



DESENVOLVIMENTO DE NOVA CONFIGURAÇÃO PARA O DISTRIBUIDOR DA MÁQUINA DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO Nº 3 DA USIMINAS-CUBATÃO¹

Joaci Gonçalves de Oliveira ²

Antonio Eli Nunes ³

Luiz Carlos Lopes ⁴

Alessandro Prenazzi ⁵

Bruno Augusto Batista Ribeiro ⁶

Resumo

Este trabalho apresenta a metodologia de desenvolvimento de uma configuração otimizada do fluxo de aço líquido no distribuidor da máquina de lingotamento contínuo 3 da Usiminas-Cubatão, visando a melhoria da qualidade do aço produzido e o aumento da segurança operacional. A avaliação da efetividade da configuração proposta foi realizada através do acompanhamento dos índices de qualidade dos aços ultra baixo teor de carbono (*intersticial free*), utilizados na indústria automobilística. Em relação à segurança operacional foi medido o residual do revestimento refratário de trabalho na região de maior desgaste e o *splash* gerado pelo impacto do primeiro aço na peça refratária utilizada na zona de impacto do distribuidor. Os índices medidos mostram que houve uma melhoria dos aspectos avaliados, contribuindo para a produção de aços com elevado índice de limpidez interna e a possibilidade de utilização do distribuidor por seqüenciais longos com garantia de segurança operacional. A redução do *splash* inicial comprova a capacidade de amortecimento do impacto do aço líquido na zona de impacto do distribuidor.

Palavras-chave: Lingotamento contínuo; Distribuidor; Simulação numérica; Limpidez

DEVELOPMENT OF NEW TUNDISH CONFIGURATION IN CONTINUOUS CASTING MACHINE #3 OF THE USIMINAS-CUBATÃO

Abstract

This paper presents a methodology to develop an optimized configuration of liquid steel flow in the tundish of the continuous casting machine #3 of the Usiminas-Cubatão in order to improve the quality of steel produced and to increase of the operation safety. The evaluation of the effectiveness of the proposed configuration was performed by monitoring the levels of quality of ultra-low carbon steel (*interstitial free*), used in the automotive industry. The residual refractory work lining in the area of greatest wear was measured and the splash generated by the impact of the first steel on the refractory used in the impact zone of the tundish was also evaluated. The quality data measured showed a significant improvement of the aspects evaluated, contributing to the production of steels with high internal cleanliness. The lower wear of the refractory lining can guarantee long sequential operational with safety. The decrease of the initial splash demonstrates the capability of the special pieces used on impact zone to enhance the operational safety.

Key-words: Continuous casting; Tundish; Numerical simulation; Steel cleanliness.

¹ Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Engenheiro Metalurgista MSc – USIMINAS

³ Engenheiro – USIMINAS

⁴ Engenheiro Mecânico – USIMINAS

⁵ Engenheiro Metalurgista – Assistente Técnico Especialista – Magnesita Refratários

⁶ Engenheiro Químico – Pesquisador – Magnesita Refratários

1 INTRODUÇÃO

A configuração interna dos distribuidores utilizados no lingotamento contínuo dos aços tem sido cada vez mais estudada como uma maneira de melhorar a qualidade interna do aço produzido e garantir uma operação segura no lingotamento contínuo. Sabe-se que uma configuração adequada do distribuidor pode levar a uma redução de inclusões presentes no aço líquido, através da utilização de peças refratárias para modificação do fluxo. A eliminação de inclusões no distribuidor acontece tanto pelo direcionamento do fluxo de aço líquido para a escória, onde essas inclusões são eliminadas, quanto pelo aumento do tempo de residência do aço líquido no distribuidor, que promove o coalescimento e facilita a flotação dessas inclusões. Todo o esforço empregado na eliminação de inclusões passa pela presença de uma escória com boa capacidade de absorção dessas inclusões. A Figura 1 mostra um corte transversal de um defeito superficial e sua caracterização por microsonda indicando a sua origem no processo.

