

OTIMIZAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DO LINGOTAMENTO CONTÍNUO ATRAVÉS DO MODELAMENTO FÍSICO DO DISTRIBUIDOR – VM DO BRASIL E UFOP¹

Fabricio Batista Vieira²
Osvaldo Neto³
Hélio Manetta⁴
César Nery⁵
Carlos Antônio Silva⁶
Frederico Cunha⁷

RESUMO

Neste trabalho é apresentado um desenvolvimento do modelo físico de distribuidor em escala 1/3 sendo uma parceria entre V&M do Brasil e UFOP. Dentro deste projeto procurou-se avaliar a influência de vários fatores na variável tempo de residência. Onde os principais ensaios realizados foram:

- Avaliação de formação de vórtex;
- Emulsificação de escória;
- Assimetria do distribuidor;
- Projeto DOE para maximização do tempo de residência.

Sendo que os principais resultados do trabalho foram:

- O tampão inibe a formação do vórtex;
- As barreiras inibem a propagação da emulsificação;
- Aumento do dique e do nível de aço no distribuidor proporciona um incremento do tempo de residência.
- Assimetrias dos modificadores de fluxo proporciona diferentes tempos de residência no distribuidor

PALAVRAS-CHAVE: Lingotamento contínuo, distribuidor, modelamento físico.

(1) Contribuição técnica a ser apresentada no XXXV Seminário de Fusão, Refino e Solidificação de Metais, 17 a 19 de Maio de 2004, Salvador – BA

(2) Engenheiro Metalurgista, MSc. , Departamento de Aciaria da V&M do Brasil.

(3) Engenheiro Metalurgista, MSc. , Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento da Área Siderúrgica da V&M do Brasil.

(4) Engenheiro Metalurgista, Gerente do Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento da Área Siderúrgica da V&M do Brasil.

(5) Engenheiro Civil, Departamento de Aciaria da V&M do Brasil.

(6) Professor Adjunto da REDEMAT e Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto.

(7) Engenheiro Metalurgista, UFMG.

1 – INTRODUÇÃO

O principal objetivo deste trabalho é estabelecer padrões de operação que permitam manter dentro de limites de qualidades estreitos e aceitáveis as barras lingotadas na VMB, se estendendo a todas qualidades a serem produzidas.

Foram feitos vários experimentos no intuito de estimar o nível mínimo do aço no distribuidor em que é possível determinar a formação do vórtex; maximizar o tempo de permanência do aço neste e minimizar a ocorrência de emulsificação de escória.

Os primeiros resultados apresentados se referem ao nível do distribuidor para a formação do vórtex. Sabe-se que a formação deste age de forma propícia a aumentar o arraste de escória no lingotamento. A partir deste trabalho determinou-se o nível de aço mínimo em que o distribuidor pode trabalhar evitando-se a formação do vórtex em condições diversas.

Depois são apresentados resultados relativos à emulsificação de escória. São mostrados os papéis positivos do uso de barragens e diques e abertura submersa; minimizando esta emulsificação e reduzindo o desgaste da válvula submersa. Além disso, estes artifícios possibilitam uma melhor qualidade do aço lingotado, já que aumenta o tempo de residência no distribuidor e diminui a Fração de Volume Morto e o Descarte gerado.

Os outros experimentos têm a finalidade de discutir as assimetrias de montagem geradas por erros de posicionamento dos diques/barragens e discutir os seus resultados, indicando as diferenças dos parâmetros estimados comparados à montagem padrão. São também mostrados os resultados operacionais obtidos quando se trabalha com o tubo longo fora de sua posição ideal, ou seja, inclinado. No uso do Tubo Longo inclinado percebe-se diferenças nos tempos de residência entre os veios, onde na prática pode propiciar heterogeneidade no comportamento fluido e térmico do aço.

2 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O modelo deste distribuidor foi construído em escala 1:3. Como consideração preliminar de similaridade, para se determinar as condições específicas do modelo, foi considerada a igualdade do adimensional de Froude no protótipo e no modelo. Portanto as equações que relacionam os valores de variáveis de modelo com aquelas da prática industrial são como seguem:

Razão entre grandezas no modelo/protótipo					
Dimensões	Áreas	Volumes	Velocidades	Vazões	Tempos
λ	λ^2	λ^3	$\lambda^{1/2}$	$\lambda^{5/2}$	$\lambda^{1/2}$

Os experimentos requerem o controle de vazão de entrada e saída do líquido no distribuidor; medição da condutividade (concentração de sal) de entrada e saída nos veios. Estes dados, também o tempo decorrido nos experimentos, são

colhidos e armazenados em um computador através de uma placa de aquisição A/D, para controle do processo e para análise posterior.

