

ESTUDO TERMODINÂMICO DE ESCÓRIAS PRIMÁRIAS E FINAIS DE ALTO-FORNO UTILIZANDO THERMO-CALC^{®1}

Waleska Effgen de Oliveira²

Beatriz Fausta Gandra³

Luís Augusto Marconi Scudeller⁴

André Luiz Vasconcelos da Costa e Silva⁵

Resumo

A formação apropriada de escória é condição primordial para uma operação estável do alto-forno, sendo de fundamental importância o conhecimento das suas características, em função da carga metálica (minério, sinter e pelota) e do coque utilizado. Neste artigo são apresentados os resultados de um estudo termodinâmico das escórias primárias e finais utilizando o *software* de termodinâmica computacional, Thermo-Calc[®] for Windows versão 5. Para os cálculos foi utilizado o banco de dados Slag2 para o sistema composto por SiO₂ – CaO – Al₂O₃ – MgO – MnO – FeO. As cargas metálicas avaliadas foram compostas por um tipo de sinter e dois tipos de pelotas. Para uma avaliação comparativa foi analisada a carga, média de 2009, utilizada no Alto-Forno 3 de Ipatinga e no Alto-Forno 2 de Cubatão, da Usiminas. As escórias foram avaliadas quanto às suas temperaturas de início e final de fusão e as fases presentes. Todos os resultados apresentados neste estudo enfatizam a importância de uma carga metálica para o alto-forno estar bem preparada, especialmente para a zona coesiva.

Palavras-chave: Escória primária; Escória final; Alto-forno; Thermo-Calc[®].

THERMODYNAMIC STUDY OF PRIMARY AND FINAL BLAST FURNACE SLAGS USING THERMO-CALC[®]

Abstract

The appropriate slag formation is an essential condition for getting a smooth operation of blast furnace, being important the knowledge of their characteristics, depending on the metallic burden (lump, sinter and pellet) and coke used. In this paper are presented the results of a thermodynamic study of primary and final slag using the computational thermodynamics software, Thermo-Calc[®] for Windows version 5. For the calculations it was used the database Slag2 for the slag system composed of SiO₂ - CaO - Al₂O₃ - MgO - MnO - FeO. The metallic burden was evaluated by a type of sinter and two types of pellets. For a comparative evaluation was analyzed the burden, average of 2009, used in Usiminas's Blast Furnace 3 Ipatinga and Blast Furnace 2 Cubatão. Slags were evaluated for their initial and final temperatures of melting and the phases present. All the results presented in this study emphasize the importance of the well prepared metallic burden into the blast furnace, especially for the cohesive zone.

Key words: Primary slag; Final slag; Blast furnace and Thermo-Calc[®].

¹ Contribuição técnica ao 41º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 12º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 12 a 26 de setembro de 2011, Vila Velha, ES.

² Membro da ABM, Engenheira Química, M.Sc., Centro de Tecnologia da Usiminas; Ipatinga, MG. Brasil.

³ Membro da ABM, Engenheira Metalurgista, M.Sc. Centro de Tecnologia da Usiminas; Ipatinga, MG. Brasil.

⁴ Membro da ABM, Engenheiro de Materiais, Dr., Centro de Tecnologia da Usiminas; Ipatinga, MG. Brasil.

⁵ Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, PhD., Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, RJ. Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A formação apropriada de escória é condição primordial para uma operação estável do alto-forno, bem como para boa qualidade do gusa produzido. Este fenômeno inclui a dissolução da ganga do minério de ferro, das cinzas dos combustíveis e dos fluxantes. São desejáveis boas propriedades de amolecimento e fusão, de fluidez, de dessulfuração e máxima capacidade para retirada de álcalis do alto-forno.

Como já é de conhecimento, a zona coesiva é a região de maior resistência à passagem de gases no alto-forno, sua forma e espessura normalmente determinam a distribuição dos gases. A quantidade e a qualidade da escória formada na região da zona coesiva determinam a produtividade do alto-forno. A formação de escória nessa região é um processo extremamente complexo. É iniciado pelo amolecimento de parte da carga metálica, que é aumentado gradualmente até a sua fusão, acompanhada pela dissolução de diferentes materiais entre eles, fluxantes, ganga de minérios e cinza dos combustíveis consumidos na redução direta e carburização, até o gotejamento do material líquido em direção ao cadinho.

Segundo MA,⁽¹⁾ uma forma de se classificar a escória formada pode ser a seguinte:

- escória primária – formada pela ganga contida em cada carga metálica carregada;
- escória de rampa – escória primária após dissolução de todos os componentes fluxantes e aditivos carregados pelo topo, incluindo parte da cinza contida no coque consumido nas reações diretas e na carburização;
- escória de ventaneira – formada pela cinza contida nos combustíveis queimados em frente às ventaneiras. Toda injeção de finos deve ser contemplada nesta região; e
- escória final – mistura das escórias de rampa e ventaneiras, deduzindo a quantidade de SiO_2 que é reduzida a Si.

