

# DESENVOLVIMENTO DE AÇOS CARBONO MICROLIGADOS COM BORO NA CST-ARCELOR BRASIL <sup>1</sup>

Carlos Alberto Perim <sup>2</sup>

## Resumo

O boro é um elemento usado como microligante no aço, que melhora a temperabilidade dos aços de alta resistência e baixa liga, através do retardamento da transformação ferrítica/perlítica, promovendo a formação de bainita, e conferindo boa propriedade mecânica. Neste trabalho será mostrado o desenvolvimento realizado na CST-Arcelor Brasil, visando viabilizar a produção de aços microligados ao boro no lingotamento contínuo. O trabalho se fundamentou em um levantamento de dados de literatura sobre a produção de aços microligados com boro. A partir destes dados, foram caracterizados os possíveis problemas na primeira produção de aços microligados com boro na CST, que apresentou um nível elevado de trincas internas. A partir da identificação dos parâmetros que influenciam a formação de trincas neste tipo de aço, foram propostas alterações nas variáveis de produção e produzidos lotes experimentais para diversos clientes. Foram produzidas 21 corridas de material com nível de carbono na faixa de 0,085 a 0,23%, microligado com boro, ao longo de 2005, em quatro diferentes composições químicas. Os resultados de qualidade interna e superficial das placas comprovaram que os parâmetros estabelecidos para a produção destes aços durante o desenvolvimento deste projeto foram adequados. Desta forma, os novos parâmetros de lingotamento, estabelecidos para a produção de aços microligados ao boro, foram padronizados.

**Palavras-chave:** Boro; Lingotamento contínuo; Trincas internas.

## DEVELOPMENT OF LOW CARBON MICROALLOYED STEELS WITH BORON AT CST - ARCELOR BRAZIL

### Abstract

Boron is a microalloyed element used in steels, which improves the hardenability of high strength low alloy steels, through the retardation of the ferritic/perlitic transformation, promoting the bainitic formation, and conferring good mechanic properties. In this work, the development conducted at CST-Arcelor Brazil will be shown, aiming to make possible the production of microalloyed steels with boron in the continuous casting machines. This work is based on a data-collecting of literature about production of microalloyed steels with boron. By using these data, the possible problems in the first production of boron added steels at CST had been characterized, once the first trial presented a high level of internal cracks. Once it had been identified the parameters that influence the crack formation in this type of steel, it was proposed some modifications in production parameters and produced experimental lots for several customers. A total of 21 heats of this kind of material had been produced during 2005, in four different chemical compositions. The results of internal and surface quality of the slabs had proven that the parameters established for the production of this kind of steel during the development of this project had been well adjusted. The new casting parameters, established for the production of carbon steels with boron (C in the range 0,085 ~ 0,25%), had been standardized.

**Key words:** Continuous casting; Boron added steels.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.*

<sup>2</sup> *Membro da ABM, Especialista do Controle Técnico da Aciaria.*

## INTRODUÇÃO

O boro é um dos menores elementos metálicos, com número atômico 5 e peso atômico 10,81, seu ponto de fusão é de 2079° C e o ponto de ebulição é de 2550° C. O boro tem diversos usos industriais: na fabricação de isolamento de fibra de vidro, como branqueador, ácido bórico e bórax para produtos de lavanderia, para produção da cor verde em fogos de artifício entre outros.

O boro é adicionado ao aço devido à sua habilidade única de aumentar a temperabilidade quando presente em concentrações que variam de 15 a 40 ppm. Ele pode ser usado como elemento substituto de outros elementos de liga em aços tratados termicamente, especialmente quando estes constituintes apresentam problema de mercado.<sup>(1)</sup> O boro é utilizado em aços inoxidáveis austeníticos para controlar a fragilidade a quente, e melhorar as propriedades de fluência. O boro é adicionado a alguns aços na indústria nuclear, onde se requer a absorção de nêutrons. É também utilizado em aços destinados a estampagem extra-profunda, onde remove nitrogênio intersticial e permite a diminuição das temperaturas de laminação a quente. O boro reage rapidamente com o Oxigênio e com o Nitrogênio, sendo completamente desnecessário no aço quando em forma combinada. Assim, é necessário assegurar, durante a produção na Aciaria, que o boro esteja adequadamente protegido.

