

MODELAMENTO FÍSICO INTEGRADO DE SISTEMAS DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE PLACAS PARA ESTUDO DA FORMAÇÃO DE PLACAS DE MISTURA⁽¹⁾

Carlos Eduardo Passagli Barra⁽²⁾

Bruno Leonardo da Silva Morato⁽³⁾

Alexandre de Freitas Gomes de Mendonça⁽³⁾

Bruno do Nascimento Teixeira⁽⁴⁾

Roberto Parreiras Tavares⁽⁵⁾

Resumo

No presente trabalho, modelos físicos de um distribuidor e de um molde de lingotamento contínuo de placas foram utilizados para estudo da formação de placas de mistura, quando seqüências de aços de diferentes composições químicas são lingotados. Os modelos físicos foram construídos em escala 1:3 em relação a uma planta industrial. Sua operação foi completamente automatizada, incluindo controle de vazões e níveis em todos os pontos relevantes. A partir dos ensaios, foram geradas curvas F para o distribuidor e para o molde. Diferentes níveis do fluido no distribuidor foram empregados. Foi constatado que a redução de nível no distribuidor permite uma redução significativa no comprimento da placa de mistura. Os resultados obtidos serviram para validar as previsões de um modelo matemático para previsão do comprimento da placa de mistura.

Palavras-chave: lingotamento contínuo, modelamento físico, modelamento matemático, placa de mistura.

(1) Trabalho a ser apresentado no XXXVI Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais da ABM, 16 a 18 maio de 2005, Vitória – Espírito Santo

(2) Sócio da ABM, Engenheiro Metalurgista, Aluno de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da UFMG

(3) Sócio da ABM, Engenheiro Metalurgista

(4) Aluno do Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação da UFMG

(4) Sócio da ABM, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da EEUFMG.

1 INTRODUÇÃO

A produção mundial de aço vem crescendo ao longo das últimas décadas e, com a crescente globalização da economia, a concorrência interna e externa tem aumentado significativamente. Para manter-se competitiva no mercado, uma empresa siderúrgica precisa trabalhar focada em redução de custos. Foi pensando assim, e também agregando qualidade aos seus produtos, que as usinas siderúrgicas brasileiras em sua grande maioria passaram a produzir placas e tarugos predominantemente pelo processo de lingotamento contínuo.

Para atender aos diversos seguimentos de mercado, as empresas trabalham com diversas qualidades e dimensões de produtos. Desta forma, a produção de aços é bastante diversificada. O lingotamento contínuo, por sua vez, precisa trabalhar com seqüenciais longos para conseguir aliar produtividade e custos reduzidos. Portanto, é muito freqüente ocorrerem misturas, trocas de qualidade, dentro de uma mesma seqüência, sem que se possa trocar o distribuidor. Quando isso ocorre, são geradas placas contaminadas com qualidades diferentes, chamadas de placas de mistura. A produção deste tipo de placas pode alcançar volumes significativos, representando perdas importantes para as indústrias. As placas de mistura são desclassificadas para os clientes finais e vendidas para aplicações menos rigorosas a um preço inferior ao praticado para venda de placas.

No Brasil, o padrão atual de determinação do comprimento de mistura no lingotamento contínuo nas usinas é puramente empírico.

Nesta área, modelos matemáticos têm sido aplicados e obtiveram como resultado ganhos expressivos de rendimento, uma vez que otimizam o corte das placas de mistura. Estes modelos, além de ser útil na operação de corte das placas de mistura, poderão ser usados para minimizar o volume de aço misturado e otimizar o comprimento da placa de mistura gerada. Para ser útil, estes modelos deverão fornecer respostas rápidas, que possam ser usadas pelos operadores das instalações de lingotamento contínuo e, portanto, não podem envolver a solução de complexas equações diferenciais, que consumiriam horas de computação.

