

# DESENVOLVIMENTO DE CONTROLADORES DE FLUXO, ATRAVÉS DE ESTUDO COMPUTACIONAL, PARA OS DISTRIBUIDORES DE AÇO DA MÁQUINA DE LINGOTAMENTO 4 DA CSN.<sup>(1)</sup>

Alfredo Fonseca Veiga<sup>(2)</sup>  
Antônio Carlos Sant'anna da Silva<sup>(3)</sup>  
Carlos Alberto Pinheiro Vieira<sup>(4)</sup>  
José Ernesto de Azevedo Nadalon<sup>(5)</sup>  
Leonardo Barboza Trindade<sup>(6)</sup>  
Marcus Reis<sup>(7)</sup>  
Marcelo Kruger<sup>(8)</sup>  
Noraldito Hipólito Guimarães Gomes<sup>(9)</sup>

## Resumo

Originalmente os Distribuidores de Aço da Máquina de Lingotamento Contínuo 4 da CSN não possuíam controladores de fluxo, diques e inibidores de turbulências, como parte integrante de sua configuração interna. Com a necessidade de melhoria da qualidade do aço foram realizados estudos, através de modelos computacionais, de novas configurações internas e determinou-se uma combinação de diques e inibidor de turbulência que melhorou as características do fluxo. Os resultados do modelo computacional foram confirmados em testes industriais que consistiram na comparação, para distribuidores sem controladores de fluxo e distribuidores com controladores de fluxo, do índice de obstrução dos veios e da presença de inclusões não metálicas no aço. O uso de controladores de fluxo diminuiu o índice de clogging nos veios de lingotamento, assim como melhorou a qualidade do aço por meio da diminuição do número de inclusões. Com o intuito de aumentar o rendimento do aço líquido no distribuidor da Máquina 4, mas preservando as melhorias no fluxo de aço conseguidas através da combinação de diques e inibidor de turbulência, foi desenvolvido o modelo computacional do Sistema YES. Embora os testes industriais ainda não tenham sido realizados, os resultados do modelo computacional e uma breve discussão do Sistema YES são apresentados neste trabalho.

**Palavras-chave:** distribuidor, inibidor de turbulência, sistema YES.

(1) Contribuição Técnica a ser apresentada no XXXVI Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais, Vitória ES, maio de 2005.

(2) Engenheiro Metalurgista, M.Sc., Departamento de Assistência Técnica da Magnesita SA;

(3) Engenheiro Metalurgista, Gerência de Tecnologia da Metalurgia da CSN;

(4) Engenheiro Mecânico, Centro de Pesquisas da Magnesita SA;

(5) Engenheiro Civil, Science Technology & Engineering – STE;

(6) Físico, Dr., Science Technology & Engineering - STE;

(7) Engenheiro Mecânico, M.Sc., Departamento de Engenharia da ESSS;

(8) Engenheiro Mecânico, Departamento de Engenharia da ESSS;

(9) Engenheiro Metalurgista, Gerência Geral da Metalurgia do Aço da CSN.

## INTRODUÇÃO

A Companhia Siderúrgica Nacional – CSN possui 3 Máquinas de Lingotamento Contínuo de placas de 2 veios cada uma. As Máquinas 2 e 3, cuja produção está grande parte voltada para o lingotamento de aços especiais, como IF e API, são dotadas de distribuidores de aço de 30 t de capacidade nominal. A Máquina 4, responsável pela produção de aços baixo, médio e alto carbono e IF para partes expostas, possui distribuidores de 60 t de capacidade nominal e é responsável por cerca de 40% da produção da Aciaria.

Desde o início de operação da Máquina 4, em dezembro de 1998, o distribuidor de aço era desprovido de barreiras, diques ou inibidores de turbulência, ou seja, de qualquer controlador de fluxo. Em 2003, foi proposta uma configuração de diques e inibidor de turbulência que pudesse melhorar as condições do fluxo do aço. Foi, então, desenvolvido um modelo numérico para estudar os volumes característicos<sup>(1,2,3)</sup> e o nível de remoção de inclusões da configuração original, dita “vazia”, comparativamente a nova configuração, dita “com controladores de fluxo”. Depois que as simulações numéricas foram concluídas, testes industriais foram realizados comparando-se as duas configurações, com controladores de fluxo e vazia, por meio do monitoramento de dois parâmetros: limpeza interna por contagem de inclusão e índice de placas desviadas por desobstrução dos veios com vara.

