

## EOF DEVELOPMENTS STAGE 1– SUPERSONIC FIXED INJECTORS\*

Breno Totti Maia<sup>1</sup>  
Paulo Roberto Ogliari Hopperdize<sup>2</sup>  
Marcelo Ferreira Martins<sup>3</sup>  
Leandro Martins Perreira<sup>4</sup>  
Geraldo Vieira da Silva<sup>5</sup>  
Sandro Luís Zahner<sup>6</sup>

### Resumo

O reator EOF foi desenvolvido no Brasil nos anos 80 com características únicas. O pré-aquecedor de sucata e a distribuição dos pontos de injeção de gases oxidantes e combustíveis conferem estas características. Um reator dinâmico e versátil capaz de adequar-se a grandes variações de carregamento de gusa e sucata, porém com equipamentos de injeção calcados ainda nos princípios da concepção da tecnologia. O objetivo deste trabalho é apresentar a etapa 1 de uma seqüência planejada de 3 etapas os desenvolvimentos que visam o aumento de produtividade do EOF. Nessa etapa 1 são apresentadas os ganhos relativos a modificação do número de pontos de injeção de oxigênio e a adequação desses pontos para condição supersônica de sopro.

**Palavras-chave:** EOF; Lanças supersônicas fixas; Tempo de sopro, Perda metálica, Consumo oxigênio.

### EOF DEVELOPMENTS STAGE 1– SUPERSONIC FIXED INJECTORS

### Abstract

The EOF reactor was developed in Brazil in the eighties with unique features. The preheating of scrap and distribution of injection points oxidizing gases and fuels make up these features. A dynamic and versatile reactor able to support big variations between scrap and hot metal charged, by the way with same devices to inject oxygen since when technology start up. This papers aims to show stage 1 of plan sequence of 3 stages of developments that look for increase EOF productivity. In this stage 1 are presented gains related of change number of points to inject oxygen and adaptation of this points for supersonic blow conditions.

**Keywords:** EOF; Fix supersonic lances; Blow time, Metallic lost, Oxygen consumption.

<sup>1</sup> Sócio da ABM; Engenheiro Metalurgista e Doutor Pesquisador e Diretor Técnico da LUMAR METALS; Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Sócio da ABM; Engenheiro Metalurgista e Diretor Técnico da LUMAR METALS; Porto Alegre, RG, Brasil.

<sup>3</sup> Assessor de Processo da Gerdau Divinópolis, Divinópolis, MG, Brasil.

<sup>4</sup> Assessor de Processo da Gerdau Divinópolis, Divinópolis, MG, Brasil.

<sup>5</sup> Gerente de Manutenção da Gerdau Divinópolis, Divinópolis, MG, Brasil.

<sup>6</sup> Sócio da ABM, Gerente da Aciaria da Gerdau Divinópolis, Divinópolis, MG, Brasil..

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo o Manual da KORTEC (1986)<sup>(1)</sup>, os tradicionais “Open Hearth Furnace”, dependendo exclusivamente de combustível para produzir energia de aquecimento, tinham seu limite prospectado. O processo então denominado “KORF – KORF OXI-REFINING FUEL” foi um sistema integrado envolvendo modificações nas estruturas dos Siemens-Martin (Open Hearth), mudanças no revestimento dos fornos e mudanças nos métodos e práticas de operação através de uma combinação dos processos regenerativos e pneumáticos. Um dos principais parâmetros foi o aumento da produtividade horária, aproximadamente o dobro, como consequência da redução do tempo de ciclo. Com a redução do tempo de tap to tap, a perda térmica foi reduzida, assim como a necessidade de combustível contribuindo para o aumento da competitividade do aço com a redução dos custos operacionais. Com os princípios fundamentais do KORF, novos desenvolvimentos foram realizados na planta da Pains resultando no EOF (“Energy Optimizing Furnace”), um forno com grande flexibilidade no processo. A Figura 1 apresenta um esquema da primeira concepção do EOF.