Regime permanente :

Embora a montagem construída seja adequada à determinação da função Distribuição de Probabilidades dos Tempos de Residência (comumente chamada de Distribuição dos Tempos de Residência ou DTR) seja através da técnica de Adição de Traçador em Degrau ou da técnica de Adição de Traçador em Pulso, esta última foi escolhida por razões de conveniência. O pulso é obtido pela injeção de solução aquosa de KCl, junto ao tubo Longo. Vários parâmetros podem ser gerados a partir da curva "concentração de traçador versus tempo", obtidas para cada veio. Uma curva típica gerada nos experimentos é mostrada, esquematicamente, na Figura 2.1.

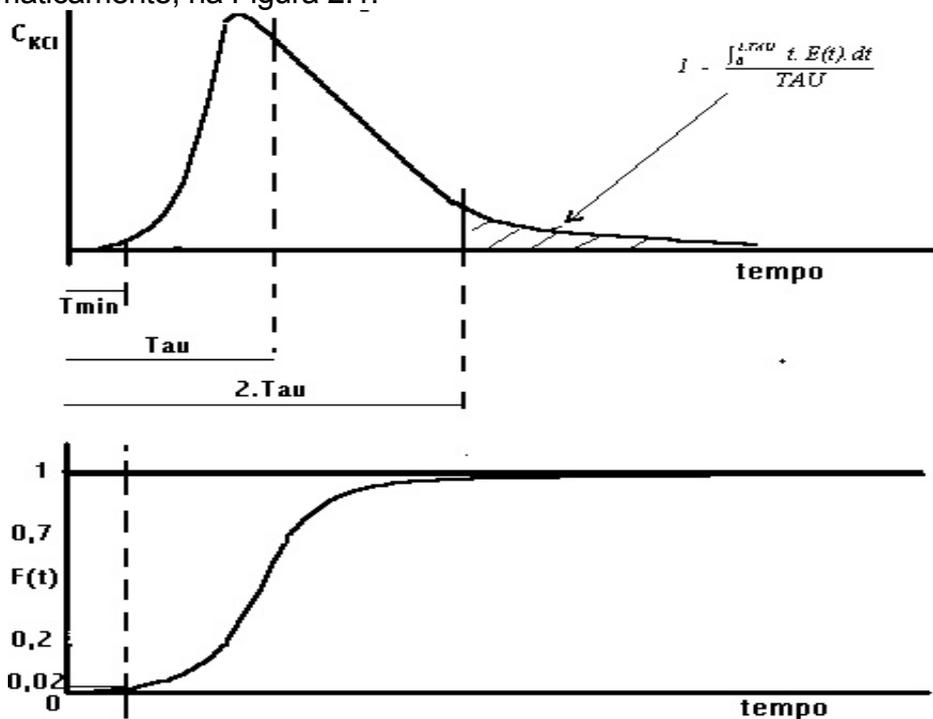


Figura 2.1: Curva típica concentração vs tempo e a curva cumulativa resultante

E(t) - Função distribuição de probabilidade dos tempos de residência, DTR. Esta função é calculada diretamente a partir da curva "concentração de traçador vs tempo", em função de sua definição estatística, que requer que o produto $E(t).dt$ forneça a fração de elementos de fluido que apresentam tempo de residência entre os valores t e $t+dt$. Esta função é característica do reator e de seu regime de funcionamento e, naturalmente, específica de cada veio. Entretanto a mesma função $E(t)$ pode ser obtida em configurações diferentes, de modo que a mesma sozinha, não é capaz de caracterizar completamente o fluxo. $E(t)$ se calcula como,

$$E(t) = \frac{QC_T}{M} = \frac{QC_T}{\int_0^{\infty} C_T \cdot dt} \quad (1)$$

onde são valores característicos de cada veio:

- Q vazão volumétrica (L/s);
- C_T concentração de traçador KCl (g/L);
- M quantidade de traçador que sai pelo veio (g);
- t tempo (s).