Uma nova configuração interna para o distribuidor de aço da Máquina 4 vem sendo desenvolvida, mas não com o objetivo de melhorar as condições do fluxo de aço. Desta vez o objetivo é aumentar o rendimento metálico da Máquina de Lingotamento Contínuo através da redução do cascão de aço que sobra no interior do distribuidor no final da seqüência de lingotamento. Esta nova configuração, conhecida como Sistema YES, já foi modelada numericamente e os testes industriais já estão em fase inicial.

Este trabalho traz uma descrição do modelamento numérico e seus resultados para as 3 configurações (vazia, com controladores de fluxo e YES), os resultados operacionais dos testes industriais alcançados até então e uma breve descrição do Sistema YES.

## MATERIAL E MÉTODO

### Modelamento Numérico

Para a determinação da melhor configuração de modificadores, foram empregadas duas técnicas de quantificação e qualificação do escoamento: análise de curvas de Distribuição de Tempos de Residência – DTR e análise Lagrangeana que simula a trajetória das partículas de inclusões. A primeira é utilizada há muitos anos em modelos físicos e constitui-se em uma análise empregada inicialmente em reatores químicos.<sup>(4,5,6)</sup> Através dessa técnica é possível avaliar os tempos característicos do escoamento, como por exemplo, os tempos mínimo e médio de residência. A porcentagem do escoamento em regime pistonado (FFP), morto (FVM) e de mistura (FMP) também pode ser determinada e é importante para a caracterização do escoamento. O modelo Lagrangeano<sup>(7)</sup> consiste basicamente em se calcular as forças que agem sobre uma partícula (inclusões) sujeita às condições do escoamento.

Nessas condições as principais forças que agem sobre elas são as forças de empuxo, arraste e turbulência.

Os modelos numéricos para a solução de problemas envolvendo mecânica dos fluidos devem descrever os aspectos mais importantes da física do problema real. Para modelar o escoamento no interior do distribuidor são utilizadas as equações de Navier-Stokes. A simulação das curvas DTR envolve a adição de um traçador e o cálculo de sua concentração em função do tempo. O modelo Lagrangeano resolve um balanço de forças sobre cada partícula e é simulado em regime estacionário. Adicionalmente, condições de contorno para cada uma das variáveis independentes do problema devem ser fornecidas em cada fronteira do domínio. O software empregado para resolver o problema numérico foi o CFX-5.6, que se baseia em uma discretização espacial com esquema de alta resolução (High Resolution) para a representação dos termos advectivos das equações de Navier-Stokes. Os parâmetros simulados, como propriedades físicas do aço líquido e condições operacionais simuladas, estão dispostos na Tabela 1 e na Tabela 2.

**Tabela 1.** Propriedades físicas do aço líquido.

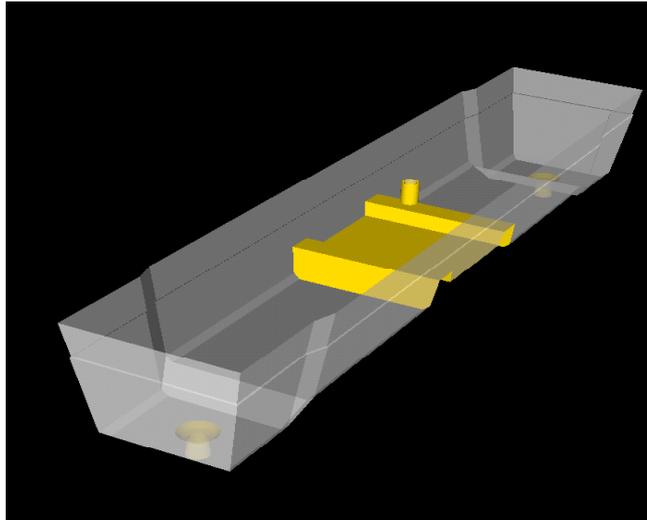
<b>PROPRIEDADE FÍSICA</b>	
Densidade ( $kg / m^3$ )	7.218
Viscosidade ( $kg / m.s$ )	0,005
Calor específico ( $J / kg.K$ )	750
Condutividade térmica ( $W / m.K$ )	41
Expansividade térmica ( $K^{-1}$ )	0,0001

