



PRÁTICAS PARA OPERAÇÃO COM GUSA LÍQUIDO COM BAIXO TEOR DE SILÍCIO NO CONVERTEDOR LD¹

Dione Araújo Moreira²
Igor Eduardo Silva Vieira³
Nathália Rabelo de Mello Penholati⁴
Paulo César Lemes de Almeida³
Ronaldo Santos Sampaio⁵
Washington Fernandes da Cruz⁶

Resumo

Em situações onde o teor de Si do gusa líquido é baixo existe dificuldade na formação de escória. Dessa forma, a prática realizada na V&M do Brasil consiste na utilização de um insumo capaz de contribuir para a elevação do teor de Si, o qual será responsável pela obtenção do volume mínimo de escória necessário para a forma atual de operação. Diferentes insumos são capazes de realizar essa função. Foram avaliados cinco diferentes insumos em relação às propriedades metalúrgicas e viabilidade econômica (através da ferramenta Valor-em-Uso). A ferramenta de avaliação foi o Modelo Termoquímico do Convertedor LD, desenvolvido na plataforma do *Microsoft Excel* e *Visual Basic*; e resultados da prática operacional do conversor da V&M do Brasil. O presente estudo demonstrou que, analisando os resultados somente no reator, a utilização do Insumo A, apresentado neste trabalho, é o melhor método para realizar a compensação do volume de escória em termos econômicos e de processo.

Palavras-chave: Recirculação de escória; Convertedor LD; Gusa líquido baixo teor de silício.

PRATICE FOR OPERATION WITH HOT METAL WITH LOW SILICON CONTENT IN CONVERTER LD

Abstract

In situations where the silicon content of hot metal is low there is difficulty in slag formation. Thus, the practice held at V&M do Brasil is the use of an input that contribute to increase the silicon content, which is responsible for obtaining the minimum amount of slag required for the current form of operation. Different inputs are able to perform this function. Five different inputs were evaluated in this work in relation to metallurgical properties and economic viability (through the tool *Value-in-Use*). The assessment tool was the Thermochemical Model of Converter LD, developed on *Microsoft Excel* and *Visual Basic*; and the database of the converter of V&M do Brasil. The present study has demonstrated that, analyzing the results only in the converter, the use of the Input A, presented in this paper, is the best method for reach the minimum amount of slag in economic and operational aspects

Key words: Slag recycling; Converter LD; Hot metal with low silicon.

¹ Contribuição técnica ao 42º Seminário de Aciaria – Internacional, 15 a 18 de maio de 2011, Salvador, BA, Brasil.

² Engenheiro de Produção Metalurgia Primária da V&M do Brasil

³ Estudante de Engenharia Metalúrgica da UFMG

⁴ Engenheira de Processo da Metalurgia Primária da V&M do Brasil

⁵ Engenheiro Metalurgista Ph.D. Consultor pela RSConsultants Ltda.

⁶ Supervisor de Processo da V&M do Brasil



1 INTRODUÇÃO

A necessidade de elevação do volume de escória está vinculada à capacidade operacional do processo. Através de um *benchmarking* descobriu-se a possibilidade da recirculação de escória do convertedor LD, o que representa uma excelente opção para aproveitamento desse produto.

A recirculação de escória representa o retorno do silício, já oxidado, ao banho; com a vantagem de trazer consigo CaO e MgO, ou seja, reduzindo o consumo de fundentes. A presença dessa escória no início do processo seria benéfica também pela aceleração da formação da escória. Em contrapartida, a escória recirculada atuaria como um refrigerante e acrescentaria fósforo ao processo.

Com o objetivo de agregar valor à escória, observou-se a possibilidade da sua utilização no Alto-Forno. Nessa etapa do processo, em função de conter os fundentes necessários já calcinados, a escória recirculada seria capaz de poupar energia utilizada na calcinação. Com a menor demanda de energia, necessita-se de menor massa de carvão vegetal. Em concordância com sua aplicação no convertedor, a escória também levaria ao alto-forno um acréscimo no teor de fósforo.

A ampliação deste estudo ocorre com a inclusão da escória do refino secundário. Esta, além de possuir influências semelhantes à escória do LD, não participaria como uma entrada de fósforo no processo.

A prática de reutilizar escória de aciaria tanto no próprio convertedor LD quanto no alto-forno, reduz os custos com manutenção dos aterros de rejeitos além de reduzir o passivo ambiental das empresas.

