

MODELAGEM MATEMÁTICA DA TRANSIÇÃO DE GRAUS DE AÇO NO LINGOTAMENTO CONTÍNUO DA USIMINAS⁽¹⁾

Afrânio Márcio Costa⁽²⁾
Fabiano Almir Barbosa⁽³⁾
Roberto Parreiras Tavares⁽⁴⁾

RESUMO

Durante uma seqüência de lingotamento contínuo, aços com composições químicas diferentes são produzidos com freqüência, o que origina placas de mistura. Na Usiminas, as placas de mistura representam aproximadamente 4% da produção total.

Neste trabalho foi desenvolvido um modelo matemático para simular a mistura que ocorre no distribuidor e na parte superior do veio do lingotamento. Baseando neste modelo, pode-se, então, prever o comprimento da placa de mistura gerada.

A aplicação deste modelo mostrou que é possível prever o comprimento de mistura em função das diversas variáveis de processo. Além disso, comparou-se o projeto de distribuidor atual da Usiminas com um novo projeto visando avaliar os efeitos na mistura.

Palavras-chave: lingotamento contínuo, modelo matemático, transição de graus.

(1) Contribuição Técnica ao XXXV Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais - ABM, 17 a 19 de maio de 2004, Salvador, BA.

(2) Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, M.Sc.; Departamento de Aciaria da Usiminas; Ipatinga, MG.

(3) Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, M.Sc.; Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG.

(4) Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da EEUFMG; Belo Horizonte, MG.

1 INTRODUÇÃO

No processo de produção do aço, a etapa de lingotamento contínuo foi introduzida para promover ganhos de qualidade e de produtividade na Aciaria, tornando possível o lingotamento de uma série de corridas em uma mesma seqüência. Devido ao mix de produtos da Usiminas, torna-se necessário, muitas vezes, realizar o lingotamento de aços com diferentes composições químicas, caracterizando o fenômeno de mistura no lingotamento contínuo.

Com uma produção mensal de 400.000 toneladas, as placas de mistura representam uma perda de rendimento de 4% na Usiminas. Com o propósito de reduzir o descarte destas placas, elaborou-se um modelo matemático para prever o comprimento das placas de mistura geradas durante uma transição de graus de aço.

Foram publicados diversos trabalhos⁽¹⁻⁴⁾ sobre a modelagem dos fenômenos físicos presentes nas transições de graus de aço no lingotamento contínuo. Neste estudo, optou-se pela modelagem da mistura no distribuidor e na parte superior do veio, permitindo estudar as principais variáveis que afetam o comprimento de mistura gerada durante o lingotamento de aços com composições químicas diferentes.

2 METODOLOGIA

O modelo matemático desenvolvido para representar o comportamento dos fenômenos físicos presentes em uma mistura de aços adotou uma metodologia similar à empregada por Thomas⁽¹⁾, sendo avaliada a influência da vazão de lingotamento e da taxa de enchimento do distribuidor no comprimento da placa de mistura. Este modelo foi dividido em duas partes:

- modelo de mistura no distribuidor;
- modelo de mistura no veio.

A modelagem do veio foi realizada apenas nas regiões superiores da máquina de lingotamento contínuo, correspondendo a região do molde e a região vertical abaixo do molde, o que permitiu desprezar os efeitos da solidificação na mistura, uma vez que a camada solidificada nesta região é pequena.

Como a mistura é influenciada pelo tempo de residência, fração de volume pistonado, volume misto e volume morto, que são os parâmetros ligados à geometria do distribuidor, comparou-se dois diferentes projetos sendo o primeiro igual ao projeto atual e o segundo um projeto novo⁽⁵⁾, figura 1.

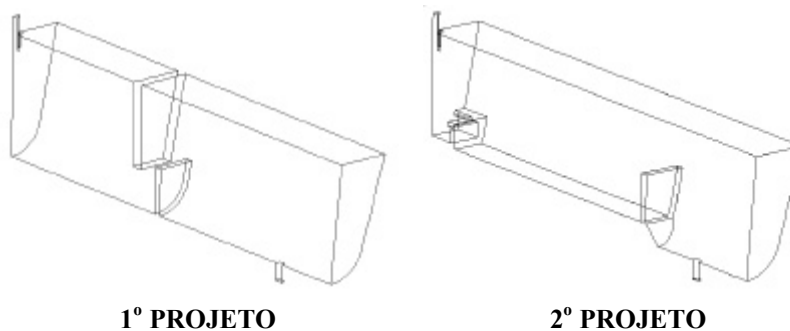


Figura 1 - Desenho esquemático, ¼ de simetria, dos projetos de distribuidor simulados.

