

# SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ESCOAMENTO DO AÇO NO CANAL DE VAZAMENTO DO REATOR EOF<sup>1</sup>

*Carlos André Ruy Carneiro*<sup>2</sup>  
*Lucas Alves de Castro*<sup>2</sup>  
*Rafael Fernandes Reis*<sup>2</sup>  
*Breno Totti Maia*<sup>3</sup>  
*Roberto Parreiras Tavares*<sup>4</sup>

## **Resumo**

Uma das etapas do refino primário do aço é o vazamento. Esta operação afeta a produtividade da aciaria e a qualidade do produto. O “EOF” possui uma forma característica para o vazamento do aço líquido, composto por um canal de vazamento, uma bica e uma contrabica. Neste trabalho, o escoamento e a transferência de calor durante o vazamento foram simulados. Duas diferentes configurações de contrabica foram analisadas. Baseando nos resultados das simulações, uma configuração foi proposta e testada na indústria. A nova contrabica apresenta comportamento melhor do que a utilizada atualmente.

**Palavras-chave:** EOF; Canal de vazamento; Contrabica de vazamento; Escoamento de aço.

## **NUMERICAL SIMULATION OF THE STEEL FLOW IN THE EOF TAPPING**

### **Abstract**

One important step in the steel primary refining is the tapping. This operation affects the productivity of the steel plant and the quality of the product. The EOF has a particular tapping system, composed of the tap hole, the tapping spout and the counter tapping spout. In the present paper, fluid flow and heat transfer during tapping were analyzed. Based on the simulation results, an alternative configuration was proposed and tested in the industry. The new counter tapping spout presented a better performance than the one being currently used.

**Key words:** EOF; Tap hole; Tapping spout; Fluid flow.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 40º Seminário de Aciaria – Internacional, 24 a 27 de maio de 2009, São Paulo, SP, Brasil.*

<sup>2</sup> *Sócio da ABM, Estudante de Graduação, Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.*

<sup>3</sup> *Engenheiro Metalurgista, M.Sc., Estudante Pós-Graduação, Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.*

<sup>4</sup> *Sócio da ABM, Professor Associado, Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.*

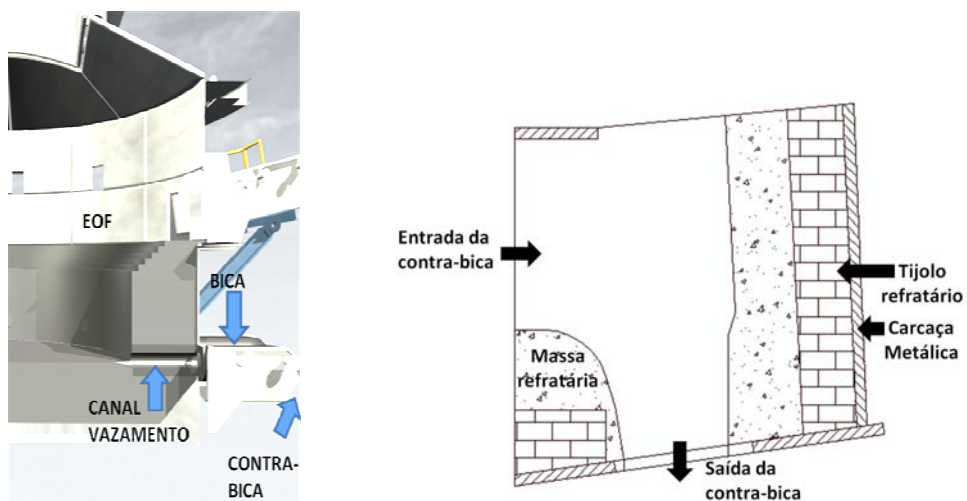
# 1 INTRODUÇÃO

As aciarias buscam continuamente o incremento e aperfeiçoamento da sua produção de duas maneiras: através da instalação de novas unidades produtoras com equipamentos atualizados tecnologicamente e/ou através do desenvolvimento dos parâmetros de processo com objetivos de aumentar os volumes produzidos por unidade de tempo, juntamente com o desenvolvimento contínuo da qualidade dos produtos.

