

MODELAMENTO MATEMÁTICO DA ZONA DE MISTURA DE AÇOS EM LINGOTAMENTO CONTÍNUO¹

Vinicius de Oliveira Cravo²
Afrânio Marcio Costa³
Dimas Bahiense Moreira⁴
Varadarajan Seshadri⁵
Itavahn Alves da Silva⁶
Carlos Antonio da Silva⁶

Resumo

O aumento eficiente da produção do lingotamento contínuo requer longas seqüências de painéis sem interrupção; este é um fator de estabilidade e segurança e de redução de custo operacional. Com a entrada da Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST) no mercado de bobinas à quente a demanda de grandes variações de tipos de aço com baixa tonagem tornou-se mais comum, e para atender este mercado sem aumento dos custos operacionais, faz-se necessária a realização de misturas de diferentes tipos de aços no mesmo distribuidor. O objetivo deste projeto é estudar as alternativas para viabilizar a mistura de aços no distribuidor minimizando as perdas por descartes ou “down grade” das placas produzidas, isto através de modelagem física e matemática, de forma, a avaliar a influência de determinadas variáveis como: geometria do distribuidor, direcionadores de fluxo, vazão de re-enchimento do distribuidor, altura de válvula longa, peso de aço no distribuidor, utilização de tampão, etc. Pretende-se estudar a influência dos parâmetros sobre a zona de mistura, estudando-a de forma qualitativa e quantitativa. O modelo matemático desenvolvido permitiu avaliar os efeitos das principais variáveis do lingotamento contínuo no comprimento da placa de mistura. Destaca-se o peso de aço no distribuidor como variável importante para minimizar a mistura. Esse volume deve ser o menor possível, sem contudo correr o risco de passar escória do distribuidor para o molde.

Palavras-chave: Lingotamento contínuo; Mistura de aços; Modelo físico; Modelo matemático.

MATHEMATICAL MODEL OF INTERMIX ZONE IN CONTINUOUS CASTING

Abstract

The increase of the production of steels through continuous casting machines requires long ladle sequences without interruption; if this condition is achieved it brings out stability and safeness and also reduction of operational cost. Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST) arrival at the hot rolled coil market is demanding flexibility to supply small tonnages of a variety of steel grades. Thus in order to accomplish this objective without increasing the operational costs it has become necessary to cast different grades of steel at the same sequential without tundish changes. The objective of this project is to study the alternatives that would make possible the mixture of steels in the tundish but minimizing the losses due to downgrading the slabs. Both physical and mathematical modeling are to be used in order to evaluate the influence of variables such as: geometry of the tundish, flow obstacles, presence of turbulence inhibitors, depth of ladle valve, weight of steel in the tundish, stopper rod etc. It is intended to study the influence of these parameters on the mixing zone, both in a qualitative and quantitative way. With a mathematical model for intermixing, it was possible to study continuous casting variables effects in length slabs mixing. The tundish weight was more important for minimum mixing. The tundish weight has to be the minimum possible, however without allow the pass of slag from tundish to mold.

Key words: Continuous casting; Intermix zone; Physical model; Mathematical model.

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

² *Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, MSc. Divisão Técnica da Aciaria da CST*

³ *Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, MSc. Divisão de Metalurgia da CST*

⁴ *Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, Divisão Técnica da Aciaria da CST*

⁵ *Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, Prof. Dr. da Universidade Federal de Minas Gerais*

⁶ *Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, Prof. Dr. da Universidade Federal de Ouro Preto*

INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, o crescente desenvolvimento do processo de lingotamento contínuo aliado à necessidade de maior produtividade tornou necessária a utilização de maior seqüencial de lingotamento; Ao mesmo tempo, também foi crescente a demanda por diferentes materiais com um menor volume de produção. Para atender as demandas requeridas, mantendo-se a produtividade, se faz necessária a mistura de diferentes tipos de aço no mesmo distribuidor, gerando então placas de composição química variável ao longo das mesmas, chamadas placas de mistura. Produtores de aço precisam conhecer exatamente onde a região mista ocorre, com o objetivo de promover um descarte mínimo e, ao mesmo tempo, conseguir atender os limites de especificação química dos clientes. Desta forma algumas condições de lingotamento podem ser otimizadas para minimizar o custo associado à mistura.

