

DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA PROTEÇÃO DO JATO ABERTO UTILIZANDO DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL ¹

*Marcelo Kruger*²
*Marcus Vinicius Figueira dos Reis*³
*Leonardo Barboza Trindade*⁴
*Rodrigo Nazareth Borges*⁵
*Mauricio dos Santos*⁶

Resumo

A qualidade do aço obtido através do processo de lingotamento contínuo pode ser afetada quando há um contato direto entre o aço líquido e o ar (oxigênio). Visando uma melhor proteção do jato aberto entre o distribuidor e o molde, o Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Magnesita desenvolveu um dispositivo, onde um gás inerte é injetado no seu interior, criando uma atmosfera contendo uma quantidade reduzida de oxigênio. Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo, através da utilização de uma ferramenta de Dinâmica dos Fluidos Computacional, realizar uma análise tanto qualitativa quanto quantitativa para as diversas configurações geométricas testadas. A metodologia de Volumes Finitos, utilizada no pacote computacional CFX 5.7[®], foi empregada. Foi considerado um modelo multicomponente com ar e nitrogênio com convecção natural, devido à alta temperatura do jato de aço. O modelo k- ϵ foi utilizado para a modelagem de turbulência.

Palavras-chave: Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), lingotamento contínuo, jato aberto.

¹ Trabalho a ser apresentado no "XXXVI Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais - Internacional", 16 a 18 de maio de 2005, Vitória/ES

² Eng. Mecânico, Engineering Simulation and Scientific Software - ESSS

³ Eng. Mecânico, M. Sc., Engineering Simulation and Scientific Software - ESSS

⁴ Físico, Dr., Science, Technology and Engineering - STE

⁵ Engenheiro Mecânico, M. Sc., Centro de Pesquisas da Magnesita SA

⁶ Engenheiro Metalurgista, M.Sc., Departamento de Assistência Técnica da Magnesita SA

1 INTRODUÇÃO

O lingotamento contínuo através de jato aberto é empregado em várias indústrias siderúrgicas e é considerado um processo de custo mais baixo, comparado ao lingotamento com jato protegido. Porém, o contato do oxigênio com o aço líquido pode ocasionar a formação de inclusões na forma de óxidos, ocasionando perda na qualidade do produto. Segundo Szekely,⁽¹⁾ sistemas envolvendo jatos de gases e metais fundidos estão presentes em um grande número de operações envolvendo processamento de metais. O controle destas operações obrigatoriamente passa pelo conhecimento detalhado dos fenômenos envolvidos.

Visando garantir a qualidade do aço, a Magnesita, através do seu Centro de Pesquisa e Desenvolvimento, desenvolveu um dispositivo, onde um determinado gás (nitrogênio ou argônio) é injetado no seu interior, objetivando criar uma atmosfera com quantidade de oxigênio bastante reduzida. O dispositivo é posicionado de tal forma que o jato de aço líquido passa pelo seu interior, e deve ficar colocado entre a base do distribuidor e o topo do molde. O gás é injetado no interior do dispositivo através de um tubo, posicionado na lateral do mesmo. A Figura 1 mostra um desenho esquemático do sistema dispositivo-jato-molde-distribuidor. A região cilíndrica ao redor do dispositivo é o limite externo do modelo numérico onde são aplicadas as condições de contorno. A base quadrada (cor laranja) representa o menisco do molde, ao passo que o topo do modelo representa a base do distribuidor (não apresentada nesta figura).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é, dado um conjunto de configurações (posição do tubo de injeção de gás, uso de um defletor na saída do tubo, comprimento de saia etc.) para um determinado modelo, definir, através dos resultados obtidos da simulação numérica do escoamento de ar e nitrogênio, qual a configuração geométrica do dispositivo que propicia as melhores condições para a proteção do jato aberto. Para se determinar a melhor configuração, utilizou-se, juntamente com as análises do escoamento (campos de velocidade e pressão), a distribuição de fração mássica de nitrogênio no interior do caneco junto ao jato aberto e na região do menisco.