Os equipamentos utilizados no refino primário do aço são os convertedores BOF e os fornos elétricos a arco. Como uma nova concepção, surgiu nas últimas décadas o forno EOF, cuja sigla significa *energy optimizer furnace*. O EOF surgiu com a expectativa de reaproveitar a energia gerada durante o refino para o pré-aquecimento da sucata da corrida seguinte. Esse pré-aquecimento permite o uso de quantidades de sucata em níveis não encontrados nas rotas tradicionais. Durante o ciclo de produção, o EOF apresenta características interessantes relativas ao tempo das etapas de processo. A primeira delas consiste no baixo tempo de carregamento, devido ao fato da sucata ser carregada por via aérea através dos pré-aquecedores e o carregamento de gusa por uma bica própria, não interferindo com o início do sopro de oxigênio. Outra vantagem com relação ao tempo é a inexistência de um tempo específico para vazamento da escória, uma vez que este ocorre continuamente durante o sopro. O mesmo acontece com a amostragem de temperatura e carbono através da porta de escória, durante os períodos finais do sopro, permitindo o ajuste para vazamento sem a necessidade de interromper o sopro.

Com estas características, o tempo fora de sopro é reduzido apenas à etapa de vazamento de aço e fechamento de canal de vazamento, tornando o EOF um equipamento competitivo na produção do aço.

O conjunto de peças que permitem o vazamento de aço é constituído de três partes: furo de corrida, bica de vazamento e contrabica de vazamento. O furo de corrida tem função de conter o banho metálico no interior do EOF pelo preenchimento do seu diâmetro com um material granulado de magnésia-carbono. A bica de vazamento conduz o aço para a posição de enchimento da panela e a contrabica tem a função de direcionar o fluxo para a panela de aço, conforme apresentado na **Figura 1**.



**Figura 1** – Esquema do reator EOF. (a) corte lateral e (b) detalhe do conjunto bica e contrabica.

As características deste processo de vazamento de aço expõem o banho metálico ao ambiente, levando à grandes perdas na transição para a panela, provocando uma elevada turbulência no aço e trazendo efeitos nocivos na sua qualidade, no rendimento de ligas, além de provocar aumento do tempo de operação do processo seguinte (forno-panela).

Maia, Barral e Avila<sup>(1)</sup> relatam que a vida útil do furo de corrida deve ser a maior possível, possibilitando uma diminuição dos custos de manutenção do mesmo. Uma geometria capaz de manter um desgaste mais homogêneo pode prolongar a vida do furo de corrida, um tempo de vazamento estável e predeterminado durante a vida do furo, bem como inibir formação de vórtice, prevenindo o arraste de escória para o furo de corrida.

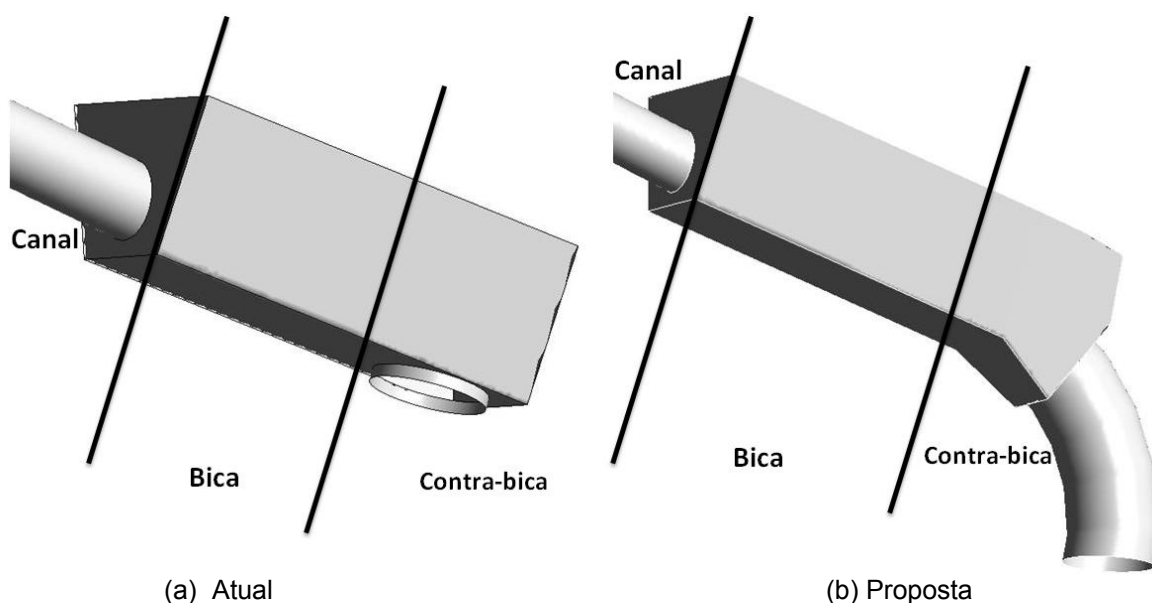
As regiões do furo de corrida onde há uma mudança brusca de geometria estão sujeitas a concentração de tensões; portanto, uma variação mais suave de geometria diminui esta concentração, reduzindo assim o efeito desta sobre essas regiões.<sup>(2)</sup> O alívio das tensões pode prolongar a vida do equipamento, reduzindo o efeito do desgaste.

