

# AVALIAÇÃO DO COMPRIMENTO DA PLACA DE MISTURA NO LINGOTAMENTO CONTÍNUO ATRAVÉS DE MODELAGENS FÍSICA E MATEMÁTICA

*Amilton Carlos Pinheiro Cardoso Filho*<sup>1</sup>

*Flávio Ferreira Policarpo*<sup>1</sup>

*Harley Sânio Oliveira dos Santos*<sup>2</sup>

*Roberto Parreiras Tavares*<sup>3</sup>

## Resumo

Experimentos para avaliar a formação de placas de mistura em uma máquina de lingotamento contínuo de dois veios foram desenvolvidos utilizando modelos físicos do distribuidor e do molde. A operação destes dois equipamentos foi completamente automatizada, permitindo reproduzir exatamente o procedimento adotado na indústria durante as mudanças de tipos de aços no lingotamento seqüencial. Observou-se que a redução de nível mínimo de aço líquido no distribuidor foi a variável que causou a redução mais significativa no comprimento da placa de mistura. O tempo de permanência neste nível mínimo e a vazão de alimentação de aço no distribuidor, durante a recuperação do nível normal de trabalho, mostraram pouco efeito sobre o comprimento da placa de mistura. A não consideração da mistura que ocorre no molde, como feito na maioria das publicações anteriores, tende a subestimar o comprimento da placa de mistura. As previsões de comprimento da placa de mistura baseadas em um modelo matemático semelhante a um previamente apresentado na literatura apresentaram boa concordância com os resultados experimentais.

**Palavras-chave:** Modelamento físico; Modelamento matemático; Placa de mistura; Lingotamento contínuo; Modificador de fluxo.

## EVALUATION OF THE LENGTH OF THE INTERMIXED SLAB USING PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODELING

### Abstract

Using fully integrated and automated physical models of a tundish and a mould (strand) of a two-strand continuous slab caster, grade transitions experiments were performed. With this experimental setup, the procedure adopted in the industry during grade transition was rigorously reproduced. The effects of the minimum liquid level in the tundish, time kept at this minimum level and inlet flowrate into the tundish during level recovery on the intermixing length were determined. The positive effect of decreasing the liquid level in the tundish was demonstrated. It was also shown that predictions neglecting mixing in the mould tend to underestimate the intermixing length. The time kept at the minimum level showed a slight effect on the length of the intermixed slab. No clear effect of the inlet flowrate into the tundish during level recovery was identified in the range of flowrates tested. The predictions of a similar version of a previously developed mathematical model presented good agreement with the experimental results.

**Key words:** Mathematical modeling; Physical modeling; Grade transition; Continuous casting; Flow modifiers.

### I INTRODUÇÃO

Para conseguir obter altas produtividades e custos reduzidos, as empresas siderúrgicas procuram trabalhar com seqüenciais longos no lingotamento contínuo. Assim, torna-se muito freqüente a ocorrência de misturas de qualidade dentro de uma mesma seqüência de lingotamento. Quando isso ocorre, são geradas placas contendo diferentes qualidades de aço. A produção destas placas de mistura pode atingir volumes significativos, representando perdas importantes para as empresas.

Trabalhos anteriores<sup>(1-4)</sup> estudaram a formação da placa de mistura considerando apenas a mistura que ocorre no distribuidor. Esta abordagem é razoável quando se trata de lingotamento de tarugos, uma vez que as dimensões do molde são reduzidas. Entretanto, no lingotamento de placas, esta aproximação tende a subestimar significativamente o comprimento da placa de mistura, particularmente quando se reproduz a prática industrial de redução do nível do aço no distribuidor durante as trocas de qualidade dos aços sendo lingotados.

<sup>1</sup>Aluno do Curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica da UFMG. Rua Espírito Santo, 35 – Belo Horizonte, MG, 30160-030 – amiltonmetal@yahoo.com.br, flaviofp2000@yahoo.com.br

<sup>2</sup>Aluno do Curso de Graduação em Engenharia de Automação e Controle da UFMG. Rua Espírito Santo, 35 – Belo Horizonte, MG, 30160-030 – hsanio@gmail.com

<sup>3</sup>Sócio da ABM, Professor Associado do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da EEUFMG. Rua Espírito Santo, 35 – Belo Horizonte, MG, 30160-030 – rtavares@demet.ufmg.br

Neste trabalho foi feito um estudo sobre a formação da placa de mistura através de modelamento físico e matemático. Os modelos físicos do molde e do distribuidor foram construídos em escala 1:3 em relação a uma instalação industrial. A operação destes modelos foi completamente automatizada, permitindo reproduzir de forma bastante adequada à prática adotada na indústria durante a troca de placas contendo qualidades diferentes de aço.