Huang e Thomas (1996) citam que existem vários meios para evitar/ minimizar a região de mistura gerada. O primeiro meio citado, operacionalmente mais simples, é lingotar os diferentes tipos de aço como seqüência simples, ou seja, executando apenas uma simples troca de panelas. Este método evita as perdas de produtividade, porém gera o maior volume de mistura. A alternativa mais extrema é o encerramento da seqüência quando o primeiro grau terminar e produzir um novo grau em uma nova seqüência. Desta forma se evita a geração de placas de mistura, porém, aumenta-se a perda de produtividade devido ao tempo gasto para reiniciar o lingotamento, ao mesmo tempo que provoca a perda de rendimento devido a problemas de qualidade relacionados ao fim e início de lingotamento. Outro método é a troca de distribuidor, este minimiza a perda de produtividade, pois não requer parar a máquina de lingotamento contínuo e evita a mistura dentro do distribuidor; A mistura ocorre somente no interior do molde, porém ainda existe a perda de rendimento devido ao aço remanescente no distribuidor, além do que limita-se a vida média do distribuidor. Consequentemente o benefício depende da quantidade de mistura a ser evitada. O melhor método citado para minimizar a região de mistura é a inserção de placa separadora no molde. Este método é capaz de minimizar ao máximo a mistura no interior do molde. Entretanto a inserção física da placa separadora requer redução na velocidade de lingotamento ou até mesmo “parar” o veio, o que implica em risco de abaulamento excessivo e trincas nas placas, risco de rompimento de pele (breakout), e até mesmo dano à máquina de lingotamento, além de que, a placa separadora pode ser de alto custo.

Para Yeh e colaboradores (1993) o método de realizar a troca de qualidades no lingotamento contínuo é a realização de mistura de aços no mesmo distribuidor com otimização. De acordo com os autores as variáveis que mais influenciam no volume de mistura gerada, são: a velocidade de lingotamento e nível mínimo de aço no distribuidor.

Silva e colaboradores (2001) citam a importância de estudar o fluxo de aço no distribuidor para conhecer o grau de misturamento de diferentes tipos de aço e sua implicação no volume final de descarte. Em períodos de trocas de panela, caracterizados como períodos de transiência, os principais fatores relacionados com o volume de descarte gerado são volume de aço no distribuidor durante o re-enchimento com o aço “novo”, taxa de re-enchimento, taxa de lingotamento e configuração dos dispositivos de controle de fluxo.

MATERIAL E MÉTODO

Para o desenvolvimento do trabalho fez-se necessário dividi-lo em três partes. Uma parte teórica que trata do desenvolvimento do modelo matemático para analisar a mistura formada durante a troca de qualidades no lingotamento contínuo. A segunda etapa trata do modelamento físico do distribuidor atual da CST (MLC#1) com o objetivo de ajustar o modelo matemático desenvolvido. Isto corresponde a determinar as curvas de mistura no distribuidor, que possam ser alimentadas a um modelo matemático de solidificação no molde, local onde se completa a transição. A terceira parte é responsável pela validação do modelo matemático através de experimentos práticos.

Para a determinação das curvas de transição de composição química válidas para o distribuidor foi construído um modelo físico em acrílico, escala 1:3, de acordo com os critérios de similaridade de Froude. O período de troca de painéis é modelado pela consideração do distribuidor estar-se esvaziando até um nível mínimo, devido à interrupção da alimentação quando uma panela, ao se esgotar, é retirada do circuito, como ocorre nas operações industriais. Inicialmente faz-se o sistema entrar em regime permanente no nível usual de trabalho. A seguir interrompe-se a corrente de água e aguarda-se que o distribuidor alcance um nível mínimo de trabalho, e inicia-se a admissão de água com traçador (KCl, utilizado para simular os diferentes graus dos aços), até que o distribuidor atinja seu nível usual de trabalho. Os experimentos realizados requerem um controle de vazão de entrada e saída do líquido no distribuidor; medição de concentração de traçador na entrada e saída, conforme pode ser visto na Figura 1.