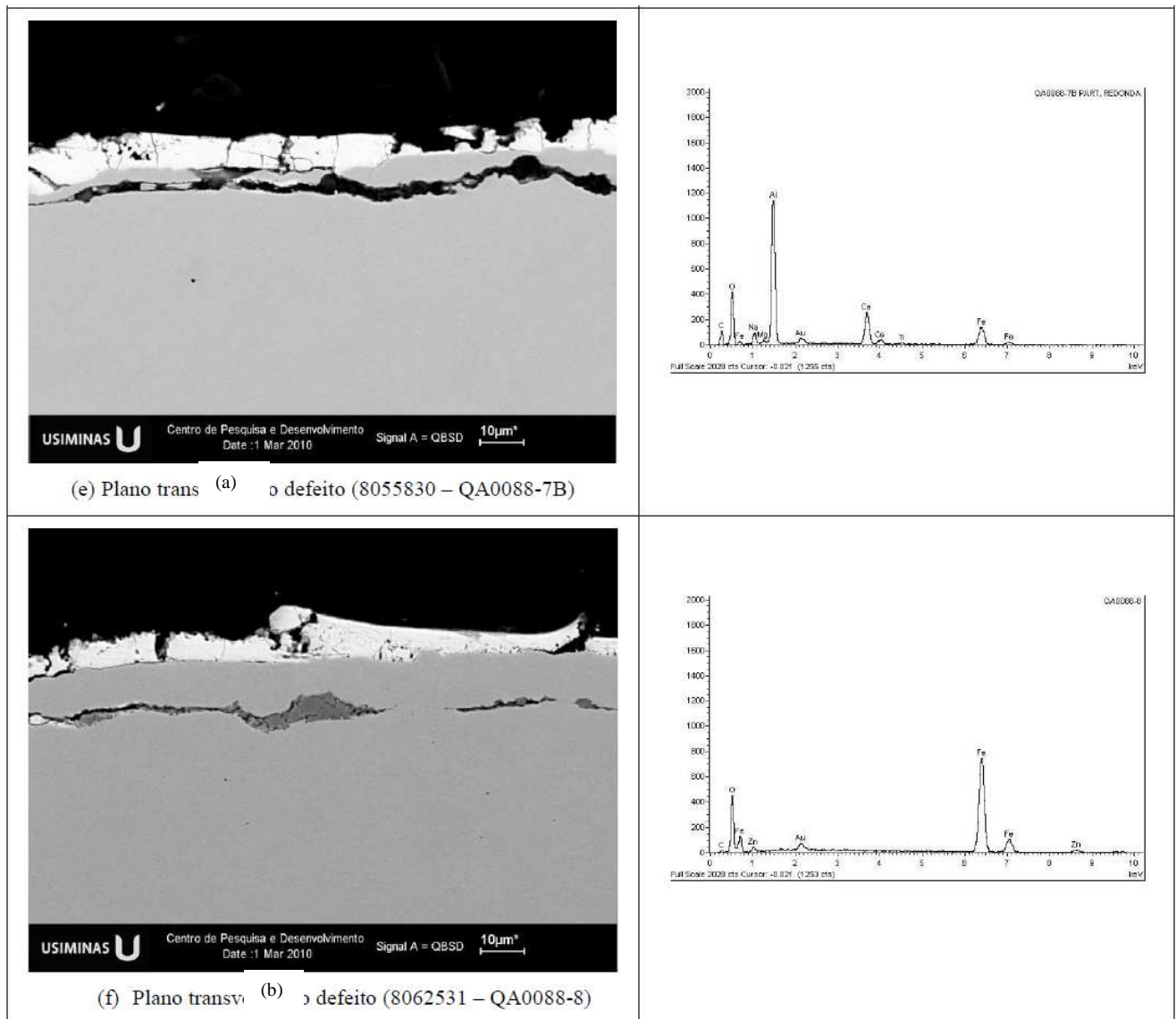


Figura 1 – Defeito superficial em laminados: (a) inclusão não metálica oriunda de processo na aciaria- $Al_2O_3/CaO/NaO/FeO/MgO$; (b) inclusão não metálica oriunda de processo de laminação- FeO

As características de fluxo do aço no distribuidor são dadas através de uso de peças refratárias que funcionam como modificadores de fluxo em um distribuidor específico. Como a eliminação de parte das inclusões do aço líquido depende do padrão de fluxo de aço líquido no distribuidor, a utilização da simulação numérica computacional torna-se uma ferramenta fundamental no auxílio da determinação das melhores configurações de peças refratárias modificadoras de fluxo. A simulação numérica através da resolução das equações de Navier-Stokes, energia e turbulência acopladas, consegue fornecer importantes informações, como os campos de velocidade, distribuição de temperatura, tensão de cisalhamento nas paredes refratárias, energia cinética de turbulência, que permitem determinar de maneira precisa e confiável uma configuração otimizada do distribuidor.⁽¹⁻⁴⁾

Em relação à segurança operacional, os modificadores de fluxo têm que reduzir a tensão de cisalhamento nas paredes refratárias e a turbulência na interface metal/escória, causadas pelo fluxo de aço líquido no distribuidor. A tensão de cisalhamento contribui para o aumento do desgaste do revestimento refratário pelo aumento da erosão causada pelo aço líquido e pela escória. A turbulência na interface metal-escória (energia cinética de turbulência) aumenta a erosão química pela escória com sua renovação constante e a manutenção da diferença de composição química entre o revestimento refratário e a escória e sua afinidade com os componentes do refratário. Além da contribuição na redução do desgaste refratário, a redução do *splash* inicial contribui para o aumento da segurança ocupacional do processo de lingotamento contínuo, sendo um indicador direto da capacidade de amortecimento do impacto do jato de metal líquido. A presença de fluxo de aço direcionado fora ou afastado da zona de impacto, como é o caso de válvulas longas inclinadas, pode causar desgastes localizados no revestimento refratário, que podem ser minimizados ou eliminados através da utilização de superfície com característica difusora. A Figura 2 mostra o aspecto de um inibidor de turbulência com esta superfície difusora, caracterizada pelas ondulações localizadas no fundo da peça.

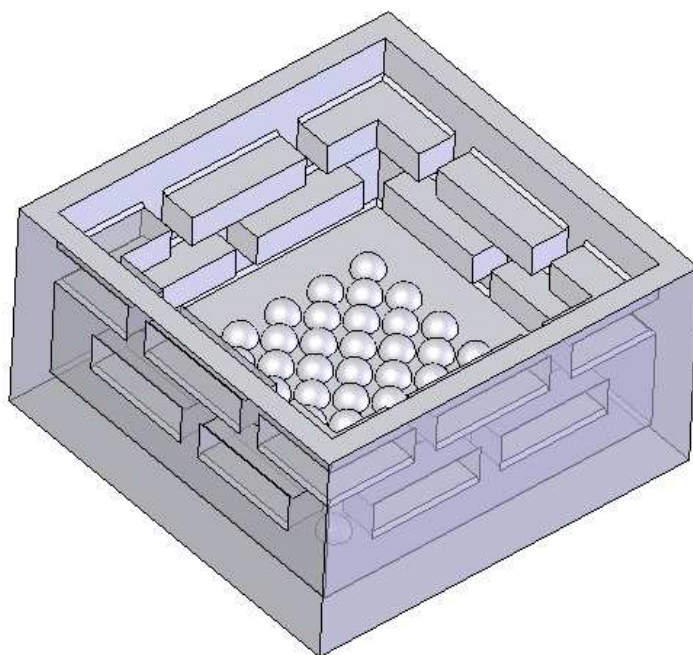


Figura 2 – Peça modificadora de fluxo com superfícies difusoras.

A Figura 3 mostra o efeito da inclinação da válvula longa (7°) nos vetores de velocidade do fluxo de aço durante a operação, utilizando um inibidor de turbulência convencional (a) e utilizando uma peça com superfície difusora (b). Na Figura 3a nota-se claramente a formação de um caminho preferencial do jato de alta velocidade que significará uma redução significativa do tempo de residência mínimo do aço no distribuidor e um grande aumento no valor da energia cinética de turbulência na interface metal-escória. Já a Figura 3b mostra o efeito da superfície difusora reduzindo turbulência e eliminando a formação do caminho preferencial de escoamento (curto-circuito) devido principalmente à maior área útil da peça conseguida com a eliminação das “abas” na extremidade superior do inibidor convencional.