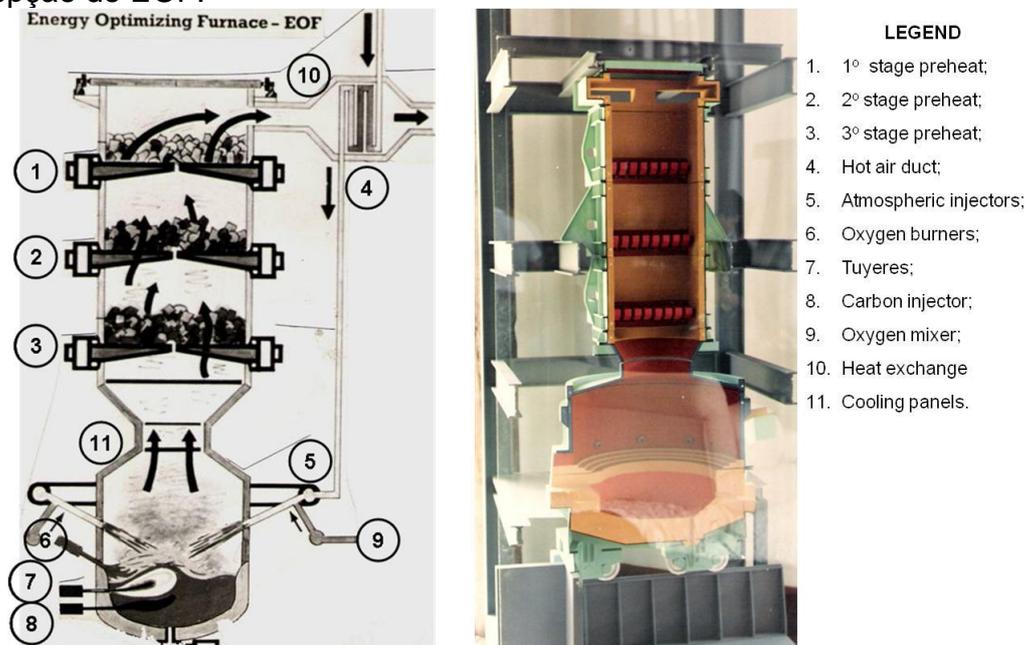


Figura 1- Concepção do primeiro EOF: (a) Esquema e (b) Maquete (Catálogo da Companhia Siderúrgica Pains, 1978)<sup>(2)</sup>.

Na Figura 1, conforme Catálogo da Companhia Siderúrgica Pains<sup>(2)</sup>, pode ser visto que o EOF originalmente era composto com estágios de pré-aquecimento de sucata indicados pelos números de 1 a 3. Cada etapa de pré-aquecimento representa uma corrida a ser processada no refino primário. Na concepção, o EOF dispunha de um sistema para pré-aquecer o ar (nº.10), auxiliando os injetores de pós-combustão (nº. 5) que podiam ainda, ter sopro enriquecido com oxigênio (nº. 9). Era possível recarburar o banho através de injeção de carbono (nº. 8), ou por outro lado, aumentar a descarburagem através de ventaneiras (nº. 7). Um dos grandes avanços do processo foi à inserção dos queimadores de oxigênio (nº. 6), que contribuíram para acelerar as reações de oxidação do banho. Acima da linha dos refratários, todo o caminho do gás de combustão é contido por painéis refrigerados (nº. 11). Após o aproveitamento da energia para pré-aquecer a sucata, a energia remanescente ainda é aproveitada no recuperador (nº. 10) para pré-aquecer também o ar para pós-

combustão. Desta configuração original para a atual, muitas alterações foram feitas tanto com relação à funcionalidade dos equipamentos quanto principalmente aos conceitos utilizados face as reais possibilidades de ganho deste reator siderúrgico. O EOF atualmente utiliza um pré-aquecimento de sucata simples e eficiente através de gases produzidos no processo pela injeção de oxigênio no banho de ferro-gusa líquido juntamente com sucata. Com 32% de sucata pré-aquecida e 68% de ferro-gusa líquido, essa carga típica possui energia suficiente proveniente das reações do oxigênio com carbono, silício, manganês, fósforo e ferro para processar a corrida sem o auxílio de outra fonte externa de energia. A sucata é suportada por garfos de modo que os gases quentes gerados na corrida em processamento a aquecem neste local chamado de “Pré-Aquecedor”, colocado imediatamente acima do forno. Este é único caminho para saída dos gases do forno, provocando um pré-aquecimento da sucata a valores superiores a 800°C, sendo necessário ar para controle de temperatura. A sucata pré-aquecida em uma corrida é carregada na corrida posterior. O CO remanescente da pós-combustão é queimado no pré-aquecedor, gerando calor e contribuindo para o pré-aquecimento da sucata. O oxigênio necessário para o refino primário da corrida é injetado de três formas: ventaneiras, lanças supersônicas e injetores atmosféricos. Tabela 1<sup>(4)</sup> apresentam a distribuição do oxigênio no EOF e sua principal influência no refino.

**Tabela 1 - Forma de injeção de oxigênio no EOF.**

Equipamento	Posição	Quantidade	%Oxigênio	Influencia
Ventaneira	Parede próxima a sola e canal de vazamento	2	15	Movimento banho e descarburacão
Lança Atmosférica	Parte superior dos painéis	4	57	Formação scoria e pós-combustão
Lança Supersônica	Parte superiores dos painéis próximo porta escória	2	28	Descarburacão

O pré-aquecimento da sucata e sua forma de carregamento, a injeção de oxigênio durante o carregamento de ferro-líquido na etapa de fusão, vazamento de escória e medição de temperatura de carbono e temperatura ao longo do processo de sopro conferem ao EOF um reduzido tempo de processo, em torno de 28 minutos por corrida, sendo um grande diferencial deste equipamento<sup>(4)</sup>.

## 1.1 PRÁTICAS ATUAIS

Uma vez descida a sucata dos pré-aquecedores para a sola do forno, é carregado o ferro-gusa líquido e ao mesmo tempo é iniciado o sopro pelas ventaneiras e injetores. Durante o carregamento do ferro-gusa também é iniciada a adição de escorificantes (cal calcítica e cal dolomítica) para proteção do refratário. A necessidade de uma rápida adição do material escorificante reside no fato da escória aos 2 minutos começar a verter pela porta de escória, aumentando o arraste de ferro e não havendo tempo suficiente para dissolução da cal no banho.

Com o completo enforamento do ferro-gusa, são acionadas as lanças supersônicas. As lanças supersônicas são os únicos equipamentos para injeção de oxigênio que possuem movimento de avanço e recuo. A principal forma de controle

da vazão total de oxigênio no EOF é através de controle dos injetores atmosféricos. Devido às particularidades do EOF, a seqüência de operação do refino primário tem grande similaridade com um forno elétrico, muito embora todas as reações sejam determinadas pelo oxigênio injetado.