De acordo com esta definição, a composição química da escória primária, escória de ventaneira e final pode ser obtida por cálculos, e suas propriedades podem ser estimadas por informações de literatura ou medidas experimentais. Entretanto, a composição e as propriedades das escórias intermediárias formadas em diferentes posições da zona coesiva são difíceis de ser conhecidas, devido à segregação da distribuição de carga e à variação das condições no alto-forno. Esta segregação na formação de escória é agravada quando se tem carregamento de materiais fluxantes no topo do alto-forno.

Neste estudo, foram avaliadas as escórias primária e final de cargas metálicas compostas por um tipo de sinter e por dois tipos de pelotas, por meio do *software* de termodinâmica computacional, Thermo-Calc[®] versão 5 for Windows.

2 DESENVOLVIMENTO

As cargas metálicas analisadas neste estudo estão apresentadas na Tabela 1 assim como as respectivas abreviações utilizadas de forma a facilitar a leitura ao longo do texto. Para efeito de comparação, foram analisadas as cargas de um período de 2009 do Alto-Forno 3 da usina de Ipatinga e do Alto-Forno 2 da usina de Cubatão.

Tabela 1. Cargas metálicas avaliadas com as respectivas abreviações

Carga Metálica	Abreviação
100% sinter experimental	S
100% pelota A (B2=0,22)	PA
100% pelota B (B2=0,94)	PB
50% sinter experimental– 50% pelota A	S+PA
50% sinter experimental– 50% pelota B	S+PB
50% pelota A – 50% pelota B	PA+PB
50% sinter experimental– 25% pelota A – 25% pelota B	S+PA+PB
Alto-Forno 3 – Ipatinga	AF3
Alto-Forno 2 – Cubatão	AF2

Para o cálculo das escórias utilizando como carga metálica o sinter experimental, as pelotas e a mistura destes, não foi considerada a adição de corretivos de basicidade. Já para a carga metálica do AF3 e do AF2, por se tratar de um caso real, a adição de corretivos de basicidade foi considerada no cálculo das escórias.

Na Tabela 2 estão apresentados os dados de carregamento e produção dos altos-fornos utilizados para os cálculos das escórias.

Tabela 2. Dados de carregamento e de produção dos AF's

Material	Unidade	AF3	AF2
Sinter	%	69,3	62,5
Minério Granulado	%	15,9	25,7
Pelota	%	14,8	11,8
Ilmenita	kg/t	15,6	-
Quartzo	kg/t	0,6	6,3
Dunito	kg/t	-	8,3
Coque	kg/t	372,64	375,20
PCI	kg/t	117,67	134,60
Gusa	t/d	8.059	7.590
Escória	kg/t	263,9	302,6

Após a obtenção das composições das escórias por balanço de massa, foram determinadas as temperaturas de início e final de fusão e as fases presentes para cada caso, utilizando o Thermo-Calc[®]. Para a temperatura, variaram-se os valores de entrada de 900°C a 1.600°C, dependendo do caso analisado. Considerou-se um sistema de 1 mol e sob pressão de 1 atm. A composição de cada composto foi dada em porcentagem em massa. Todos os cálculos foram realizados no estado padrão de referência. Uma vez que o foco do estudo é a formação de escórias, optou-se por suspender as fases *Gas* e *Fe_Liquid*.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos cálculos da composição química da escória primária para os compostos SiO₂, CaO, Al₂O₃, MgO, MnO e FeO, e as temperaturas de início e de final de fusão para este sistema, determinadas por meio do Thermo-Calc[®], estão apresentados na Tabela 3. Observa-se que a primeira escória primária a ser fundida é aquela formada por PB+PA, seguidas por PB, PA, S+PA; S+PB+PA; S+PB e, por último, S. Os resultados são apresentados segundo a ordem de temperatura de início de fusão da escória primária.

Tabela 3. Temperaturas de fusão das escórias primárias para o sistema $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO} - \text{MnO} - \text{FeO}$.

Carga Metálica	Escória Primária										
	Total (Kg/t)	Composição química (%)							Fusão (°C)		
		FeO	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	B2	T _{início}	T _{final}	ΔT
PB+PA	120,0	5,69	54,52	24,79	7,68	3,56	1,91	0,45	970	1326	356
PB	101,7	6,81	41,58	38,97	7,88	0,91	1,59	0,94	978	1410	432
PA	138,2	4,86	64,04	14,35	7,53	5,51	2,14	0,22	1019	1354	335
S+PA	224,0	2,85	37,27	40,37	6,17	8,20	3,90	1,08	1026	1383	357
S+PB+PA	214,9	2,99	33,47	44,39	6,15	7,77	3,91	1,33	1034	1460	426
S+PB	205,8	3,15	29,34	48,77	6,13	7,30	3,92	1,66	1098	1606	508
S	309,8	1,95	25,32	51,98	5,56	9,40	4,68	2,05	1112	1594	482
AF3	238,8	2,64	33,73	45,18	8,16	6,23	2,68	1,34	1139	1453	314
AF2	273,8	2,24	31,01	48,06	8,47	5,21	3,86	1,55	1192	1568	376

