

MODELAMENTO FÍSICO E MATEMÁTICO DA FORMAÇÃO DA PLACA DE MISTURA NO LINGOTAMENTO CONTÍNUO¹

*Amilton Carlos Pinheiro Cardoso Filho*²

*Flávio Ferreira Policarpo*²

*Harley Sânio Oliveira dos Santos*³

*Roberto Parreiras Tavares*⁴

Resumo

A produção de aço vem crescendo e se diversificando ao longo dos últimos anos. Para atender aos diversos segmentos do mercado, as empresas trabalham com diversas qualidades e dimensões dos produtos. Desta forma, a produção de aços é bastante diversificada. Para conseguir obter altas produtividades e custos reduzidos, deve-se procurar trabalhar com seqüências longas. Assim, torna-se muito freqüente a ocorrência de misturas/trocas de qualidade dentro de uma mesma seqüência de lingotamento, sem que haja troca de distribuidor. Quando isso ocorre, são geradas placas contendo diferentes qualidades de aço. Estas placas são denominadas placas de mistura. A produção deste tipo de placas pode atingir volumes significativos, representando perdas importantes para as empresas. Neste trabalho foi feito um estudo sobre a formação da placa de mistura através de modelamentos físico e matemático. Os modelos físicos do molde e do distribuidor foram construídos em escala 1:3 em relação à instalação industrial. A operação destes modelos foi completamente automatizada, permitindo reproduzir de forma bastante adequada a prática adotada na indústria durante a troca de placas contendo qualidades diferentes de aço. 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. Estes resultados apresentaram boa concordância com a previsão das simulações matemáticas.

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

MATHEMATICAL AND PHYSICAL MODELING OF GRADE TRANSITION IN CONTINUOUS CASTING

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 by as much as 70 %, depending on the liquid level in the tundish. 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: Grade transition; Mathematical modeling; Physical modeling; Tundish; Mold

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

² *Aluno do Curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica da UFMG*

³ *Aluno do Curso de Graduação em Engenharia de Automação e Controle da UFMG*

⁴ *Sócio da ABM, Professor Associado do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da EEUFMG.*

1 INTRODUÇÃO

A produção de aço vem crescendo e se diversificando ao longo dos últimos anos. Para atender aos diversos segmentos do mercado, as empresas trabalham com diversas qualidades e dimensões dos produtos. Desta forma, a produção de aços é bastante diversificada. Para conseguir obter altas produtividades e custos reduzidos, deve-se procurar trabalhar com seqüenciais longos. Assim, torna-se muito freqüente a ocorrência de misturas/trocas de qualidade dentro de uma mesma seqüência de lingotamento, sem que haja troca de distribuidor. Quando isso ocorre, são geradas placas contendo diferentes qualidades de aço. Estas placas são denominadas placas de mistura. A produção deste tipo de placas pode atingir volumes significativos, representando perdas importantes para as empresas.

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 à instalação industrial. A operação destes modelos foi completamente automatizada, permitindo reproduzir de forma bastante adequada a 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. Foi também aplicado um modelo matemático para simular a transição entre diferentes qualidades de aço.

2 OBJETIVOS

Os objetivos do presente trabalhos são:

- simular física e matematicamente a formação da placa de mistura no lingotamento contínuo;
- 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;
- 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.

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			0,39
Molde	Comprimento (m)		Largura (m)		Espessura (m)
	1,12		0,4 – 0,5 – 0,6		0,08

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.