**Tabela 2.** Condições Operacionais Simuladas.

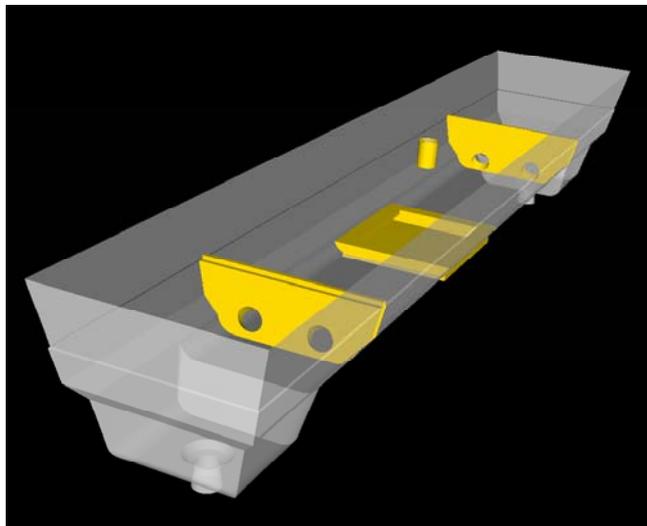
<b>CONDIÇÕES OPERACIONAIS</b>	
Velocidade lingotamento ( $t / min / veio$ )	2,75
Temperatura do aço líquido ( $^{\circ}C$ )	1.555
Temperatura na carcaça do distribuidor ( $^{\circ}C$ )	116,5
Fluxo de calor na "escória" ( $W / m^2$ )	15.000
U equivalente ( $W / m^2.K$ )	3,9827

As configurações simuladas foram:

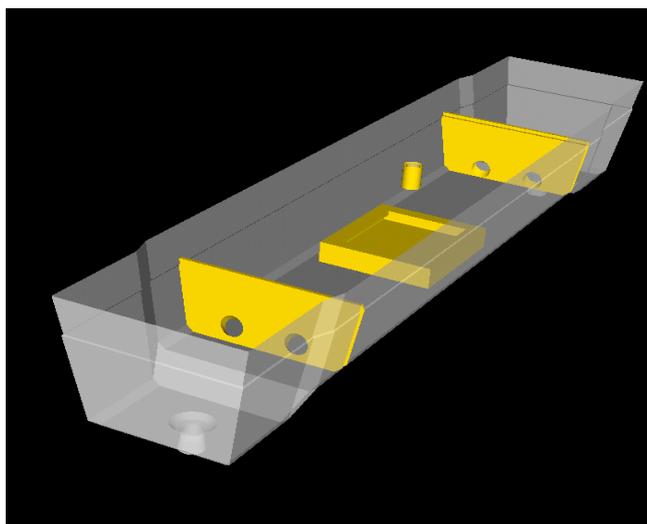
- configuração original (vazia), mostrada na Figura 1;
- configuração com diques laterais e inibidor de turbulência central (com controladores de fluxo) mostrada na Figura 2;
- configuração com sistema YES dita (YES), mostrada na Figura 3.



**Figura 1.** Configuração interna original.



**Figura 2.** Configuração interna com diques laterais e inibidor de turbulência na parte central.



**Figura 3.** Configuração interna com Sistema YES.

## Sistema YES

O Sistema YES (Yield Enhancement System) foi desenvolvido, em conjunto, pela Foseca e Stelco Inc, com a finalidade de diminuir a sobra de aço no fim do seqüencial de lingotamento e também diminuir a quantidade de aço de mistura (intermix). No Brasil a Magnesita SA possui licença para comercialização e utilização da configuração do sistema nos distribuidores de aço das Usinas brasileiras, sendo a CSN a pioneira nos testes.

