



EVOLUÇÃO DO PROJETO DE REFRIGERAÇÃO PARA VENTANEIRAS UTILIZANDO SIMULAÇÃO CFD*

Breno Totti Maia¹

Bruno Orlando de Almeida Santos²

Fabício Silveira Garajau³

Marcelo de Souza Lima Guerra⁴

Resumo

A constante busca por aumento de produtividade aliada à redução de custos com paradas para manutenção nos altos-fornos tem exigido incessantes evoluções tecnológicas em seus equipamentos. As ventaneiras são equipamentos de vital importância para o processo de redução do minério de ferro, e um importante parâmetro para um bom desempenho em processo é seu projeto de refrigeração. Tendo em vista que a otimização da refrigeração pode aumentar a vida do equipamento e reduzir custos com manutenções, o presente trabalho apresentará um estudo de evolução no projeto de refrigeração de ventaneiras com câmaras de refrigeração independente no mesmo corpo (câmaras interna e externa). Esta evolução tem como objetivo principal permitir a utilização da câmara interna mesmo após a falha da câmara externa, devido a sua refrigeração independente e otimizada, com aumento na vida útil do equipamento. A comparação destes projetos será feita utilizando ferramentas de simulação computacional CFD e os resultados serão apresentados na conclusão do trabalho.

Palavras-chave: Ventaneiras; CFD; Projeto; Refrigeração.

EVOLUTION OF TUYERES REFRIGERATION USING CFD SIMULATION

Abstract

The constant demand for high productivity coupled with cost reduction with maintenance in blast furnaces, has caused incessant technological changes in their equipment. The tuyeres are vital to the process of reduction of iron ore equipment, and an important parameter for optimal performance in the design process is the tuyere cooling design. Given that the optimization of cooling can increase equipment life and reduce maintenance costs, this paper will present a study of evolution in the design of cooling tuyere with independent cooling chambers in the same body (internal and external chamber). This development aims to allow the use of the inner chamber even after the failure of the outer chamber, due to its independent and optimized cooling. Thus, one can achieve an increase in the useful life of the equipment, allowing the equipment to run until a more suitable time for replacement. Comparison of these projects will be done using computer simulation tools and CFD results will be presented at the conclusion of the work.

Keywords: Tuyeres; CFD; Design; Cooling.

¹ *Engenheiro Metalurgista e Doutor Pesquisador, Lumar Metals, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Engenheiro de Materiais e Mestre Pesquisador, Lumar Metals, Santana do Paraíso, MG, Brasil.*

³ *Engenheiro Mecânico e Pesquisador, Lumar Metals, Santana do Paraíso, MG, Brasil.*

⁴ *Engenheiro Mecânico e Pesquisador, Lumar Metals, Santana do Paraíso, MG, Brasil.*

* *Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.*



1 INTRODUÇÃO

O alto-forno é um reator industrial muito utilizado na produção de ferro gusa, matéria prima empregada para obtenção do aço e ferro fundido. O ferro gusa é uma liga obtida no estado líquido contendo 92 a 95% de ferro, 3 a 4,5% de carbono e outros elementos. As matérias-primas utilizadas basicamente são compostas pela carga metálica (minério de ferro, pelotas ou sinter), combustível (Coque ou Carvão Vegetal) e fundentes (Calcário, Dolomita e Quartzo) [1]. Seu princípio fundamental é reduzir os minérios ferrosos pela passagem de um elemento redutor em contra corrente, que será o CO ou H₂. Já a estrutura interna do alto-forno bem como o perfil de movimentação da carga tem sido estudada desde o início do século XX [2]. Durante os anos subsequentes técnicas operacionais tais como controle da temperatura de sopro, enriquecimento de oxigênio, pressões de operação, pré-tratamento de matéria prima, injeção de combustíveis auxiliares entre outras, vem sendo desenvolvidas com o objetivo de aumentar a produtividade desse equipamento [3]. O maior avanço desses estudos e para o conhecimento do perfil interno dos altos-fornos se deu a partir de experiências de dissecação desse reator realizadas pelos japoneses na década de 70 e pelos russos na década de 60. Durante os estudos, notificou-se pela primeira vez a respeito da presença de uma zona de amolecimento e fusão no interior do forno, ficando evidenciada a partir dessa época a importância dos estudos da estrutura interna do alto-forno [4,5]. O principal resultado da dissecação dos fornos foi a determinação da sua estrutura interna, sendo observadas cinco zonas distintas dentro desses fornos, conforme mostra a Figura 1.

