

ESCOAMENTO FLUIDODINAMICO BIFÁSICO NO MODELO COMPUTACIONAL DA PANELA DE ACIARIA*

Getúlio Fonseca dos Santos¹
Gilberto Fernandes Lima²
Leonardo Neves³

Resumo

O refino secundário é um processo onde a homogeneização do aço e as flotações de inclusões ocorrem no banho metálico, cujo conhecimento do tempo de mistura é necessário na produção de aços limpos. A panela, principal vaso onde ocorre o processo, contém plugues ou bicos de injeção de gás inerte, podendo ser utilizados argônio ou nitrogênio, que são responsáveis pela rinsagem do aço. Devido à importância desta etapa neste processo, este trabalho objetivou realizar o estudo do escoamento bifásico do aço na panela com duas configurações diferentes, sendo a configuração um com dois plugues de gás inerte: ambos a meio raio e a configuração dois com dois plugues de gás inerte, um a meio raio e outro no centro da panela. Neste projeto foi utilizada fluidodinâmica computacional, *CFD*, para a realização das malhas e simulações que forneceram as curvas de traçador e o perfil de velocidade para ambas as configurações. Os resultados simulados indicam que a configuração dois é a mais indicada para o escoamento bifásico, sendo a melhor opção para ser utilizada no modelo de panela industrial.

Palavras-chave: simulação; escoamento bifásico; panela; refino secundário.

TWO-PHASE FLUIDODYNAMIC FLOW IN THE COMPUTER MODEL OF STEEL LADLE

Abstract

Secondary refining is a process where the homogenization of steel and flows of inclusions occur in the metallic bath, which knowledge of the time of mixture is necessary in the production of clean steels. The ladle, the main vessel where the procedure occurs, contains inert plugs or injection nozzles, argonium or nitrogen, which are responsible for the steel rinsing. Due to the importance of this stage in this process, this work has obtained the study of the two-phase steel flow with two different configurations, the configuration one with two inert gas plugs: both of the ray and the configuration two with two gas plugs inertial, one midday, and others in the center of the ladle. Computational fluidodynamics, *cfD*, for the production of simulations that provided tracer curves and the speed profile for both the configurations were used in this project. The simulated results indicate that the two configuration is the most indicated for two-phase discharge, being the best option to be used in the industrial ladle model.

Keywords: simulation; two-phase flow; ladle; secondary refining.

¹ Eng Metalurgista MSc, Engenheiro de vendas na IBAR, Poá, SP, Brasil.

² Eng. Metalurgista, Professor, Pesquisador, M.Sc. em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG), João Monlevade, MG, Brasil. amilleste@uol.com.br.

³ Eng. Metalurgista, Professor, Pesquisador, Dr. em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica, Departamento de Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, MG, Brasil. prof.leonardoneves@gmail.com.

1 INTRODUÇÃO

A indústria busca aperfeiçoar seus processos produtivos e uma das ferramentas mais utilizadas é a simulação computacional. Por meio deste instrumento, vários autores, como [1], [2], [3] e [4], buscaram melhorar processos ao construírem os protótipos, físicos ou computacionais, referentes ao refino secundário. O escoamento bifásico água/ar, sistema este utilizado por possuir propriedades similares ao sistema industrial aço/gás, garante que a mistura do escoamento criado dentro da panela seja o principal parâmetro controlador do processo de mistura.

Para que o escoamento possa ser representado numericamente através de uma simulação computacional, o usuário deve fornecer informações referentes à geometria, propriedades dos fluidos, condições de contorno. Já o modelo físico tem que obedecer a critérios de similaridade que podem ser: geométrica, dinâmica, térmica e química [5]. [6] utilizou um modelo físico, construído conforme modelo industrial da ArcelorMittal unidade João Monlevade, que seguiu os critérios de similaridade geométrica, escala 1:3, e dinâmica.

