

DESENVOLVIMENTO DE NOVA CONCEPÇÃO DE CONTROLADORES DE FLUXO DE AÇO PARA OS DISTRIBUIDORES DA MÁQUINA DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO Nº 4 DA CSN ¹

Antônio Carlos Sant'anna da Silva²

Elcio Santana³

Noraldo Hipólito Guimarães Gomes⁴

Samuel Bento Rezende Nogueira⁵

Sérgio Tinoco Barbosa⁶

Wender Andrade Alves⁷

Resumo

Desde 2004, os distribuidores da Máquina de lingotamento contínuo nº 4 da CSN passaram a ser dotados de um sistema de modificadores de fluxo de aço composto de um inibidor de turbulência central e dois diques próximos aos furos de passagem do aço líquido para os moldes. A implantação dessa melhoria trouxe muitos méritos no tocante à melhoria de limpeza interna do aço, assim como na redução dos índices de clogging nos veios. Durante o ano de 2005, foi desenvolvida, em parceria com uma empresa fornecedora de produtos refratários, uma nova concepção de controladores, com o objetivo de aumentar o rendimento de aço, através da redução das sobras de aço no distribuidor em final de lingotamento. Foram realizadas simulações utilizando modelamentos matemáticos e físicos, seguidos de testes industriais, que mostraram os ganhos potenciais do projeto. Após a implantação, os resultados obtidos comprovaram os ganhos projetados na fase experimental, tendo sido observada sensível aumento de rendimento além de uma ligeira melhora dos indicadores de qualidade de produto.

Palavras-chave: Lingotamento contínuo; Distribuidor; Modificador de fluxo

DEVELOPMENT OF NEW DESIGN FOR STEEL FLOW CONTROL SOLUTIONS FOR TUNDISHES OF CSN's Nº 4 CASTER

Abstract

Since 2004, CSN's nº 4 tundishes have been provided with steel flow control devices. They were composed by one central turbulence inhibitor and two weirs, each one located close to mould feeding valves. This system brought about better cleanliness of steel as well as reduction of clogging occurrence. During 2005, a new design of flow control was developed aiming increase of yield by reduction of the remaining liquid steel in the tundish at the end of casting sequence. Potential benefits of this idea were shown by mathematical modelling followed by tests in industrial scale. The benefits anticipated during experiments were actually obtained in regular operation, with casting yield increasing and also a slight improvement in the cleanliness of the product.

Key words: Continuous casting; Tundish; Steel flow control.

¹ *Contribuição técnica ao XXXVIII Seminário de Aciaria – Internacional, 20 a 23 de maio de 2007, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Engenheiro Metalurgista da Gerência de Aciaria da CSN.*

³ *Engenheiro Metalurgista da Gerência de Processos da Metalurgia da CSN.*

⁴ *Engenheiro Metalurgista da Gerência de Lingotamento Contínuo da CSN.*

⁵ *Técnico Metalúrgico, Assistente Técnico da VESUVIUS do Brasil.*

⁶ *Técnico Metalúrgico, Assistente Técnico da VESUVIUS do Brasil*

⁷ *Engenheiro de Materiais, Especialista em Produtos da VESUVIUS do Brasil*

1 INTRODUÇÃO

O atual nível de competitividade do mercado siderúrgico mundial exige esforços constantes no sentido de reduzir os custos de transformação e no da elaboração de produtos cada vez mais nobres (com maior valor agregado). Essas demandas vêm impelindo as indústrias correlatas a uma busca incessante por novas tecnologias que possam atender de modo satisfatório essas exigências aparentemente contraditórias.

Neste sentido, uma etapa de grande relevância é a evolução conceitual de soluções aplicadas a distribuidores de máquinas de lingotamento contínuo (MLC).⁽¹⁾ Os distribuidores são equipamentos cuja função básica poder ser entendida como garantir fornecimento ininterrupto de aço para as MLC durante uma seqüência de lingotamento. Eles desempenham papel importante na definição do nível de limpeza interna do aço, uma vez que representam talvez a última oportunidade para que essa característica do aço seja trabalhada.⁽²⁾

Uma visão moderna de engenharia de fluxo,⁽³⁾ entende o distribuidor como um reator que, além de servir como reservatório, deve apresentar características tais como: aumento do tempo mínimo de residência do aço (MRT) e conseqüente eliminação de linhas de curto circuito com objetivo de maximizar a flotação (eliminação) de impurezas do banho; redução da turbulência gerada pelo fluido entrante e a conseqüente redução da emulsificação de escória no banho metálico; alteração do padrão de fluxo para obtenção de uma maior homogeneidade termoquímica entre os veios; desenvolvimento de uma maior parcela de fluxo pistonado para transição mais eficiente de graus de aço e eliminação de fluxos tipo vórtex que arrastem escória diretamente para o molde.

