

# CÁLCULO DA VISCOSIDADE E TEMPERATURA LIQUIDUS DE ESCÓRIAS DE ALTO-FORNO\*

Moacir Andretti Sabino Mota<sup>1</sup>  
Raimundo Nonato Batista Braga<sup>2</sup>  
Paulo César Lemes de Almeida<sup>3</sup>

## Resumo

Os componentes da carga dos altos-fornos, que majoritariamente formam a escória final, consistem basicamente da ganga da carga metálica (minério, sinter, pelota), dos fundentes adicionados (quartzito, calcário, dolomita, etc) e da cinza do redutor (carvão vegetal ou coque). A estrutura da escória é formada por um conjunto de óxidos oriundos do processo de redução metálica e das impurezas da carga. As características de uma escória para uma máxima eficiência na operação do alto-forno devem ser: baixo ponto de fusão, fluidez e baixa viscosidade, tolerância, alta dessulfuração, remoção de álcalis. Com base nos argumentos destacados acima, tornou-se necessário o estudo de um método de cálculo eficiente para a viscosidade e da temperatura de *liquidus* da escória do AF2 da Vallourec Soluções Tubulares do Brasil - VSB.

**Palavras-chave:** Escória; Alto-forno; Viscosidade; Temperatura *liquidus*.

## CALCULUS OF VISCOSITY AND LIQUIDUS TEMPERATURE OF BLAST FURNACE SLAGS

### Abstract

The blast furnace burden components, which mostly form the final slag, consist basically of the gangue (ore, sinter, pellet), added fluxes (quartzite, limestone, dolomite, etc.) and reducer ash (from charcoal or coke). The structure of the slag is formed by a set of oxides derived from the process of metal reduction and impurities of the burden. The characteristics of a slag for maximum efficiency in blast furnace operation should be: low melting point, fluidity and low viscosity, tolerance, high desulphurisation, alkali removal. Based on the arguments highlighted above, it became necessary to study an efficient calculation method for the viscosity and liquidus temperature of the Vallourec's BF#2 slag.

**Keywords:** Slags; Blast-furnace; Viscosity; *Liquidus* temperature.

<sup>1</sup> Estagiário de engenharia metalúrgica, PRF – Gerência de Produção de Ferro Gusa, Vallourec Soluções Tubulares do Brasil - VSB, Jeceaba, Minas Gerais - Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro metalurgista, mestre, consultor, PRF – Gerência de Produção de Ferro Gusa, Vallourec Soluções Tubulares do Brasil - VSB, Jeceaba, Minas Gerais - Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro metalurgista, graduado, engenheiro de processos, PRF – Gerência de Produção de Ferro Gusa, Vallourec Soluções Tubulares do Brasil - VSB, Jeceaba, Minas Gerais - Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Os componentes da carga dos altos-fornos, que majoritariamente formam a escória final, consistem basicamente da ganga da carga metálica (minério, sinter, pelota), dos fundentes adicionados (quartzito, calcário, dolomita, etc) e da cinza do redutor (carvão vegetal ou coque).

A estrutura da escória é formada por um conjunto de óxidos oriundos do processo de redução metálica e das impurezas da carga.

Os principais óxido constituintes da escória final são: CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e MgO; com seus respectivos teores em média para alto-fornos a carvão vegetal: 35, 40, 12 e 10.

Os óxidos ainda não reduzidos, ao atingirem a rampa do alto-forno, com uma temperatura acima de 1200°C, reagem entre si e devido ao aumento de temperatura passam ao estado líquido, formando assim a escória, cujo os principais componentes são provenientes:

- do minério de ferro: sílica (SiO<sub>2</sub>), alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), titânia (TiO<sub>2</sub>), óxido de manganês (MnO<sub>2</sub>), sulfeto e cálcio (CaS), óxido de ferro (FeO), óxido de zinco (ZnO),
- do carvão: sílica (SiO<sub>2</sub>), Cal (CaO), óxido de magnésio (MgO), pentóxido de fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), óxido de potássio (K<sub>2</sub>O), óxido de sódio (Na<sub>2</sub>O) também conhecidos como álcalis.
- dos fundentes: Cal (CaO), magnésia (MgO), sulfeto de cálcio (CaS).