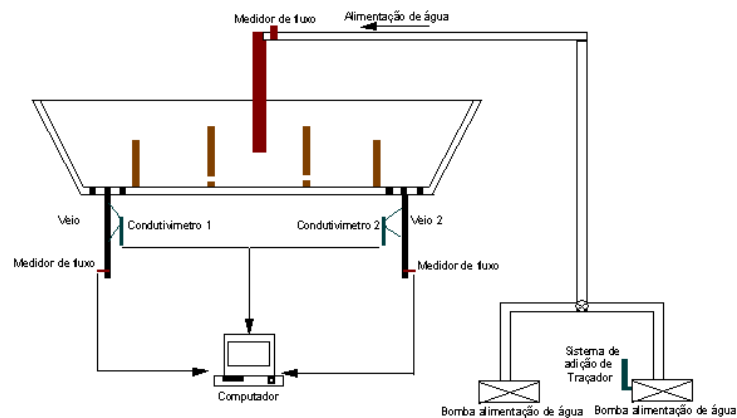


Figura 1 – Desenho esquemático do Modelo Físico do Distribuidor da CST

Para um completo modelamento de toda região de mistura faz-se necessário além da determinação da mistura no distribuidor, conhecer o comportamento do efeito da mistura de aço no interior do molde. Portanto é necessária a construção de um modelo capaz de representar a solidificação do aço no molde, sendo que um dos dados de entrada deste modelo é a curva de transição do distribuidor. De acordo com este modelo, sendo C_0 a concentração de um dado elemento de interesse referente à panela que se esgota e sendo C_1 a concentração referente à panela que entra em regime de vazamento a curva F de transição seria dada por:

$$F = \frac{C - C_0}{C_1 - C_0} \quad (1)$$

onde C representa a variação temporal de composição na saída do veio. Portanto a curva F representa uma normalização das composições no intervalo $(0,1)$, o primeiro valor indicando início e o segundo final de transição. Conforme proposto por Szekeres (2005) admite-se ainda que o processo de solidificação – formação da pele no molde – pode ser descrito pela equação semi-empírica

$$d \text{ [mm]} = k \sqrt{t \text{ [min]}} \quad (2)$$

onde d indica espessura de pele, t o tempo de extração de calor e k uma “constante”, função das condições de resfriamento e, usualmente, com valor em torno de 25, para o caso da CST estes valores estão entre 25,5 e 26,5. Portanto, desde que numa dada área de seção reta da placa se superpõem camadas de sólido formadas em instantes diferentes seria possível observar, a partir do instante de abertura da segunda panela, uma gradação de composição tal como sugerida na Figura 2. De acordo com a mesma, valores crescentes de F seriam notados desde a periferia até o centro da placa, isto é, a transição se completa primeiro nas regiões centrais.

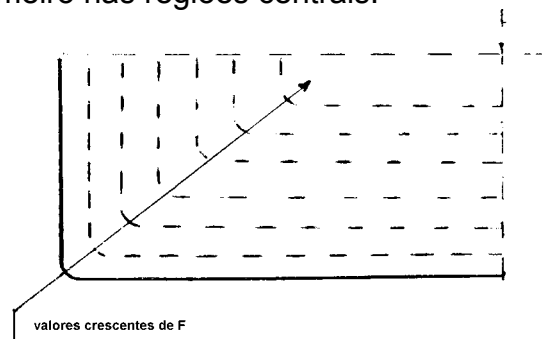


Figura 2: Perfil esquemático de composição na área de seção reta da placa.

Cada camada de sólido depositada é o resultado da composição do líquido na frente de solidificação. Entretanto esta composição não corresponde à composição do aço líquido que sai do distribuidor, sendo de fato uma função complexa inclusive da posição e das condições de fluxo no interior do molde. A composição média do aço **líquido** no interior do molde varia ao longo do tempo desde que as composições de entrada – aço provindo do distribuidor – e de saída – aço consumido no processo – divergem. Um balanço de conservação permite escrever, como Taxa de Acumulação, Taxa de Variação de Composição do aço líquido na poça, Figura 3a:

$$V_{poça} \frac{dF}{dt} = Q \{ F_E - F \} \quad (3)$$

onde representam $V_{poça}$, o volume de líquido no interior do molde [m^3]; Q , a vazão volumétrica de aço, [m^3/s]; F_E , a composição adimensional do aço que entra na poça, isto é a composição do efluente do distribuidor tal como determinada pela curva de transição do distribuidor; F , a composição no interior da poça.

