



UTILIZAÇÃO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA REDUÇÃO DO “CASÇÃO” DE DISTRIBUIDORES DE AÇO¹

Márcio Corrêa de Carvalho²
Daniel Rodrigues Oliveira³
Gerson Ceslau Rusky⁴
Bruno Corrêa Pinheiro⁵
Adilton Rocha da Silva⁶
Eduardo Magalhães Braga⁷

Resumo

O objetivo deste trabalho é reduzir as perdas de aço pelo distribuidor que se apresentam como volume de aço solidificado pelas paredes e pelo fundo do distribuidor durante a sua operação, denominado “cascão”. O “cascão” que se solidifica pelas paredes e pelo fundo possui um peso médio 2.000 kg. Foram coletadas várias informações a respeito das variáveis do processo e das propriedades físicas, principalmente térmicas dos materiais empregados no distribuidor e do aço líquido. A partir desses dados, foram realizados, o estudo térmico e fluidodinâmico da operação do distribuidor sob condições ideais de trabalho com auxílio de simulação computacional através do *software Ansys*. Os resultados mostraram que a mudança no formato do fundo do distribuidor, a implantação de tijolos isolantes e o ajuste da quantidade de palha de arroz utilizada na superfície do aço líquido podem diminuir a quantidade de “cascão” formado nos distribuidores nas trocas dos equipamentos durante as campanhas.

Palavras-chave: Distribuidor; Simulação computacional; “Cascão” do distribuidor; Lingotamento contínuo.

COMPUTATIONAL SIMULATION TO REDUCE “SKULLS” INTO STEEL TUNDISHES

Abstract

The aim of this work is to reduce the tundish loss of steel which appear as volume of solid steel at the walls and bottom of steel tundishes, called “skulls”. The skulls has an average weight of 2000kg. It was collected several information about variables of process and physical properties, mainly thermal properties of the tundish and liquid steel. Having all this data, thermal and fluid-dynamic approaches were performed in the tundish operation under ideal working conditions, with the aid of computational simulation using Ansys software. The results demonstrates that changes on the shape of tundish bottom, the installation of insulating refractory and the amount control of rice straw on the surface of liquid steel can decrease the amount of skulls during the exchange of tundishes on it cycles.

Key words: Tundishes; Computational simulation; Skulls; Continuous casting.

¹ Contribuição técnica ao 43º Seminário de Aciaria – Internacional, 20 a 23 de maio de 2012, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Engenheiro Químico, Prof. Msc da FEMAT- UFPA.

³ Graduando da FEMAT-UFPA e estagiário da Sinobras.

⁴ Engenheiro metalúrgico, Gerente de Aciaria da Sinobras.

⁵ Engenheiro Metalúrgico, Engenheiro de Processos da Sinobras.

⁶ Graduando da FEMAT-UFPA.

⁷ Engenheiro Mecânico, Prof. Dr. da FEM – UFPA.



1 INTRODUÇÃO

O distribuidor é um equipamento que atua no processo de lingotamento contínuo de aços. A sua principal função é a de armazenar temporariamente o aço líquido e distribuir este para os moldes de maneira que se tenha um sincronismo no processo do lingotamento contínuo. Atualmente procura-se otimizar o funcionamento do distribuidor de maneira que o mesmo possua um melhor controle do perfil de escoamento do aço, a homogeneização da temperatura e promover a flotação e separação de inclusões. Durante sua operação podem ocorrer problemas como a geração de material solidificado nas paredes do distribuidor na prática denominado de “cascão”.

Normalmente as otimizações realizadas em usinas siderúrgicas não são feitas de forma empírica, mas sim através de estudos e com a utilização de modelagens matemáticas e ou modelagens físicas em laboratórios especializados em centros de pesquisa ou universidades. O presente trabalho consiste em solucionar o problema da geração do “cascão” nos distribuidores do lingotamento contínuo da siderurgia integrada Sinobras S.A.. Otimizando seu funcionamento com o auxílio da simulação computacional. Utilizando-se o *software Ansys* é construído um modelo matemático térmico e fluidodinâmico do distribuidor a partir de suas dimensões de projeto e dados de operação. O modelo é alimentado pela coleta de valores reais de suas propriedades coletados na planta.