Com o carregamento de ferro-gusa finalizado, inicia-se a fusão durando aproximadamente 10 minutos, podendo este tempo variar em função da composição química da carga metálica, da temperatura e da quantidade de ferro-gusa. Simultaneamente à fusão da sucata, também ocorrem reações de oxidação dos elementos do banho líquido e dissolução da cal, contribuindo para o gradativo aumento do volume de escória<sup>(4,5)</sup>.

O EOF possui um sistema de basculamento hidráulico que limita sua movimentação em 8° em relação a vertical, nos dois sentidos, permitindo o vazamento de aço em um sentido e o vazamento de escória no outro. Com a sucata completamente líquida, a próxima etapa é essencialmente de refino através da oxidação dos elementos do banho. Nesta etapa ocorre o vazamento contínuo de escória através da porta, tornando o EOF um bom equipamento desfosforante e com altas taxas de aquecimento do metal.

A energia gerada na pós-combustão, principalmente pela reação do oxigênio com carbono, é parcialmente absorvida pelo banho e parcialmente usada para o pré-aquecimento da sucata<sup>(5)</sup>. O calor sensível remanescente dos gases vai pré-aquecer a sucata que está no pré-aquecedor suportada por um sistema de garfos refrigerados à água.

O EOF foi concebido para que as reações de descarburização fossem realizadas através do mecanismo de difusão do carbono do banho líquido até a atmosfera oxidante acima da escória. O equipamento também possuía queimadores a oxigênio com objetivo de acelerar a fusão da sucata. Com os aprimoramentos, foram introduzidas lanças supersônicas que propiciaram uma redução na distância lança-banho através de sua movimentação para o interior do reator, mas também devido ao considerável aumento da velocidade do oxigênio.

## 2 DESENVOLVIMENTO

A metodologia de trabalho foi estabelecida através de equipe multidisciplinar e apoiada sobre premissas e objetivos a cada estágio conforme apresentado na Tabela 2.

**Tabela 2 - Objetivos e premissas dos desenvolvimentos no EOF.**

Etapa	Objetivos	Objetivos Específicos	Premissas
1	Aumento da produtividade horária	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eliminação das lanças supersônicas com avanço;</li> <li>• Substituição dos injetores atmosféricos para supersônicos fixos;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manutenção das condições de pressão e vazão de oxigênio da rede;</li> <li>• Manutenção das linhas e equipamentos de controle de oxigênio existente;</li> </ul>
2	Aumento da estabilidade operacional	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Introdução de blocos refrigerados e adequação dos painéis;</li> <li>• Controle independente por ponto de oxigênio;</li> <li>• Redistribuição dos pontos de injeção de oxigênio ao redor da carcaça;</li> </ul>	
3	Aumento da vida do refratário	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Substituição do gás de injeção pelas ventaneiras;</li> <li>• Redimensionamento dos injetores fixos</li> </ul>	

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após aproximadamente três décadas desde sua posta em marcha, acredita-se ser este uma implementação e reorganização inédita dentro dos conceitos iniciais propostos a concepção do EOF.

As ações foram norteadas por estudos anteriores realizados em modelos físicos<sup>(4,7,8,9)</sup> que apontavam a baixa eficiência dos injetores atmosféricos, a importância das ventaneiras como elementos de homogeneização do banho e os injetores supersônicos como responsáveis pelas taxas de descarburização, conforme retratado pelas Figura 2 e Figura 3.

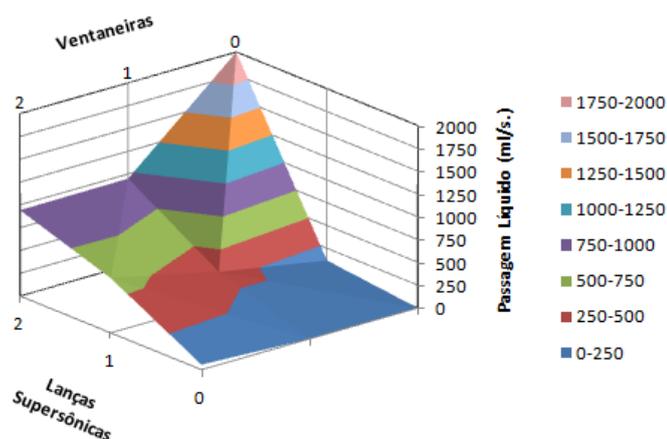


Figura 2 - Taxa de perda de banho passante pela porta de escória do EOF<sup>(9)</sup>.

Na Figura 2, os injetores atmosféricos presentes em todos os ensaios não afetaram a taxa de perda, podendo ser notado na condição onde não estava em operação ventaneiras e lanças supersônicas. Baseado nestes resultados, o aperfeiçoamento do processo o EOF, é a redistribuição das lanças supersônicas, principalmente para região do vazamento de aço, posição ao qual o EOF permanece basculado para +8° em substituição aos injetores atmosféricos, conforme previsto no estágio 2 do desenvolvimento.