Como resultado direto desta necessidade do setor siderúrgico, muito tem sido investido no desenvolvimento de tecnologias que possam propiciar tais benefícios durante o lingotamento. Inicialmente, os estudos de modelamento de fluxo conduziram ao emprego de sistemas combinados de barragens e diques. Posteriormente, os esforços de diversos pesquisadores⁽⁴⁾ originaram soluções mais complexas, com o surgimento dos genericamente chamados “impact pads”. Estes dispositivos, desde sua concepção, devem considerar a captura, desaceleração e reorganização do fluxo de aço proveniente do tubo longo como premissa básica a um funcionamento adequado. Dada a extrema energia deste jato de aço, um material refratário desenvolvido para tais condições de exigência é requerido para garantia de uma performance adequada.⁽⁵⁾ Além disso, cada aplicação ou cada novo projeto deve ser encarado como um novo ambiente, influenciado por novos fatores e tipicamente com objetivos de aplicação distintos.

A Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) possui três MLCs de 2 veios cada uma. A MLC4 é a de maior produtividade, sendo responsável por 40% do total de placas produzidas.

Desde o início de operação da MLC4, em 1998, o distribuidor era desprovido de qualquer mecanismo de modificação de fluxo de aço. Em 2003, foi proposta uma configuração composta de dois diques e um “impact pad” de primeira geração (Figura 1), com o objetivo de melhoramento das condições de fluxo. Foi utilizado modelamento numérico para a definição da configuração ideal e testes industriais confirmaram os méritos prenunciados pela fase de simulação. O sistema foi implantado em julho de 2004 e, a partir de então, os resultados de qualidade (nível de limpeza) e de deposição de alumina nos veios, confirmaram a tendência verificada durante os testes.

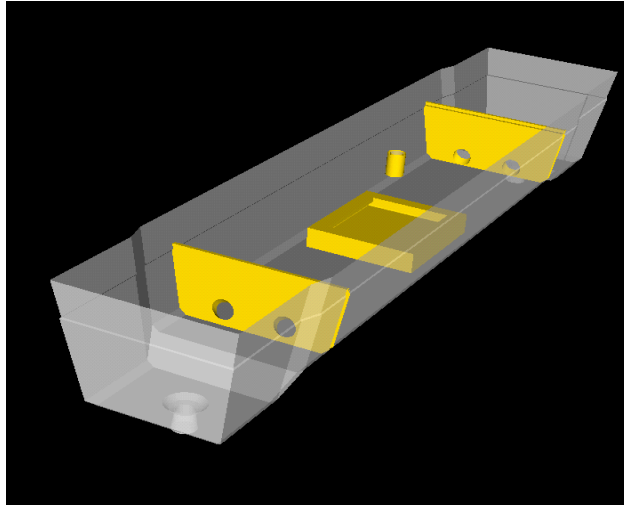


Figura 1: Visão esquemática da configuração de modificadores de fluxo implantada em julho/2004 na máquina 4

A configuração selecionada apresentou, no entanto, um efeito negativo – o aumento na sobra de aço no distribuidor em fins de lingotamento, devido à dificuldade de escoamento, já que parte do aço ficava confinado no centro do distribuidor entre os dois diques. Este confinamento de parte do aço resultou em um aumento do peso médio de perda de aço por sobra no distribuidor e conseqüente redução no rendimento de máquina.

Considerando a necessidade de implementar ações na direção de redução dos custos de produção de placa, foi solicitado aos fornecedores que propusessem alternativas de projetos que buscassem otimizar a sobra de aço no distribuidor sem prejuízo das segurança operacional ou do nível de qualidade das placas.

Uma dos fornecedores de refratários apresentou uma proposta de configuração definida a partir de um trabalho de simulação computacional realizado por uma empresa canadense especializada em estudos de modelamento.

A principal vantagem deste desenvolvimento foi o aumento de rendimento metálico, uma vez que foi verificada uma forte tendência de formação de vórtex quando se utiliza unicamente “impact pads” de primeira geração. Por sua vez, “impact pads” de terceira geração tipo “SUPER-X” (caracterizados por multiorifícios e multicâmaras) associados a peças inibidoras de vortex (“Vortex Killer”) podem não só eliminar estas formações, como também aumentar o tempo mínimo de residência e volume pistonado do distribuidor, otimizando assim a qualidade do fluxo.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de uma nova concepção de modificadores de fluxo para o distribuidor da MLC4 da CSN, focado em aumento de rendimento metálico e melhoria de limpeza interna (redução de quantidade de inclusões). Para tanto, o conceito de “impact pad” de terceira geração “SUPER-X” conciliado com os redutores de vortex (“Vortex Killer”) foi utilizado como base para o modelamento computacional.