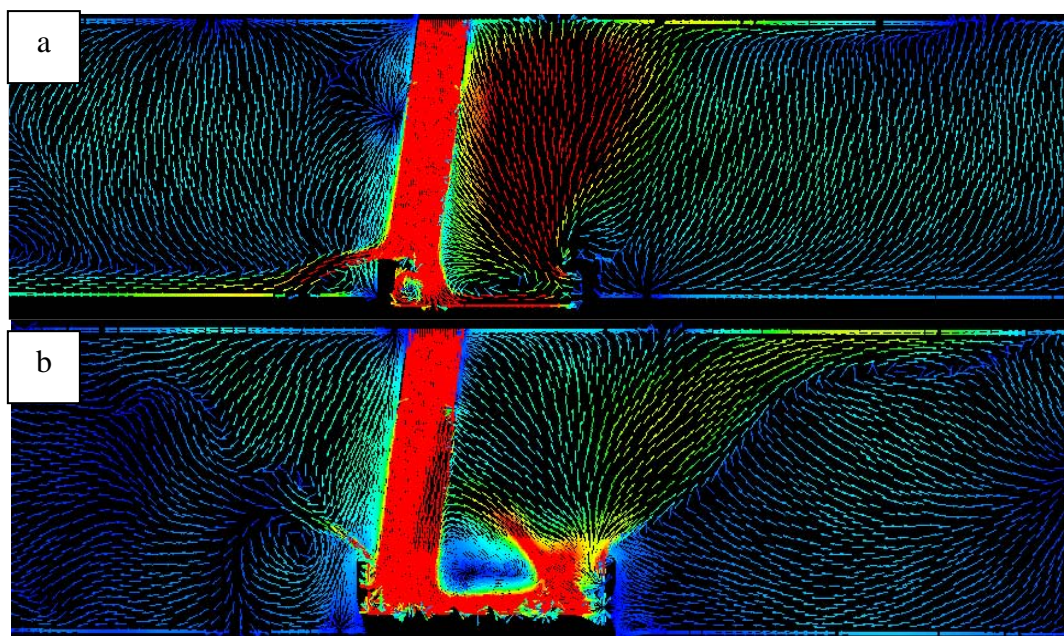


Figura 3 – (a) Uso de inibidor de turbulência convencional e (b) Uso de peça especial difusora.

Orientados pela simulação numérica foi realizado teste industrial na Máquina de Lingotamento Contínuo número 3 da Usiminas-Cubatão, utilizando uma nova configuração interna do distribuidor. Nos testes foi utilizada uma peça refratária básica (>92% de MgO) com superfícies difusoras, montada na região do impacto do aço líquido. A configuração foi avaliada em relação aos índices de qualidade de aço ultra baixo teor de C e à expectativa de vida dos distribuidores em relação ao desgaste do revestimento de trabalho.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho compreende duas etapas distintas:

- determinação de uma configuração adequada do distribuidor utilizando a simulação computacional; e
- testes industriais.

2.1 Simulação Computacional

A simulação computacional do distribuidor ocorre em três etapas distintas, segundo a seguinte metodologia:

- a primeira etapa resolve, em regime permanente, as equações de Navier Stokes para a obtenção dos perfis de velocidade e o perfil térmico segundo a lei de Fourier através do método de diferenças de volumes finitos em uma malha tetraédrica;
- na segunda etapa, considerando um modelo transiente, calcula-se de acordo com a lei de Fick a dispersão de traçador, emitido via pulso, a fim de gerar as curvas de distribuição de tempo de residência do aço e então determinar os volumes característicos do distribuidor; e
- a terceira e última etapa é o cálculo das trajetórias das inclusões e a possibilidade de captação das mesmas pela interface metal-escória, uma vez que estas toquem a superfície. A formulação lagrangeana de cálculo é então utilizada para os diversos tamanhos de inclusões e a contagem daquelas captadas é fornecida.⁽¹⁻³⁾

As condições de contorno aplicadas no modelo foram: uma vazão de aço de 3,5 t/min; a temperatura de entrada do aço fornecida foi de 1.560°C; a densidade do aço utilizada foi de 7.020 kg/m³. As perdas térmicas foram calculadas com base nas temperaturas medidas na carcaça do distribuidor. A partir dessas temperaturas e do perfil refratário do distribuidor foi possível calcular o coeficiente global de troca de calor.

Após simulação de diversos casos foi selecionado o de melhor resultado geral que foi determinado utilizando como critério os seguintes fatores, em ordem de importância:

- padrão geral do fluxo de aço no distribuidor;
- tempo mínimo de residência;
- eliminação de inclusões pela interface metal/escória;
- energia cinética de turbulência na interface metal/escória;
- energia de cisalhamento nas paredes refratárias;
- volumes característicos; e
- perdas térmicas.

2.2 Testes Industriais

Para a realização dos testes industriais a configuração proposta foi utilizada alternadamente em relação à configuração referência em uma primeira etapa, sendo utilizada em seguida por um período de tempo contínuo.

Os resultados relacionados à segurança operacional foram avaliados através da medição do desgaste ocorrido na região da parede refratária na região de vazamento, que é a mais crítica do revestimento de trabalho. A geração do *splash* na partida da máquina de Lingotamento 3 também foi avaliada e comparada com a configuração referência.

Os resultados relacionados à qualidade foram levantados através da ocorrência de defeitos relacionados à presença de inclusões no produto após laminação. Para esta avaliação, foram utilizados os resultados obtido na produção de aços ultra baixo teor de carbono, destinados à indústria automobilística, onde os requisitos de qualidade são mais rigorosos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Simulação Numérica

A configuração selecionada dentre os casos analisados compreende apenas a utilização de uma peça modificadora de fluxo na região de impacto. A configuração selecionada é apresentada na Figura 4.