As características de uma escória para uma máxima eficiência na operação do alto-forno devem ser<sup>1</sup>:

- ponto de fusão: a escória deve ser completamente líquida nas temperaturas de fabricação do gusa (1300°C – 1450°C para altos-fornos a carvão vegetal e 1450°C – 1550°C para altos-fornos a coque);
- fluidez: para que escoe com facilidade e haja boa transferência de massa, a escória deve ter uma baixa viscosidade;
- tolerância: pequenas alterações na composição ou na temperatura devem ser toleradas sem causar problemas;
- dessulfuração: a escória deve ter uma alta capacidade de remoção de enxofre;
- álcalis: a escória deve ter uma alta capacidade de remoção de álcalis;
- volume: o volume de escória deve ser o menor possível à medida que não interfira nos outros critérios enumerados. Para cada 50kg de escória por tonelada de gusa tem-se, em média, um consumo adicional de 13,5kg de coque por tonelada de gusa.

## DIAGRAMAS DE EQUILÍBRIO

Para que se possa discutir como a formação e a composição da escória influenciam nas características enumeradas anteriormente é necessário conhecer razoavelmente os diagramas de equilíbrio (binários, ternários e pseudo-ternários) que fornecem informações importantes, como<sup>1</sup>:

- constituição mineralógica da escória em função da temperatura;
- temperatura inicial de formação de líquidos;
- variação da concentração e composição do líquido na escória com temperatura;
- solubilidade de um componente ou de uma fase em outra a diversas temperaturas;
- porcentagem dos gases em equilíbrio a qualquer temperatura.

\* Contribuição técnica ao 47º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas e 5º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, parte integrante da ABM Week, realizada de 02 a 06 de outubro de 2017, São Paulo, SP, Brasil.

## DIAGRAMAS TERNÁRIOS E PSEUDO-QUATERNÁRIOS

Pode-se definir como diagramas ternários uma representação gráfica triangular de três componentes à pressão constante, em que cada um dos componentes se apresenta em cada uma das extremidades com sua composição de 100%.

Na figura abaixo o triângulo equilátero é dividido em 100 partes, onde o ponto A representa o componente A puro e qualquer ponto na linha AC representa uma mistura de A e C, sem o componente B.

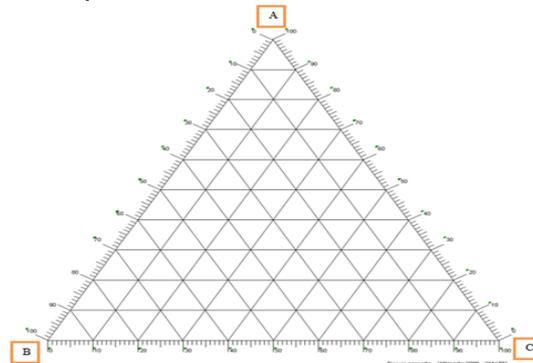


Figura 1. Representação genérica de um diagrama ternário.

Os diagramas ternários são de grande utilidade para o estudo das escórias de modo geral, porém para as escórias de alto-forno não são plenamente satisfatórios, uma vez que possuem quatro componentes principais. Com isso é necessária a utilização de um sistema de quatro componentes – os diagramas quaternários. Por se tratar de quatro componentes estes diagramas são de difícil representação; usa-se um tetraedro regular com cada componente nos vértices, o que ocupa as três dimensões, ficando impossível a apresentação da temperatura.

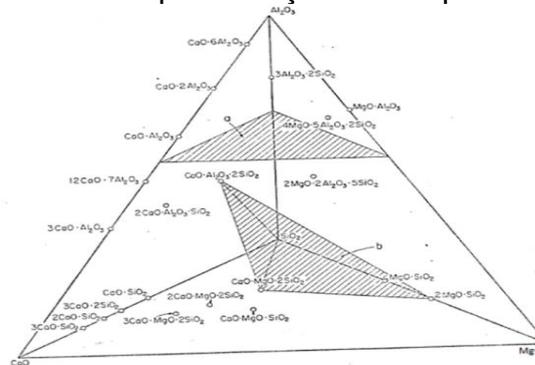


Figura 2. Representação de um diagrama pseudo-ternário.