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 panela. 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.⁽¹⁾ 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. Todas estas variações de vazão e nível no distribuidor e no molde foram registradas em intervalos de 1 s. A Figura 1 apresenta gráficos ilustrando estas variações 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.⁽²⁾

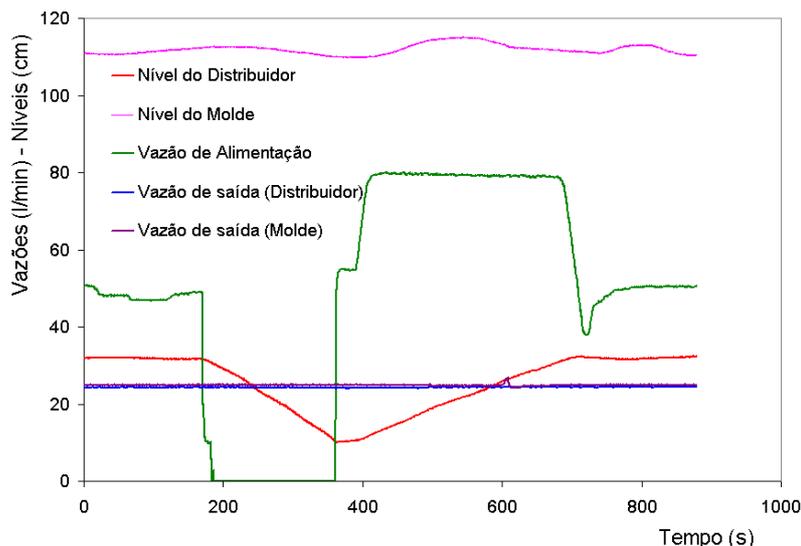


Figura 1- Variações de vazão e níveis no molde e no distribuidor durante um dos ensaios.

No presente trabalho, as variáveis de transição que foram analisadas foram:

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

Todos os testes foram realizados em triplicata.

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 integrados e a sua operação completamente automatizada.

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.⁽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.

3.2.1 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 foram 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, é necessário saber o tempo de residência médio, t_r , e o tempo de escoamento em pistão, t_p . Esses tempos foram obtidos através dos experimentos com 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 à 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.

3.2.2 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.

$$Q_{r,s} = L.E.v_c(t) \quad (8)$$

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.

3.2.3 Validação do modelo matemático

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

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.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 mostra um exemplo de curvas de transição obtidas na saída do distribuidor e do molde, para uma altura mínima de fluido no distribuidor igual a 15 cm, vazão de recuperação de 80 l/min e tempo de permanência no nível mínimo de 30 s. Nesta figura está indicado também 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 5) 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.

A seguir, os efeitos das diferentes variáveis investigadas no presente trabalho serão apresentados e discutidos.

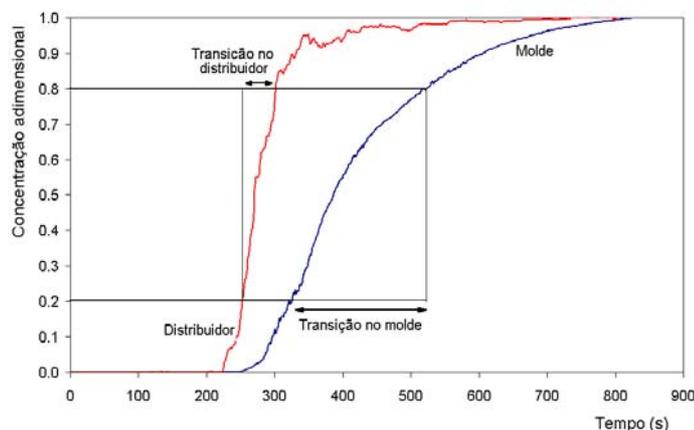


Figura 2- Exemplo de curvas de transição para formação de placa de mistura, identificando os tempos de transição no molde e no distribuidor.

3.1 Efeito do Nível Mínimo no Distribuidor

Quatro níveis mínimos de fluido no distribuidor foram testados: 7, 11, 15 e 22 cm. As Figuras 3 e 4 apresentam curvas de transição para o distribuidor e 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 nas figuras acima, foram estimados os comprimentos de placa de mistura, considerando a vazão de fluido na saída do distribuidor e a escala empregada na confecção dos modelos físicos. Dois comprimentos foram estimados, um considerando a mistura no distribuidor e no molde, e o outro considerando apenas a mistura no distribuidor. Desta forma, é possível ter uma estimativa da contribuição relativa da mistura nestes dois reatores. Os resultados desta avaliação são apresentados na figura 5. 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. A diferença entre as curvas para o molde e o distribuidor representa a contribuição da mistura que ocorre no molde.

