

AMOLECIMENTO E FUSÃO DE CARGAS FERROSAS: AVALIAÇÃO DE UM MODELO TERMODINÂMICO*

Ismael Vemdrame Flores¹
Aline Lima da Silva²
Nestor Cezar Heck³
Maurício Covcevich Bagatini⁴

Resumo

O amolecimento e fusão das cargas ferrosas, crítico para a formação da zona coesiva e operação dos altos-fornos, foram termodinamicamente investigadas. Uma estratégia de cálculo iterativa em FactSage (macro processing) foi utilizada para simular a redução gás/sólido para uma pelota ácida e um sinter. Os cálculos de equilíbrio foram obtidos no intervalo de 800 a 1550°C através do princípio de minimização de energia de Gibbs. O grau de redução das amostras foi calculado e ajustado aos seus valores experimentais através de um fator de restrição gasoso. De modo geral, os graus de redução simulados foram similares aos dados experimentais das amostras. A composição de fases, relação líquido/sólido e composição da escória foram obtidas em função da temperatura e discutidas quanto ao processo de amolecimento e fusão. Os perfis líquido/sólido e de perda de pressão das amostras apresentaram as mesmas tendências, mostrando a dependência existente entre esses dois parâmetros. Os resultados obtidos indicam que a abordagem termodinâmica utilizada pode ser interessante para aprimorar o conhecimento existente sobre o amolecimento e fusão de cargas ferrosas para altos-fornos.

Palavras-chave: amolecimento e fusão, zona coesiva, termodinâmica.

SOFTENING AND MELTING OF IRON-BEARING MATERIALS: EVALUATION OF A THERMODYNAMIC MODEL

Abstract

The softening and melting of iron-bearing materials, critical for cohesive zone formation and blast furnace operation, were thermodynamically investigated. An iterative calculation strategy in FactSage (macro processing) was used to simulate gas/solid reduction for an acid pellet and a sinter. The equilibrium calculations were obtained from 800 up to 1550 ° C by the principle of Gibbs energy minimization. The degree of reduction of the samples was calculated and adjusted to their experimental values using a gaseous restriction factor. In general, the simulated reduction degrees were similar to samples experimental data. The phase composition, liquid/solid ratio, and slag composition were obtained as a function of temperature and discussed regarding the softening and melting process. The profiles of liquid/solid ratio and pressure loss presented the similar trends, showing the dependence between these two parameters. The results indicate that the thermodynamic approach used may be interesting to improve the existing knowledge about the softening and melting of ferrous loads for blast furnaces.

Keywords: softening and melting, cohesive zone, thermodynamics.

¹ *Doutorando do Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas (PPGEM) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.*

² *Dr. Professor na Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.*

- ³ *Dr. Professor, Núcleo Termodinâmico Computacional (NTCm), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.*
- ⁴ *Dr. Professor, coordenador do Laboratório de Processos Metalúrgicos (LAPROMET), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Apesar das numerosas alternativas, o alto-forno prevalece como o processo dominante para produção de ferro primário. A operação desses reatores sempre foi crítica e complexa, até que o conhecimento sobre os fenômenos envolvidos foi aprofundado a partir dos estudos de dissecação conduzidos nas décadas de 60 e 70. Uma das principais descobertas desses trabalhos foi a existência de uma região de transição da carga ferrosa desólida para líquida, chamada zona coesiva, cujas características (geometria, espessura e posição) influenciam profundamente a produtividade e o consumo de combustível dos altos-fornos [1]. Uma zona coesiva estreita maximiza a sua permeabilidade e conseqüentemente a produtividade do reator, enquanto que o posicionamento da zona em regiões mais inferiores do alto-forno minimiza o consumo de energia, diminuindo os custos de produção e possibilitando estabelecer a composição do ferro gusa com o tempo [2]. Dentre os fatores que regem as características da zona coesiva, as propriedades à alta temperatura das matérias-primas ferrosas afetam significativamente a espessura e posição da zona [3].

A complexa natureza do fenômeno de amolecimento e fusão das matérias-primas ferrosas é usualmente avaliada por experimentos em laboratório, os quais em parte simulam as condições observadas na zona coesiva durante operação. Nesses experimentos, um leito de partículas é submetido a um aquecimento lento em condições de carga mecânica e atmosfera redutora até temperaturas em torno de 1600°C. Ao longo do teste a temperatura, altura do leito e a diferença de pressão entre os pontos de entrada e saída dos gases (medida de permeabilidade) são continuamente monitorados para obter dados referentes ao fenômeno de amolecimento e fusão e a performance do material à alta temperatura. Ademais, testes interrompidos em temperaturas ou níveis de contração específicos são uma alternativa para aprofundar o conhecimento dos fenômenos envolvidos. Entretanto, abordagens usuais não são capazes de fornecer detalhes sobre as constantes mudanças de composição química e de fases ao longo de todo o fenômeno. Em especial, as temperaturas de formação do primeiro líquido, sua quantidade, composição e fração de massa cumprem um papel fundamental no desenvolvimento do processo de amolecimento e fusão. Nesse sentido, a literatura disponível carece de abordagens alternativas que possam aprofundar o conhecimento existente. Avaliações e modelos termodinâmicos e cinéticos tem potencial de explorar a formação de escória e as suas propriedades de forma mais detalhada que os resultados obtidos experimentalmente, contribuindo para aumentar o conhecimento. Em relação aos fenômenos de amolecimento e fusão, três estágios principais podem ser observados, são eles: amolecimento, exsudação e gotejamento [4]. O início do estágio de amolecimento é caracterizado pela gradual diminuição da altura do leito sem um aumento significativo de perda de pressão. De acordo com Bakker *et al.* [4], o amolecimento é desencadeado pela formação de fase líquida na microestrutura do núcleo das partículas, formado devido a redução dos óxidos de ferro segundo o modelo topoquímico. Assim, a resistência à deformação do material é determinada somente pela espessura e estrutura da casca metálica. A partir desse ponto o aumento da temperatura acarreta na formação de um maior volume de escória, levando a uma mudança abrupta do estágio de amolecimento para o de exsudação. Nesse instante, os vazios do leito são preenchidos pela escória anteriormente contida no núcleo das partículas, restringindo o fluxo gasoso. De acordo com Kaushik *et al.* [5], a viscosidade e a energia de superfície da escória podem ser