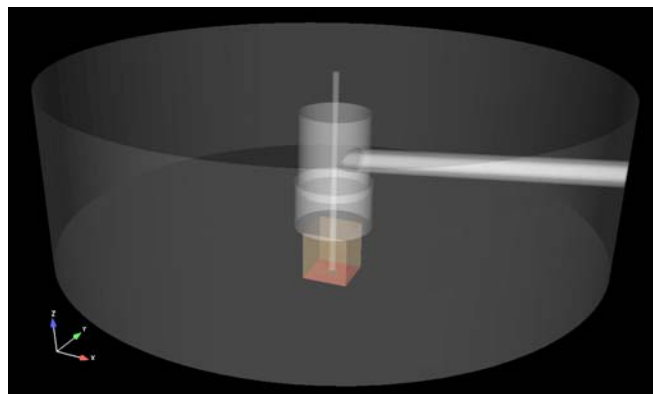


Figura 1. Desenho esquemático do modelo dispositivo-jato-distribuidor-molde

2 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO MODELO

Os modelos numéricos para a solução de problemas envolvendo mecânica dos fluidos devem descrever os aspectos mais importantes da física do problema real. escoamentos de fluidos são regidos pelas equações de Navier-Stokes, mas a extrema complexidade destas equações impossibilita, até mesmo para casos simples, a obtenção de uma solução com os recursos computacionais atualmente disponíveis, se uma simulação considerando todas as escalas espaciais e temporais (transientes) for desejada. Para modelar estes escoamentos são utilizados modelos aproximados, tais como as equações de Navier-Stokes com valores médios no tempo, conhecidas como *Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations* (RANS) e que são empregadas neste trabalho. Esta abordagem viabiliza a solução de escoamentos turbulentos com os recursos computacionais atualmente disponíveis e é a mais utilizada em problemas industriais. Tomando-se a média das equações de Navier-Stokes surgem novos termos, conhecido por tensões de Reynolds, que carregam as características turbulentas e transientes do escoamento. Uma das metodologias mais usuais consiste em modelar este tensor a partir das variáveis k (energia cinética turbulenta) e ε (taxa de dissipação turbulenta).

A abordagem utilizada neste trabalho consiste em resolver o escoamento de uma fase gasosa composta de dois componentes: ar e nitrogênio. O jato de aço foi simulado como um sólido, onde nas paredes foi aplicada uma condição de deslizamento calculada pela velocidade do jato. Esta simplificação foi possível, pelo fato de que, na prática, observa-se muito pouca interação (influência) do escoamento de nitrogênio sobre o jato de aço. Por outro lado, é sabido o efeito que a alta temperatura do jato de aço pode causar sobre o escoamento da fase gasosa. Para isto os efeitos térmicos em todo o processo também foram considerados. Por se tratar de um escoamento incompressível, de baixas velocidades, e com pequenas variações de densidade em função da temperatura, aplicou-se a aproximação de *Boussinesq*,⁽²⁾ explicada em seção posterior, para capturar os efeitos devido ao empuxo térmico sobre o escoamento.

A equação da continuidade, para um escoamento em regime permanente, para a mistura ar-nitrogênio é dada por

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = S_{massa} \quad (1)$$

onde \mathbf{V} é o vetor velocidade médio no tempo de cada fluido $\{\mathbf{v}_x, \mathbf{v}_y, \mathbf{v}_z\}$. O termo S_{massa} é o termo fonte de geração ou retirada de massa. Neste caso o termo fonte é nulo. A equação de conservação da quantidade de movimento é expressa como

$$\nabla \cdot ((\rho \mathbf{V} \otimes \mathbf{V})) = \nabla \cdot (\mu_{eff} (\nabla \mathbf{V} + (\nabla)^T)) - \nabla \mathbf{p} + S_{QM} \quad (2)$$

onde ρ é a densidade, \mathbf{p} é a pressão, e $S_{QM} = \{S_{QM_x}, S_{QM_y}, S_{QM_z}\}$ é o termo fonte de geração de quantidade de movimento.

A viscosidade efetiva μ_{eff} é dada pela soma das viscosidades laminar e turbulenta

$$\mu_{eff} = \mu_0 + \mu_t \quad (3)$$

onde μ_0 é a viscosidade molecular e μ_t é calculado a partir dos parâmetros turbulentos.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{K^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

Para a solução dos parâmetros turbulentos k e ε da fase líquida é utilizado o modelo de turbulência $k-\varepsilon$ padrão, desenvolvido por Launder e Spalding (2).