Soluções são propostas a partir de simulações computacionais do escoamento do aço líquido e de transferência de calor pelas paredes e pelo fundo modificando-se o projeto do distribuidor atual com outras configurações de refratários e parâmetros na operação como a quantidade de palha de arroz utilizada.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Quantificação de Perda Metálica

A primeira parte do trabalho consistiu em se quantificar a perda metálica gerada pelos distribuidores durante as campanhas. Para tal foram feitas medições diretas do peso do cascão e indiretas a partir das suas dimensões médias calculando o peso médio através do volume médio e da densidade do aço no estado sólido. O peso do cascão gerado no fundo do distribuidor era de aproximadamente 2.000 Kg e o gerado nas paredes era de aproximadamente 800 Kg. As Figuras 1 e 2 mostram as fotos do “cascões” do fundo e da lateral respectivamente.



Figura 1. Cascão do fundo do distribuidor.



Figura 2. Medição da espessura do casão.

2.2 Modelo Matemático para Perfil de Escoamento

O trabalho consistiu em se determinar o perfil de escoamento do aço líquido. O escoamento foi analisado a luz da equação de Navier Stokes para a continuidade, quantidade de movimento e energia. Foi considerado o modelo k- ϵ de turbulência, as constantes foram as mesmas encontradas por Launden e Spalding⁽¹⁾ *apud* Barbosa, Araújo Filho e Tavares.⁽²⁾ As Equações 1 e 2 regem o fenômeno de escoamento:

- Equação diferencial geral de Navier-Stokes⁽³⁾

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \mu_{eff} \nabla^2 u - \nabla p + \rho g \quad (1)$$

- Equação da continuidade⁽³⁾

$$\nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (2)$$

2.2.1 Condições de contorno

Verificou-se o perfil do escoamento do aço em regime estacionário com perdas de calor, que será detalhado posteriormente. Foram admitidas as seguintes condições de contorno:

Vazão de entrada de aço de 2,92 m/s, vazão mássica de saída em cada veio de 4,21 kg/s, paredes não adiabáticas com condição de não escorregamento, superfície externa a pressão de 1 atm, desprezou-se a presença de escória na superfície do aço, arraste de escória e ar pelo jato de aço. O aço se encontra a uma temperatura uniforme de entrada de 1.555°C.

2.3 Modelo Matemático para Perfil de Temperatura

Foram realizados dois tipos de simulações. A primeira para se conhecer o perfil de temperatura pelo distribuidor e a segunda para determinar a perda de calor pelo aço líquido com o tempo. Assim foram calculadas através da Lei de Fourier as taxas de transferência e fluxo de calor através das paredes do distribuidor.

2.3.1 Condições de contorno

Considerou-se apenas a condução de calor pelos refratários e pela escória, não levando em conta a convecção do aço líquido e as perdas de calor por radiação pela superfície da escória e da chapa metálica do distribuidor. Para que estes cálculos pudessem ser realizados foram medidas as temperaturas do aço líquido através de termopares e da chapa externa do distribuidor e superfície externa isolada através de câmera termográfica e pirômetro com ponto de medição de temperatura



localizado no centro da parede frontal do distribuidor. As Figuras 3 e 4 mostram as termografias da chapa metálica e da superfície isolada respectivamente.

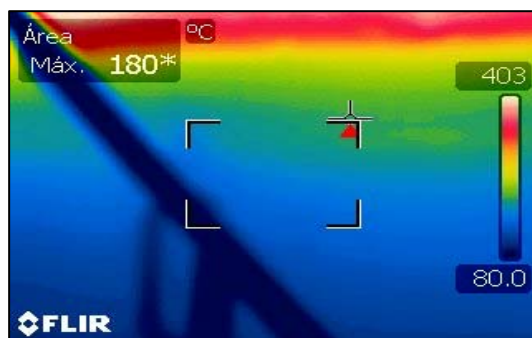


Figura 3. Termografia da chapa frontal.