Para ajustar o modelo matemático foi necessário realizar simulações em modelo físico. Estas simulações mostraram que os parâmetros de escoamento, fração de volume morto, volume pistonado e volume misto, variam à medida que o volume de aço no distribuidor é alterado. As simulações foram realizadas no estado estacionário mantendo-se constantes a vazão e o número de experimentos em cada caso. Variou-se apenas o volume de aço presente no distribuidor, isto é, o nível de enchimento do distribuidor. Com os resultados encontrados, foi possível obter relações entre as frações de volume e a massa de aço no distribuidor. Estas equações foram utilizadas como dados de entrada do modelo matemático.

2.1 Modelo de Mistura no Distribuidor

O modelo de mistura no distribuidor foi dividido em duas regiões conforme figura 2. Em cada uma destas regiões realizaram-se balanços de massa, utilizando a equação:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{Q}{V}(C_2 - C_1) \quad (1)$$

onde:

$\frac{dC}{dt}$: variação da concentração normalizada com o tempo [s^{-1}];

Q: vazão de aço da região [mm^3/s];

V: volume da região [mm^3];

C_1 : concentração normalizada entrando na região [adimensional];

C_2 : concentração normalizada saindo da região [adimensional].

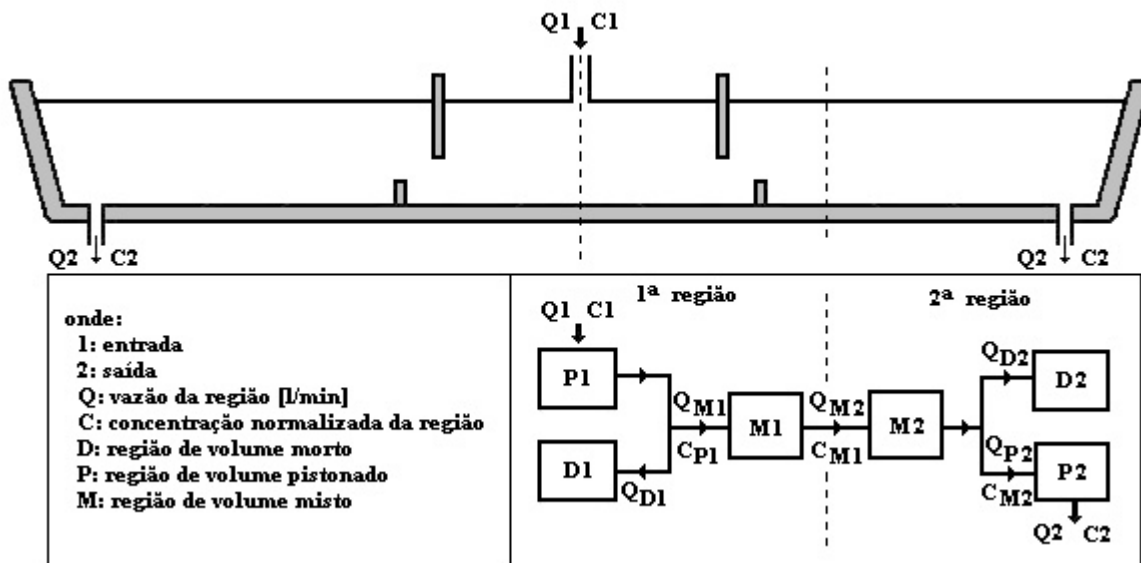


Figura 2 - Representação esquemática do modelo de mistura no distribuidor.

Considerando que a transição de aços com composição química diferente é um processo essencialmente transiente, à medida que o fluido vai escoando através de

cada uma destas regiões do distribuidor, os valores de vazão, de volume e das concentrações normalizadas são recalculados para cada intervalo de tempo. Assim, definiu-se um incremento de tempo igual a 0,01 s.

Como o fenômeno de mistura de diferentes aços no distribuidor é controlado pela difusão turbulenta^(1,2), todos os cálculos foram feitos levando-se em consideração apenas o elemento químico que apresenta a maior diferença entre as composições químicas das corridas envolvidas na mistura. A concentração normalizada deste elemento químico é obtida através da equação:

$$C = \frac{C_t - C_{ant}}{C_{atual} - C_{ant}} \quad (2)$$

onde:

C: concentração normalizada [adimensional];

C_t: concentração do elemento para um tempo t [adimensional];

C_{ant}: concentração do elemento químico na corrida anterior [adimensional];

C_{atual}: concentração do elemento químico na corrida atual [adimensional].