Neste trabalho, foram conduzidos experimentos para estudo da formação de placas de mistura, empregando um conjunto de modelos físicos completamente automatizados. O efeito do nível de fluido no distribuidor foi estudado. Os resultados dos ensaios experimentais foram utilizados na validação de um modelo matemático para previsão do comprimento da placa de mistura.

2 METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido em três etapas:

- desenvolvimento de experimentos com os modelos físicos visando simular a formação de placa de mistura durante o lingotamento de seqüenciais de aços com diferentes composições químicas;
- desenvolvimento de um modelo matemático para simulação da formação da placa de mistura; e
- validação do modelo matemático desenvolvido, usando os resultados da parte experimental.

A seguir cada uma das etapas acima é descrita.

2.1 Modelamento Físico

A parte experimental desse trabalho constou da realização de experimentos utilizando modelos físicos do distribuidor e do molde, construídos no Laboratório de Simulação de Processos do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Os modelos físicos do distribuidor e do molde foram completamente integrados e sua operação automatizada. A Figura 1 mostra uma vista do conjunto de modelos físicos usados nos ensaios. Trata-se de uma réplica em escala 1:3 de uma máquina de lingotamento de placas com dois veios.

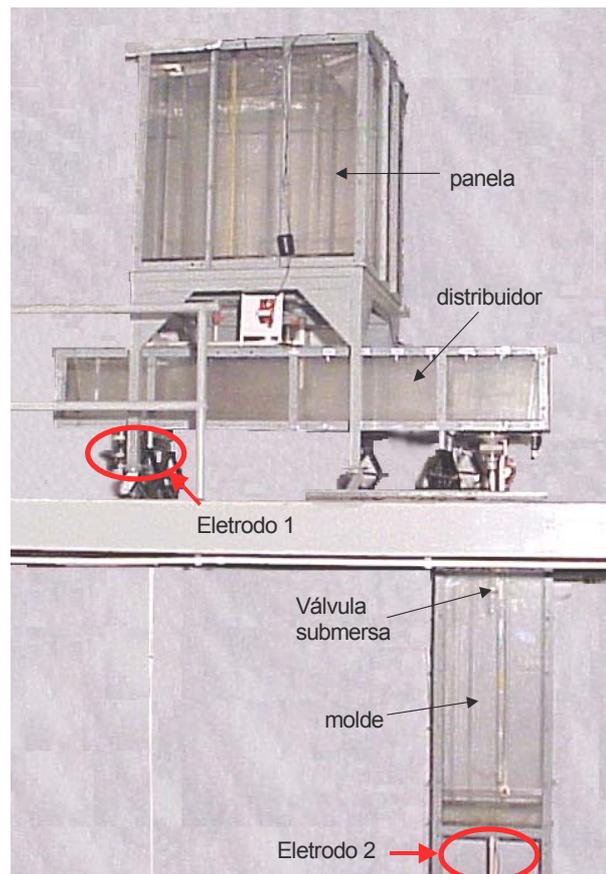


Figura 1. Vista dos modelos físicos usados nos ensaios.

A Figura 2 mostra a tela do sistema de automação utilizado na realização dos experimentos. Este sistema de automação foi fundamental para a obtenção de um elevado grau de repetibilidade dos testes.