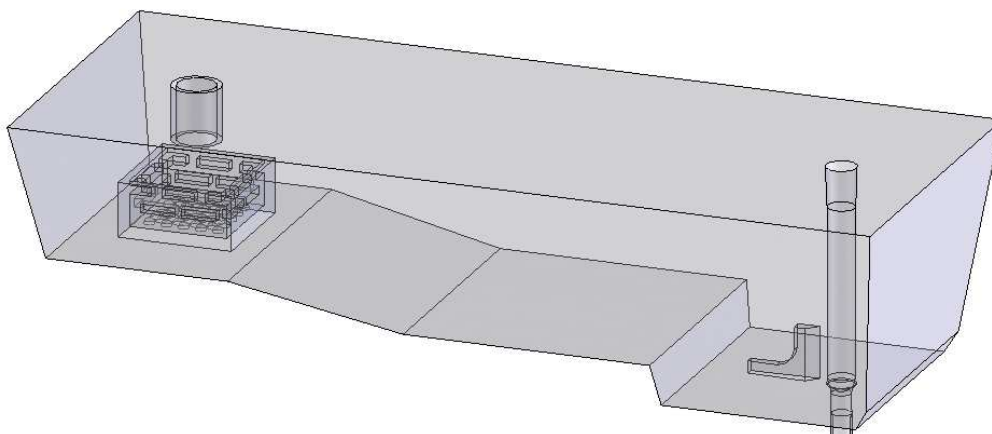


Figura 4 – Configuração utilizada nos testes industriais.

A peça refratária modificadora de fluxo é fabricada com material básico com elevada resistência à compressão a quente (RCQ) cujas principais características estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características do material refratário utilizado no modificador de fluxo

RFQ	<1.000°C	80 MPa	
	1.600°C	50 MPa	
Análise Química (% em massa)*	MgO	SiO ₂	
	94	4	

* Valores típicos

A peça modificadora de fluxo apresenta uma superfície inferior (impacto) com relevos que proporcionam um comportamento difusor do jato de aço incidente, reduzindo a influência danosa da ocorrência de válvula longa inclinada durante o lingotamento. A Figura 5 mostra detalhes da peça e sua montagem na região de impacto do distribuidor da Máquina de Lingotamento Contínuo 3 da Usiminas-Cubatão.

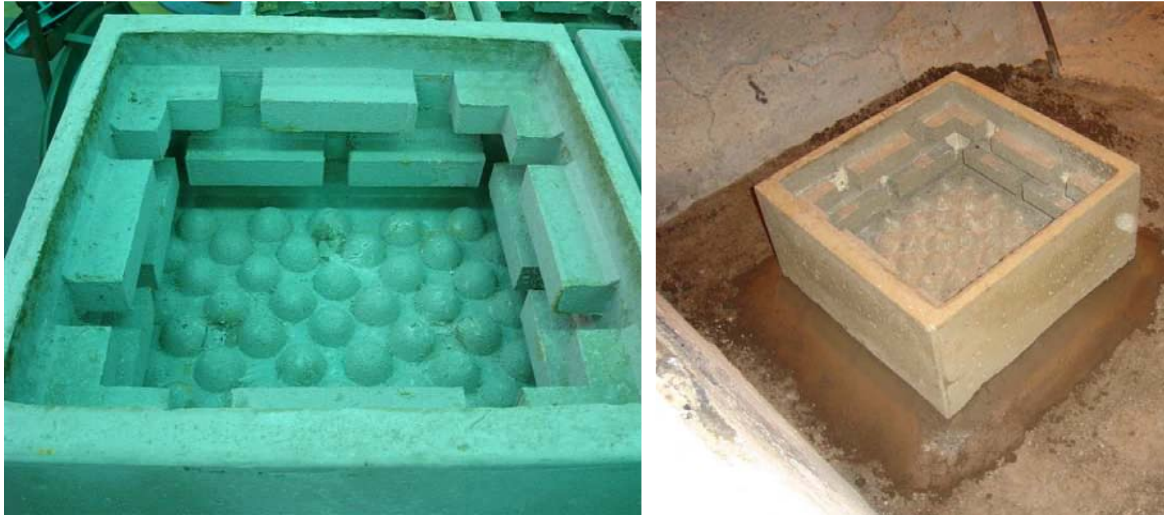


Figura 5 – Peça modificadora de fluxo utilizada nos testes.

Nota-se na Figura 5 que a lateral da peça possui duas fileiras de ressaltos que visam confinar a turbulência na região de impacto. As duas fileiras garantem, também, a permanência deste efeito durante um tempo maior de operação em casos de longos seqüenciais de lingotamento. A presença destes ressaltos na parede interna da peça garante uma área útil de incidência otimizada em casos de ocorrência de operação com válvula longa inclinada.

O padrão de fluxo apresentado na Figura 6 mostra que a turbulência (regiões de alta velocidade) foi confinada na região de impacto do jato de aço, com velocidades baixas na interface metal/escória e que o aço apresenta uma tendência de fluxo inicialmente ascendente e posteriormente paralelo à superfície, o que facilita a absorção das inclusões pela escória.

