



## DESENVOLVIMENTO E UTILIZAÇÃO DE UM MODELO MATEMÁTICO DE BALANÇO TÉRMICO DE UM FEA COMO FERRAMENTA DE AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS TÉCNICOS E ECONÔMICOS NO USO DE GUSA LÍQUIDO<sup>1</sup>

Thiago Pinto Wandekoker<sup>2</sup>  
Breno Totti Maia<sup>3</sup>  
Paulo Hopperdizer<sup>4</sup>  
José Roberto de Oliveira<sup>5</sup>

### Resumo

Neste trabalho foi desenvolvido um modelo matemático para o balanço térmico e de massa para Forno Elétrico a Arco (FEA) levando em consideração o percentual de gusa líquido carregado no forno. O modelo desenvolvido é baseado em dados metalúrgicos e termodinâmicos, cujos resultados foram validados através da análise de dados de processo de um FEA de 80 toneladas. O modelo desenvolvido permite a parametrização das perdas térmicas envolvidas e então confronto dos valores de entrada e de saída calculados com os valores reais de processo, possibilitando a extrapolação dos parâmetros e determinação de condições otimizadas de operação. Como resposta do modelo obtém-se, curvas que relacionam o uso do gusa líquido com demais parâmetros de processo do FEA, como, consumo de energia elétrica, necessidade de carbono, necessidade de fundentes e consumo de gases.

**Palavras-chave:** Forno elétrico a arco; Gusa líquido; Balanço térmico.

### DEVELOPMENT AND USE OF A MATHEMATICAL MODEL OF THERMAL BALANCE FOR EAF AS A TOOL FOR THE EVALUATION OF TECHNICAL AND ECONOMIC PARAMETERS AT THE HOT METAL USE

### Abstract

In this paper was developed a mathematical model to thermal and mass balance for Electric Arc Furnace (EAF) taking into account use of hot metal charged. This model is based on metallurgical and thermodynamic data and the results were validated through analyzing of process data from 80 tons EAF. The model allows the parameterization of the thermal losses involved and then to confront the input and output values calculated with the actual values of process. It is possible extrapolation of parameters to determine optimal operating conditions. In response of the model is obtained, curves that relate the use of hot metal with other FEA process parameters, such as, energy consumption, carbon required, need of fluxes and gas consumption.

**Key words:** Electric arc furnace; Hot metal; Thermal balance.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 43º Seminário de Aciaria – Internacional, 20 a 23 de maio de 2012, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro de Controle e Automação, Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais do Instituto Federal do Espírito Santo – IFES e Pesquisador da Lumar Metals, sócio da ABM,

<sup>3</sup> Engenheiro de Metalúrgico e Pesquisador da Lumar Metals, sócio da ABM,

<sup>4</sup> Engenheiro Metalúrgico e Diretor da Lumar Metals, sócio da ABM,

<sup>5</sup> Professor Doutor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais do Instituto Federal do Espírito Santo – IFES.



## 1 INTRODUÇÃO

Os fornos elétricos a arco (FEA) vêm ao longo dos anos aprimorando seus processos, notadamente pela busca de novas fontes de energia, principalmente de origem química através de injeções de gases ou através do uso de metal líquido. O uso destas novas fontes de energia é determinante na composição do custo final do aço produzido, mas impõe novos grupos de parâmetros operacionais que necessitam de tratativa adequada para garantir estes novos requerimentos de processo, as quais: ajustes de balanço de massa, ajustes de balanço térmico.<sup>(1)</sup>

Uma breve descrição dos desenvolvimentos dos fornos elétricos pode ser caracterizada em três distintos períodos, segundo Jones.<sup>(2)</sup> O primeiro entre os anos de 1985 e 1995, buscando práticas operacionais e novos conceitos de projetos para atender a redução de custos operacionais e aumento de qualidade. Também nesta época, alternativas foram apresentadas para reduzir os custos dos convencionais fornos elétricos de corrente alternada (AC EAF). O desenho dos fornos elétricos sofreu alterações consideráveis, com fornos mais largos e maior aporte de energia, com claros objetivos de reduzir o tempo de fusão.

No segundo período, entre 1995 e 2005, as atenções voltaram-se para o processo propriamente dito, com acréscimos de equipamentos com o objetivo de aumentar e melhorar a distribuição de energia nos fornos elétricos. Este período também é caracterizado por projetos de fornos elétricos de grandes capacidades, em torno de 1.000.000 toneladas de aço por ano. Em 2000, uma atenção especial foi dada as escórias, pois a utilização de metal líquido e outras fontes de carbono implicaram em um maior aporte de sílica na escória, sendo necessárias correções na basicidade, principalmente na ternária, para a correção da alumina vinda de sucatas de má qualidade.

Segundo Jones,<sup>(2)</sup> o terceiro período de desenvolvimento dos fornos elétricos compreendem os anos de 2005 até os dias atuais, sendo este período focado em fornos elétricos cada vez maiores e no aumento da capacidade dos transformadores, com claros objetivos de redução do tempo de elaboração do aço (*Tap to Tap Time*), com conseqüências na altura dos fornos elétricos.