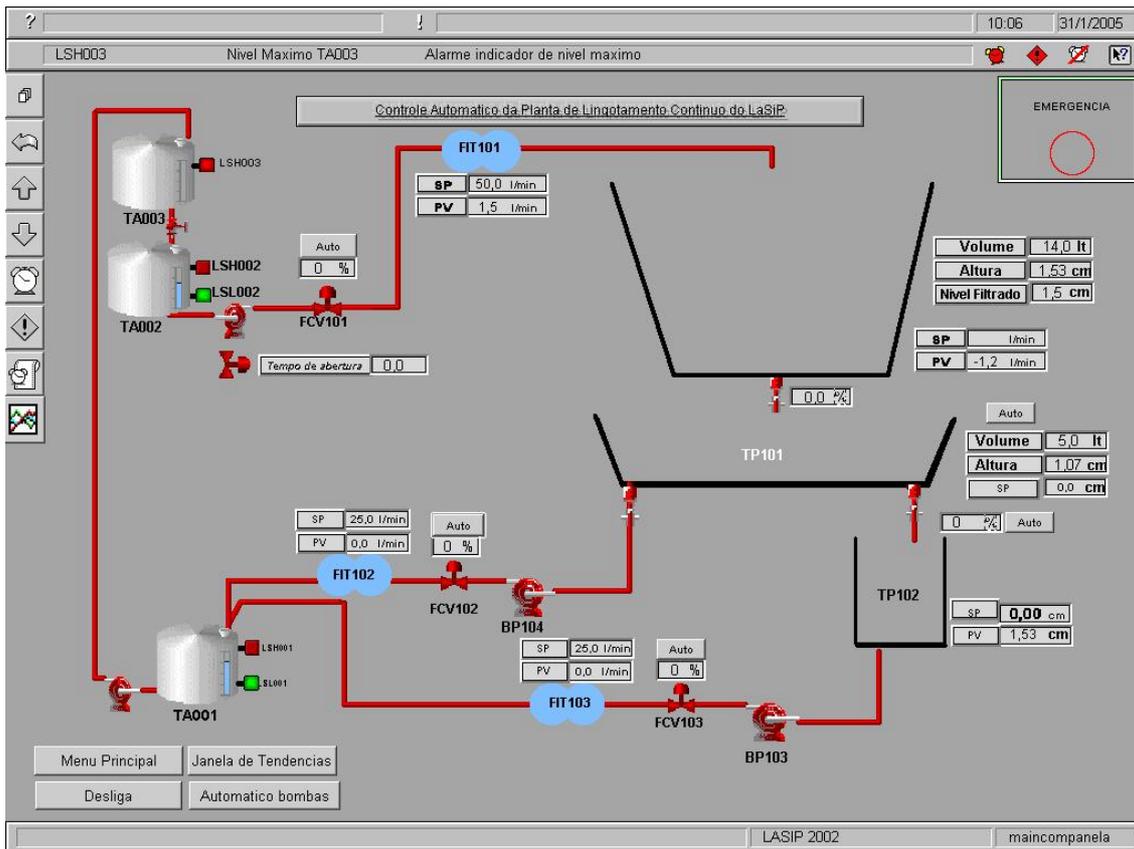


Figura 2. Tela do sistema supervisório usado no controle das condições experimentais.

Nos ensaios, a água foi utilizada para simular o aço. O critério de similaridade de Froude⁽¹⁾ foi usado para estabelecer as vazões de água empregadas

Os ensaios realizados consistiram na injeção de um pulso de traçador na alimentação do distribuidor. A concentração do traçador nas saídas do distribuidor e do molde foram, então, acompanhadas durante um tempo equivalente a quatro tempos de residência do fluido no distribuidor. Os eletrodos indicados na Figura 1 foram usados na determinação desta concentração. Todos os testes foram realizados em triplicata. A variação da concentração nas saídas do distribuidor e do molde foram integradas ao longo do tempo de teste, permitindo a obtenção de curvas F.⁽²⁾

Diferentes níveis de fluido no distribuidor foram empregados nos ensaios. Estes níveis corresponderam aos seguintes volumes de água nos distribuidor: 200, 150 e 120 l (equivalentes a 40, 30 e 24 toneladas de aço no distribuidor, respectivamente). Todos os ensaios foram realizados com o emprego de um dique e uma barragem.

Em todos os testes, a vazão de fluido na alimentação do distribuidor foi mantida em 50 l/min, significando o lingotamento de placas de 1,8 m de largura com espessura de 0,24 m, a uma velocidade de 0,9 m/min.