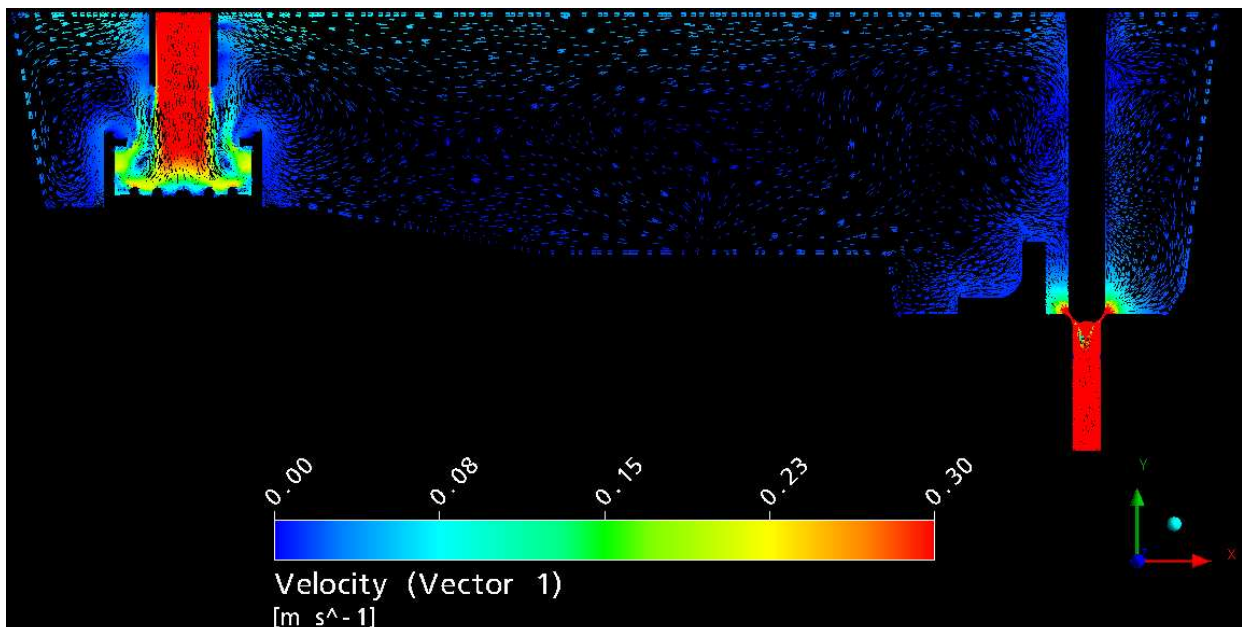


Figura 6 – Campos de velocidade no plano central do distribuidor.

As baixas velocidades no menisco podem ser melhor visualizadas pela energia cinética de turbulência na interface metal/escória. Este fato contribui para a redução da possibilidade de arraste de escória para o aço da reoxidação do aço líquido. O amortecimento do impacto de aço proporcionado pela peça modificadora de fluxo reduz a energia cinética de turbulência na interface metal-escória e a tensão de cisalhamento nas superfícies refratárias como mostrado nas Figuras 6 e 7, respectivamente. Os benefícios oriundos destes aspectos são: a menor possibilidade de emulsificação da escória e o menor desgaste do refratário.

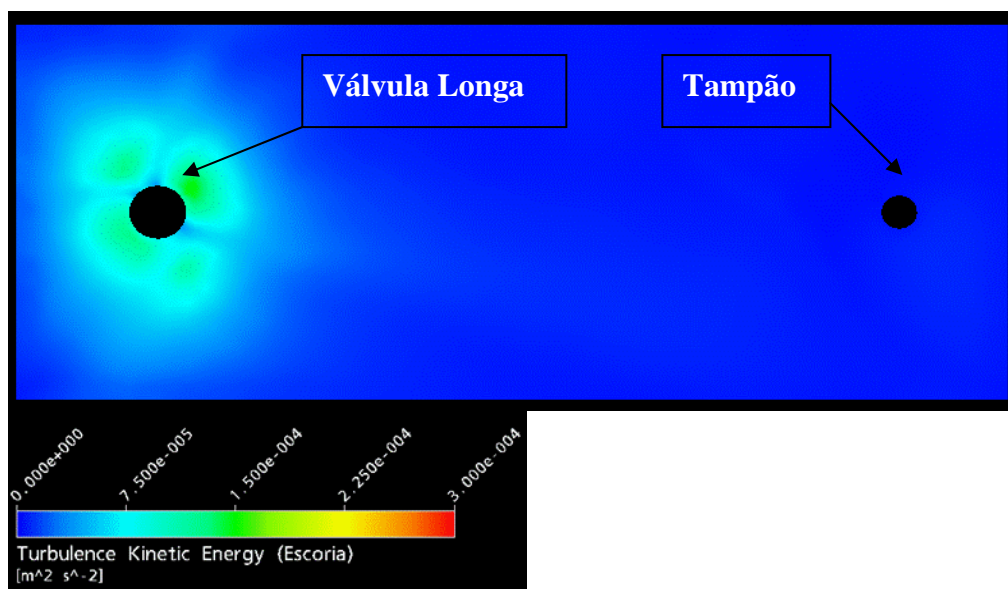


Figura 7 – Energia cinética de turbulência na interface metal-escória.

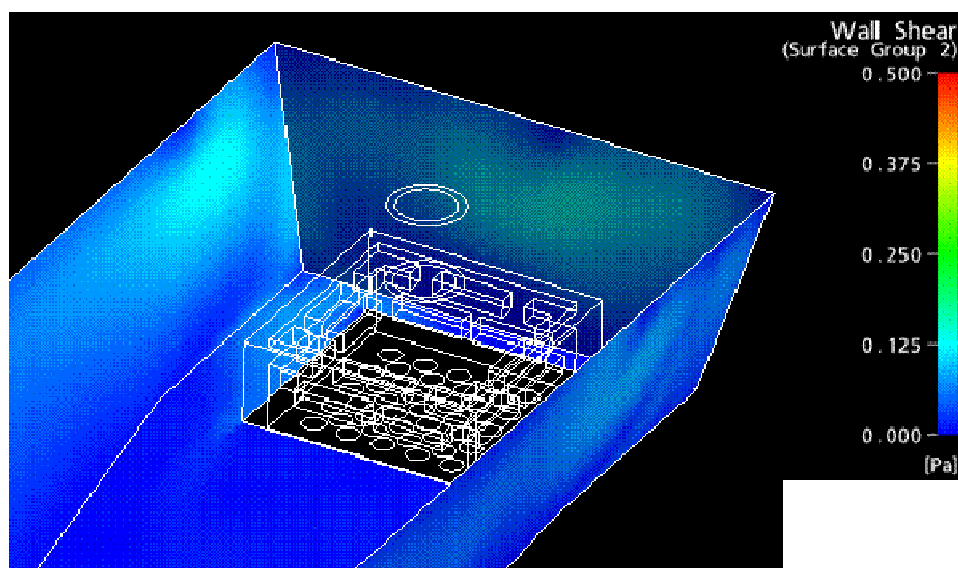


Figura 8 – Tensão de cisalhamento nas paredes do distribuidor.

A distribuição de temperatura obtida na simulação numérica (Figura 9) indica que a temperatura no veio é aproximadamente 2°C menor que na entrada do distribuidor, mostrando uma boa homogeneidade de temperaturas no interior do reator. Este fato é resultado do baixo nível de volume morto apresentada pela configuração proposta. Esta avaliação é uma vantagem apresentada pela simulação numérica, já que na simulação física esta propriedade não pode ser avaliada.