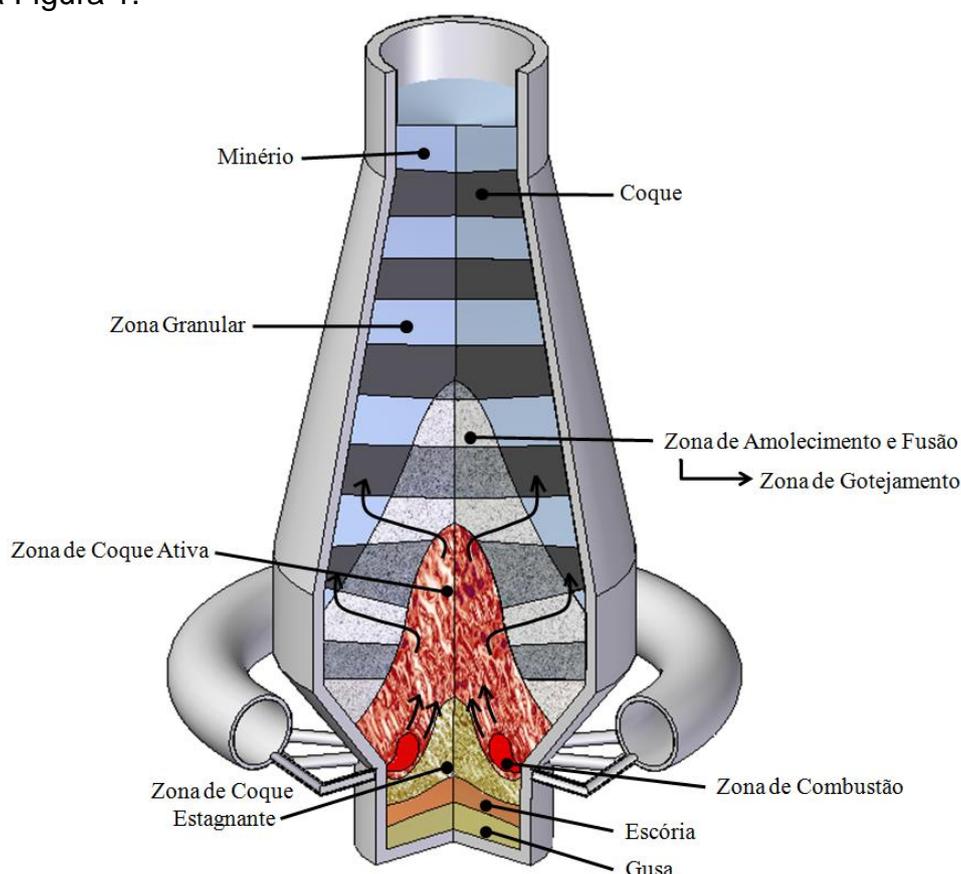


Figura 1 - Esquema das regiões internas do alto-forno (Adaptado de Fernandes [7]).

* *Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.*



O ar pré-aquecido é insuflado pelas ventaneiras com temperaturas próximas a 1000°C e reage com o redutor na zona de combustão, estabelecendo uma taxa de consumo. O ar injetado encontra o redutor aquecido a temperaturas próximas a 1500°C iniciando a reação de formação do dióxido de carbono (CO₂), altamente exotérmica. Por sua instabilidade acima de 1000°C, o carbono do redutor reage rapidamente com o dióxido de carbono, formando o monóxido de carbono (CO), reação esta conhecida como *Solution loss* ou de *Boudouard*. O fluxo ascendente de gás redutor em alta temperatura irá trocar calor com a carga, determinando as isotermas no interior do alto-forno. As temperaturas de 2000°C na parte inferior do reator fundirão o ferro já reduzido e a escória, aquecendo-o às respectivas temperaturas de vazamento [4-6]. A variação de calor ao longo das regiões do alto-forno favorece uma série de reações químicas que ocorrem nesses níveis, sendo uma zona superior de intensas trocas térmicas de pré-aquecimento (30 a 800°C), uma zona intermediária de baixas ou nenhuma troca térmica, também chamada de zona de reserva química, onde Fe, FeO, CO e CO₂ estão em equilíbrio (800 a 1000°C), e por fim, a zona inferior de fusão, que possui temperaturas da ordem de 900°C a 1500°C [1,4]. As ventaneiras são um constituinte dos equipamentos dos altos-fornos que tem como função principal injetar o ar quente vindo dos sopradores formando a zona de combustão.