importantes para a sua saída do núcleo. Por fim, o estágio de gotejamento ocorre quando material líquido consegue percolar o leito como um todo.

No contexto apresentado, esse trabalho visa descrever uma abordagem termodinâmica, utilizando os bancos de dados e processamento macro do software FactSage, para simular a redução de cargas ferrosas em condições dinâmicas de aquecimento. Os resultados obtidos são as composições química e de fases em função da temperatura para as fases sólidas e líquidas, calculando-se ainda a viscosidade das escórias formadas e sua relação mássica com as fases sólidas. Os resultados obtidos das simulações foram comparados com dados oriundos de testes de amolecimento e fusão tradicionais e a validade e potencial da metodologia desenvolvida foram discutidos.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia para Simulações Termodinâmicas

De modo a avaliar uma abordagem termodinâmica computacional voltada para acompanhar o desenvolvimento das propriedades de amolecimento e fusão de cargas ferrosas, cálculos de equilíbrio foram realizados numa tentativa de simular um processo dinâmico aquecimento e redução. As simulações foram efetuadas para uma pelota ácida e um sinter metalúrgico, duas cargas ferrosas muito utilizadas em altos-fornos. As massas e a composição química necessárias para os cálculos termodinâmicos foram obtidas a partir do trabalho de Nishimura *et al.* [6] e podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química das matérias-primas ferrosas. [NISHIMURA].

	Massa (g)	Composição (% em massa)						Porosidade (%)	CaO/ SiO ₂
		Fe _t	FeO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO		
Pelota Ácida	880	67,29	-	0,71	2	0,3	0,39	26,3	0,36
Sinter	673	57,81	7,02	10,12	4,89	1,89	0,64	35,8	2,07

Devido à complexidade envolvida nos cálculos para simular as condições de descida, aquecimento e redução da carga em um alto-forno optou-se por, neste primeiro trabalho, por utilizar os parâmetros (temperatura, taxa de aquecimento e atmosfera) normalmente empregados em experimentos de amolecimento e fusão. Assim, com base nas condições experimentais usadas por Nishimura *et al.* [6], cada carga ferrosa foi simulado para o intervalo de temperatura de 800 a 1550°C. Para varrer esse intervalo, assumiu-se um passo incremental de 1 minuto entre cada simulação, levando-se em consideração a taxa de aquecimento de 10°C/min para o intervalo de 800 a 1000°C e a taxa de 5°C/min entre 1000 e 1550°C. A quantidade máxima de gás disponível em cada temperatura foi de 22,8 L/min de N₂, 10 L/min de CO e 1,2 L/min de H₂.

Os cálculos termodinâmicos foram executados pelo método de minimização de energia de Gibbs através do software FactSage (versão 7.1, CRCT-ThermFact, Montreal, Canada e GTT-Technology, Aachen, Alemanha). O fluxograma apresentado na Figura 1 mostra o conjunto de operações realizadas para executar as simulações. Por se tratar de um processo iterativo, as etapas de cálculo foram controladas empregando-se um arquivo macro, o qual possibilita a comunicação entre os softwares FactSage e o Microsoft Excel, permitindo a entrada de dados para cálculo através de planilhas em Excel, salvar resultados como correntes,

exportar resultados e gerar gráficos. Os bancos de dados FToxid, FactPS e SGTE do FactSage foram utilizados.

Para as simulações, primeiramente a composição mássica da carga ferrosa e dos gases foram inseridos no módulo Equilib do FactSage pelo arquivo macro através de uma planilha Excel. A primeira iteração determina o equilíbrio entre a carga ferrosa e a fase gasosa na temperatura de 800°C, enquanto que os resultados obtidos são salvos como correntes e inseridos como dados de entrada para a próxima temperatura de equilíbrio. Para controlar o aumento da temperatura com o andamento das iterações, um operador (Itcount) foi introduzido (Figura 1).