3 MATERIAIS E METODOS

A metodologia para implantação do nova concepção na MLC4 envolveu três etapas:

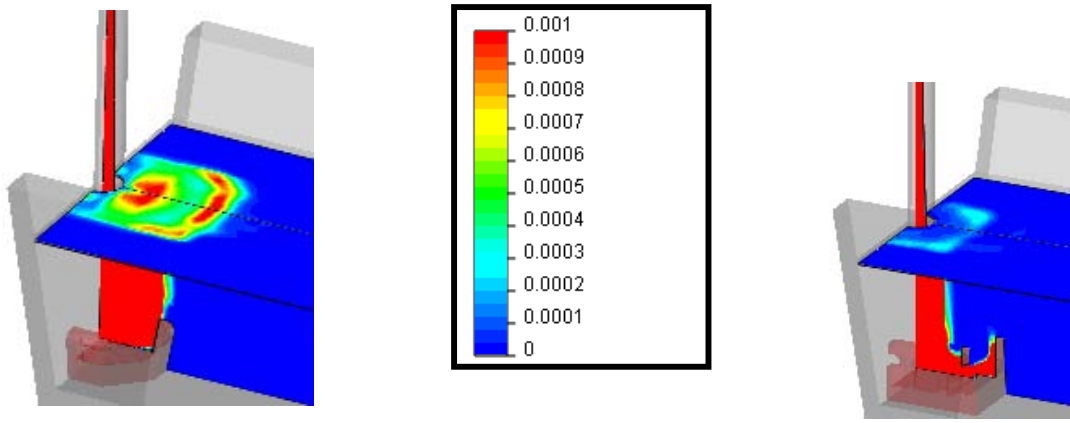
- Estudo e desenvolvimento conceitual do projeto – A MLC4 utiliza um distribuidor simétrico tipo barca com capacidade nominal de 60 t. Esta máquina está capacitada a produzir placas de larguras variando entre 830 e 1620 mm e espessura de 250 mm, operando a uma vazão horária típica de 4,5 t/min. O distribuidor foi modelado sob duas distintas condições: a primeira utilizando a antiga solução “impact pad” central de primeira geração associado a diques próximo às cabeceiras, e uma segunda condição utilizando o novo “impact pad” de terceira geração tipo “Super-X” com quebradores de vortex (“Vortex-killer”). Nesse modelamento, foi feita simulação CFD, utilizando a ferramenta Fluent SST-ADV.
- Testes em campo em pequena escala – Foram feitos testes iniciais com um número reduzido de peças com o objetivo de verificar a resistência das peças em uso, bem como as possíveis interferências operacionais.
- Testes em escala industrial (um mês de utilização) – Foi feita a utilização do novo sistema por um período ininterrupto de 1 mês, com o objetivo de confirmar os méritos de rendimento e de qualidade sugeridos a partir dos resultados de simulação da etapa 1. Nessa fase, foram avaliados: a) nível de segurança de operação com redução da sobra de aço no distribuidor em final de lingotamento; b) nível de limpeza interna através de contagem de inclusões em amostras de aço retiradas nos moldes da máquina.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Modelamento CFD

Para condição de utilização do distribuidor na MLC 4 da CSN, verificou-se uma notória diferença entre a turbulência gerada pelo fluxo do aço em um distribuidor com os antigos “impact pads” de primeira geração e os novos “impact pads” de terceira geração do tipo SUPER-X. A Figura 2, onde as cores vermelhas indicam alta intensidade de turbulência e as azuis baixa turbulência, demonstram que o comportamento do SUPER-X é muito superior para dissipação de turbulência:

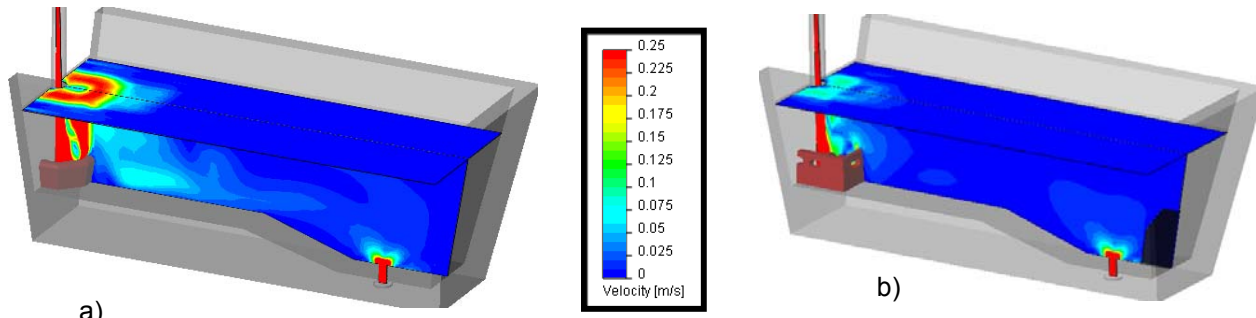
Além de turbulência, foram verificados também os perfis de velocidade e de deslocamento de partículas comparando a solução anterior com a nova solução. Novamente a cor vermelha representa altas velocidades e a azul baixa velocidade na Figura 3. Observa-se que, além de possibilitar uma redução mais efetiva de altas velocidades preferenciais de deslocamento, o SUPER-X produz um perfil mais homogêneo com velocidades igualmente distribuídas.



