



# AValiação TERMODINÂMICA PARA REDUZIR Si EM AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS USANDO FeO <sup>1</sup>

Raphael Dias de Medeiros<sup>2</sup>  
José Roberto de Oliveira<sup>3</sup>  
Ramiro da Conceição do Nascimento<sup>3</sup>  
Estéfano Aparecido Vieira<sup>4</sup>

## Resumo

Em alguns processos metalúrgicos a remoção de Si de aços inoxidáveis austeníticos pelo FeO é uma alternativa que pode melhorar o aproveitamento de sucatas para fabricação de novas ligas. Neste trabalho foi feita uma avaliação termodinâmica objetivando estabelecer as reações preferenciais que deverão ocorrer quando adicionado FeO na superfície de um banho líquido de um aço inoxidável austenítico fundido. Levou-se em consideração as atividades dos componentes presentes na interface metal/escória e as energias livres de Gibbs envolvidas para diversas reações possíveis. Para prever quais elementos serão preferencialmente oxidados cálculos termodinâmicos foram feitos seguindo os referenciais Raoultiano e 1% em peso. As atividades foram calculadas levando-se em consideração apenas os parâmetros de interação de 1ª ordem. Os cálculos mostram que o Si possui forte tendência a ser oxidado pelo FeO. Comparando as duas referências verifica-se que existem algumas discrepâncias. Este método é útil para explicar os mecanismos que governam a oxidação de alguns elementos presentes no aço pelo FeO.

**Palavras-chave:** Aço austenítico; Silício; FeO; Modelo termodinâmico; Carepa.

## THERMODYNAMIC EVALUATION TO REDUCE Si CONTENT FROM AUSTENITIC STAINLESS STEELS

### Abstract

In some metallurgical process remove Si from austenitic stainless steels using FeO is a way that may improve the scraps recycling to obtaining new alloys. In this work a thermodynamic evaluation was made aiming establish which is the first reaction that will occur when FeO is added on the surface of liquid austenitic stainless steel. It was considered the activities of components restrained in the alloy/slag interface and standard Gibbs free energy involving all possible reactions. To forecast which components will be oxidized preferably, thermodynamic calculi were performed using references Raoultian and 1% wt. The activities were calculated using only first order interaction parameters. Calculi showed that Si has strongly tendency to be oxidized. When it was compared the both referential used we checks that there are some discrepancies. This model is useful to explain the mechanism that controls oxidation of some components in steel by FeO.

**Key words:** Stainless steel; Silicon; FeO; Thermodynamic model; Scale.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 41º Seminário de Aciaria – Internacional, 23 a 26 de maio de 2009, Resende, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> Mestrando em Metalurgia e Materiais – IFES.

<sup>3</sup> Doutor em Metalurgia e Materiais – IFES.

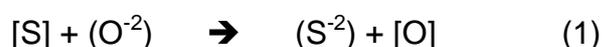
<sup>4</sup> Doutor em Metalurgia e Materiais – IFES. [estefanovieira@ifes.edu.br](mailto:estefanovieira@ifes.edu.br)



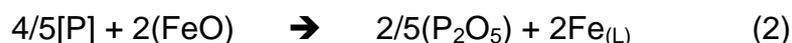
## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, muitas indústrias metalúrgicas reciclam metais e ligas sucataadas. Nestes processos a presença de impurezas é comum e dependendo do valor agregado do produto pode ser viável ou não fazer a remoção delas. Em algumas situações fazer a remoção das impurezas, tecnologicamente não é prático ou até mesmo impossível. Com as novas exigências do mercado cada vez mais competitivo as indústrias metalúrgicas buscam sempre reduzir custos. Portanto, o aproveitamento de sucatas é tido como uma alternativa real objetivando aperfeiçoar a cadeia produtiva. Todo este contexto justifica o desenvolvimento de técnicas que objetivam remover impurezas dos metais fundidos e ligas. Existem vários métodos disponíveis para remoção de elementos dissolvidos nos metais e ligas conforme listado a seguir:

i) O elemento indesejável “x” é transferido para outra fase onde lá possui alta solubilidade. A segunda fase não é solúvel na liga e um típico exemplo deste caso seria a transferência do enxofre do ferro fundido para escória.