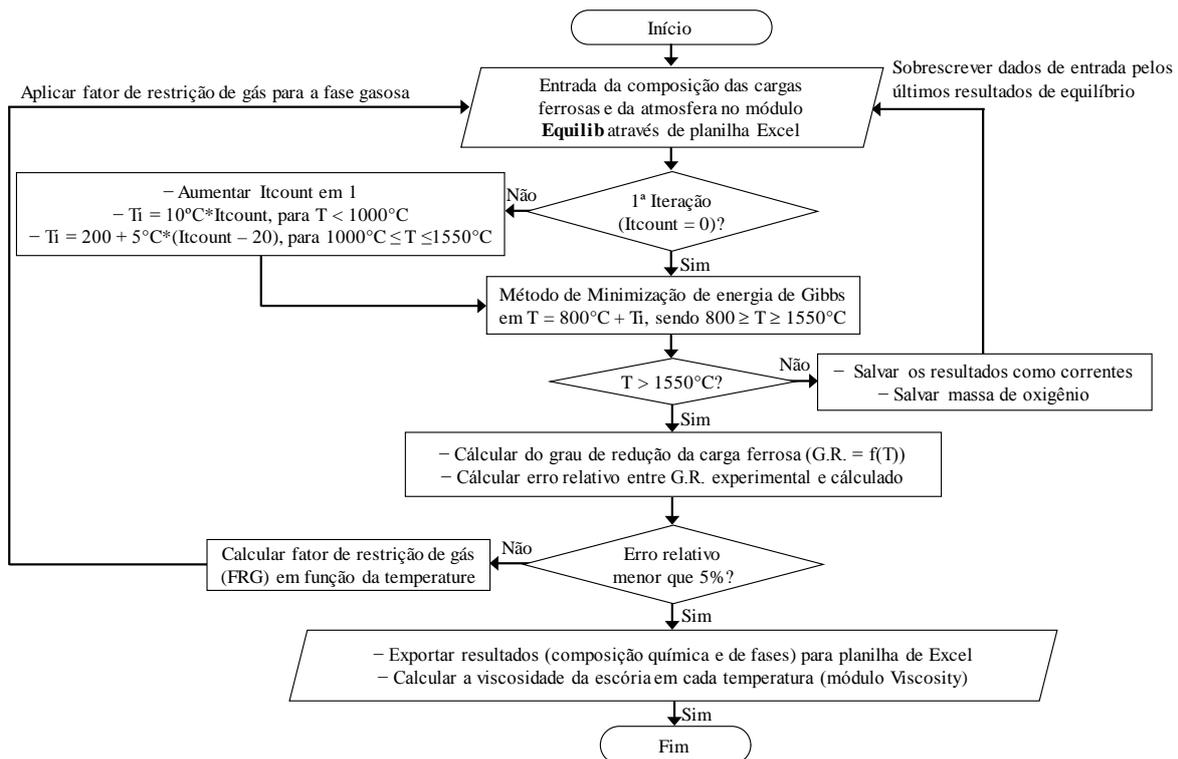


Figura 1. Fluxograma de operações utilizadas para as simulações termodinâmicas.

Concluído o processo iterativo referente aos cálculos de equilíbrio, o grau de redução da carga simulada foi calculado em função da temperatura vide Equação 1, onde O_r^T e O_{total} representam, respectivamente, o oxigênio removido da carga ferrosa na temperatura T e o oxigênio total inicialmente contido nos óxidos de ferro. A curva obtida pela simulação foi comparada com a redutibilidade medida por Nishimura et al. [6] nos testes de amolecimento e fusão e o erro relativo em cada temperatura foi calculado segundo a Equação 2. Os termos GR_{exp}^T e GR_{sim}^T se referem respectivamente aos graus de redução experimental e simulado em uma dada temperatura. Caso algum dos erros relativos esteja acima de 5%, um fator de restrição para a quantidade de fase gasosa (FRG) disponível para reação com a carga ferrosa é calculado segundo a Equação 3. Esse fator varia entre 0 e 1, controlando a quantidade de gás para atingir cada equilíbrio, sendo 1 o total de gás disponível e vice versa. Para ajustar os dados simulados à curva experimental, uma função de FRG com a temperatura é aplicada sobre os dados de entrada da fase gasosa, zerando-se o operador Itcount e reiniciando-se o processo iterativo de cálculo de equilíbrio. Esse procedimento é repetido o número de vezes necessárias até que a função FRG obtenha resultados de equilíbrio com erros relativos abaixo de 5% ou até que esses não apresentem mais mudanças significativas. Quando essa

condição for cumprida os resultados de equilíbrio são exportados para uma planilha de Excel e a viscosidade das escórias são avaliadas no seu intervalo de temperatura de existência usando-se o módulo Viscosity do FactSage.

$$\text{Grau de Redução (GR}_{\text{sim}} - \%) = \frac{O_r^T}{O_{\text{total}}} * 100 \quad (1)$$

$$\text{Erro Relativo (\%)} = \frac{(GR_{\text{exp}}^T - GR_{\text{sim}}^T)}{GR_{\text{exp}}^T} * 100 \quad (2)$$

$$\text{Fator de Restrição de Gás (FRG)} = \prod_{T=800^\circ\text{C}}^{1550^\circ\text{C}} \frac{GR_{\text{exp}}^T}{GR_{\text{sim}}^T} \quad (3)$$