a) Impact Pad Primeira Geração

b) Impact Pad SUPER-X

Figura 2 – Comparação do nível de turbulência provocada pelo jato para a) configuração com inibidor atual b) configuração com inibidor de teste

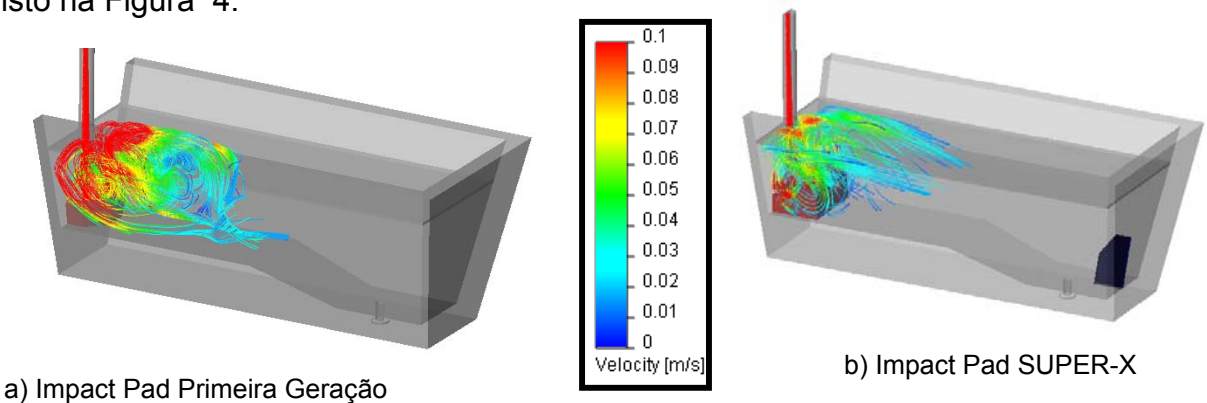


a)

b)

Figura 3: Perfil de Velocidade no Plano Central do Distribuidor para a) configuração com inibidor atual b) configuração com inibidor de teste

Traçando-se as linhas de fluxo com respectivos tempos de deslocamento, verificamos que para um mesmo tempo de deslocamento o SUPER-X foi muito mais efetivo na dissipação do momento do fluxo que a solução anterior conforme pode ser visto na Figura 4.



a) Impact Pad Primeira Geração

b) Impact Pad SUPER-X

Elapsed time = 60s

Figura 4: Perfil de velocidades para as duas condições após 60s de panela aberta

Ao analisar o tempo mínimo de residência (MRT), verifica-se que há um aumento de 50% a favor do novo conceito SUPER-X ao ser comparado com a antiga solução de “impact pad” de primeira geração. A Figura 5 demonstra esta relação de MRT entre as duas propostas. Há que se salientar que este parâmetro é extrema importância para qualidade do material em lingotamento.

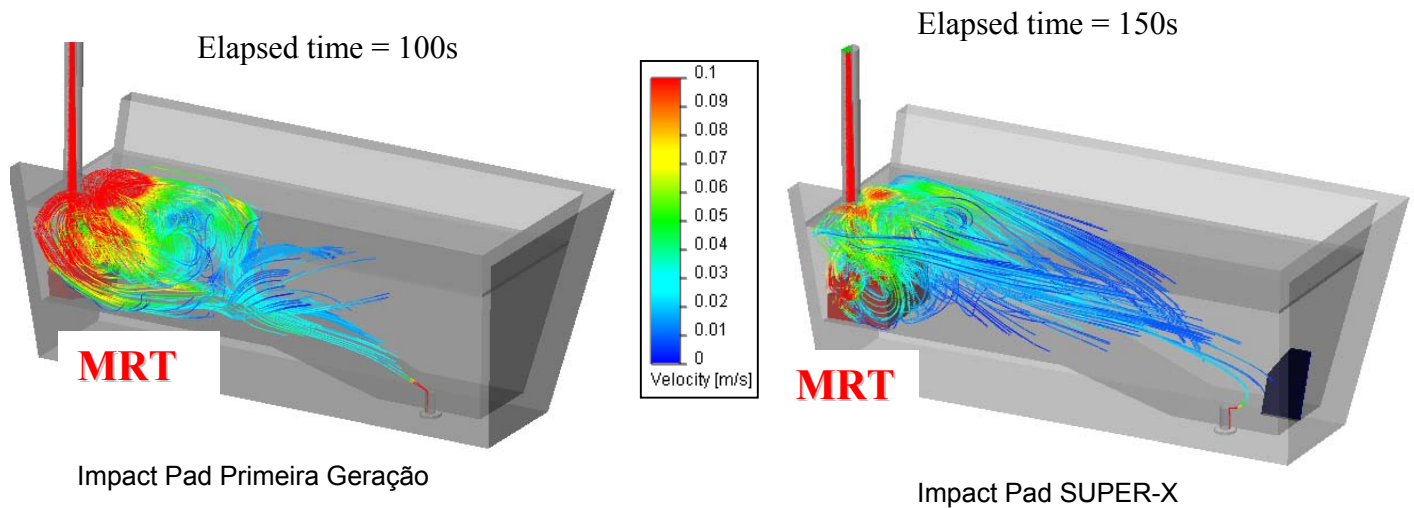


Figura 5 - Variação do Tempo Mínimo de Residência (MRT) em função do Tipo de “Impact Pad”