Segundo Clixby,⁽²⁾ materiais com basicidades (B2) menores que 1 (ácidos) caracterizam-se por possuírem menor temperatura de início de fusão, o que pode provocar gotejamento prematuro. Observa-se na Tabela 3 que as escórias com basicidade menor que 1 foram as que tiveram as menores temperaturas de início de fusão. Para verificar se existe correlação entre a basicidade binária da escória primária e a sua temperatura de início de fusão foi realizada uma análise de regressão linear com os dados obtidos (Figura 1).

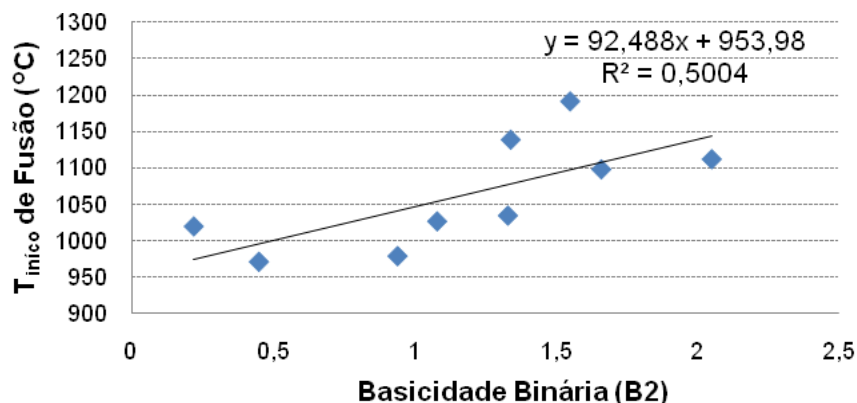


Figura 1. Correlação entre a basicidade binária e a temperatura de início de fusão da escória primária.

De acordo com a Figura 1, obteve-se uma correlação direta entre a basicidade binária e a temperatura de início de fusão da escória primária. Isto indica que quanto maior for a basicidade do material, maior será a sua temperatura de início de fusão. Entretanto, apesar da escória primária formada por PA possuir a menor basicidade (0,22), a sua temperatura de início de fusão foi mais alta do que as escórias formadas por PB+PA (B2=0,45) e PB (B2=0,94). Isto pode estar relacionado com o teor de FeO na escória. A escória primária formada por PA (FeO=4,86%) possui teor de FeO mais baixo do que as escórias formadas por PB+PA (FeO=5,69%) e PB (FeO=6,81%). Um aumento no teor de FeO provoca redução na temperatura de fusão. Outro aspecto relevante é que a escória primária formada por PA possui 5,51% de MgO, enquanto que nas escórias formadas por PB+PA e por PB, os teores de MgO são menores, 3,56% e 0,91%, respectivamente. De acordo com o diagrama

$\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{MgO} - \text{FeO}$,⁽³⁾ um aumento no teor de MgO provoca um aumento na temperatura *solidus*.

Para verificar estatisticamente a influência de diversos óxidos sobre a temperatura de início de fusão, foi avaliada a estrutura da covariância, ou seja, possibilitar a visualização de como as variáveis se relacionam, realizando uma análise de fatores. O resultado da análise de covariância envolvendo a composição química da escória primária e a sua temperatura de início de fusão está apresentado na Figura 2.

Plot of Factor Loadings

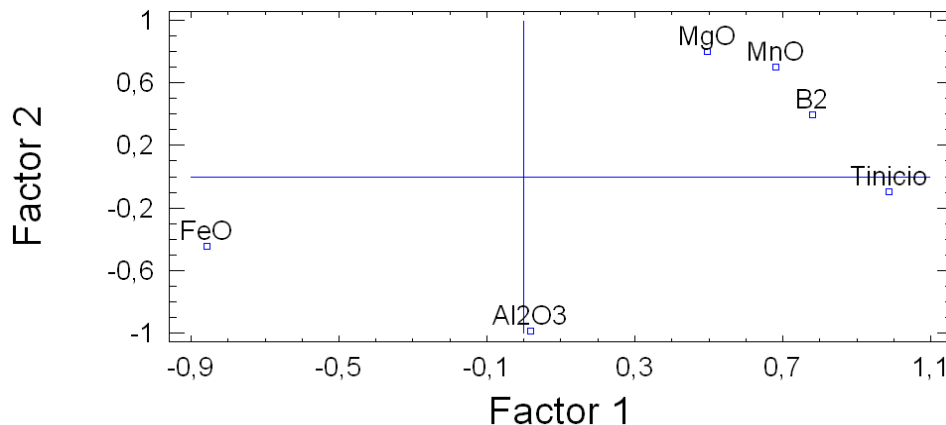


Figura 2. Pesos dos fatores para as composições químicas das escórias primárias.