Pode-se utilizar de dois métodos para simplificar a complexidade de um diagrama quaternário:

- escolhendo um plano com composição constante de um dos componentes;
- trabalhando em um plano que melhor representa a composição das três fases do sistema.

Com base nesses dois métodos pode-se definir um diagrama chamado pseudo-ternários, que é uma representação de uma das superfícies do diagrama quaternário em um novo diagrama ternário. Na figura 4 observa-se um exemplo de diagrama pseudo-ternário no qual a alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) é mantida constante e o plano  $\text{CaO-MgO-SiO}_2$  foi obtido por meio do primeiro método citado anteriormente.

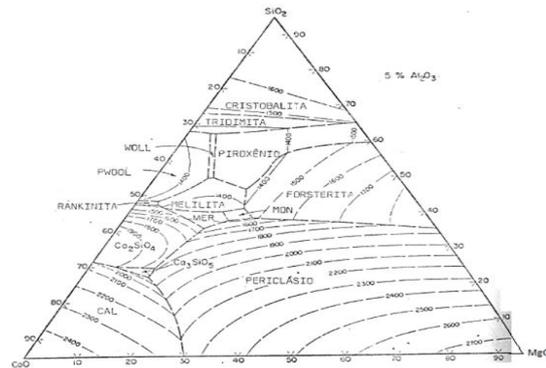


Figura 3– Diagrama pseudo-ternário no plano de 5% de  $Al_2O_3$  do sistema  $CaO-MgO-Al_2O_3-SiO_2$

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

As escórias de alto-forno desempenham um importante papel na operação de um alto-forno, e para isso ela deve possuir baixa temperatura de *liquidus* e uma viscosidade que proporcione um bom esgotamento do cadinho e que não impeça um bom desenvolvimento das corridas.

### 2.1 Temperatura de *liquidus*

Para mensurar a temperatura de *liquidus* das escórias é comum utilizar diagramas ternários assim como na figura 5.

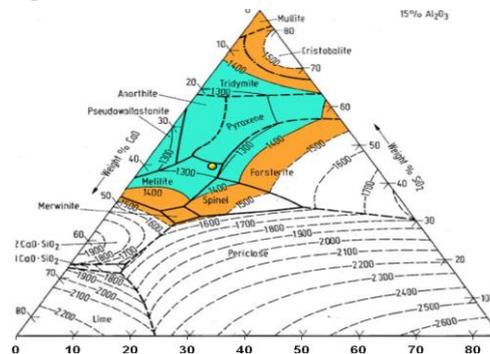


Figura 5 – Diagrama para temperatura de liquidus com corte em 15% de  $Al_2O_3$

Em um curso ministrado na ABM Week 2015, LEI GAN<sup>[2]</sup> apresenta um novo método para cálculo da temperatura de *liquidus*.

Segundo ele a temperatura de *liquidus* pode ser expressa pela equação abaixo (Equação 1):

$$958 + 659,9.XSiO_2 + 1040,7.XCaO + 1343,2.XAl_2O_3 + 1090,5.XMgO + 137.XNa_2O_2 - 668.XK_2O + 408,7.XLi_2O + 522.XFeO + 760,9.XMnO + 1022.XCrO + 794.XFe_2O_3 + 2198.XCr_2O_3 - 532.XCaF_2 + 844.XTiO_2 - 12,6.XB_2O_3 + 1207.XBaO + 1768.XSrO + 2234.XZrO_2 \quad (1)$$

Em que  $X_i$  representa a fração molar de cada elemento na composição total da escória.