No caso de problemas envolvendo transferência de calor, a equação da conservação da energia que rege o fenômeno é dada por

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{V} h) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S \quad (5)$$

onde λ é a condutividade térmica $h = h(p, T)$ é a entalpia do fluido, calculada a partir de relações termodinâmicas. Para o caso de um fluido com densidade e calor específico constante, a entalpia é simplesmente o produto do calor específico e da temperatura:

$$h = C_p \cdot T \quad (6)$$

2.1 Escoamento Multicomponente

Para um fluido constituído de mais de uma componente o escoamento é regido pelas equações de transporte da mistura, descritas na seção anterior, mais as equações responsáveis pelo transporte das componentes. O movimento do fluido é modelado através de um único campo de velocidade, pressão, temperatura e turbulência. A influência das componentes é sentida somente pela variação das propriedades médias do fluido principal, que são uma soma ponderada das propriedades de cada componente.

Por exemplo, o nitrogênio possui uma densidade um pouco diferente da densidade média do ar. A razão entre a densidade da componente e a densidade média do fluido principal é chamada de fração mássica:

$$Y_i = \frac{\rho_i}{\rho_{Mix}} \quad (7)$$

Onde a densidade da mistura é expressa por

$$\rho_{Mix} = \sum_{NC} \rho_i Y_i \quad (8)$$

A fração mássica é calculada através da equação de balanço para esta variável:

$$\frac{\partial(\bar{\rho}Y_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}U_j Y_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_i \frac{\partial Y_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial(\bar{\rho}Y_i''U_j'')}{\partial x_j} + S_i \quad (9)$$

onde Γ_i é a difusividade da componente no fluido principal.

2.2 Empuxo Térmico

Para pequenas variações de densidade em função da temperatura, a aproximação de *Boussinesq*⁽²⁾ pode ser empregada. Esta hipótese é uma aproximação do termo de empuxo devido à variação de densidade do escoamento, sendo conveniente de ser empregada em casos onde a abordagem à densidade constante é utilizada (como neste presente trabalho). É utilizada uma aproximação onde a variação de densidade é expressa por uma variação de temperatura. Isto é melhor descrito no texto a seguir.

É sabido que essas pequenas variações de densidade é que dão origem aos movimentos de massa entre as regiões frias e quentes do aço líquido. Ainda neste caso, a densidade poderá variar em função da concentração de cada componente (equação 8). A força de empuxo térmico é introduzida na equação da quantidade de movimento como uma força de campo, **B**:

$$\mathbf{B} = (\rho - \rho_{ref})\mathbf{g} \quad (10)$$

onde \mathbf{g} é o vetor gravidade $\{0, -9.81, 0\}$ e ρ_{ref} é a densidade de referência. Na aproximação de *Boussinesq* (3) os efeitos da variação da compressibilidade do gás na densidade podem ser ignorados.

O termo $(\rho - \rho_{ref})$ é descrito por

$$(\rho - \rho_{ref}) = -\rho_{ref}\beta(T - T_{ref}) \quad (11)$$

onde β é a Expansividade Térmica, em $[^{\circ}C^{-1}]$ e T_{ref} é a temperatura de referência.

2.3 Condições de Contorno

Para o fechamento do problema numérico descrito acima é necessário ainda definir as condições de contorno para cada fronteira do domínio.

Para as paredes do domínio (Figuras 2a e 2b) foi aplicada a condição de não-escorregamento dos fluidos junto às paredes, isto é, $V_x, V_y, V_z = 0$.

Na fronteira externa do domínio (Figura 2c) foi aplicada a condição de *Opening*, com temperatura e pressão prescrita de 30 °C e 0 atm, respectivamente.

Na entrada (figura 2.3-c – região em amarelo) foi aplicado um valor de vazão de nitrogênio $5,98958 \times 10^{-3}$ kg/s e um perfil uniforme de temperatura de 30 °C.

Por fim, na região do jato de aço (Figura 2d) foi aplicada uma condição de contorno de parede, com velocidade de 3 m/s e temperatura de 1560 °C.

