

# SEQUENCIAMENTO DE AÇOS DE QUALIDADES DISTINTAS EM UM MESMO DISTRIBUIDOR NO LINGOTAMENTO CONTÍNUO <sup>(1)</sup>

*Marcelo Carboneri Carboni <sup>(2)</sup>  
André Siqueira de Lima <sup>(3)</sup>  
Alexandre Silveira de Azevedo <sup>(4)</sup>  
José Roberto Bolota <sup>(5)</sup>*

## Resumo

Este trabalho tem por objetivo desenvolver um modelo para a previsão da região de comprimento da zona de transição de um tipo de aço para outro, lingotados utilizando-se um mesmo distribuidor. Este comprimento é fundamental para que se faça a separação entre a região que deve ser descartada por heterogeneidade química e a região aproveitável como produto bom. A metodologia de trabalho consiste no desenvolvimento de um modelo teórico, baseado em fluxo de massa e interação entre as espécies químicas presentes nos aços, e o posterior ajuste deste modelo à situação real de lingotamento, envolvendo-se mais variáveis. Neste modelo estão incorporadas as variáveis de diferença de composição química, quantidades de aço envolvidas, velocidade de lingotamento e geometria do distribuidor. Como resultado deste trabalho desenvolveu-se um modelo com entradas simples para ser utilizado durante o sequenciamento de aços de qualidades distintas em um mesmo distribuidor. Através da utilização deste modelo é possível prever o comprimento da região de transição entre os dois tipos de aços lingotados, permitindo a separação de região a ser descartada. Com a utilização deste modelo pode-se garantir maior confiabilidade na separação da região de transição e redução do descarte em relação ao praticado anteriormente.

**Palavras-chave:** sequenciamento, qualidades distintas, modelamento matemático

- (1) Trabalho enviado ao XXXVI Seminário de Fusão, Refino e Solidificação, 16 a 18 de Maio de 2005 Vitória ES
- (2) *Engenheiro Metalurgista – Supervisor Técnico de Processos de Aciaria – Aços Villares S/A – Usina Mogi das Cruzes*
- (3) *Tecnólogo em Garantia da Qualidade – Controlador de Pátio de Tarugos – Aços Villares S/A – Usina Mogi das Cruzes*
- (4) *Técnico em Metalurgia – Supervisor Operacional de Lingotamento Contínuo – Aços Villares S/A – Usina Mogi das Cruzes*
- (5) *Engenheiro Metalurgista – Gerente de Aciaria – Aços Villares S/A – Usina Mogi das Cruzes*

# 1 INTRODUÇÃO

O processo de lingotamento contínuo permite o sequenciamento de corridas em um mesmo distribuidor. Essa prática reduz, significativamente, o custo de produção nesta etapa do processo, que consiste basicamente, nos custos de refratário de trabalho e válvulas utilizadas no distribuidor a cada seqüência. Além disso, a prática de sequenciamento em lingotamento contínuo permite um aumento na produtividade da máquina, reduzindo-se o tempo de máquina parada para set up. O custo comparativo em função do número de corridas em um mesmo distribuidor é apresentado na Figura 1 conforme Tancredo e Santos.<sup>(1)</sup>