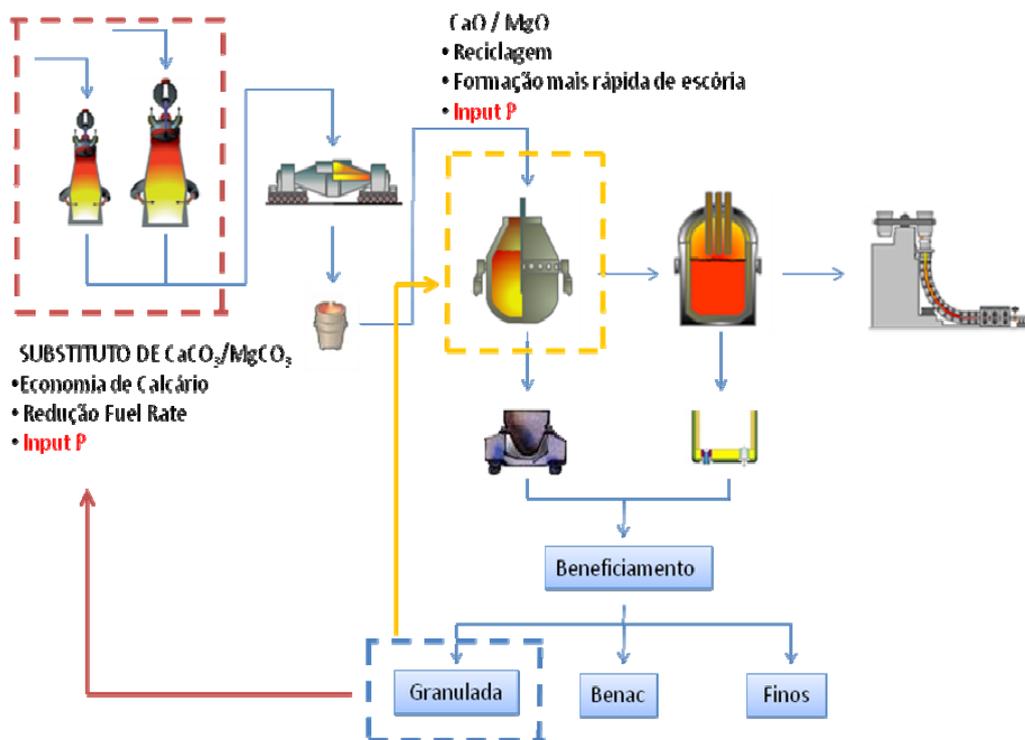


Figura 1 - Visão integrada para opções para a escória dentro do processo.

Os outros insumos também utilizados na simulação foram o Insumo B e o Insumo C. Estes, assim como o Insumo A, possuem teor elevado de silício metálico,



participando do processo como fontes de energia química que, por outro lado, exigem a adição de fundentes.

1.1 Apresentação do Modelo Termoquímico do Convertedor LD

O convertedor LD é um equipamento utilizado para a obtenção de aço através do sopro de oxigênio que promove agitação do metal e oxidação das impurezas contidas no gusa líquido. Com o intuito de estudar e ser capaz de fazer previsões acerca do fenômeno que ocorre nesse processo foi desenvolvido o Modelo Termoquímico do Convertedor LD. Esse modelo foi construído no Excel baseado nas relações termodinâmicas que regem o processo, incluindo reações conhecidas que ocorrem nesse sistema e as características de insumos e produtos.

O objetivo inicial com a construção desse modelo foi estudar a melhor forma de utilização das matérias-primas disponíveis, obtendo o maior lucro possível. Assim, introduziu-se para cada componente seu valor econômico, para que o sistema fizesse a escolha pela solução mais interessante em termos financeiros.

O modelo trabalha, através do otimizador solver, maximizando o lucro horário. O sistema possui restrições sendo as principais o fechamento do balanço de massa e energético do processo, e inclui também o atendimento a algumas exigências operacionais. Há ainda os valores estimados pelo programa para que todas as restrições sejam atendidas, como por exemplo: massa de gusa líquido, sucata, fundentes e escória; e composição da escória.