O objetivo deste trabalho é levantar o histórico de problemas na produção de aços microligados ao boro na CST-Arcelor Brasil, bem como propor alternativas para a sua produção em aços com carbono na faixa de 0,085 a 0,23%.

### Histórico da Produção

A produção inicial de aços médio carbono com boro foi realizada em setembro de 1996. Neste ano, um cliente solicitou a produção de um aço carbono (C entre 0,15 e 0,25%), com teor de B entre 30 e 80 ppm. O aço foi produzido sem qualquer outro elemento de liga e foi acalmado ao alumínio.

Foram produzidas cinco corridas (total de 1500 ton), sendo todas desclassificadas por trinca transversal. Um exemplo de trinca obtida à época é mostrado na Figura 1.



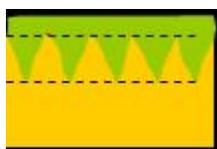
**Figura 1** – Impressão de Baumann do primeiro lote de aço microligado ao boro na CST.

A desclassificação foi atribuída à alta relação boro/nitrogênio obtida (> 1,4), devido ao elevado limite inferior especificado para o boro (40 ppm).

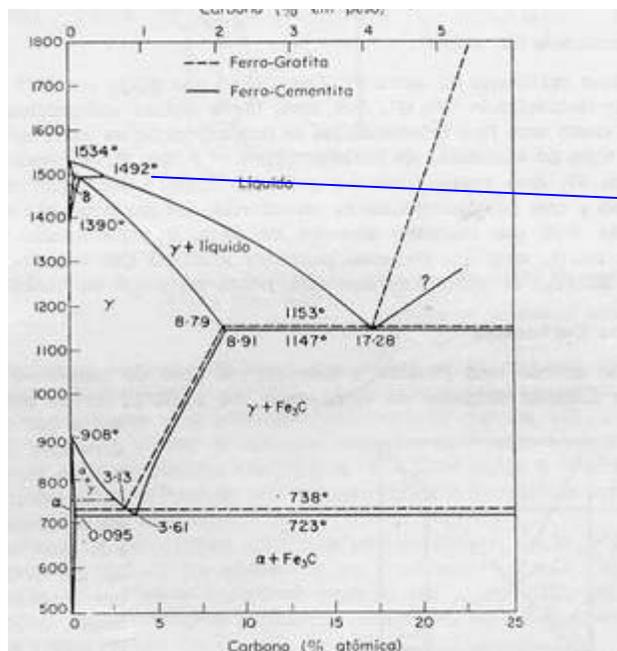
Em função da desclassificação de todo material, a CST não aceitou mais pedidos de aços de teor médio de carbono com B em faixa, devido ao elevado risco de trincas.

### Influência do Boro nos Aços Comuns

O boro é um elemento que reduz a temperatura solidus dos aços comuns, alargando a região de temperatura de transição solidus/liquidus e, por conseguinte provoca a formação de dendritas mais alongadas (ver desenho esquemático na Figura 2). A figura 2 também mostra um diagrama Fe-C, onde se nota que a temperatura de fusão do Fe puro (1534 °C) decresce para o patamar de 1492 °C na região peritética.<sup>(2)</sup>