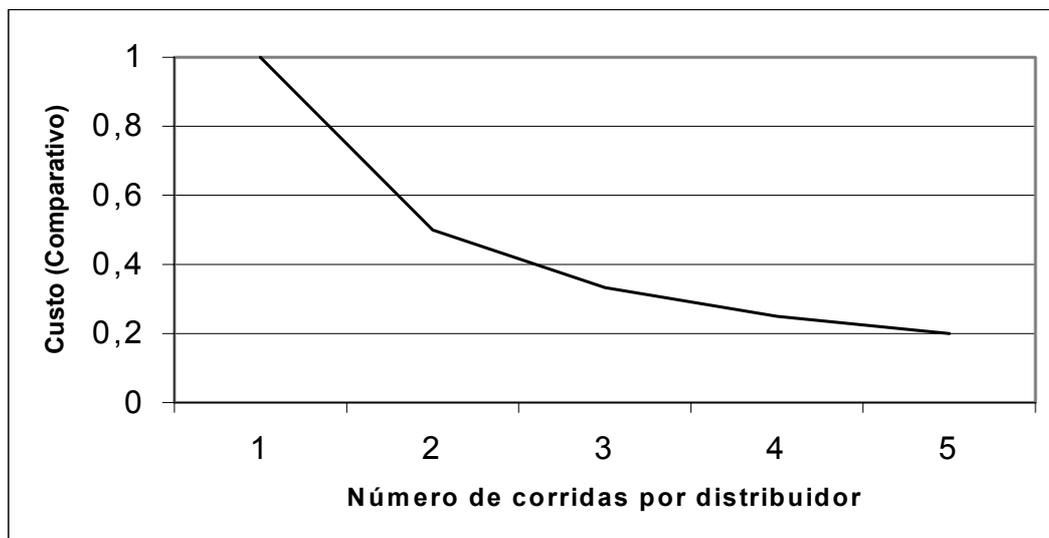


Figura 1. Efeito do número de corridas por distribuidor no custo do lingotamento contínuo.

O *mix* de produção de uma usina de aço especial é bastante diversificado. Neste caso, uma alternativa para aumentar o número de corridas no mesmo distribuidor (n.º de seqüencial) é a técnica de lingotar aços diferentes, como se fosse uma seqüência de aços iguais. Desta maneira, ocorre a mistura do aço da primeira corrida com o aço da segunda, gerando uma quantidade de tarugos de composição química heterogênea, que não podem ser utilizados para sua aplicação primária, e, na grande maioria dos casos, não podem ser utilizados como aço especial.

Com a troca de panela, o aço da primeira corrida é misturado com o aço da segunda. Este procedimento cria uma região heterogênea no tarugo, passando, gradualmente da composição química de uma corrida para outra.

A produtividade do lingotamento contínuo é aumentada, mas é produzido uma quantidade de aço com composição química heterogênea que não preenche as características requisitadas pelo cliente.

Uma série de parâmetros influencia nesta quantidade de tarugos de composição química heterogênea gerados. Alguns parâmetros estão associados à própria máquina, como por exemplo geometria do tundish e do molde. Outros, por sua vez estão ligados às condições de processo, como por exemplo: diferença de composição química, velocidade e temperatura de lingotamento, quantidade de aço no tundish no momento de troca de panela, momento em que a panela é aberta, entre outros.

Diversas publicações versam sobre o modelamento matemático de previsão desta quantidade de tarugos de transição de composição química. O foco da maioria destas publicações dá-se em relação à mistura de aço dentro do distribuidor. Algumas publicações consideram ainda a mistura de aço dentro do molde. Claramente quanto maior a seção do molde, maior relevância terá a mistura de aço dentro dele. A maioria dos modelos apresentados considera, também o enchimento contínuo do tundish após a abertura da segunda panela. Esta, porém, nem sempre é a prática mais recomendada.

O objetivo deste trabalho é apresentar um modelo numérico preliminar para prever a região a ser descartada durante o lingotamento de aços de qualidades distintas utilizando-se um mesmo distribuidor, para uma máquina de lingotamento contínuo de tarugos com quatro veios. As seções lingotadas nesta máquina são quadradas de 155mm e 185mm de lado. Este modelo deve considerar também diversas condições transientes de lingotamento, incluindo variação de velocidade de lingotamento e de fluxo de aço em função do tempo. Através da utilização deste modelo é possível definir condições otimizadas do sequenciamento de aços de qualidades distintas, visando o mínimo de descarte e o máximo em determinação correta da região a ser descartada. Esta otimização pode ser feita para parâmetros como velocidade de lingotamento, quantidade de aço no distribuidor, bem como para otimizar a melhor sequencia de lingotamento para os diferentes tipos de aço.

O desenvolvimento deste modelo deu-se pelo modelamento matemático e previsão teórica da mistura de aço dentro do distribuidor, sendo validado posteriormente por resultados reais obtidos na planta.