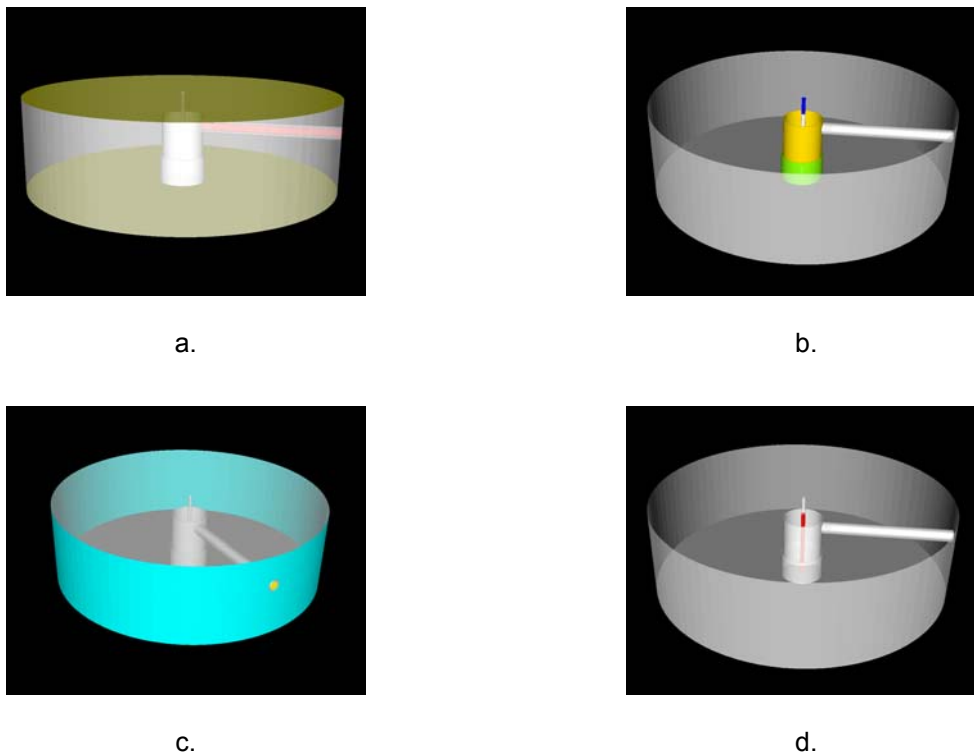


Figura 2. Condições de Contorno

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram analisadas seis configurações do dispositivo de proteção para jato aberto, mostradas na Figura 3.