O desgaste no furo de corrida se dá pelos seguintes mecanismos; oxidação, corrosão (ataque por escória), erosão (vazamento de aço) e choque térmico.<sup>(2)</sup> Outros aspectos a serem considerados no vazamento são as características de escoamento e regime de trabalho. Escoamentos com movimento irregular do fluido e velocidades variáveis com o tempo são caracterizados como escoamento turbulento.<sup>(3)</sup> Estas características de escoamento são observadas durante o vazamento de aço no processo EOF.

O objeto do presente trabalho é reduzir a turbulência do jato na contrabica com objetivo de reduzir as perdas térmicas no vazamento e aumentar a vida útil da contrabica. Para isso, foram simulados o escoamento do aço e a transferência de calor durante o vazamento do aço. Os resultados das simulações foram validados através de testes industriais.

## 2 METODOLOGIA

As contrabicas atual e proposta são apresentadas na **Figura 2**.



**Figura 2** – Apresentação das geometrias das contrabicas em estudo.

Na **Figura 2** observa-se que a principal alteração proposta foi a mudança gradual da direção de escoamento do aço com a inclusão de um seção curva. O objetivo é melhorar a condução do banho metálico até a panela. A imagem representa o espaço ocupado pelo aço e não a geometria do conjunto canal de vazamento, bica e contrabica.

Para desenvolvimento do modelo matemático do escoamento do aço nas contrabicas atual e proposta, foi utilizado um software comercial Ansys-CFX 11, que utiliza o método de volumes finitos.

O modelo matemático desenvolvido considera: escoamento monofásico (aço), tridimensional e turbulento, fluido newtoniano e incompressível.

As equações que descrevem matematicamente o escoamento do aço líquido no modelo são: equação da continuidade, equação de conservação da quantidade de movimento (forma turbulenta das equações de Navier-Stokes), equação de conservação de energia térmica, equação de conservação de energia cinética turbulenta e equação de conservação da taxa de dissipação da energia cinética de turbulência.

As condições de contorno utilizadas no modelo estão apresentadas na **Tabela 1**.

**Tabela 1** – Parâmetros e condições de contorno adotadas nas simulações

| Parâmetros                         | Valores  |
|------------------------------------|--|
| Vazão de aço                       | 183,3 kg/s   |
| Temperatura de entrada             | 1600°C   |
| Paredes                            | Sem Rugosidade;<br>Coeficiente global de transferência de calor: 7 W/m <sup>2</sup> .K;<br>Temperatura ambiente; 25 °C;  |
| Superfície em contato com ambiente | Sem escorregamento;<br>Coeficiente global de transferência de calor: 15 W/m <sup>2</sup> .K;<br>Temperatura ambiente; 25 °C;<br>Emissividade do aço líquido: 0.28; |
| Número de elementos de volume      | Geometria atual = 700.000<br>Geometria proposta = 160.000  |