Como restrição, a soma da porcentagem em massa dos componentes: CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e MgO deve ser maior que 95% e os componentes cuja participação em massa seja menor que 2% devem ser desconsiderados. Ex.: TiO<sub>2</sub>, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

## 2.2 Viscosidade

Pode-se definir de uma forma abrangente a viscosidade sendo uma propriedade física que caracteriza-se como a resistência ao escoamento dos fluidos. Por se tratar de uma propriedade física em que as ligações entre os átomos de seus constituintes são determinantes para um comportamento fluido ou não, a viscosidade é altamente relacionada à temperatura, uma vez que com o acréscimo da temperatura, maior a quantidade de energia disponível para agitação dos elétrons bem como o rompimento das ligações em questão. Assim sendo, quanto maior a temperatura da escória mais fluida ela se comporta para uma mesma composição química.

Em um alto-forno a escória deve ser fluida para haver boa transferência de massa na interface gusa-escória, garantindo um produto mais puro e com o menor teor de elementos indesejáveis, como o enxofre.

Os métodos para a determinação da viscosidade são:

- viscosímetro: equipamento que mensura a viscosidade através do torque.
- diagrama de isoviscosidade: representações esquemáticas em forma de diagramas.
- modelos matemáticos: regressões lineares que predizem a viscosidade a uma dada temperatura entre um determinado intervalo.

### 2.2.1 Modelos matemáticos

A fim de avaliar uma forma prática e com baixo custo de implementação, foi utilizado neste trabalho três modelos matemáticos específicos para determinação da viscosidade.

#### 2.2.1.1 Método de Fontana

Fontana, citado em Campos<sup>[1]</sup>, apresentou seguinte equação (equação 2) para cálculo da viscosidade:

$$\ln \eta = -10,3469 + \frac{25144}{T} - 9,6334 \cdot X_{CaO} - 11,8176 \cdot X_{MgO} - 0,80216 \cdot X_{Al_2O_3} \quad (2)$$

onde T é igual à temperatura da escória em Kelvin (considera-se T<sub>escória</sub> sendo T<sub>gusa</sub> + 50); X<sub>i</sub> é igual à porcentagem em peso de i sobre 100.

#### 2.2.1.2 Método de Urbain

O modelo é baseado no sistema CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> sendo os constituintes da escória classificados em 3 categorias: vítreos (X<sub>G</sub>); modificados (X<sub>M</sub>) e anfotéricos (X<sub>A</sub>).

$$X_G = X_{SiO_2} + X_{P_2O_5}$$

$$X_M = X_{CaO} + X_{MgO} + X_{FeO} + X_{MnO} + X_{CrO} + X_{NiO} + X_{Na_2O} + X_{K_2O} + X_{Li_2O} + 2X_{TiO_2} + 2X_{ZrO_2} + 3X_{CaF_2}$$

$$X_A = X_{Al_2O_3} + X_{Fe_2O_3} + X_{B_2O_3} + X_{Cr_2O_3}$$

\* Contribuição técnica ao 47º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas e 5º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, parte integrante da ABM Week, realizada de 02 a 06 de outubro de 2017, São Paulo, SP, Brasil.

A equação (equação 3 e 4) básica do modelo é:

$$\eta(P) = A T \exp \left[ \frac{1000B}{T} \right] \quad (3)$$

$$-\ln A = mB + n \quad (4)$$

Calculam-se os valores de A e B para determinar a viscosidade.

### 2.2.1.3 Método de Lei-Gan

O método foi baseado na equação de Vogel–Fulcher–Tammann<sup>[2]</sup> (equação 5):

$$\log \eta = A + \frac{B}{T-C} \quad (5)$$

onde  $\eta$  é a viscosidade em Pa.s;

T é a temperatura da escória em Kelvin;

A é uma constante de valor igual a -3,10 indicando o valor de temperatura limite para a viscosidade;

B corresponde a energia de ativação criada pelo rearranjo estrutural da cadeia de átomos durante a fusão e C corresponde a temperatura onde a viscosidade seria infinita;

Os parâmetros B e C podem ser obtidos através das equações abaixo:

$$B = \sum b_i X_i$$

$$C = \sum c_i X_i$$

O índice  $i$  corresponde a cada componente da escória, as constantes b e c para cada componente é apresentado na tabela 1.