2.2. Resultados e Discussão

2.2.1 Avaliação do Modelo Termodinâmico

A Figura 2 (A) e (B) apresenta, respectivamente, as curvas de grau de redução experimentais obtidas por Nishimura *et al.* [6] em função da temperatura esua comparação com os graus de redução simulados. Os resultados obtidos (Figura 2 – B) mostraram boa correlação com seus respectivos valores experimentais na maior parte do intervalo de temperaturas, onde as linhas tracejadas representam os erros relativos máximos assumidos ($\pm 5\%$). O sínter metalúrgico mostrou os menores erros e, portanto, os melhores resultados. As temperaturas assinaladas nas Figuras 1 (A) e (B) indicam o momento onde as taxas de redução, medidas durante os ensaios de amolecimento e fusão, aumentam abruptamente, especialmente para a pelota ácida. Segundo os autores [6], isso ocorre devido a presença de coque metalúrgico nos ensaios, que a partir dessa temperatura participa na redução direta do FeO presente na escória. Nota-se na Figura 1 (B) que próximo aos pontos onde a mudança de inclinação (taxa de redução) ocorre, os erros relativos de ambas as amostras, principalmente para a pelota ácida, aumentam significativamente. Isso indica que o coque deve ser considerado nos cálculos de equilíbrio para aprimorar o modelo termodinâmico proposto e abordar satisfatoriamente cargas ferrosas com características variadas. Além disso, a inclusão de carbono nos cálculos pode permitir avaliar a sua participação e consumo no processo de amolecimento e fusão.

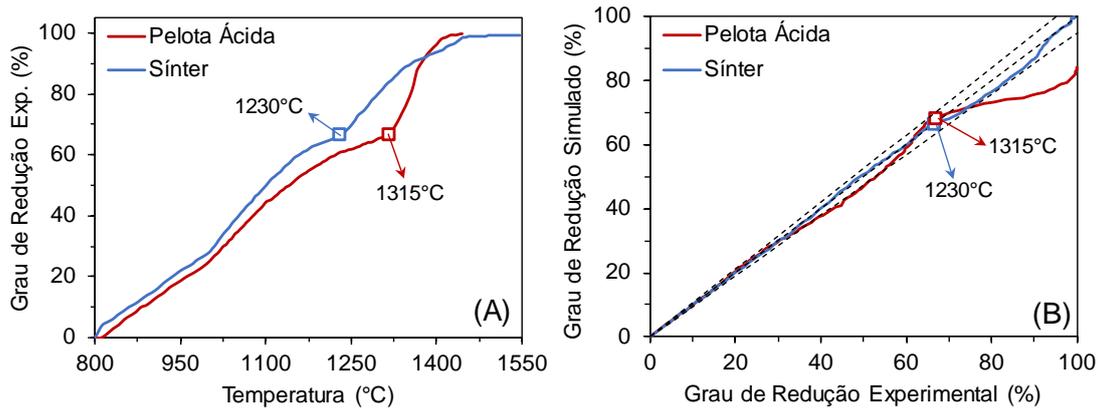


Figura 2. (A) Graus de redução experimentais obtidos por Nishimura *et al.* [8] e **(B)** sua comparação com os resultados obtidos das simulações termodinâmicas.

2.2.2. Avaliação dos Resultados Termodinâmicos

A Figura 3 mostra a evolução das fases majoritárias nas amostras de (A) pelota ácida e (B) sínter em função das temperaturas de equilíbrio. Na figura, os sólidos englobam todos os compostos não metálicos presentes, seja na forma pura (Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , FeO , Al_2O_3 , SiO_2 , CaO , MgO , entre outros) ou como misturas (Olivina, Wollastonita, Melilita, Coríndon, diversos tipos de cálcio ferritas). Ademais, o ferro metálico formado pela redução (Fe_0), o ferro metálico em estado líquido (Fe(l)), a escória e a relação líquidos/sólidos também são representados.

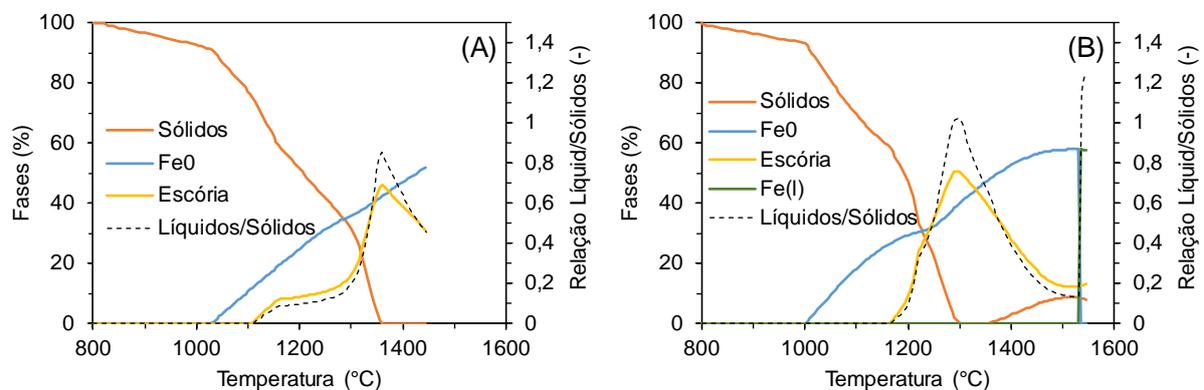


Figura 3. Evolução das fases majoritárias e relação de líquidos e sólidos na **(A)** pelota ácida e **(B)** sínter em função da temperatura de equilíbrio.