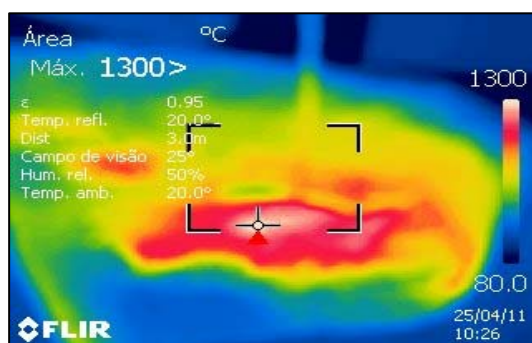


Figura 4. Termografia da superfície isolada.

Considerou-se que a temperatura do banho era uniforme, e ideal de 1.555°C por todo seu volume, portanto, considerou-se que a temperatura na parede interna do distribuidor estivesse à temperatura uniforme de 1.555°C. Simplificou-se o modelo utilizando a Lei de Fourier para o cálculo de transferência de calor para paredes planas considerando as áreas das paredes do distribuidor. A taxa de transferência de calor e Fluxo de calor foi obtida a partir das Equações 3 e 4 de acordo com Seshadri et al.⁽³⁾ e Incropera⁽⁴⁾ respectivamente:

$$Q_f = \frac{(T_{s2} - T_{s1})}{\frac{LA}{KA \cdot Af} + \frac{LB}{KB \cdot Af} + \frac{LC}{KC \cdot Af} + \frac{LD}{KD \cdot Af}} \quad (3) \quad q_f = \frac{Q_f}{A} \quad (4)$$

Onde:

- Ts1 = temperatura na superfície da chapa metálica (180°C);
- Ts2 = temperatura na superfície de contato aço - massa refratária (1.555°C);
- KA = condutividade da chapa metálica = 60,5 W/m°C;
- KB = condutividade do Alukor 70 = 7,34 W/m°C;
- KC = condutividade do Alukor 85 = 1,88 W/m°C;
- KD = condutividade do Jetmag = 0,756 W/m°C;
- LA = espessura da chapa metálica = 20 mm;
- LB = espessura do tijolo permanente (Alukor 70) = 32 mm;
- LC = espessura do tijolo de trabalho (Alukor 85) = 152 mm e 229 mm;
- LD = espessura da massa refratária (Jetmag) = 30 mm;
- A = área;
- Qf = taxa de transferência de calor; e
- qf = fluxo de calor.



O cálculo de perda de calor pela superfície considerou uma camada isolante de palha de arroz de 10 mm de espessura e que não haveria perda de calor por irradiação e convecção pela mesma. Sendo assim, calculou-se através da Lei de Fourier apenas a condução de calor entre a interface do banho e a escória formada e a superfície externa em contato com o ambiente com os dados obtidos na termografia, segundo Assis⁽⁵⁾ a escória proveniente de palha de arroz possui condutividade térmica de 1,21 W/m°C.

2.4 Desenvolvimento das Simulações do Distribuidor

Para o desenvolvimento das simulações foram geradas em *software CAD3D* as geometrias do distribuidor de forma simplificada para as simulações de perfil de temperatura e geometria do aço líquido para as simulações de perfil de escoamento. Foram geradas geometrias do distribuidor original e do distribuidor com modificações para futuras comparações. Os modelos computacionais foram criados no *software Ansys*. A Figura 5 mostra respectivamente as geometrias com as malhas de elementos finitos gerados para o distribuidor original e para as modificações para as simulações térmicas.

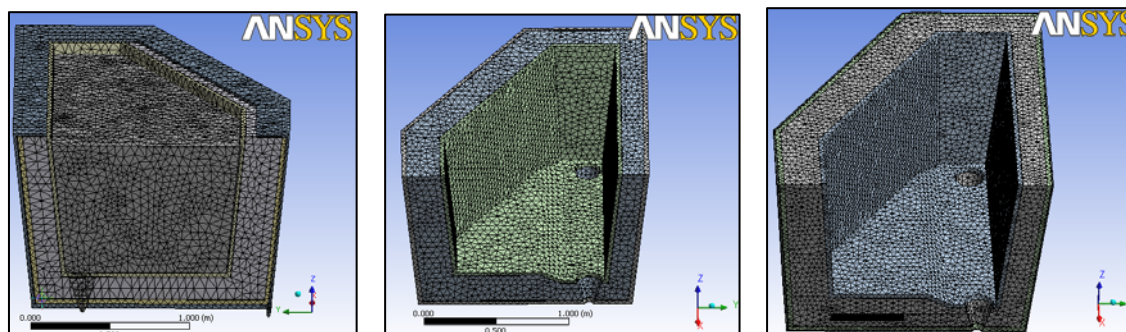


Figura 5. Respectivamente: Malhas n°1, n°2 e n°3.