Um dos parâmetros que pode determinar a estrutura de escoamento é a variação da posição de injeção de gás. Diferentes configurações de injeção de gás induzem a formação de regiões de baixa velocidade e regiões de recirculação dentro da panela, as quais influenciam em menor ou maior grau o caráter da mistura. Na prática industrial, a redução dos tempos de mistura garante o aumento da produtividade e a redução dos insumos utilizados, por exemplo, do gás argônio. [7].

[3] mostrou em seus estudos a redução das regiões de volume estagnado e do tempo de mistura em uma liga com a utilização da configuração com dois plugues, um centralizado e outro posicionado excentricamente com vazões distintas.

A modelagem do escoamento em qualquer regime, laminar ou turbulento, é realizada através das equações de Navier-Stokes [1]. Segundo [1] a modelagem do regime turbulento pode ser realizada através da utilização do modelo $k - \epsilon$. Este modelo segundo [3] é o mais indicado para o estudo do escoamento e do fenômeno de mistura em uma panela de base circular, pois é isotrópico e de fácil convergência.

O protótipo computacional confeccionado foi baseado no modelo físico utilizado por [6]. O trabalho realizado teve como objetivo descobrir qual configuração de plugue fornece as melhores condições para melhoria da produção de aço pela indústria que utilize o padrão de panela.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais e Métodos

Neste trabalho utilizou-se a fluidodinâmica computacional (um “*software*” CFD com licença acadêmica) para realizar as simulações. No intuito de confirmar a exatidão e a confiabilidade nos dados processados (por este “*software*”) foi necessário realizar uma validação de um modelo computacional já conhecido, o modelo dos pesquisadores [2].

O modelo computacional usado nessa pesquisa foi o modelo físico de [6] que se refere a uma geometria industrial, a propriedades dos fluidos e condições iniciais de contorno. As características geométricas desse modelo físico, que é uma panela, são de um tronco cônico cuja base é circular com diâmetro interno de 868 mm, topo com diâmetro interno de 931 mm, altura máxima de 1262 mm e 18 mm de espessura lateral, dimensões estas que foram utilizadas para simular o escoamento.

Os dados físico-químicos do ar e da água, [8], introduzidos no modelo matemático foram, respectivamente, massa específica 1,185 e 997 kg/m³ e também para viscosidade dinâmica, respectivamente, 1,83E⁻⁵ e 8,90E⁻⁴ kg/m.s e para água 0,072 N/m de tensão superficial.

As condições de contorno do modelo usado no trabalho, Figura 1, estabelecidas nos contornos do domínio do modelo físico, são:

- Paredes e Fundo: Foi considerada a condição não escorregamento para a água e escorregamento livre para o gás (“*free slip*”). Próximo ao fundo da panela do lado direito foi posicionado um sensor para monitorar a adição de traçador e a velocidade média do fluido.
- Plugues de gás: Foi considerada a entrada do gás constante. A vazão de entrada de ar foi de 24 l/min, não havendo expansão desse gás por aumento de temperatura.
- Topo da Panela: Foi assumida como uma condição de “*desgassing*” gás. Para o sistema com plugue de gás, a superfície livre foi considerada com uma condição de saída livre não permitindo que as bolhas do gás saiam do sistema ao atingirem esta superfície. Próximo ao topo no lado esquerdo foi determinado o ponto de adição do traçador.