Como esperado, com o aumento da temperatura a partir de 800°C, a participação de sólidos diminui em ambas as cargas ferrosas devido à redução, tendo-se a formação de ferro metálico (Fe_0) em 1030 e 1005°C para a pelota ácida e o sínter, respectivamente. O perfil das fases sólidas segue de acordo com as taxas de redução das amostras experimentais, tendo três regiões de inclinações distintas (Figura 2). A formação do primeiro líquido (escória) foi observada nas temperaturas de 1110°C para a pelota ácida e 1165°C para o sínter metalúrgico. O desenvolvimento da escória e da relação líquido/sólido prossegue com um perfil muito semelhante, aumentando gradativamente até um ponto máximo (1360 e 1290°C para a pelota e o sínter) que posteriormente decresce até o término das simulações. Ademais, ferro em estado líquido só foi observado para o sínter, uma vez que carbono não foi considerado nos cálculos de equilíbrio, não havendo

carburação. Pelas temperaturas do teste de amolecimento e fusão, somente o sínter atingiu as temperaturas necessárias para a fusão do ferro.

De forma complementar aos resultados exibidos na Figura 3, a Figura 4 (A) e (B) detalha o perfil das fases sólidas obtidas pelas simulações para a pelota ácida e o sínter. Nesse trabalho as fases denotadas por cálcio-ferritas e $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ representam grupos de compostos com estrutura similar. As fases α e β dos silicatos de cálcio foram agrupadas como $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, as quais ainda podem conter quantidades menores de Mg_2SiO_4 , Fe_2SiO_4 dissolvidas. O grupo das cálcio-ferritas consiste de compostos como CAF3, CAF1 e C2AF, onde C, A e F representam CaO , Al_2O_3 e FeO_x , respectivamente. Compostos apresentando fórmula geral AB_2O_4 foram classificados como “Espinélios”, onde $\text{A} = \text{Fe}^{2+}$, Mg^{2+} e $\text{B} = \text{Al}^{3+}$, Fe^{3+} . A fase Coríndon corresponde majoritariamente a Fe_2O_3 em solução sólida com Al_2O_3 . Por fim, a Olivina e a Melilita são os compostos de fórmula química $(\text{Ca}, \text{Fe}, \text{Mg})_2\text{SiO}_4$ e $\text{Ca}_2(\text{Fe}, \text{Al}, \text{Si}, \text{Mg})_3\text{O}_7$, enquanto que o monóxido (MeO) representa uma solução sólida contendo principalmente FeO com Fe_2O_3 , CaO , MgO e Al_2O_3 dissolvidos em menor proporção.

Acrescendo à discussão realizada para a Figura 3, o perfil das fases na Figura 4 mostra o coríndon (solução rica em Fe_2O_3) como a fase em equilíbrio em temperaturas mais baixas, até 900°C para a pelota ácida e até 830°C para o sínter. Nesse último, contabiliza-se também as cálcio-ferritas, a Melilita e a Olivina até 850°C . Com o aumento da temperatura, o equilíbrio favorece o decréscimo das fases mencionadas para a formação de um espinélio (Fe_3O_4 com Al e Mg dissolvidos). Observa-se que a redução da hematita (Coríndon) em ambas as amostras, junto as cálcio-ferritas e a Melilita para o sínter, ocorre de forma ininterrupta até sua total transformação para o estado menos oxidado. O mesmo pode ser verificado para a redução da magnetita (Espinélio) para wüstita (Monóxido – MeO). Esses resultados estão de acordo com a usual consideração de que os óxidos de ferro são totalmente reduzidos à um estado de menor oxidação, para que então a nova fase formada possa ser reduzida. Para a pelota ácida, a Olivina é uma fase importante, aparecendo em equilíbrio com o espinélio e a solução sólida de óxidos (MeO) até a formação da escória em 1110°C . Nesse caso, a Olivina trata-se majoritariamente de Fayalita (Fe_2SiO_4) que junto ao FeO forma uma escória de menor ponto de fusão que o sínter. Em contraste, para o sínter, a Olivina aparece somente até a temperatura de 900°C , onde transforma-se em $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$. A Melilita no sínter tem papel semelhante a Olivina para a pelota, aparecendo em equilíbrio com os óxidos de ferro e $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ até a temperatura de aproximadamente 1200°C , onde participa da formação da escória. Na temperatura de 1165°C a Melilita e o $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ reduzem em quantidade para a formação da escória. No entanto, a fase $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ reaparece em torno de 1350°C .