2.2 Modelo de Mistura no Veio

O modelamento no veio foi realizado apenas na região vertical das máquinas de lingotamento contínuo do tipo vertical-curva da Usiminas, regiões S1 e S2 apresentadas na figura 3. A região S1 corresponde ao molde, possuindo um comprimento de 900 mm. Já a região S2 representa a parte vertical abaixo do molde com um comprimento de 1600 mm.

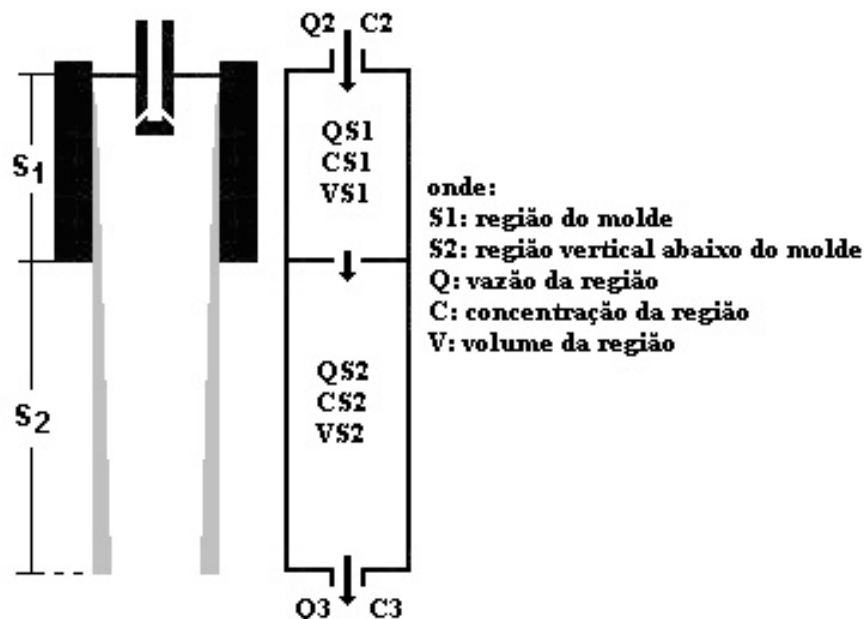


Figura 3 - Representação esquemática do modelo de mistura no veio.

No veio também foram realizados balanços de massa nas regiões S1 e S2, utilizando a equação 1, e calculados os volumes de S1 e S2:

$$\begin{aligned} V_{S1} &= L \cdot E \cdot Z_{S1} \\ V_{S2} &= L \cdot E \cdot Z_{S2} \end{aligned} \quad (3)$$

onde:

V_{S1} : volume da região S1 [mm³];
 L: largura da placa [mm];
 E: espessura da placa [mm];
 Z_{S1} : comprimento da região S1 [mm];
 V_{S2} : volume da região S2 [mm³];
 Z_{S2} : comprimento da região S2 [mm].

As vazões de aço passando pelas regiões S1 e S2 foram calculadas para cada intervalo de tempo:

$$Q_{S1}(t) = L \cdot E \cdot v(t) \quad (4)$$

$$Q_{S2}(t) = Q_{S1}(t) \quad (5)$$

onde:

Q_{S1} : vazão volumétrica da região S1 [mm³/s];
 $v(t)$: velocidade de lingotamento no instante t [mm/s];
 Q_{S2} : vazão volumétrica da região S2 [mm³/s].

2.3 Validação do Modelo

Foram amostradas seis placas de mistura⁽⁶⁾, processadas em diferentes condições de lingotamento contínuo nas máquinas 1 e 2, com diferentes elementos químicos controladores da mistura. Estas placas foram amostradas no centro e em uma das laterais, figura 4. Neste trabalho são apresentados os resultados representativos para duas placas de mistura amostradas, figura 5.