## **2 OBJETIVOS**

O principal objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um modelo matemático para a compreensão do sequenciamento de aços de qualidades distintas em um mesmo distribuidor.

A partir do conhecimento do comportamento do aço dentro do distribuidor em um regime transiente objetiva-se modelar e prever a região formada por heterogeneidade química dos aços entre primeira e segunda panela.

Este trabalho também objetiva a otimização das condições operacionais estudadas pelo modelo para reduzir o descarte e garantir a padronização e reprodutibilidade da operação de sequenciamento de aços de qualidades distintas.

## **3 MATERIAIS E MÉTODOS - DESENVOLVIMENTO DO MODELO**

### **3.1 Critérios de Desenvolvimento do Modelo**

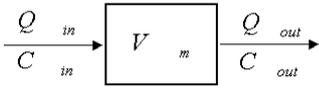
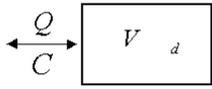
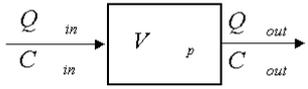
A primeira premissa do modelo assume que o fluxo de aço dentro do distribuidor durante a troca de panelas é altamente turbulento. Assim sendo, a difusividade turbulenta é muito maior do que a difusividade molecular. Portanto, pode-se assumir que todas as espécies químicas terão o mesmo comportamento, conforme confirmado na validação na planta. Assim sendo, a concentração pode ser calculada por uma única função adimensional ( $C(t)$ ) definida por:

$$C(t) = \frac{C(t) - C_{old}}{C_{new} - C_{old}} \quad (1)$$

O valor da concentração adimensional pode assumir qualquer valor entre 0 (composição da primeira panela) e 1 (composição da segunda panela). A partir desta concentração adimensional, pode-se calcular a concentração de qualquer espécie química utilizando-se a Equação 1.

Neste modelo são considerados três tipos de volumes: volume de mistura, volume pistonado e volume morto. As equações básicas do modelo são derivadas da equação de conservação de massa, considerando-se cada volume e cada composição química envolvidos. Os volumes de mistura são considerados perfeitamente misturados, não apresentando heterogeneidade de composição química dentro de um determinado volume. O fluxo pistonado presente no distribuidor causa um atraso ( $tp$ ) na concentração de saída do tundish. A Tabela 1 apresenta as definições e equações referentes aos três volumes.

**Tabela 1.** Descrição dos volumes básicos utilizados.

Equação	Volume de Mistura ( $V_m$ )	Volume Morto ( $V_d$ )	Volume Pistonado ( $V_p$ )
Conservação de massa			
Conservação de massa de um elemento químico	$\frac{dV_m}{dt} = Q_{out} - Q_{in}$ $\frac{dC_{out}}{dt} = \frac{Q_{in}}{V_m} (C_m - C_{out})$	$\frac{dV_d}{dt} = \pm Q$ $C \neq f(Q, V)$	$\frac{dV_p}{dt} = Q_{out} - Q_{in}$ $C_{out} = C_m \left( t - \frac{V_p}{Q_{in}} \right)$

### 3.2 Modelamento do Fluxo Dentro do Tundish

O fluxo de aço dentro do tundish foi modelado considerando-se uma subdivisão do volume total em diversos volumes parciais deste. Considerando-se tratar-se de um tundish de quatro veios e simétrico, modelou-se apenas metade de seu volume assumindo-se a outra metade como apresentando o mesmo comportamento. Outra aproximação efetuada foi considerar-se a mistura e transição de composição como sendo um processo isotérmico, o que nem sempre é uma realidade na prática. Na Figura 2 é apresentado um esquema da distribuição dos volumes em um semi tundish considerando-se um veio externo e um veio interno.