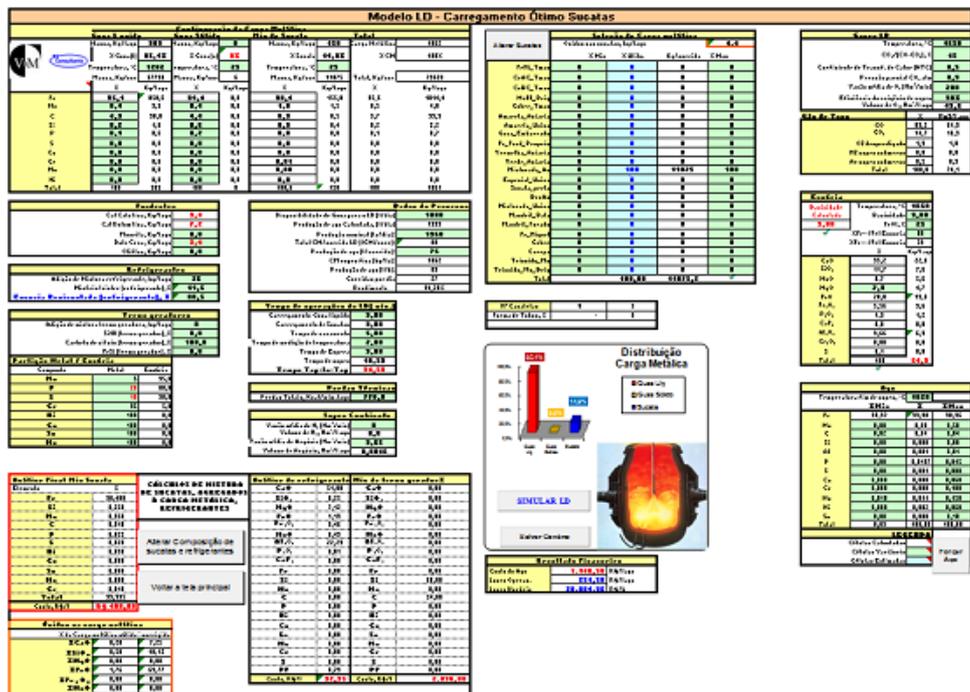


Figura 2 - Interface do modelo termoquímico do convertedor LD.

1.2 O Conceito de Valor-Em-Uso

O Valor-em-Uso (VEU) consiste num método de análise de viabilidade econômica. Este método é bastante utilizado no meio siderúrgico. Através dele é possível comparar o estágio atual de um negócio com cenários de interesse, verificando e



quantificando os melhores resultados possíveis nos novos cenários, mantendo a realidade atual do empreendimento como base de referência para a comparação. Assim, os resultados encontrados com a utilização dessa ferramenta contribuem diretamente para a melhoria do resultado do negócio, definindo, por exemplo, a escolha de insumos para os reatores siderúrgicos; e, também, servindo de base para a renegociação de contratos com fornecedores.

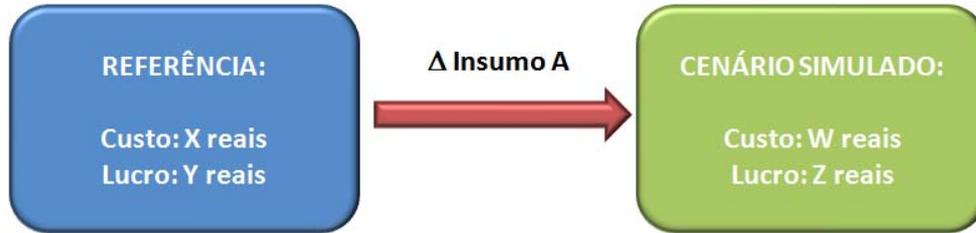


Figura 3 - Conceito de Valor-em-uso.

Considerando-se que as variações no Custo e no Lucro são atribuídas apenas ao Insumo A.

VEU Custo Mínimo: novo preço do insumo A para que o custo W volte a ser X.

VEU Lucro Máximo: novo preço do insumo A para que o lucro Z volte a ser Y.

$$Lucro \frac{R\$}{dia} = \left(PV \frac{R\$}{t \text{ aço}} - CP \frac{R\$}{t \text{ aço}} \right) \cdot PR \frac{t \text{ aço}}{dia}$$

PV = preço de venda; CP = custo de produção; PR = produção.

2 METODOLOGIA

2.1 Escolha dos Cenários

A prática de carregamento do Convertedor LD na V&M do Brasil é baseada na utilização máxima da energia disponível. Através da análise da temperatura que o gusa líquido é recebido na aciaria e de sua composição química, calcula-se, através do *Blocon*, a massa de sucata a ser adicionada a fim de fechar o balanço térmico, evitando perda de energia.