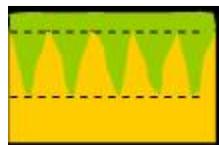
Sem boro



Sem Boro  
Tfus = 1534°C  
Tsol = 1492°C

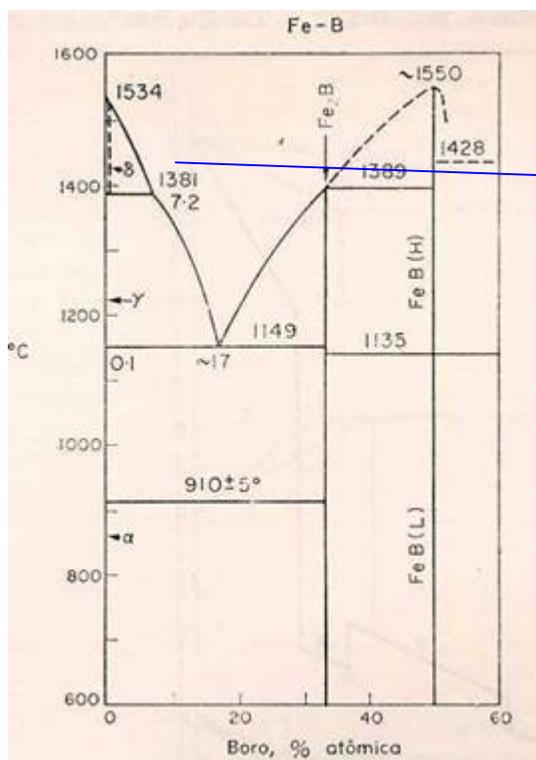
Figura 2 – Diagrama Fe-C sem outros elementos de liga.<sup>(2)</sup>

Considerando apenas o diagrama Fe-B, nota-se o alargamento da região entre a temperatura de fusão do ferro puro e do patamar peritético (Figura 3)



T solidus  
T liquidus

Com boro



Com Boro  
Tfus = 1534 °C  
Tsol = 1381 °C

Figura 3 – Diagrama de Equilíbrio Fe-B.<sup>(2)</sup>

No caso de um aço com 0,25% de carbono, Bernhard, Hiebler e Wolf<sup>(3)</sup> estudaram a segregação do boro e sua influência sobre a temperatura de solidificação. Para um teor de 30 ppm de boro, foi observado um decréscimo de 25 °C na temperatura deste tipo de aço, conforme mostrado na Figura 4, onde  $f_s$  é a fração de sólidos.

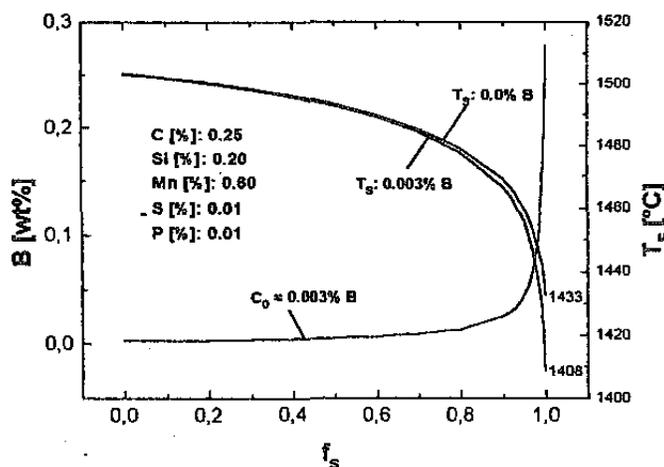
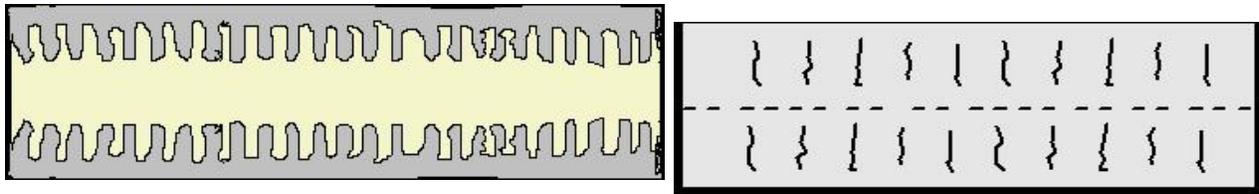


Figura 4 – Influência da adição de 30 ppm de boro sobre segregação e sobre a temperatura solidus em um aço médio carbono.<sup>(3)</sup>

Observa-se então a influência desta diminuição da T solidus no mecanismo de formação de trincas internas. Esta diminuição gera a concentração de material segregado entre as dendritas, ocasionando pequeno atraso na solidificação em relação

ao restante do líquido (e o material fica mais rígido, podendo formar trincas). A trinca inicial, uma vez formada, quando passa pelo rolo seguinte, dependendo das condições de lingotamento, pode se ampliar, devido à deformação imposta à placa, conforme mostrado esquematicamente na Figura 5.