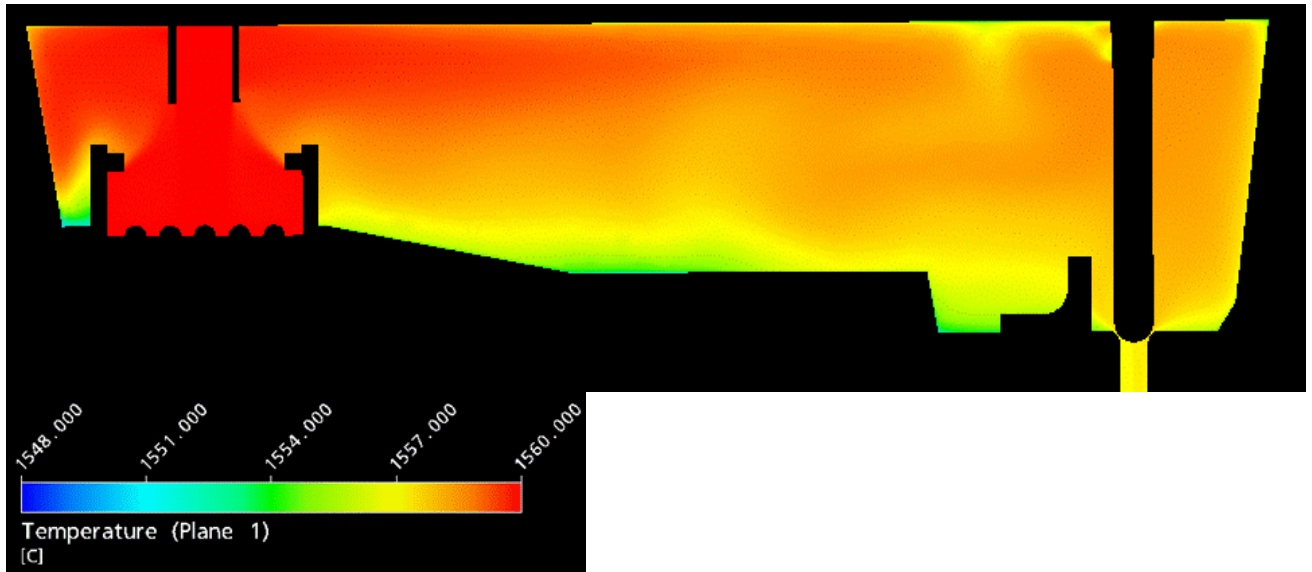


Figura 9 – Distribuição de temperatura no interior do distribuidor.

Na Tabela 2 são apresentados os volumes característicos e o tempo de residência mínimo do aço no interior do distribuidor.

Tabela 2 – Volumes característicos e tempo de residência calculados

Volume de mistura (%)	65
Volume pistonado (%)	26
Volume morto (%)	9
Tempo de residência mínimo (s)	136

Cabe ressaltar a baixa porcentagem de volume morto, demonstrando o que foi mencionado com relação à homogeneidade térmica do aço líquido dentro do distribuidor, e o alto tempo de residência obtido pela configuração proposta.

3.2 Testes Industriais

Em uma primeira etapa de testes industriais as peças foram utilizadas em seqüências menores para se avaliar o desgaste do material refratário da peça modificadora de fluxo. Na Tabela 3 são apresentados os dados obtidos nesta fase, onde se pode perceber que a taxa de desgaste máxima foi de 0,007 mm/min. Considerando uma espessura remanescente de segurança de 20 mm, a taxa máxima de desgaste mencionada permite que essa peça tenha vida útil de aproximadamente 70 horas.

Tabela 3 – Dados de desgaste da peça modificadora de fluxo

Tempo de lingotamento	Quantidade de Corridas	Tipo de Aço	MODIFICADOR DE FLUXO		Velocidade de desgaste (mm/min)
			Residual (mm)	Original (mm)	
02hs 13min	3	Médio Carbono	50	50	0
16hs 37min	20	Médio Carbono	48	50	0,002
11hs 39min	12	Médio Carbono	49	50	0,001
12hs 03min	12	Médio Carbono	47	50	0,004
6hs 58min	7	Ultra Alto Carbono	50	50	0
12hs 36min	13	Médio Carbono	47	50	0,004
9hs 23min	11	IF	46	50	0,007
10hs 16min	12	IF	50	50	0
8hs 10min	10	Médio Carbono	49	50	0,002

A medição do desgaste foi realizada na superfície inferior da peça, onde ocorre o impacto do jato de aço líquido, como mostrado na Figura 10.



Figura 10 – Medição de residual refratário da peça modificadora de fluxo.

Além de garantir a segurança operacional através da determinação do residual da peça refratária, nos primeiros testes também se mediu o remanescente do revestimento refratário na linha de escória próxima à região de vazamento, para garantir a segurança operacional. A Figura 11 apresenta os resultados obtidos nas primeiras utilizações, mostrando uma tendência significativa de redução do desgaste nesta região. Considerando-se a maior taxa de desgaste obtida com a utilização da



configuração proposta (0,04mm/min) e uma espessura remanescente de segurança de 10 mm a expectativa de vida média obtida seria de 20 h de lingotamento. Já na condição de referência, com a taxa máxima de desgaste, a expectativa de vida obtida nas mesmas condições seria de 14 h, sendo que atualmente o distribuidor está limitado a uma operação de 16 h e 12 h para determinados tipos de aços.