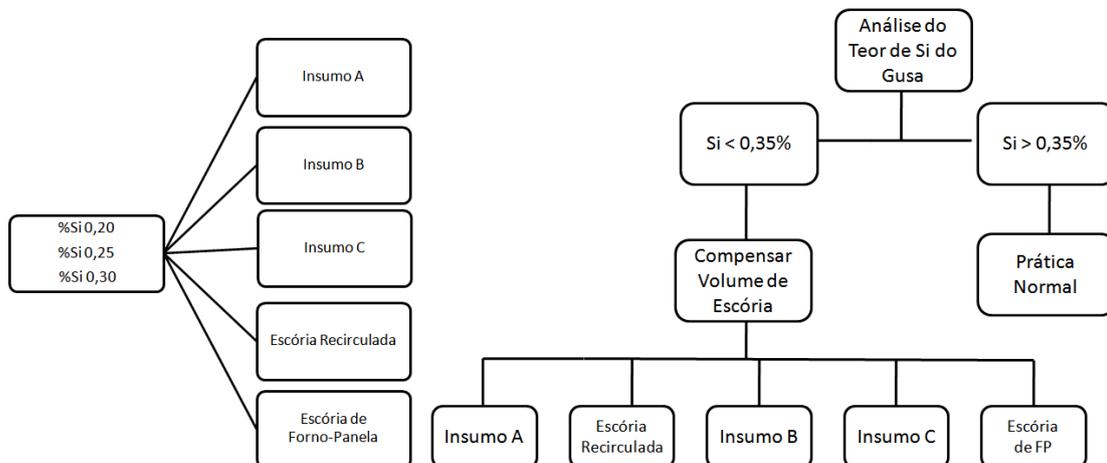


Figura 4 - Cenários simulados e fluxograma da metodologia aplicada.



No entanto, em função da operação no conversor, o teor de silício obtido na análise é determinante no cálculo. Em situações nas quais o teor de silício é inferior a 0,35% o sistema supervisor determina antecipadamente a adição do Insumo A. O intuito dessa adição é elevar o teor de silício metálico no banho proporcionando um volume de escória mais elevado.

Conforme Gonçalves⁽¹⁾ dois fatores são preponderantes na determinação do volume de escória. Em primeiro lugar depende da taxa de desfosforação que se pretende obter. Outro fator também importante é a necessidade de se ter um volume mínimo de escória necessário para minimizar as projeções do metal durante o processo de refino. Essas projeções além de provocarem uma perda metálica significativa, provocam também aderência de metal na borda do forno e também na lança de oxigênio, trazendo grandes transtornos para a parte operacional da aciaria.

A proposta do presente trabalho consistiu em avaliar, em termos metalúrgicos e financeiros, a viabilidade da substituição do insumo que tem como função principal elevar o volume de escória. Nessa linha, foram analisadas, além do insumo já utilizado, outras quatro alternativas. Estes cinco materiais foram divididos em dois grupos, de acordo com a forma que atuaria no processo, sendo capaz de fornecer energia química ao banho ou atuando como um refrigerante. No grupo das alternativas exotérmicas encontram-se o Insumo A, Insumo B e o Insumo C; e no grupo das alternativas endotérmicas tem-se a escória do próprio conversor (reciclada) e a escória do forno-panela.

Tabela 1 – Análise química dos insumos utilizados nas simulações

Insumos	%Fe total	%Fe (M)	%Si	%C	%Mn	%P	%S	%SiO ₂	%Al ₂ O ₃	%CaO	%FeO	%MgO	%MnO	%P ₂ O ₅
Sucata Misturada	98,4	98,4	0,25	0,31	0,95	0,025	0,02	0	0	0	0	0	0	0
Insumo A	0	0	40,0	1,0	0	0	0	10,91	6,08	17,22	0	0	0	0
Insumo B	22,0	22,0	78,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Insumo C	66	66	0	34,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Escória Reciclada	19,43	0	0	0	0	0	0	17,3	1,07	43,6	24,9	6,8	4,9	1,6
Escória de Forno-Panela	0,39	0	0	0	0	0	0	9	25	57	0,5	0	0,5	0

O cenário que possui o menor teor de silício sem que seja adicionado qualquer insumo para compensação do volume de escória foi tomado como referência, utilização de gusa líquido com 0,35% de silício. A avaliação dos cinco insumos consistiu em comparações com este cenário referência para três teores de silício, 0,20%; 0,25%; e 0,30%.

Em cada cenário foi utilizada a quantidade do respectivo insumo para que o volume de escória fosse o mesmo do cenário referência, situação na qual a prática operacional é bem dominada. A análise dos cenários consistiu numa comparação com a referência em termos das características relacionadas:

- produção diária;
- consumo de fundentes;
- capacidade de desfosforação; e
- valor-em-uso.

A referência definida no início dos trabalhos consistiu no seguinte cenário:

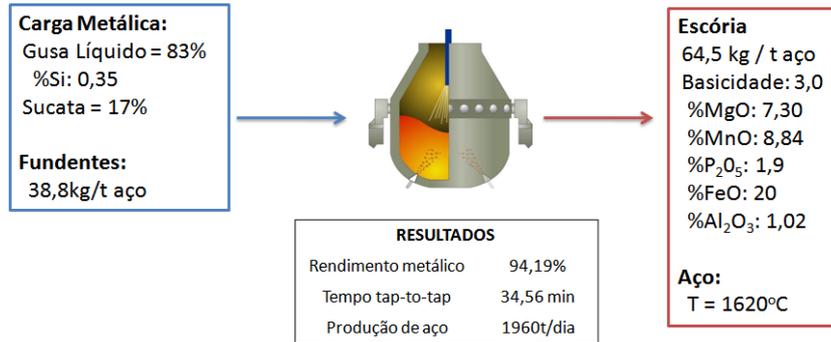


Figura 5 - Cenário utilizado como referência para comparação entre simulações.