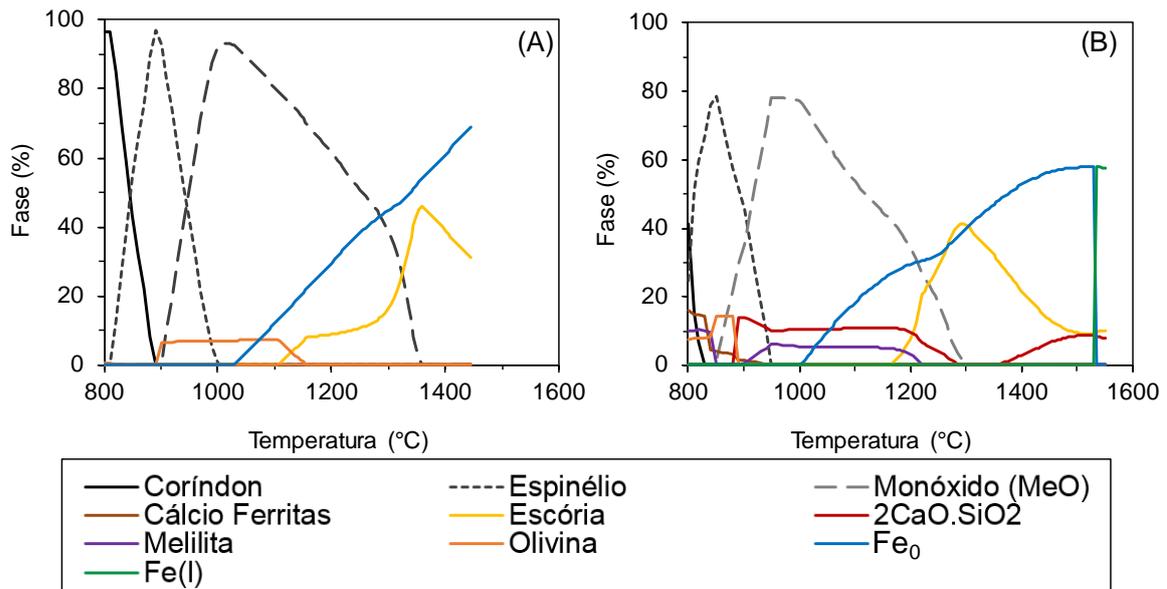


Figura 4. Perfil de evolução de fases para (A) pelota ácida e (B) sínter em função das temperaturas de equilíbrio.

A Figura 5 (A) e (B) mostra a composição das escórias formadas respectivamente para a pelota ácida e sínter em função da temperatura de equilíbrio. Como usualmente observado no processo de amolecimento e fusão, a composição da primeira escória formada é rica em FeO [2,3 e 7], nesse caso entre 40 e 50%. Além disso, SiO₂ e CaO são os compostos majoritários em ambas as amostras, tendo-se Fe₂O₃ e Al₂O₃ em menor proporção. Para o sínter, o MgO só aparece na escória à temperaturas acima de 1250°C, oriundo das fases Melilita, 2CaO.SiO₂ e principalmente da solução sólida de monóxido (MeO). A escória da pelota ácida formou-se primeiro (1110°C) em comparação com o sínter (1165°C), principalmente devido ao seu menor grau de redução (Figura 2 – A) e conseqüentemente maior quantidade de FeO (Figura 4) para formar uma Fayalita de baixo ponto de fusão.

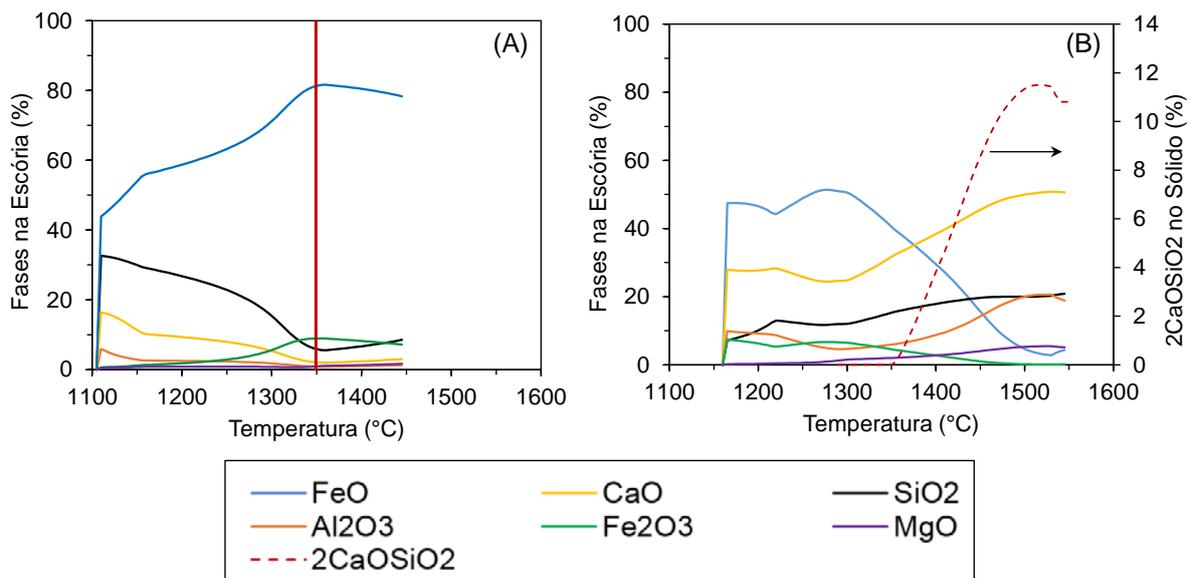


Figura 5. Composição das escórias da (A) pelota ácida e do (B) sínter em função da temperatura de equilíbrio.