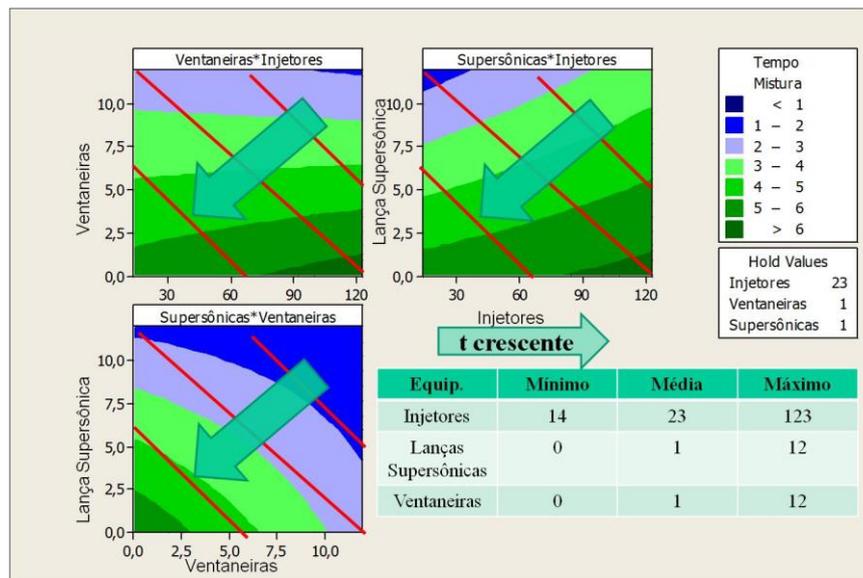


Figura 3 - Superfície de contorno para tempo de mistura no EOF – Valores de saída médios<sup>(8)</sup>.

Porém a discussão está na quantidade de oxigênio, sendo 70%, aplicada nos quatro injetores atmosféricos para obtenção de energia durante a pós-combustão, diante da necessidade de incremento na taxa de descarburização do banho conforme mostrado Figura 3 em relação ao elevado tempo de mistura.

### 3.1 ESTÁGIOS DE DESENVOLVIMENTO DA ETAPA 1

O primeiro estágio da etapa 1 foi o recálculo dos injetores transformando-os de injetores e baixa pressão para injetores de alta pressão, conforme apresentado na Figura 4.

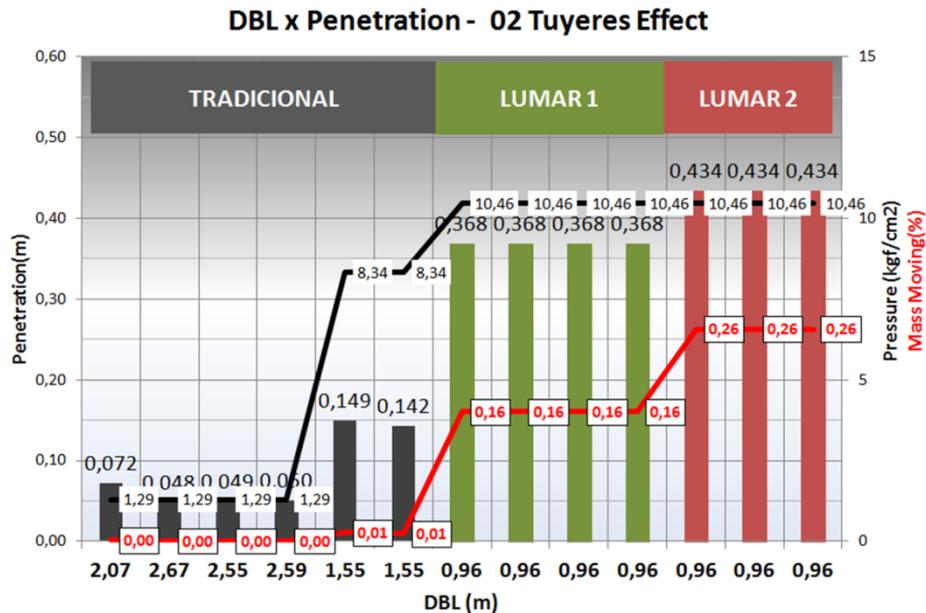


Figura 4 - Estágios de transformação de injetores atmosféricos em supersônicos.

Durante a implementação, o dilema relativo à Figura 4 foi o comportamento da redistribuição da pressão de rede sobre os injetores devido ao fato que os injetores atmosféricos possuem somente um sistema de controle para os quatro pontos de distribuição, conforme apresentado representado na Figura 5.

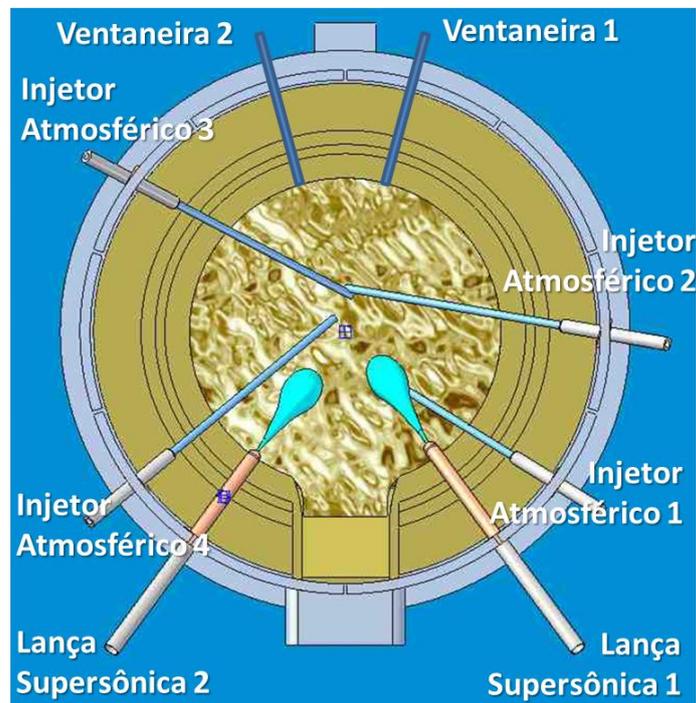


Figura 5 – Tradicional posicionamento das fontes de oxigênio no EOF.