O Sistema YES consiste na modificação da configuração interna do revestimento permanente do distribuidor de forma que seu volume seja diminuindo, mas sem a redução da altura do nível de aço até o veio de lingotamento. As mudanças feitas no revestimento permanente, para os distribuidores de aço da Máquina 4 da CSN, foram as seguintes:

- aumento da altura do fundo de 131 para 241 mm; e
- colocação de um “rodapé” em todo o perímetro do distribuidor de 400 mm de altura por 100 mm de espessura;

Vale ressaltar que as alterações do revestimento permanente foram acompanhadas pela manutenção das posições do inibidor de turbulência e dos diques laterais. O volume interno do distribuidor de aço foi diminuído de 7,92 m<sup>3</sup> para 7,19 m<sup>3</sup>, mas a altura mínima da superfície de aço até o veio de lingotamento para troca da panela de aço, sem o desvio da qualidade da placa, foi mantida em 562 mm. A alteração foi na quantidade de aço dentro do distribuidor durante a troca da panela que diminuiu de 20 para 15t.

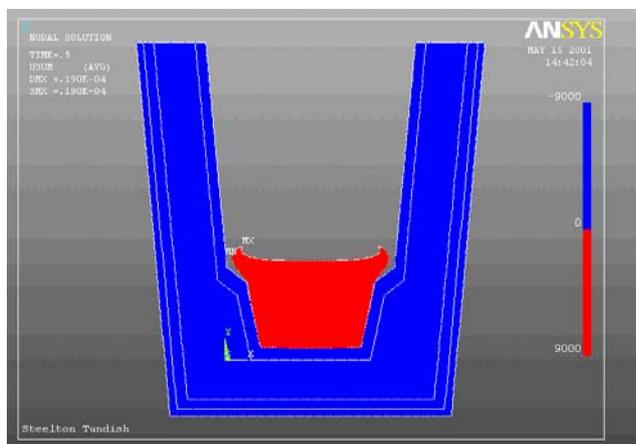
Os benefícios trazidos pelo Sistema YES estão diretamente ligados à redução de custo de fabricação do aço pela diminuição do cascão de aço no distribuidor no final do seqüencial do lingotamento. Mas vantagens adicionais também ocorrem como aumento da facilidade de cambamento do cascão do distribuidor e aumento da campanha do revestimento permanente. A tabela 3 traz um resumo dos benefícios do sistema.

**Tabela 3** . Vantagens com a utilização do Sistema YES.

<b>VANTAGENS</b>	<b>MOTIVO</b>	<b>GANHOS*</b>
Redução do cascão de aço após fim do lingotamento. Figura 4.	Redução do volume interno através de alterações do revestimento permanente.	Redução de 9 para 4 t do “bode” de aço após fim do seqüencial, Para 80 seqüenciais / mês um aumento de 400 t / mês de placa de aço.
Facilidade no cambamento do distribuidor. Figura 5.	Efeito de descolamento do cascão da parede devido à presença do “rodapé” lateral.	Diminuição do tempo de cambamento e aumento da vida do revestimento permanente.
Maior vida do revestimento permanente.	Aumento da espessura e diminuição do dano causado durante a cambagem. Figura 6.	Aumento da campanha do revestimento permanente em 10%, aumentando a vida de 700 para 770 corridas.
* Estes dados são estimados, já que os testes industriais ainda não foram realizados. As estimativas foram baseadas em cálculos de projeto e experiências de outras Usinas que já usam o Sistema YES.		



**Figura 4.** Cascão de aço do distribuidor de aço da Usina Stelco Hilton com redução de 4 t indicado pelas setas.



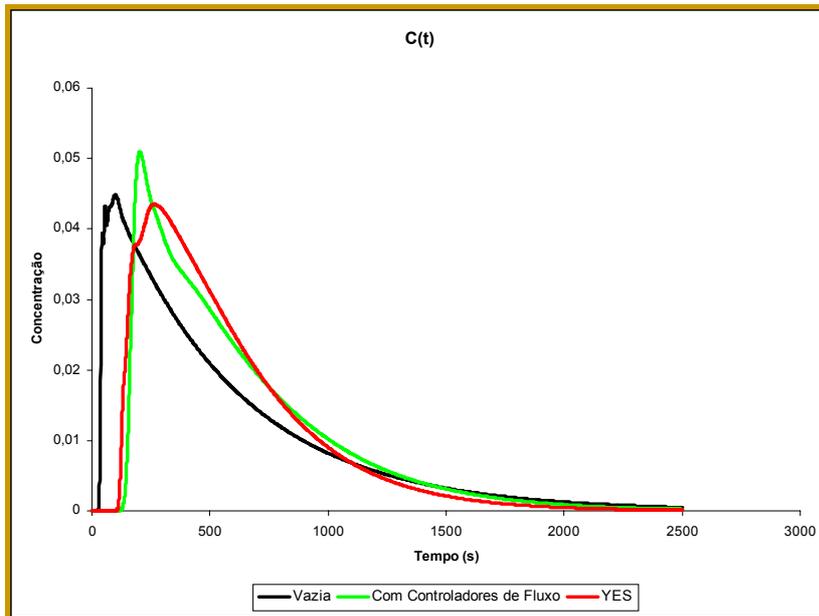
**Figura 5.** Simulação em ANSYS da contração sofrida pelo cascão de aço dentro do distribuidor no resfriamento. Retirada facilitada pelo descolamento que ocorre na região do “rodapé” lateral.