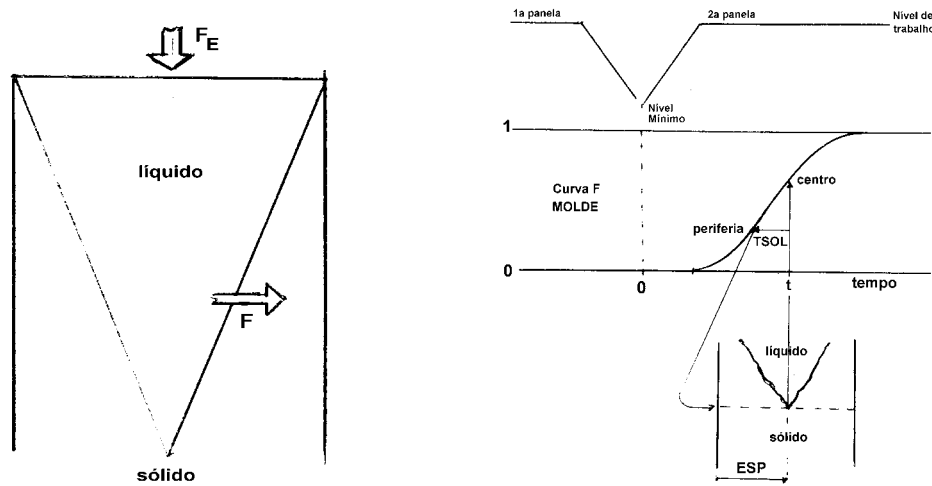


Figura 3: (a) Esquema para determinar a variação de composição do líquido na poça líquida, (b) Distribuição de composição de pele em função da curva de transição no molde

A expressão admite que a vazão de entrada deve ser igual à vazão de saída em regime macroscopicamente permanente, e pode ser utilizada para atualizar a composição do líquido na poça – frente de solidificação – desde que $V_{poça}$ pode ser facilmente calculado por integração ao longo do eixo longitudinal da placa, admitindo crescimento de pele de acordo com a formula semi-empírica já citada.

Se a variável ESP [m], representa a meia espessura da placa, o tempo necessário para solidificação completa da mesma, TSOL [s] será dado por:

$$TSOL = \left\{ \frac{ESP \cdot 1000}{K_s} \right\}^2 60 \quad (4)$$

Enquanto que o comprimento metalúrgico M [m], isto é, a profundidade estimada da poça, seria:

$$M = \frac{V_c}{60} TSOL \quad (5)$$

onde V_c representa a velocidade de lingotamento, [m/min], 1000 e 60 representam ajuste de unidade.

Neste caso, num dado instante t após o início da transição o centro da placa se solidifica à profundidade M com composição F , ao passo que a porção exterior da pele teria se formado no instante $t - TSOL$ com composição F' , defasada em relação ao núcleo de acordo com a curva de transição da poça, vide Figura 3b. As posições intermediárias correspondem há tempos intermediários e composições intermediárias.

De posse destes argumentos um programa para estimar a distribuição dos vários elementos numa dada área de seção reta pode ser implementado de imediato. A Figura 4 apresenta um quarto de uma seção genérica da placa, dividida em uma malha ($I=1, NPJ$; $J=1, NPJ$). Num dado instante t , o material do nó (NPI, NPJ) se solidifica com composição F ; pode então ser calculado quanto tempo antes a porção referente ao nó (I, J) teria se solidificado; a composição referente a este nó genérico pode ser facilmente inferida se a curva de transição do distribuidor – e logo do líquido no molde – estiver disponível. Este procedimento poder ser repetido de modo a varrer toda a área da seção reta e qualquer tempo demandado.