ii) A impureza “x” reage com uma segunda fase que pode ser sólida, fundida ou gasosa. A segunda fase não é solúvel no metal ou liga. Um exemplo típico seria a transferência do fósforo do aço para escória através da formação do  $P_2O_5$  seguindo a seguinte reação:



iii) A impureza “x” reage com outro elemento adicionado no metal líquido propositalmente. O produto da reação pode ser líquido, sólido ou gasoso e, portanto deverá ser removido da liga. Neste caso os produtos da reação gerados deverão ser Eliminados por forças produzidas pela gravidade ou por outros meios de arraste com o auxílio de injeção de gases inertes não solúveis. Temos o exemplo de adição do Si ou Al em aços para promover a desoxidação através da formação de  $SiO_2$  e  $Al_2O_3$  respectivamente ou a remoção do P pelo oxigênio dissolvido conforme mostram as reações abaixo:



iv) As impurezas podem ser eliminadas por uma eletrólise. Neste caso o metal de interesse pode ser depositado no catodo como ocorre com o Cu que na forma de  $CuSO_4$  é concentrado seguindo a reação.

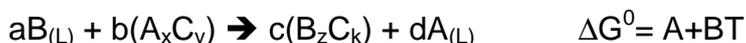


v) Durante a solidificação uma liga metálica pode ser mantida no estado semi-sólido, as impurezas poderão estar concentradas no líquido previamente formado que depois de separado do sólido tem-se a purificação.



## 1.1 Aspectos Termodinâmicos

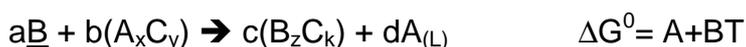
Nos processos de purificação um aspecto de fundamental importância é o potencial termodinâmico de remoção dos elementos. Vamos por exemplo, imaginar uma reação em uma liga binária A-B onde B é o soluto e A o solvente. O elemento B pode ser eliminado da liga por um composto  $A_xC_y$ , seguindo a seguinte reação:



Considerando que a referência é Raoultiana, a energia livre envolvida neste processo pode ser dada por:

$$\Delta G = \Delta G^0 + R.T.\ln \frac{[a_A]^d \cdot [a_{B_zC_k}]^c}{[a_B]^a \cdot [a_{A_xC_y}]^b} \quad \{1\}$$

Onde  $\Delta G^0$  são valores tabelados para cada reação envolvida. A mesma reação dada acima pode ser reescrita considerando o referencial 1% em peso e portanto teríamos:

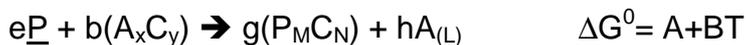


o valor de  $\Delta G^0$  assume outro valor diferente da equação anterior pois, os coeficientes A e B serão diferentes. A equação para obter o valor da energia livre envolvida no processo pode ser dada por:

$$\Delta G = \Delta G^0 + R.T.\ln \frac{[a_A]^d \cdot [a_{B_zC_k}]^c}{[h_B]^a \cdot [a_{A_xC_y}]^b} \quad \{2\}$$

Por serem praticamente puros, podemos considerar a atividade do solvente A e do composto  $A_xC_y$  igual a 1. A atividade do composto formado  $B_zC_k$  deverá valer 1 caso forme-se na forma pura. A partir destas considerações, é possível obter de 1 e 2 equações que permitem calcular a concentração de equilíbrio do elemento B, soluto, no solvente A. Ambas conduzem a resultados idênticos porém, na equação 1 o resultado é dado em fração molar e na 2 em % em peso.

