



Copyright 2019, ABINOX, ABRACO, IPT

Trabalho apresentado durante o INOXCORR 2019 - Seminário Brasileiro de Aços Inoxidáveis como Solução Contra Corrosão, em São Paulo no mês de agosto de 2019.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

## **Influência da adição de boro nas transformações ferríticas e austeníticas baseado em simulações termodinâmicas**

Vinicius A. de Oliveira<sup>1</sup>, Claudemiro Bolfarini<sup>2</sup>

### **Resumo**

---

A presença de elementos de liga em aços inoxidáveis visando melhores propriedades vem se tornando uma prática cada vez mais presente em indústrias e centros de pesquisa. Estudos recentes evidenciaram que a adição de boro pode ser uma ótima alternativa para aplicações em que se necessitam elevada resistência ao desgaste. A formação de boretos na microestrutura faz com que a dureza do material se eleve significativamente. A influência desse elemento nas transformações ferríticas e austeníticas durante solidificação ainda não é amplamente conhecida. Dessa forma, esse trabalho objetivou, por meio de cálculos termodinâmicos, avaliar a influência da adição de boro nas transformações ferríticas e austeníticas a partir de simulações utilizando o aço inoxidável duplex LDX 2101. Os resultados mostraram que, além do aumento da resistência ao desgaste, a adição desse elemento em aços inoxidáveis teve efeito no prevaecimento da fase austenita por maiores intervalos de temperatura, caracterizando-se como um elemento gamagênico.

**Palavras-chave:** aços inoxidáveis; boro; simulações termodinâmicas; gamagênico.

### **Introdução**

---

Estudos recentes vêm evidenciando, cada vez mais, a importância da adição de boro em aços inoxidáveis visando melhorias de propriedades mecânicas (1-4).

Em relação à utilização de boro em aços inoxidáveis, Zepon (1) investigou o comportamento da dureza e resistência ao desgaste de três ligas baseadas na composição química do aço inoxidável supermartensítico fabricadas via conformação por spray, sendo que duas delas foram modificadas com teores de 0.3 e 1% de boro. Concluiu-se que quanto maior presença de boro

---

<sup>1</sup> Engenheiro de Materiais e Manufatura – UFSCar

<sup>2</sup> Prof. Dr., Engenheiro de Materiais – UFSCar

na composição da liga, maior dureza e resistência ao desgaste do material, principalmente devido à formação de boretos na microestrutura, resultando em menores perdas volumétricas. Essas análises foram comparadas com os resultados obtidos por Beraldo (2) a partir de duas ligas de aços inoxidáveis superduplex, sendo que uma delas modificada com teor de 3.7% de boro. Pode-se observar na figura 1 que, mesmo apresentando valores iguais de durezas, o aço inoxidável superduplex modificado com a presença de 3.7% de boro apresentou uma perda volumétrica bastante inferior ao aço inoxidável supermartensítico modificado com a presença de 1% de boro. Esse efeito foi atribuído à maior quantidade de partículas duras de boretos presentes no material com teor de boro mais elevado em sua composição química.