F(t) - Função cumulativa de distribuição dos tempos de residência

Por definição F(t) fornece a fração de elementos de fluido com tempo de residência inferior a t. Portanto,

$$F(t) = \int_0^t E(t).dt \quad (2)$$

F(t) é o produto natural da técnica de adição em degrau e logo pode ser utilizada para a avaliação do grau de misturamento do líquido de duas panelas seqüenciais no distribuidor. Por exemplo, se uma panela com aço de composição C_1 fosse imediatamente substituída por outra, com aço de composição C_2 , um sensor localizado na saída do distribuidor registraria uma curva do tipo

$$\frac{C - C_1}{C_2 - C_1} = F(t) \quad (3)$$

Neste trabalho escolheu-se concentrar as atenções nos seguintes parâmetros:

- *Tau* (s): Tempo médio de residência
- *t* 2% (s): Tempo necessário para que 2% do traçador alcance o veio
- *FVM*: Fração Volumétrica correspondente ao Volume Morto
- *r* 50: Variável associada ao tempo de flotação de inclusões de 50 μ m. Uma melhora do processo acarreta em aumento desta variável
- *D(ton)*: Quantidade de descarte em toneladas gerada por veio

3) RESULTADOS EXPERIMENTAIS

3.1 - Formação de Vórtex:

Os testes confirmam a característica do corpo cilíndrico do tampão, de inibir a formação de vórtices. Observa-se que os vórtices se formam prematuramente na ausência do tampão; que são praticamente inexistentes para pequenas aberturas.

Testes	Veio nº3 (mm) Interno		Veio nº4 (mm) Externo	
	com barreiras	sem barreiras	com barreiras	sem barreiras
1	21	8	38	10
2	20	7	38	9
3	21	8	38	10

Tabela 3.1: Altura de formação do vórtex à vazão de entrada de 12 L/min. Distribuidor sem tampão

Testes	Veio 3 (mm) Interno		Veio 4 (mm) Externo	
	com barreiras	sem barreiras	com barreiras	sem barreiras
1	13	9	7	6
2	13	9	7	7
3	14	8	8	7

Tabela 3.2: Altura de formação do vórtex à vazão de entrada de 12 L/min. Altura do tampão de 20 mm

3.2 - Emulsificação de escória

Neste experimento, foi visto que o uso de barragens direcionadoras de fluxo age positivamente no processo.

O fato destas diminuírem a emulsificação da escória no distribuidor tem um efeito importante na performance operacional do lingotamento, haja visto que desta forma diminuem o ataque no tampão e minimiza o arraste de inclusões provenientes da escória do distribuidor.

3.3 - Distribuidor com obstáculos direcionadores de fluxo & assimetrias de montagem

A Tabela 3.3 apresenta os valores médios por veio, para o caso em que se considera a válvula longa inclinada 5 graus em relação à vertical, na direção dos veios 1 e 2.

Observa-se, como esperado, uma grande discrepância quanto aos tempos de residência (Tau): estes são menores nos veios 1 e 2 quando comparados com os tempos mínimos dos veios 3 e 4, respectivamente, ocasionando uma queda na qualidade do processo em relação ao uso do tubo longo na vertical, já que ocasiona diferenças nos tempos de residência no distribuidor e perfis de temperatura mais heterogêneos, comprometendo a qualidade do processo.

Veio	ton/min	Tau(s)	t 2% (s)	FVM	r50	D(ton)
1	0,278	648	116,28	0,351	1380	2,642
4	0,279	669	157,67	0,306	1827	2,510
2	0,277	539	46,76	0,361	579	2,269
3	0,279	644	65,5	0,351	795	2,699

Tabela 3.3: Tubo Longo a 5 graus à vertical na direção dos veios 1 e 2; vazão 1,10 ton/min

4 – PROJETOS DE EXPERIMENTOS (DOE)

Tempo de residência de inclusões

Visando reconhecer a influência de alguns fatores ainda não testados em outros experimentos sobre o tempo de residência das inclusões elaborou-se um projeto experimento para tal finalidade. Os fatores avaliados foram:

- tipo de configuração de dique, níveis: com furo aberto e furo fechado;
- altura de aço no distribuidor, níveis: 600mm e 750mm;
- profundidade de imersão do tubo longo na lamina de aço no distribuidor, níveis: 150mm e 300mm;
- vazão mássica, níveis: 280kg/min e 400kg/min;
- altura do dique: altura padrão (285mm) e 20% mais alto (342mm);
- abaixamento da barragem: abaixamento padrão (530mm medido do topo do distribuidor) e 20% menos baixa (20% mais alto-424mm).