No primeiro estágio foram substituídos os injetores atmosféricos 1, 2, 3 e 4 por 2 injetores supersônicos fixos que foram montados nas posições 2 e 3 tendo cada um o dobro da vazão do injetor atmosférico. Nesse estágio inicial foi possível constatar um aumento da pressão que alimentava a então linha dos injetores atmosféricos. No

processo foi possível notar a intensificação da taxa de descarburização com reflexos positivos na redução do tempo de corrida.

Então com intuito de melhorar o controle e autonomia de injeção, foi realizado o segundo estágio que consistiu em uma modificação ampla, porém mantendo as mesmas posições ao redor dos painéis refrigerados do EOF.

A modificação consistiu em utilizar injetores supersônicos fixos na posição das lanças supersônicas móveis e assim com controles independentes por lança e manter injetores supersônicos fixos nas posições 2 e 3 conforme Figura 6.

Essa redistribuição trouxe ganhos tanto operacionais quanto de manutenção. Os operacionais residem no fato de frequentemente as lanças supersônicas terem a mobilidade comprometida e ficarem soprando oxigênio sobre o refratário do EOF. Do ponto vista da manutenção, as lanças supersônicas móveis são equipamentos de difícil remoção e posicionamento, sendo dos itens que tem significativo impacto no tempo de parada das manutenções preventivas do EOF.

Outro ganho notado na substituição por injetores supersônicos fixos foi na pressão de injeção assim como na pressão da rede de fornecimento de oxigênio. Com a transformação de injetores de baixa para injetores de alta pressão e mantido a mesma vazão total, ocorreu uma pressurização de todo o conjunto.

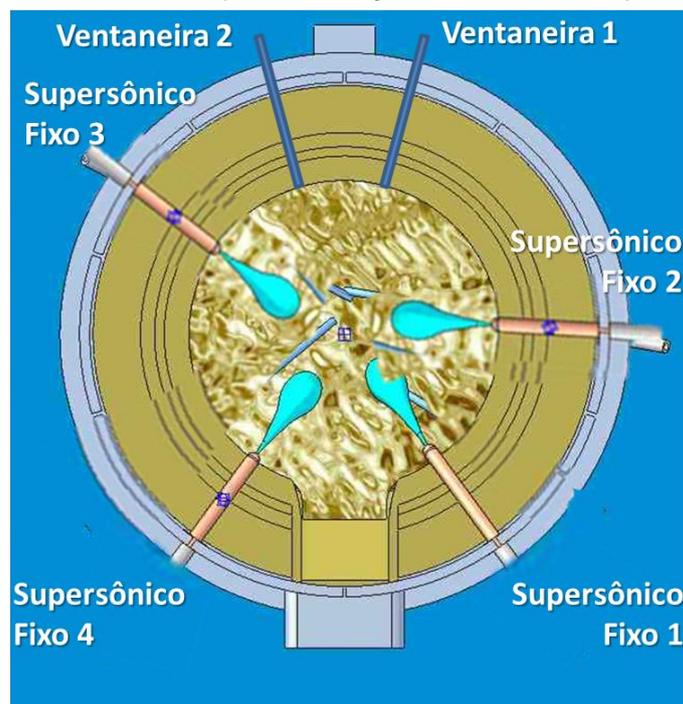
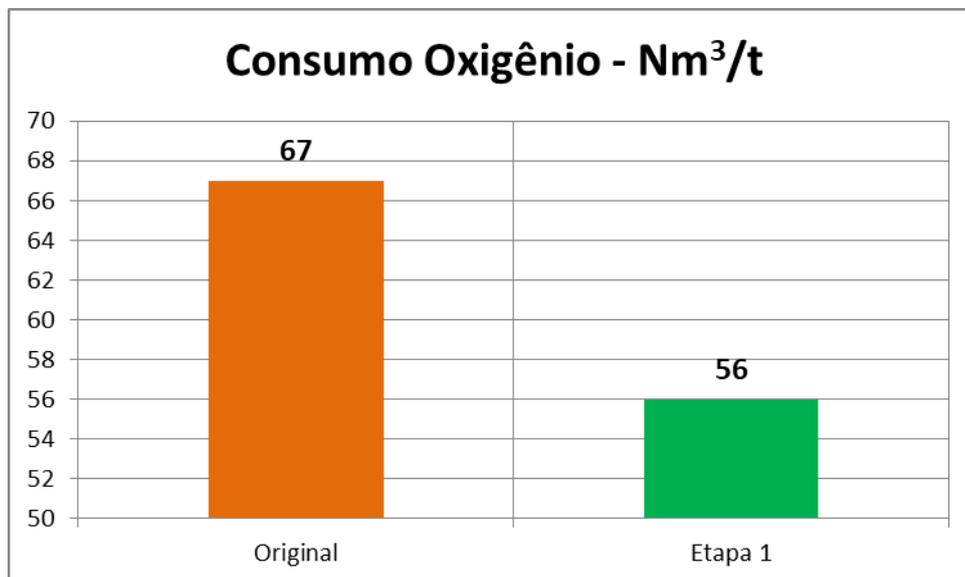


Figura 6 – Posicionamento da Etapa 1 das fontes de oxigênio no EOF.