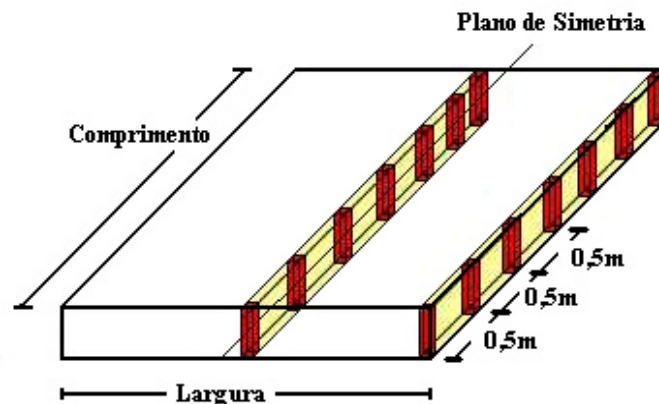


Figura 4 - Representação esquemática da amostragem em placas de mistura.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo matemático elaborado apresenta como resultado final o comprimento da placa de mistura, para determinadas condições de lingotamento. Variando estas condições de lingotamento, velocidade, largura e espessura de placa, composição química, massa de aço no distribuidor, taxa de enchimento do distribuidor e, até mesmo, o projeto de distribuidor, o comprimento da placa de mistura modifica-se.

As placas amostradas foram produzidas com velocidade de lingotamento igual a 0,8 m/min, massa de aço no distribuidor, no momento do início da mistura, igual a 10 toneladas, espessura de placa igual a 252 mm e lingotamento em dois veios. A tabela I apresenta as variáveis de processo na qual estas placas de mistura foram produzidas.

Tabela I – Condições de produção e simulação das placas de mistura amostradas⁽⁶⁾.

Condição operacional	1ª placa	2ª placa
Vazão de lingotamento [m ³ /s]	0,006	0,005
Vazão de enchimento do distribuidor [m ³ /s]	0,01	0,02
Largura da placa [mm]	1890	1500
Elemento químico controlador	Mn	C
Faixa de aprovação [adimensional]	0 ~ 0,90	0 ~ 0,85
Comprimento da placa de mistura padrão Usiminas [mm]	7000	4000

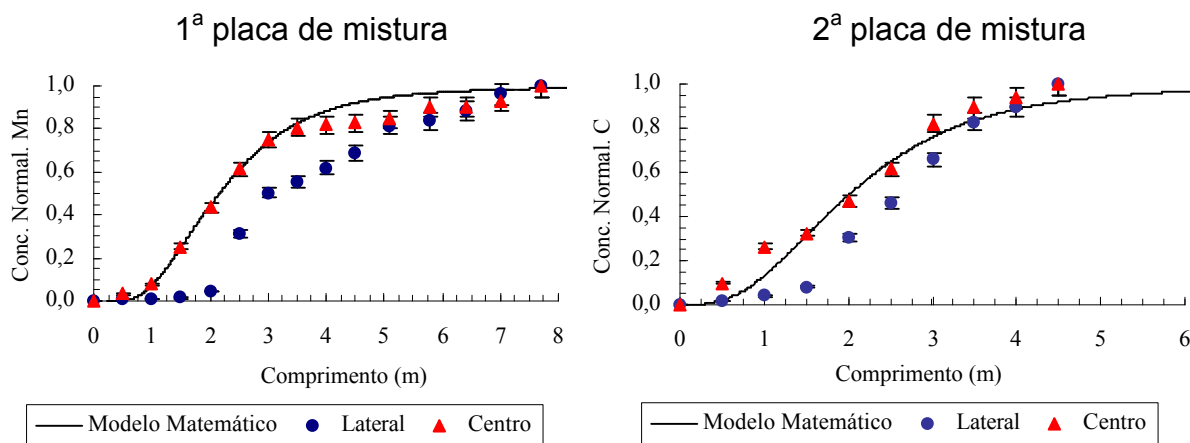


Figura 5 - Comparação em previsão do modelo matemático e resultados de amostragem em placas de mistura da Usiminas⁽⁶⁾.

O modelo matemático ajustou-se aos resultados verificados pela amostragem das placas de mistura. Os resultados obtidos na amostragem na lateral das placas apresentaram um desvio em relação a amostragem no centro das placas. Este fato é atribuído ao efeito da solidificação^(1,6), que se inicia na lateral e propaga-se para o centro da placa.

Os resultados comparativos entre os dois projetos de distribuidor foram realizados através de simulações no modelo matemático desenvolvido, figura 6.