Os efeitos de diferentes variáveis associadas ao procedimento adotado durante a transição foram investigados.

Um modelo matemático já apresentado na literatura<sup>(5)</sup> foi também utilizado para simular a transição entre diferentes qualidades de aço. Este modelo apresenta a característica de fornecer respostas rápidas e poder ser usado na prática industrial para determinação do comprimento da placa de mistura.

## 2 OBJETIVOS

Os objetivos do presente trabalho são:

- simular física e matematicamente a formação da placa de mistura no lingotamento contínuo; e
- avaliar os efeitos das condições de transição sobre o comprimento da placa de mistura.

## 3 METODOLOGIA

O trabalho foi desenvolvido em duas etapas:

- modelamento físico da transição entre diferentes tipos de aços durante o lingotamento contínuo seqüencial; e
- modelamento matemático da formação da placa de mistura.

O desenvolvimento destas etapas é descrito a seguir.

### 3.1 Modelamento Físico

Inicialmente será feita uma descrição do aparato experimental utilizado nos testes. Em seguida, a metodologia adotada no desenvolvimento dos experimentos será apresentada.

#### 3.1.1 Aparato experimental

A parte experimental desse trabalho constou da realização de experimentos utilizando modelos físicos de um distribuidor e de um molde, construídos no Laboratório de Simulação de Processos do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG. Estes modelos foram integrados e sua operação completamente automatizada. Os modelos físicos foram construídos em escala 1:3 em relação a uma instalação de lingotamento de placas com dois veios. As suas principais dimensões estão listadas na Tabela 1.

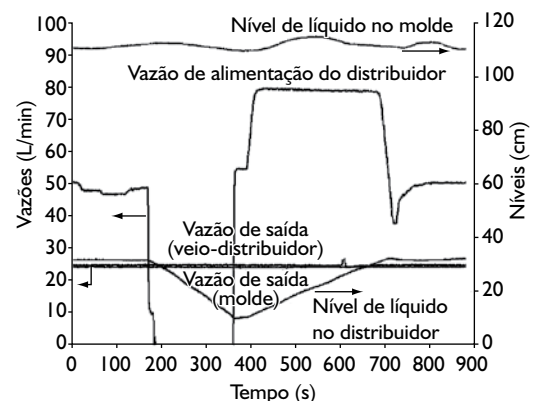
O sistema de automação foi fundamental para possibilitar a reprodução do procedimento usualmente adotado nas indústrias durante a transição entre diferentes tipos de aço sendo lingotados em seqüência.

**Tabela 1.** Principais dimensões dos modelos físicos usados nos ensaios.

Dimensões	Comprimento (m)		Largura (m)		Altura (m)
	Superior	Inferior	Superior	Inferior	
Distribuidor	2,76	2,60	0,33	0,155	0,39
Molde	Comprimento (m)		Largura (m)		Espessura (m)
	1,12		0,4 – 0,5 – 0,6		

### 3.1.2 Simulação da formação da placa de mistura

Para simulação da formação da placa de mistura foram usadas água natural e água contendo uma pequena concentração de sal. Inicialmente, a operação do distribuidor e do molde foi estabilizada usando apenas água natural. Em um dado instante, a alimentação do distribuidor foi interrompida, simulando o início da troca de placa. A vazão de saída de fluido do distribuidor para o molde foi mantida constante em 50 L/min (25 L/min em cada veio). Estas vazões correspondem às vazões usadas na indústria, usando o critério de similaridade baseado na igualdade do número de Froude.<sup>(6)</sup> Com este procedimento, o nível de fluido no distribuidor caiu até um nível preestabelecido. Quando este nível foi alcançado, a alimentação do distribuidor foi reiniciada, mas desta vez usando água com sal. Inicialmente a vazão foi igual à soma das vazões dos veios. Isto permitiu manter o nível no distribuidor constante e igual ao valor mínimo usado no teste. Este nível permaneceu constante durante um dado tempo. Transcorrido este período, a vazão de alimentação foi elevada, permitindo a recuperação do nível normal de trabalho do distribuidor. Quando este nível foi alcançado, a vazão de alimentação foi novamente alterada para o valor normal de trabalho. A Figura 1 apresenta gráficos ilustrando estas variações durante um dos ensaios.