**Tabela 1** – Representação do banco de dados com as informações e cálculos das corridas.

A	bi				ci			
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO
-3,1	751,19	3308,42	5490,72	1944,87	958,23	1019,48	727,95	556,66

O modelo foi calibrado com 812 composições de escórias industriais e 421 composições de escórias sintéticas. Através deste banco de dados, foi possível fazer ajustes paramétricos na equação de Vogel e prever algumas constantes que tornaram o modelo mais próximo da realidade industrial, Campos<sup>[1]</sup>.

### 2.3 Avaliação dos métodos

O Alto-forno 2 (AF2) da VSB possui as seguintes características:

- volume útil: 350 m<sup>3</sup>;
- reduztor utilizado na carga: carvão vegetal;
- carga metálica: minério de ferro e pelota;
- número de furos de gusa: 1;
- quantidade média de corridas/dia: 8
- número de ventaneiras: 11.

Foram selecionadas 200 corridas do AF2 seguindo os seguintes critérios:

-período: 01-janeiro-2016 a 25-abril-2016;

-corridas produzidas durante os dois dias após retorno das paradas do AF2 foram excluídas;

-as corridas deveriam obter temperatura média do gusa no canal de 1390°C a 1420°C.

Criou-se então um banco de dados com as informações das corridas, em seguida através das composições químicas das escórias calculou-se a viscosidade utilizando os três métodos e a temperatura de *liquidus* utilizando o método de Lei-Gan, conforme a figura 7.

#	Vol. Escória	Nº Corrida	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	FeO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	S	Índice de basicidade		T. Médio Gusa no canal	Temperatura Escória	T. Líquidas		Viscosidade			
														Bisária	Tetraária			Diagrama	Lei-Gan	Lei-Gan	Urbain	Eq. Fontana	
																							°C
46	07/01/2016	137	2909	28,94	44,11	11,61	9,53	0,52	0,019	0,31	1,975	0,299	-	-	-	1378,33	1428,33	°C	°C	1271,57	16,39	3,30	15,27
47	07/01/2016	137	2910	30,81	42,2	12,34	9,81	0,38	0,013	0,33	1,742	0,277	-	-	-	1412,67	1462,67	1300	1252,37	10,37	6,49	9,16	9,16
48	07/01/2016	137	2911	32,7	41,36	12,68	10,03	0,36	0,002	0,28	1,788	0,267	-	-	-	1428,00	1478,00	-	1298,23	8,02	5,33	6,53	6,53
49	07/01/2016	137	2912	33,92	39,49	13,1	10,19	0,31	0,004	0,27	1,888	0,252	-	-	-	1440,33	1490,33	-	1328,21	6,43	4,53	5,14	5,14

Figura 7 – Representação do banco de dados com as informações e cálculos das corridas.

De posse do banco de dados, foram feitas regressões lineares entre a viscosidade calculada e os componentes da escória, esquematizada na tabela 2.

Tabela 2. Resultados das regressões lineares (componente vs. viscosidade)

Método	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Basicidade
Fontana	0,508	0,0984	0,085	0,689
Lei-gan	0,356	0,0889	0,107	0,689
Urbain	0,291	0,0497	0,171	0,737

Visando ampliar a análise dos métodos, foi calculada a regressão linear multivariada (tabela 3) com os mesmos parâmetros da tabela 2 acrescidos da temperatura da escória.

Tabela 3. Resultados da regressão multivariada

Coeficiente	Eq.	Lei-Gan	Urbain
	Fontana		
R múltiplo	0,923	0,953	0,993
R-Quadrado	0,852	0,908	0,985
R-quadrado ajustado	0,847	0,905	0,983

Com base nos coeficientes das regressões apresentadas e a análise dos gráficos de regressão entre os componentes da escória o resultado da viscosidade, pôde-se inferir que o método de Lei-Gan é o mais ponderado e o mais sensível a variações dos parâmetros analisados. Isto pode ser comprovado através da tabela 3, onde observa-se que o método de Lei-Gan se comporta com valores intermediários dentre os métodos em questão.

## 2.4 Aplicação do método

Definido o método de Lei-Gan para cálculo da viscosidade da escória, diariamente passou-se a calcular a viscosidade das escórias bem como a temperatura de

*liquidus* e efetuar análises durante a reunião diária de avaliação do processo do AF2.