Além de demonstrar a superioridade da nova solução que utiliza o “impact pad” de terceira geração tipo “SUPER-X” em relação ao antigo “impact pad” de primeira geração, este mesmo modelamento mostrou a clara influência do Vórtex Killer para eliminar fluxos tipo vórtex em baixos níveis ferrostáticos na MLC4 da CSN.

Em consequência de todas as evidências obtidas pela simulação CFD Fluent SST-ADV, a configuração apresentada na Figura 6 foi eleita como a mais adequada para atingir qualidade de aço superior e aumentar o rendimento metálico na MLC4 da CSN.

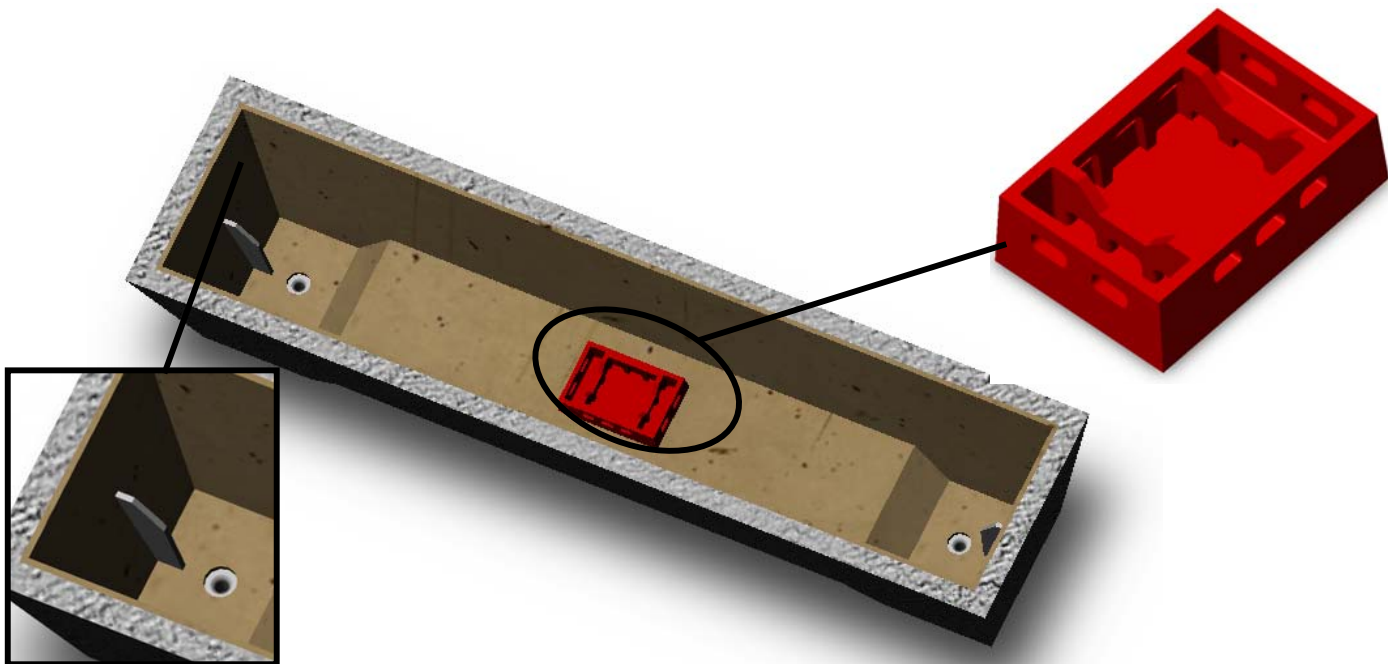


Figura 6 – Configuração selecionada para os testes na MLC4, mostrando, nos detalhes, o inibidor de turbulência (impact-pad) e o quebrador de vortex (Vortex-killer).

4.2 Testes Industriais

Os testes industriais foram realizados durante o ano de 2005 e a amostragem utilizada está detalhada abaixo. A configuração proposta foi montada em 80 distribuidores, perfazendo um total de 768 corridas.