**Figura 1.** Variações de vazão e níveis no molde e no distribuidor durante um dos ensaios.

Para acompanhar a transição, a condutividade elétrica da água foi monitorada nas saídas do distribuidor e do molde durante todo o ensaio. A partir de uma curva de calibração, foi possível transformar os dados de condutividade elétrica em concentração de sal. A variação de concentração de sal em função do tempo simula a variação de concentração dos solutos presentes no aço durante uma transição entre diferentes tipos de aços sendo lingotados seqüencialmente. As curvas de variação de concentração obtidas nestas condições são denominadas curvas F.<sup>(7)</sup>

No presente trabalho, as variáveis de transição analisadas foram:

- nível mínimo de líquido no distribuidor durante a transição: 7 cm, 11 cm, 15 cm e 22 cm;
- tempo de permanência no nível mínimo: 30 s, 60 s e 120 s;
- vazão de líquido durante a recuperação do nível normal de trabalho no distribuidor: 65 L/min, 70 L/min e 80 L/min.

Todos os testes foram realizados em triplicata.

É importante mencionar que trabalhos já apresentados na literatura técnica consultada<sup>(1-4)</sup> 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 integrados.

### 3.2 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.<sup>(5)</sup> 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*.

No modelo proposto por Huang e Thomas,<sup>(5)</sup> o distribuidor é dividido em volumes de escoamento pistonado, de mistura e morto. Através de balanços de massa para os elementos envolvidos na transição, são propostas equações diferenciais representando as variações de concentração destes elementos na saída do distribuidor em função do tempo. Já o molde é considerado como sendo composto de duas regiões de mistura, uma superior e uma inferior. Novamente equações diferenciais expressando as variações de concentração ao longo do tempo são obtidas a partir de balanços de massa. A concentração de solutos na entrada do molde é obtida do modelo de mistura no distribuidor.

Para avaliar a mistura total, foram elaboradas pelos presentes autores duas sub-rotinas. A primeira analisa a mistura no distribuidor e a segunda avalia a mistura no molde. Os detalhes do equacionamento do modelo matemático são apresentados por Huang e Thomas<sup>(5)</sup> e não são reproduzidos aqui.

#### 3.2.1 Validação do modelo matemático

A validação do modelo matemático envolveu a comparação de suas previsões com os resultados obtidos a partir dos modelos físicos. Com esta etapa de validação, foi possível calibrar o modelo matemático para previsão do comprimento da zona de mistura, com a obtenção de resultados compatíveis e confiáveis. Huang e Thomas<sup>(5)</sup> validaram o seu modelo obtendo dados de um modelo físico de um distribuidor operando com nível constante. No presente trabalho, este modelo foi validado considerando níveis de aço variáveis no distribuidor, como acontece na indústria.

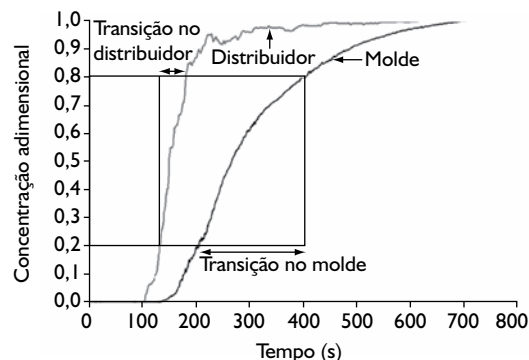
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para avaliar a formação da placa de mistura, foi definida uma concentração adimensional,  $C^*$ , expressa por:<sup>(2,5)</sup>

$$C^* \equiv \frac{C_{(t)} - C_{ant}}{C_{pos} - C_{ant}} \quad (1)$$

onde  $C_{(t)}$  é a concentração de um determinado elemento no aço,  $C_{pos}$  e  $C_{ant}$  são as concentrações do mesmo elemento na corrida posterior e anterior, respectivamente. Nos modelos físicos, estas concentrações são de traçador na saída do distribuidor e do molde.