## 2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo utilizar balanços de massa e balanços térmicos estáticos para investigar os efeitos da variação de carga metálica líquida sobre os demais parâmetros operacionais de um forno elétrico a arco.

Através da parametrização das perdas térmicas envolvidas no processo de elaboração do aço, feita a partir da coleta de dados reais de processo em um FEA de 80 t, é possível confrontar os valores de entrada e saída calculados pelo modelo com os valores reais de processo, permitindo extrapolação dos parâmetros para determinação de condições otimizadas de operação. Como resultado do modelo, obtém-se a partir da variação da quantidade de gusa líquido no FEA, curvas que relacionam parâmetros de processo, como por exemplo: consumo de energia elétrica, necessidade de carbono, necessidade de fundentes e consumo de gases.

## 3 MÉTODO

A seqüência de execução dos cálculos executados pelo modelo proposto segue o fluxo apresentado na Figura 1.

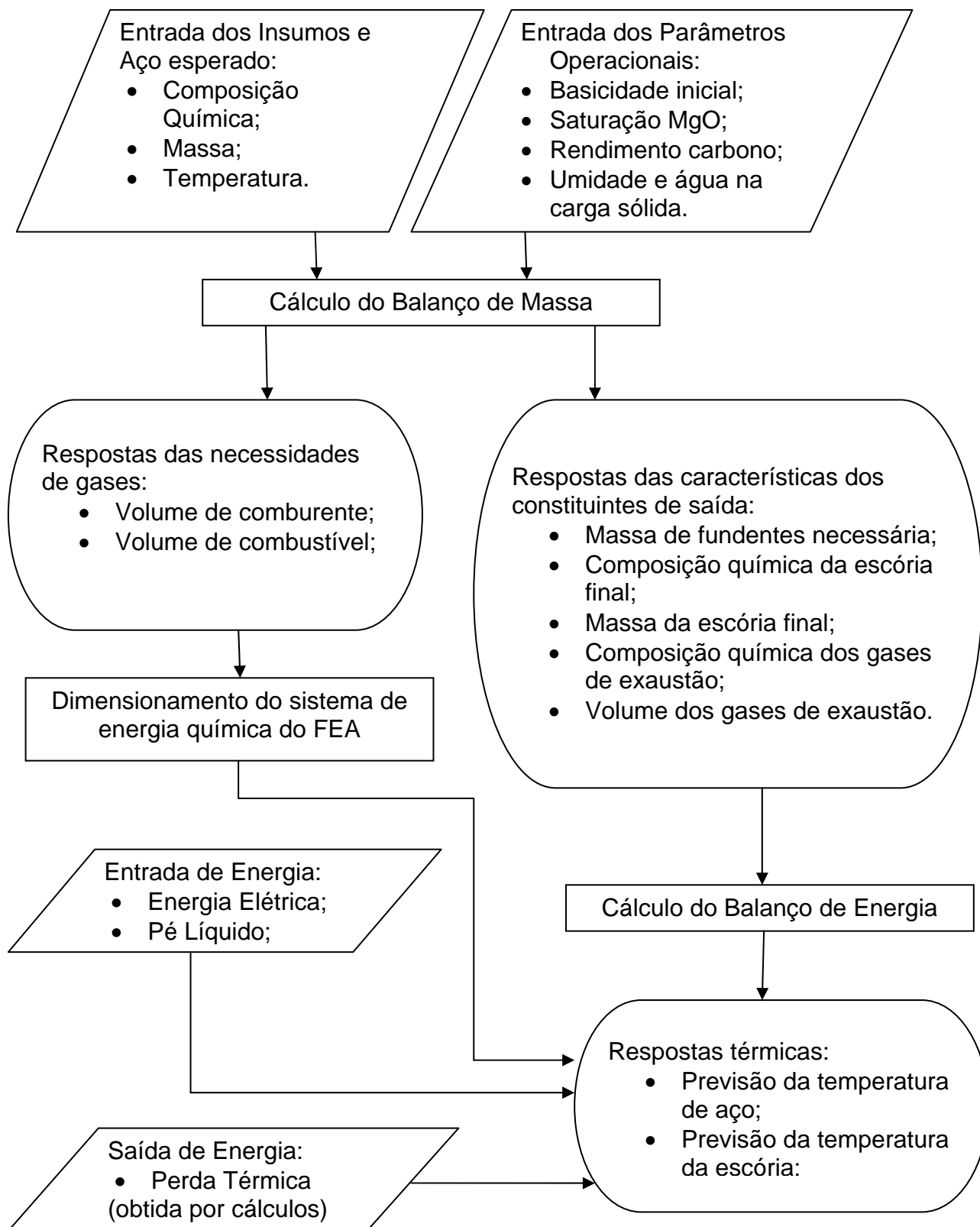


Figura 1. Fluxo para resolução dos balanços de massa e de energia.