Pela análise de fatores (Figura 2) verifica-se que o primeiro fator detém 70,68% da variabilidade total dos dados, enquanto que o segundo detém apenas 21,18% da variabilidade. O primeiro fator, responsável pela maior variabilidade, tem maior peso para as variáveis temperatura de início de fusão, FeO, basicidade, MnO e MgO. A temperatura de início de fusão está correlacionada diretamente com a basicidade e com os teores de MnO e MgO e inversamente com o teor de FeO. Apesar de ser registrada na literatura, a forte influência da Al_2O_3 na temperatura de início de fusão da escória primária, surpreendentemente não foi observada correlação entre essas variáveis. Este fato pode ser atribuído à estreita faixa de variação estudada (5,56% a 8,47% de Al_2O_3). Não foram considerados a SiO_2 e o CaO , pois estes compostos estão correlacionados por meio da basicidade binária.

O banco de dados utilizado para os cálculos contém uma fase líquida *Slag*, uma fase líquida rica em ferro (solução diluída), uma fase líquida de FeO puro, uma fase de misturas gasosas, e várias fases sólidas (isto é, óxidos, silicatos, sulfetos, fosfatos, etc.). Para o caso da escória de alto-forno, as fases de interesse são a fase líquida *Slag* e as fases sólidas. Na Figura 3 está apresentado o gráfico da variação da fração molar da fase *Slag* com a temperatura. A temperatura de início de fusão da escória é aquela na qual aparece o primeiro material fundido, isto é, quando a fração molar da fase *Slag* sai da condição zero, enquanto que a temperatura final de fusão é aquela na qual a fração molar da fase *Slag* corresponde a 1, ou seja, a escória já se encontra totalmente líquida.

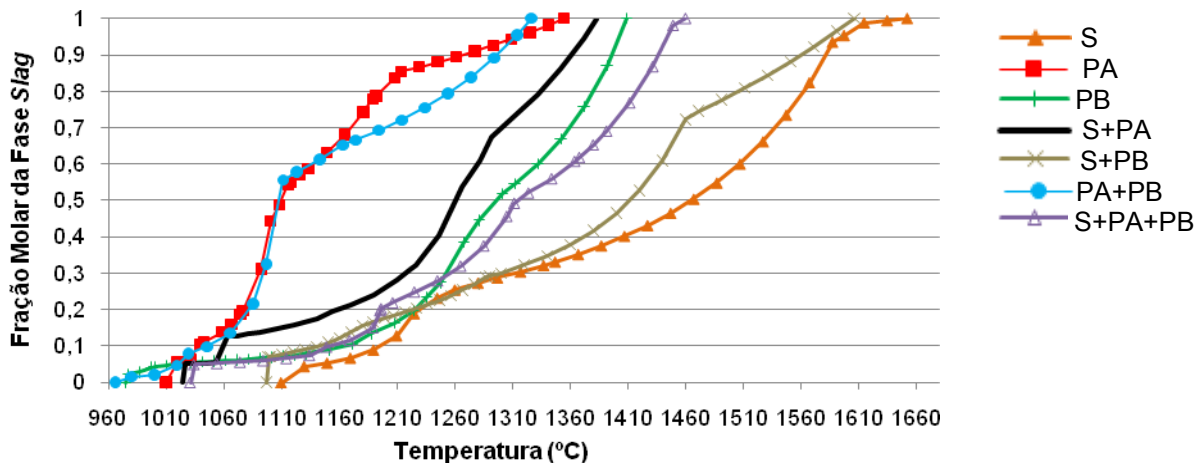


Figura 3. Variação da fração molar da fase *Slag* com a temperatura. Escória primária para o sistema $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO} - \text{MnO} - \text{FeO}$.

Uma característica importante da escória primária é possuir uma pequena diferença entre a temperatura *solidus* e a temperatura *liquidus*, pois isso resultará numa zona coesiva mais estreita, tendo como consequência um melhor escoamento gasoso no interior alto-forno.