A Figura 2 mostra um exemplo de curvas de transição ilustrando o critério que foi usado neste trabalho para avaliar o tempo de transição entre qualidades de aço e o comprimento da placa de mistura. Foi considerado que o tempo de transição corresponde ao intervalo transcorrido entre as concentrações adimensionais (definidas pela equação 1) na faixa entre 0,2 a 0,8. Este intervalo é sempre menor quando avaliado usando apenas a variação de concentração na saída do distribuidor. Neste caso, apenas a mistura de qualidades que ocorre no distribuidor é considerada. Quando se avalia este intervalo usando os dados na saída do molde, a mistura que ocorre tanto no distribuidor quanto no molde é considerada. Esse segundo valor se aproxima mais do resultado real obtido na máquina de lingotamento industrial. Nos resultados que serão apresentados a seguir, os valores de tempo de transição para o distribuidor e o molde serão considerados.



**Figura 2.** Exemplo de curvas de transição para formação de placa de mistura, identificando os tempos de transição no molde e no distribuidor.

O comprimento da placa de mistura na máquina industrial é estimado pela seguinte relação:

$$L_M \equiv \frac{Q}{A} \cdot t_{trans} \cdot \frac{1}{\lambda} \quad (2)$$

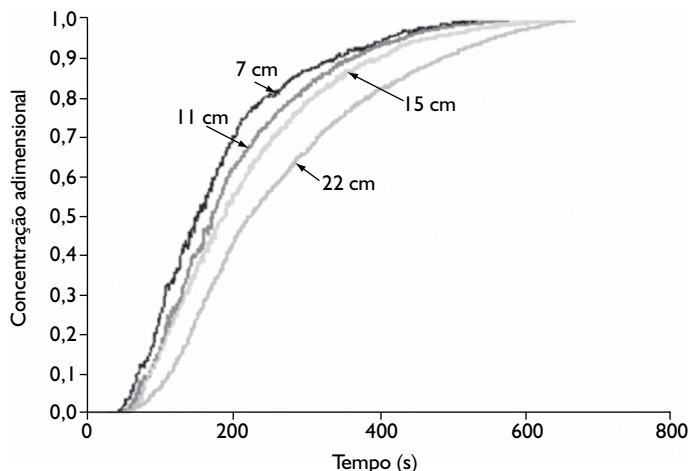
onde LM é o comprimento da placa de mistura, Q é a vazão de saída de material do molde, A é a área da seção transversal do modelo físico do molde,  $t_{trans}$  é o tempo de transição avaliado no modelo físico e  $\lambda$  é o fator de escala (no presente trabalho  $\lambda = 1/3$ ). Esta equação relaciona os comprimentos de mistura no modelo físico ( $Q.t_{trans}/A$ ) com o industrial (LM).

A seguir, os efeitos das diferentes variáveis investigadas serão apresentados e discutidos.

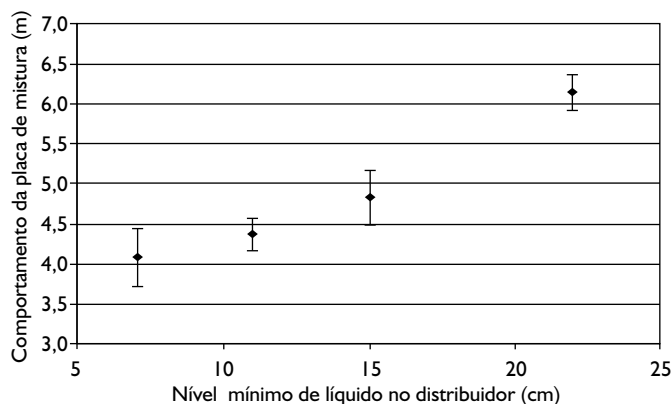
#### 4.1 Efeito do Nível Mínimo no Distribuidor

Quatro níveis mínimos de fluido no distribuidor foram testados: 7 cm, 11 cm, 15 cm e 22 cm. A Figura 3 apresenta curvas de transição para o molde obtidas para estes diferentes níveis. Em todos estes ensaios, a vazão de recuperação foi de 80 L/min e o tempo de permanência no nível mínimo foi de 30 s.