2.2 Considerações para Simulação

As simulações foram conduzidas com algumas considerações mantidas constantes em todos os cenários para que pudesse ser feita, posteriormente, a comparação entre estes.

O modelo termoquímico utilizado trabalha com algumas variáveis de processo como dado de entrada.

Tabela 2 - Considerações realizadas para a condução do trabalho.

Variáveis de Processo mantidas Constantes nas Simulações	
Temperatura de Fim de Sopros	1620°C
Basicidade Binária da Escória	3,0
MgO na Escória	7,3%
Partição de Fósforo	20% Aço / 80% Escória

Os valores utilizados foram obtidos através do banco de dados da VMB, sendo, portanto, condizentes com a realidade atual do processo.

A partição de fósforo é uma das entradas do modelo. Dessa forma, para a avaliação da capacidade de desfosforação, realizou-se uma manipulação da Equação de Healy.⁽²⁾ Após a determinação do cenário referência e do valor de entrada para o coeficiente de partição, calculou-se uma nova constante para a equação. Com a equação estabelecida calculou-se os coeficientes de partição para os cenários simulados.

Equação de Healy:

$$L_p = \text{Log} \frac{(\%P)}{[\%P]} = \frac{22350}{T} - 16 + 2,5 \log Fe + 0,08CaO$$

Equação de Healy manipulada para adequação ao cenário referência:

$$L_p = \text{Log} \frac{(\%P)}{[\%P]} = \frac{22350}{T} - 19,73 + 2,5 \log Fe + 0,08CaO$$

onde:

(%P) = teor de P na escória

[%P] = teor de P no aço



T = temperatura em K
Fe = teor de Fe total na escória
CaO = teor de CaO na escória

3 DISCUSSÃO

3.1 Resultados no Convertedor LD

Os insumos estudados foram analisados em função de alguns aspectos considerados mais relevantes no processo, sendo eles: produção diária, custo de produção, consumo de fundentes, capacidade de desfosforação e valor-em-uso.

3.1.1 Produção

A produção de aço alcançou valores superiores ao cenário referência nas situações onde foi utilizada a escória recirculada. No cenário com gusa líquido de teor de silício igual a 0,30% utilizando escória de forno-panela a produção também se mostrou superior.

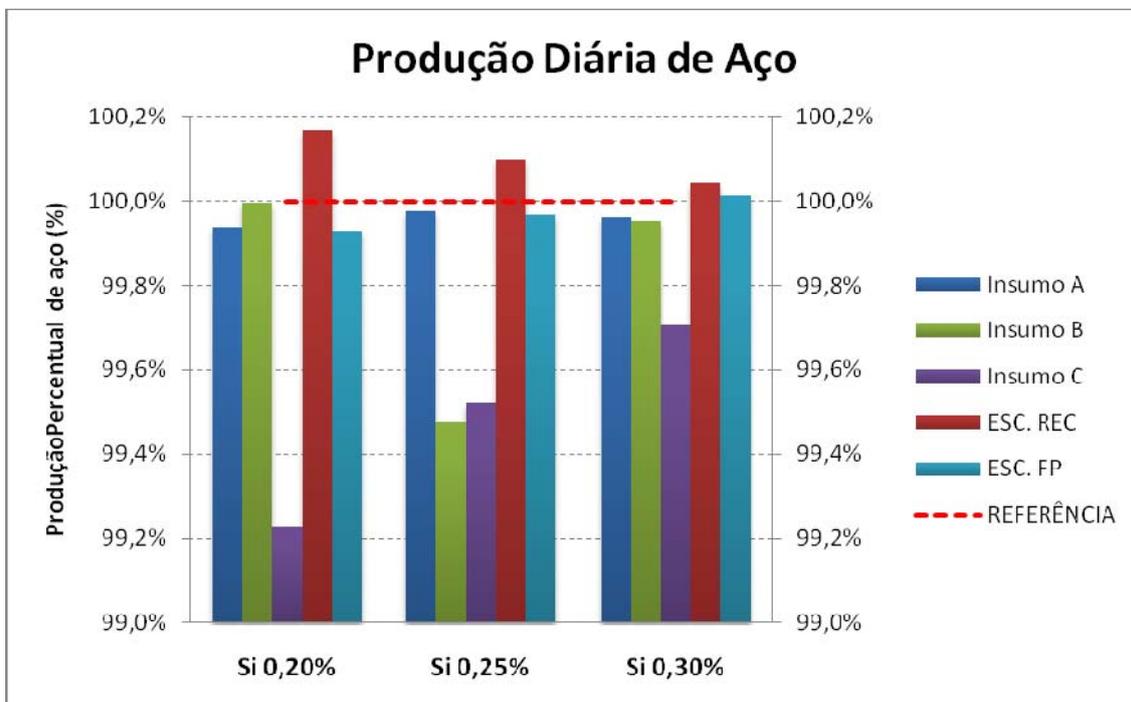


Figura 6 - Produção diária de aço.