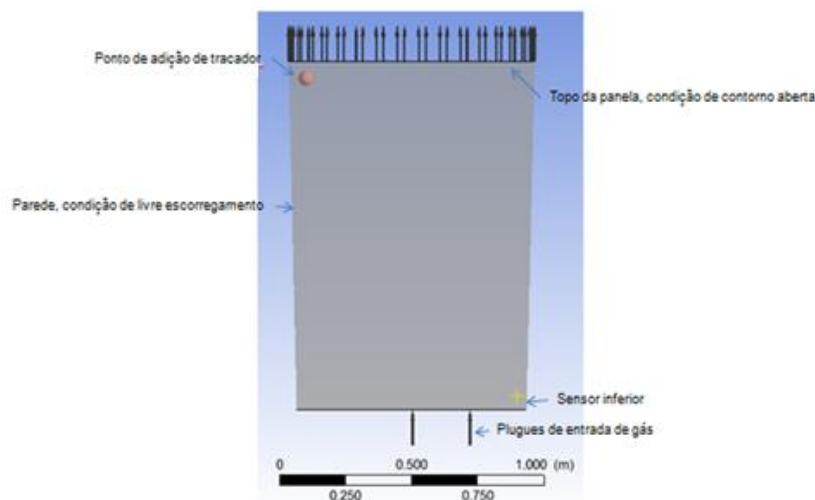


Figura 1 – Condições de contorno do modelo matemático utilizadas nas simulações para a configuração dois.

As configurações dos plugues utilizadas foram:

- Configuração um: Dois plugues a ½ raio, diametralmente opostos.
- Configuração dois: Um plugue central e outro a ½ raio, em relação ao centro da panela.

Para modelar o escoamento foi utilizado o modelo do tipo $k-\varepsilon$ e “time step” de 0,1 seg. O critério de convergência, RMS, considerado para resolução dos equacionamentos, foi de 10^{-6} .

2.2 Tipo e independência de malha

A malha não estruturada, tetraédrica, foi tomada para a solução do escoamento utilizando equações de continuidade e quantidade de movimento, e de grandezas de turbulência. De acordo com [4] a independência de malha é feita para que as dimensões do volume de controle tenham a menor influência possível nos resultados numéricos.

A Figura 2 foi simulada computacionalmente pelo autor segundo configurações: um (à esquerda) e dois (à direita).

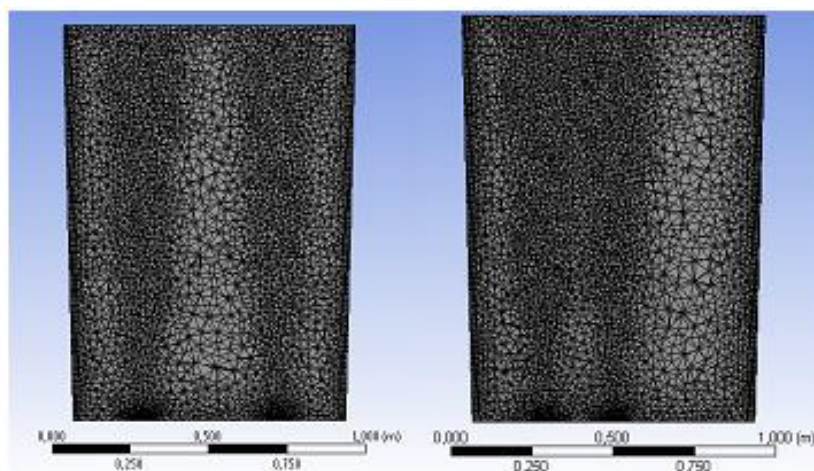


Figura 2 - Aspecto da malha-configuração um e dois.

As Tabelas 1 e 2 representam as malhas utilizadas e seus respectivos números de nós e elementos para as configurações um e dois.

Tabela 1 - Número de malhas, elementos e nós para a configuração um.

Malhas	Quantidade de Elementos	Quantidade de Nós
1	365.167	96.334
2	431.303	114.897
3	544.410	143.595
4	618.207	162.518

Tabela 2 - Número de malhas, elementos e nós para a configuração dois.

Malhas	Quantidade de Elementos	Quantidade de Nós
1	327.859	86.977
2	429.510	114.631
3	541.281	143.064

2.3 Resultados

2.3.1 Validação de um modelo computacional

O modelo dos pesquisadores [2] foi reproduzido para malha tetraédrica, modelo em escala 0.20 de uma panela de 210 toneladas, dois plugues diametralmente opostos a $\frac{1}{2}$ raio, “time step” de 0,25 seg. e fator de convergência de 10^{-4} . Os resultados de tempo de mistura, obtidos por [2] e simulação estão representados na Tabela 3 sendo que estes resultados validam o modelo computacional.