A partir dos tempos de transição determinados na Figura 3, foram estimados os comprimentos de placa de mistura através da Equação 2. Os resultados são apresentados na Figura 4. As barras de erro correspondem ao desvio padrão dos resultados. Observa-se que a redução no nível mínimo de fluido no distribuidor provoca uma diminuição no comprimento da placa de mistura. Este efeito tende a se tornar menos significativo quando as alturas mínimas se tornam menores.



**Figura 3.** Curvas de transição para o molde para diferentes níveis mínimos de fluido no distribuidor.



**Figura 4.** Efeito do nível mínimo de líquido no distribuidor sobre o comprimento da placa de mistura.

#### 4.2 Efeitos do Tempo de Permanência no Nível Mínimo e da Vazão de Recuperação

O tempo de permanência no nível mínimo e a vazão de alimentação do distribuidor durante o período de recuperação do nível normal de trabalho não apresentaram efeitos significativos sobre o comprimento da placa de mistura. Em relação ao tempo no nível mínimo, apesar da ligeira tendência de redução no comprimento da placa de mistura quando se aumenta este tempo, não há base estatística (segundo resultados de testes de hipótese) para afirmar que as médias obtidas para cada tempo de permanência sejam diferentes, considerando um grau de confiança de 90%. Quanto ao efeito da vazão de recuperação durante o enchimento do distribuidor, novamente, uma análise estatística dos resultados não indica efeito significativo desta variável. Deve-se, entretanto, mencionar que a vazão máxima de 80 L/min foi limitada pelo aparato experimental utilizado nos ensaios. Se vazões mais elevadas pudessem ser alcançadas, talvez algum efeito mais relevante fosse observado.

#### 4.3 Efeito da Mistura no Molde

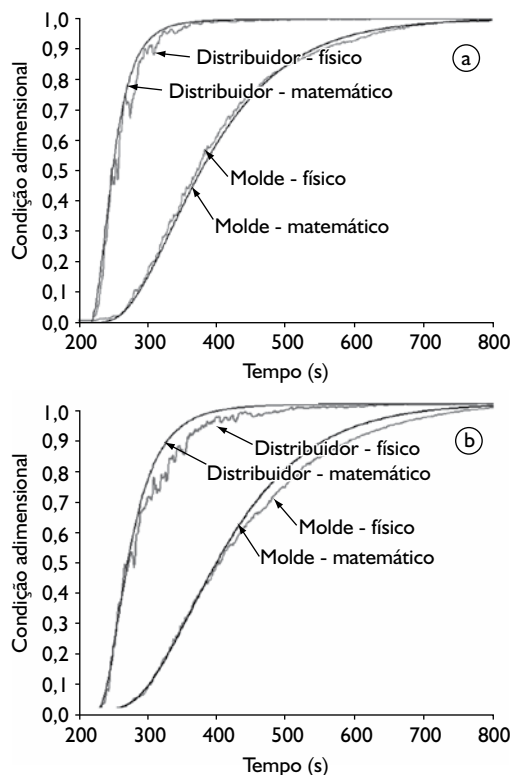
A Tabela 2 apresenta a contribuição da mistura no molde na determinação do comprimento da placa de mistura. Nota-se que, em todos os níveis mínimos de líquido no distribuidor, a mistura no molde tem papel mais significativo, particularmente para os níveis mínimos mais baixos. Isso demonstra que a mistura no molde não deve ser desconsiderada quando se estuda a formação de placas de mistura. Para se alcançar reduções nos comprimentos das placas de mistura, deve-se também investigar as variáveis que afetam o escoamento no molde, tais como configuração e profundidade da válvula submersa e velocidade de lingotamento. Estas variáveis serão objeto de futuros trabalhos.

**Tabela 2.** Contribuição da mistura no molde no comprimento da placa de mistura.

Nível mínimo de líquido no distribuidor (cm)	Contribuição relativa da mistura no molde no comprimento da placa de mistura (%)
7	86,0
11	73,0
15	72,5
22	63,6

#### 4.4 Modelamento Matemático

A Figura 5 mostra as previsões do modelo matemático, juntamente com os resultados experimentais correspondentes, para uma vazão de recuperação de 80 L/min e tempo de permanência no volume mínimo de 30 s.