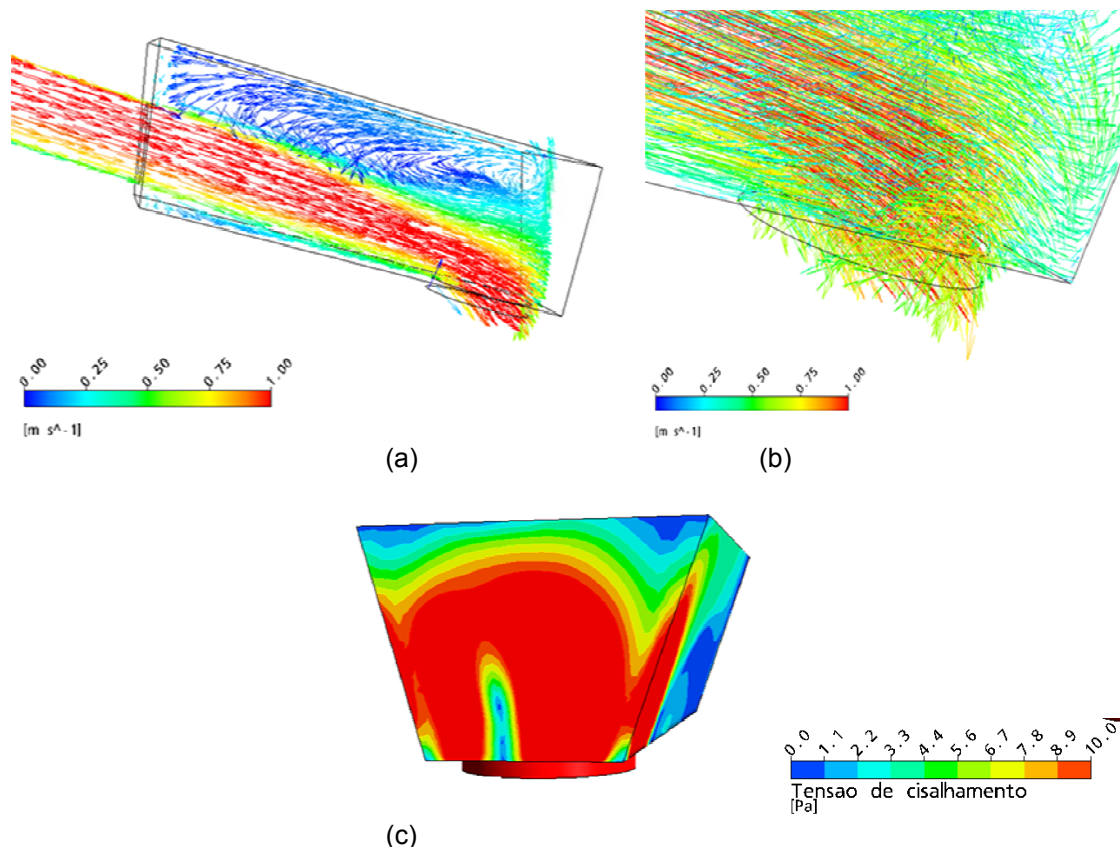
A diferença do número de elementos de volume entre as simulações é devido à necessidade de atingir o critério de convergência com resíduo máximo de 10<sup>-6</sup> para todas as equações de conservação. A maior turbulência necessita de um maior refinamento na malha.

De posse das soluções das equações de conservação, foi realizada a análise dos resultados, através do exame dos vetores de velocidade, dos perfis de temperatura, dos perfis da tensão de cisalhamento e energia de cinética turbulenta.

Após análises e correções, uma contrabica com a geometria proposta foi construída em caráter experimental e o seu desempenho comparado com o da contrabica atual.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A primeira simulação numérica foi realizada considerando o conjunto bica e contrabica. Na **Figura 3**, são apresentados os vetores de velocidade no plano de simetria (a), junto à saída da contrabica (b) e os contornos de tensão de cisalhamento (c) nas paredes da contrabica para a configuração em uso atualmente.



**Figura 3** – (a) Vetores de velocidade no plano de simetria, (b) detalhe dos vetores de velocidade na saída da contrabica (c) campos de tensão de cisalhamento nas paredes da contrabica atual.

A mudança de direção na extremidade da contrabica altera os vetores de velocidade, provocando uma recirculação na parte superior e a perturbação dos vetores que estão saindo em direção a panela, conforme apresentado na **Figura 3(a)**.