Para correlacionar os resultados calculados com a prática industrial foram acompanhadas 12 corridas do AF2 no período de 12-ago-2016 até 23-set-2016. Outras corridas foram parcialmente acompanhadas e tudo que era observado era comentado e relatado durante as reuniões de acompanhamento diário do processo. A figura 8 ilustra os parâmetros observados durante as corridas.

Data	Corrida	Início	Fim	Início da escória	Amostragem									índice de escória	Contraprova			VE LF
					T1	T2	T3	G1	G2	G3	E1	E2	E3		E1	E2	E3	
12/08/2016	4176	09:10	10:33	09:33	09:50	-	09:51	-	-	10:15	-	-	-	S			153	
				10:05	1337	1346	-	1346	-	-	1346	-						-

Figura 8 – Planilha utilizada para coleta de dados durante as corridas.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O acompanhamento diário dos resultados da viscosidade mostrou coerência com o aspecto observado ao longo das corridas do AF2. Como esperado a viscosidade apresentou alta sensibilidade a variação da temperatura do gusa, porém o método demonstrou ponderação e equilíbrio, assim como na figura 9. Segundo Campos [1]. *“Uma escória é boa para processamento industrial quando sua viscosidade estiver abaixo de 15 Poise”*, porém observa-se que para o caso do AF2 da VSB que a escórias com viscosidade acima de 11 Poise, acarretam uma dificuldade de esgotamento do cadinho e complicações ao longo da produção como elevação da pressão de sopro em alguns casos.

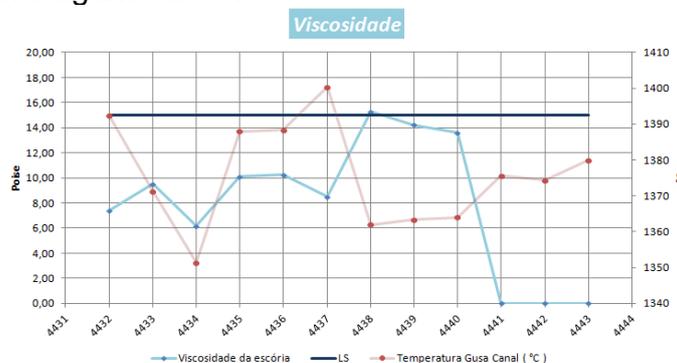


Figura 9 – Equilíbrio da viscosidade durante as corridas.

O método demonstrou também boa tolerância para variações químicas, de forma equilibrada ele demonstrava o que realmente era observado no aspecto visual da escória.

Com base nas corridas acompanhadas ao longo do período, pôde-se observar uma forte coerência dos valores de viscosidade calculados e o aspecto visual. Observou-se também que a viscosidade não é constante ao longo da corrida, existem momentos onde ela se apresenta fluida e outros não, isto pode ser facilmente explicado pelo desenvolvimento das corridas durante a produção no alto-forno. Durante o vazamento o reator continua reduzindo a carga e as variações do processo são inevitáveis, seja pela variabilidade da coluna (qualidade do carvão, qualidade da carga metálica, condição de sopro, permeabilidade, pressão de sopro)

o que faz com que a temperatura oscile ou pelo próprio comportamento irregular da descida do material que afeta diretamente o valor da viscosidade da escória.

Como forma de otimização de processo, observou-se que a utilização de moinha de carvão vegetal para cobrir a escória tornou-se uma boa prática para manter a viscosidade em um patamar aceitável, porém sua excessiva utilização torna um impedimento para a fluidez da escória. Além disso para uma temperatura de gusa abaixo de 1200°C, a prática de utilização de moinha de carvão vegetal não é eficaz e muitas vezes atrapalha a fluidez da escória e o desenvolvimento da corrida.

Por meio as análises e observações de processo verificou-se que para temperaturas de gusa acima de 1440°C, a incorporação do silício no ferro gusa tende a favorecer a fluidez. Uma vez que incorporado no gusa o teor de sílica reduz na escória, aumentando a basicidade e reduzindo a viscosidade.