A estratégia utilizada nos testes consistiu da avaliação, sobretudo de 02 itens:

4.2.1 Rendimento

Com a finalidade de avaliar o mérito na redução de sobra, foi definida a altura mínima de aço no esgotamento do distribuidor de 20 cm como marca de segurança (baseada na experiência com o projeto atual). No projeto atual, essa altura de 20 cm é a altura média obtida para o peso de aço + escória equivalente a 9,0 t. Realizou-se a redução gradual no peso de aço remanescente nos distribuidores e, após o cambamento, os cascões correspondentes foram separados, limpos (remoção de escória) e foi feita a medida da altura de aço em cada cabeceira. Levantou-se, assim, um gráfico correlacionando o peso da balança com a altura de aço sólido remanescente.

Para um residual de 7,5 t no distribuidor (total = aço + escória), o valor médio de altura encontrada foi de 220 mm, sendo que todos os valores estiveram acima do limite de segurança de 200 mm.

Uma vantagem evidente da configuração de teste sobre a atual é que naquela, para qualquer situação a simetria do cascão tende a ser mantida, isto é, a altura de aço tende a ser a mesma nas duas cabeceiras. No caso da atual, a presença dos diques

impede a comunicação entre as duas regiões, e, a partir de uma certa altura, o esgotamento do aço tende a se efetuar de forma independente em cada um dos lados (é função das vazões de aço sendo transportado para o molde). Por este motivo, como já é padrão atualmente, a sobra de aço terá de ser maior quando a diferença entre as larguras dos moldes dos dois veios for excessiva, já que a única referência para o operador é o peso do aço e ele não consegue ter uma idéia da altura em cada cabeceira.

4.2.2 Nível de limpeza interna

Foram selecionadas 20 corridas de aço baixo carbono produzidas utilizando rota via Desgaseificador a vácuo, lingotadas com a configuração proposta. Foram extraídas amostras nos moldes da Máquina 4 na região correspondente à transição de corridas (troca de painéis). A idéia era avaliar a fase do processo que potencialmente mais seria afetada pela alteração.

A partir das amostras coletadas (tipo Lolly pop), foram confeccionados corpos de prova de 10x10 mm que, após polimento sem ataque químico, foram levados ao microscópio ótico, onde se verificou a distribuição das inclusões presentes por faixa de tamanho. Os resultados obtidos foram comparados com os obtidos para a configuração original, quando foram retiradas amostras (outras 20 corridas) nas mesmas condições do teste. Os resultados para o caso do Super-X pode ser visualizado a partir do gráfico da Figura 7.

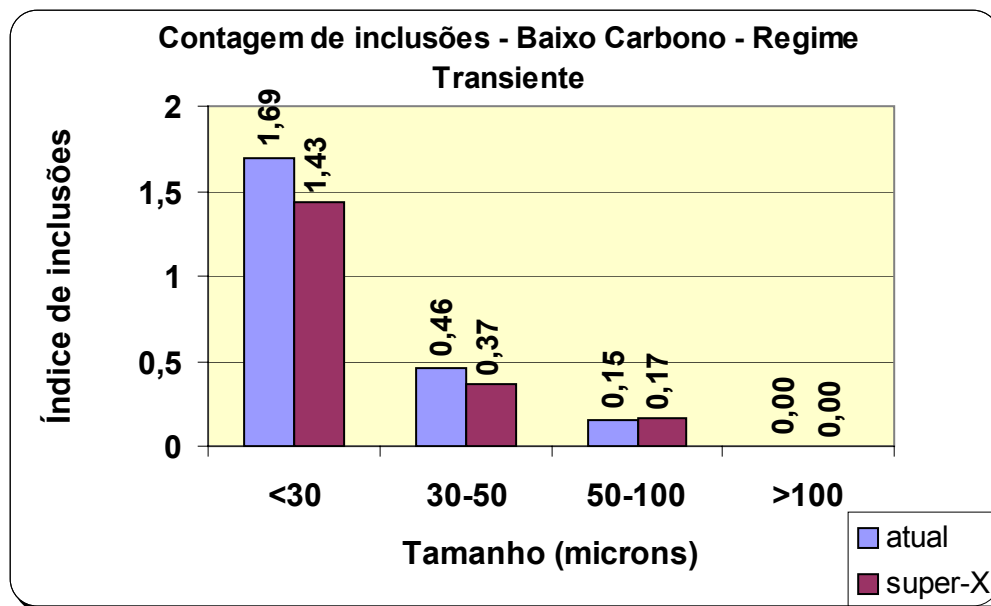


Figura 7 – Comparativo da distribuição de inclusões em aço baixo carbono entre a configuração atual e a configuração em teste para os distribuidores da MCC#4

Observa-se que há uma ligeira redução no índice de inclusões (em torno de 15%) para inclusões até 50 microns. Este resultado está de acordo com o previsto na simulação e significa que a adoção dessa nova configuração não deverá trazer efeito negativo sobre a qualidade do produto.