**Figura 6.** Fotografia da configuração interna do distribuidor de aço com Sistema YES da Usina da Stelco Hilton. Presença do “rodapé” lateral e elevação do fundo na parte central.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 7 traz o gráfico com as curvas dos tempos de residência – DTR.



**Figura 7.** Curva Distribuição dos Tempos de Residência – DTR.

Os resultados dos volumes característicos e capacidade de remoção de inclusões para as 3 configuração são apresentados nas Tabelas 4 e 5.

**Tabela 4.** Volumes Característicos, Tempo Mínimo e TAU.

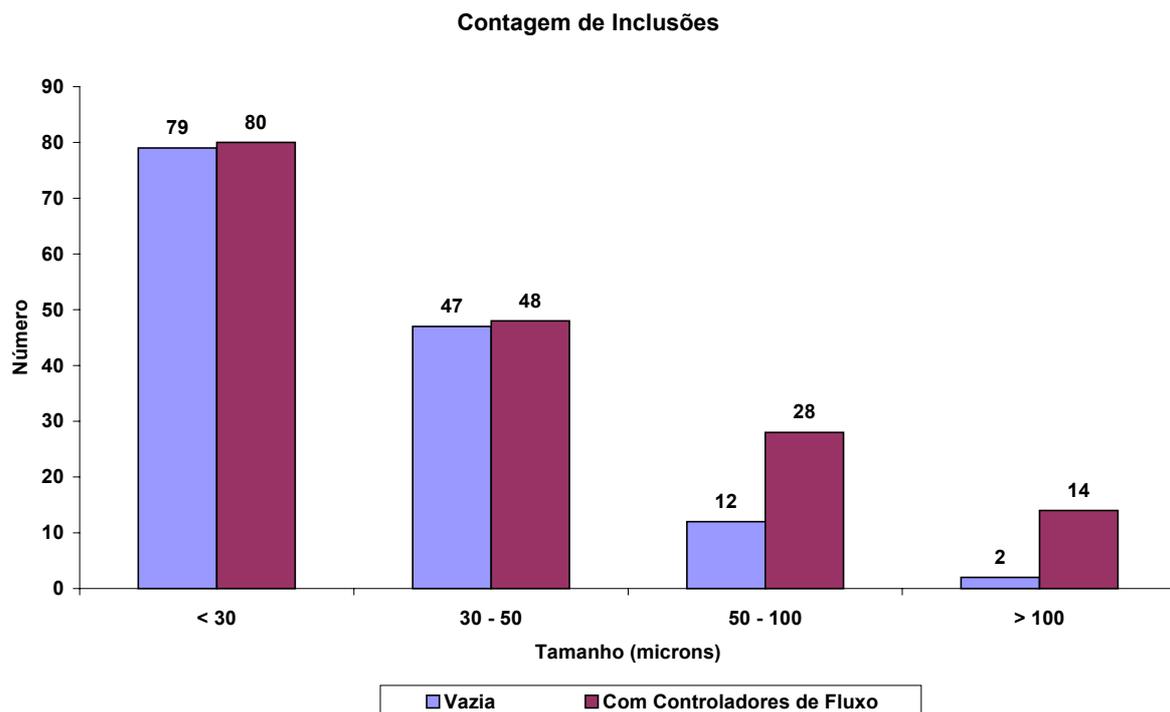
Parâmetros	Vazia	Com Controladores de Fluxo	Yes
FFP (%)	6,7	23,0	20,8
Volumes Característicos FVM (%)	35,6	22,3	20,0
FMP (%)	57,7	54,7	59,1
Tempo Mínimo (2% da Curva F(t))	37,0	142,0	118,0
TAU (Tempo Médio de Residência)	552,2	617,3	566,8