O fluxograma apresentado na Figura 1 tem início com as informações de disponibilidade de massa e composição dos insumos que serão empregados na produção de aço. Além destas informações são necessários informações sobre parâmetros de processos pretendidos, como basicidade inicial, saturação de MgO



na escória assim com a composição final do aço. Estes valores têm origem em estudos prévios e em muitos casos em experiências anteriores, mas são de extrema importância nos balanços de massa para aumentar a representatividade dos modelos termodinâmicos.

Os balanços de massas foram executados considerando a base molar dos elementos e as conversões para volume considerando tratar de gases ideais e, portanto, volume molar. A partir dos volumes envolvidos, quando fornecido as expectativas de tempo de processo, é possível efetuar o dimensionamento dos equipamentos que irão compor o sistema de energia química do FEA (injetores e queimadores), porém este dimensionamento não está sendo considerado neste trabalho. A resposta do balanço de massa: massa de aço, massa de escória e volume dos gases de exaustão, são os elementos de entrada para o balanço térmico assim como as temperaturas envolvidas. No balanço térmico são consideradas as entalpias de aquecimento, transformação e reação química.

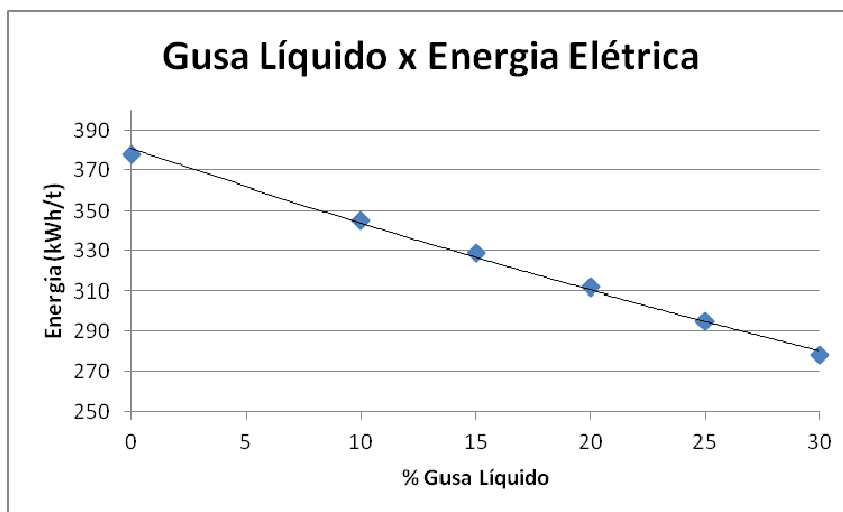
Foi realizado um trabalho prévio de validação do modelo desenvolvido, ao qual se utilizou parâmetros de entrada dados reais de processo para determinação da perda térmica em situações típicas de corrida, com carga de metal líquido variando de 0% a 28% da carga total do FEA, sendo a carga média total de gusa (gusa sólido + gusa líquido) das corridas analisadas 30%. Após a análise destas corridas através do modelo proposto, para efeito de cálculos teóricos e conceituais, o parâmetro de entrada “perda térmica” foi considerado constante para o cálculo da previsão do consumo de energia, consumo de gases e parâmetros da escória como desenvolvimento de cenários teóricos e conceituais.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

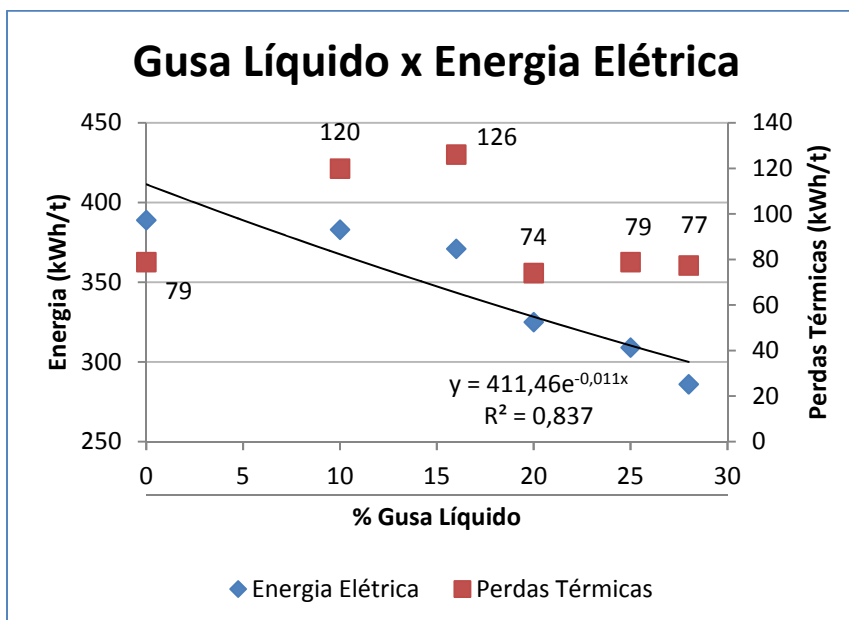
Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos pelo modelo desenvolvido através da análise de dados reais de processos e também dados conceituais.