Pelo método DOE permitiu-se realizar 32 eventos. Cada evento foi repetido seis vezes no modelo físico do distribuidor da UFOP. Mediu-se assim o tempo de residência.

Tipo de Furo	Altura de aço no Distribuidor	Profundidade imersão Tubo Longo	Vazão mássica	Altura do Dique	Abaixamento da Barragem	t2% 1 & 4	t2% 2 & 3
Furo Fechado	600mm	300mm	280kg/min	20% mais Alto	20% menos Baixo	195,89	80,14
Furo Aberto	600mm	300mm	400kg/min	Altura padrão	Abaixamento padrão	134,17	49,58
Furo Aberto	750mm	150mm	200kg/min	20% mais Alto	Abaixamento padrão	139,933	58,227
Furo Aberto	600mm	150mm	400kg/min	Altura padrão	20% menos Baixo	111,3	48,336
Furo Aberto	750mm	300mm	280kg/min	20% mais Alto	20% menos Baixo	143,55	56,062
Furo Aberto	750mm	150mm	400kg/min	20% mais Alto	20% menos Baixo	140,235	56,225
Furo Fechado	600mm	150mm	280kg/min	Altura padrão	20% menos Baixo	136,46	53,4
Furo Aberto	600mm	300mm	400kg/min	20% mais Alto	20% menos Baixo	119,83	51,236
Furo Fechado	600mm	300mm	400kg/min	Altura padrão	20% menos Baixo	118,586	53,3
Furo Aberto	750mm	300mm	400kg/min	Altura padrão	20% menos Baixo	150,61	59,745
Furo Fechado	750mm	150mm	280kg/min	Altura padrão	Abaixamento padrão	181,83	66,7
Furo Aberto	750mm	300mm	400kg/min	20% mais Alto	Abaixamento padrão	133,69	49,21
Furo Fechado	600mm	150mm	400kg/min	Altura padrão	Abaixamento padrão	128,5	51,67
Furo Fechado	600mm	150mm	400kg/min	20% mais Alto	20% menos Baixo	139,41	53,366
Furo Aberto	750mm	300mm	280kg/min	Altura padrão	Abaixamento padrão	134,49	59,478
Furo Aberto	600mm	150mm	400kg/min	20% mais Alto	Abaixamento padrão	135,495	44,245
Furo Fechado	750mm	150mm	280kg/min	20% mais Alto	20% menos Baixo	153,95	60,45
Furo Fechado	750mm	150mm	400kg/min	20% mais Alto	Abaixamento padrão	143,99	56,13
Furo Fechado	600mm	300mm	280kg/min	Altura padrão	Abaixamento padrão	151,27	56,33
Furo Aberto	600mm	150mm	280kg/min	Altura padrão	Abaixamento padrão	147,438	49,918
Furo Fechado	750mm	300mm	400kg/min	20% mais Alto	20% menos Baixo	137,99	54,756
Furo Aberto	600mm	150mm	280kg/min	20% mais Alto	20% menos Baixo	135,47	49,691
Furo Aberto	600mm	300mm	200kg/min	Altura padrão	20% menos Baixo	132,46	44,3
Furo Aberto	750mm	150mm	280kg/min	Altura padrão	20% menos Baixo	157,82	56,23
Furo Fechado	750mm	300mm	280kg/min	20% mais Alto	Abaixamento padrão	142,74	107,93
Furo Fechado	750mm	150mm	400kg/min	Altura padrão	20% menos Baixo	146,88	62,17
Furo Fechado	750mm	300mm	280kg/min	Altura padrão	20% menos Baixo	131,252	51,26
Furo Fechado	750mm	300mm	400kg/min	Altura padrão	Abaixamento padrão	139,83	53,86
Furo Fechado	600mm	300mm	400kg/min	20% mais Alto	Abaixamento padrão	118,79	52,93
Furo Aberto	750mm	150mm	400kg/min	Altura padrão	Abaixamento padrão	142,06	55,31
Furo Fechado	600mm	150mm	280kg/min	20% mais Alto	Abaixamento padrão	134,025	60,54
Furo Aberto	600mm	300mm	280kg/min	20% mais Alto	Abaixamento padrão	140,477	54,480

Tabela 4.1: Projeto de experimentos.