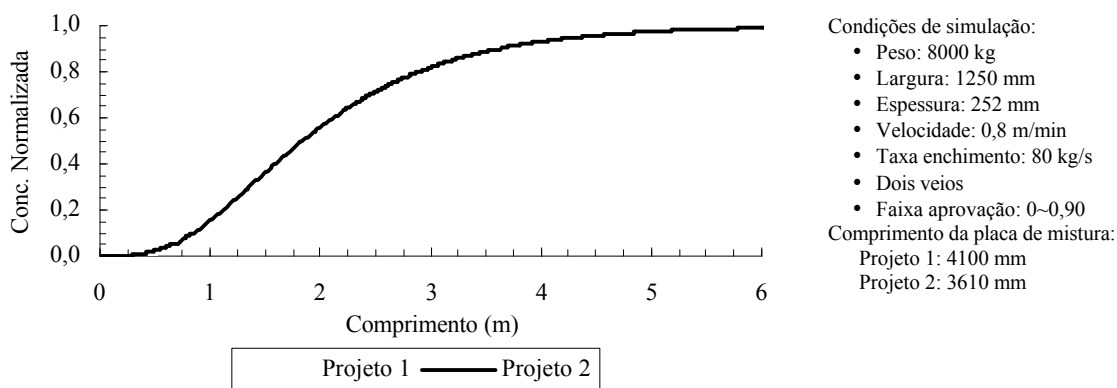


Figura 6 - Efeito do projeto de distribuidor no comprimento da placa de mistura⁽⁶⁾.

Pode-se verificar que o projeto de distribuidor afeta de forma substancial o comprimento da placa de mistura. Para minimizar o descarte, durante o lingotamento de aços com composição química diferente, é importante maximizar o volume de aço que apresenta escoamento do tipo pistão no distribuidor. Por outro lado, deve-se minimizar o escoamento do tipo misto, bem como o volume morto⁽⁶⁾ do distribuidor. Considerando estes fatores, pode-se estudar diferentes projetos de distribuidor^(5,7), visando otimizar os parâmetros do escoamento. O projeto de distribuidor modificado, projeto 2, apresentou uma redução no comprimento da placa de mistura da ordem de 12% quando comparado ao projeto 1.

O efeito da massa de aço no distribuidor no comprimento da placa de mistura foi avaliado. Para isso, foram realizadas três simulações considerando diferentes massas de aço no distribuidor, no momento do início da mistura. Todas as outras variáveis de processo foram mantidas constantes. A figura 7 apresenta os resultados encontrados nestas simulações. Constata-se que a massa de aço no distribuidor tem um efeito muito grande no comprimento da placa de mistura^(1-3,6). Quanto maior a massa de aço no distribuidor, no momento da transição de grãos de aço, maior será o comprimento da placa de mistura e, portanto, maior será o volume de aço descartado.

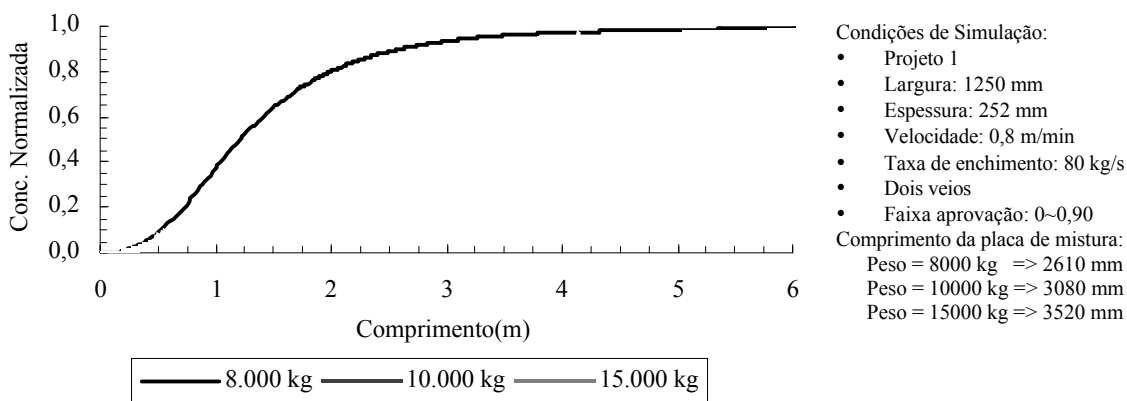


Figura 7 - Efeito da massa de aço no distribuidor no comprimento da placa de mistura⁽⁶⁾.

Quando a massa de aço no distribuidor passou de 8000 kg para 15000 kg, o comprimento da placa de mistura aumentou em torno de 35 %, uma vez que o comprimento da placa de mistura passou de 2610 mm para 3520 mm, figura 7. Porém, a diminuição da massa de aço no distribuidor é limitada pelo aumento da probabilidade de passagem de escória do distribuidor para o molde.