Chevrand e Cândido,<sup>(3)</sup> em seu balanço térmico simplificado para FEA adotam valores de perdas térmicas que variam entre 115 kWh/t e 129 kWh/t, de acordo com a capacidade nominal do FEA. Após simulações diversas com dados reais de processo de um FEA de capacidade de 80 t foi observado que o valor médio das perdas térmicas apuradas nas corridas analisadas ficaram em torno de 93 kWh/t. Este parâmetro será utilizado para a realização da simulação de cálculos teóricos e conceituais visando a obtenção de condições otimizadas de processo. A perda térmica é diferença entre o somatório de entradas de energia e o somatório de saídas de energia, representando todas as saídas não mensuradas no sistema FEA, como calor extraído pelos painéis refrigerados, refratários, exposição ao ambiente durante carregamentos, por exemplo.

A Figura 2 apresenta o resultado teórico, obtidos através do modelo de balanço térmico proposto, do consumo de energia elétrica em função da utilização de gusa líquido na carga do FEA. Os resultados obtidos mostram que para cada ponto percentual de gusa líquido utilizado na carga há uma redução do consumo de energia elétrica na ordem de 3,6 kWh/t. Este resultado foi obtido através da manipulação do consumo de energia elétrica em substituição do uso do gusa líquido para a manutenção do valor de perda térmica constante (93 kWh/t). Paula et al.,<sup>(4)</sup> após realização de testes práticos em FEA de 100 t, apuraram que para o processo em questão o valor de equivalência de um ponto percentual de gusa líquido na redução do consumo de energia foi de 3,0 kWh/t.



**Figura 2.** Redução do consumo de energia elétrica em função do uso de gusa líquido na carga – Análise teórica.



**Figura 3.** Redução do consumo de energia elétrica em função do uso de gusa líquido na carga – Dados práticos.

O gráfico apresentado na Figura 3 correlaciona dados reais de processo de um FEA de 80 t, cujo as principais características estão apresentadas na Tabela 1, que utiliza gusa líquido na carga. O consumo de energia elétrica no processo de elaboração do aço no FEA sofre redução na medida em que se eleva o percentual de gusa líquido na carga, sendo que a equivalência energética média do gusa líquido para o caso analisado ficou em 3,7 kWh/t, muito próximo aos 3,6 kWh/t teóricos. É esperado que se encontrem variações, tanto para cima quanto para baixo, no valor de equivalência de energia elétrica do gusa líquido nos diferentes processos de diferentes usinas, isto principalmente pelo fato de que as práticas operacionais e equipamentos utilizados em cada usina influenciam diretamente neste parâmetro. Por isso é importante antes de se utilizar modelos para otimização dos parâmetros de processo seja feito a parametrização dos mesmos a cada diferente aplicação.

**Tabela 1.** Características gerais do FEA analisado

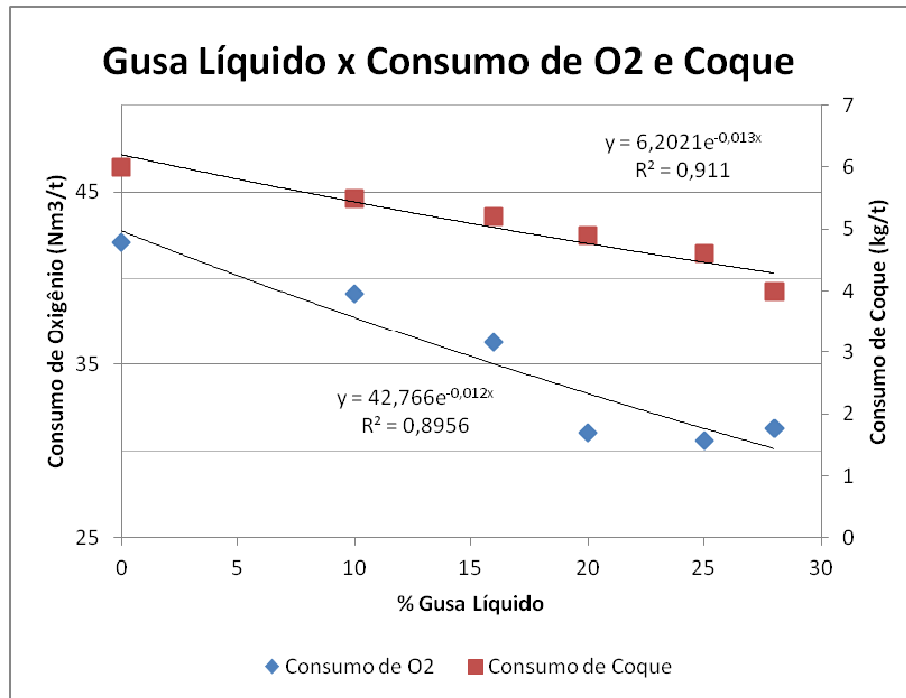
Capacidade nominal	80 t
Carga enfiada (total)	85,6 t
Quantidade de carregamentos (sem gusa líquido)	2 carregamentos
Quantidade de carregamentos (com gusa líquido)	3 carregamentos
Rendimento metálico	88%
Pé líquido	3 t
Potência transformador	75 MVA
Percentual de gusa na carga (sólido + líquido)	30%
Injetores de oxigênio (convencionais)	3 x 1.500 Nm <sup>3</sup> /h
Queimadores oxi-combustíveis	3 x 3,5 MW
Manipulador de porta	Max 2.400 Nm <sup>3</sup> /h
Power on	37 min