Supondo agora que, além da presença do elemento B tem-se também o elemento P. Este poderá ser eliminado da liga A conforme a reação:



Obviamente, os valores de A e B para cálculo do  $\Delta G^0$  serão diferentes das reações anteriores. É possível calcular a energia livre utilizando uma expressão semelhante a 1 ou 2. Tomando-se, por exemplo, referencial 1% em peso, pode-se escrever:

$$\Delta G = \Delta G^0 + R.T.\ln \frac{[a_A]^g \cdot [a_{P_M C_N}]^h}{[h_P]^e \cdot [a_{A_xC_y}]^b} \quad \{3\}$$



O valor de  $\Delta G$  utilizando-se a equação 3 pode ser comparado com obtido pela equação 2 e o menor valor indicará qual elemento terá preferência de ser removido do ponto de vista termodinâmico. Um aspecto importante é que as equações sejam balanceadas de modo a manter o coeficiente “b” precedente a  $A_x C_y$  idênticos. Desta forma garante-se a comparação e é possível verificar qual elemento dissolvido tem mais afinidade em reagir com o composto  $A_x C_y$ .

## 1.2 Cálculo de Atividade

Para efetuar os cálculos propostos anteriormente é necessário estabelecer os valores das atividades para o elemento soluto. Para liga binária e referencial Raoultiano podemos calcular a atividade de um componente “i” da seguinte forma:

$$a_i = \gamma_i \cdot X_i \quad \{4\}$$

Onde  $a_i$  é a atividade Raoultiana do componente “i” e “ $\gamma_i$ ” é o coeficiente de atividade Raoultiano. Quando “ $\gamma_i$ ” vale 1 temos que é válida a lei de Raoul e este valor é aplicado para formação de substâncias puras líquidas ou sólidas. Para soluções muito diluídas existe um trecho onde o coeficiente “ $\gamma_i$ ” é constante e vale “ $\gamma_i^0$ ”. Cada elemento i dissolvido em um metal possui seu valor de “ $\gamma_i^0$ ” tabelado. Neste trecho vale a lei de Henry e assim:

$$a_i = \gamma_i^0 \cdot X_i \quad \{5\}$$

se o referencial escolhido for 1% em peso, então neste caso a atividade será dada pela seguinte equação:

$$h_i = f_i \cdot \%i \quad \{6\}$$

Onde “ $h_i$ ” é a atividade Henryana do componente “i” e “ $f_i$ ” é o coeficiente de atividade Henryano. Para soluções muito diluídas o valor de “ $f_i$ ” é constante e vale 1. Trata-se do trecho onde vale a lei de Henry no referencial 1% em peso, portanto:

$$h_i = \%i \quad \{7\}$$

As expressões acima permitem calcular as atividades e seus respectivos coeficientes de um componente “i” em solução nos sistemas binários. Contudo, isto não é a realidade prática para a maioria dos problemas que surgem durante a elaboração de metais e ligas. Nestes processos é comum a presença de vários elementos químicos em solução, ou seja, as ligas. Assim, para estes casos existe um tratamento matemático o qual permite calcular os coeficientes de atividade levando em consideração este aspecto. Para o referencial Raoultiano o coeficiente “ $\gamma_i$ ” pode ser calculado da seguinte forma:

$$\ln \gamma_i = \ln \gamma_i^0 + \varepsilon_i^i \cdot X_i + \varepsilon_i^B \cdot X_B + \dots + \varepsilon_i^N \cdot X_N + \frac{1}{2} \%_i^2 \cdot \phi_i^i + \%_i \cdot \%_B \cdot \phi_i^B + \dots + \%_i \cdot \%_N \cdot \phi_i^N \quad \{8\}$$

E para referencial Henryano podemos escrever:

$$\log f_i = \log f_i^0 + e_i^i \cdot \%_i + e_i^B \cdot \%_B + \dots + e_i^N \cdot \%_N + \frac{1}{2} X_i^2 \cdot \rho_i^i + X_i \cdot X_B \cdot \rho_i^B + \dots + X_i \cdot X_N \cdot \rho_i^N \quad \{9\}$$