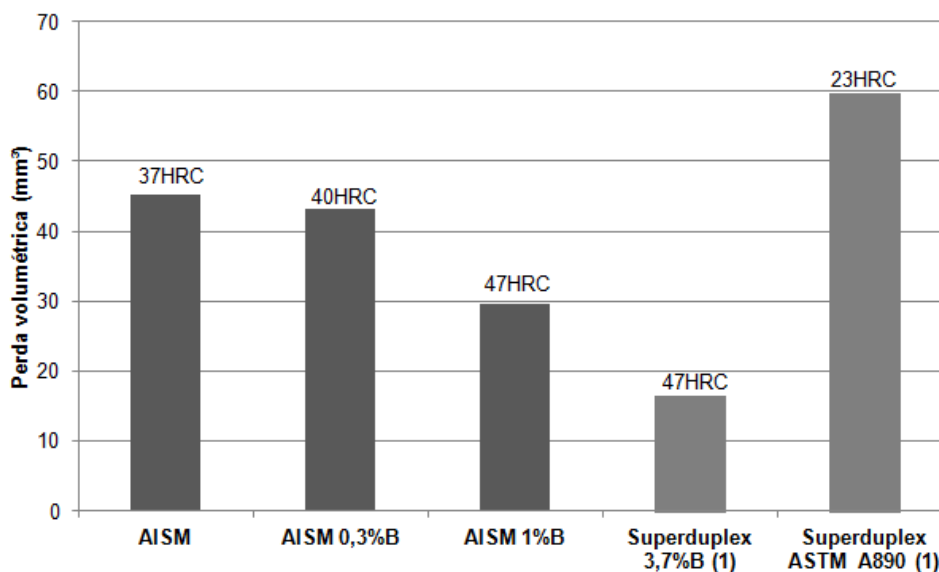


Figura 1 - Valores de dureza e perda volumétrica nas cinco ligas comparadas

Entretanto, estudos a respeito da influência da adição desse elemento em transformações ferríticas e austeníticas são escassas na literatura, apesar de estarem diretamente relacionadas com a microestrutura final dos aços e interferem (principalmente no caso de aços inoxidáveis), nas propriedades mecânicas devido aos mecanismos intrinsecamente relacionados às fases, tais como, crescimento de grãos, fissuração a quente, trincas de solidificação, entre outros. Portanto, por meio de simulações termodinâmicas, o presente trabalho investigou a influência desse elemento nas transformações ferríticas e austeníticas.

## Metodologia

O material utilizado para a simulação foi o aço inoxidável duplex LDX 2101, de baixo teor de níquel e elevado teor de manganês, a fim de proporcionar uma matriz duplex ao final da solidificação e aumentar a solubilidade de nitrogênio na microestrutura. A composição química utilizada pode ser observada na tabela a seguir.

Tabela 1 - Composição química do aço inoxidável duplex LDX 2101

Cr	Ni	Mn	Mo	N	C	Si	P	Cu	S	Fe
21,0	1,35	4,0	0,1	0,25	0,04	1,0	0,04	0,1	0,06	Restante

Para os cálculos termodinâmicos, foi utilizado o *software* de simulação ThermoCalc, com base de dados comercial de materiais ferrosos TCFE7, Estocolmo, 2012 (5).

Os resultados foram obtidos a partir da composição básica do aço LDX 2101, com adição e consequente variação do teor de boro na microestrutura, em quantidades de 1, 2 e 3%. Assim, curvas de quantidade de fases (em moles) foram construídas em função da temperatura e, a

partir desses resultados, pôde-se observar a maneira com que os campos de ferrita e austenita variam de acordo com os teores de boro.

## Resultados e discussão

Observa-se a seguir, as figuras referentes aos gráficos plotados para as quantidades de 1, 2 e 3% de boro, respectivamente.