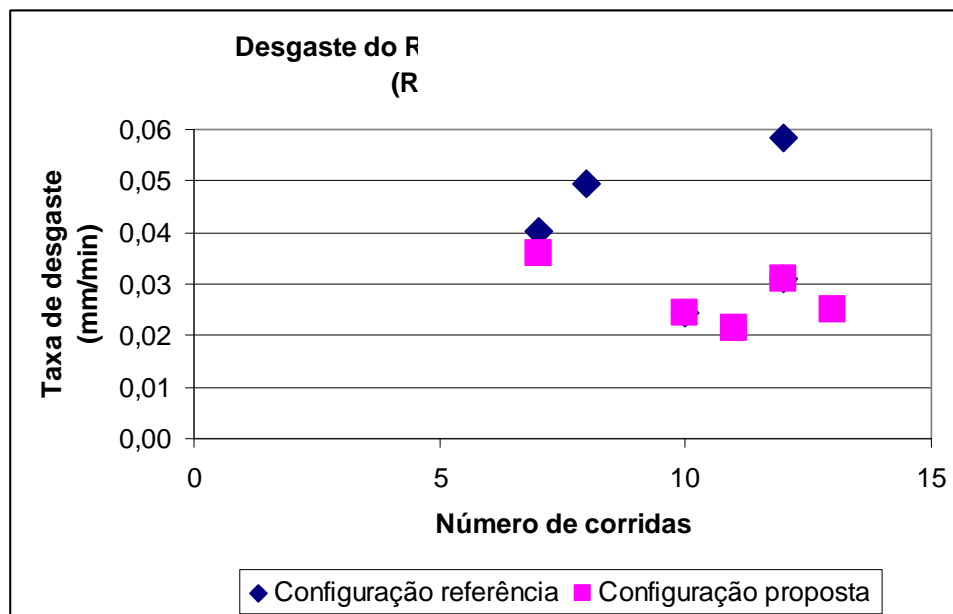


Figura 11 – Medidas preliminares do desgaste do revestimento de trabalho, utilizando a configuração proposta em comparação aos dados obtidos com a configuração de referência.

Com a segurança operacional garantida, partiu-se para a utilização das peças em larga escala. Nesta etapa foram utilizadas 30 peças em todos os tipos de aços. Nesta etapa do desenvolvimento objetivou-se a consolidação dos dados de segurança operacional obtidos e a determinação dos índices de qualidade. Para avaliação dos índices de qualidade foram utilizados apenas os distribuidores onde foram lingotados seqüenciais de aços IF (Intersticial free). Na Figura 12 são apresentados os dados obtidos com a utilização de 30 peças.

Máq

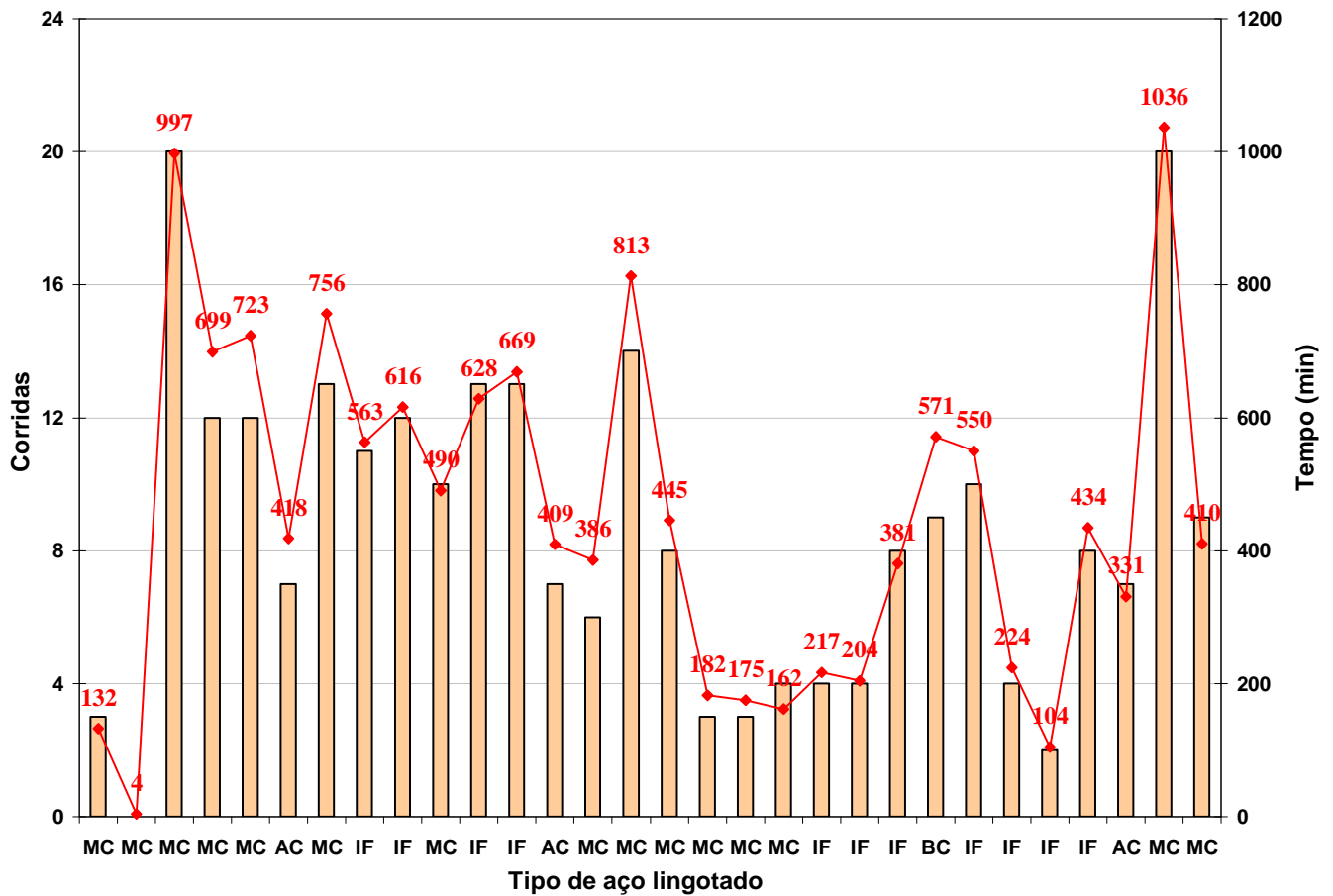


Figura 12 – Dados operacionais obtidos na realização dos testes industriais.