A melhora alcançada na produtividade justifica-se pelo menor volume de oxigênio utilizado nos cenários com escória. O balanço de oxigênio para situações com gusa líquido com 0,20% de silício demonstra que a diferença encontra-se na reação do silício e também na formação de FeO. O resultado disso é um menor tempo no sopro, acarretando numa possibilidade de aumento de produção. A redução na queima de ferro também justifica o pequeno aumento observado no rendimento metálico.



Tabela 3 - Balanço de oxigênio

Material	Cenário Referência	Si 0,2%+ Insumo A	Si 0,2% + Insumo B	Si 0,2% + Insumo C	Si 0,2% + Esc. Recic.	Si 0,2% + Esc. FP
	Nm ³ / t. aço					
Entrada						
Sopro O ₂	49,51	49,56	49,55	50,22	49,35	49,57
Saída						
Escória + Pó de Topo	7,70	7,75	7,70	7,70	5,98	6,73
SiO ₂	2,60	2,59	2,60	2,60	1,53	1,57
MnO	0,96	0,95	0,95	0,95	0,90	0,93
FeO	1,60	1,60	1,61	1,60	1,01	1,67
Fe ₂ O ₃	2,07	2,07	2,07	2,07	2,07	2,07
P ₂ O ₅	0,48	0,48	0,48	0,48	0,47	0,49
Gases LD	40,82	40,83	40,86	41,52	42,39	41,85
CO	30,17	30,18	30,20	30,69	31,33	30,93
CO ₂	10,65	10,65	10,66	10,83	11,06	10,92
Perdas	0,99	0,99	0,99	1,00	0,99	0,99
Total	49,51	49,56	49,55	50,22	49,35	49,57

3.1.2 Consumo de fundentes

O consumo de fundentes, como previsto, sofreu grande redução nas situações onde foram utilizadas as alternativas endotérmicas, escória de forno-painel e escória de LD. As situações com alternativas exotérmicas apresentaram um consumo de fundentes bastante próximo do cenário referência, o que também pode-se dizer que era esperado, tendo em vista que haveria formação de sílica e os materiais não contavam (ou contavam com teor insuficiente) de CaO e outros óxidos que compõem a escória.

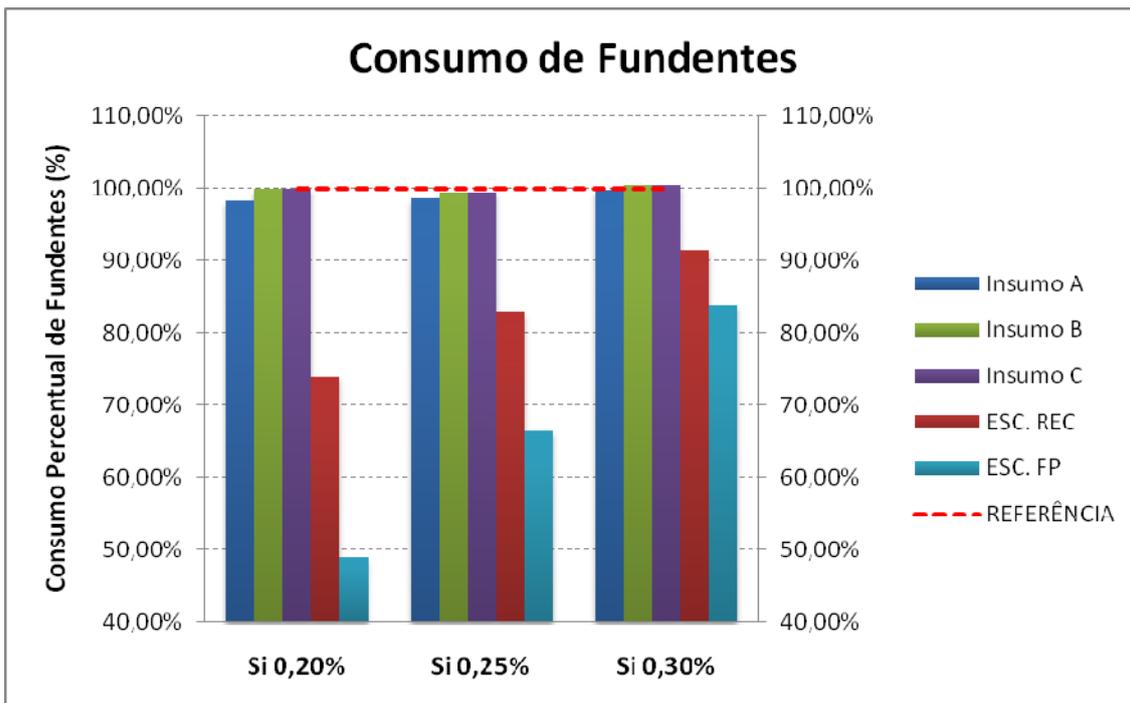


Figura 7 - Consumo de fundentes.

