	LR (MPa)	%Along. L ₀ =50mm	%Along. Prop. (*)	HV ₁₀	HRB (**)	K (MPa)	n
2,65	1200	270	348	38	45	109 (**)	61	577	0,19
2,75	1300	275	347	38	45	109 (**)	61	569	0,18
2,75	1300	282	327	46	54	102 (**)	57	528	0,17
3,00	1200	267	339	46	53	105	59	574	0,20
3,20	1413	240	320	36	41	101	55	537	0,20
3,50	1200	252	328	42	47	103 (**)	57	554	0,20
3,60	1146	245	318	36	40	100 (**)	55	526	0,19
4,25	1200	255	336	42	45	105 (**)	58	571	0,20
4,25	1200	263	348	36	39	109 (**)	61	582	0,19
4,25	1200	264	339	44	47	106 (**)	59	572	0,20
4,25	1200	270	352	38	41	110 (**)	62	587	0,19
Média		262	337	40	46	105	58	562	0,19
Desvio Padrão		13	12	4	5	4	2	22	0,01

(*) - Obtido dos dados de alongamento (CP L₀=50mm) conforme ISO 2566.⁽¹⁹⁾ (**) - Obtido dos dados de dureza e LR medidos conforme DIN EN ISO 18265.⁽²⁰⁾