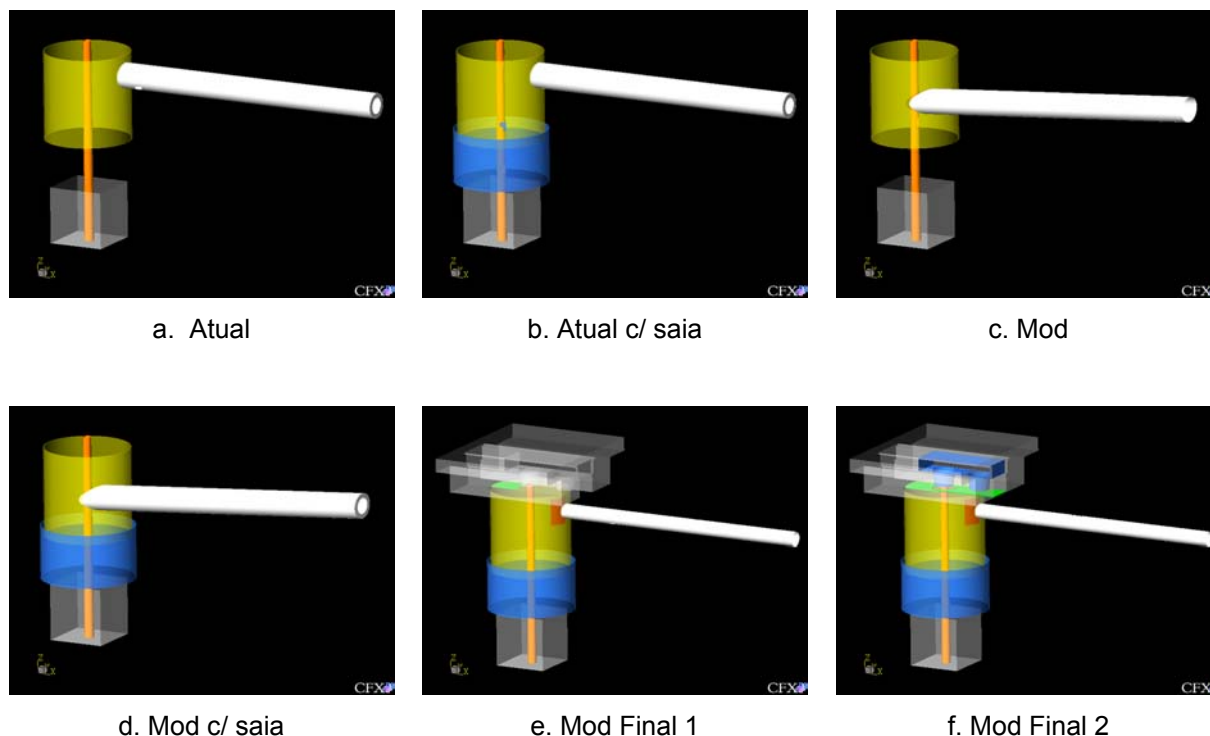


Figura 3. Configurações dos dispositivos de proteção para jato aberto.

A Figura 4 apresenta os vetores de velocidade que caracterizam o escoamento no interior do dispositivo de proteção, em um plano que o corta ao meio. Comparando os casos Atual e Atual com “saia” (Figura 4a e 4b, respectivamente), observa-se que o não uso da “saia” acarreta em uma pequena mudança na direção dos vetores abaixo da base do dispositivo de proteção (ver círculo em vermelho). Além disso, o não uso da “saia” faz com que os vetores se direcionem para o interior do dispositivo e para a região do molde, levando consigo uma certa quantidade de ar, que por sua vez, acelera a oxidação do aço.

Em relação aos casos modificados, tanto com saia quanto sem saia (Figura 4c e 4d, respectivamente), nota-se que as magnitudes de velocidade são maiores, devido ao efeito acelerador da injeção tangencial. Pode-se notar também que o campo de velocidades é elevado acima do dispositivo de proteção e em direção ascendente. Um movimento de rotação tipo ciclone pode ser observado, uma vez que o nitrogênio entra pelo duto, posicionado à esquerda, e boa parte sai pelo topo à direita. Os modelos final 1 e 2 (Figura 4.e e 4.f, respectivamente) praticamente não apresentaram diferenças neste plano de corte. Nestes dois casos considerou-se que o dispositivo de proteção está conectado ao mecanismo de troca rápida de válvula de jato aberto, o que ajuda a evitar a perda de nitrogênio acima do dispositivo de proteção.

A influência destes perfis de velocidade, bem como o acoplamento do dispositivo no mecanismo de troca-rápida de válvula de jato aberto, quanto à concentração de nitrogênio, ficam bem evidenciados na Figura 5 e na Tabela 1. Fica evidente que os casos Final 1 e 2, que possuem a saia e o acoplamento com o mecanismo de troca rápida, conseguem reter de forma eficiente o nitrogênio dentro do dispositivo de proteção.