Tabela 3 – Resultados para a simulação do modelo dos pesquisadores Madan et. al. (2005).

Vazão Utilizada (l/min)	Malhas	Quantidade de Elementos	Tempo de Mistura por Madan et. al. (2005) (seg.)	Tempo de Mistura por Simulação (seg.)
10	1	450.230	42	42,50
12	2	442.303	35	35,30
15	3	470.853	31	31,25

2.3.2 Simulação computacional do modelo físico

As figuras 3 e 4 mostram os gráficos com as curvas de traçador referentes às configurações de plugues utilizadas neste trabalho.

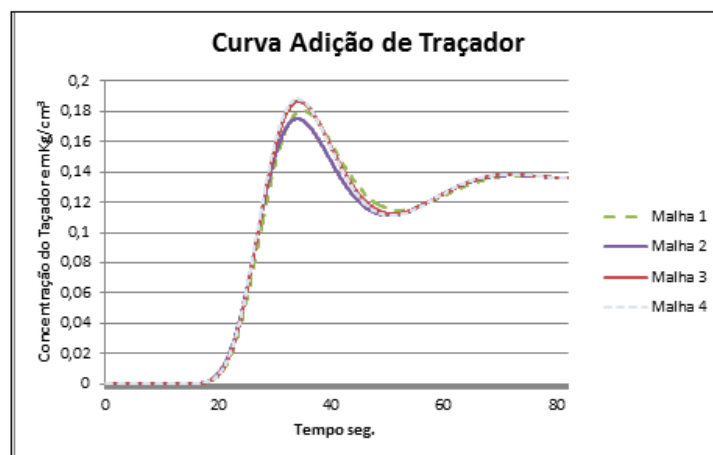


Figura 3 - Curva de adição de traçador-configuração um.

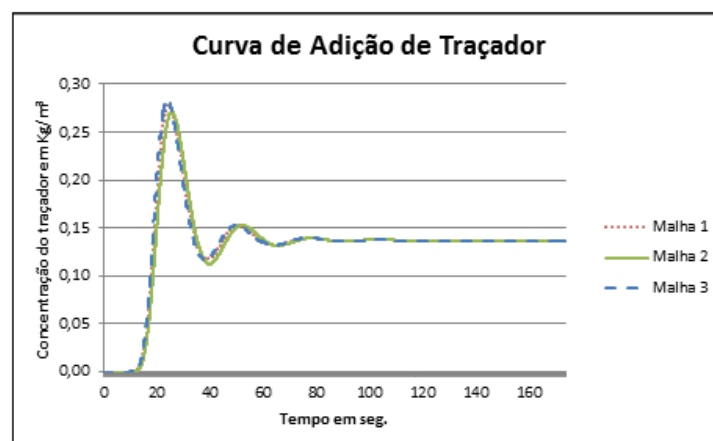


Figura 4 - Curva de adição de traçador-configuração dois.

O tempo de mistura é um parâmetro definido pelo instante em que as curvas de concentração se estabilizam entre os limites de $\pm 5\%$ da concentração final ([3]; [9]). Este parâmetro foi definido para as concentrações finais das configurações um e dois a partir das Figuras 3 e 4, respectivamente, sendo que estes valores estão representados nas Figuras 5 e 6.