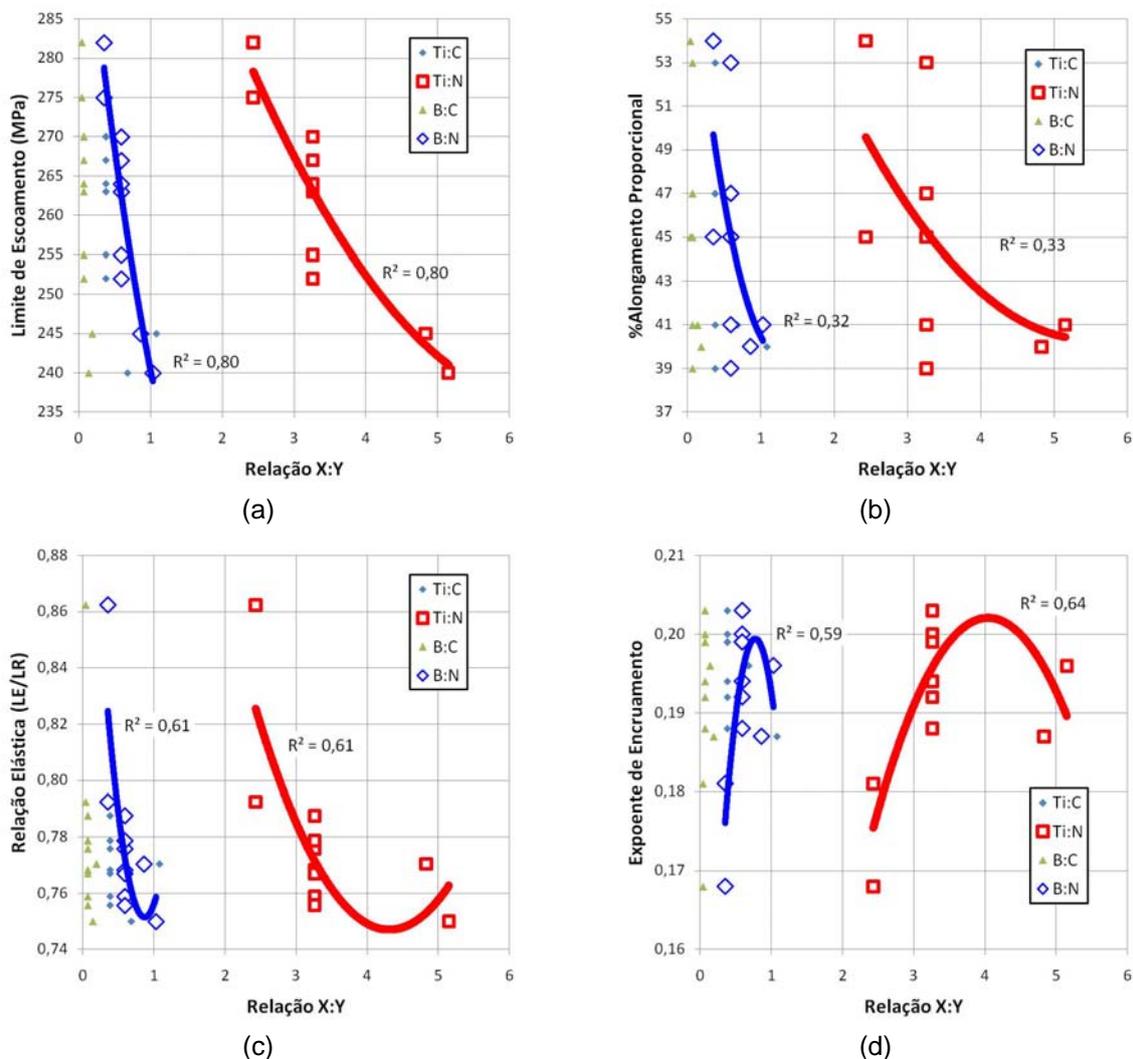


Figura 5. Variação dos resultados de ductilidade em função de alguns parâmetros de composição química obtida no aço estudado. As curvas são do tipo $y=ax^2+bx+c$ e R^2 é o coeficiente de determinação. Resultados similares aos de Paju.⁽¹⁸⁾

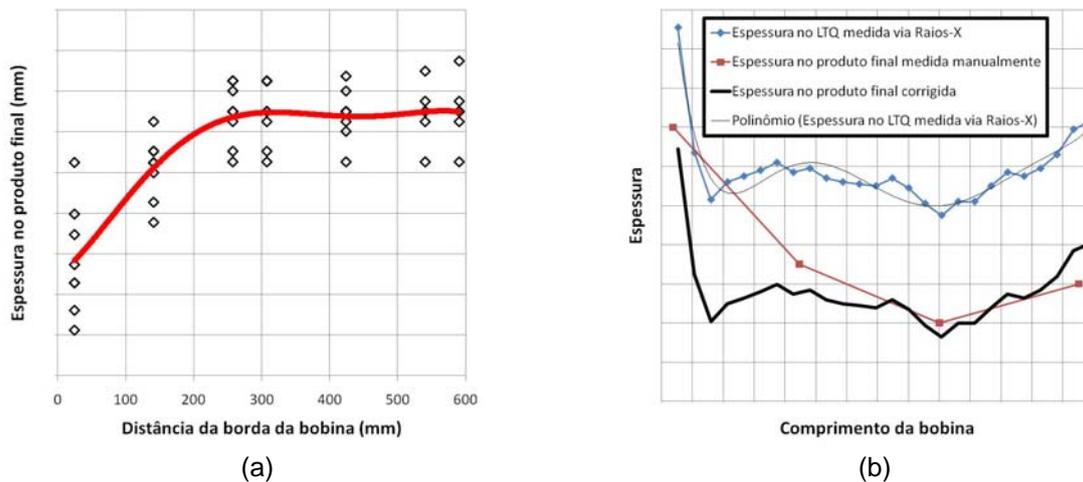


Figura 6. Processo de determinação do perfil de espessuras da tira: (a) modelamento do perfil de espessuras pela largura; (b) modelamento da variação da espessura da tira com base no registro feito na saída do laminador na Usina.

A medição automática da espessura feita na usina e a medição manual permitiram traçar um perfil de espessuras ao longo de toda a superfície das bobinas analisadas. Como o material foi decapado, as medições manuais também auxiliaram na determinação da exata espessura do material após esta operação. Os resultados estão mostrados no gráfico da Figura 6.b.