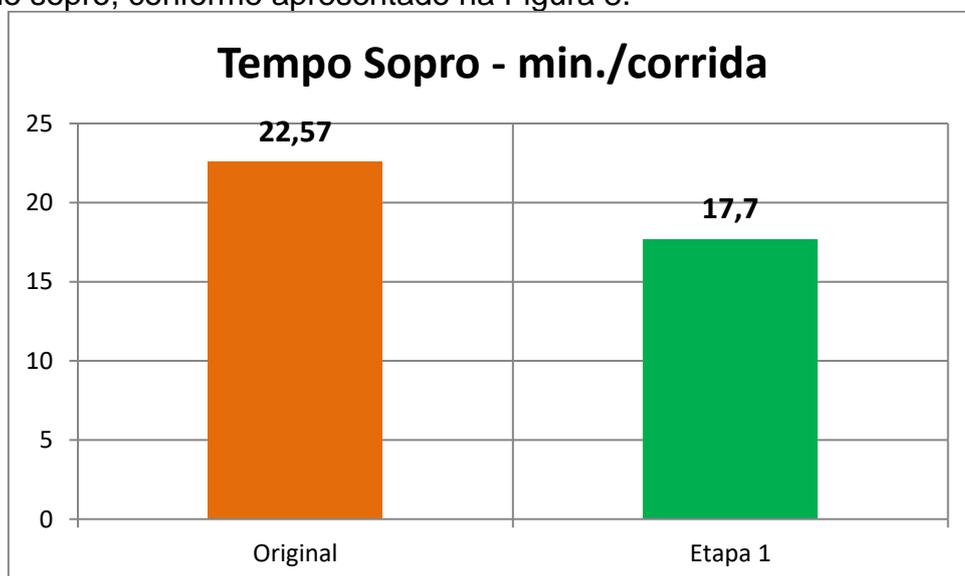
O reflexo dessa pressurização repercutiu positivamente na elevação e estabilidade da pressão de fornecimento, e essa refletindo sobre a estabilidade de pressão durante a corrida, garantindo aumento e estabilidade na taxa de descarburização devido a maior penetração de jato conforme preconizado pela Figura 4, na região indicada com Lumar 1.

O aumento da penetração dos jatos supersônicos para a mesma vazão total de oxigênio, comparando antes e após as mudanças, trouxeram ganhos operacionais que serão elencados e discutidos abaixo.



**Figura 7 - Consumo de oxigênio antes e após a implementação da etapa 1 de modificações no EOF.**

A Figura 7 mostra uma redução de 16% no consumo total de oxigênio. Os injetores supersônicos fixos provocam uma maior penetração do jato no banho líquido, intensificando as reações de descarburização, aumentando sua eficiência e eficácia. O resultado imediato do aumento da eficiência e eficácia do oxigênio é a redução do tempo de sopro, conforme apresentado na Figura 8.



**Figura 8 – Tempo de sopro antes e após a implementação da etapa 1 de modificações no EOF.**

A redução no tempo de sopro de 27% garante o objetivo determinado para etapa 1 pois as demais etapas de processo do EOF são relativamente rápidas quando comparada com as outras rotas de produção como BOFs e EAFs principalmente. Potencialmente o tempo de sopro alcançado, permite em teoria a produção de 03

corridas por hora, considerando ou 72 corridas por dia, tornando o EOF um reator imbatível em produtividade horária.

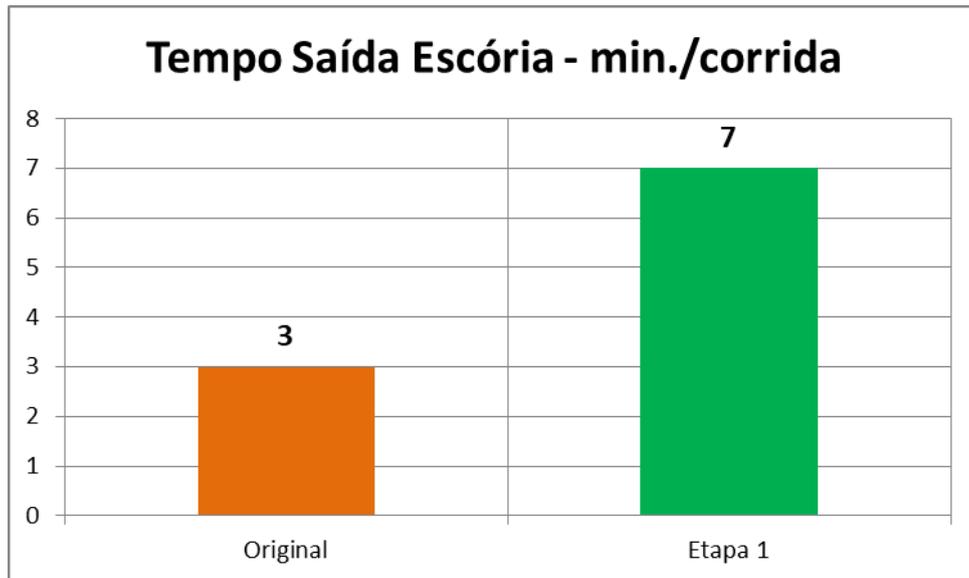


Figura 9 – Tempo de saída de escória pelo barrado antes e após a implementação da etapa 1 de modificações no EOF.