3.1.3 Capacidade de desfosforação

O cenário com Insumo A apresentou o resultado mais próximo do cenário referência em termos de capacidade de desfosforação, mostrando-se ainda inferior a este. O cenário com escória recirculada apresenta uma quantidade maior de fósforo no aço, fato justificado pela entrada de P₂O₅ no próprio insumo.



Tabela 4 - Balanço de massa do fósforo

Material	Cenário Referência	Si 0,2% + Insumo A	Si 0,2% + Insumo B	Si 0,2% + Insumo C	Si 0,2% + Esc. Recic.	Si 0,2% + Esc. FP	
	kg / t. aço	kg / t. aço	kg / t. aço	kg / t. aço	kg / t. aço	kg / t. aço	
Entrada	Gusa Líquido	0,6153	0,6150	0,6161	0,6150	0,6412	0,6322
	Gusa sólido	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	Sucata	0,0457	0,0454	0,0450	0,0454	0,0356	0,0396
	Cal_Calcítica	0,0172	0,0167	0,0172	0,0172	0,0124	0,0066
	Cal_Dolomítica	0,0155	0,0155	0,0155	0,0155	0,0112	0,0095
	Minério de Ferro	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013
	Escória Recirculada	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1257	0,0000
	Total	0,6949	0,6940	0,5950	0,6944	0,8274	0,6891
Saída	Aço	0,1337	0,1336	0,1338	0,1336	0,1602	0,1326
	Escória	0,5350	0,5342	0,5351	0,5345	0,6410	0,5304
	Pó de Topo	0,0262	0,0262	0,0262	0,0262	0,0262	0,0262
	Total	0,6949	0,6940	0,5950	0,6944	0,8274	0,6891

No entanto, a pior situação foi encontrada com o uso de escória de forno-panela. Analisando a composição da escória resultante nesse cenário foi observado um teor de CaO bastante inferior aos outros cenários, apresentando 35% de CaO enquanto nos outros cenários foram encontrados valores superiores a 40%. A forma de cálculo demonstra que a desfosforação possui relação de proporcionalidade com o teor de CaO na escória, sendo interessante, portanto, valores mais elevados deste.

Tabela 5 - Avaliação da capacidade de desfosforação

Cenário	Lp Healy (Calculado)	% de P na Escória*
Referência	1,781	80
Si 0,20% + Insumo A	1,766	79,44
Si 0,20% + Esc. Recirculada	1,708	77,18
Si 0,20% + Esc. Forno-Panela	1,276	55,56

* Partição de fósforo corresponde ao percentual do fósforo total que é destinado à escória.

3.1.4 Valor-em-Uso

O cálculo do custo de produção engloba a utilização de todos os insumos necessários para a produção de uma tonelada de aço, demonstrando a influência geral de cada opção utilizada no estudo.

Todos os cenários apresentaram elevações no custo de produção. O cenário com Insumo A foi aquele que mais se aproximou da referência, causando menos impactos financeiros. A escória recirculada, principal alvo de estudo, causou a maior elevação nos custos. Tal fato pode ser justificado pelo grande consumo de gusa líquido nesse cenário. Devido à falta de energia química, obtida através da reação do oxigênio com o silício metálico, a alternativa é aproveitar a energia térmica que o gusa possui.