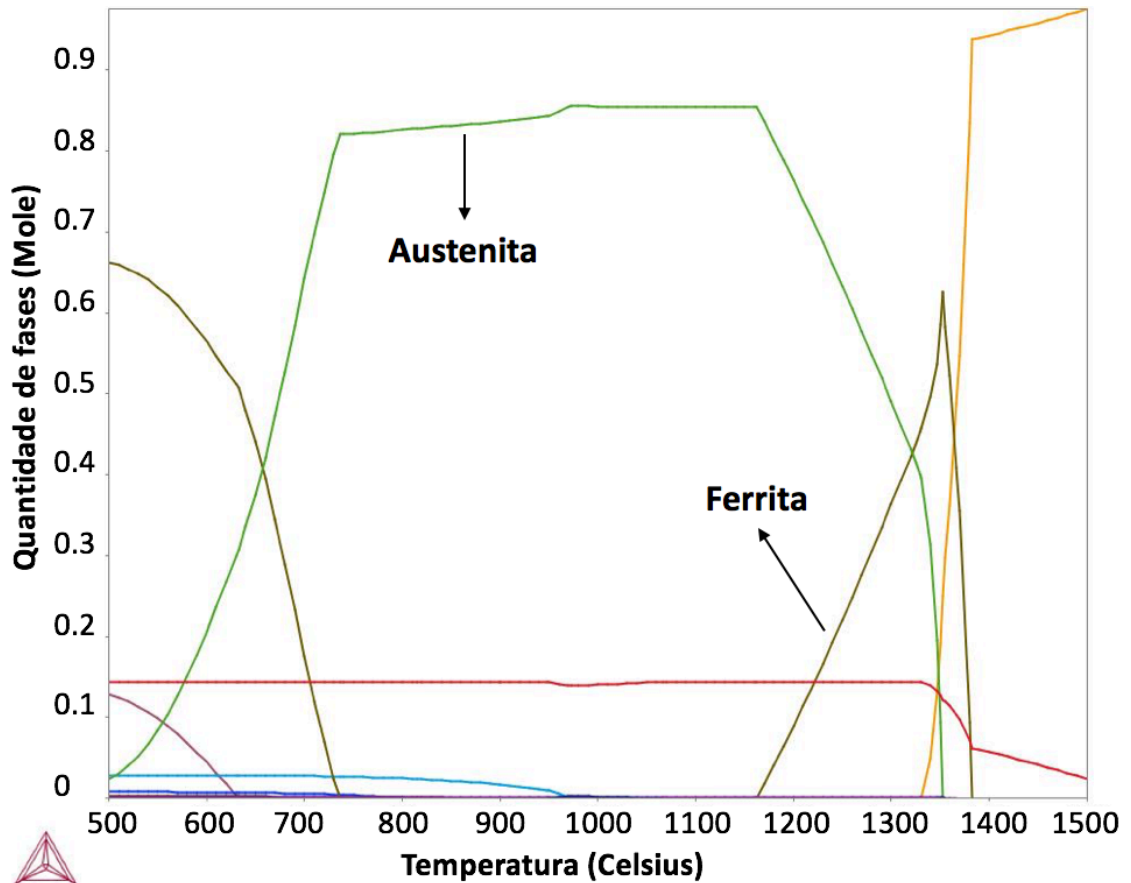


Figura 2 - Simulação para o aço LDX 2101 com a presença de 1% de boro

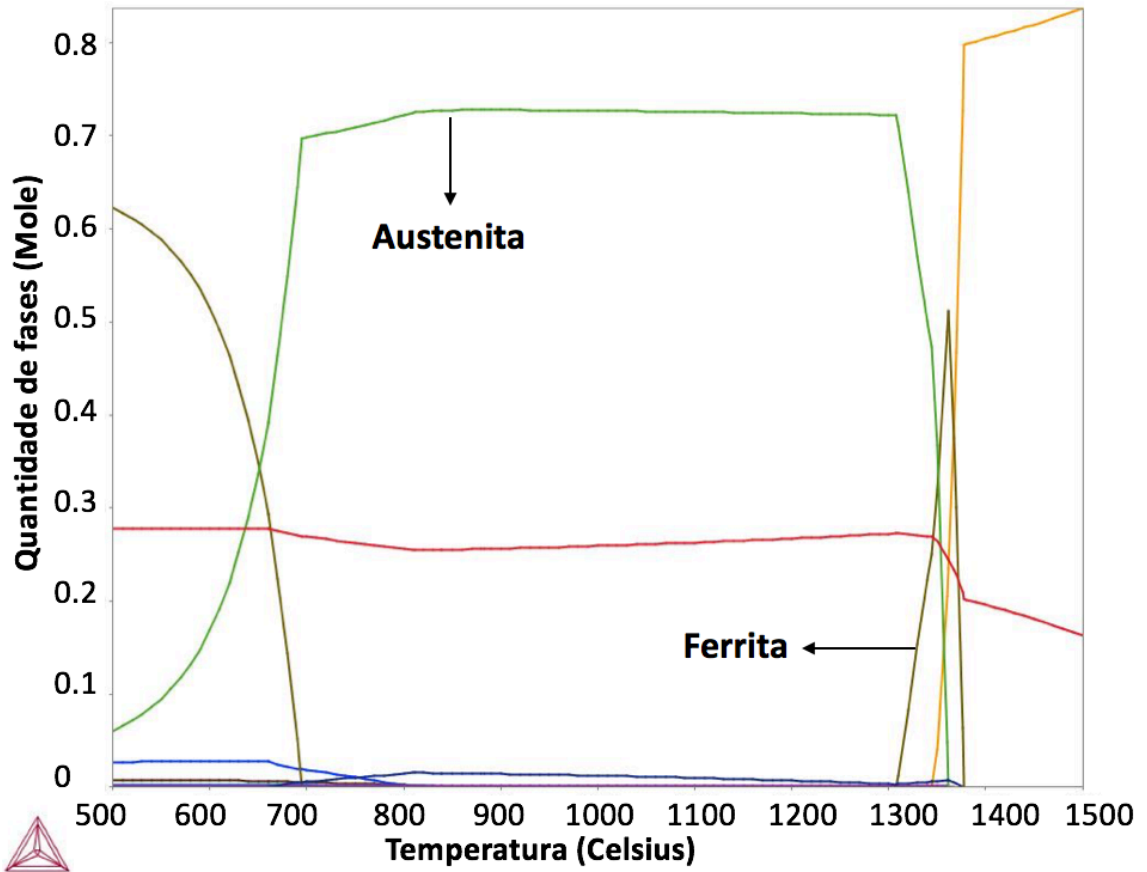


Figura 3: Simulação para o aço LDX 2101 com a presença de 2% de boro

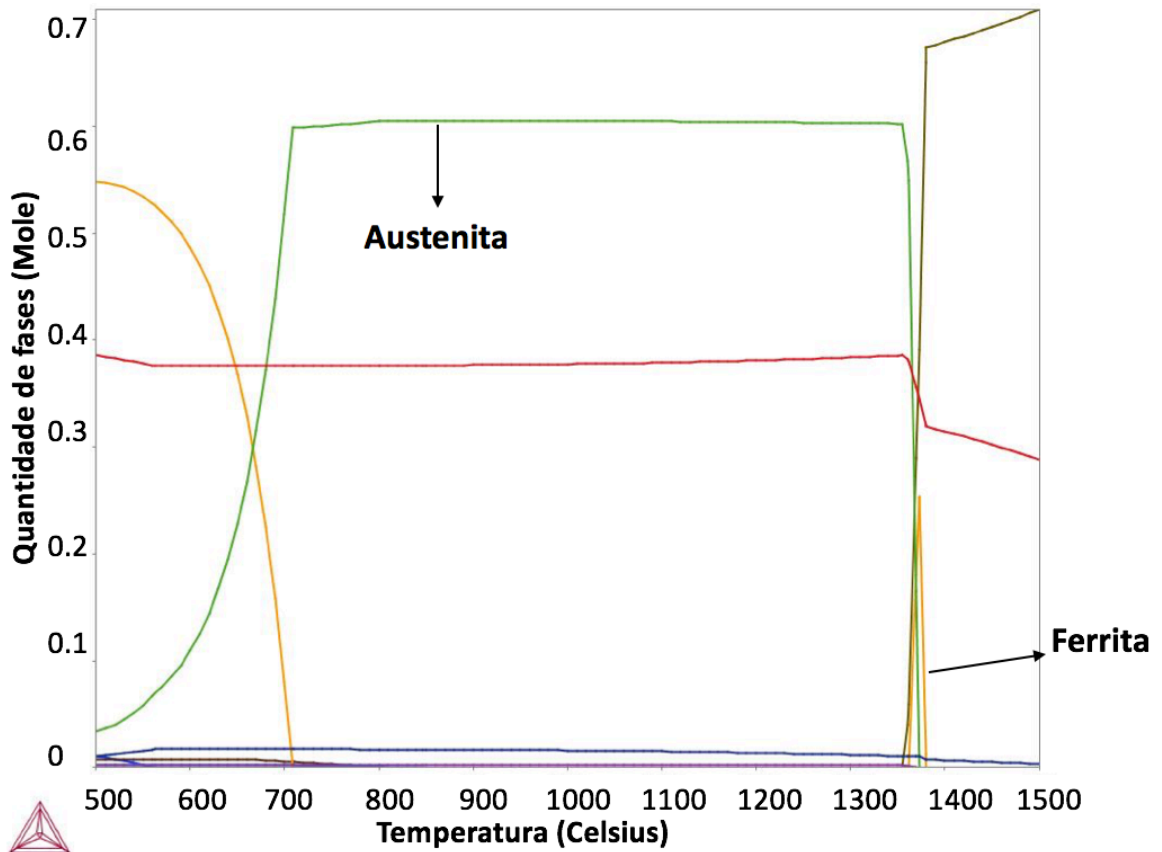


Figura 4 - Simulação para o aço LDX 2101 com a presença de 3% de boro

Percebe-se que o boro apresenta um caráter extremamente austenitizante, ou seja, um aumento no seu teor faz com que haja prevalecimento da fase austenita na microestrutura do material, o que pode ser observado pela redução, cada vez mais significativa, do campo ferrítico.

O fenômeno de estabilização de determinada fase está diretamente relacionado com a busca por uma situação de menor energia daquela composição do material em questão. Por isso, supõe-se que o boro, de estrutura tetragonal ou romboédrica, quando adicionado ao aço promove uma diminuição da energia livre da microestrutura austenítica. A partir da obtenção de valores de calor específico para cada elemento, os quais foram adquiridos previamente por meio dos cálculos termodinâmicos, foi possível estimar os valores de entalpia e entropia e, portanto, a descobrir a magnitude da energia livre de Gibbs. Sendo assim, modelos podem ser aplicados para indicar o comportamento dos elementos quando acrescidos em forma conjunta.