“N” indica o número total de componentes, “ $e_i^j$ ” e “ $\epsilon_i^j$ ” são parâmetros de interação entre os elementos de primeira ordem, “ $\rho_i^j$ ” e “ $\phi_i^j$ ” são os de segunda. Todas estas variáveis, são todos bem conhecidos na literatura<sup>(1,2)</sup> e seus valores tabelados podem ser encontrados em diversas fontes.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A proposta deste trabalho é estudar a remoção de Si em aços austeníticos inoxidáveis através do uso de carepa de laminação rica em FeO. A carepa são óxidos de ferro, basicamente constituídos por wustita (FeO), hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>). A Figura 1 mostra seu aspecto macroscópico. É de fundamental importância conhecer o potencial termodinâmico de remoção do Si. Contudo, os demais elementos presentes também estarão susceptíveis a remoção e neste trabalho foi feito este estudo.



Figura 1. Carepas na superfície e eliminadas do tarugo de aço.<sup>(3)</sup>

O aço a ser estudado possui a composição química conforme apresentado pela Tabela 1.

Tabela 1. Composição Química da sucata (% em peso)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Co	Al	V
Medido	0,48	2,27	0,81	0,03	0,02	24,2	12,37	0,21	0,13	0,09	0,1	0,04

Conforme já dito, a adição de carepa no aço provocará a remoção não somente do Si como também de outros elementos. O objetivo deste trabalho é avaliar termodinamicamente quais elementos serão removidos pela carepa. Serão estudados os seguintes elementos C, Si, Mn, Cr e Ni. Os demais elementos tratam-se de impurezas e, portanto, a remoção dos mesmos não altera a qualidade do produto final a ser obtido. É interessante que se faça a remoção do Si com mínimo de remoção de C, Mn, Cr e Ni possível, tendo em vista que, para estes a perda torna o processo mais caro. Para fazer os cálculos termodinâmicos e verificar qual elemento possui maior tendência de ser eliminado pelo FeO do ponto de vista termodinâmico é necessário conhecer as reações de interesse para cada sistema. As Tabelas 2 e 3 apresentam os valores de energia livre para as reações de interesse considerando o referencial Raoultiano e 1% em peso respectivamente.



**Tabela 2.** Principais reações possíveis no sistema escória rica em FeO e aço austenítico<sup>(4-6)</sup>

Reação	#	Energia livre padrão $\Delta G^0$ (ref. Raoultiana)
$\text{FeO}_{(L)} + \underline{\text{C}} \rightarrow 1/2 \text{CO}_{(G)} + \text{Fe}_{(L)}$	(A)	+23300-27,98T cal
$\text{FeO}_{(L)} + \underline{\text{Si}}_{(L)} \rightarrow \text{SiO}_{2(L)} + \text{Fe}_{(L)}$	(B)	-39285+9,4T cal
$\text{FeO}_{(L)} + \underline{\text{Mn}}_{(L)} \rightarrow \text{Fe}_{(L)} + \text{MnO}_{(S)}$	(C)	-44526+11,3T cal
$\text{FeO}_{(L)} + 2/3\underline{\text{Cr}}_{(L)} \rightarrow \text{Fe}_{(L)} + 1/3\text{Cr}_2\text{O}_{3(S)}$	(D)	-30217+7,17T cal
$\text{FeO}_{(L)} + \underline{\text{Ni}}_{(L)} \rightarrow \text{Fe}_{(L)} + \text{NiO}_{(S)}$	(E)	+1550+8,99T cal