Através destes experimentos, foram determinadas também as frações de volume morto, de mistura e de escoamento em pistão e as alturas das zonas de mistura no molde.⁽¹⁾ Estes parâmetros são utilizados no modelamento matemático de simulação da formação da placa de mistura.

É importante mencionar que trabalhos já apresentados na literatura técnica consultada⁽³⁾ trabalham com os modelos físicos do distribuidor e do molde

separadamente, e não conseguem reproduzir exatamente o que ocorre na prática industrial. No presente trabalho, estes modelos foram completamente integrados e são empregados simultaneamente.

2.2 Modelamento Matemático

Para o desenvolvimento do modelo matemático para avaliar a mistura de aços com qualidades diferentes durante uma seqüência de lingotamento contínuo, foi adotada uma metodologia semelhante à utilizada por Huang e Thomas.⁽⁴⁾ Isso pode ser justificado devido à grande semelhança entre o que foi proposto naquele trabalho e o que se pretende obter com o modelo elaborado na presente investigação. Além disso, o modelo de Huang e Thomas apresenta tempos de processamento bastante reduzidos, compatíveis com uma futura aplicação "on-line".

Para avaliar a mistura total, foram elaboradas duas sub-rotinas. A primeira analisa a mistura no distribuidor e a segunda avalia a mistura no molde.

2.2.1 Mistura no distribuidor

Para a modelagem matemática da mistura no distribuidor é necessário definir inicialmente as frações de volume existentes no distribuidor: o volume morto, o volume de escoamento pistão e o volume de mistura perfeita. Para isso serão utilizadas as seguintes equações:

$$V_m = (t_r - t_p) Q_{in} \quad (1)$$

$$V_p = t_p Q_{in} \quad (2)$$

$$V_d = V_T - t_r Q_{in} \quad (3)$$

$$V_T = V_m + V_p + V_d \quad (4)$$

onde Q_{in} é a vazão de entrada no distribuidor e V_T é o volume total do distribuidor.

Para resolver as equações acima, torna-se necessário saber o tempo de residência médio, t_r , e do tempo de escoamento em pistão, t_p . Esses tempos foram obtidos através dos experimentos utilizando os modelos físicos.

No momento da troca da panela de aço, o aço presente no distribuidor possui a composição química igual a da corrida anterior na seqüência de lingotamento. Uma fração de segundo após a abertura dessa outra panela, a composição química do aço começa a sofrer modificação em função da nova qualidade. Nesse momento inicia-se a mistura. O modelo avalia a variação da concentração em cada uma das regiões do distribuidor. Para facilitar os cálculos ligados a composição química do aço e comparação com os resultados dos modelos físicos, foi definida uma concentração adimensional avaliada por:

$$C \equiv \frac{F_{(t)} - F_{ant}}{F_{pos} - F_{ant}} \quad (5)$$

onde $F_{(t)}$ é a concentração de um determinado elemento no aço, F_{pos} e F_{ant} são as

concentrações do mesmo elemento na corrida posterior e anterior, respectivamente. Nos modelos físicos, estas concentrações correspondem às variações de concentração do traçador na saída do distribuidor e do molde.

2.2.2 Mistura no molde

O modelo de mistura no molde considera que a mistura neste equipamento ocorre predominantemente na sua parte superior, devido à intensa turbulência que caracteriza essa região.

A equação da variação da concentração que governa essa região é:

$$\frac{dC_{rs}}{dt} = \frac{Q_{rs}}{V_{rs}}(C_T - C_{rs}) \quad (6)$$

onde:

C_{rs} é o valor do adimensional de concentração nessa região;

Q_{rs} é a vazão de aço entrando nessa região;

V_{rs} é o volume dessa região;

C_T é o valor do adimensional de concentração saindo do distribuidor.

Na equação 6 é necessário calcular os valores de Q_{rs} e V_{rs} , que são obtidos a partir de

$$V_{rs} = L.E.Z_{rs} \quad (7)$$

onde:

L é a largura da placa;

E é a espessura da placa; e

Z_{rs} é o comprimento dessa região de mistura.

$$Q_r = L.E.v_c(t) \quad (8)$$

onde:

$v_c(t)$ é variação da velocidade de lingotamento com o tempo. No presente estudo, esta velocidade foi mantida constante.