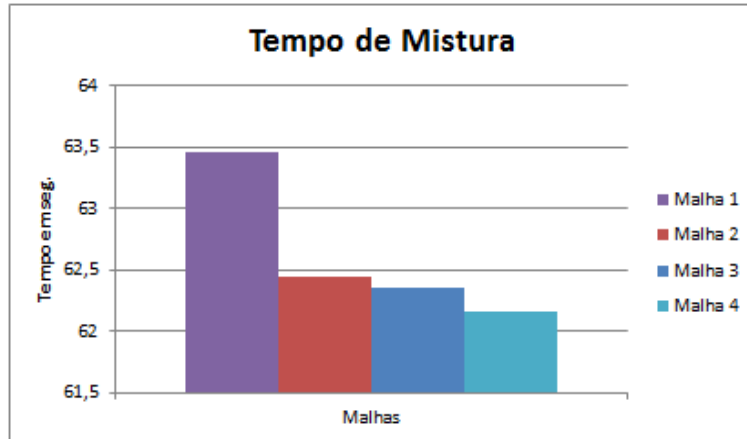


Figura 5 - Tempo de mistura para configuração um.

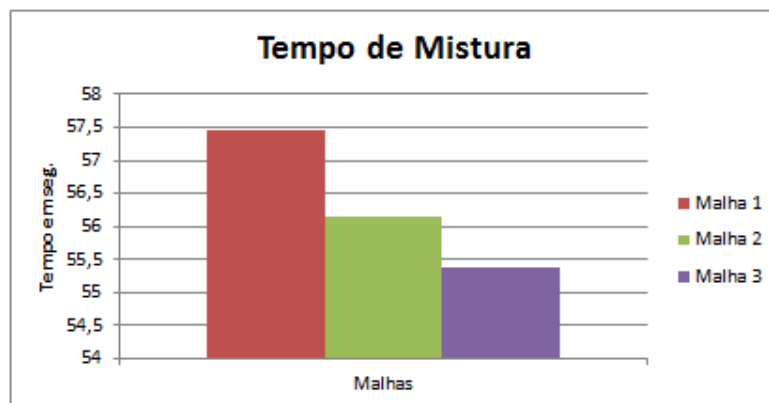


Figura 6 - Tempo de mistura para configuração dois.

A Figura 7 mostra o campo de vetores de velocidade a partir de um corte longitudinal para a configuração um e a Figura 8, para a configuração dois onde este campo é mais acentuado.