As malhas geradas foram tetraédricas e estas foram modificadas para que se houvesse uma melhora nos resultados. A primeira malha é constituída de 36.425 nós e 127.106 elementos. A segunda malha é constituída de 54766 nós e 262.037 elementos, o terceiro foi constituído de 113.958 nós e 544.137 elementos com física de referência CFD.

Para as simulações de escoamento foram modelados somente o volume do aço líquido do distribuidor atual e de possível modificação. A Figura 6 mostra as malhas geradas.

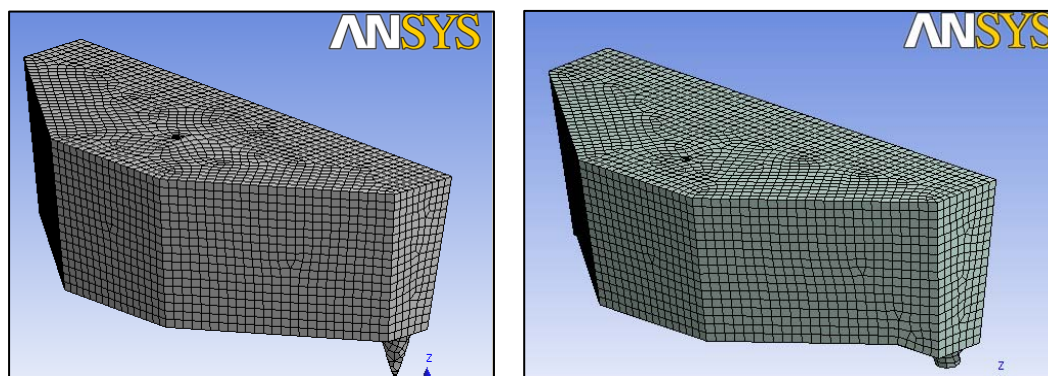


Figura 6. Respectivamente: Malhas n°4 e n°5.



As malhas da Figuras 6, foram geradas a partir de elementos hexaédricos, com física de referência CFD. A malha para o distribuidor atual possui 21.981 elementos e 23.154 elementos e a malha para o volume modificado possui 21.317 nós e 22.659 elementos. O tamanho do elemento foi testado várias vezes e definiram-se o tamanho de 0,05 m com alta relevância para se melhorar os resultados nas regiões de entrada e saída de aço. Além destas malhas foram geradas outras duas malhas com os mesmos procedimentos das anteriores, porém com nível de aço de 130 mm e sem vazão de entrada a fim de se simular o estado de esvaziamento do distribuidor no nível de formação de cascão.

3 RESULTADOS

3.1 Cálculos de Transferência de Calor

Os cálculos de transferência de calor por condução através dos refratários e superfície mostraram que a perda de calor é muito relevante. Segundo Bordin,⁽⁶⁾ em seu trabalho com um distribuidor de 12 toneladas, para um modelo não isotérmico as perdas térmicas pela superfície, paredes e fundo foram, respectivamente, 15.000 W/m², 3.200 W/m² e 1.400 W/m². No caso estudado obtivemos as taxas de transferência e fluxo de calor pelas paredes:

Tabela 1. Fluxo de calor e taxa de transferência de calor pelo distribuidor (10/2011)

Parede	Qf (W)	qf (W/m ²)
Parede frontal	23.938,85	9.499,55
Parede lateral	3.543,8	11.081,34
Fundo	18.845,94	9.489,39
Região do Δ	8.283,13	7.408,59
Lado da bica	5413	7.415,99