**Tabela 5.** Eficiência de Remoção de Inclusões.

Tamanho de Inclusão	Vazia	Com Controladores de Fluxo	Yes
100 µm	84,6	90,7	90,1
50 µm	33,4	45,6	40,9
30 µm	19,3	20,1	15,3

Os resultados mostram que a configuração com controladores de fluxo, em relação à configuração vazia, melhora as condições do fluxo por meio do aumento do tempo de residência, mas com queda do volume morto, aumento do tempo mínimo o que se reflete em um maior volume pistonado e uma pequena diminuição do volume de mistura. O Sistema YES mostrou uma ligeira queda de performance do fluxo de aço no distribuidor, em comparação à configuração com controladores de fluxo, com a queda do volume pistonado.

A eficiência de remoção de inclusões mostrou que para inclusões com tamanhos de 30  $\mu\text{m}$  a diferença entre as configurações é pequena, contudo, para inclusões maiores que 50  $\mu\text{m}$  a diferença de eficiência se torna maior. Mais uma vez a configuração com controladores de fluxo apresentou os melhores resultados. Como o estudo dos volumes característicos propõe a melhoria da qualidade interna das placas de aço, foram utilizados 20 distribuidores com a configuração com controladores de fluxo e foram realizadas contagens das inclusões presentes no aço. O mesmo procedimento foi feito para 20 distribuidores com a configuração vazia. Com o intuito de eliminar a influência das metalurgias primária e secundária, foram utilizadas somente corridas com idênticas rotas de fabricação e os resultados estão na Figura 8. O mesmo acompanhamento será feito para o Sistema YES.



**Figura 8.** Contagem de inclusões.

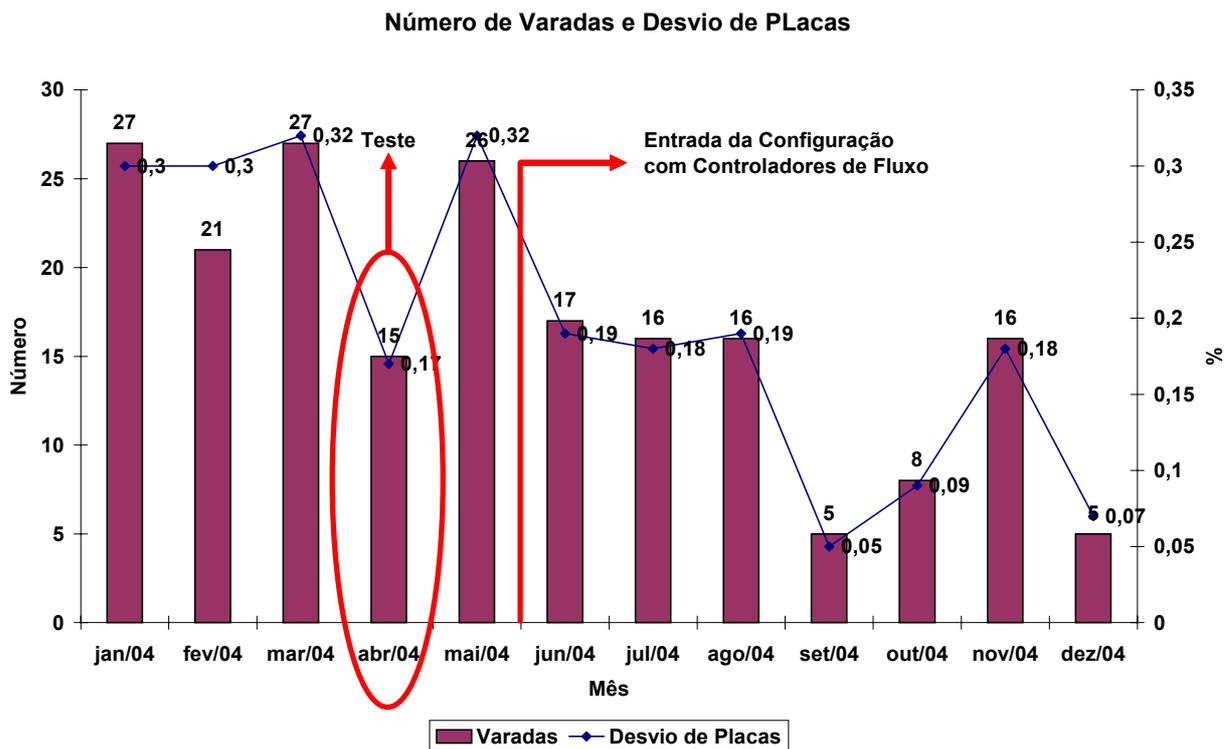
Verifica-se que o número de inclusões com tamanhos menores que 50  $\mu\text{m}$  não alterou-se de forma significativa, mas o número de inclusões com tamanhos entre 50 e 100  $\mu\text{m}$  teve uma redução de cerca de 57% e o número de inclusões com tamanhos maiores que 100  $\mu\text{m}$  teve uma redução de quase 86%.