Ao longo dos anos as ventaneiras foram adquirindo novas funções como: ponto de injeção de redutores sólidos, líquidos e gasosos, enriquecimento de oxigênio, ponto de amostragens. Mas além de funções ligadas a operação, as ventaneiras também exercem papel estrutural, pois devem suportar as elevadas cargas térmicas, bem como eventos de descida repentina de carga sobre sua estrutura, tornando-se um equipamento vital para obtenção dos níveis de produção assim como para segurança patrimonial e das equipes dos altos-fornos. O objetivo desse trabalho e apresentar estudos reforçam essas novas funções das ventaneiras.

2 MODELAGEM MATEMÁTICA

A fase fluida é descrita pelas equações de transporte em fase contínua. Nos softwares comerciais CFD as equações de Navier-Stokes são resolvidas em sua forma conservativa. As equações resolvidas para a fase líquida incluem conservação de massa, momento, energia cinética turbulenta, taxa de dissipação turbulenta e energia [8]. As equações governantes no escoamento do fluido representam demonstrações matemáticas das leis de conservação da física, onde a massa do fluido deve ser conservada; a taxa de variação de momento é igual à soma das forças atuantes na partícula de fluido (Segunda lei de Newton) e a taxa de variação de energia é igual à soma das taxas de calor adicionado e do trabalho realizado em uma partícula de fluido (Primeira lei da Termodinâmica).

O fluido será tratado como um contínuo sempre em termos de propriedades macroscópicas, tais como velocidade, pressão, densidade e temperatura, e suas derivadas no espaço e no tempo. Propriedades microscópicas tais como estrutura ou movimentos moleculares são ignorados [9].

O princípio da conservação de massa estabelece que a massa do volume do fluido seja constante. Portanto, o primeiro passo para a derivação da equação de conservação de massa é o balanço de massa para o elemento do fluido. A equação para a conservação de massa, ou equação da continuidade, pode ser escrito da seguinte forma:

* *Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.*



$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = S_m \quad (1)$$

A equação de conservação de momento ou também conhecida como quantidade de movimento utiliza a segunda lei de Newton, onde a taxa de mudança de momento de uma partícula de um fluido é igual à soma das forças nessa partícula. A segunda lei de Newton, quando aplicada ao elemento de fluido, diz que a força resultante no elemento de fluido é igual à sua massa multiplicada pela aceleração do elemento, como mostra a equação:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho U) + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \vec{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

A equação da energia é derivada da primeira lei da termodinâmica que afirma que a taxa de variação de energia de uma partícula de fluido é igual à taxa de calor para a partícula de fluido somado ao trabalho realizado [10]. Para o estado estacionário, a equação da energia é resolvida na forma mostrada pela equação:

$$\frac{\partial (\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{tot}) - \nabla \cdot (k \nabla T) + \nabla \cdot (U \cdot \tau) + U \cdot S_M + S_E \quad (3)$$

O modelo de turbulência utilizado, $k-\epsilon$, é baseado no modelo de equações de transporte para a energia cinética de turbulência (k), que é definido como a variação da flutuação na velocidade; e a taxa de dissipação turbulenta (ϵ), que é a taxa na qual ocorre a dissipação das flutuações na velocidade [11].

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \epsilon + P_{kb} \quad (4)$$

$$\frac{\partial (\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} P_k - C_{\epsilon 2} \rho \epsilon + C_{\epsilon 1} P_{sb}) \quad (5)$$

3 MODELAGEM NUMÉRICA

Para o estudo do comportamento da refrigeração da ventaneira, a modelagem partiu da geometria apresentada na Figura 2.