Na saída da contrabica - **Figura 3(b)**, os vetores de velocidade apresentam várias direções, provocando uma grande turbulência principalmente no trecho onde há mudança de direção, da horizontal para vertical descendente. A turbulência provoca um espalhamento de jato quando fluxo de metal deixa a contrabica em direção à panela de aço. Esse espalhamento tem efeitos negativos sobre a qualidade do aço.

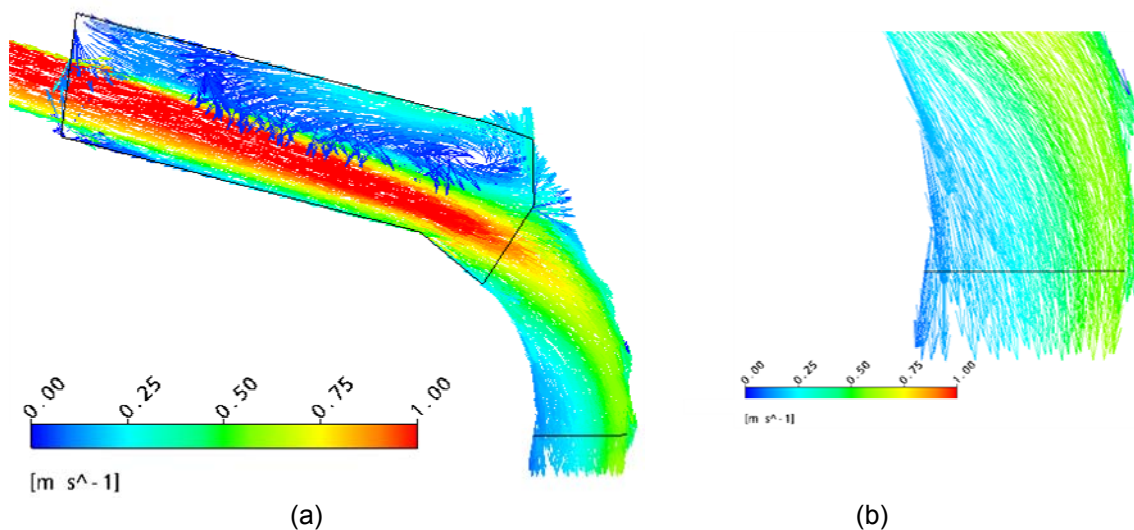
Na análise dos campos de tensão de cisalhamento, o efeito mais notável é a grande área com elevados níveis de tensão de cisalhamento na região onde o fluxo de aço choca-se com a parede da contrabica, conforme visto na **Figura 3(c)**.

Na prática, o comportamento descrito pela simulação pode ser visualizado através do resfriamento de material metálico nas bordas superiores da bica de vazamento, conforme pode ser visto na **Figura 4**, através do estreitamento da bica e da parte superior da contrabica.



**Figura 4** – Imagens da contrabica atual em dois momentos: (a) no início de vazamento, (b) no final do vazamento.

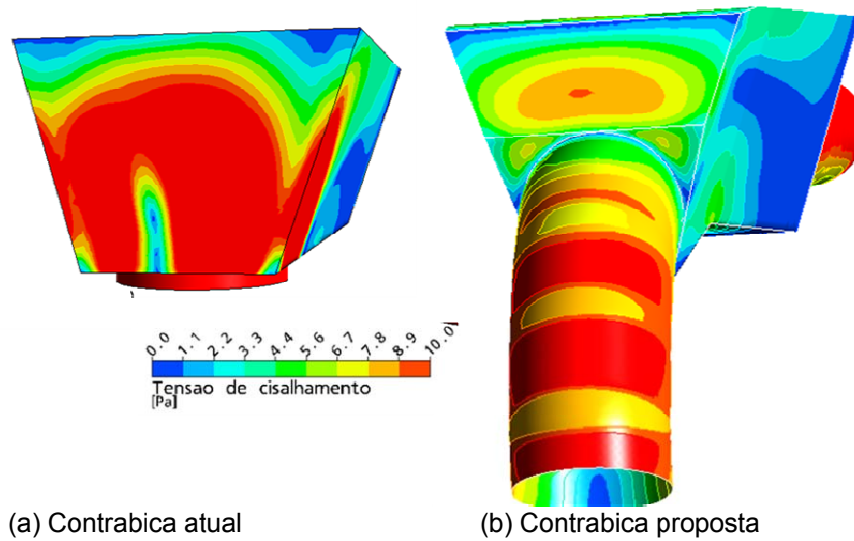
O desgaste é observado na contrabica através do espalhamento de jato, levando à necessidade de troca semanal desta peça, implicando em quebra de ritmo de produção. Através da observação em campo e comparação com as simulações numéricas, foi proposta uma alteração na geometria da contrabica. Os vetores de velocidade do aço nesta nova geometria são apresentados na Figura 5.