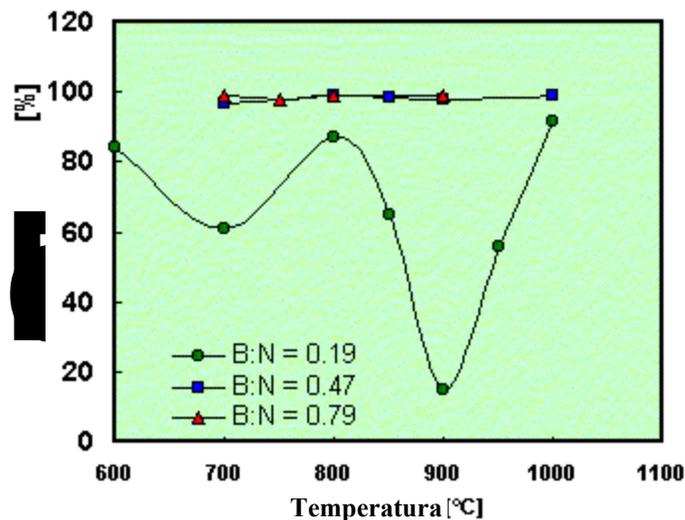


**Figura 5** – Representação esquemática da formação de trincas → microligado ao boro.

O B também é um elemento efetivo para impedir a precipitação de ferrita e aumentar a resistência, gerando uma transformação de fase em baixa temperatura. O boro é um elemento de liga muito potente, bastando a adição de 0,002 a 0,003% para ter um efeito equivalente a 0,5% de Mo. O efeito do boro é mais efetivo em teores mais baixos de carbono, por isto ele é tipicamente utilizado em aços de carbono baixo. O nível elevado de boro, entretanto (excedente a 0,005%), leva à saturação de seu efeito, e a ductilidade degrada.

O boro tem uma afinidade muito forte pelo oxigênio e pelo nitrogênio, com os quais forma compostos. O boro só afeta a temperabilidade dos aços se estiver em solução. Por isto, requer a adição de elementos reagentes (*gettering*) tais como alumínio e titânio para reagirem preferencialmente com o Oxigênio e Nitrogênio nos aços.<sup>(4)</sup>

Na figura 6 é mostrada a curva de ductilidade a quente de um aço baixo carbono com boro. Nota-se que a relação B/N afeta o poço de ductilidade, e pode provocar o aumento de trincas transversais de quina.<sup>(5)</sup>



**Figura 6** – Curvas de ductilidade a quente (INSTRON) mostrando que relações B:N acima de 0.5 melhora a ductilidade e reduz o risco de trincas transversais de quina no lingotamento contínuo.<sup>(5)</sup>

No caso da adição combinada de B e Ti no aço, o Ti forma uma solução com o N dentro do grão, na forma de TiN (desde que uma relação mínima ( $Ti > 3,4 \times N$ ) seja utilizada). Assim, o balanço entre o N e Ti é extremamente importante.

### **Principais Medidas Adotadas para Produção de Nova Produção**

Em função da análise de dados de literatura, concluiu-se que os principais problemas encontrados no primeiro lote estavam relacionados a dois pontos principais:

- Faixa de B requerida muito alta (40 a 80ppm) – possível degradação da ductilidade, e acima dos valores recomendados;

- O não uso do Ti como um elemento reagente com (*gettering*) Nitrogênio, o que promoveria o consumo de N e permitiria abaixar o teor de B a níveis razoáveis, e permitir a incorporação de B na forma de elemento livre.