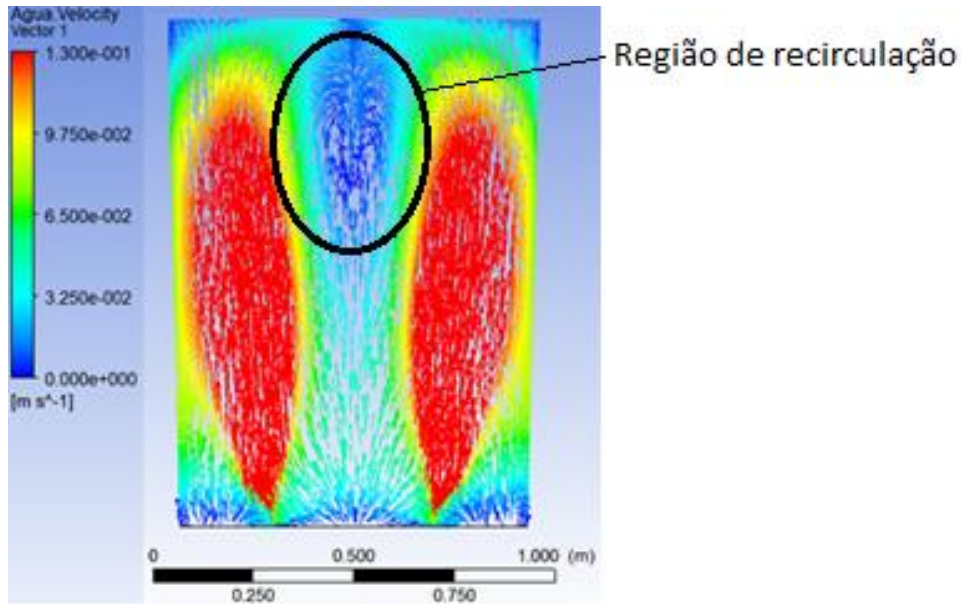


Figura 7 - Perfil de velocidade configuração um com seus respectivos valores

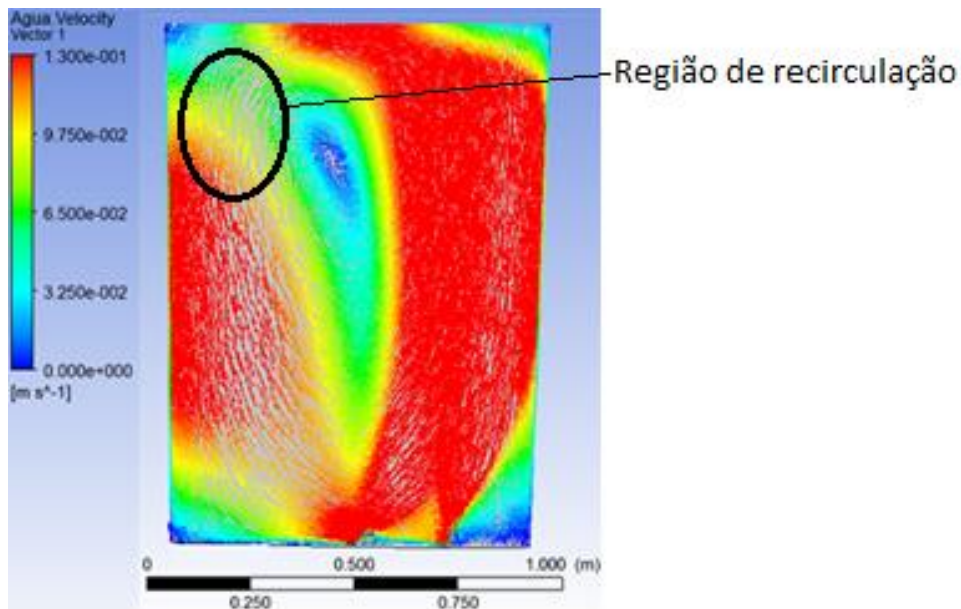
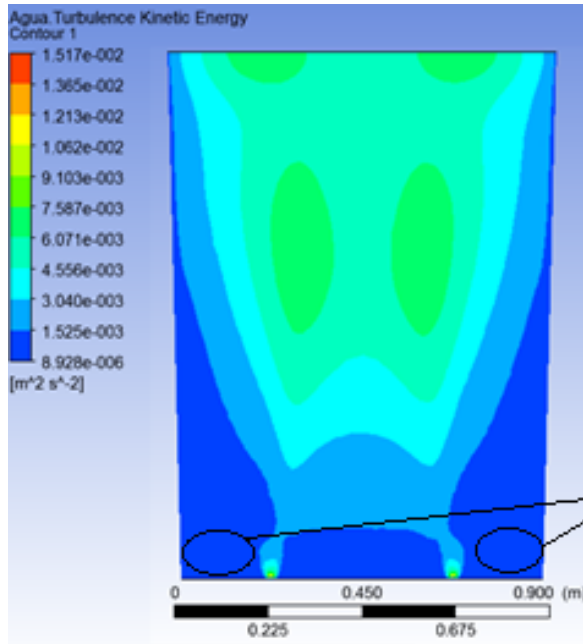


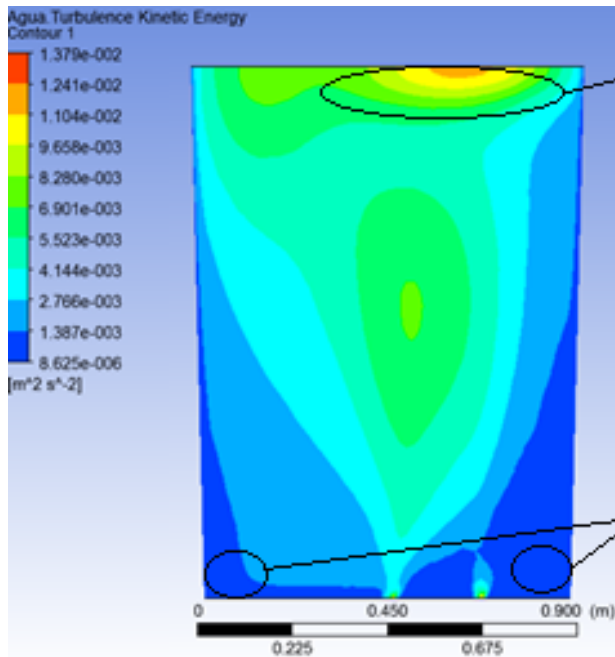
Figura 8 - Perfil de velocidade configuração dois com seus respectivos valores