4.2.3 Resumo das vantagens apuradas

A Tabela 1 apresenta um quadro contendo um resumo das observações colhidas nas fases de teste

Tabela 1 – Quadro resumo das vantagens da configuração de teste

Item	Vantagem
FACILIDADE DE IMPLANTAÇÃO	Grande. Não necessita alterações no revestimento permanente do distribuidor
REDUÇÃO DA SOBRA DE AÇO	Possibilita a redução de 1,5 t / distribuidor, em média
INTERFERÊNCIA OPERACIONAL	Nenhuma – não houve necessidade de mudanças no procedimento de lingotamento
SEGURANÇA OPERACIONAL	É mais seguro que o atual nas situações de diferença significativa de vazão entre os veios – ausência dos diques garante bom escoamento da região central e comunicação entre o aço presente nas duas cabeceiras
INFLUÊNCIA NA QUALIDADE	Observa-se uma ligeira redução na quantidade de inclusões presentes nas amostras coletadas nos moldes

Dadas as vantagens apresentadas na tabela acima, optou-se pela adoção da configuração de teste na MLC4. A implantação em todos os distribuidores dessa máquina foi efetuada na 1ª semana de Setembro/2006.

4.2.4 Resultados após a implantação

A implantação do sistema Super-X + Vortex-killer foi efetivada na 1ª semana de setembro de 2006. Como consequência, foi implementada a alteração dos padrões de esvaziamento de distribuidor, com a redução de cerca de 1,5 t para as condições normais (pequena diferença de vazão entre os dois veios) e de 5,0 t para as condições de grande diferença de vazão.

Em termos de rendimento, a redução na sobra de distribuidor obtida pode ser verificada através do gráfico das Figura 8. Utilizou-se, como parâmetro, a sobra unitária média, obtendo-se pela divisão do total de sobra apontada no mês pelo número de distribuidores utilizados no período.

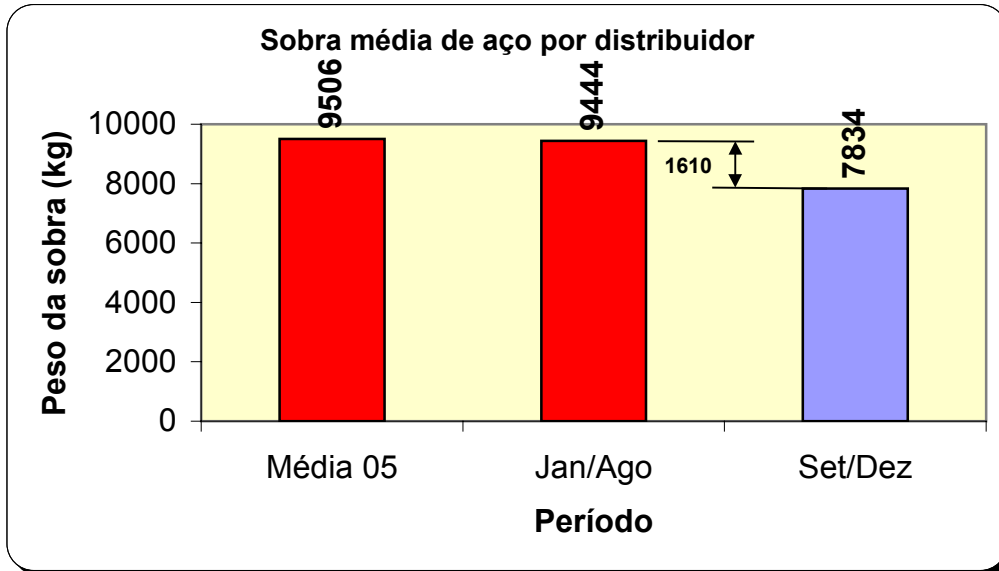


Figura 8 – Evolução da sobra média por distribuidor da máquina 4 após a implantação da nova configuração de modificadores de fluxo.

O resultado acima projeta uma redução no sucatamento de aço da ordem de 135 t/mês.

Impacto na qualidade de produto

Após a implantação do projeto, foi feita análise do impacto na qualidade final através de verificação do índice de ocorrência de esfoliação (defeito associado à presença de inclusões não-metálicas) nas linhas de laminação. O Índice de Ocorrência de Esfoliação pode ser calculado pela relação entre a soma das ocorrências e desvios em material procedente da máquina 4 dividido pela produção da máquina 4 no mesmo período. A evolução do índice pode ser visualizada a partir da Figura 9, onde se observa que não houve nenhuma tendência de elevação considerando o material processado entre os meses de setembro e dezembro. Pode-se, portanto, concluir que não houve efeito negativo na qualidade de produto, conforme previsto pelos resultados dos testes de simulação realizados.