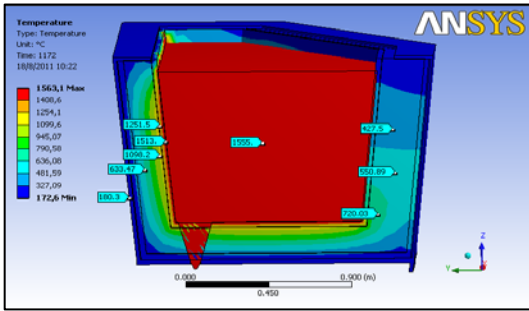
Para a superfície o resultado do cálculo da transferência de calor foi de:

$$q_{\text{esc}} = \frac{1,21 \text{ W/mK} (1828 \text{ K} - 1573\text{K})}{0,010 \text{ m}}$$

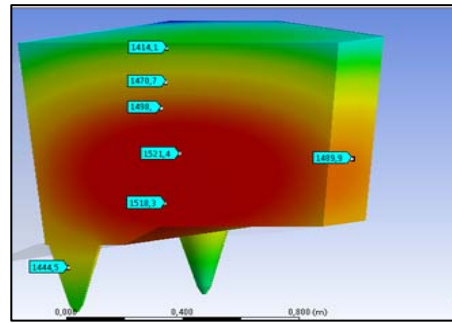
$$q_{\text{esc}} = 30855 \text{ W/m}^2$$

3.2 Resultados das Simulações Térmicas

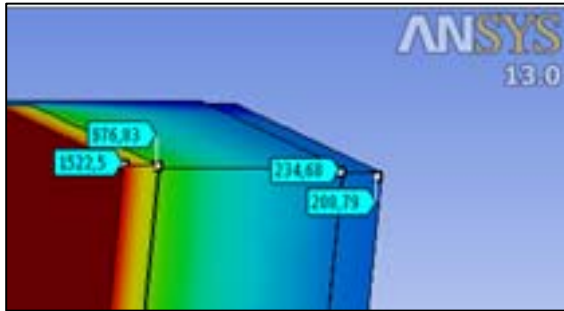
As simulações térmicas foram realizadas primeiramente em regime estacionário para se determinar o perfil de temperaturas nas paredes e fundo do distribuidor e depois em regime transiente em um tempo de 14.400 s, sendo este o tempo necessário para o encharque do distribuidor, o qual é realizado em máquinas de aquecimento por chama de gás GLP. Foi desconsiderado o volume de aço líquido para o regime transiente, sendo considerada a temperatura do banho na superfície da massa refratária. A Figura 7 mostra os resultados das simulações em regime estacionário e transiente.



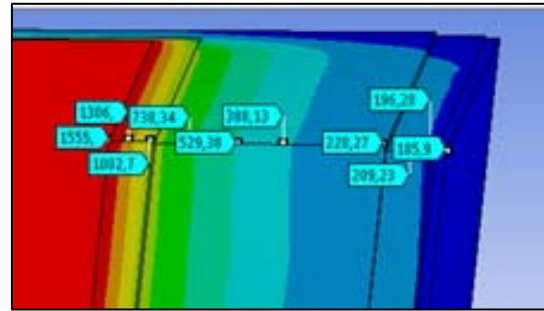
(a)



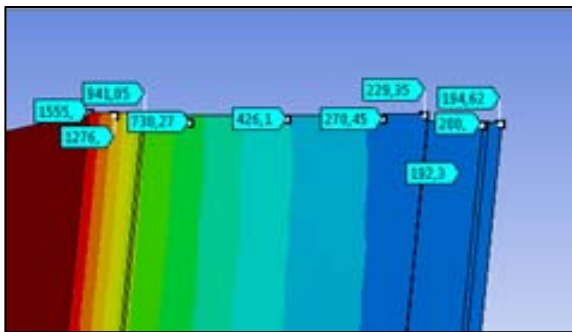
(b)



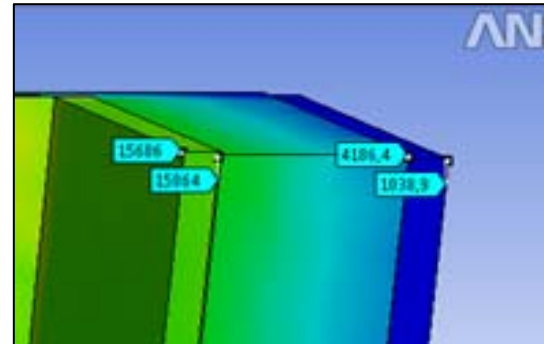
(c)