A partir da conjunção dos dois modelos de variação da espessura pela largura e comprimento, montou-se um mapeamento das espessuras de toda a tira analisada conforme ilustrado na Figura 7. Dos embarques que foram feitos ao longo do ano de 2010, a Assistência Técnica em conjunto com o Controle Integrado do Produto da Usiminas-Cubatão acompanharam especificamente dois fornecimentos, em um dos quais, o material teve o seu perfil de espessuras quantificado, como exemplificado na Figura 7, em função de uma necessidade levantada pelo cliente.

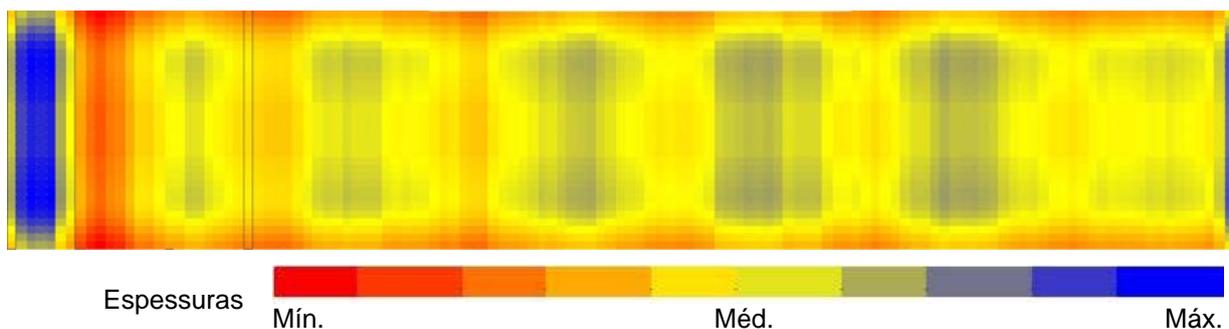


Figura 7. Exemplo do mapeamento de espessuras ao longo de toda a superfície de uma das bobinas produzidas com o aço estudado neste trabalho.

O processamento do material foi acompanhado junto a dois clientes. Um dos clientes acompanhados (cliente A) aplicou o produto na estampagem de corpos de compressores de sistemas de refrigeração, como mostrado na Figura 1.a. O mesmo emitiu um relatório que aponta um bom desempenho do material, porém fazendo restrições ao tipo de oleamento em algumas bobinas. Esta situação está associada às características de uma das linhas de decapagem da Usiminas-Cubatão. Foram feitas algumas reuniões sobre o assunto com as áreas operacionais, de suporte técnico e com a Assistência Técnica para oferecer uma possível solução. A



alternativa que se concluiu foi restringir o material para passar apenas em um das duas linhas de decapagem e somente utilizar a outra linha quando esta estiver na condição mais adequada para este cliente.

O outro cliente (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 conta que o processamento do produto é mais simples.

4 DISCUSSÃO

O tratamento de aços de baixos teores de carbono no RH traz uma vantagem prática, já que o tratamento destes tipos de aços, de composição química similares à do aço IF, gera uma condição operacional para o RH mais adequada. Os dados obtidos, especialmente de ductilidade (Along._{Méd.}=40%) apontam que o aço excedeu às exigências da norma NBR 5906 EPA (Along._≥34%).

Deve-se destacar que foi detectada o mesmo tipo de correlação entre as razões Ti:N e B:N que as indicadas na bibliografia^(17,18) para as principais propriedades mecânicas do aço. No caso do Limite de Escoamento (LE) e Razão Elástica (LE/LR) houve uma melhora nos valores desejados para estes parâmetros mecânicos, como estabelecido pela Eq.4. Foi detectada uma inflexão na tendência de aumento dos valores do coeficiente de encruamento (n). Esta tendência também ocorreu 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 contribuiu para obtenção de menores valores desta propriedade. Aparentemente, o surgimento dos precipitados neste aço efetivamente diminuiu a sua resistência e melhora a estabilidade no comportamento plástico, 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,⁽⁶⁾ 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.

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 limpeza para a produção de aços IF. Assim, utilizando esta rota para a produção do material aqui estudado, verificou-se uma melhoria de seu desempenho em termos de propriedades mecânicas e composição química.