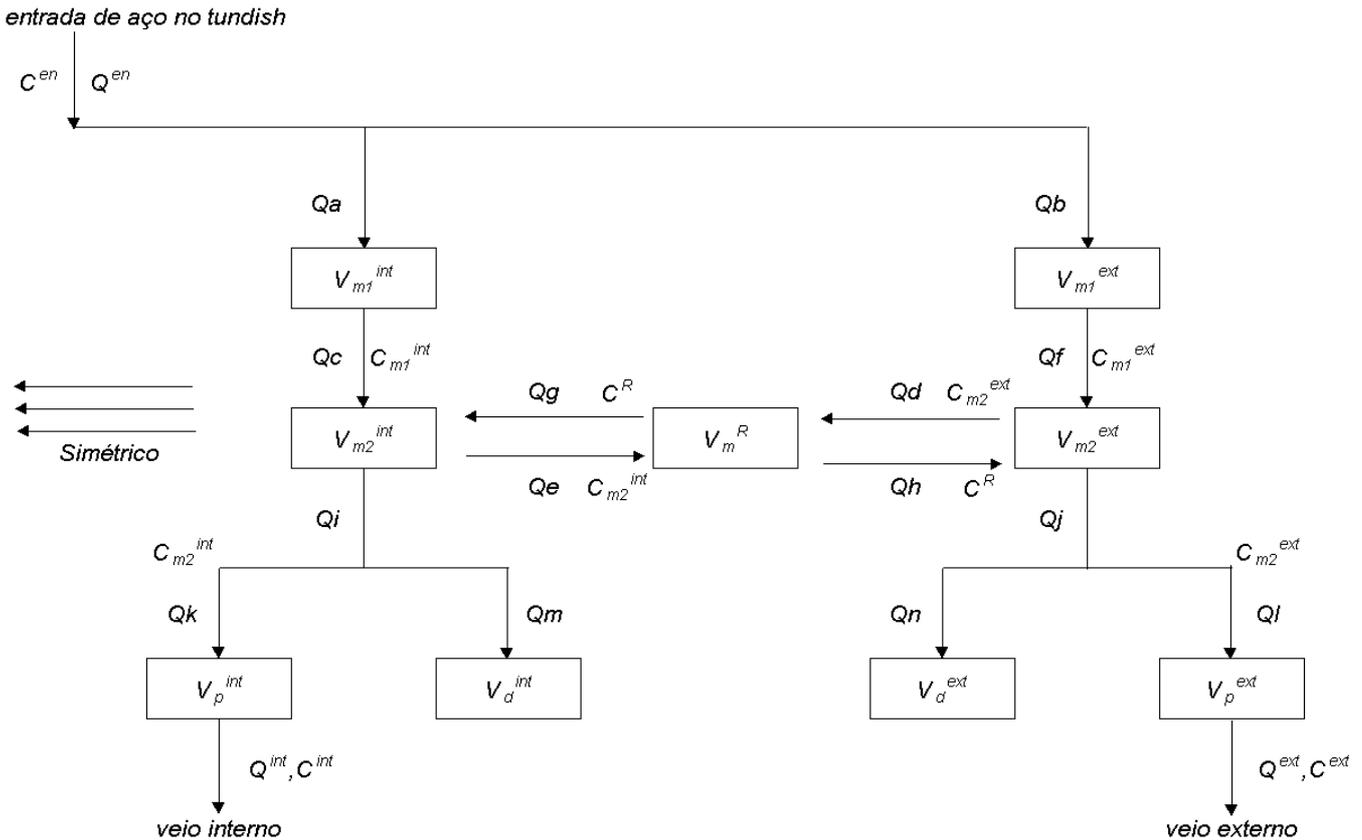


Figura 2. Representação esquemática dos Volumes definidos no Semi Tundish

Assim sendo, ocorre uma clara separação entre dois grupos principais de volumes associados à condição de veio interno (*int*) ou externo (*ext*). Cada um destes fluxos consiste em dois fluxos de mistura ( $V_{m1}$  e  $V_{m2}$ ), um volume morto ( $V_d$ ) e um volume pistonado ( $V_p$ ). Para calcular o fluxo de material recirculado existe ainda um volume de mistura de recirculação ( $V_{mR}$ ).