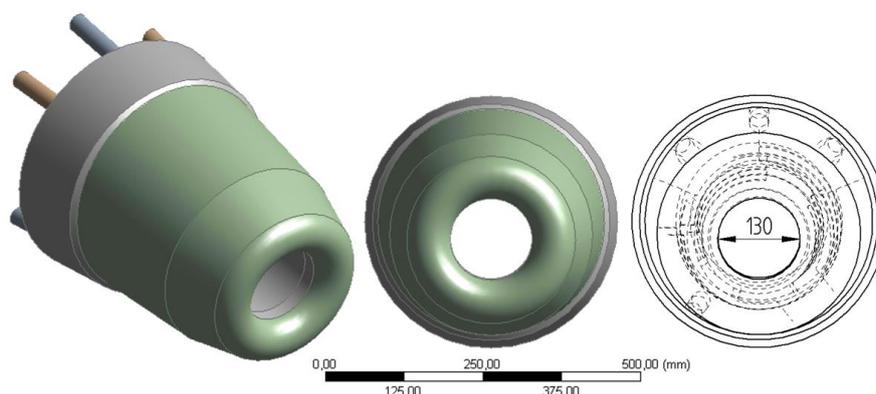


Figura 2 - Geometria 3D da Ventaneira.

Todo o estudo foi conduzido em um modelo que contempla dupla refrigeração utilizado em um Alto-Forno com capacidade em torno de 2800 toneladas de ferro gusa por dia, onde esta ventaneira de câmara dupla será comparada a um modelo

* Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



desenvolvido pela Lumar Metals Ltda nas mesmas condições de operação, destacando perfis de velocidade, e temperatura.

Para a correta geração de malha computacional, uma análise prévia detalhada da geometria e dos efeitos físicos do processo devem ser feitas. O cuidado com a geometria favorece a geração de malhas mais regulares, benéfico tanto para convergência dos resultados, como para a redução do número de elementos que compõem o domínio [12,13]. Também é importante avaliar os fenômenos físicos para o correto levantamento das camadas e número de elementos para captar tais efeitos.

Para o presente estudo, a malha foi separada em duas regiões. A primeira é a região do fluido, no caso água de refrigeração, que deve contemplar camadas próxima a parede para captar os efeitos da viscosidade e variação de pressão para aproximar os resultados dos valores práticos de operação. A segunda região é o corpo sólido, no caso cobre, que também deve contemplar camadas de elementos para a correta transferência dos campos de concentração e temperatura ao longo da espessura do material, conforme apresentado na Figura 3. Ambos devem ser conectados através de interface para garantir a interação entre os domínios fluido e sólido, sem perda de informação.

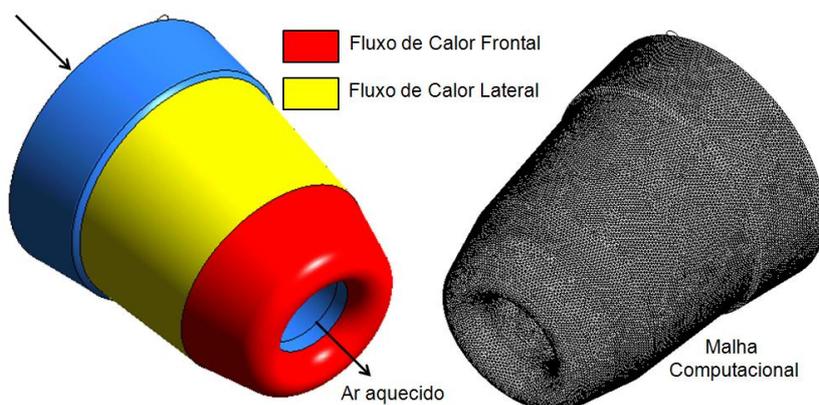


Figura 3 - Principais Condições de contorno do corpo sólido e malha computacional com 2,3 milhões de elementos para o fluido e 1,8 milhões de elementos para o corpo da ventaneira.

As principais condições de contorno e estrutura de malha estão apresentados na Tabela 1 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Tabela 1 - Condições de contorno para análise.

	Descrição	Valores
Fluido Câmara Frontal	Pressão de Entrada	1,5 bar
	Temperatura de Entrada da água	40°C
Fluido Câmara Traseira	Pressão de Entrada	1,5 bar
	Temperatura de Entrada da água	40°C
Ventaneira	Fluxo de Calor Frontal	2,4 MW/m ²
	Fluxo de Calor Lateral	1,5 MW/m ²

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos resultados foram separados em três grandes grupos: perfis de velocidade do fluido de refrigeração, temperaturas envolvidas no sistema (superfície

* Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



da ventaneira e água de refrigeração) e variação de pressão do fluido na geometria analisada. Deve-se destacar que estas três condições devem ser monitoradas para garantir que os valores de processo prático estejam bem aplicados para o modelo computacional, buscando representar de forma mais aproximada o comportamento do equipamento em operação.