Para a temperatura *liquidus* observou-se que existia uma forte coerência dos valores apresentados pelo método e os apresentados pelos tradicionais diagramas ternários. Na figura 10 é apresentado o valor da temperatura de *liquidus* para uma escória com a seguinte composição: 29,67% de CaO, 39,65% de SiO<sub>2</sub>, 16,34% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 10,07% de MgO e 0,34% de MnO. Para esta mesma composição o método de Lei-Gan apresentou uma temperatura *liquidus* 1299,04 °C.

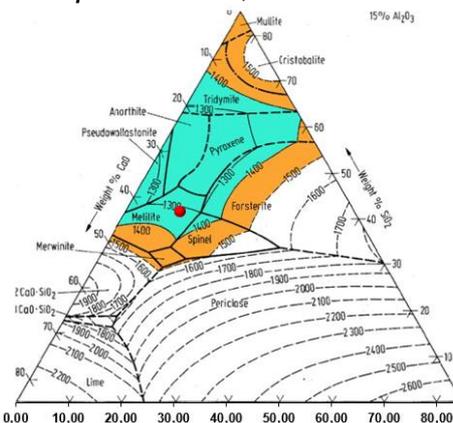


Figura 10 – Representação da escória citada no pseudo-ternário.

Além disso foi possível correlacionar as variáveis reais de processo do AF2, como a temperatura do gusa e as condições e dificuldade durante o vazamento com a temperatura de *liquidus* calculada pelo método. Sendo possível afirmar que o método é eficaz e infere valores condizentes com processo industrial.

#### 4 CONCLUSÃO

Através da análise crítica dos dados bem como a vivência operacional durante a aplicação do método, conclui-se que:

- com base nos coeficientes das regressões apresentadas e a análise dos gráficos, bem como a atribuição do grau de influência na viscosidade, pode-se concluir que o método de Lei Gan é o mais ponderado e o mais sensível a variações dos parâmetros analisados;
- o acompanhamento diário do processo mostrou coerência com os relatos observados ao longo das corridas do AF2;

- como esperado a viscosidade apresenta alta sensibilidade a variação da temperatura do gusa;
- observa-se para o caso do AF2 da VSB que a viscosidade situa-se abaixo do limite de 15 poise, entretanto vale salientar que para valores acima de 11 poise observa-se uma dificuldade de esgotamento da escória;
- a viscosidade não é constante durante o período de vazamento, devido as inúmeras variáveis inerentes ao processo.
- a utilização de moinha de carvão vegetal para cobrir a escória é uma boa prática para manter a viscosidade em um patamar aceitável, porém sua excessiva utilização torna um impedimento para a fluidez da escória.
- para uma temperatura de gusa abaixo de 1200°C, a prática de utilização de moinha de carvão vegetal não é eficaz e muitas vezes atrapalha a fluidez da escória.
- Para temperaturas do gusa acima de 1440°C, a incorporação do silício no ferro gusa tende a favorecer a fluidez. Uma vez que incorporado no gusa o teor de sílica reduz na escória, aumentando a basicidade e reduzindo a viscosidade.

## REFERÊNCIAS

- 1 Campos, VF. Desenvolvimento da tecnologia do alto-forno, Belo horizonte. UFMG 1984. P. 777-871.
- 2 Lei Gan, Chaobin L. A general viscosity model for molten blast furnace slag. Metallurgical and Material Transactions B. 2014:45B(6): 875-888.
- 3 Urbain G. Viscosity estimation of slags. Steel research: 1987:58(3): 111-116.
- 4 Kekkonen M, Oghbaisilasi H, Louhenkilpi S. Viscosity model for molten slags. Finland: Aalto University: 2012.
- 5 QIU G., CHEN L., ZHU J, LV X, BAI C. Effect of Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Addition on Viscosity and Structure of Ti-bearing. ISIJ International. 2015:55(7): 1367-1376.
- 6 Lei Gan. Blast furnace slag viscosity. In: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. Curso do 45º Ironmaking and raw materials seminar: 2015: Rio de Janeiro, Brasil. São Paulo: ABM: 2015. p. 01-85.