**Figura 5** - (a) Vetores de velocidade no plano de simetria, (b) detalhe dos vetores de velocidade na saída da contrabica proposta.

A geometria curva da peça de refratário permitiu uma suavização no padrão de escoamento do aço. Esta suavização reduziu o espalhamento do jato e certamente possibilitará uma redução na perda de temperatura do aço.

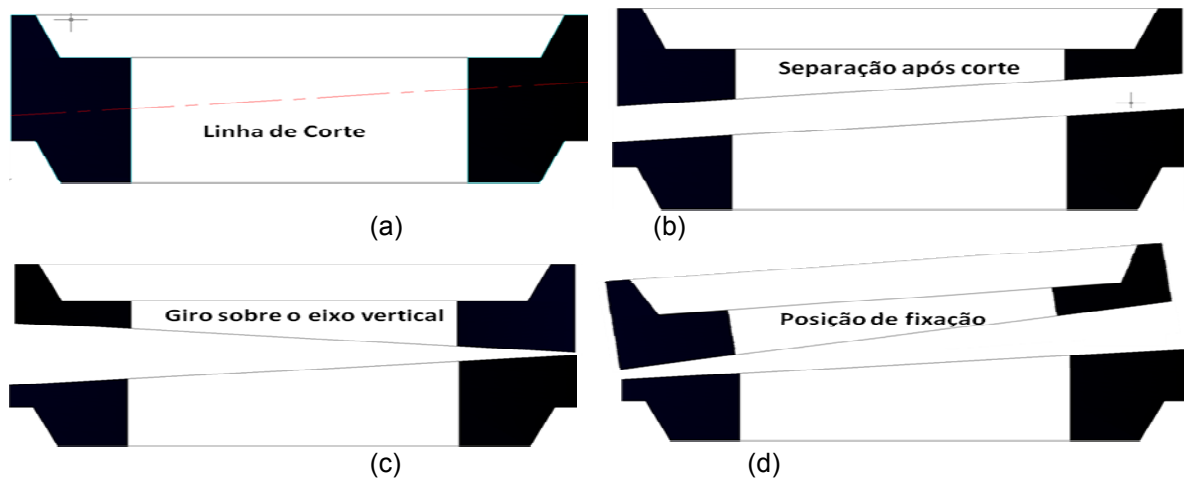
Os campos de tensão de cisalhamento para a nova geometria da contrabica são apresentados na Figura 6. Para facilitar a comparação, estão incluídos os resultados para a contrabica atual.



**Figura 6** – Contornos comparando a tensão de cisalhamento no plano de simetria para: (a) contrabica atual e (b) contrabica proposta.

Há uma redução na área das regiões com elevadas tensões de cisalhamento. Na nova contrabica, as maiores tensões de cisalhamento ocorrem no interior da seção curva, mas em áreas menores, o que levará a um desgaste menor e mais localizado do refratário.

O teste industrial foi realizado em parceria com o fornecedor de refratário e consistiu em um corte diagonal nas peças refratárias atualmente utilizadas na contrabica, conforme apresentado na **Figura 7**.



**Figura 7** – Desenho em corte da peça refratária.

A obtenção de uma geometria curva na contrabica foi possível realizando um corte na peça indicado na **Figura 7(a)**, em seguida a peça foi separada, **Figura 7(b)**. A parte superior é girada sobre o raio, **Figura 7(c)** e finalmente fixada sobre a base **Figura 7(d)**. O encaixe dessas peças sucessivas possibilitou o formato curvo. Na **Figura 8** é apresentada uma foto da contrabica proposta montada.