Um dos principais motivos para a perda de eficiência das máquinas de lingotamento contínuo na CSN é a redução de velocidade por obstrução do veio devido à deposição de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  no canal de vazamento. A obstrução de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , ou clogging, é retirada por meio de batidas com vara metálica. Esta operação faz com que o clogging seja carregado para o interior da placa, gerando inclusões grandes que conduzem a defeitos no produto. As placas de aço são, então, desviadas para produtos de menor qualidade, o que se chama “downgrade”.

Em abril de 2004 foi feito um teste, por meio da montagem de todos os distribuidores com a configuração com controladores de fluxo, e o número de utilização de vara para desobstrução dos veios, ou “varadas”, e o percentual de placas desviadas foram comparados com os valores de rotina. Os resultados indicaram uma queda no

número de “varadas” de uma média de 25 por mês para 15 no mês de teste. Além disso, o percentual de placas desviadas caiu de uma média mensal de 0,30% para 0,17%.

Após verificação dos resultados e reforçada pela queda do número de inclusões, foi decidida a implantação da nova configuração com controladores de fluxo. Em maio de 2004 os índices de controle apresentaram uma piora, pois se voltou a utilizar a configuração vazia até que a nova configuração pudesse ser implantada definitivamente, o que ocorreu em junho de 2004. Os resultados do ano de 2004 podem ser vistos na Figura 9.



**Figura 9.** Número de utilização de varas para desobstrução dos veios e índice de placas desviadas.

## CONCLUSÕES

Os resultados do modelamento numérico mostraram que a colocação de diques laterais e inibidor de turbulência na parte central do distribuidor melhoraram as condições do fluxo do aço. Isto foi verificado através do incremento dos volumes característicos e da melhoria da eficiência de remoção de inclusões.

Estes resultados foram confirmados nos testes industriais que mostram uma diminuição do índice de clogging nos veios de lingotamento, através da diminuição do índice de “varadas” para desobstrução.

A diminuição do número de “varadas”, por sua vez, diminuiu a quantidade de placas desviadas por queda da qualidade do aço. Além disso houve uma melhoria na limpidez interna do aço, por meio da diminuição do número de inclusões, principalmente daquelas com tamanhos maiores que 50 µm.

Os resultados do modelamento numérico apontaram uma queda de performance do fluxo de aço, quanto à remoção de inclusões e volumes característicos, para a configuração YES em comparação à configuração com controladores de fluxo. Isto já era esperado devido à diminuição do volume interno do distribuidor com a modificação da espessura do revestimento permanente nas paredes e fundo. Contudo espera-se que esta queda seja insuficiente para causar modificações nas melhorias alcançadas na área operacional. Além disso, os ganhos de rendimento metálico provindos da implantação do Sistema YES podem trazer grande redução do custo operacional da Máquina de Lingotamento Contínuo 4 da CSN.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem a todos da equipe ESSS pela rapidez e eficiência no modelamento numérico das configurações dos distribuidores e aos operadores da Reframax pelas observações realizadas durante a montagem das novas configurações dos distribuidores que permitiram uma melhor adaptação dos controladores de fluxo.

### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- 1 BARRETOS, J.J.; BARRON MEZA, M.A.; MORALE, R.D. Physical and mathematical modeling of steel flow and heat transfer in tundishes under non-isothermal and non-adiabatic conditions. **ISIJ International**, v. 36, n. 5, p. 543-552, 1996.
- 2 SAHAI, I.; EMI, T. Melt flow characterization in continuous casting tundishes. **ISIJ International**, v. 36, n. 6, p. 667-672, 1996.
- 3 SAHAI, I.; EMI, T. Criteria for water modeling of melt flow and inclusion removal in continuous casting tundishes. **ISIJ International**, v. 36, n.9, p. 1166-1173, 1996.
- 4 SILVA, C.A.; CARVALHO, C.V.D.. **Projeto Risa & Fundação Gorceix – distribuidor de LC da CSN**. Ouro Preto: UFOP, 2003. 15 p.
- 5 CRAIG, K.J.; KOCK, D. J.; MAKGATA, K. W.; WET, G. J. Design optimization of a single-strand continuous caster tundish using residence time distribution data.. **ISIJ International**, v. 41, n 10, p. 1194-1200, 2001.
- 6 MAZUMDAR, D.; GUTHRIE, I. L. The physical and mathematical modelling of continuous casting tundish systems. **ISIJ INTERNATIONAL**, v. 39, n. 6, p. 524-547, 1999.
- 7 BANDERAS ,A. R.; MORALES, R. D.; GARCÍA-DEMEDICES, L.; DÍAZ-CRUZ, M. Mathematical simulation and modelling of steel flow with gas bubbling in trough type tundishes. **ISIJ International**, v. 43, n .5, p. 653-662, 2003.

# DEVELOPMENT OF STEEL FLUX CONTROLLERS BY MATHEMATICAL SIMULATION FOR TUNDISHS OF CASTING CONTINUOUS MACHINE 4 OF CSN.<sup>(1)</sup>

*Alfredo Fonseca Veiga*<sup>(2)</sup>  
*Antônio Carlos Sant'anna da Silva*<sup>(3)</sup>  
*Carlos Alberto Pinheiro Vieira*<sup>(4)</sup>  
*José Ernesto de Azevedo Nadalon*<sup>(5)</sup>  
*Leonardo Barboza Trindade*<sup>(6)</sup>  
*Marcus Reis*<sup>(7)</sup>  
*Marcelo Kruger*<sup>(8)</sup>  
*Noraldo Hipólito Guimarães Gomes*<sup>(9)</sup>

## Abstract

Originally the tundishes of CSN continuous casting machine number 4 didn't have any steel flow modifiers, dams or turbulence inhibitors in its internal configuration. In order to increase the steel quality, some studies of new internal configurations, i. e., a combination of dams and turbulence inhibitors, using the Computational Fluid Dynamic (CFD) were carried out. The results of the numerical models were confirmed in industrial tests, which consisted, for tundishes with and without flow modifiers, in the comparison of clogging occurrence and numbers of non-metallic inclusions in the steel. The use of flow modifiers decreased the clogging occurrence as well as improved the steel quality by reducing the number of non-metallic inclusions. To improve the yield of liquid steel in the tundish, but keeping the steel flux improvement which was gained with the flow modifiers, the YES System was developed. Although the industrial tests haven't been done yet, the results of the mathematical simulation and a brief explanation of the YES System are presented in this work.

**Key-words:** Tundish, turbulence inhibitor, YES System.

*(1) Technical Contribution to be presented in XXXVI Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais, Vitória ES, maio de 2005.*

*(2) Metallurgical Engineer, M.Sc., Technical Assistance Department of Magnesita SA;*

*(3) Metallurgical Engineer, Technical Metallurgical Management of CSN;*

*(4) Mechanical Engineer, Research Department of Magnesita SA;*

*(5) Civil Engineer, Science Technology & Engineering – STE;*

*(6) Physic, Dr., Science Technology & Engineering - STE;*

*(7) Mechanical Engineer, M.Sc., Engineering Department of ESSS;*

*(8) Mechanical Engineer, Engineering Department of ESSS;*

*(9) Metallurgical Engineer, Steelmaking Management of CSN.*