Após o registro dos resultados experimentais realizou-se a análise estatística dos dados para reconhecer quais os fatores testados realmente influenciam significativamente. A figura 4.1 mostra o gráfico de Pareto obtido.

Pareto Chart of the Effects: Tempo de residência para inclusões nos veios 1 e 4

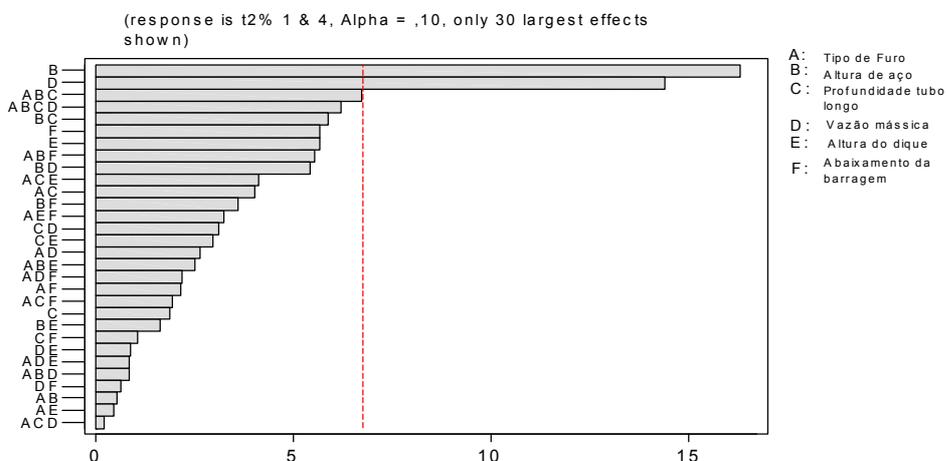


Figura 4.1: Gráfico de Pareto para os fatores importantes sobre o tempo médio de residência das inclusões para o escoamento nos veios 1 e 4.

Conforme pode ser visto na figura 4.1 os fatores importantes para o tempo de residência das inclusões nos veios 1 e 4 foram:

- de forma isolada, a altura de aço no distribuidor durante o lingotamento;
- de forma isolada, a vazão mássica de aço escoando pelos veios;
- de forma combinada, a configuração de barragem (com furo ou sem furo) com a altura de aço no distribuidor e a profundidade de imersão do tubo longo na lamina de aço do distribuidor.

Já para os veios 2 e 3 os valores determinados foram:

- de forma isolada, a altura de aço no distribuidor durante o lingotamento;
- de forma isolada, a vazão mássica de aço escoando pelos veios e o abaixamento da barragem;
- de forma combinada, a vazão mássica de aço escoando pelos veios e a altura dos diques.

Tendo sido identificados os fatores que realmente contribuem para a formação da variável tempo de residência das inclusões, resta-nos saber quais os níveis devem ser selecionados para a maximização desses tempos para os pares de veios. Dessa forma os gráficos dos efeitos foram construídos e podem ser mostrados nas figuras 4.2 e 4.3.