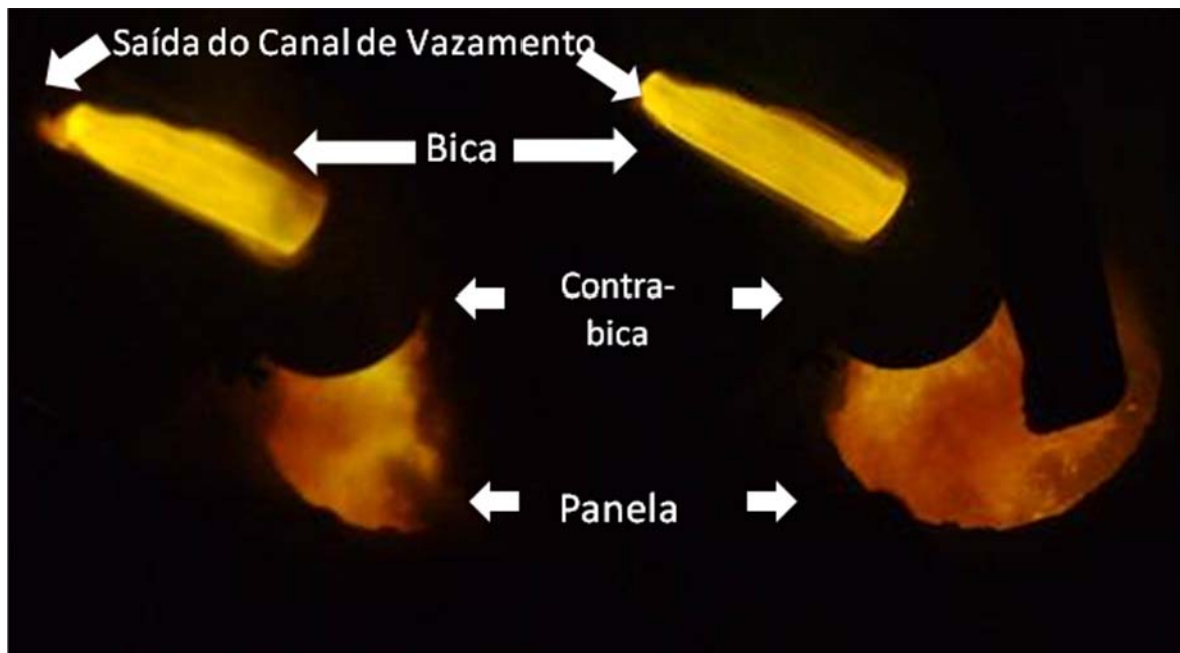




**Figura 8** – Imagem da contrabica proposta montada antes do início de operação.

A contrabica proposta foi montada e testada no período de tempo subsequente ao uso da contrabica atual. Um importante resultado qualitativo da utilização da nova contrabica foi a redução da formação de cascão na parte superior do canal e, principalmente, a diminuição acentuada do desgaste, possibilitando o seu uso pelo dobro de tempo quando comparado com a contrabica anterior. Desta forma houve uma redução do tempo de troca e maior continuidade de produção.

Uma imagem das condições de vazamento da contrabica proposta pode ser visto na **Figura 9**.