Também será apresentado um comparativo da variação de projetos com redução de temperatura e aumento de eficiência, evidenciando o controle da espessura de parede e desgaste de revestimento protetor.

4.1 Perfil de Velocidade

A região de operação da ventaneira expõe sua face e laterais a condições de extrema solitação térmica, devido à frente de chama gerada pela entrada do ar aquecido e do material pulverizado injetado. Esta frente de chama produz temperaturas da ordem de 2100°C, irradiando grande fluxo de calor no equipamento, bem como solitações mecânicas de abrasão/erosão e arreamento de cargas que podem danificar o equipamento.

O correto dimensionamento dos canais de refrigeração da ventaneira contribui de forma considerável na redução das falhas do equipamento, visto que a velocidade de escoamento e como consequência sua turbulência, tem impacto direto nos coeficientes de transferência de calor do canal de refrigeração.

O projeto de ventaneira analisado utiliza um tubo frontal, que conduz a água até sua ponta, e uma segunda câmara, que refrigera a parte traseira da ventaneira. Assim, os perfis de velocidade podem ser observados através da Figura 4.

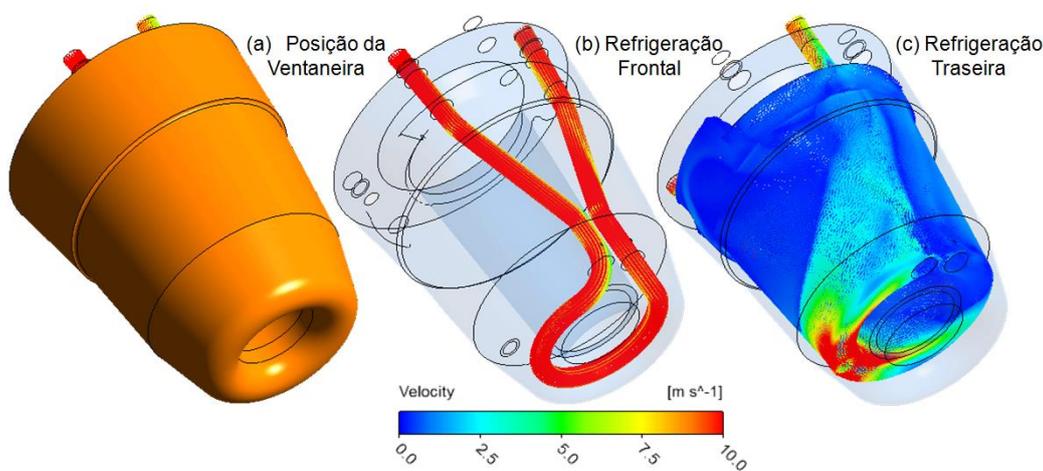


Figura 4 - Perfil de refrigeração da ventaneira (b) parte frontal e (c) câmara traseira.

Através das imagens da Figura 4 é possível observar que, para a refrigeração frontal, há um perfil de velocidade elevado e constante, proporcionando altos coeficientes de transferência de calor. Já para a câmara traseira, a característica do projeto não permite uma refrigeração ideal, dificultando a passagem da água entre os tubos que conduzem a água da refrigeração frontal.

Mesmo em regiões de baixa solitação, a baixa velocidade da água ou a sua recirculação em alguns pontos pode comprometer consideravelmente a longevidade do projeto. A variação do processo aliada a agressiva condição de exposição são pontos que podem reduzir a vida do equipamento em processo.

* Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



4.1 Perfil de Temperatura

A posição de operação das ventaneiras expõem sua face a condições de alta temperatura e também de possíveis esforços mecânicos de abrasão/erosão, promovendo desgastes e falhas no equipamento. Outro grande causador de desgaste são os particulados provenientes da região próxima às ventaneiras.

Apesar do fluxo de calor constante em toda face do bico, o perfil de temperatura está diretamente relacionado com o perfil de velocidade do fluido de refrigeração. Desta forma, é possível observar na Figura 5, uma elevação na temperatura deste projeto de ventaneira durante operação.