Equações Envolvidas:

$$Q_a = x_a Q^{en}$$

$$Q_c = x_c Q_i$$

$$Q_e = Q_a - dV_{m1}^{int} / dt$$

$$Q_h = Q_d + Q_j - Q_f + dV_{m2}^{ext} / dt$$

$$Q_i = Q_k + Q_m$$

$$Q_k = Q^{int} + dV_p^{int} / dt$$

$$Q_m = dV_d^{int} / dt$$

$$Q_b = Q^{en} - Q_a$$

$$Q_d = x_d Q_j$$

$$Q_f = Q_b - dV_{m1}^{ext} / dt$$

$$Q_g = Q_c + Q_i - Q_e + dV_{m2}^{int} / dt$$

$$Q_j = Q_l + Q_n$$

$$Q_l = Q^{ext} + dV_p^{ext} / dt$$

$$Q_n = dV_d^{ext} / dt$$

$$\begin{aligned}
C^{int} &= C_{m2}^{int}(t - t_p^{int}) & C^{ext} &= C_{m2}^{ext}(t - t_p^{ext}) \\
dC_{m1}^{int}/dt &= Q_a(C^{en} - C_{m1}^{int})/V_{m1}^{int} & dC_{m1}^{ext}/dt &= Q_b(C^{en} - C_{m1}^{ext})/V_{m1}^{ext} \\
dC_{m2}^{int}/dt &= (Q_e C_{m1}^{int} + Q_g C^R - (Q_g + Q_e)C_{m2}^{int})/V_{m2}^{int} \\
dC_{m2}^{ext}/dt &= (Q_f C_{m1}^{ext} + Q_h C^R - (Q_f + Q_h)C_{m2}^{ext})/V_{m2}^{ext} \\
dC^R/dt &= (Q_d C_{m2}^{ext} + Q_e C_{m2}^{int} - (Q_d + Q_e)C^R)/V_m^R
\end{aligned}$$

A partir destas equações, o fluxo total de aço entrando no tundish ( $Q^{en}$ ) e saindo do tundish ( $Q^{int} + Q^{ext}$ ) são valores conhecidos em função do tempo e são dados de entrada para o modelo. Assim sendo o valor do volume do meio tundish considerado ( $V^T$ ) também é conhecido em função do tempo.

### 3.3 Controle do Nível do Tundish Durante a Transição

Durante a operação normal de lingotamento, o nível do tundish é mantido relativamente constante com o valor de  $W_{tundish}$ . Nesta situação, o fluxo de aço entrando e saindo do distribuidor é constante, para a manutenção de regime permanente, e é dado por  $Q_{permanente}$ . Este fluxo é definido pela seção lingotada e a velocidade de lingotamento, podendo ser facilmente calculado. No momento da troca de painéis, o nível do distribuidor é trazido para um mínimo operacional, visando reduzir a quantidade de aço a ser misturado com o aço da próxima panela. Este valor é definido como  $W_{drain}$ . Existem duas possibilidades para o enchimento do tundish após abertura de uma panela; o procedimento de simples diluição e o de dupla diluição.

- **Simple Diluição** consiste no enchimento do volume total do tundish na máxima velocidade possível; Desta forma é estabelecido o fluxo  $Q_{SD}$  maior que  $Q_{permanente}$  de modo a encher rapidamente o distribuidor.
- **Dupla Diluição** consiste em manter-se um fluxo pequeno  $Q_{DD}$  durante algum tempo de operação de maneira a permitir que o nível do tundish seja mantido baixo durante toda a etapa de diluição no sequencial de aços de qualidades distintas.