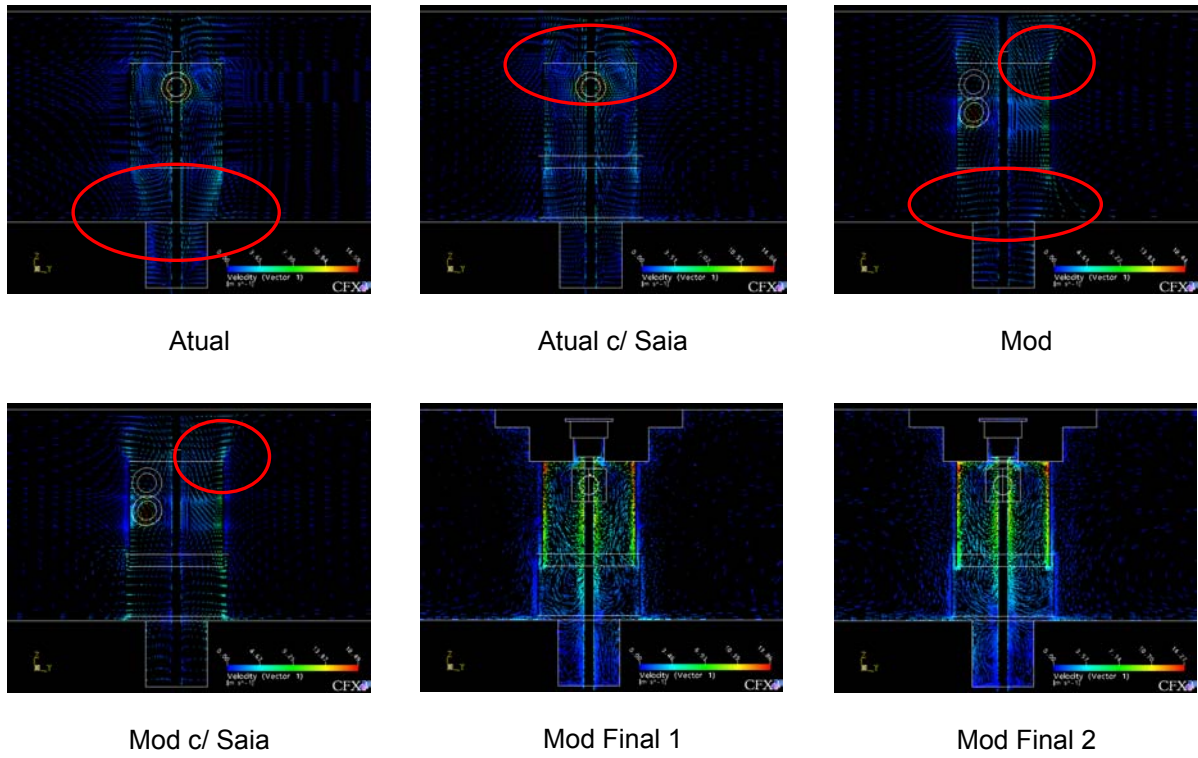


Figura 4. Vetores de velocidade.