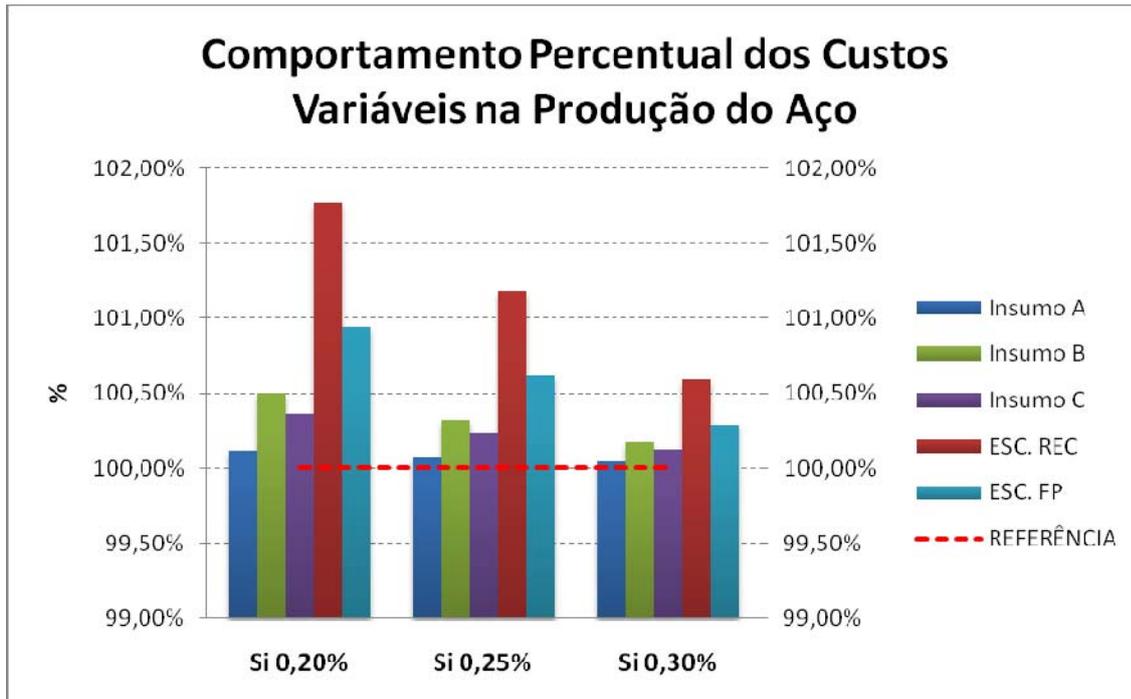


Figura 8 - Custos variáveis para a produção de aço.

O aumento nos custos de produção em todos os cenários determina, através do valor-em-uso, que os valores atribuídos aos insumos devem ser reduzidos para que cada prática seja viável economicamente. No entanto, em alguns cenários, como o da escória recirculada, a elevação nos custos foi tão elevada que o valor-em-uso encontrado foi negativo. O valor-em-uso para lucro máximo também foi negativo nas situações com esse insumo, pois o aumento na produção diária não foi capaz de compensar o efeito no custo de produção.

Tabela 6 - Resultados em termos de VEU Custo Mínimo e VEU Lucro Máximo

Insumo Utilizado	VEU Custo Mínimo (R\$ / t)			VEU Lucro Máximo (R\$ / t)		
	Si 0,20%	Si 0,25%	Si 0,30%	Si 0,20%	Si 0,25%	Si 0,30%
Insumo A	309,83	312,21	305,40	210,34	255,56	126,23
Insumo B	13,61	20,47	0,69	2,15	-2199,52	938,86
Insumo C	333,74	338,77	324,54	-1462,42	-1366,79	-1636,99
Esc. Recirculada	-916,92	-917,47	-918,49	-874,13	-880,18	-886,71
Esc. FP	-379,65	-379,42	-378,34	-393,74	-389,54	-369,06

Os resultados apresentados na Tabela 6 referem-se aos valores que devem ser assumidos pelos diferentes insumos a fim de obter o custo ou o lucro do cenário referência.

3.2 Rota Alternativa de Utilização da Escória de Convertedor LD

O estudo concentrado no Convertedor LD demonstrou que a prática de recirculação de escória não representa a melhor alternativa para o processo da V&M do Brasil.

A rota alternativa encontrada para o aproveitamento deste material no processo siderúrgico seria a utilização no alto-forno.

Os fundentes utilizados no alto-forno são fontes de carbonatos, o que significa que haverá consumo energético para que ocorra a calcinação desses materiais. A escória de LD, por sua vez, apresenta os fundentes necessários, mas previamente calcinados. Essa menor demanda energética representa uma oportunidade de



economizar carvão vegetal, insumo com grande interferência no valor dos produtos VMB. É sugerida, então, a continuidade deste trabalho nessa linha.

4 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos através das simulações levaram às seguintes conclusões:

- As opções de recirculação de escória do convertedor LD e utilização da escória do forno-panela para elevar o volume de escória não apresentaram bons resultados em termos econômicos.
- Os melhores resultados foram encontrados nas situações com os insumos “exotérmicos”, prevalecendo o Insumo A. Tal fato reforça a continuidade da prática realizada atualmente.
- O aproveitamento da escória de LD no alto-forno apresenta elevado potencial de ganhos, através da redução do consumo de carvão vegetal e fundentes. Além desses fatores, há diminuição do impacto ambiental gerado pelo descarte dessa escória.

REFERÊNCIAS

- 1 GONÇALVES, W. M. Dissertação de Mestrado: Adequação do Processo de Fabricação de Aço LD, Utilizando Ferro-Gusa Líquido com Baixo Teor de Silício. Belo Horizonte: UFMG, abril 2005
- 2 HEALY, G.W. A new look at phosphorus distribution, Journal of The Iron and Steel Institute, July 1970, p 664-668.