4 CONCLUSÃO

O modelo matemático desenvolvido representa bem a transição de aços com composição química diferente no lingotamento contínuo da Usiminas. Para que o modelo represente melhor o fenômeno, está sendo estudado o efeito da solidificação do aço no veio.

Os resultados encontrados indicam que o projeto de distribuidor atual da Usiminas pode ser otimizado visando a redução do volume de aço descartado durante a realização de misturas no lingotamento. A presença do inibidor de turbulência conjugado com a alteração do fundo do distribuidor, projeto 2, contribuiu para alterar as frações de volume morto, pistonado e misto, trazendo como consequência uma diminuição no comprimento da placa de mistura. Esta diferença chegou a 12% em relação ao projeto atual de distribuidor.

A massa de aço no distribuidor no momento de iniciar a mistura deve ser sempre minimizada. Com um volume de aço no distribuidor de 8000 kg obtêm-se uma redução no comprimento da mistura de quase 35% em relação ao de 15000 kg.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) HUANG, X.; THOMAS, B.G. Intermixing model of continuous casting during a grade transition. *Metalurgical Transactions B*, V.27B, p.617-632, 1996.
- (2) VASSILICOS, A.; MANNION, F.J. & GALLENSTEIN, J.H. Prediction of intermix slab composition at Gary no.2 caster. 75th Steelmaking Conference, Toronto, Canada, V.10, p.249-254, 1992.
- (3) MOSTERT, R.; GENDT, G.G.M. & VAN DER BOGERT, R.J. The intermix models of the slab and billets caster of Hoogovens Steel in the Netherlands. *Steelmaking Conference Proceedings*, p.43-52, 1998.
- (4) CHAKRABORTY, S.; HIROSE, T.; JONES, B. & DUKELOW, D.A. Transition reduction and simultaneous maintenance of steel cleanliness in granite city tundishes. 82nd Steelmaking Conference, p.39-43, 1999.
- (5) BARBOSA, F.A. Modelamento matemático e físico do escoamento do aço líquido em diferentes projetos de distribuidor do lingotamento contínuo da Usiminas. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.
- (6) COSTA, A.M. Modelamento matemático da zona de mistura no lingotamento contínuo. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.
- (7) BARBOSA, F.A.; FILHO, G.M.A.; COSTA, A.M. & TAVARES, R.P. Modelamento matemático e físico do escoamento do aço líquido em diferentes projetos de distribuidor do lingotamento contínuo da Usiminas. XXXIV Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais da ABM. Belo Horizonte, 10p., 2003.

MATHEMATICAL MODELLING OF THE GRADE TRANSITION AT USIMINAS CONTINUOUS CASTING⁽¹⁾

Afrânio Márcio Costa⁽²⁾
Fabiano Almir Barbosa⁽³⁾
Roberto Parreiras Tavares⁽⁴⁾

ABSTRACT

During a continuous casting sequence, steels with different chemical compositions are frequently produced. This usually generates an intermix slab. At Usiminas, intermix slabs represent approximately 4% of the total steel production.

In the present paper, a mathematical model for simulating intermixing in the continuous casting machine was developed. With this model it is possible to predict the length of the intermix slab, giving a better criterion for cutting the slabs. With the model, it is also possible to analyze the effect of different process variables on the formation of the intermix slab.

Based on the model predictions, it was demonstrated that the configuration of the tundish, including the presence of flow modifiers, has a significant effect on the intermix length. The level of liquid steel inside the tundish is also an important variable that affects the length of the intermix slab. It is essential to reduce the level of steel in the tundish during steel grade transitions to decrease the length of intermix slabs.

Key word: continuous casting, mathematical modeling, grade transition.

(1) Technical Contribution to XXXV Steelmaking Seminar of Brazilian Association of Metallurgy and Materials (ABM), May 17-19, 2004, Salvador, BA, Brazil.

(2) Member of ABM, Metallurgical Engineer, M.Sc.; Department of Steelmaking of Usiminas; Ipatinga, MG, Brazil.

(3) Member of ABM, Metallurgical Engineer, M.Sc.; R&D Center of Usiminas; Ipatinga, MG, Brazil.

(4) Member of ABM, Metallurgical Engineer, Professor; Metallurgical and Materials Engineering Department, Minas Gerais Federal University; Belo Horizonte, MG, Brazil.