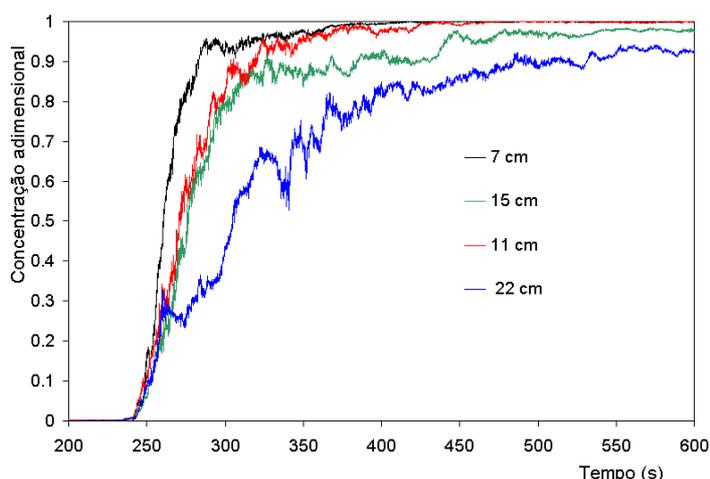


Figura 3- Curvas de transição para o distribuidor para diferentes níveis mínimo de fluido no distribuidor.

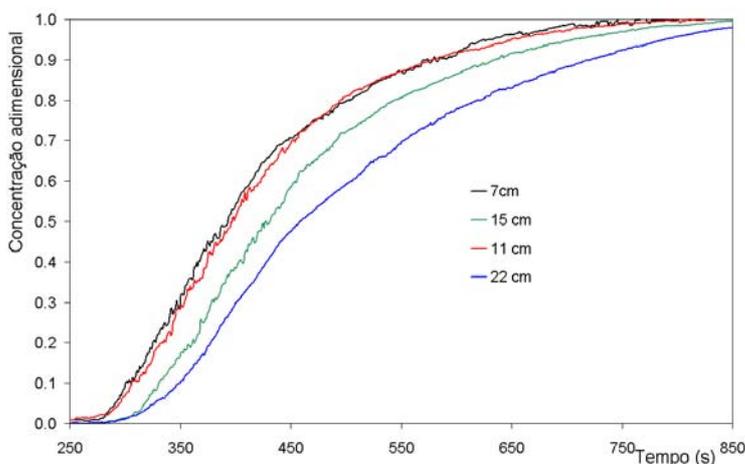


Figura 4- Curvas de transição para o molde para diferentes níveis mínimo de fluido no distribuidor.

3.2 Efeito do Tempo de Permanência no Nível Mínimo

O efeito do tempo de permanência no nível mínimo é mostrado na figura 6. Apesar da ligeira tendência de redução no comprimento da placa de mistura quando se aumenta o tempo de permanência no nível mínimo, particularmente para os níveis mais elevados, não há base estatística para afirmar que as médias obtidas para cada tempo de permanência sejam diferentes, considerando um grau de confiança de 90 %.