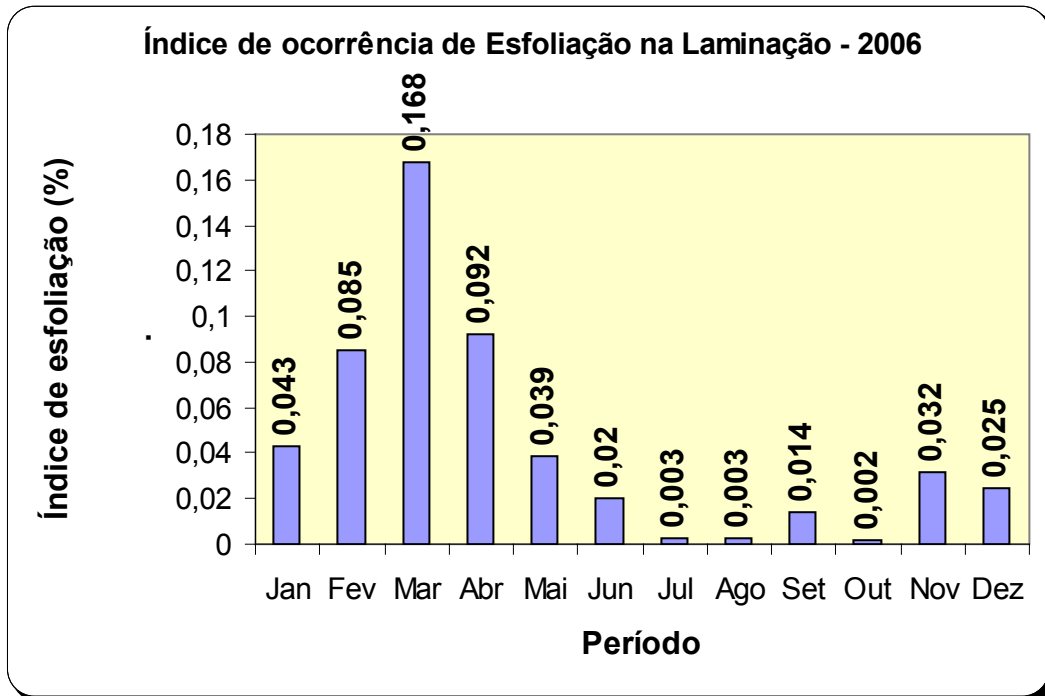


Figura 9 – Comparativo do índice mensal de ocorrência de Esfoliação nas linhas de laminação.

5 CONCLUSÕES

O uso de ferramentas de simulação matemática mais uma vez demonstrou ser um recurso bastante eficiente na predição de processos ligados a escoamento de metal líquido, reduzindo os riscos nos testes industriais.

Graças a um trabalho conjunto da CSN com uma empresa fornecedora de refratários, foi possível desenvolver um projeto de sistema de controle de fluxo de mais baixo custo, capaz de melhorar o rendimento (através da redução das sobras) e com melhoria no nível de limpeza interna do produto.

Os estudos de configurações de modificadores de fluxo para distribuidores de lingotamento contínuo apresentam um potencial bastante elevado de ganhos tanto em termos de redução de custos – associada, por exemplo a um mais completo escoamento do distribuidor em fim de lingotamento ou à redução de peso envolvido em mistura de aços de composições diferentes – quanto em termos de limpeza interna. Esse tipo de estudo é capaz de fornecer soluções bastante otimizadas com um nível de investimento muito baixo.

BIBLIOGRAFIA

- 1 CRAMB, A. W. Directions in the Production of Clean Steels, *Trans AFS*, (1994), p. 3 - 9.
- 2 McPHERSON, N. A. & McLEAN, A. (Eds.) Non-Metallic Inclusions in continuously Cast Steel, *Continuos Casting*, vol. 7. **The Iron and Steel Society**, 1995
- 3 HEASLIP, L.J, DORRICOT, J.D., RICHAUD, J., ROGLER, J.P. Minimization of Hybrid Steel Production during Grade Inter-Mixing by Improved Tundish Design and On-line Optimization, Prediction & Tracking. **McMaster Symp.2005**
- 4 ODENTHAL, H-J., PFEIFER, H., KLAAS M. Physical and mathematical modeling of tundish flows using Digital Particle Image Velocimetry (DPIV) and CFD-methods. **Steel Research** 71, No. 6+7,2000, p. 210-219.
- 5 SARPOOLAKY, H., ZHANG, S., ARGENT, B.B., LEE, W.E., Influence of GrainPhase on Slag Corrosion of Low-Cement Castable Refractories, **J. Am. Ceram. Soc.**, 84(2) 426-434, 2001.
- 6 HEASLIP, L.J, DORRICOTT, J.D., RICHAUD, J., ROGLER, J.P., ALVES, W.A., Mould Flow prediction and optimization. **ABM XXXVII Steelmaking Seminar – International, 2006.**
- 7 VEIGA, A.F., SILVA, A. C. S., VIEIRA, C.A.P., TRINDADE, L.B., REIS, M., KRUGER, M., GOMES, N.H.G. Desenvolvimento de controladores de fluxo através de estudo computacional para os distribuidores de aço da máquina de lingotamento da CSN, **XXXVI Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais – Internacional, 2005.**