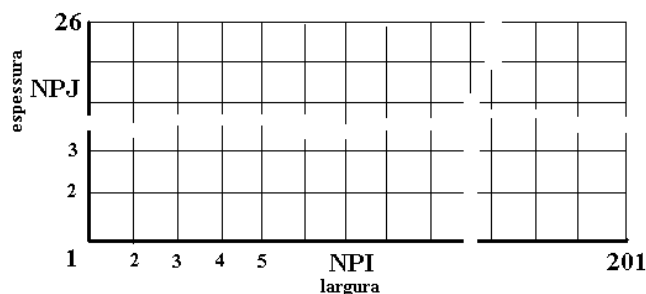


Figura 4: Malha de integração correspondente a $\frac{1}{4}$ da seção reta da placa. Linhas em negrito representam a superfície da placa

Para a validação do modelo matemático desenvolvido foram realizadas amostragens em uma placa de mistura obtida na operação industrial do lingotamento contínuo da CST. A placa de mistura obtida durante a operação industrial foi amostrada no centro, a 7,5cm da superfície e na superfície, conforme ilustrado na figura 5. As placas de mistura foram cortadas conforme a necessidade de amostragem. A distância entre cada amostra foi de 1m.

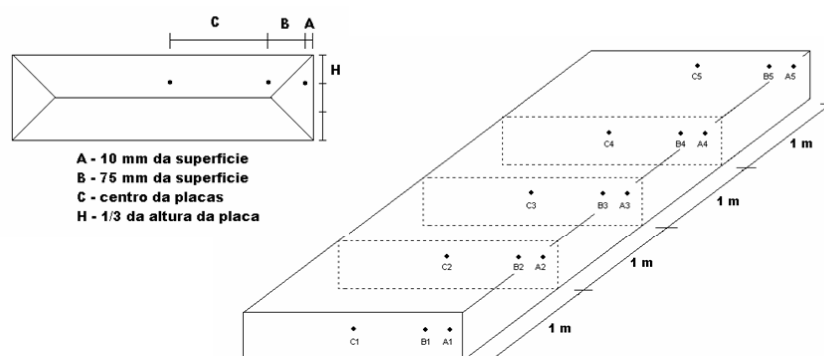


Figura 5: Figuras esquemáticas do posicionamento das amostragens considerando seções transversais e longitudinais

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em função da natureza turbulenta do fluxo, para cada condição operacional do distribuidor vários ensaios foram repetidos de modo a gerar uma curva média representativa da transição em cada veio para cada situação. A forma final de tal curva seria função de vazão de lingotamento, vazão de reenchimento, nível mínimo durante transição, volume normal de trabalho. A figura 6 apresenta uma curva típica de transição. Curvas de transição (curvas F) representam uma normalização das composições no intervalo (0,1), o primeiro valor indicando início e o segundo final de transição e são demonstrados na equação [1], no caso do modelo as concentrações são substituídas pelo sinal de condutividade.

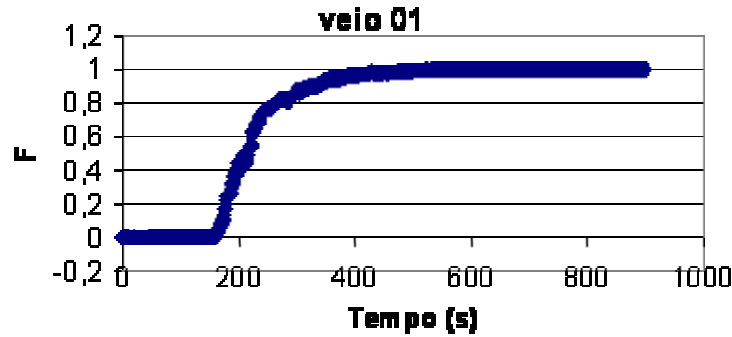


Figura 6: Curva de Transição: F vs t, veio 01

Dos resultados dos testes transientes são retirados o tempo mínimo de residência, que é definido como sendo o tempo médio para um elemento individual do fluido percorrer o distribuidor e a influência das variáveis C na definição da curva F. De posse destes resultados, o próximo passo consistiu em correlacionar as variações experimentadas pelo parâmetro “C” em função das condições operacionais e associar este ao modelo de transição no molde. Para validar o modelo foi realizada uma mistura de aços na planta industrial. As placas de misturas foram amostradas e foram utilizadas para ajuste do modelo. A Figura 7 apresenta o resultado do modelo ajustado com os resultados das análises das placas.