O aumento do tempo início da retirada da escória em 133% apresentado na Figura 9 é um importante avanço para melhoria dos resultados metalúrgicos da corrida e potencialmente significar redução no consumo de escorificantes como cal calcítica e dolomítica. O aumento do tempo de permanência no interior do EOF significa uma melhor dissolução das cales, uma escória com menor oxidação e maior efetividade na remoção de elementos como fósforo. Um impacto do maior tempo de residência é observado na Figura 10 que apresenta o teor de inicial de FeO na escória.

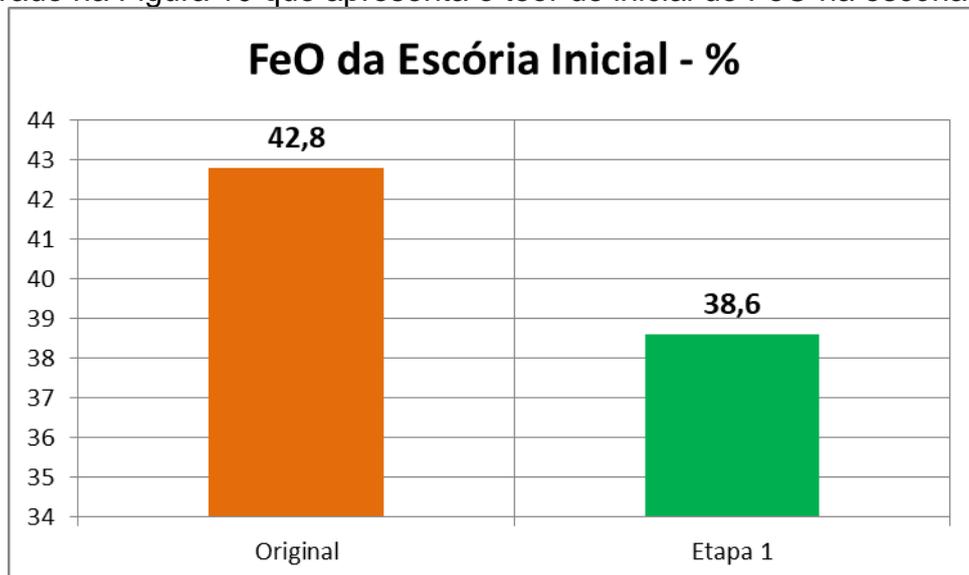
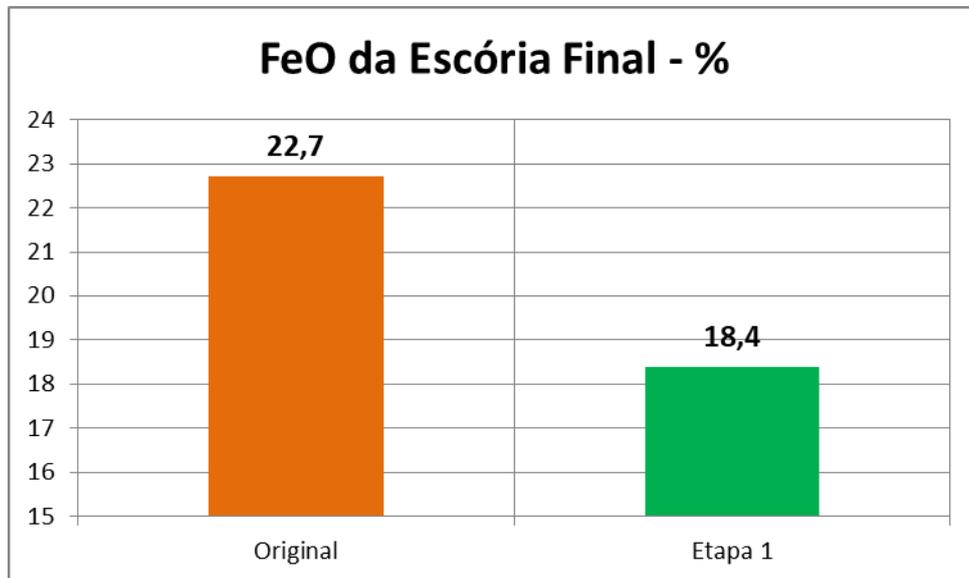


Figura 10 – FeO da escória inicial passante pelo barrado antes e após a implementação da etapa 1 de modificações no EOF.