Para uso da equação 7, é necessário definir empiricamente o valor de Z_{rs} . No presente trabalho, este valor foi obtido a partir dos ensaios nos modelos físicos.

2.2.3 Validação do Modelo Matemático

A validação do modelo matemático envolveu a comparação de suas previsões com os resultados obtidos a partir dos modelos físicos.

No futuro, esta validação do modelo vai incluir também a comparação de suas previsões com as de modelos para escoamento turbulento do aço no distribuidor e no molde de lingotamento contínuo. Estes modelos são mais completos, mas requerem a solução de complexas equações diferenciais, que consomem um tempo excessivamente elevado na sua solução, o que inviabiliza o seu uso "on-line". Esta comparação é interessante pois permite um entendimento mais profundo dos padrões de escoamento do fluido nos reatores envolvidos.

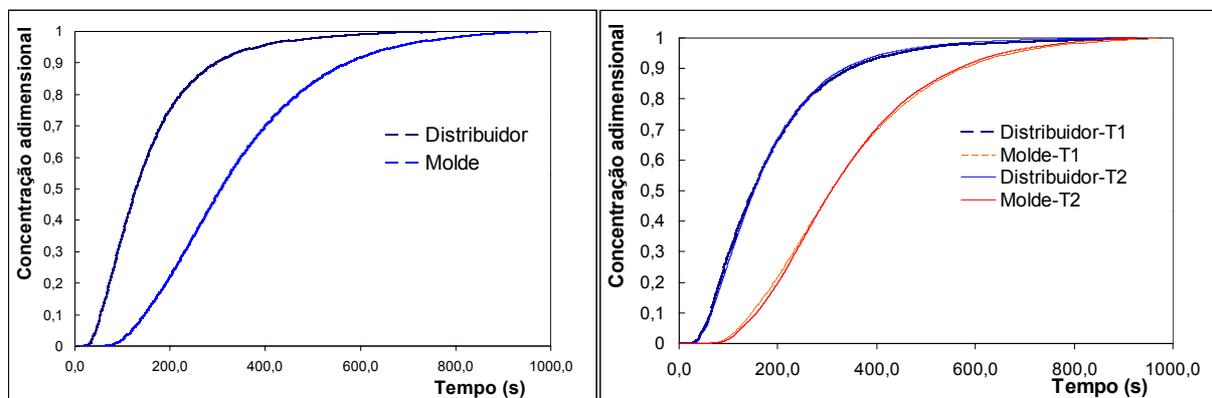
Com esta etapa de validação, espera-se calibrar o modelo matemático para previsão do comprimento da zona de mistura, buscando a obtenção de resultados compatíveis e confiáveis.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios com os modelos físicos, incluindo a avaliação do efeito do nível de fluido no distribuidor, as previsões e a validação do modelamento matemático.