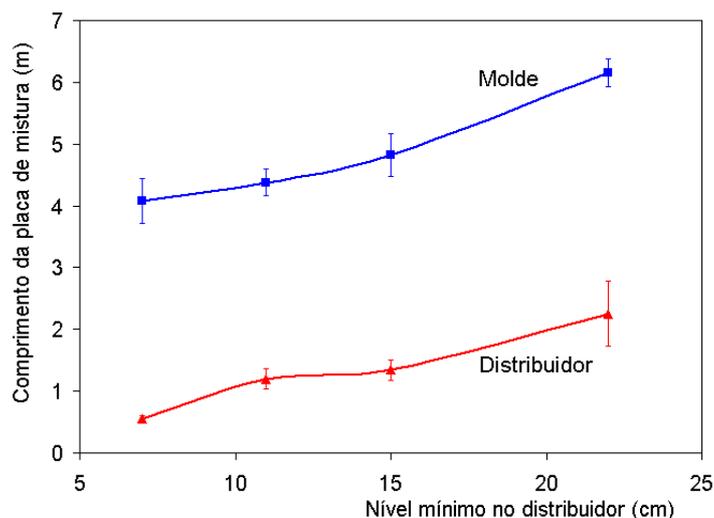


Figura 5- Efeito do nível mínimo de fluido no distribuidor sobre o comprimento da placa de mistura, considerando mistura no molde e no distribuidor.

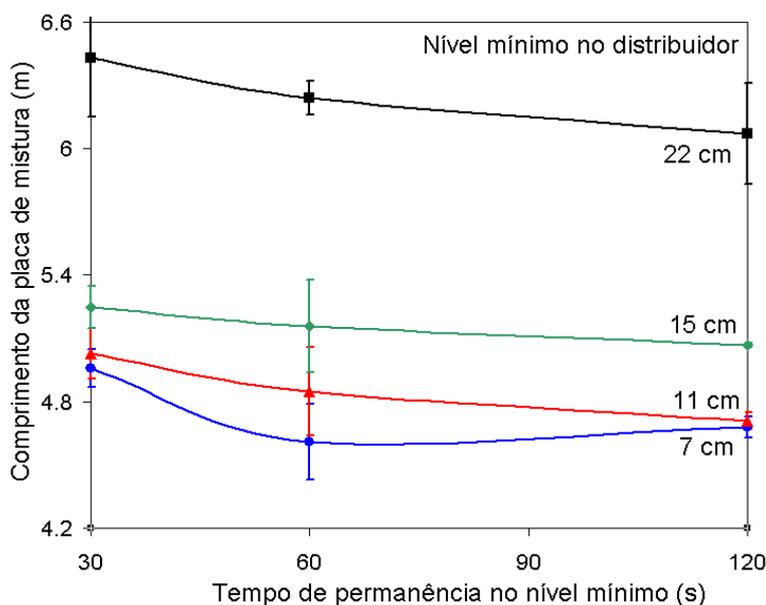


Figura 6- Efeito do tempo de permanência no nível mínimo de fluido no distribuidor sobre o comprimento da placa de mistura.

3.3 Efeito da Vazão de Recuperação

O efeito da vazão de recuperação durante o enchimento do distribuidor é mostrado na Figura 7. Nenhuma tendência clara foi identificada em relação a este efeito.