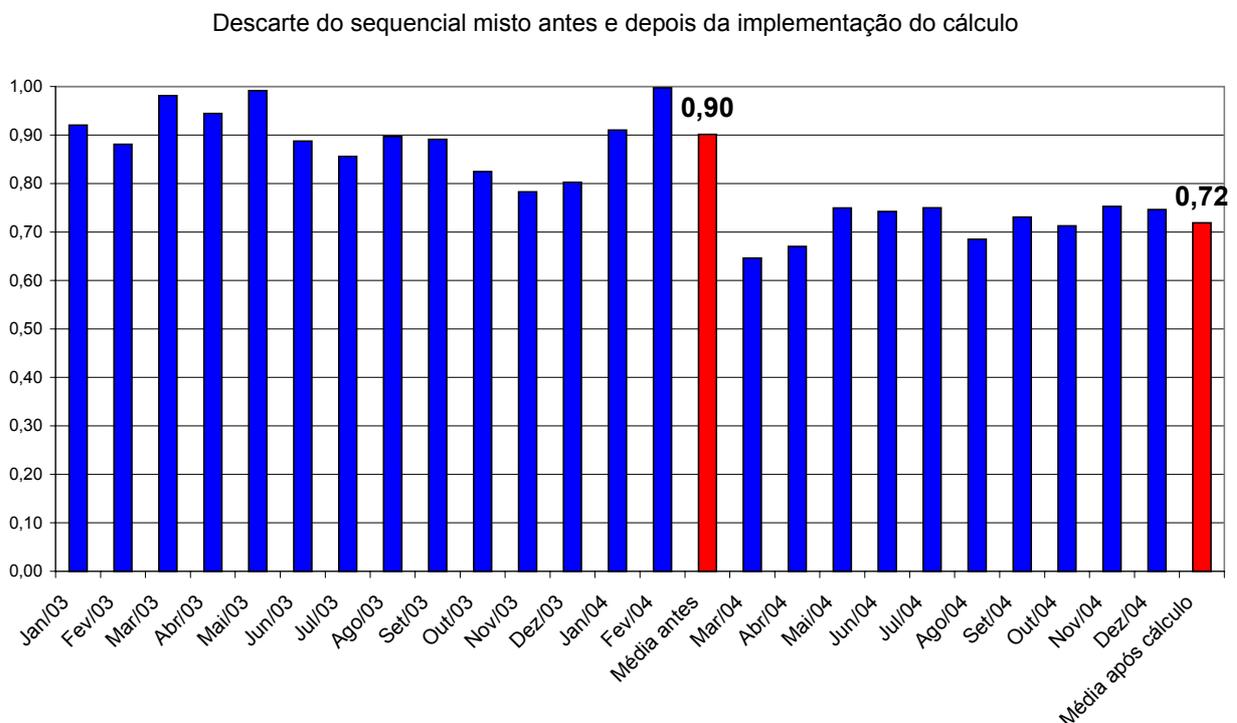
## 4 RESULTADOS

### 4.1 Resultados Operacionais da Implantação do Modelo

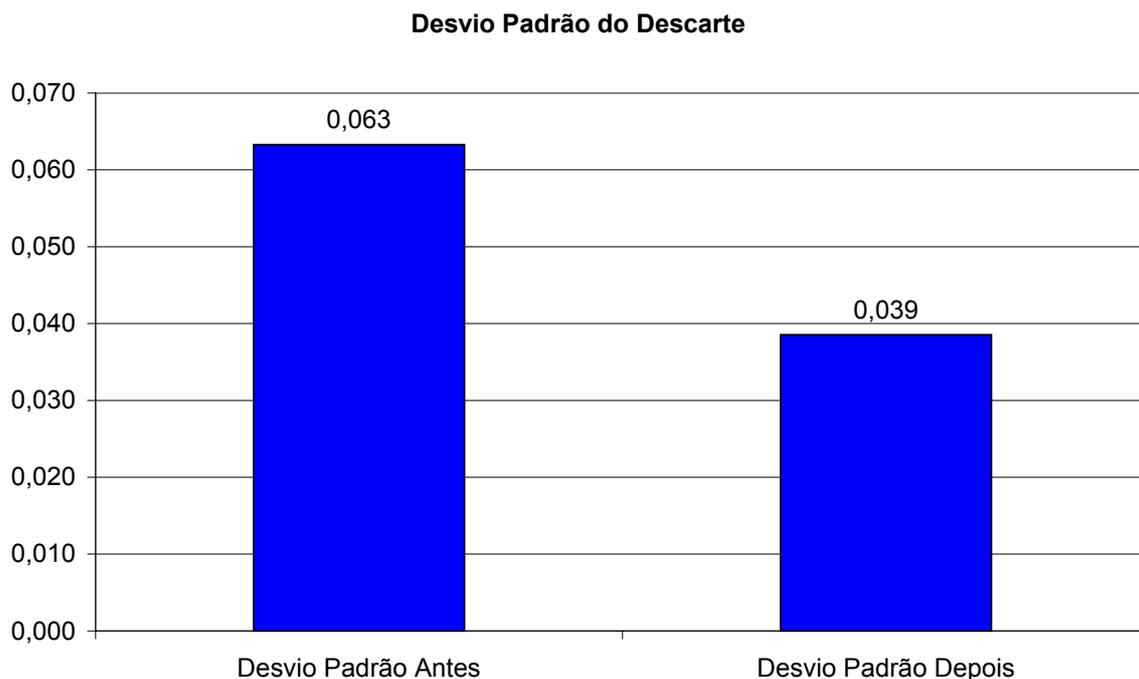
O objetivo principal da implantação deste modelamento foi a otimização da prática de sequenciamento de aços de qualidades distintas. Através desta otimização visava-se melhorar a confiabilidade do cálculo de descarte da material heterogêneo gerado durante o sequenciamento de aços de qualidades distintas num mesmo distribuidor. Com esta melhoria na confiabilidade torna-se possível manter-se a reprodutibilidade da operação, possibilitando a redução do descarte total de material. Quando o descarte calculado não é suficiente para eliminar toda a região heterogênea gerada, faz-se necessário o sucataamento dos tarugos posteriores ao descarte efetuado, aumentando o descarte total realizado. Desta forma, com um

cálculo mais refinado é possível aumentar-se o descarte calculado em alguns casos de maior diferença de composição química entre primeira e segunda panelas, mesmo assim mantendo-se a média de descarte por sequencial de aços diferentes mais baixa do que na condição anterior.

Assim sendo, os indicadores utilizados para a avaliação dos resultados da implementação do cálculo de descarte em sequenciais de aços de qualidades distintas em um mesmo distribuidor foram: Toneladas de aço descartadas por sequencial de aços de qualidades distintas (média mensal) e Desvio Padrão das toneladas descartadas por sequencial de aços de qualidades distintas. Estes indicadores são apresentados nas Figuras 3 e 4 abaixo, para comparação da situação antes e da situação depois da implementação das melhorias no cálculo. Nessas figuras não são apresentados valores absolutos em toneladas, mas sim valores proporcionais que indicam a redução tanto de toneladas descartadas quanto no desvio padrão mês a mês.



**Figura 3.** Descarte por heterogeneidade química por sequencial de aços de qualidade distinta



**Figura 4.** Comparação entre desvios padrão do processo de descarte antes e depois da implantação do modelo de cálculo

## 5 CONCLUSÕES

O sequenciamento de aços de qualidades distintas em um mesmo distribuidor na máquina de lingotamento contínuo de Aços Villares S/A – Usina Mogi das Cruzes foi estudado e um modelo matemático desenvolvido. As principais conclusões obtidas deste estudo são apresentadas a seguir:

1. Com o estudo do modelo matemático proposto para a análise de sequenciamento de aços de qualidades distintas em um mesmo distribuidor conseguiu-se a determinação da distribuição dos volumes de mistura dentro de um distribuidor de uma máquina de quatro veios de tarugos quadrados nas seções de 155 mm e 185 mm. A partir desta distribuição de volumes pode-se determinar a distribuição de fluxo de aço entre os veios, considerando-se fluxo pistonado.
2. O modelo permite sua aplicação a situações de regime transiente, ou seja em momentos de troca de panela e enchimento e esvaziamento do distribuidor.
3. Com a aplicação do modelo pode-se concluir também que a utilização do método da *Dupla Diluição* no enchimento do tundish gera menor quantidade de descarte por material heterogêneo do que no método da simples diluição.
4. A simplicidade do modelo permite uma aplicação na própria planta para a determinação do corte dos tarugos que apresentam heterogeneidade química durante o lingotamento, a partir de estimativa da composição final da corrida de aço a ser obtida.
5. O descarte médio por sequencial de aços de qualidades distintas foi reduzido em 20% após a implementação do modelo aplicado diretamente na produção.
6. O desvio padrão da média de descarte por sequencial de aços de qualidades distintas foi reduzido em cerca de 40%, o que representa uma melhor estabilidade e reprodutibilidade de processo no cálculo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 TANCREDO, G. A.; SANTOS, A. C. Sequenciamento de aços de qualidades distintas no lingotamento contínuo. In: SIMPÓSIO INTERNO DA UNIDADE ESTRATÉGICA DE NEGÓCIO DA CONSTRUÇÃO MECÂNICA - AÇOS VILLARES S.A. – MOGI DAS CRUZES, SP, 4., 1999, Mogi das Cruzes. **Anais...**

## BIBLIOGRAFIA

- 1 PICCONE, T. J.; SINHA, A. K.; MADDEN, M. A. Intermix trials at Gary no. 2 caster using different Tundish configurations. In: 2001 STEELMAKING CONFERENCE, 2001. **Proceedings...** p. 101-110.
- 2 GOLDSCHMIT, M. B.; FERRO, S. P.; WALTER, G. F.; ARANDA, V. G.; MORELOS, J. A. T. Numerical model for the minimization of intermixed round bars in a four line continuous caster. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 32B, p. 537-546, Jun. 2001
- 3 MORALES, R. D.; BARRETO, J. J.; LÓPEZ-RAMIREZ, S.; PALAFOX-RAMOS, J.; ZACHARIAS, D. Melt flow control in a multistrand Tundish using a turbulence inhibitor. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 31B, p. 1505-1515, dec. 2000

# SEQUENTIAL CASTING OF DIFFERENTE STEEL GRADES WITHOUT TUNDISH CHANGE IN THE CONTINUOUS CASTING <sup>(1)</sup>

*Marcelo Carboneri Carboni <sup>(2)</sup>  
André Siqueira de Lima <sup>(3)</sup>  
Alexandre Silveira de Azevedo <sup>(4)</sup>  
José Roberto Bolota <sup>(5)</sup>*

## **Abstract**

The present work aims to develop a mathematical model to predict the length of the transition zone from one steel grade to the other, cast in the same tundish. This length is very important for segregating the region that must be discarded by chemical heterogeneity and the region applicable as good product. The methodology employed consists on the development of a theoretical model, based on mass transfer on chemical interaction of the species present in the steel grades, and the adjust of this model to the real situation of casting, involving more variables. The variables considered for this model are: chemical composition differences, amounts of steel involved, casting speed and tundish geometry. As a result for this work a model with very sensible entries was developed. This model is used during the casting of different steel grades in the continuous casting machine. By means of this model it is possible to predict the length of the intermix zone of the casting, allowing the proper segregation of the length to be discarded. With the use of this model it is possible to guarantee higher reliability on the calculation of the intermix zone length and to reduce the amount of material discarded this way.

**Key- words:** sequential casting, different grades, intermix, mathematical model

(6) Trabalho enviado ao XXXVI Seminário de Fusão, Refino e Solidificação, 16 a 18 de Maio de 2005 Vitória ES

(7) *Metallurgical Engineer – Meltshop Process Supervisor – Aços Villares S/A – Mogi das Cruzes Plant*

(8) *Quality Assurance Technician – Billet Yard Monitoring – Aços Villares S/A – Mogi das Cruzes Plant*

(9) *Metallurgist – Continuous Casting Supervisor – Aços Villares S/A – Mogi das Cruzes Plant*

(10) *Metallurgical Engineer – Meltshop Manager – Aços Villares S/A – Mogi das Cruzes Plant*