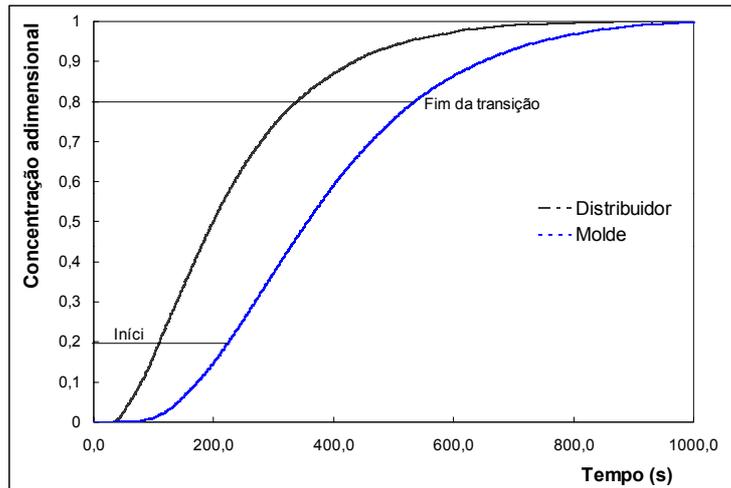
3.1 Modelamento Físico

A Figura 3 apresenta os resultados dos ensaios para estudo da formação da placa de mistura, para os níveis de 120, 150 e 200 litros de fluido no distribuidor. Para o nível de 150 l foram colocados resultados de 2 ensaios para comprovar a repetibilidade dos testes. A ordenada em todos os gráficos é a concentração adimensional definida na equação 5. Especificando-se como região de transição aquela compreendida entre as concentrações de 0,2 e 0,8, foram determinados os comprimentos de placa de mistura mostrados na Tabela 1. A Figura 3c ilustra o procedimento para esta avaliação. Para efeito de comparação, foram colocados os comprimentos que seriam obtidos considerando apenas a mistura no distribuidor. Nota-se que a previsão levando-se em consideração apenas o distribuidor subestima o comprimento da placa de mistura em cerca de 60 %.



a) 120 litros

b) 150 litros



c) 200 litros

Figura 3. Curvas de transição para os níveis de 120, 150 e 200 l de fluido no distribuidor.

Tabela 1. Comprimentos das placas de mistura para os diferentes níveis de fluido no distribuidor.

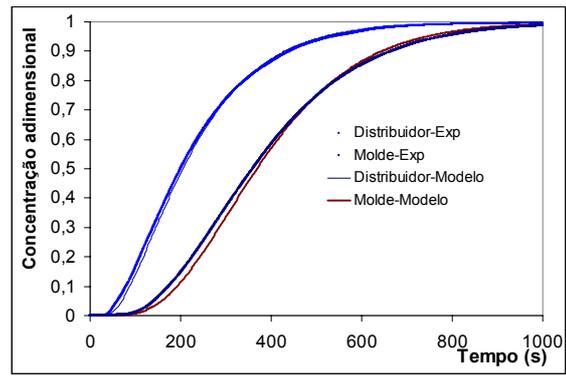
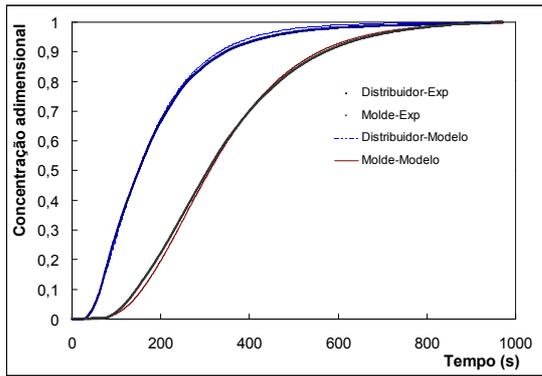
Nível de fluido no distribuidor (l)	Comprimento da placa de mistura (m)	
	Mistura no distribuidor apenas	Mistura no distribuidor e no molde
120	3,88	9,17
150	4,64	10,07
200	6,12	11,80

A Tabela 1 ilustra também o efeito positivo que a redução do nível de fluido no distribuidor traz em termos de redução do comprimento da placa de mistura. A redução do nível de 200 para 120 l permitiu uma diminuição neste comprimento em cerca de 22 %. É importante observar que os testes realizados ainda não contemplaram variações contínuas no nível de fluido no distribuidor, como é normalmente feito na indústria durante a troca de placas com aços de diferentes composições. Este tipo de procedimento será implementado futuramente, buscando reproduzir mais adequadamente o que ocorre na prática industrial.

3.2 Previsões e Validação do Modelo Matemático

A Figura 4 apresenta uma comparação entre as previsões do modelo matemático e os resultados obtidos nos experimentos com o modelo físico. Para realizar a simulação matemática, foram usadas as frações de volume pistonado e de mistura obtidos nos ensaios nos modelos físicos.