**Tabela 3.** Principais reações possíveis no sistema escória rica em FeO e aço austenítico<sup>(4-6)</sup>

Reação	#	Energia livre padrão $\Delta G^0$ (ref. 1% em peso)
$\text{FeO}_{(L)} + \underline{\text{C}} \rightarrow 1/2 \text{CO}_{(G)} + \text{Fe}_{(L)}$	(F)	+23300-21,98T cal
$\text{FeO}_{(L)} + \underline{\text{Si}} \rightarrow \text{SiO}_{2(L)} + \text{Fe}_{(L)}$	(G)	-39285+13,28T cal
$\text{FeO}_{(L)} + \underline{\text{Mn}} \rightarrow \text{Fe}_{(L)} + \text{MnO}_{(S)}$	(H)	-44526+20,42T cal
$\text{FeO}_{(L)} + 2/3\underline{\text{Cr}} \rightarrow \text{Fe}_{(L)} + 1/3 \text{Cr}_2\text{O}_{3(S)}$	(I)	-30217+4,90T cal
$\text{FeO}_{(L)} + \underline{\text{Ni}} \rightarrow \text{Fe}_{(L)} + \text{NiO}_{(S)}$	(J)	+1550+18,21T cal

Para calcular o potencial termodinâmico de uma reação é necessário usar os coeficientes de atividade Henryano e/ou Raoultiano dependendo da referência escolhida. A Tabela 4 apresenta os valores dos parâmetros de interação de primeira ordem dos elementos principais envolvidos. Estes parâmetros foram utilizados nas equações 8 e 9 para obter-se os coeficientes de atividade. Nesta primeira etapa foram desprezados os parâmetros de 2ª ordem.

**Tabela 4.** Parâmetros de interação de primeira ordem " $e_i^j$ " e " $\epsilon_i^j$ "<sup>(4-6)</sup>

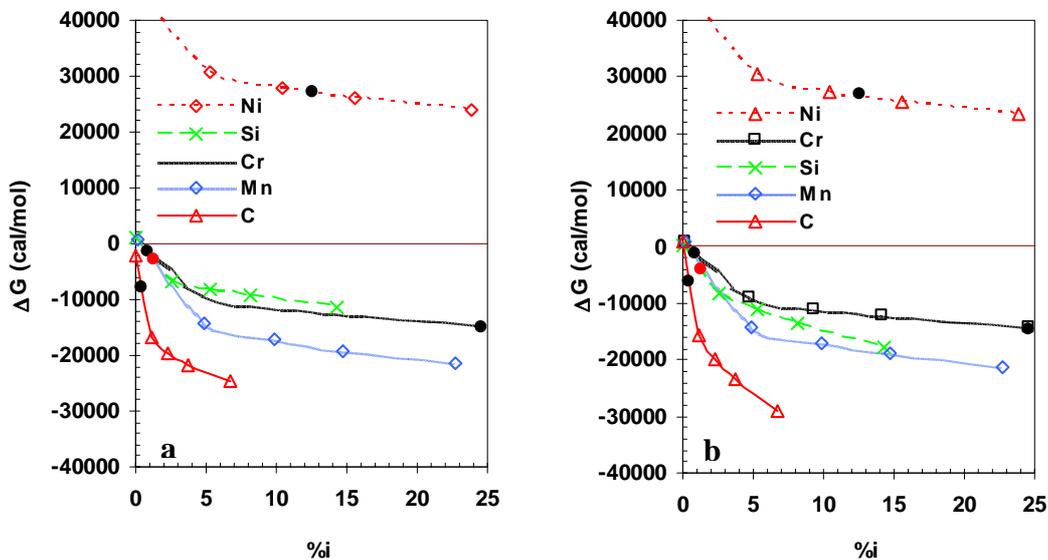
	$e_i^j$						$\epsilon_i^j$					$\gamma^0$
	j → C	Si	Mn	Cr	Ni		j → C	Si	Mn	Cr	Ni	
<b>Ni</b>	0,042	0,0057	0	-0,0003	0,0009	<b>C</b>	2,9	1,2	0	0	0,16	0,57
<b>Cr</b>	-0,12	-0,0043	0	-0,0003	0,0002	<b>Si</b>	-5,1	0	0	0	0	0,0011
<b>Mn</b>	-0,007	0,06	-0,003	0	0	<b>Mn</b>	-2,7	0,5	0	0	0	1,3
<b>Si</b>	0,18	0,11	0,002	-0,003	0,005	<b>Cr</b>	9,72	12,6	0,5	0	1,2	1,14
<b>C</b>	0,14	0,08	-0,012	-0,024	0,012	<b>Ni</b>	7,8	9,72	-2,7	-5,1	2,9	0,66