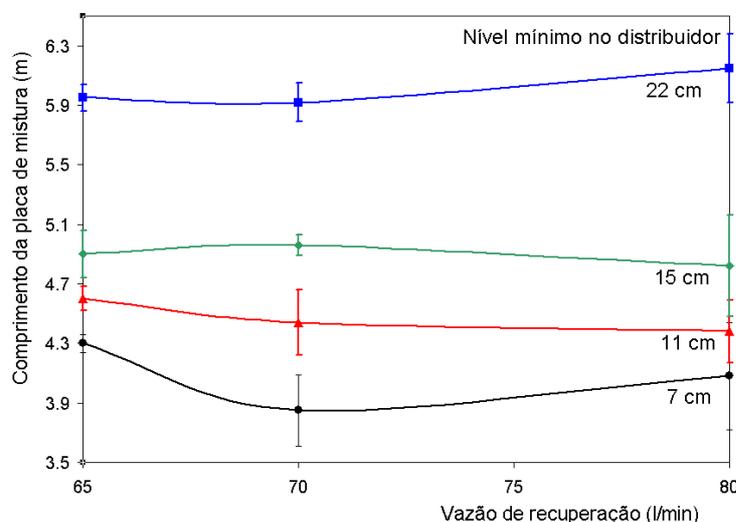
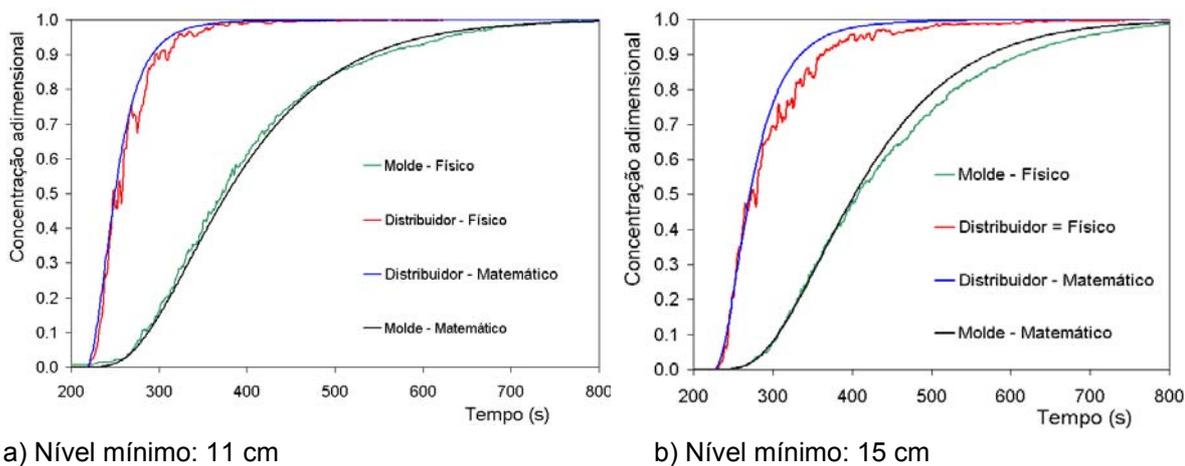


Figura 7- Efeito da vazão de recuperação sobre o comprimento da placa de mistura

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 pudesse ser observado.

3.3 Modelamento Matemático

A Figura 8 mostra previsões obtidas com o modelo matemático para a transição, juntamente com os resultados experimentais correspondentes, obtidos com os modelos físicos.



a) Nível mínimo: 11 cm

b) Nível mínimo: 15 cm

Figura 8- Comparação entre as previsões do modelo matemático para a transição e os resultados experimentais. Vazão de recuperação: 80 l/min. Tempo de permanência no volume mínimo: 30 s. Níveis mínimos no distribuidor: 11 e 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 e 0,52 m. Com estes dados, foi possível reproduzir os resultados obtidos nos diversos experimentos. Desta forma, pode-se afirmar que o modelo apresentado é uma ferramenta útil para simulação da transição entre diferentes tipos de aço no lingotamento contínuo.

4 CONCLUSÕES

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 à instalação industrial. A operação destes modelos foi completamente automatizada, permitindo reproduzir de forma bastante adequada a prática adotada na indústria durante a troca de placas contendo qualidades diferentes de aço. 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.

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 47.1019/2004-6. Os autores agradecem também ao CNPq e à USIMINAS pelas bolsas de iniciação científica concedidas aos estudantes de graduação, que participam do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 SAHAI, Y.; EMI, T. Melt Flow Characterization in Continuous Casting Tundishes. ISIJ International, vol. 36, N° 6, 1996.
- 2 Levenspiel, O. Engenharia das Reações Químicas. Vol. 2. Editora Edgard Blucher Ltda., 1974, 480 p.
- 3 McLean, A.; McPherson, N.A. Continuous Casting – Tundish to Mold Transfer Operations, Volume 6, Iron and Steel Society, Warrendale, 1992.
- 4 HUANG, X., THOMAS, B. G. Intermixing model of continuous casting during a grade transition. Metallurgical Transactions B, v.27B, p.617-632, August, 1996.