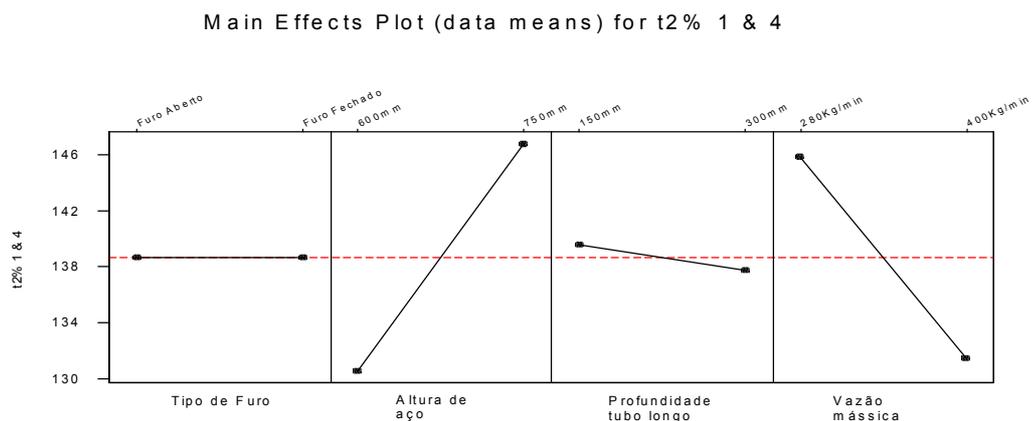


Figura 4.2: Gráficos dos principais efeitos sobre os tempos médios de residência das inclusões para os veios 1 e 4.

De forma isolada pode-se perceber pela figura 4.2 que:

- o tipo de configuração de dique, apesar de ter sido apontada como um fator importante, não apresenta efeito significativo sobre a variável resposta, o que pode ser considerado como uma resposta coerente em relação ao mecanismo de escoamento para os veios 1 e 4;
- a altura de aço no distribuidor em 750mm maximiza o tempo de residência;
- a profundidade do tubo longo foi apontada de forma isolada, e apresentando 150mm de penetração como sendo o nível que poderia maximizar o tempo de residência das inclusões para os veios 1 e 4;

- a vazão mássica de aço no distribuidor em 280kg/min foi apontada como maximizadora para o tempo de residência das inclusões para os veios 1 e 4.

A análise dos efeitos dos níveis dos fatores para o tempo de residência das inclusões nos veios 2 e 3 pode ser vista na figura 4.3.

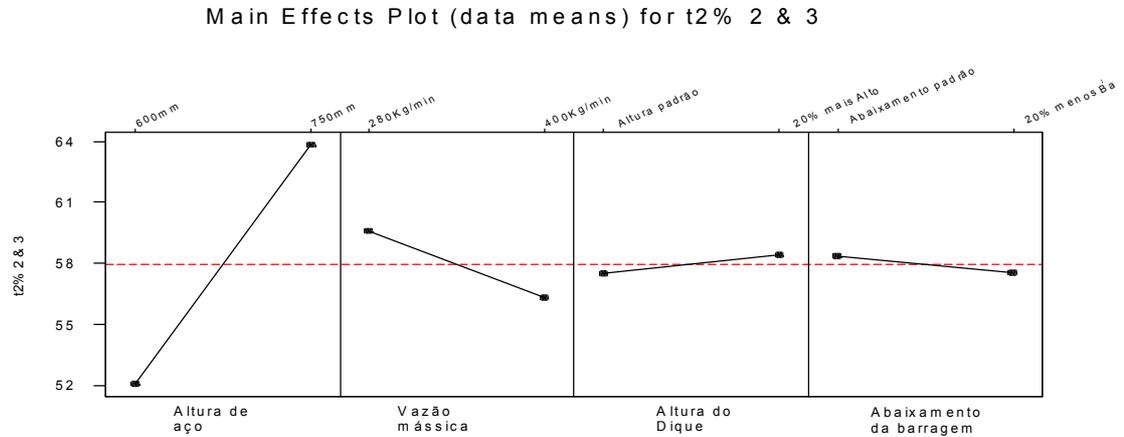


Figura 4.3: Gráficos dos principais efeitos sobre o tempo médio de residência das inclusões para os veios 2 e 3.

Assim pode ser dito a respeito da figura 4.3:

- A altura de aço no distribuidor e a vazão mássica foram novamente apontadas com 750mm e 280kg/min para a otimização do processo;
- A altura do dique em 20% mais elevada torna o tempo de residência das inclusões ligeiramente mais alto;
- O abaixamento da barragem no formato padrão torna o tempo de residência das inclusões ligeiramente mais alto;

5 – CONCLUSÕES

A) Formação de Vórtex:

- O tampão inibe a formação de vórtex;
- As barreiras têm pouca influência quanto aos veios externos, porém nos veios internos o curto circuito gerado pelo furo de escoamento facilita a formação do vórtex;
- De qualquer forma o vórtex é formado em baixos níveis de aço no distribuidor; deve-se portanto evitar trabalhar em níveis baixos de aço e/ou grandes aberturas do tampão;

B) Emulsificação de escória:

- O uso de barragens direcionadoras de Fluxo age de forma positiva no processo, diminuindo a propagação da emulsificação no distribuidor.