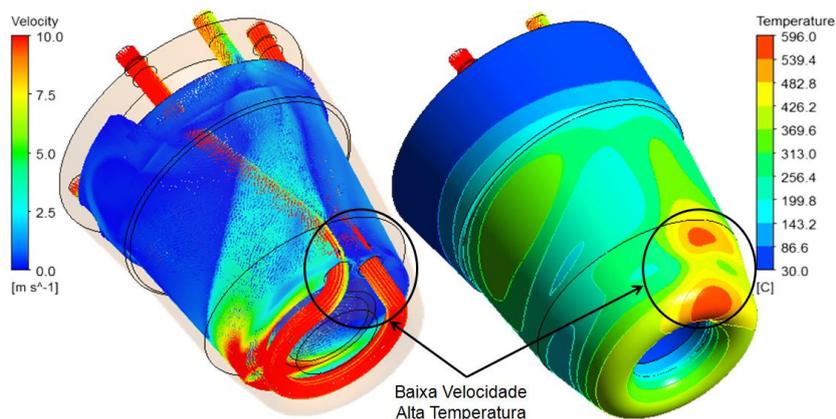


Figura 5 - Perfil de velocidade comparado ao perfil de temperatura da ventaneira.

Ao analisar a imagem, é possível observar que, apesar de o projeto contemplar uma refrigeração frontal dedicada, a mesma por ser conduzida por tubos, dificulta a refrigeração da face frontal de forma completa. Há uma região que não é contemplada pela refrigeração, elevando a temperatura local e favorecendo a formação de trincas.

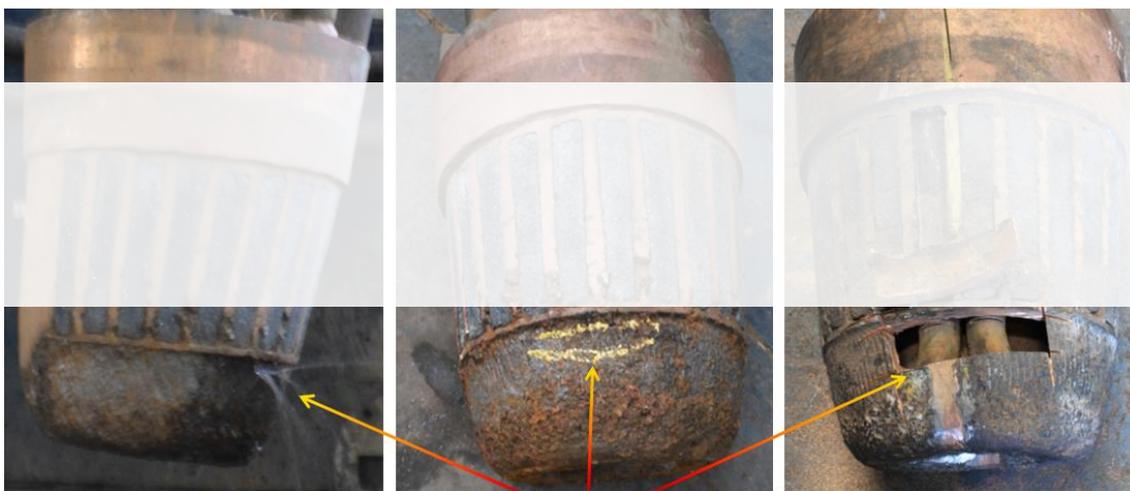


Figura 6 - Região de Falha.

Também é observado que há uma outra região de alta temperatura, localizada na lateral da ventaneira. Esta região contempla o ponto de passagem dos tubos que conduzem a refrigeração à face frontal (Figura 6). Esta elevação na temperatura

* *Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.*



está relacionado à baixos valores dos coeficientes de transferência de calor por convecção no interior do bico. Também é possível observar através da Figura 4 - (b) que a região de maior desgaste e falha do equipamento ocorre exatamente na região de maior temperatura do material.

4.2 Comparativo de Projetos

Ao comparar o projeto com a simulação, verifica-se que o local de falha condiz exatamente com um dos pontos quentes do resultado computacional (Figura 7).