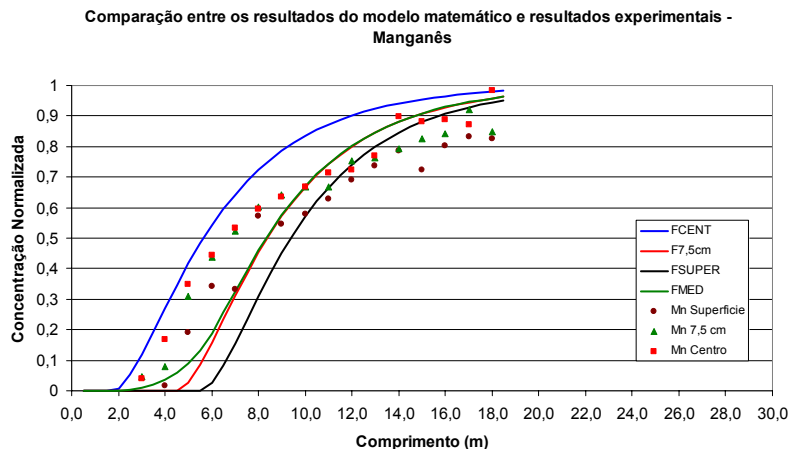


Figura 7 – Comparação entre os resultados do modelo matemático e resultados experimentais - Manganês

Algumas variáveis operacionais de lingotamento contínuo interferem de forma significativa na extensão do processo de mistura e, conseqüentemente, no comprimento final da placa de mistura. Assim sendo, conhecer as influências dessas variáveis no procedimento de troca de qualidades pode contribuir de forma significativa para minimizar o descarte, promovendo ganhos de rendimento na Aciaria. Uma das variáveis que mais influenciam a extensão da zona de mistura no distribuidor durante lingotamento contínuo com troca de qualidade é o peso de aço no distribuidor no momento da abertura da panela contendo a corrida seguinte. Esse peso de aço define o volume inicial no modelo matemático elaborado e, conseqüentemente, os volumes de cada uma das regiões de escoamento pistão, morto e mistura.

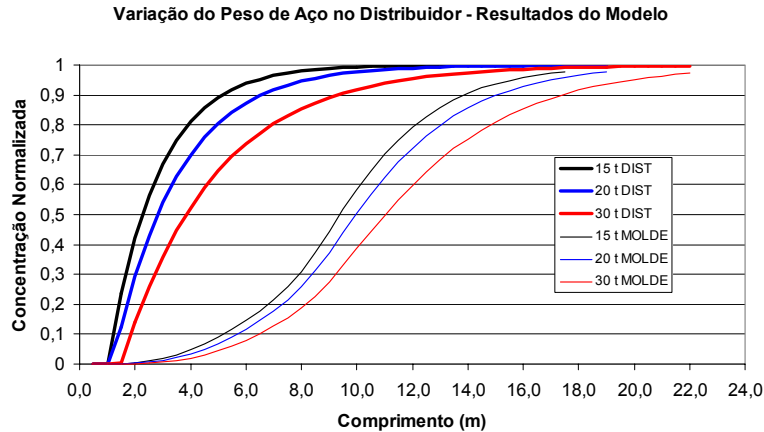


Figura 8 – Análise da Influência do peso de aço no distribuidor no comprimento da mistura, curvas de distribuidor e molde.

O modelo apresenta como resultado a curva F de transição no distribuidor (curvas com identificação “DIST”) e para as mesmas condições as curvas de transição do molde para a posição central, 7,5 cm da superfície e superfície da placa, para comparação dos resultados foram utilizados os valores médios das três posições (curvas com identificação “MOLDE”). Conforme pode ser observado na Figura 8, a medida que diminui-se o volume de aço no distribuidor no momento de abertura da nova panela a transição no distribuidor se torna mais brusca e da mesma forma (porém com menor intensidade) um menor volume de mistura no molde. Assim sendo, deve-se visar realizar o procedimento de troca de qualidades no lingotamento contínuo com o menor volume de aço no distribuidor, para assim, minimizar o descarte. O mesmo tipo de resultado foi encontrado por Huang e Thomas (1996), Silva e colaboradores (2003), Costa e colaboradores (2004).

A taxa de enchimento do distribuidor também pode ter um efeito significativo na troca de qualidades no distribuidor durante a operação de lingotamento contínuo. Esta representa a razão entre vazões volumétricas correspondentes ao novo aço que está entrando no distribuidor e do aço antigo que vai deixando o mesmo.