Após a análise dos principais motivos que ocasionaram o insucesso da primeira tentativa de produção, foram aceitos pedidos de aços médio carbono com boro, de quatro diferentes clientes, que foram produzidos ao longo do ano de 2005. Para viabilizar a produção destes pedidos, foram estabelecidas as seguintes premissas:

Curva de Resfriamento: Utilizada curva de resfriamento menos intenso, tanto na Máquina de Lingotamento Contínuo número 1 (MLC#1) ( $< 0,70$  l/kg), como na MLC#2 ( $< 0,65$  l/kg).

Relação Ti/N – Objetivado valor maior que 3,4;

Relação B/N – Objetivar próximo a 0,5;

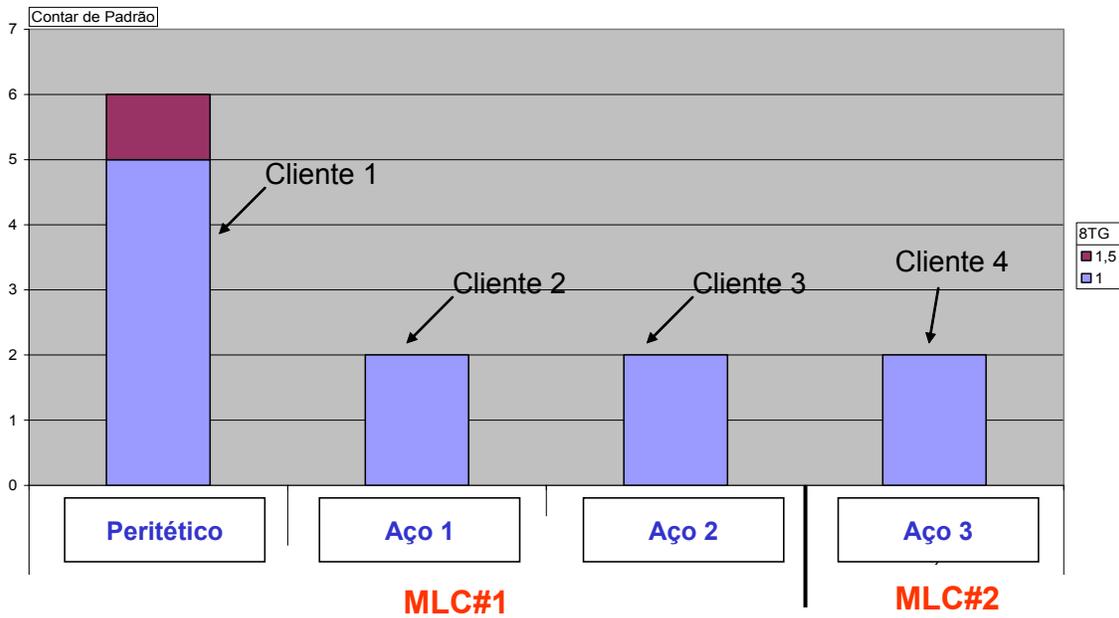
Instruir macroataque (ataque com ácido para revelar defeitos) em amostras longitudinais e transversais na primeira corrida de distribuidor e nas placas com maior velocidade de lingotamento;

Além destas medidas, optou-se por utilizar resfriamento secundário menos intenso para evitar a formação de trincas superficiais e de resfriar lentamente as placas antes de seu condicionamento.

### **RESULTADOS OBTIDOS**

Considerando os aços peritéticos (C entre 0,085 e 0,145%), foram produzidas 12 corridas (3.600ton) de material com adição de boro, sem quaisquer anormalidades de qualidade interna e superficial. Também não ocorreu a desclassificação de placas nesta qualidade. Assim, aços desta família foram liberados para aceite de pedidos.