O acompanhamento realizado auxiliou 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

- 1 MORALES, C.; MOREIRA, P.S.; LOPES, M.M.G.; **Melhorias no processo de estampagem para aços baixo carbono**. 40^o Seminário de Laminação da ABM, Vitória, p. 298-304, out., 2003.



- 2 DAVIES, R.G. **High Strength Steels in Automobiles**. Automotive Steels Seminar, TSNIIVHM & CBMM (org.), Moscow, 1988.
- 3 ABNT. **NBR 5915**. Chapas finas a frio de aço-carbono para estampagem. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2008.
- 4 MAGNABOSCO, A.S.; Resistência Mecânica x Conformabilidade. Módulo 5, Cap.3 p. 481-500. In: MORAIS, W.A.; MAGNABOSCO, A.S; NETTO, E.B.M.; **Metalurgia física e mecânica aplicada**. 2^a Edição. São Paulo: ABM, 2009.
- 5 FONSTEIN, N.M., **Low-Alloy Dual-Phase Steels For Cold Forming Applications**. In: Automotive Steels Seminar, TSNIIVHM & CBMM (org.), Moscow (1988).
- 6 MORAIS, W.A. et. Al.; **Estudo das variáveis de deformação plástica em aços através de ensaios de tração instrumentados**. 59^o Congresso Anual da ABM, São Paulo, jul. 2004.
- 7 TOSAKA, A.; et al. **Hot rolled steel with good deep drawability and good anti-secondary working embrittlement property, "KFN5"**. In: Kawasaki Steel Technical Report, n.43, p.46-48, Oct.. 2000.
- 8 ABNT. **NBR 5906**. Chapas finas a quente de aço-carbono para estampagem. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2008.
- 9 DIN. DIN 1614. **Steel flat products; Hot rolled sheet and strip; Technical delivery conditions; Mild unalloyed steels for cold reducing**. Deutsches Institut für Normung. 1986.
- 10 DUPUIS, G.; HUBERT, R.A.; TAILLARD, R.; **A Detailed Study of Sulphide Precipitation in Ti-IF Steels**. 40th MWSP Conference Proceedings. P.117-125, 1998.
- 11 YANG, X.; et al.; **Solubility products of titanium sulphide and carbosulphide in ultra-low carbon steels**. ISIJ International, v.36, n. 10, p.1286-1294, 1996.
- 12 OIKAWA, K.; SASAKI, T.; MITSUI, H.; ISHIDA, K. **Solubility products os VS and NbS in iron alloys**. ISIJ International, v.49, n. 7, p.942-946, 2009.
- 13 MAGNABOSCO, A.S.. Coeficientes de solubilidade na austenita. Anexo. p. 925-927. In: MORAIS, W.A.; MAGNABOSCO, A.S; NETTO, E.B.M.; **Metalurgia física e mecânica aplicada**. 2^a Edição. São Paulo: ABM, 2009.
- 14 KRAUSS, G.; **Steels: Processing, Structure, and Performance**. Cap. 8, p.119-147.. Materials Park: ASM International, 2005.
- 15 INOUE, K; OHNUMA, I; OHTANI, H; ISHIDA, K.; NISHIZAWA, T.; **Solubility product of TiN in Austenite**. ISIJ International, v.38, n. 9, p.991-997, 1998.
- 16 AWS. AWS D1.1. **Structural Welding Code**. Annex XI. American Welding Society. 2010.
- 17 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.53-54, apr.. 2009.
- 18 PAJU, M.; Effects of boron protection methods on properties of steel. **Ironmaking and Steelmaking**, v.19., n.6, p.495-500, 1992.
- 19 ISO. ISO 2566/1: **Steels – Conversion of elongation values – Part 1: Carbon and low alloy steels**, International Organization for Standardization. 1984.
- 20 DIN EN ISO 18265. **Metallic Materials - Conversion of hardness values**. Deutsches Institut für Normung. 2004.