É válido ressaltar que as simulações termodinâmicas estão de total acordo com o que já é encontrado na literatura, especialmente a respeito do caráter gamagênico ou alfavagênico (6), o que permite a caracterização do boro como elemento austenitizante, juntamente com manganês, níquel, carbono, por exemplo.

## Conclusões

---

Os resultados das simulações termodinâmicas sugeriram que há influência significativa da adição de boro nas transformações austeníticas e ferríticas durante solidificação de aços inoxidáveis. Ainda, percebeu-se que o boro, mesmo quando adicionado em pequenas quantidades, faz com que o campo de formação da ferrita diminua cada vez mais, evidenciando um comportamento gamagênico.

Dessa forma, além dos resultados mais conhecidos acerca da adição de boro em aços inoxidáveis (aumento da resistência ao desgaste), é interessante ressaltar o efeito que esse elemento pode apresentar na formação microestrutural, podendo impactar diretamente nas propriedades do material em questão.

## Referências bibliográficas

---

- (1) ZEPON, G., **Resistência Ao Desgaste Do Aço Inoxidável Supermartensítico Modificado Com Boro Conformado Por Spray**, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de São Carlos, 2013.
- (2) BERALDO, L., **Avaliação Da Resistência Ao Desgaste de Aços Inoxidáveis Conformados Por Spray**, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de São Carlos, 2011.
- (3) NASCIMENTO, A., **Efeito Da Porcentagem de Boro Na Microestrutura E Resistência Ao Desgaste Do Aço Inoxidável AISI 430 Conformado Por Spray Em Um Tribossistema Placa Sobre Cilindro**, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de São Carlos, 2014.
- (4) SOYAMA, J., **Estudo do efeito de modificações com boro e nitrogênio em aços inoxidáveis superduplex visando reduzir o coeficiente de atrito e aumentar a resistência ao desgaste**, Processo nº. 2014/27073-0, Universidade Federal de São Carlos, UFSCar, São Carlos, 2017.
- (5) SUNDMAN B., et.al., (1985) **The Thermo-Calc databank system**. Calphad 9:153–190. doi: 10.1016/0364-5916(85)90021-5.
- (6) LOPES, T.P., **Utilização de simulação termodinâmica para desenvolvimento de aços inoxidáveis modificados com boro conformados por spray: aplicações e limitações**, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de São Carlos, 2017.