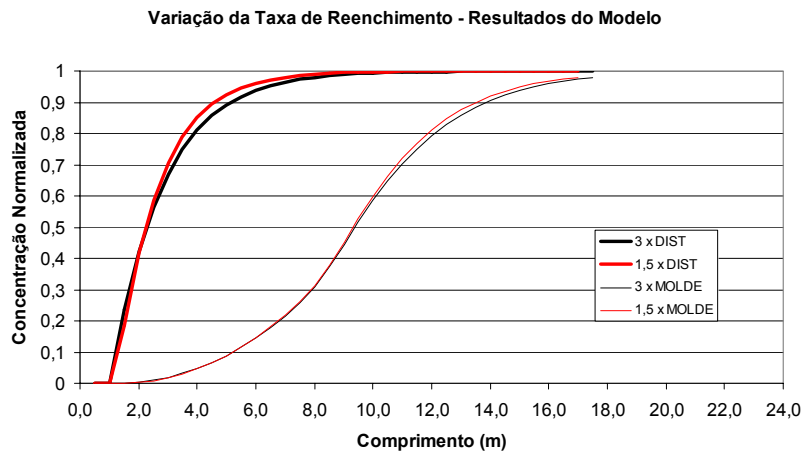


Figura 9 - Análise da Influência da taxa de reenchimento de aço no distribuidor no comprimento da mistura, curvas de distribuidor e molde.

Os resultados encontrados, apresentados na Figura 9, mostram que apesar de uma pequena diferença na curva de mistura do distribuidor a taxa de reenchimento do distribuidor não tem influência significativa no comprimento final da placa de mistura. A velocidade de lingotamento influencia nos resultados do modelo matemático da mistura no distribuidor, pois da mesma forma que as dimensões do molde, alteram a vazão de saída de aço do distribuidor, throughput. Thomas (1997) analisou o efeito da largura e espessura da placa, para uma velocidade constante, no comprimento da placa de mistura. Para este trabalho foram analisadas variações na velocidade de lingotamento, para dimensões de placas, espessura e largura, constantes.

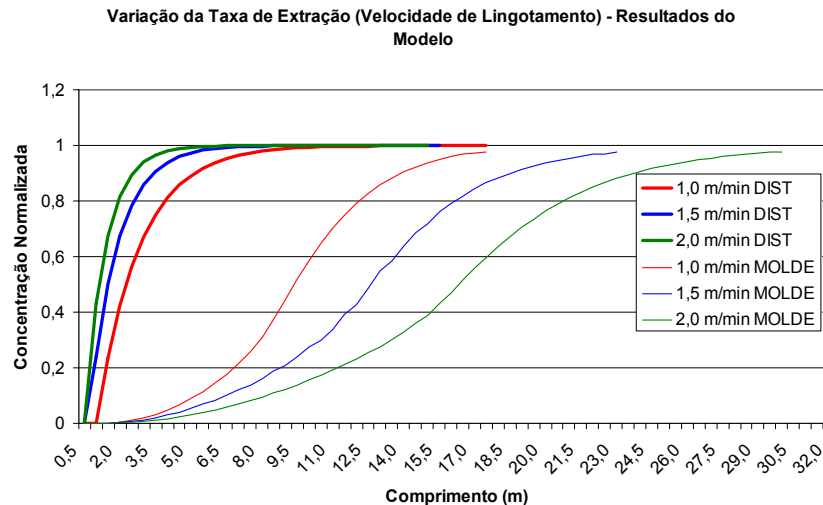


Figura 10 - Análise da Influência da taxa de extração de aço no distribuidor no comprimento da mistura, curvas de distribuidor e molde..

Conforme pode ser observado na Figura 10, a medida que aumenta-se a taxa de extração do distribuidor a transição no distribuidor se torna mais brusca porém devido ao aumento da poça líquida efetiva para mistura (mantendo-se as condições de resfriamento) o volume de mistura gerado aumenta. Assim sendo, deve-se visar realizar o procedimento de troca de qualidades no lingotamento contínuo com a menor taxa de extração de aço no distribuidor possível, para assim, minimizar o descarte.

Outra variável analisada é o gradiente de temperatura, isto é, a diferença entre a temperatura do aço que está no distribuidor em relação ao novo aço que será misturado.