Observa-se na Figura 3 que a escória primária formada por uma carga metálica composta por PA forneceu a menor diferença entre a temperatura *solidus* e a temperatura *liquidus*. A PB apesar de apresentar temperatura de início de fusão menor, 978°C, obteve temperatura final de fusão, 1.410°C, maior que PA. Este resultado encontrado no Thermo-Calc[®] diferiu do resultado encontrado nos ensaios de amolecimento e fusão, discutido na dissertação de Castro⁽⁴⁾ que avaliou dois tipos de pelotas, uma neutra ($B_2=1,03$) e uma ácida ($B_2=0,27$). Pelo método CVRD, a temperatura de início de fusão da pelota ácida, 1.100°C, foi mais baixa que a da pelota neutra, 1.227°C, entretanto, a temperatura final de fusão foi mais alta para a pelota ácida, 1.367°C, do que a da pelota neutra, 1.338°. Em consequência, a diferença entre as temperaturas de início e final de fusão foi maior para a pelota ácida. O maior valor de ΔT para a pelota ácida sugere uma maior espessura de zona coesiva quando este material for submetido à aplicação industrial. Durante o processo de redução de uma pelota, uma concha de ferro metálico é formada sobre a sua superfície externa. Essa concha é impermeável ao gás, dificultando o progresso da redução. Ao se atingir uma determinada temperatura, escória líquida rica em FeO é formada no interior da pelota. As pelotas mais básicas possuem graus de redução mais elevados do que as pelotas ácidas devido ao aumento da formação de calcioferritas e à elevada porosidade. Dessa forma espera-se que as pelotas mais básicas apresentem uma maior espessura da concha metálica e uma menor quantidade interna de FeO disponível para a formação de escória de baixo ponto de fusão. Esses fatores contribuem para uma menor espessura de zona coesiva das pelotas básicas.⁽⁴⁾

Os resultados encontrados nos dois métodos (utilizando o Thermo-Calc[®] e o forno de amolecimento e fusão) são diferentes. Mas, é importante registrar que estes resultados não devem ser comparados diretamente. No primeiro, não é possível considerar os aspectos dinâmicos da redução, interação gusa/escória, nem interação carga metálica/combustível. As análises termodinâmicas utilizando o Thermo-Calc[®] refletem apenas a influência da composição química do material com a temperatura e desconsidera os efeitos de viscosidade, composição do gás redutor, porosidade, tamanho das partículas e cinética de redução. A vantagem de se utilizar

um *software* de termodinâmica computacional é a possibilidade da realização de cálculos de equilíbrio de sistemas complexos formados por cinco ou mais elementos. O Thermo-Calc[®] viabiliza a avaliação de forma relativamente simples e direta de vários equilíbrios importantes na siderurgia. É importante salientar também que no segundo, algumas variáveis são desconsideradas. Contudo, sua relação com o fenômeno real no interior do alto-forno é mais próxima.

A carga composta por S forneceu, além da maior diferença entre as temperaturas *solidus* e *liquidus*, também as maiores temperaturas de início e final de fusão. Este aumento nas temperaturas pode ser explicado pela alta basicidade binária do sínter, em torno de 2. Este resultado é corroborado por um estudo realizado por Clixby,⁽²⁾ que observou nos ensaios de amolecimento e fusão de materiais com basicidade acima de 1,8, a presença de material residual após a finalização do ensaio em 1.550°C – 1.600°C, devido à formação de compostos com alto ponto de fusão.

Na Figura 4 está apresentado o gráfico da variação da fração molar da fase *Slag* com a temperatura para as escórias primárias do AF3 de Ipatinga e do AF2 de Cubatão. Observa-se na Figura 4 e na Tabela 3 que as temperaturas de início e final de fusão da escória primária do AF3 são menores que aquelas do AF2 de Cubatão. Além disso, a diferença entre a temperatura *solidus* e a temperatura *liquidus* da escória do AF3 é menor que a do AF2. Isto pode ser explicado pela diferença de basicidade das escórias dos dois altos-fornos. No AF3, a basicidade foi 1,34, enquanto que no AF2 foi 1,55. Essa diferença já era esperada, uma vez que tanto a pelota (B2=0,73) quanto o sínter (B2=1,91) carregados no AF3 possuíam basicidades menores que a pelota (B2=1,07) e o sínter (B2=2,06) carregados no AF2.

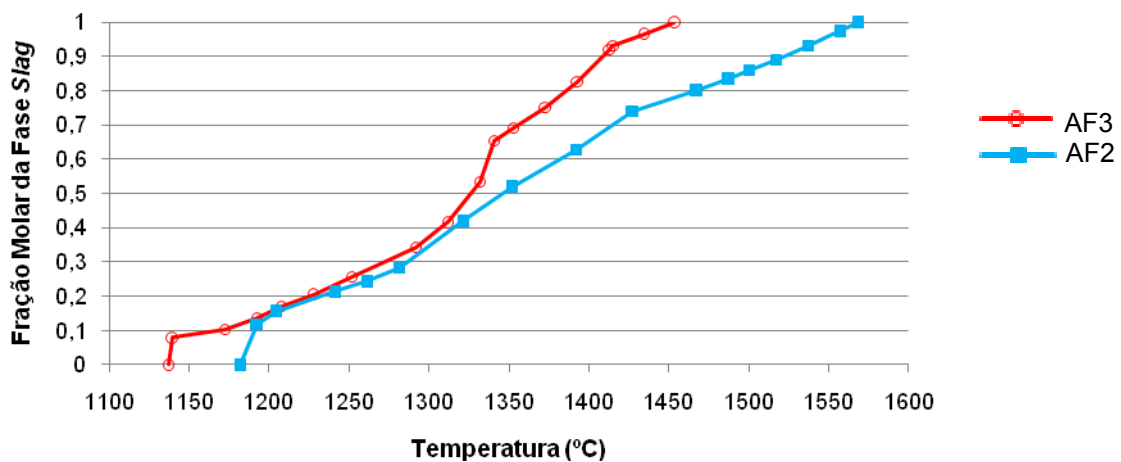


Figura 4. Variação da fração molar da fase *Slag* com a temperatura. Escória primária para o sistema $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO} - \text{MnO} - \text{FeO}$.