O resultado geral era esperado, mas analisando os pontos é possível notar que para a utilização de 10% e 15% de gusa líquido, o valor de perda térmica foi superior aos demais, atingindo 126 kW/t, não sendo observado a queda no consumo de energia prevista pela regressão. O fato pode estar associado ao aumento do número de carregamentos com a entrada da carga líquida, mas, entretanto esta quantidade ser insuficiente para compensar as perdas geradas pelo tempo necessário (*power off*) para o carregamento.

Uma vez estimada estas perdas térmicas para condição de corridas sequenciadas com um, dois ou mais carregamentos, ou mesmos em condições após longos períodos de parada é possível criar um banco de dados específico para que estes valores sejam utilizados para prever a temperatura de vazamento com base nos dados de entrada da nova corrida.

A Figura 4 apresenta outra análise de dados reais de processo. Com o aumento do percentual de gusa líquido na carga ocorre a redução no consumo de oxigênio do FEA, bem como a redução do consumo de carburante. Um dos motivos é a substituição do carbono injetado pelo carbono do gusa líquido. Quando se utiliza gusa líquido na carga do FEA a etapa de descarburização torna-se rápida e intensa quando comparada com a utilização de gusa sólido. Isto é facilmente compreendido se analisarmos que, uma vez vertido dentro do FEA, o carbono fornecido pelo gusa líquido está instantaneamente disponível, em volume e em massa, para as reações de descarburização, ao passo que, quando utilizado gusa sólido (carbono disperso em fase sólida) as reações de descarburização acontecem a medida em está sendo fundido, resumindo, a eficiência de reação das interfaces gás-líquido é maior que nas interfaces gás-sólido.

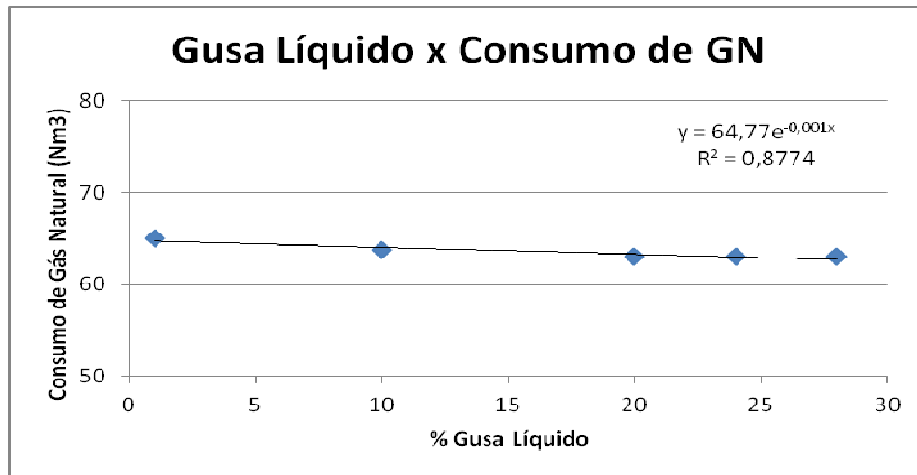
Por outro lado este gráfico também mostra a baixa eficiência do sistema de injeção de oxigênio no FEA, que é composto por injetores supersônicos convencionais. Uma vez que a quantidade total de carbono no FEA é a mesma para todas as corridas analisadas (gusa total carregado: 30%), grandes variações no consumo de oxigênio não eram esperadas. A baixa eficiência do oxigênio injetado também pode ser verificada pelo teor de FeO (óxido de ferro) presente na escória, que para o caso citado é em média 46,8% (em massa). O percentual de FeO elevado encontrado na escória contribui negativamente em outro parâmetro operacional do FEA, o rendimento metálico do FEA, que para o caso analisado é de 88%.