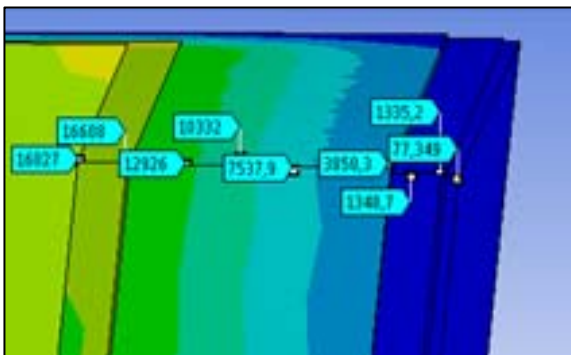
(d)



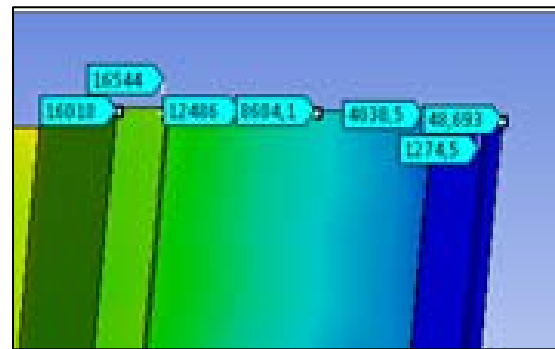
(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 7. (a) perfil de temperatura distribuidor atual regime permanente; (b) perfil de temperatura distribuidor atual regime transiente após 1 h; (c) perfil de temperatura distribuidor atual regime transiente; (d) perfil de temperatura distribuidor com placa isolante tipo 1 em regime transiente; (e) perfil de temperatura distribuidor com placa isolante tipo 2 em regime transiente; (f) fluxo de calor distribuidor atual; (g) fluxo de calor distribuidor com placa isolante tipo 1; e (h) fluxo de calor distribuidor com placa isolante tipo 2.

3.3 Resultados das Simulações de Escoamento

A primeira simulação foi realizada em regime estacionário considerando as perdas de calor já calculadas. Os resultados obtidos foram as linhas de fluxo do



escoamento do aço considerando a saída pelos 2 veios laterais, como é comumente utilizado, e entrada de aço com temperatura de 1.555°C e com variação de temperatura do aço enquanto o mesmo escoava sob condições ideais. Os resultados estão demonstrados nas Figuras 8 e 9. A segunda simulação realizada desconsiderou a entrada de aço e o volume considerado foi o volume do nível de formação do cascão, que como já foi dito é de aproximadamente 130 mm. Estes são mostrados nas Figuras 10 e 11 com as linhas de fluxo do distribuidor atual e modificado respectivamente.

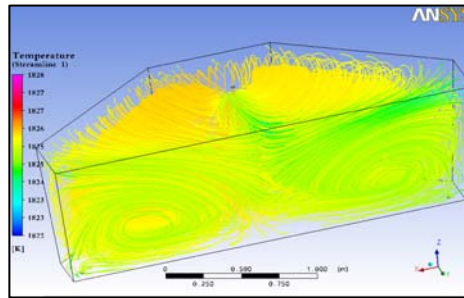


Figura 8. Linhas de fluxo variando com T.

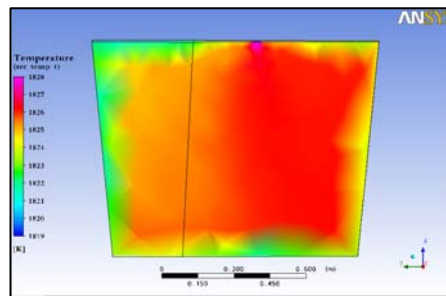


Figura 9. Seção com temperaturas do aço.