Na Figura 5 está apresentado um esquema ilustrativo de como poderia ser a zona coesiva de um alto-forno, considerando que a temperatura de início de fusão da escória primária corresponde à temperatura de início de amolecimento e que a temperatura final de fusão da escória primária corresponde à temperatura final de fusão da zona coesiva.

É importante salientar que a temperatura final de fusão da zona coesiva não é a mesma temperatura final de fusão da escória primária, pois a composição dessa escória e a sua co-existência com as fases sólidas não são constantes durante o processo de redução. Outro detalhe importante é que não foi considerada a interação carga metálica/combustível. Desconsiderando estes fatos, observa-se (Figura 5) que a posição da zona coesiva do AF3 está mais alta do que a da zona

coesiva do AF2. Isto significa que a carga metálica começará a fundir mais cedo no AF3. Por outro lado, a zona coesiva do AF3 é mais estreita ($\Delta T=314^{\circ}\text{C}$) do que a zona coesiva do AF2 ($\Delta T=376^{\circ}\text{C}$), o que acarreta maior perda de carga para este último.

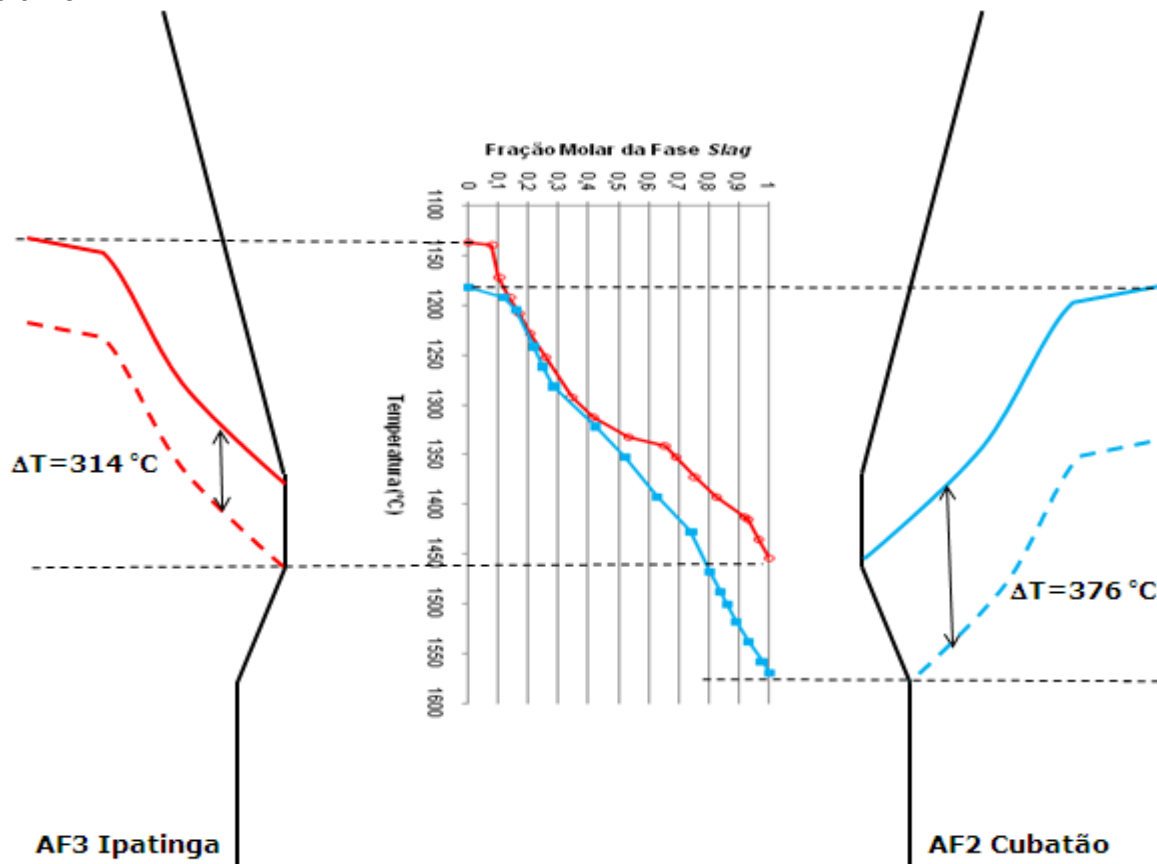


Figura 5. Esquema ilustrativo das zonas coesivas do AF3 e do AF2.