Observa-se uma boa concordância entre as previsões do modelo e os resultados experimentais. O efeito da solidificação, que não é considerado nos experimentos com os modelos físicos, será implementado através do modelo matemático, visando a obtenção de previsões mais realistas.



a) 120 l

b) 200 l

Figura 4. Comparação entre as curvas de transição experimentais e as previstas pelo modelo matemático.

4 SUMÁRIO E CONCLUSÃO

Através de modelos físicos de um distribuidor e de um molde de lingotamento contínuo de placas completamente integrados, foi possível realizar ensaios simulando a formação de placas de mistura. Experimentos com diferentes níveis de fluido no distribuidor mostraram o efeito benéfico na redução desse nível, possibilitando uma diminuição significativa no comprimento da placa de mistura. A desconsideração da mistura no molde pode levar a uma previsão de comprimento da placa de mistura até 60 % inferior à realidade.

O modelo matemático desenvolvido forneceu previsões de curvas de transição bem próximas das obtidas experimentalmente. O efeito da solidificação, difícil de ser analisado através de modelos físicos, será implementado no modelo matemático, buscando a obtenção de previsões mais realistas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq/PRONEX pelo apoio financeiro concedido ao projeto “Qualidade de Aços para Processos de Lingotamento Contínuo Convencional e Novas Tecnologias de Lingotamento”. Os autores agradecem também à CAPES, CNPq e à USIMINAS pelas bolsas mestrado e iniciação científica concedidas aos Engenheiros e estudantes de graduação, que participam do presente trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. SAHAI, Y.; EMI, T. Melt flow characterization in continuous casting tundishes. **ISIJ International**, v. 36, n. 6, p.667-672, 1996.
2. LEVENSPIEL, O. **Engenharia das reações químicas**. São Paulo: Edgard Blucher, 1974. v.2.
3. MCLEAN, A.; MCPHERSON, N.A. **Continuous casting – tundish to mold transfer operations**. Warrendale: Iron and Steel Society, 1992. v.6.
4. HUANG, X., THOMAS, B. G. Intermixing model of continuous casting during a grade transition. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v.27B, n.4, p.617-632, Aug. 1996.

INTEGRATED PHYSICAL MODELING OF CONTINUOUS CASTING SYSTEMS TO STUDY INTERMIXING DURING GRADE TRANSITION⁽¹⁾

*Carlos Eduardo Passagli Barral⁽²⁾
Bruno Leonardo da Silva Morato⁽³⁾
Alexandre de Freitas Gomes de Mendonça⁽³⁾
Bruno do Nascimento Teixeira⁽⁴⁾
Roberto Parreiras Tavares⁽⁵⁾*

Abstract

In the present work, a fully integrated system of physical models of a continuous casting system has been built. This system was used in the simulation of intermixing during grade change. The models were built in a 1:3 scale of an industrial plant. The operation of the models was completely automated, including control of flow rates and liquid levels in all the relevant regions. During the experiments, F curves were obtained for different levels of liquid in the tundish. It was shown that a reduction in this level leads to a significant reduction in the length of the intermixed slab. A mathematical model to simulate intermixing was developed. Its predictions were validated based on the results of the experiments with the physical models.

Key-words: continuous casting, physical modeling, mathematical modeling, intermixing, grade change.

(1) Paper to be presented at the XXXVI Steelmaking Seminar, May 16-18, 2005, Vitória – Espírito Santo

(2) Member of ABM, M.Sc. Student, Mining and Metallurgical Engineering, Federal University of Minas Gerais.

(3) Member of ABM, Metallurgical Engineer.

(4) Undergraduate Student, Control and Automation Engineering, Federal University of Minas Gerais.

(5) Member of ABM, Associate Professor, Materials and Metallurgical Engineering Department, Federal University of Minas Gerais.