Com o andamento da redução e aumento de temperatura, os perfis de FeO na escória das cargas ferrosas são nitidamente diferentes. O FeO da escória formada pela pelota aumenta gradativamente até atingir um ponto máximo em 1350°C, mesma temperatura onde a maior proporção de líquido é observada (Figura 4). Já para o sinter, o FeO se manteve relativamente estável em aproximadamente 50% até 1300°C, onde sua redução teve início. Conseqüentemente, a diminuição dos teores de FeO na escória do sinter aumentou a proporção das demais fases. Além disso, em 1350°C houve novamente a formação de $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (linha tracejada na Figura 5 – B), possivelmente devido a menor solubilidade do CaO e da SiO_2 na escória mais pobre em FeO. De acordo com Nishimura *et al.* [6], a formação de $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ pode impedir o contato entre o ferro metálico e o coque metalúrgico, suprimindo as reações de carburação e a coesão do ferro. Além disso, nos experimentos de amolecimento e fusão, os $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ podem ser observados como resíduo sólido não gotejado, podendo ser associados a cargas ferrosas de menor permeabilidade. Os resultados da pelota para temperaturas acima de 1350°C não são de confiança, indicado pela linha vermelha na Figura 5 – (A), uma vez que os erros relativos obtidos acima dessa temperatura foram muito superiores ao limite estipulado de 5% (Figura 1). Novas simulações com a inclusão de carbono deverão ser realizadas para adequar os resultados obtidos nessa faixa de temperatura.

Entender o comportamento de formação das escórias e suas composições durante o processo de amolecimento e fusão à altas temperaturas pode ajudar a aprimorar a composição das cargas ferrosas visando a obtenção de melhores propriedades. Para tanto, apesar dos resultados adquiridos, uma análise mais detalhada das escórias com o auxílio de diagramas de fase deve ser realizada, investigando também a influência de compostos específicos nas temperaturas *solidus* e *liquidus*. Ademais, ensaios interrompidos seguidos da caracterização dos produtos obtidos estão sendo planejados para, junto as simulações termodinâmicas, ajustar e validar os resultados obtidos.

2.2.3. Comparação dos Resultados Termodinâmicos com Dados Experimentais

Na realização de experimentos de amolecimento e fusão um dos principais parâmetros utilizados para avaliar as propriedades à alta temperatura das cargas ferrosas é a perda de pressão através do leito de amostras. Esse índice mede a permeabilidade do material durante o teste, sendo usado para determinar quem formaria a zona coesiva mais adequada. Uma vez que a formação de líquido é fundamental para a perda de pressão, a Figura 6 (A) e (B) mostra, respectivamente para a pelota ácida e o sinter, as curvas de perda de pressão experimentais obtidas por Nishimura *et al.* [6] em comparação com a relação líquido/sólido (L/S) e a viscosidade calculada para as escórias através do modelo termodinâmico.

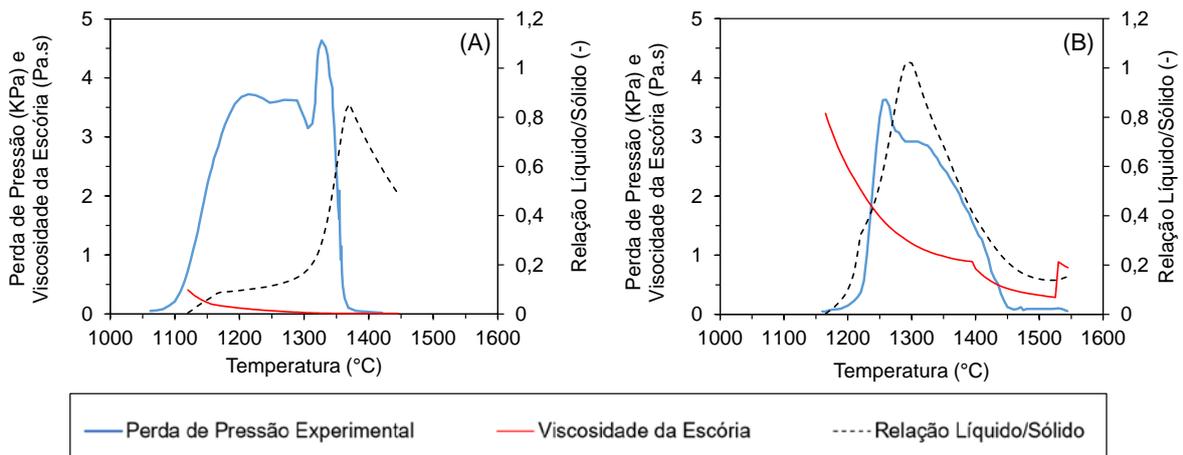


Figura 6. Comparação entre a perda de pressão experimental para a pelota ácida (A) e sínter (B) com suas respectivas frações de líquido/sólido e a viscosidade da escória calculada.

Como pode ser visto, a perda de pressão e a relação L/S apresentaram perfis bastante similares. A temperatura onde a perda de pressão aumenta abruptamente para valores acima de 200 Pa é usualmente relacionada com a parte superior da zona coesiva. Esse ponto foi observado para a pelota e o sínter nas temperaturas de 1092 e 1207°C, respectivamente, indicando que a zona coesiva formada pela pelota ácida estaria em posições mais elevadas no alto-forno. Em comparação, essa mesma tendência foi observada para as temperaturas de formação de escória obtidas pelo modelo termodinâmico, especificamente em 1110 e 1165°C para a pelota e o sínter. De forma similar, as temperaturas de máxima perda de pressão para a pelota e o sínter foram 1326 e 1260°C, próximo às temperaturas onde a relação L/S foi máxima, 1360 e 1290°C, respectivamente. Salienta-se que a temperatura para a máxima relação L/S da pelota está acima de 1350°C, temperatura limite acima da qual os resultados obtidos não são confiáveis. Pela análise da Figura 1 (A) e Figura 5 (A), é possível dizer que se o carbono fosse considerado nas simulações da pelota, o mesmo auxiliaria na redução do FeO da escória a partir de 1315°C, ponto onde a taxa de redução aumenta significativamente. Dessa forma, os resultados atuais da relação L/S da pelota a partir de 1315°C superestimam em valor e temperatura os resultados que seriam encontrados ajustando-se o modelo. Com isso, a concordância entre as temperaturas de máxima relação L/S e a máxima perda de pressão deve ser melhorada. Quanto ao gotejamento, apenas o sínter pode ser analisado. A temperatura de gotejamento do sínter foi de 1448°C e pode ser comparada com a temperatura de 1480°C, onde a relação L/S fica relativamente constante (11%).