Na Tabela 4 estão apresentados os resultados dos cálculos da escória final, ordenada segundo a temperatura final de fusão. Para os cálculos, o teor de FeO na escória final foi fixado em 0,40% (média obtida dos altos-fornos da Usiminas do ano de 2009). Optou-se por fixar o teor de FeO na escória final, pois este valor depende do grau de redução que a carga metálica atinge a zona de amolecimento e fusão, e também das condições operacionais do alto-forno.

Tabela 4. Temperaturas de início e final de fusão das escórias finais para o sistema $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO} - \text{MnO} - \text{FeO}$

Carga Metálica	Escória Final											
	Total (Kg/t)	Composição química (%)								Fusão ($^{\circ}\text{C}$)		
		FeO	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	B2	T _{início}	T _{final}	ΔT	
PA	159,09	0,40	64,17	13,85	14,22	5,31	0,59	0,22	1039	1227	188	
PB+PA	143,60	0,40	56,33	22,64	14,97	3,48	0,51	0,40	1044	1320	276	
S+PA	240,88	0,40	39,77	38,99	10,69	8,02	1,12	0,98	1063	1342	279	
S+PB+PA	233,14	0,40	36,56	42,50	10,79	7,56	1,11	1,16	1142	1389	247	
PB	128,12	0,40	46,47	33,68	15,91	1,17	0,40	0,72	1039	1412	373	
S+PB	225,40	0,40	33,13	46,27	10,91	7,06	1,10	1,40	1139	1471	332	
S	330,72	0,40	29,73	49,83	8,84	9,09	1,34	1,68	1099	1594	495	
AF3	260,31	0,40	36,23	42,06	11,93	6,31	0,75	1,16	1138	1367	229	
AF2	304,38	0,40	35,46	44,41	12,13	5,80	1,06	1,25	1139	1378	239	

A característica mais importante da escória final de alto-forno é estar totalmente líquida e fluida nas temperaturas de fabricação do gusa. No caso de altos-fornos a coque esta temperatura varia entre 1.450°C e 1.550°C. Verifica-se na Tabela 4 que apenas a escória final formada por uma carga metálica composta por 100% S não estará totalmente líquida na temperatura de fabricação do gusa. As escórias que apresentaram menor temperatura de início de fusão foram as compostas por PB e PA, ambas 1.039°C. Entretanto, a formada por PA estará totalmente líquida a uma temperatura menor, 1.227°C, do que a formada por PB, 1.412°C. Obviamente, esta diferença entre as temperaturas finais de fusão para estes dois casos está relacionada à basicidade da escória, 0,22 para PA e 0,72 para PB. Não houve diferença significativa entre as temperaturas de início e final de fusão da escória final do AF3 e do AF2. Tanto a escória final do AF3 quanto a do AF2 tiveram temperaturas finais de fusão mais de 70°C abaixo de 1.450°C, assegurando estarem líquidas nas temperaturas de fabricação do gusa. No entanto, é importante garantir que a distribuição de carga seja eficiente, evitando regiões de difícil fusibilidade no interior dos AF's.

Na Figura 6 está apresentado o gráfico da variação da fração molar da fase *Slag* da escória final com a temperatura.

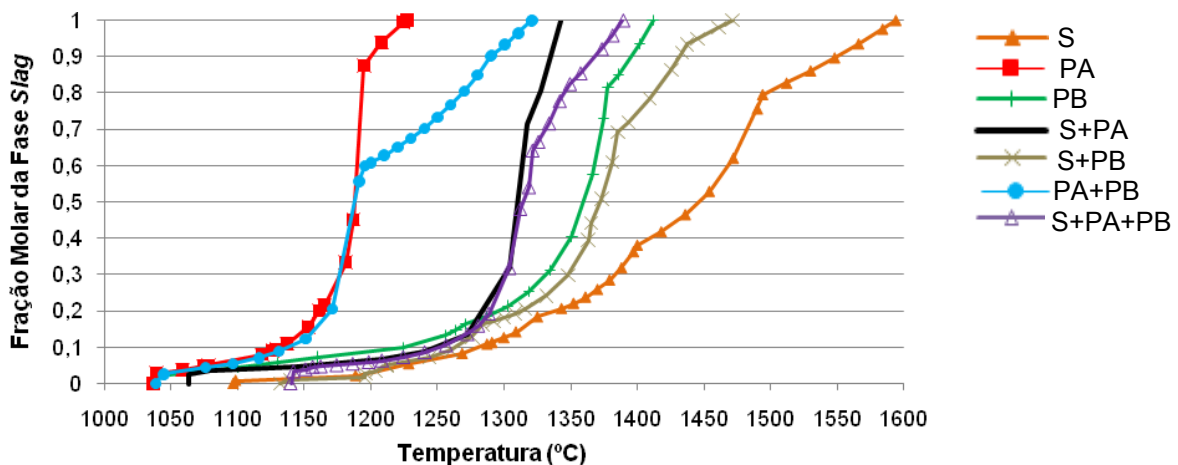


Figura 6. Variação da fração molar da fase *Slag* com a temperatura. Escória final para o sistema $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO} - \text{MnO} - \text{FeO}$.