A redução de 10% no FeO inicial da escória apresentado na Figura 10 mostra que o aumento do tempo de residência e o aumento da taxa de descarburização teve tempo hábil para geração suficiente de gás CO para redução dos teores de FeO seja

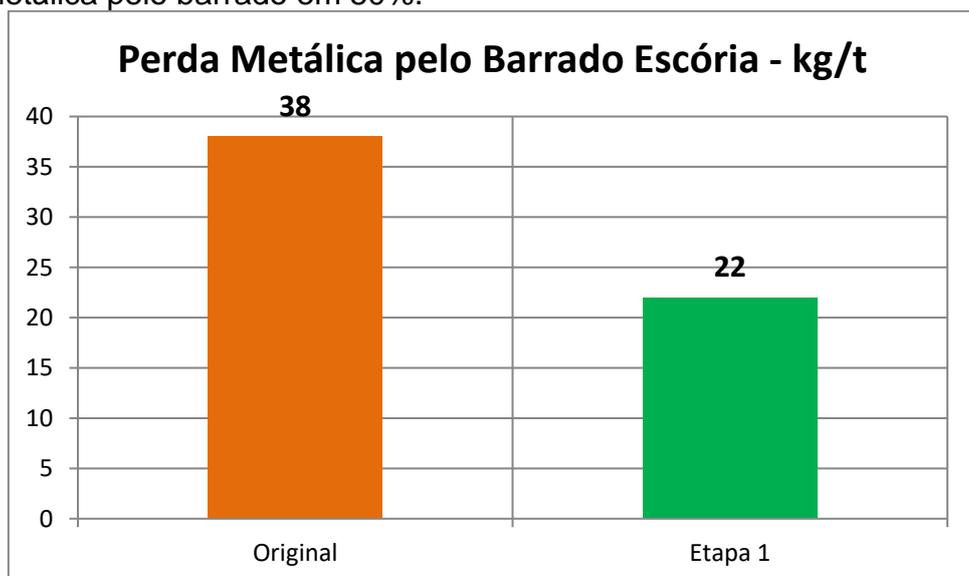
proveniente de sucatas ou mesmo oxidação durante a fusão inicial da sucata nos instantes iniciais de processo. Esse comportamento mantém-se ao longo do processo até ao final de sopro conforme apresentado na Figura 11.



**Figura 11 – FeO da escória final passante pelo barrado antes e após a implementação da etapa 1 de modificações no EOF.**

A Figura 11 mostra uma redução de 19% com a introdução dos injetores supersônicos fixos. Revela também que o aumento da taxa de descarburização devido a maior penetração de jato, teve papel ativo na redução dos óxidos ferrosos não atendo-se somente as etapas iniciais. A Figura 12 mostra os ganhos de produtividade com o aumento do rendimento da corrida pela redução das perdas metálicas pelo barrado do EOF.

A efetiva melhora na qualidade da escória, bem dissolvida e formada, aumenta a sua viscosidade e associado ao maior tempo de residência permite tempo suficiente para a fusão e incorporação do metal da sucata ao banho metálico, reduzindo a perda metálica pelo barrado em 50%.



**Figura 12 – Perda metálica passante pelo barrado antes e após a implementação da etapa 1 de modificações no EOF.**

## 4 CONCLUSÃO

As principais conclusões da etapa 1 com a introdução de injetores supersônicos fixos no EOF são:

1. Redução do consumo de oxigênio em 16%;
2. Redução do tempo de sopro em 22%;
3. Aumento do tempo da permanência da escória no EOF em 133%;
4. Redução do %FeO da escória inicial em 10%;
5. Redução do %FeO da escória final em 19%;
6. Redução da perda metálica pelo barrado do EOF em 42%.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a Gerdau Divinópolis e a Lumar Metals pelo incentivo a pesquisa continuada e oportunidade de divulgação.

## REFERÊNCIAS

- 1 KORTEC. **Training Manual for K.O.R.F.**, ed. Steelmaking Edition, Baarerstraße 21 Switzerland. Set.1986.
- 2 Catálogo da Companhia Siderúrgica Pains. **Pains 25 anos: 10.10.53 – 10.10.78.**, 1978.
- 3 CHAMA EMPREENDEDORA. **A História e a Cultura do Gerdau 1901 – 2001.** Ed.: Prêmio.2001.
- 4 MAIA, B. T., Modelamento Físico e Matemático do Escoamento de Fluidos nos processos BOF e EOF. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2013. 238p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica).
- 5 MALAIYAPPAN, V., RAJAVEL, G., GOPAL, M., GNANAPRAKASAM, B., Thermo-kinetics, Mass and Heat balance in an Energy Optimizing Furnace. JMRT 2018.
- 6 SOUSA, L. G., Efeito da Variação de Parâmetros Operacionais e de Projeto na Pós-Combustão e na Temperatura dos Fumos no Forno EOF. Anais do 42º Steelmaking Seminar - International, Salvador, Bahia, Maio, 2011.
- 7 PETRUCELLI, A. C.; MAIA, B. T.; ABREU, G.; IMAGAWA, R. K.; TAVARES, R. P. EOF COLD MODEL – STUDY OF BATH BEHAVIOR In: 45º Seminário de Aciaria Internacional, 2014, Porto Alegre.
- 8 PETRUCELLI, A. C.; MAIA, B. T.; ABREU, G.; IMAGAWA, R. K.; TAVARES, R. P. EOF COLD MODEL – STUDY OF MIXING TIME In: 45º Seminário de Aciaria Internacional, 2014, Porto Alegre.
- 9 MAIA, B. T.; ABREU, GUSTAVO; PETRUCELLI, ANA CLARA; TAVARES, Roberto Parreiras. EOF cold model-study of bath behavior. Journal of Materials Research and Technology. , v.5, p.58 - 67, 2016.