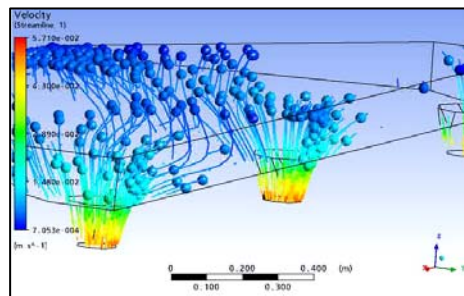


Figura 10. Linhas de fluxo dist. atual.

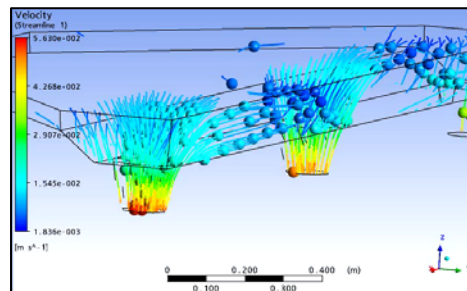


Figura 11. Linhas de fluxo dist. modificado.



4 DISCUSSÃO

4.1 Simulações Térmicas

O resultado mostrado na Figura 7a mostra o perfil de temperatura do distribuidor atual trabalhando em regime permanente considerando o aço sem convecção, a Figura 7c apresenta o perfil de temperatura do distribuidor em regime transiente após 14.400 s, as Figuras 7d e 7e demonstram que a incorporação de placas de material isolante com espessuras de 10 mm entre a chapa metálica e o tijolo permanente diminui a temperatura na parte externa do distribuidor. As simulações transientes mostram que as temperaturas mais externas diminuem de 208,79°C para 185,9°C para o primeiro tipo de isolante e de 208,79°C para 194,62°C para o segundo tipo de isolante, fato que resulta em uma menor perda de calor pelo distribuidor. Ao mesmo tempo constata-se que as temperaturas dos refratários mais próximos ao banho se elevaram, isto acontece devido a maior retenção de energia térmica no seu interior garantindo que a temperatura interna seja retida por mais tempo. Estes resultados são comprovados também pelas simulações de transferência de fluxo. A Figura 7f mostra o fluxo de calor em regime transiente para o distribuidor atual. As Figuras 7g e 7h mostram que o fluxo, também em regime transiente, na parte mais externa diminui em comparação com o distribuidor atual de 1.038,9 W/m² para 77,39 W/m² para o primeiro tipo de isolante e de 1.038,9 W/m² para 48,69 W/m² para o segundo tipo de isolante.

A Figura 7b mostra que se o aço permanecer sem escoar e sem ser renovado, o que pode acontecer durante o *pit stop* por um tempo máximo de 3.600 s, ele perde temperatura para um valor de 1.285°C, o que resulta teoricamente em uma perda de 4,5°C/min. Obviamente a perda de temperatura do banho não é uniforme, a maior perda acontece pela superfície e pelas paredes, principalmente pelos cantos das paredes, porém, é suficiente para que o aço se solidifique nas paredes do distribuidor. Mesmo que haja a renovação do aço, este não conseguirá liquefazer o aço solidificado nas paredes.

4.2 Simulações de Escoamento

A simulação de escoamento das Figuras 8 e 9 mostram as linhas de fluxo do escoamento de aço e perfil de temperatura respectivamente quando o distribuidor está trabalhando cheio, em condições ideais e operando com 2 veios abertos, sendo esta a situação mais comum de operação do distribuidor estudado. Pode-se notar que há uma variação de aproximadamente 6°C e as menores temperaturas se encontram na parede frontal, onde se tem grande perda de calor, e que o escoamento é bastante turbulento com presença de grandes vórtices e com regiões mortas. Isto se deve a falta de inibidores de turbulência e válvula longa. No trabalho de Bordin,⁽⁶⁾ a variação de temperatura no volume do banho também foi de 6°C.