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

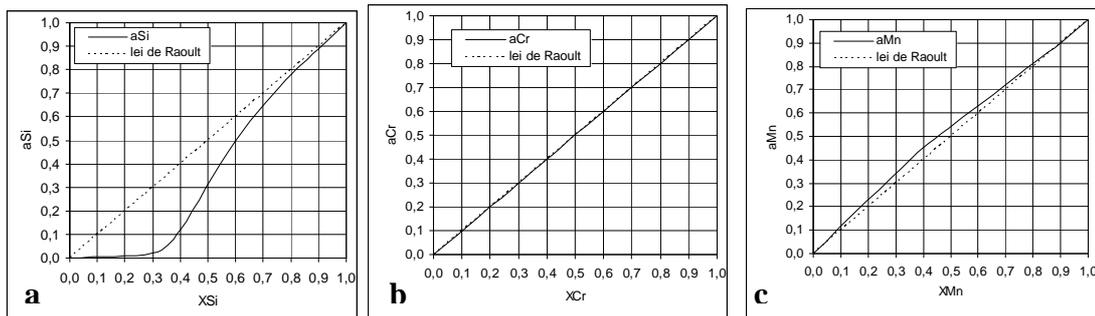
Usando os dados obtidos na bibliografia consultada, foi possível construir a Figura 2 para referencial Raoultiano, o qual mostra o potencial termodinâmico de eliminação para cada elemento de interesse. A Figura 2a apresenta as curvas obtidas sem considerar os parâmetros de interação dos demais elementos presentes já a Figura 2b é mais completa porque usa estes valores. Para construção da Figura 2 foram necessárias algumas considerações importantes: Assumiu-se para a atividade do FeO sempre o valor igual a 0,71.<sup>(7)</sup> Esta escolha baseia-se no fato de ser típico para carepas oriundas de laminação, resíduo muito comum que pode ser utilizado para este fim; A atividade do Fe foi considerada sempre igual a fração molar presente; Para os óxidos sólidos MnO, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e NiO a atividade foi considerada igual a 1 devido a formação de sólido puro. Para o SiO<sub>2</sub> considerou uma atividade igual a 0,3<sup>(7)</sup> porque este provavelmente torna-se líquido dissolvendo-se na escória formada. A fração escolhida representa a transferência de aproximadamente 40% do Si total para a escória, considerando-se que a quantidade de carepa a ser usada será exatamente a estequiométrica para remover todo o Si. Nos gráficos os pontos totalmente preenchidos representam a % inicial dos elementos contidos no aço. Podemos observar que o potencial de remoção do Si é muito forte e nestas condições verifica-se que para o aço estudado termodinamicamente este será o



elemento preferencial a ser removido perdendo apenas para o C e o Cr, conforme mostra o ponto vermelho em destaque. Os resultados mostram também que existe uma disputa entre o Si, Mn e Cr.



**Figura 2.** Potencial de remoção de remoção de alguns elementos dissolvidos em um aço inoxidável austenítico – referência Raoultiana (a) sem parâmetros de interação (b) com parâmetros de interação.