No que diz respeito às viscosidades das cargas ferrosas, a escória do sínter teve viscosidade inicial (3,4 Pa.s), uma ordem de grandeza maior que a pelota ácida (0,41 Pa.s). Ambas as escórias foram mais viscosas quando formadas e à medida que a temperatura de equilíbrio aumentou, a viscosidade diminuiu. Esse efeito foi muito mais pronunciado para o sínter, que à temperaturas elevadas atinge viscosidades na mesma ordem que a pelota. No entanto, as viscosidades foram calculadas apenas para a fase líquida, não sendo considerada a presença de sólidos. Isso pode ser importante principalmente para o sínter, uma vez que o mesmo mostrou a formação de $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ a partir de 1350°C. Apesar da grande diferença entre as viscosidades da pelota e do sínter, os perfis de perda de pressão apresentaram magnitudes similares. De acordo com Kaushik *et al.* [5], a viscosidade e a energia de superfície da escória podem ser importantes para a sua saída do

núcleo durante o processo de exsudação. No entanto, uma relação entre o perfil de perda de pressão e a viscosidade da escórias, não foi observada para as amostras estudadas.

Esses resultados confirmam a dependência entre a relação L/S com a perda de pressão das amostras. Esses dados podem contribuir para estimar as temperaturas da zona coesiva, relacionada a posição e espessura, auxiliando também em modelos para estimar a perda de pressão em leitos de partículas na presença de líquido [7,8].

3 CONCLUSÃO

O modelo termodinâmico proposto, utilizando processamento macro em FactSage, obteve graus de redução de acordo com os resultados experimentais para uma amostra de sinter e pelota ácida, com erro relativo abaixo de 5% na maior parte do intervalo estudado. A partir disso, as fases sólidas e a escória dessas cargas ferrosas foram avaliadas em função da temperatura, apresentando resultados coerentes com a literatura existente sobre amolecimento e fusão. Os perfis de fases obtidos se mostraram bastante detalhados e podem contribuir para aumentar a compreensão dos fenômenos envolvidos. No entanto, mais estudos são necessários para validar esse tipo de resultado.

Além disso, os perfis de perda de pressão e da relação líquido/sólido se mostraram muito similares. Os parâmetros de temperatura da zona coesiva foram relativamente próximos aos observados para a formação de escória e máxima relação líquido/sólido. Esse tipo de resultado torna possível o estudo de diferentes cargas ferrosas por uma abordagem termodinâmica, podendo potencialmente auxiliar no desenvolvimento de cargas ferrosas mais adequadas e até mesmo na resolução de problemas do tipo.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro pela Coordenação de Desenvolvimento Pessoal de Nível Superior (CAPES), PROEX-0487, 2016, processo 1584853.

REFERÊNCIAS

- 1 Busby NJ, Fray TAT e Goldring DC. Nature of Cohesive Zone in Blast Furnace. *Ironmaking &Steelmaking* (1994), p. 229.
- 2 Sternal J eLahiri AK, Contraction and meltdown behavior of olivine iron ore pellets under simulated blast furnace conditions, *Ironmaking and Steelmaking* (1999), v. 26, n. 5, p. 339.
- 3 Nandy B, Chandra S, Bhattacharjee D e Ghosh D, Assessment of blast furnace behaviour through softening-melting test, *Ironmaking and Steelmaking* (2006), v. 33, n. 2, p. 111
- 4 Bakker T e Heerema RH, Determination of the fundamental softening and melting characteristics of blast furnace burden materials, *Ironmaking conference proceedings* (1997), 365.
- 5 Kaushik P e Fruehan RJ, Mixed burden softening and melting phenomena in blast furnace operation Part 1 – X-ray observation of ferrous burden, *Ironmaking and Steelmaking* (2006), v. 33, n. 6, p. 507.

- 6 Nishimura T, Higuchi K, Naito M e Kunitomo K, Evaluation of softening, shrinking and melting reduction behavior of raw materials for blast furnace, ISIJ International (2011), v. 51, n. 8, p. 1316.
- 7 Ichikawa K, Ishii J, Watakabe S e Sato M, Quantitative estimation of gas permeability of softening sinter layer with liquid phase, ISIJ International (2015), v. 55, n. 3, p. 544.
- 8 Ishii J, Murai R, Sumi I, Yongxiang Y e Boom R, Gas permeability in cohesive zone in the ironmaking blast furnace, ISIJ International (2017), v. 57, n. 9, p. 1531.