**Figura 5.** Comparação entre as previsões do modelo matemático e os resultados experimentais. Níveis mínimos no distribuidor: 11 cm e 15 cm. a) nível mínimo: 11 cm; e b) nível mínimo: 15 cm.

A boa concordância entre as previsões do modelo e os resultados experimentais foi obtida adotando frações de volume pistonado e de mistura iguais a 0,3 e 0,6, respectivamente. No molde, considerou-se que as duas zonas de mistura tinham comprimentos de 0,6 m e 0,52 m. Com estes dados, foi possível reproduzir os resultados obtidos nos diversos experimentos. Desta forma, pode-se afirmar que o modelo matemático proposto por Huang e Thomas<sup>(5)</sup>, e adotado neste trabalho, é uma ferramenta útil para simulação da transição entre diferentes tipos de aço no lingotamento contínuo.

## REFERÊNCIAS

- 1 YEH, J.-L.; HWANG, W.-S.; CHOU, C.-L. The development of a mathematical model to predict composition distribution in casting slab and intermix slab length during ladle changeover period and its verification by physical model. **ISIJ International**, v. 33, n. 5, p. 588-94, May 1996.
- 2 CHO, M.J.; KIM, I.C.. Simple tundish mixing model of continuous casting during a grade transition. **ISIJ International**, v. 46, p. 1416-20, Oct. 2006.
- 3 SESHADRI, V.; SILVA, C.A.; SILVA, I.A.. Physical modeling simulations of refining processes in Brazilian steel industry. **Scandinavian Journal of Metallurgy**, v. 34, n. 6, p. 340-52, Dec. 2005.
- 4 MAZUMDAR, D.; GUTHRIE, R.I.L. The physical and mathematical modelling of continuous casting tundish systems. **ISIJ International**, v. 39, n. 6, p. 524-47, Jun. 1999.
- 5 HUANG, X.; THOMAS, B.G. Intermixing model of continuous casting during a grade transition. **Metallurgical Transactions B**, v. 27B, n. 3, p. 617-32, Aug. 1996.
- 6 SAHAI, Y.; emi, t. Melt flow characterization in continuous casting tundishes. **ISIJ International**, v. 36, n. 6, p. 667-72, Jun. 1996.
- 7 LEVENSPIEL, O. **Engenharia das reações químicas**. São Paulo: Edgard Blucher, 1974. v. 2.

Recebido em: 30/11/07

Aceito em: 30/06/08

Proveniente de: SEMINÁRIO DE ACIARIA - INTERNACIONAL, 38., 2007, Belo Horizonte, MG. São Paulo: ABM, 2007.

## 5 SUMÁRIO E CONCLUSÕES

A formação da placa de mistura no lingotamento seqüencial de diferentes qualidades de aço foi estudada através de modelamentos físico e matemático. Os modelos físicos do distribuidor e do molde, construídos em escala 1:3 em relação a uma unidade industrial, foram operados de forma automatizada, permitindo a simulação da prática adotada na indústria durante as trocas de panela contendo aços de diferentes qualidades. Observou-se que a redução do nível mínimo de aço líquido no distribuidor durante a transição foi a variável que causou a redução mais significativa no comprimento da placa de mistura. O aumento no tempo de permanência no nível mínimo provocou uma ligeira redução no comprimento da placa de mistura. Não foi identificado nenhum efeito relevante da vazão de recuperação nas faixas de valores usados nos experimentos. Foi constatado que a mistura no molde tem papel importante na determinação do comprimento da placa de mistura e não pode ser desconsiderada, quando se deseja fazer previsões realistas deste comprimento. Variáveis associadas à mistura no molde serão objeto de futuras investigações.

Os resultados das simulações matemáticas com o modelo de transição apresentaram boa concordância com os dados experimentais obtidos nos modelos físicos.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro concedido ao projeto "Modelamento Matemático e Físico da Zona de Mistura no Lingotamento Contínuo", Processo 471019/2004-6. Os autores agradecem também ao CNPq e à USIMINAS pelas bolsas de iniciação científica concedidas aos estudantes de graduação, que participam do presente trabalho.