C) Distribuidor sem obstáculos direcionadores de fluxo vs Distribuidor com barragens padrão

- O uso de barragens e diques minimiza a discrepância entre os tempos de residência do aço observado nos veios internos e externos;
- A profundidade de imersão da válvula apresenta pouca influência sobre a maioria dos parâmetros avaliados,
- Um maior nível de aço no distribuidor aumenta o tempo de residência e o t₂%, indicando uma significativa melhora no processo.

D) Distribuidor com obstáculos direcionadores de fluxo & assimetrias de montagem

- O processo com qualquer inclinação do tubo longo ocasiona uma queda de qualidade deste, já que desta forma os tempos de residência entre os veios à direita e à esquerda se diferem, gerando diferentes perfis de temperatura no distribuidor

E) Projeto de Experimentos (DOE)

Tempo de Residência das Inclusões:

Para maximizar o tempo das inclusões no distribuidor deve-se proceder da seguinte forma:

- A configuração do dique é apontada como importante em sua interação com a altura do aço no distribuidor e a profundidade de imersão do tubo longo. Deve-se adotar para a padronização do processo a configuração (furo aberto e fechado), já que não foi possível distinguir um efeito significativo de um dos dois níveis;
- A profundidade de imersão do tubo longo deve ser adotada em 150mm;
- A vazão mássica deve ser adotada em 280kg/min (equivalente às velocidades de lingotamento de 1,4, 1,2 e 0,90m/min para as bitolas 180, 194 e 230mm), sempre que as condições de produtividade assim permitir;
- A altura do dique deve ser adotada em 20% mais elevada;
- O abaixamento da barragem deve permanecer como o método padrão.
- O nível de aço no distribuidor deve ser mantido em 750mm durante o processo.

6 - BIBLIOGRAFIA E REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

01. Heaslip, L.J., McLean, A. and Sommerville, I.D. Continuous Casting, Vol I, **“Chemical and physical interactions during transfer operations”**, Iron and Steel Society, 1983.
02. Szekely J., Evans J.W. and Brimacombe J.K. **“The Mathematical and Physical Modeling of Primary Metals Processing Operating”**, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, cap.3, pp. 69-99, and cap.6, pp.159-195.
03. LEVENSPIEL, O., **“Chemical Reaction Engineering”**, 3a. Ed., John Wiley & Sons, 1998.
04. SZEKELY, J. E ILEGBUSI, O. J., **“Physical and mathematical modelling of tundish operations”**, SpringerVerlag, New York, 1989.
05. CÂMARA, F.; FARIA, R.; Relatórios Técnicos fornecidos pela UFOP.

**STANDARD OPTIMIZATION OF CONTINUOUS CASTING MACHINE
THROUGH OF CONTINUOU CASTING MACHINE TUNDISH PHYSICAL
MODEL DEVELOPED BY V&M BRASIL AND UFOP⁽¹⁾**

**Fabricio Batista Vieira²
Oswaldo Neto³
Hélio Manetta⁴
César Nery⁵
Carlos Antônio Silva⁶
Frederico Cunha⁷**

Abstract

This paper show a development of physical model tundish scale 1/3, this is a join the V&M do Brazil and UFOP. This work analyze the influence of many factor over residence time . The mainly tests were:

- **Vortex Formation;**
- **Slag emulsification;**
- **Assimetry on the tundish;**
- **DOE projects for residence time maximization.**

The mainly results were:

- **Stopper rods avoids the vortex nucleation;**
- **The dams and diques minimize the negative consequences of slag emulsification;**
- **Increase the dique and size of tundish promote a residence time rising.**

Key-Words: Continuous Casting, Tundish, Physical Model

(1) Paper submitted to XXXV Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais, May 17 to 19, 2004, Salvador- BA.

(2) Metallurgical Engineer, MSc. , Steelmaking Department of V&M Brasil.

(3) Metallurgical Engineer, MSc. , Steelmaking Research V&M Brasil.

(4) Metallurgical Engineer, Manager of Steelmaking Research V&M Brasil.

(5) Engineer, Steelmaking Department V&M Brasil.

(6) Professor Adjunto da REDEMAT e Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto.

(7) Metallurgical Engineer, UFMG.