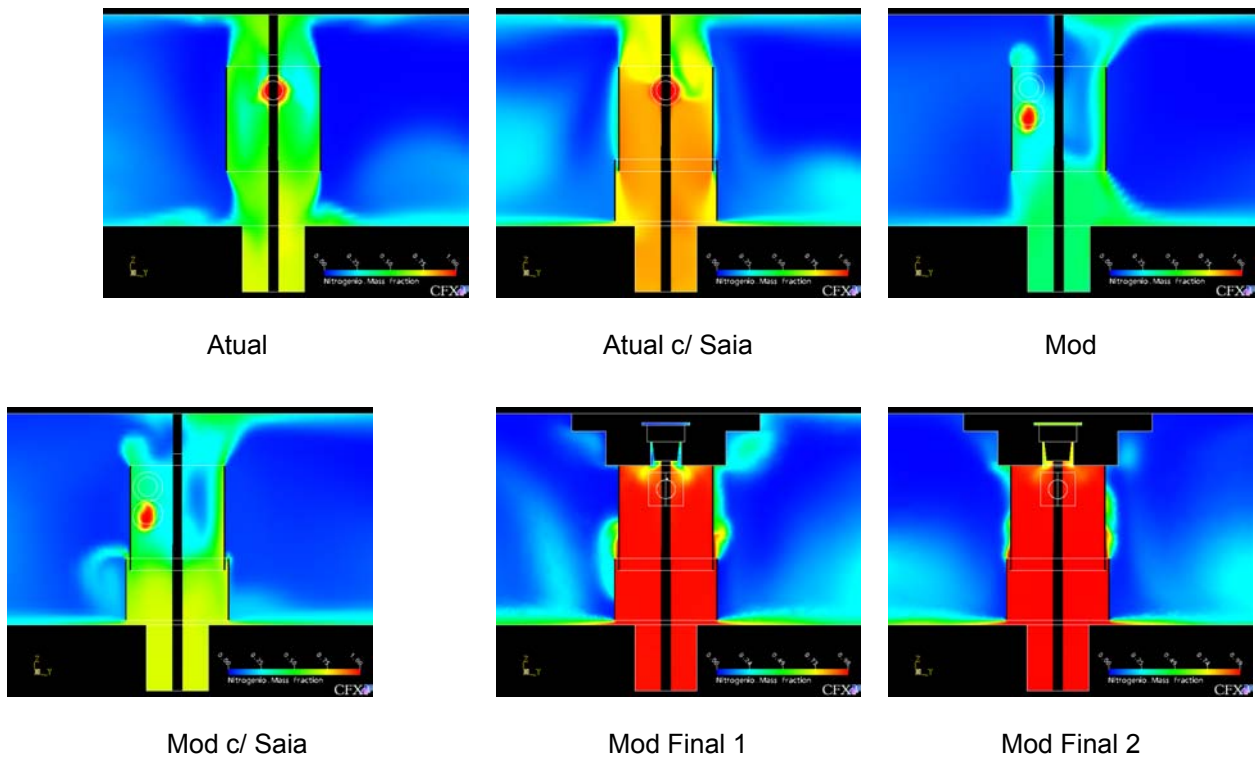


Figura 5. Fração mássica de nitrogênio.

Tabela 1. Volumes relativos de ar/nitrogênio no interior do dispositivo de proteção de jato aberto.

Parâmetro analisado	Atual s/saia	Atual c/saia	Mod s/saia	Mod c/saia	Mod Final 1	Mod Final 2
Volume ar (%)	43,9	18,43	65,55	52	9,5	4,16
Volume nitrogênio (%)	56,1	81,57	34,45	48	90,5	95,84

Na Figura 6 são apresentados os valores de fração mássica de nitrogênio na região do jato e do menisco. O ideal é que estas duas regiões estejam com altas concentrações de nitrogênio a fim de reduzir as probabilidades de oxidação do aço.

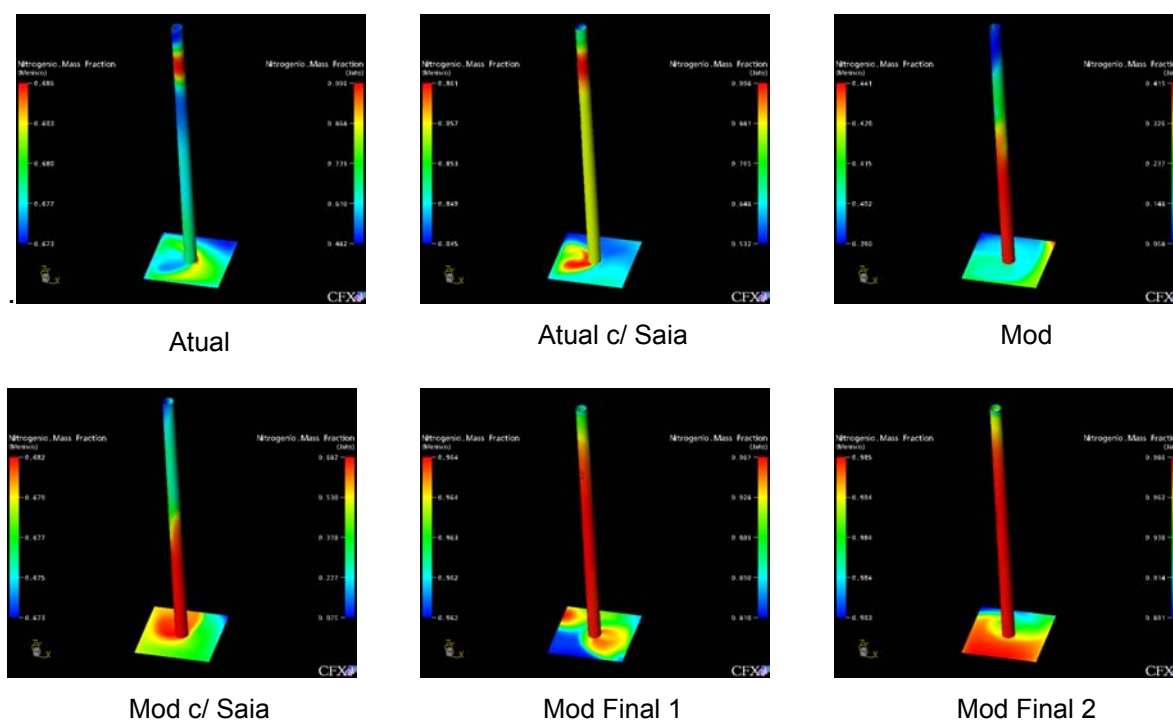


Figura 6. Fração mássica de nitrogênio junto ao jato de aço e do menisco.