As Figuras 10 e 11 mostram que dependendo do formato do fundo do distribuidor, devido ao seu esvaziamento há a formação de vórtices com fluxo radial como explicado por Mazzaferro et al.⁽⁷⁾ para painéis de aciaria. Este fenômeno é conhecido como *Drain Sink*. Segundo Rodrigues et al.⁽⁸⁾ ele se forma devido a diferença de pressões no aço formando assim um funil invertido que termina por arrastar a escória consigo pelo centro do funil e o volume de aço que fica retido no recipiente depende da velocidade de rotação inicial e da excentricidade do furo. Com o fundo do distribuidor plano houve a formação de vórtices mais abertos e mais espalhados. Já com o desnível no fundo do distribuidor se obteve a formação de



vórtices mais fechados e concentrados na região mais próximos aos veios. Isto quer dizer que no distribuidor com o fundo plano durante o seu esvaziamento há a formação de vórtices mais abertos ao nível estudado e com isto o arraste de escória para dentro dos veios que é logo interrompido pela operação, retendo conseqüentemente um volume de aço que após a limpeza do distribuidor se apresenta como na Figura 1. Já com o formato do fundo modificado, durante o fenômeno de formação dos vórtices e a passagem de escória se tem um volume de aço bem menor minimizando assim o “cascão”.

5 CONCLUSÃO

Através de dados coletados na planta, dos cálculos efetuados com os referidos parâmetros e pelas simulações verificou-se que a perda de calor pela superfície, paredes e fundo do distribuidor são as principais causas da formação do “cascão” do distribuidor. Não se pode esquecer que a operação também tem grande influência devido às oscilações no nível de aço líquido do distribuidor motivado pelas esperas do processo de refino secundário para a liberação de painéis cheios para o lingotamento contínuo e a quantidade de palha de arroz introduzida para formação de camada isolante.

A implantação de placas isolantes ou até mesmo tijolos isolantes ajuda a evitar a perda de calor pelos refratários, mantém uma maior energia térmica dentro do distribuidor por mais tempo e conseqüentemente pode levar a um tempo menor para o encharque e pode se evitar também a necessidade de entrada de aço com sobretemperatura dando uma maior vida útil aos refratários.

Foi observado também que o perfil do fundo do distribuidor contribui para a formação do cascão no fundo devido ao efeito *Drain Sink* e que com a mudança no perfil se minimiza este efeito indesejável. A formação da camada isolante promovida pela palha de arroz pode ser aumentada dentro de certos limites para que a mesma promova um maior isolamento térmico. A simulação computacional demonstrou ser uma ferramenta potente e versátil na modelagem do problema de escoamento e térmico do distribuidor, contribuindo para a diminuição da perda metálica.

Agradecimentos

Siderúrgica Norte Brasil – Sinobras S.A.
Magnesita S.A.
Laboratórios de Ensaios Destrutivos – LED – UFPA

REFERÊNCIAS

- 1 LAUNDER, B. E.; SPALDING, D.B.. The numerical computation of turbulent. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, v. 3, p. 269-289, 1974.
- 2 BARBOSA, F. A., ARAÚJO FILHO, G.M., TAVARES, R.P. Modelagens matemática e física do escoamento do aço líquido em diferentes projetos de distribuidor do lingotamento contínuo da Usiminas, Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo, v.1, n.4. p.34-39, 2005.
- 3 SESHADRI, V., TAVARES, R. P., SILVA. C.A., SILVA. I. A. Fenômenos de Transporte: Fundamentos e aplicações nas Engenharias Metalúrgica e de Materiais, São Paulo, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, p. 320-326, 2010.
- 4 INCROPERA. F.P., DE WITT. D.P. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa, Rio de Janeiro, LTC, 5ed, p. 36-37 e 62-63, 2003.



- 5 ASSIS, P.S. Modeling and Simulation on Iron and Steelmaking, Ouro Preto, REM, 1ed., p. 325-330,1998.
- 6 BORDIN, Fernanda, Modelamento Matemático do Escoamento do Aço num Distribuidor de Lingotamento Contínuo. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – PPGEM da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Poto Alegre, 2001.
- 7 MAZZAFERRO, G.M.,PIVA, M.,FERRO, S. P.; BISSIO, P.. Experimental and Numerical analysis of ladle teeming. Ironmaking and Steelmaking, 31:503-508,2004.
- 8 RODRIGUES, E.F., MIRANDA, A.M., ROCHA, L.J.C.. Numerical Simulation of Fluid Dynamics Steel Draining of Ladle. Mecânica Computacional, Buenos Aires, v. 29, p 3825–3845, 2010.