Nas Figuras 9 e 10 pode-se observar o perfil de energia cinética da água para as configurações um e dois cuja energia cinética é maior em valor e intensidade, em dois.



Região de material estagnado ou "Zona Morta"

Figura 9 - Energia cinética dentro da panela configuração um.



Região de maior energia cinética turbulenta

Região de material estagnado ou "Zona Morta"

Figura 10 - Energia cinética dentro da panela configuração dois.

2.4 Discussão

Segundo [9], que estudou a otimização do tempo de mistura par um modelo matemático de panela com a implantação de dois plugs, o tempo de mistura significa um tempo para obter um nível de 95% de homogeneidade do fluido.

Ao analisarmos as Figuras 5 e 6 é estabelecido um critério para escolha da melhor malha que representa uma mínima variação entre os tempos de mistura. Segundo [3] e [4] este critério de escolha de malha simboliza um menor esforço computacional para realizar a simulação computacional. Para a configuração um, figura 5, a malha 2 obteve um tempo de mistura próximo aos das malhas mais refinadas 3 e 4, o que caracteriza sua escolha. Mesmo critério descrito foi utilizado

para a escolha da malha 2 para a configuração dois, figura 6. Essas malhas definidas serviram para o estudo e simulação de perfis de velocidade e de energia cinética da água.

Com a agitação do banho por meio de injeção de gás, quanto mais energia for transferida do gás para o metal, melhor as condições cinéticas do processo [4] que é com a configuração dois, Figura 10.

[10] que tiveram o objetivo de otimizar a taxa de dissipação de energia, após testes experimentais, concluíram que uma redução do tempo requerido para uma perfeita mistura pode ser obtida ao se posicionar um plugue fora do centro do fundo da panela, o que foi constatado pelo perfil de velocidade na Figura 8.

Segundo [10], o aumento da energia cinética turbulenta sugere uma transferência de massa mais rápida, o que pode aumentar a coalescência de inclusões no seio do banho, facilitando sua flotação, favorecendo a emulsificação de escória, acelerando reações metal-escória e gerando novas inclusões no aço, o que pode ser favorecido na configuração dois, Figura 10. Em contra partida, [4] que estudou a dessulfuração do aço de maneira computacional, o aumento da energia cinética influencia apenas na espessura da camada estagnada.

Os perfis de velocidade indicados nas Figuras 7 e 8 mostram que a distribuição de velocidade é diferente nas duas configurações utilizadas. Na configuração um há recirculação basicamente na região central da panela, Figura 7, ao passo que a recirculação do banho é favorável nas regiões descentralizadas, Figura 8. A movimentação irregular do fluido mostrado nos perfis de velocidade, Figuras 7 e 8, caracteriza o regime como turbulento.

Na Figura 8, representação da configuração dois, tem-se maior recirculação de água na parte lateral esquerda da panela e maior velocidade na parte central superior, ao passo que na Figura 10 há maior energia cinética turbulenta na mesma região central que representa a porção de maior velocidade do fluido na panela.

Após a mistura, a configuração um apresentou uma velocidade média do fluido por volta de 0,06 m/s, que é menor que a velocidade da configuração dois, que foi de 0,1 m/s. A velocidade média é um parâmetro importante de simulação, pois, segundo [4], as reações correspondentes à panela como a dessulfuração, por exemplo, ocorrem de maneira mais rápida na presença de uma velocidade média maior do banho e como consequência a circulação do metal aumenta e evita as “zonas mortas”, o que é relatado em [10].