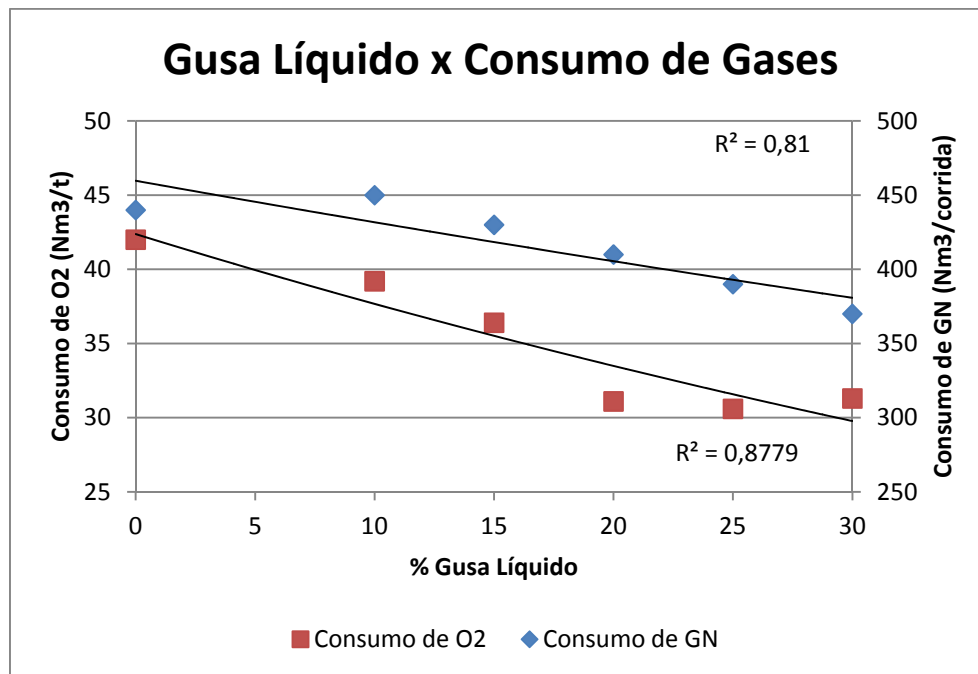
**Figura 4.** Comportamento do consumo de oxigênio e carburante em função da utilização de gusa líquido na carga do FEA – Dados práticos.

A Figura 5 também apresenta dados reais de processo e mostra que para o caso analisado a variação no consumo de GN em função do percentual de gusa líquido utilizado na carga praticamente não existe. Isto se deve, principalmente, ao fato de que a tecnologia de injeção de energia química utilizada no FEA analisado tratar-se de injetores supersônicos convencionais e queimadores oxi-combustíveis, como equipamentos distintos. O consumo de GN ocorre basicamente na fase queimador, programada para o início de fusão do primeiro e segundo cesto de sucata e a duração da fase queimador é a mesma, seja qual for o percentual de gusa líquido utilizado no FEA. Quando não há utilização de gusa líquido na carga a fase queimador é um pouco mais prolongada, justificando o consumo levemente maior de GN para estes casos.

Espera-se que, em fornos modernos, onde a utilização de energia química é imperativa, o consumo de GN sofra redução proporcional a redução do consumo de oxigênio secundário dos injetores. Além da redução do consumo de gases, sistemas de energia química equipados com injetores de alta eficiência proporcionam ainda outros ganhos metalúrgicos e operacionais, tais como: redução do consumo de energia elétrica, incremento do rendimento metálico (produtividade), menor geração de respingos (*splash*) e maior formação de bolhas em função do alto grau de agitação do banho provocado pelo sistema.



**Figura 5.** Consumo de gás natural em função do uso de gusa líquido na carga do FEA – Dados práticos.



**Figura 6.** Relação entre o uso de gusa líquido e a necessidade de consumo de gases no FEA – Análise teórica.

Mantida a injeção de carbono pulverizado constante para as corridas com gusa líquido, apenas para efeito de formação de escória espumosa e o controle do percentual de óxido de ferro (FeO) na escória, a Figura 6 apresenta o cálculo teórico que indica a necessidade do incremento de consumo de GN como fonte energética em substituição a redução do carbono injetado, para que o valor do termo perda térmica, ajustado no modelo seja mantido constante. Caso o GN não seja injetado no FEA outra fonte de energia, em geral energia elétrica, será necessária para o fechamento do balanço térmico.

A Figura 7 apresenta a influência do aumento do uso de gusa líquido no comportamento do consumo de cal calcítica e a influência na basicidade.



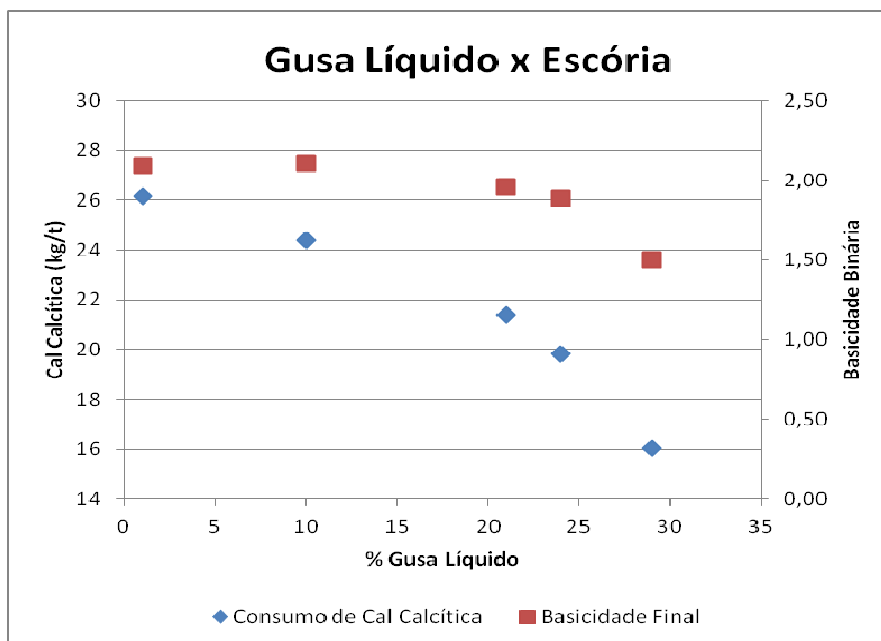


Figura 7. Basicidade binária e consumo de CaO em função do uso de gusa líquido – Análise teórica.