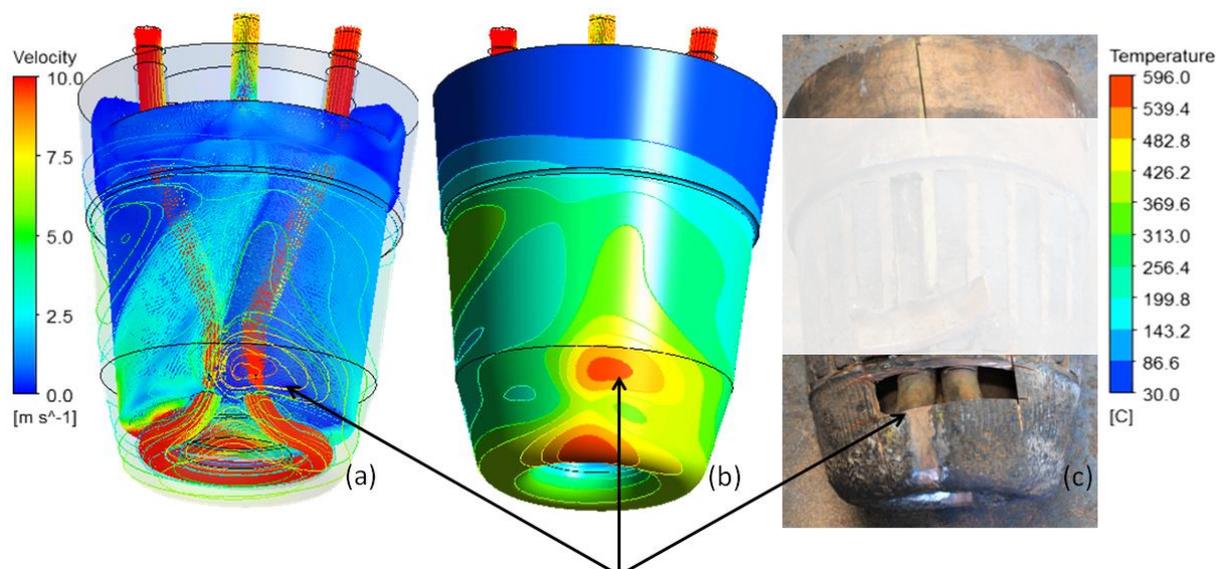


Figura 7 - Comparativo entre simulação computacional e região de falha.

É possível, através de avaliação das condições de contorno e principalmente de alterações no projeto, atingir ganhos consideráveis em eficiência de refrigeração, elevando a vida útil do equipamento e trazendo maior controle operacional para a planta siderúrgica. A Figura 8 mostra com clareza o efeito da modificação de projeto objetivando maior eficiência na refrigeração do bico. É possível notar que as regiões da ventaneira que apresentava elevação de temperatura foi reduzida simplesmente alterando as condições de escoamento internos.

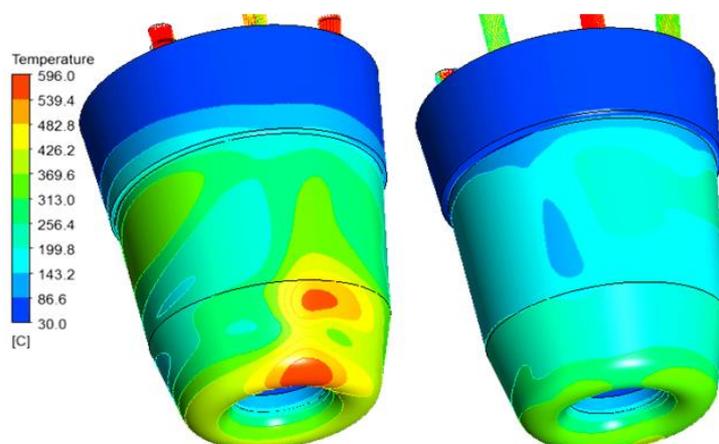


Figura 8 - Evolução do projeto da ventaneira.

* Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



Esta redução na temperatura do bico de lança reflete também no aumento das propriedades mecânicas do material. Trabalhando em temperaturas reduzidas, o material mantém as características mecânicas mais elevadas, reduzindo sua tendência a danos por abrasão de fagulhas e particulados e aumenta a vida em fadiga do material, além de preservar o revestimento duro na superfície.

O perfil de velocidade do fluido de refrigeração interno, capaz de gerar os altos coeficientes de transferência de calor podem ser vistos na Figura 9.