Também foram produzidos 3 lotes experimentais de aços com maior teor de carbono ( $0,15 < C < 0,23\%$ ) para 3 diferentes clientes. Os resultados de qualidade interna mostraram níveis de trinca baixos em todas as qualidades, conforme mostrado na figura 7. Para avaliar a qualidade interna e superficial das placas, foi utilizado o padrão de referência da Mannesmann, cuja escala vai de 1 (menos crítica) a 5 (mais crítica). Os defeitos avaliados foram 8TG (trincas internas longitudinais), 8TT (trincas transversais) e 8TQ (trincas de quina).



**Figura 7** – Resultados de qualidade interna – Macroataque – referentes a trincas internas longitudinais nas máquinas de lingotamento contínuo.

Contribuíram para estes resultados as rígidas especificações internas, objetivando reduzir a possibilidade de formação de defeitos, como mostrado na figura 8, que representa os resultados obtidos em um dos lotes experimentais.

	Macroataque				
	Ti/N	B/N	8TG	8TQ	8TT
<b>Corrida 1</b>	12,94	0,65	1,0	1,0	1,5
<b>Corrida 2</b>	16,55	0,79			
<b>Corrida 3</b>	13,94	0,67			

**Relação Ti/N** – premissa estabelecida →  $Ti/N > 3,4$  para prevenir formação de trincas internas

**Relação B/N** – premissa estabelecida →  $B/N > 0,5$  para prevenir formação de trincas transversais de quina

**Figura 8** – Resultados do Controle Sobre os Parâmetros de Processo – Aços carbono com boro.

## PRÓXIMOS PASSOS

Há um grande potencial para o aumento do uso do boro como microligante em aços estruturais, em face dos diversos estudos sendo desenvolvidos com este elemento, que aumenta muito a temperabilidade dos aços quando em solução sólida, em teores tão baixos quanto 15 ou 40ppm. Ainda há restrições de produção de aços microligados ao boro na CST, sobretudo para teores mais elevados de carbono ( $C > 0,25\%$ ) e aços com muitos elementos microligantes adicionados conjuntamente com o boro. Havendo esta demanda específica, a CST-Arcelor Brasil, com seu conhecimento adquirido, envidará esforços para viabilizar a sua produção.

## CONCLUSÃO

- Até o início de 2005, a CST-Arcelor Brasil apresentava restrições quanto à produção de aços microligados ao boro em aços com carbono superior a 0,085%;
- Foi observado um aumento da demanda por este tipo de aço por parte de alguns clientes da CST. O uso do boro tem sido estudado como um microligante eficiente na produção de vários tipos de aços;
- Foi levantado o histórico de produção de aços microligados ao B na CST, bem como avaliadas as características de produção utilizando dados de literatura;
- Foram definidas condições de processo para a produção de novos lotes de aços com boro, bem como estabelecidos limites para aceitação de aços com boro (B max, N máx, necessidade de adição de Ti, curva de resfriamento, entre outros);
- Foram desenvolvidos, ao longo de 2005, 4 novos padrões de aços microligados ao boro, cobrindo tipos de aços que estavam fora do padrão de aceitação da CST;
- Os resultados de qualidade interna e superficial das placas comprovaram que os parâmetros estabelecidos para a produção destes aços durante o desenvolvimento deste projeto foram adequados;
- Desta forma, os parâmetros de lingotamento estabelecidos para a produção de aços microligados ao boro foram padronizados.

## REFERÊNCIAS

1. Ferroalloys & Alloying Additives Online Handbook. Disponível em <http://www.shieldalloy.com/boronpage.html>
2. Humer Rothery, W. Estruturas das Ligas de Ferro: Introdução Elementar. São Paulo. Ed. Edgard Blücher Ltda, 1968.
3. Bernhard, C., H. Hiebler und M. Wolf: The Effect of P and B on Crack Susceptibility: New Results of the SSCT-Test. Proceedings of the Second International Conference on Continuous Casting of Steel in Developing Countries, Wuhan, China (1997), 224-229.
4. Universidade de Cambridge. In <http://www.msm.cam.ac.uk/doitpoms/tlplib/jominy/uses2.php>
5. Thermo Mechanical Processing. In <http://www.up.ac.za/academic/mmi/immri/Research/TMP.html>