(a) início de vazamento

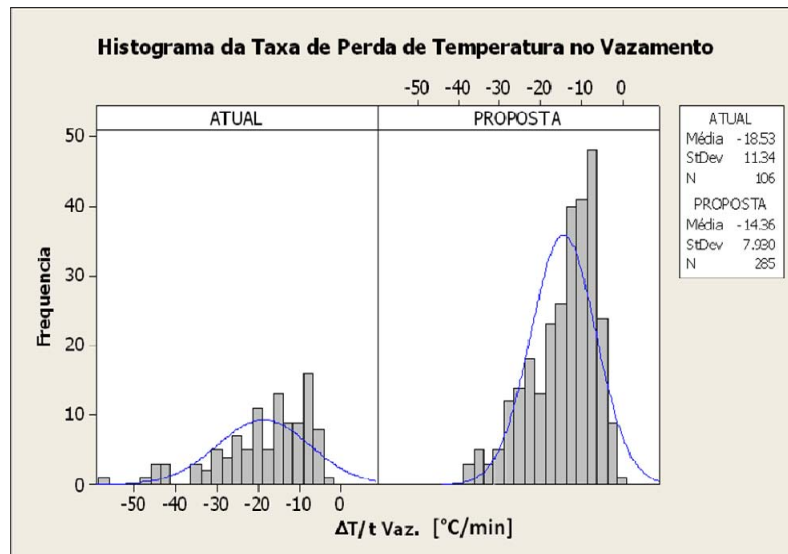
(b) final de vazamento

**Figura 9** – Imagens da contrabica proposta em dois momentos: (a) no início de vazamento e (b) no final do vazamento.

Na **Figura 9** é apresentada a contrabica proposta indicando uma redução da turbulência na sua parte superior, mas ainda com o efeito deletério do espalhamento de jato na parte inferior. Comparando as Figuras 4 e 9, é possível notar que o fluxo de aço na contrabica proposta ocorre sem nenhuma restrição em direção à panela, mantendo a bica sem acúmulo de material solidificado.



Quando testada na prática, a nova contrabica proporcionou facilidade de operação, com o vazamento controlado sem o risco de transbordamento de aço. Este melhor controle contribuiu para uma redução da perda térmica do aço, conforme pode ser visto na **Figura 10**.



**Figura 10** – Comparação da taxa de perda de temperatura do aço, durante o vazamento de aço.

Os valores mostrados na **Figura 10** representam a diferença das temperaturas medidas antes do vazamento no interior do EOF e a temperatura chegada no forno-panela dividida pelo tempo transcorrido entre as medidas, com os dados expressos em termos de taxa de variação de temperatura. Para a contrabica atual, a diferença média é 18,53°C/min, com desvio padrão de 11,34°C/min. Para a contrabica proposta a diferença média fica em 14,36°C/min com desvio de 7,93°C/min. A redução da taxa de perda de temperatura foi de aproximadamente 4°C/min, associada a uma grande redução no desvio padrão.

Os dados foram obtidos ao longo de campanhas considerando apenas aços de mesma composição química, a fim de evitar os efeitos da variação das necessidades de adição de ligas.

A alteração da geometria neste primeiro teste aumentou a durabilidade do refratário em duas vezes reduzindo o tempo para manutenção, reparo e troca da contrabica. Outro ganho apurado foi a redução da perda metálica decorrente da solidificação de material nas bordas superiores do conjunto bica e contrabica. Contudo novos desenvolvimentos ainda devem ser feitos para reduzir as perdas de temperatura do banho metálico.

Os próximos passos consistem em novas simulações utilizando diâmetros de entrada e saída diferentes e novos testes operacionais, com objetivo de reduzir o espalhamento de jato na saída da contrabica.

## 4 CONCLUSÕES

O trabalho realizado, envolvendo simulações matemáticas e testes industriais, permitiu que fossem tiradas as seguintes conclusões relativas aos benefícios da utilização da nova geometria proposta para a contrabica:

- duplicação da durabilidade pela redução do desgaste do refratário;
- redução da perda metálica por material aderido nas bordas; e
- redução da taxa de perda de temperatura em 4° C/min.

O espalhamento de jato ainda continua presente, indicando a necessidade de continuidade dos desenvolvimentos da geometria.

Os resultados obtidos evidenciam também o poder das ferramentas de simulação numérica no estudo, desenvolvimento e aprimoramento dos processos industriais

### Agradecimentos

À Gerdau e a todos da equipe de Divinópolis, que tornaram possível este trabalho. À Charles Alexis Groener, Marcos Manso, Thiago Ávila da empresa Magnesita pelo empenho em desenvolver uma rápida solução prática para a geometria proposta.

### REFERÊNCIAS

- 1 MAIA, B.T.; BARRAL, C.E.P.; AVILA, T.A. Estudo do vazamento no furo de corrida do convertedor Id e avaliação do desgaste e fricção ao longo de corridas. In: SEMINÁRIO DE ACIARIA – INTERNACIONAL, 37., 2006, Porto Alegre, RS. *Anais...* São Paulo: ABM, 2006.
- 2 GLASS, D.R., SMITH, G.C. *BOF steelmaking*. Nova York: The Iron and Steel Society of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, 1976. v. 3
- 3 AUAD, M.V. Refratários para convertedor LD. In: CELSO, D., CASTRO, L.F. (ed). *Fabricação de aço em forno básico a oxigênio*. São Paulo: ABM, 2005. [Apostila]