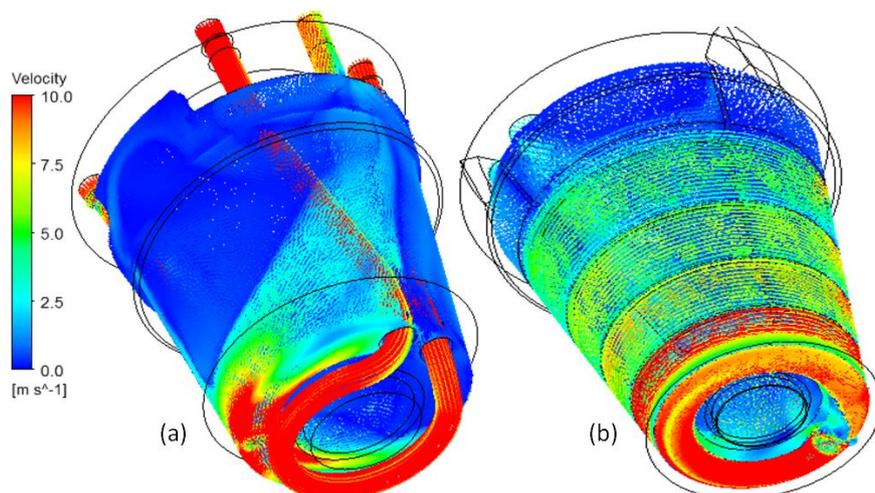


Figura 9 - Comparativo dos perfis de velocidade (a) projeto anterior e (b) projeto Lumar Metals.

Quando comparado o projeto modificado ao projeto atual, percebe-se uma grande evolução nos valores de velocidade, e como consequência, na eficiência de refrigeração. A Figura 10 mostra o equipamento fabricado após finalização do projeto.



Figura 10 - Ventaneira fabricada na Lumar Metals.

5 CONCLUSÃO

A presente contribuição conclui que é possível realizar alterações em projetos utilizando ferramenta computacional para dimensionar/aprimorar equipamentos e simular processos. Para a ventaneira em questão, os perfis de temperatura foram reduzidos aumentando a eficiência da refrigeração, influenciando diretamente no desempenho do equipamento em operação. O agressivo ambiente à que as

* Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



ventaneiras são expostas normalmente dificultam uma análise física, e podem ser representadas de forma aproximada por recursos computacionais.

A redução da temperatura da superfície da ventaneira analisada permitirá à mesma operar com maior resistência mecânica aos efeitos de abrasão/erosão, garantindo a resistência necessária para uma maior longevidade do equipamento.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Lumar Metals pelo incentivo à pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 1 Assis PS. Injeção de materiais pulverizados em altos-fornos. Belo Horizonte : Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2009.
- 2 Inada T., et al. Effect of blast furnace profile on inner furnace states. ISIJ International. 2003; 43(7): 1003-1010.
- 3 Gandra BF. Desenvolvimento de modelo matemático do fluxo de líquidos no cadinho do alto-forno. Universidade Federal de Minas Gerais. Dissertação (Mestrado), 2006.
- 4 Assis CFC. de. Caracterização de carvão vegetal para a sua injeção em altos-fornos a carvão vegetal de pequeno porte. Rede Temática em Engenharia de Materiais. Dissertação (Mestrado), 2008.
- 5 Fujihara FK. Alto forno a Coque. [book auth.] E. GARIGLIO, et al. Aspectos Tecnológicos relativos à preparação de carga e operação de alto-forno. São Paulo : Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1994.
- 6 Castro LFA, Tavares RP. Instalações do Alto-forno. s.l. : Cosipar Siderurgia, 2004.
- 7 Fernandes MV. Efeito do tipo de carvão injetado nas ventaneiras do alto-forno no consumo de combustíveis (fuel rate). Universidade Federal de Minas Gerais. Dissertação (Mestrado), 2007.
- 8 Shen U., et al. Three-dimensional modeling of coal combustion in blast furnace. ISIJ International. 2008; 48(6): 777-786.
- 9 Versteeg HK, Malalasekera W. An introduction to Computational Fluid Dynamics - The finite volume methods. New York : Longman Group Ltd, 1995. P. 257.
- 10 CFX. CFX 12.1 - Solver Theory Guide. 2010, USA.
- 11 Wilcox DC. Turbulence Modelling for CFD. California: DCW Industries, Inc., 1993. 1st ed..
- 12 CFD Simulations for water flow in lance to BOF. SANTOS, B.O.A, et al. Porto Alegre : ABM, 2014.
- 13 Shen Y., et al. Model study of the effects of coal properties and blast furnace conditions on pulverized coal combustion. ISIJ International, 2009; 49(6): 819-826, 2009.

* *Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.*