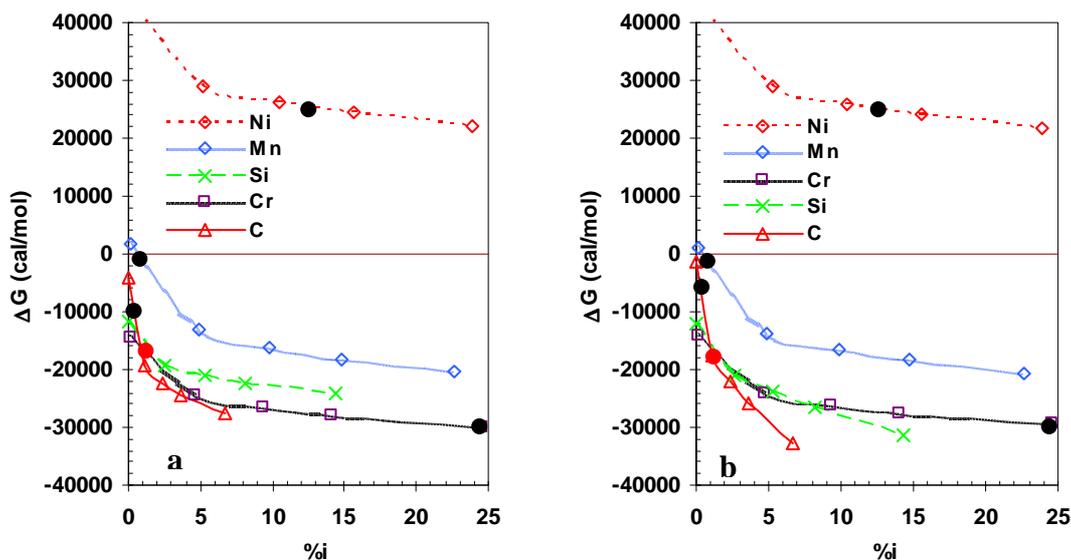
**Figura 3.** Atividade do elemento soluto em ligas binárias de Fe (a) forte desvio da idealidade Fe-Si (b) nenhum da idealidade Fe-Cr (c) pequeno desvio da idealidade Fe-Mn.<sup>(8)</sup>

Apesar da Figura 2 mostrar resultados semelhantes, é possível observar que existem algumas disparidades. Principalmente, para o caso do Si e o C, quando os cálculos são feitos com os parâmetros de interação as mudanças sobre estes elementos são mais pronunciadas o que não ocorre para os demais, Ni, Cr e Mn. A explicação para este comportamento é o fato de o Si e o C formarem soluções com fortes desvios da idealidade, como ilustra a Figura 3a para o Si. Já outros elementos a solução é pouco influenciada como mostra a Figura 3b e 3c para o Cr e o Mn respectivamente. Os resultados mostram claramente que para a composição inicial do aço estudado o Cr é o elemento preferencial a ser removido seguido pelo C, Si e Mn nesta ordem. O Ni não pode ser removido.

A Figura 4 mostra os mesmos cálculos, porém, agora utilizando referencial 1% em peso. O primeiro aspecto que pode ser observado quando se muda o referencial é a inversão da curva do Mn com Cr. Novamente, as curvas com e sem os parâmetros de interação são muito semelhantes e as diferenças mais significativas aparecem principalmente para o Si e para o C conforme verificado também na Figura 2. Portanto, o Cr continua sendo o elemento preferencial de ser



eliminado. Comparando na Figura 4b as curvas para o Si, C e Cr, os resultados sugerem que dependendo da composição da liga esta preferência pode mudar. Vieira *et al.*<sup>(9)</sup> em um trabalho recente verificaram que na prática o Si tem preferência de ser eliminado, seguido pelo Mn e depois o Cr. No experimento conduzido por 1 h eliminou-se 14% do Cr, 76% do Mn e 83% do Si. No caso do C embora se tenha um potencial termodinâmico muito favorável para ser eliminado isto não ocorre na prática. A explicação, talvez seja devido a necessidade de nucleação de uma nova fase gasosa conforme já demonstrados por outros trabalhos,<sup>(10,11)</sup> o que faz com que a cinética da reação seja mais lenta que as outras.



**Figura 4.** Potencial de remoção de remoção de alguns elementos dissolvidos em um aço inoxidável austenítico – referência 1% em peso (a) sem parâmetros de interação (b) com parâmetros de interação.