Observa-se na Tabela 4 e na Figura 6 que, da mesma forma que na escória primária, a escória final formada por S possui a maior diferença entre a temperatura de início e final de fusão, 495°C, e a escória formada por PA possui a menor diferença entre as temperaturas, 188°C. Mais uma vez, é válido ressaltar que os cálculos desconsideram os efeitos físicos, cinéticos e de pré-redução dos materiais. Apenas foi considerado o aspecto químico da carga.

Na Figura 7 está apresentada a variação da fração molar da fase *Slag* da escória final com a temperatura para o AF2 e o AF3.

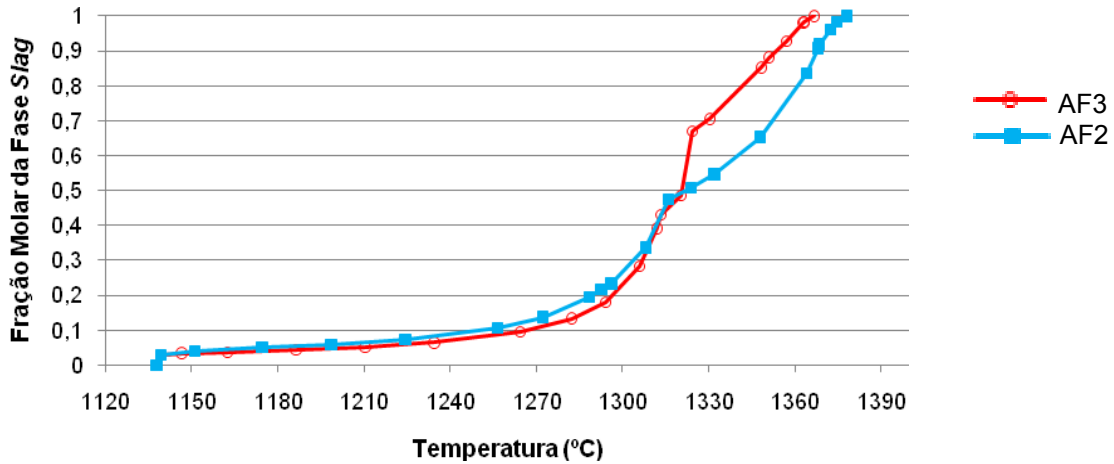


Figura 7. Variação da fração molar da fase *Slag* com a temperatura, para o AF2 e o AF3. Escória final para o sistema $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO} - \text{MnO} - \text{FeO}$.

Observa-se na Figura 7 que o comportamento da fase *Slag* para as duas escórias foi similar. Comparando com os casos reais, AF3 e AF2, as temperaturas de início e final de fusão da escória que mais se aproximaram da realidade operacional foi a proveniente da carga composta por S+PB+PA (Tabela 4). Este resultado já era esperado, uma vez que nenhum dos três materiais foi projetado para atender 100% da carga metálica. Sua composição química é complementar, no sentido de proporcionar a formação de uma escória com propriedades desejáveis no alto-forno.

4 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados neste estudo enfatizam a importância de uma carga metálica para alto-forno ter boas características de amolecimento e fusão. Portanto, toda vez que a carga metálica for modificada (proporção entre sínter, minério granulado e pelota), é de suma importância conhecer as características da escória que será formada no interior dos altos-fornos e, caso necessário, realizar as correções necessárias.

É importante salientar que, baseado nas informações existentes atualmente, não é possível realizar uma simulação precisa do comportamento de uma escória primária no interior de um alto-forno. A composição dessa escória e a sua co-existência com as fases sólidas são ainda desconhecidas. Além disso, a concentração do óxido de ferro na carga metálica e a temperatura não são constantes durante o processo de redução em um alto-forno, o que dificulta os cálculos termodinâmicos da composição da escória primária e a sua co-existência com as fases sólidas.

REFERÊNCIAS

- 1 MA, J. Injection of Flux into the Blast Furnace via Tuyeres for Optimising Slag Formation. *ISIJ International*, Vol. 39, n.º. 7, pp. 697 – 704, 1999.
- 2 CLIXBY, G. Influence of Softening and Melting Properties of Burden Materials on Blast Furnace Operation. *Ironmaking and Steelmaking*, Vol 13, n.º1, pp. 169 – 175, 1986.
- 3 SLAG ATLAS, Verlag Stahleisen GMBH, Dusseldorf, 2ª. Edição, setembro de 1995.
- 4 CASTRO, A. A. Avaliação de propriedades em Altas Temperaturas de Pelotas para Alto-Forno, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, 2006.