Na Figura 13 são apresentados os resultados de desgaste refratário na região mais crítica. Em alguns distribuidores não foi possível realizar essa determinação por razões operacionais. A taxa de desgaste médio foi de 0,02 mm/min, corroborando os resultados obtidos na primeira etapa de testes. Nota-se que existe um valor discrepante de aproximadamente 0,076 mm/min, demonstrando a importância de outros fatores operacionais no mecanismo de desgaste do revestimento refratário de trabalho. Excluindo-se o valor mencionado o segundo maior valor de desgaste foi de 0,045 mm/min, o que possibilitaria uma vida média do distribuidor de 15 h, considerando um remanescente de segurança de 20mm no revestimento refratário.

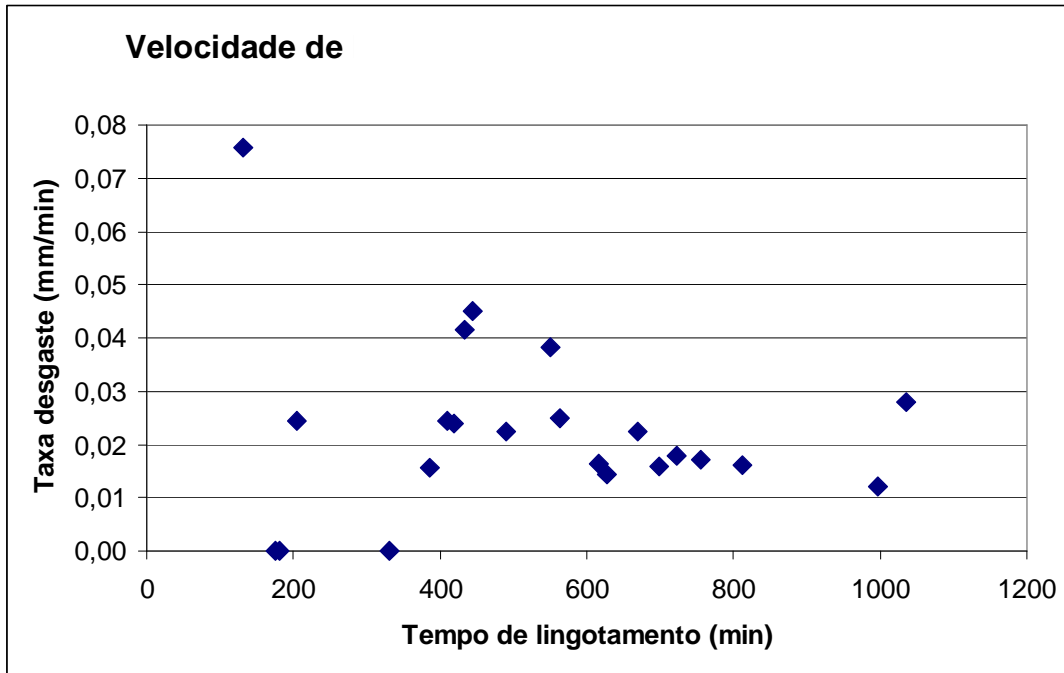


Figura 13 – Desgaste do refratário com o tempo.

4 RESULTADOS DE QUALIDADE NO PRODUTO FINAL

A nova configuração foi testada na fabricação de aços ultra baixo carbono. Tais aços representam grande desafio na sua produção, pois necessitam de excelente controle e eficiência na flotação de inclusões não metálicas a fim de atender severos requisitos em termos de qualidade superficial. Este aço é posteriormente laminado e destinado a atender a diversos tipos de produto final no tocante ao tipo de revestimento e aplicação, especialmente para a indústria automobilística. O índice de recusa por inspeção foi de 0% (zero) no produto laminado a frio (LF), laminado a frio eletrolgalvanizado (EG) e laminado a frio por imersão (GI). A Tabela 4 indica os valores obtidos para produtos obtidos a partir de placas sem escarragem programada, excetuando 56,7 toneladas destinadas ao atendimento do nível mais elevado de qualidade – PQ20.

Tabela 4 – Índice de recusa na inspeção antes e após aplicação da nova geometria de inibidor

Tipo de revestimento	Antes	Após	
	%	%	Quantidade produzida (t)
EG	1,21	Zero	175,5
GI	0,90	Zero	742,4
LF	1,27	Zero	234,0

5 CONCLUSÃO

A nova configuração de refratário para controle de fluxo desenvolvida para o distribuidor da máquina de lingotamento contínuo 3 da Usiminas, atendeu plenamente os objetivos de desempenho operacional, durabilidade por longos seqüenciais e principalmente trouxe melhoria significativa no índice de flotação de inclusões não metálicas. Neste aspecto em particular os testes industriais

demonstraram a boa eficiência da nova mobília refratária, demonstrada na inspeção de um lote de quase 1200 t de produto, onde não se detectou nenhuma recusa por defeito superficiais no produto final, seja ele revestido ou não. Destaque-se que este resultado se aplica aos diferentes níveis de inspeção, incluindo os produtos destinados a atender a categoria PQ-20, a mais alta.

REFERÊNCIAS

- 1 J. Szekely, O. Ilegbusi, The Physical and Mathematical Modeling Of Tundish Operations. 1998.
- 2 Y. Sahai, T. Emi. Melt Flow Characterization in Continuous Casting Tundishes. ISIJ International, Vol. 36, No.6, 1996, pp. 667-672
- 3 R. F.A.F. da Silva, M.Kruger, M.V.F.dos Reis, L.B. Trindade, R.N.Borges, B.A.B.Ribeiro, J. G. Oliveira, G.I.Lara, APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS DE OTIMIZAÇÃO E DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL EM UM DISTRIBUIDOR DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO. “XXXVII Seminário de Aciaria – Internacional” - 2006
- 4 TAVARES, R. P. ; OLIVEIRA, Henrique Ventura de ; LEÃO, Marck Carvalho ; CAMPOS, Thiago Rabelo Nunes ; ÁVILA, Thiago Augusto . NUMERICAL SIMULATIONS OF TURBULENT FLUID FLOW IN DIFFERENT CONFIGURATIONS OF TUNDISHES AND EXPERIMENTAL VALIDATION. In: Conferencia de Aceria, 2005, San Nicolas, Argentina. Proceedings of the IAS Steelmaking Conference. San Nicolas, Argentina : Instituto Argentino de Siderurgia, 2005. v. 1. p. 307-316