Na Figura 8, com o aumento da carga de gusa líquido existe um aporte maior de silício que será transformado em sílica ( $\text{SiO}_2$ ). Neste estudo foi determinada uma relação inicial  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  fixa para todas as simulações, entretanto, considerando impurezas da sucata, o valor final da basicidade binária decresce com o aumento do uso de gusa líquido na carga.

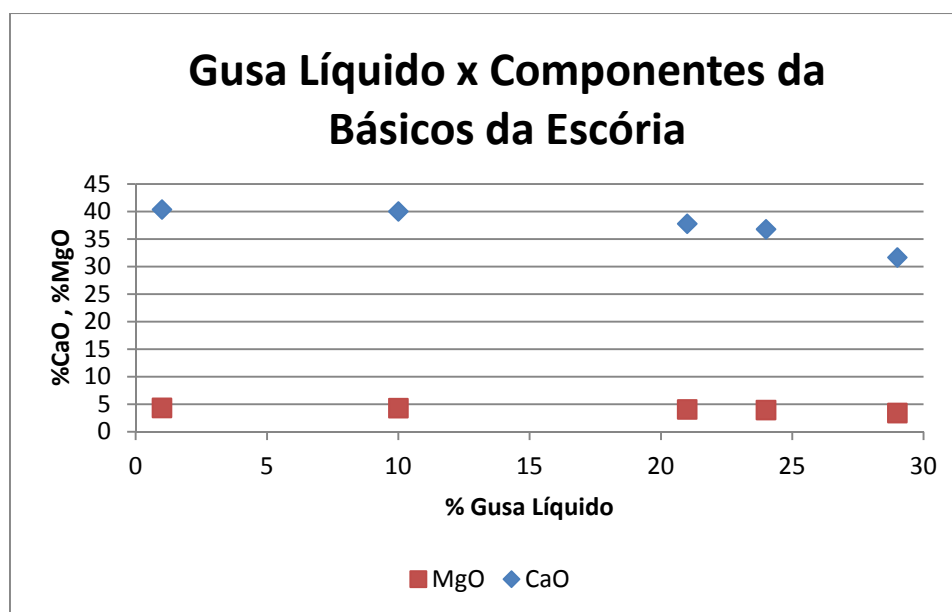


Figura 8. Componentes básicos da escória em função do uso de gusa líquido – Análise teórica.

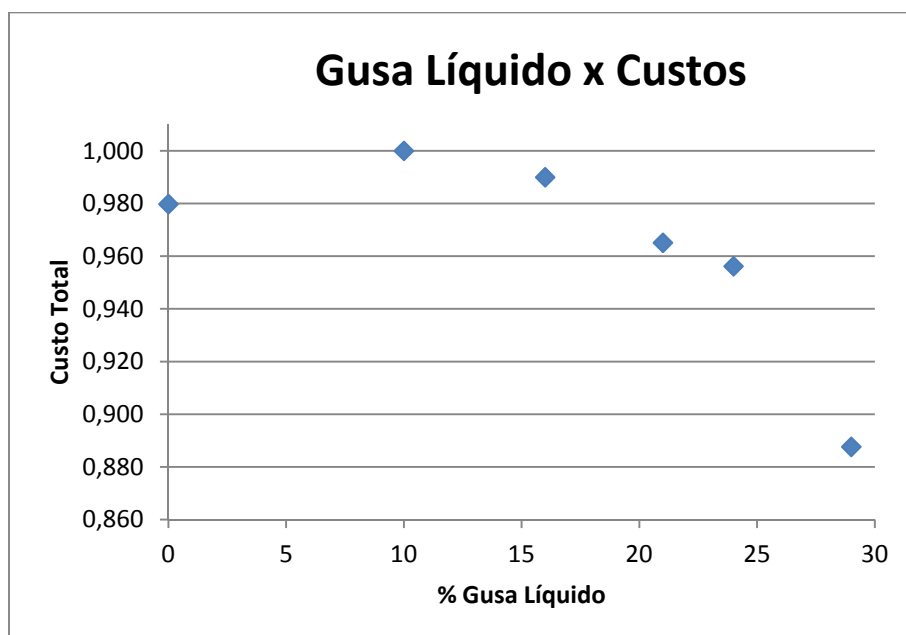
Outra conclusão é que o percentual de óxido de cálcio depende somente da cal calcítica com pequena participação da cal dolomítica. Este fato é observado na balanço de escória que aponta um valor médio de somente 4% MgO. Valor insuficiente para saturar a escória e proteger o refratário do forno elétrico (Figura 8). O presente estudo comprova a necessidade de correções da carga de fundentes (quantidade e tipo) em função do tipo de carga enforada para garantir um melhor desempenho dos refratários do forno. Nestes acertos podem ser levados em



consideração outros fatores aos quais capacidade de desfosforar assim como incremento de MgO, visando novamente, o desempenho da campanha refratário do forno elétrico.