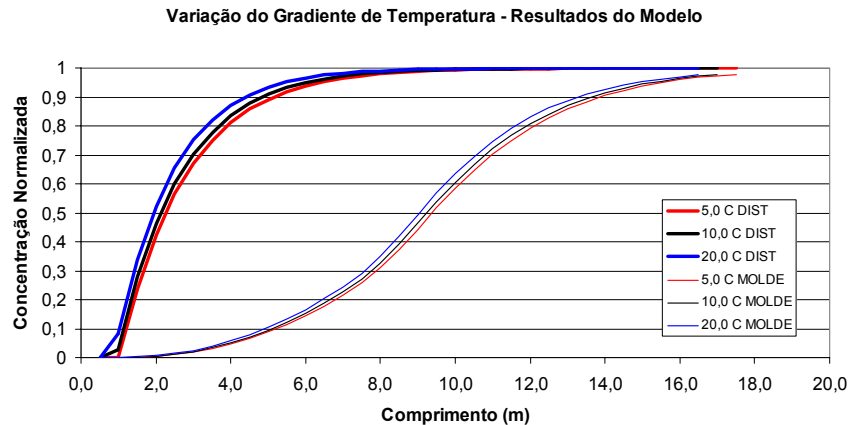


Figura 11 - Análise da Influência do gradiente de temperatura no comprimento da mistura, curvas de distribuidor e molde.

Os resultados encontrados, apresentados na Figura 11, mostram que apesar de uma pequena diferença na curva de mistura do distribuidor o gradiente de temperatura entre os aços não tem influência significativa no comprimento final da placa de mistura.

CONCLUSÃO

O peso de aço no distribuidor no momento de iniciar a troca de qualidade tem importância significativa para minimizar o comprimento da placa de mistura gerada. Esse volume de aço deve ser o menor possível, sem, contudo correr risco de formação de vórtex e, conseqüentemente, de passagem de escória do distribuidor para o molde. Esse risco é o que limita o volume mínimo de aço no distribuidor para realização da troca de qualidades no lingotamento contínuo. Esse fato trará como conseqüência uma diminuição nas perdas ao final de uma seqüência de lingotamento;

A taxa de extração da placa em lingotamento apresenta uma influência expressiva no comprimento da placa de mistura gerada. Na medida em que se diminuiu a taxa de extração de aço do distribuidor, diminuiu-se o comprimento da placa de mistura. Porém, na planta industrial, a velocidade de lingotamento é ditada pelas condições de processo.

A taxa de reenchimento do distribuidor e gradiente de temperatura não apresentaram influência significativa no comprimento da placa de mistura.

Agradecimentos

Agradeço à CST - Arcelor Brasil e ao Engenheiro Dimas Bahiense Moreira pelo incentivo e oportunidade de aperfeiçoamento técnico e profissional, bem como pelos recursos financeiros que viabilizaram a elaboração deste trabalho.

BIBLIOGRAFIA

- 1 COSTA, A.M., BARBOSA, F.A., TAVARES, R.P., “Modelamento Matemático da Transição de Graus de Aço Lingotamento Contínuo da Usiminas”. XXXV Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais, p 212-220, Salvador – BA, 17 a 19 de maio de 2004.
- 2 SILVA, C. A., et ali “Caracterização do Escoamento do Aço Líquido no Distribuidor da Máquina de Lingotamento Contínuo Operando em Regime Transiente – Modelagem Física”. 56º Congresso Anual da ABM, p.1304-1312, 16-20 julho 2001.
- 3 SILVA, C. A., et ali “Estudos de Otimização do Distribuidor de Lingotamento Contínuo da Acesita, via Modelagem Física”. XXXIV Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais; p.302-311, Belo Horizonte – MG. 19 a 21 de maio de 2003
- 4 SZEKERES, E.S., “Strand Solification: Part I – Shell Development”, Brimacombe Continuous Casting Course, v.2N, p.1-4, 16-20 May, 2005
- 5 THOMAS, B. G., HUANG, X., “Intermixing Model Of Continuous Casting During A Grade Transition”. Metallurgical Transation B, v.27B, p.617-632, August, 1996.
- 6 THOMAS, B.G. “Modeling Study of Intermix in Tundish and Strand During a Continuous Casting Grade Transition”. Metallurgical Transactions B, p.83-96, November, 1997.