Novamente os modelos final 1 e 2 apresentaram as maiores concentrações de nitrogênio, indicando uma maior capacidade de proteção do aço. É interessante notar que existem regiões com maior e menor concentração de nitrogênio, dependendo fundamentalmente das condições de escoamento.

Os valores médios de fração de nitrogênio são apresentados na Tabela 2:

Tabela 2. Valores médios de fração mássica de nitrogênio no jato e no menisco.

Local	Atual s/saia	Atual c/saia	Mod s/saia	Mod c/saia	Mod Final 1	Mod Final 2
Jato	0,69	0,87	0,24	0,40	0,95	0,98
Menisco	0,68	0,85	0,40	0,68	0,96	0,98

4 CONCLUSÕES

O escoamento ar-nitrogênio foi simulado e caracterizado no interior do dispositivo de proteção para lingotamento com jato aberto. O mesmo foi modificado de acordo com os objetivos do projeto e das possibilidades de técnicas de construção e operação do mesmo.

O uso da saia e o acoplamento do dispositivo com o mecanismo de troca-rápida de válvula de jato aberto foram de fundamental importância para a vedação e isolamento adequados do jato de aço.

Verificou-se que a colocação de um defletor na saída do tubo ajuda a evitar o choque frontal do nitrogênio com o jato de aço. Já a injeção tangencial não foi benéfica do ponto de vista de vedação e de aprisionamento do nitrogênio no interior do dispositivo de proteção. As velocidades tornaram-se muito elevadas devido ao movimento em forma de ciclone, carregando o nitrogênio para fora da região de interesse.

A partir das avaliações realizadas através da concentração de nitrogênio no interior do dispositivo de proteção e da fração mássica no menisco e no jato, é possível afirmar que a melhor configuração simulada é o modelo final 2.

Conclui-se, por fim, que a análise numérica do escoamento é uma poderosa ferramenta no auxílio à otimização do processo de fabricação de aços, ferramenta esta que já tem sido empregada com sucesso na predição de escoamentos em painéis, distribuidores e moldes, dentre outros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 SZEKELY, J. **Fluid flow phenomena in metals processing**. New York: Academic Press, 1979. p. 175-203.
- 2 BEJAN, A. **Convection heat transfer**. 2.ed. New York: John Wiley & Sons, 1995.
- 3 LAUNDER B.E., SPALDING D. B. A The numerical computation of turbulent flows. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v.3, p. 269–289, 1974.

DEVELOPMENT OF A PROTECTION DEVICE OF FREE JET USING COMPUTATIONAL FLUIDS DYNAMIC ¹

*Marcelo Kruger*²
*Marcus Vinicius Figueira dos Reis*³
*Leonardo Barboza Trindade*⁴
*Rodrigo Nazareth Borges*⁵
*Mauricio dos Santos*⁶

Abstract

The steel quality in the continuous casting can be affected when the steel is exposed to the air. Aiming a protection device for the non-protected casting, Magnesita Research and Development Center developed a device where a gas is injected inside it, with the objective to create an atmosphere with a reduced amount of oxygen. In this context, using the Computational Fluid Dynamics tool, this paper aims to carry out a qualitative and a quantitative analysis, for different geometric configurations, and determining the influence of these modifications in the standard flow. The finite volumes methodology, used in the computational package CFX 5.7[®], was applied. A multicomponent model with air and nitrogen was considered, including the natural convection due to the high temperature of the steel flow. The k- ϵ model was used to take into account the effects of turbulence.

Key-words: Computational Fluid Dynamics (CFD), Continuous Casting, Non-Protected Casting.

¹ *Technical Contribution to be presented in XXXVI Steelmaking Seminar, Vitória ES, May 2005.*

² *Mechanical Engineer, Engineering Department of ESSS*

³ *Mechanical Engineer, M.Sc., Engineering Department of ESSS*

⁴ *Physicist, Dr., Science Technology & Engineering - STE*

⁵ *Mechanical Engineer, M.Sc., Research and Development Center of Magnesita SA*

⁶ *Metallurgical Engineer, M.Sc., Technical Assistance Department of Magnesita SA*