Ainda não foi abordada a questão da exata atividade dos compostos presentes na escória. E os resultados aqui apresentados são aproximações, contudo podem ajudar no desenvolvimento de metodologias para controle de processo. Em estudos futuros serão levados em consideração também estes parâmetros, além disso, serão adicionados os coeficientes de interação de segunda ordem. Os cálculos objetivam ao final determinar com exatidão qual elemento tem preferência de ser removido e a partir disso propor técnicas que objetivem controlar a composição da liga, mantendo os elementos de interesse e removendo os prejudiciais. Cálculos semelhantes futuros, permitirão o desenvolvimento de escórias sintéticas. Os resultados são promissores e será feito um refinamento desta avaliação objetivando a torná-la mais precisa. Experimentos práticos futuros permitirão consolidar a teoria através do confronto dos resultados. O passo seguinte será a montagem de um modelo cinético.

#### 4 CONCLUSÃO

O presente trabalho mostra que o FeO pode eliminar vários elementos de aços inoxidáveis austeníticos. Para o referencial 1% em peso, os cálculos de  $\Delta G$  indicam que a ordem de preferência de remoção inicial é a seguinte: Cr, Si, C e Mn. Para o referencial Raoultiano os resultados são bastante similares e podemos



observar a inversão entre o C e o Si. Está confirmado que o Níquel não pode ser removido.

O refinamento dos cálculos usando parâmetros de interação de primeira ordem conduziu a um resultado mais coerente com a prática.

Ficou estabelecido, que do ponto de vista termodinâmico é possível eliminar o Si destes aços usando o FeO. Contudo, o controle da concentração dos demais elementos no banho deverá ser feito mudando-se as atividades dos óxidos na escória.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a Metalúrgica Ataíde, Serra-ES e a Companhia Siderúrgica Belgo Mineira, Cariacica-ES pelo apoio.

## REFERÊNCIAS

- 1 LUPIS, C. H. P.: **Chemical thermodynamics of materials**, Elsevier Science Ltd, (1983), 603p.
- 2 LÚCIO, A.; CAVALLANTE, F. L.: **Físico – química metalúrgica**, ABM, (1980), 228p.
- 3 TAKANO, C.; DEODORO, J. T. C.; NASCIMENTO, R. C.; MOURÃO, M. B.; LENZ, G.; MARTINS, D. S.: **A reciclagem de resíduos siderúrgicos sólidos**. In: seminário nacional sobre reuso/reciclagem de resíduos sólidos industriais, São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, (2000).
- 4 SIGWORTH, G. K.; ELLIOTT, J. F.: **The thermodynamics of liquid dilute iron alloys**, Metal Science, 8, 298-310.
- 5 TURKDOGAN, E.T.: **Physical chemistry of high temperature technology**, New York: Academic Press, 1980.
- 6 TURKDOGAN, E.T.: **Fundamentals of steelmaking**, New York: Ashgate, 1996.
- 7 DE CARVALHO, J. L. R.; ASSIS, P. S.; CAMILO, R. D.; FIGUEIRA, R. M.; CAMPOS, V. F.: **Dados termodinâmicos para metalurgistas**. UFMG, Belo Horizonte, (2008).
- 8 ELLIOT, J. F.; GLEISER, M.; RAMAKRISHNA, V.: **Thermochemistry for steelmaking**, v.2, AISI Addison-Wesley, (1963).
- 9 DE CARVALHO, J. D. ; DE JESUS BIANCHI, E. J. ; OLIVEIRA, J. R. ; DO NASCIMENTO JUNIOR, R.C. ; VIEIRA, E. A.: **Uso de carepa de lingotamento contínuo para reduzir Si em aços austeníticos cromo-níquel**. In: 40º Seminário de Aciaria Internacional, ABM, São Paulo, (2009).
- 10 SUN, H.; GAO, K. SAHAJWALLA, V. ; MORI, K.; PEHLKE, R. D.: Kinetics of gas oxidation of liquid Fe-C-S alloy and carbon boil phenomenon. **ISIJ International**, v. 39, n. 11, (2006), 1125-1133.
- 11 SUN, H.: Reaction rates and swelling phenomenon of Fe-C droplets in FeO bearing slag. **ISIJ International**, v. 46, n. 11, (2006), 1560-1569.