Em termos econômicos, sabendo-se dos custos envolvidos no processo de fabricação do aço é possível através do uso do modelo simular diversos cenários de utilização de matérias prima e insumos (variando o consumo de gusa líquido, consumo de GN, quantidade de carbono injetado, fundentes, pé líquido, etc.) e então avaliar o impacto econômico, buscando soluções otimizadas de processo.

Além das vantagens metalúrgicas e de processo o uso do gusa líquido em FEA também se mostrou extremamente vantajoso do ponto de vista econômico. Fazendo uma análise simplória apenas da substituição do uso da energia elétrica pelo uso do gusa líquido no FEA é possível afirmar que o custo do Kwh/t fornecido através do gusa líquido é mais do que 16 vezes menor do que o custo do kWh/t fornecido através do sistema elétrico de energia, isto considerando-se que o gusa é adquirido em fornecedores externos. Quando a fabricação do gusa é feito internamente na própria usina esta relação torna-se ainda mais vantajosa. A Figura 9 apresenta a variação do custo final estimado de produção de aço em função da variação da carga de gusa líquido. Os custos envolvidos nesta análise foram limitados a: carga metálica, fundentes, carburante, gases e energia.



**Figura 9.** Comparativo da evolução do custo de produção do aço versus o uso do gusa líquido na carga.

## 5 CONCLUSÃO

As principais conclusões do presente trabalho são:

1. A metodologia utilizada e o modelo proposto apresentaram boa precisão na previsão de redução de energia elétrica em função do uso de gusa líquido no FEA. Redução de energia elétrica prevista pelo modelo: 3,6 kWh/t para cada percentual de gusa líquido na carga. Redução de energia elétrica apurada: 3,7 kWh/t para cada percentual de gusa líquido na carga;
2. foi verificado que para utilização de carga de gusa líquido inferior a 15% do carregamento total do FEA as perdas térmicas inerentes a adição de mais um



- carregamento no FEA são maiores que os ganhos energéticos obtidos pela adição do gusa, e por isso a redução do consumo de energia elétrica obtida nestes casos são inferiores às previstas pela regressão;
- o uso de 28% de gusa líquido no carregamento do FEA impactou na redução de cerca de 26,5% no consumo de energia elétrica do FEA;
  - foi verificado um consumo menor de oxigênio para corridas que utilizam gusa líquido. Este menor consumo está atribuído a uma melhoria na eficiência de reação do oxigênio injetado;
  - ficou comprovada a necessidade de correções da carga de fundentes (quantidade e tipo) em função do tipo de carga enfiada para garantir um melhor desempenho dos refratários do forno; e
  - em termos econômicos o uso do gusa líquido em FEA também se mostrou extremamente vantajoso. Foi apurado que o custo do Kwh/t fornecido através do gusa líquido é mais do que 16 vezes menor do que o custo do kWh/t fornecido através do sistema elétrico, isto considerando-se que o gusa é adquirido em fornecedores externos. Quando a fabricação do gusa é feita internamente na própria usina esta relação torna-se ainda mais vantajosa.

## Agradecimentos

Os componentes do trabalho agradecem a Lumar Metals pelo incentivo a pesquisa continuada.

## REFERÊNCIAS

- CÂNDIDO, F. S., PASSOS, S. R. M., ALBUQUERQUE, B. T. S., GOMES, N. H. G., COELHO, E. S., *Modelo de Carga Fria do FEA – UHP – 50T.*, Anais do 42º Seminário de Aciaria Internacional. ABM. Pag. 8 – 19. Salvador, Brasil. Mai. 2010.
- JONES, J. A. T., *EAF Steelmaking – Current State of the Art Technology and Future Developments.*, Anais da 18º Conferência de Aceria. IAS. Pag. 1 – 18. Rosário, Argentina. Nov. 2011.
- CHEVRAND, L. J. S., CÂNDIDO, F.S., *Balanço Térmico de Forno Elétrico a Arco – Simples e Inteligente.* Anais do 38º Seminário de Aciaria Internacional. ABM. Pag. 21 – 29. Belo Horizonte, Brasil. Mai. 2010.
- PAULA, A. O., ARAÚJO, A. M., RIBEIRO, S. R., FURTADO, T. L. C., LIMA, W. L. S., *Aciaria Elétrica e Utilização de Gusa Líquido.* Anais do 42º Seminário de Aciaria Internacional. ABM. Pag. 792 – 800. Salvador, Brasil. Mai. 2011.