O monitoramento de velocidade da água na “zona morta” aconteceu por meio de um sensor posicionado na base da panela. Segundo [11], que realizou um estudo numérico e experimental do escoamento de aço durante o vazamento de uma panela de aciaria, quanto menor a velocidade nesta “zona morta”, menor será a homogeneidade térmica do aço. Para a configuração um, figura 7, a velocidade presente nesta zona, base da panela, é igual à velocidade da configuração dois, figura 8, que é de 0,02 m/s. Isto pode indicar que estas configurações um e dois proporcionaram uma mesma homogeneidade térmica.

3 CONCLUSÃO

Os resultados permitiram concluir que:

Os valores encontrados por simulação computacional através do software para a validação do modelo dos pesquisadores [2] apresentaram boa concordância para com os resultados obtidos pelos pesquisadores.

A melhor configuração de plugue para o modelo computacional simulado é a configuração com um plugue no centro da panela e o outro, posicionado na metade do raio, assim definida em função da análise dos dados de tempo de mistura, o perfil de velocidade, a energia cinética da água e a velocidade na zona estagnada, o que pode contribuir para obtenção de um metal mais homogêneo e limpo.

Agradecimentos

Aos professores e orientadores Leonardo Neves e Gilberto Lima Fernandes, pela disponibilidade e orientação deste projeto. À FAPEIG pelo financiamento a pesquisa, à UEMG e à FaEnge.

REFERÊNCIAS

- 1 NETO, A. S. Curso de Turbulência nos Fluidos, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2003.
- 2 MADAN, M.; SATISH, D.; MAZUMDAR, D. Modeling of mixing in ladles fitted with dual plugs. **ISIJ International**, v.45, n.5, p.677-685, 2005.
- 3 SICORSKI SKRZEK, R. Modelagem Numérica Aplicada Aos Fenômenos de Escoamento e Mistura em Modelos Físicos de Panelas de Aciaria. Departamento de Materiais e Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Tese de Doutorado. Rio Grande do Sul, Brasil, 2006.
- 4 COSTA, L. T. Simulação Fluidodinâmica Computacional para Estudo do Tratamento de Dessulfuração do Aço, Departamento de Materiais e Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2012.
- 5 VILELA, A. C. F., TRINDADE L. B. Modelamento matemático no lingotamento contínuo. In: VILELA, A. C. F., SOARES, R. B. Lingotamento contínuo de blocos e tarugos. **ABM**, São Paulo, Cap. 14, p.163-164, 2002.
- 6 SATO, C. T., Simulação do Comportamento Escória /Aço Durante o Escoamento da Panela Através de Modelagem Física, Departamento de Materiais e Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2007.
- 7 MAZUMDAR D., GUTHRIE R.I., The Physical and Mathematical Modelling of Gas Stirred Ladle Systems, **ISIJ International**, 35(1), 1-20, 1995.
- 8 NEVES, L. Modelamento do Escoamento Multifásico no Desgaseificador RH e no Distribuidor de Lingotamento Contínuo, Departamento de Materiais e Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2012.
- 9 GENG, D., LEI, H., HE, J. Optimization of mixing time in a ladle with dual plugs. **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials**, Vol. 17, N° 6, December, pág.709, 2010.

- 10 KOR, G. J. W.; GLAWS, P. C. In. Making Shaping and Treating of Steel: Ladle refining and vacuum degassing, **The AISE steel foundation**. Cap. 11. p:661-713. Pittsburg, PA, 1998.
- 11 RODRIGUES, E. F., MARINS, A. M. F., SOLIMANI, M. R. Um estudo numérico e experimental do escoamento de aço durante o vazamento de uma panela de aciaria, **Rem: Revista Escola de Minas**, vol.60, n°3, Ouro Preto, 2007.