



Rem: Revista Escola de Minas

versão impressa ISSN 0370-4467

Rem, Rev. Esc. Minas v.55 n.1 Ouro Preto jan./mar. 2002

doi: 10.1590/S0370-44672002000100005

Metalurgia & Materiais

Determinação do tempo de mistura numa panela siderúrgica

Julio Aníbal Morales Pereira

Engenheiro Metalúrgico, Doutorando do LASID/PPGEM/UFRGS

E-mail: julio@ct.ufrgs.br

Magda Galant França

Engenheira Química, Dra., Pesquisadora LASID/PPGEM/UFRGS

Antônio Cezar Faria Vilela

Engenheiro Metalúrgico, Dr. Eng., Professor do DEMET/PPGEM/UFRGS

Serviços

- Serviços customizados
- Artigo em XML
- Referências do artigo
- Curriculum ScienTI
- Como citar este artigo
- Acessos
- Citado por SciELO
- Similares em SciELO
- Tradução automática
- Enviar este artigo por email

Resumo

A eficiência do processo de fabricação do aço durante a etapa de refino secundário na panela está relacionada aos fenômenos de mistura. Em função disto, é de muito interesse o conhecimento do estado de mistura que ocorre durante o tratamento do aço líquido na panela tendo em vista a otimização do processo.

Assim sendo, o presente estudo tem como objetivo determinar, através de um modelo físico de uma panela industrial em escala reduzida (1:6), o efeito de variáveis operacionais como: vazão de gás, posição de injeção de gás, adição de traçador e posições de medida, sobre os tempos de mistura na homogeneização do sistema.

A análise dos resultados permite concluir que o tempo de mistura tende a diminuir com um aumento de vazão de gás e que, para injeções de gás a 1/2 raio, encontram-se tempos de mistura superiores do que a injeção a 1/5 raio. Esses resultados encontram-se em concordância com os resultados de outros pesquisadores, no que se refere ao efeito de parede e à escala do modelo.

Palavras-chaves: modelo físico, metalurgia na panela, injeção de gás, tempos de mistura.

Abstract

Production efficiency during the secondary refining stage in the ladle is related to the mixture's phenomena. Because of this, it is very important to understand the mixture's state as it occurs during the liquid steel treatment in the ladle, aiming for process optimization.

So, the present study wants to determine, through a physical model in reduced scale (1:6), the effect of operational variables such as: gas injection, gas injection position, tracer addition and measurement position, and the mixing times in the homogenization system.

The results make it possible to conclude that the mixing time tends to decrease with gas injection increase and that the mixing time at 1/2 radius is greater than the one at 1/5 radius. These results are in accordance with other researchers' papers referring to the wall effect and the model scale.

Keywords: *physical model, ladle metallurgy, gas injection, mixing times.*

1. Introdução

No processo de fabricação do aço, durante a etapa de refino na panela, o aço líquido é agitado por gás inerte com a finalidade de homogeneizá-lo química e termicamente, intensificar as reações banho/escória e remover as inclusões. Para melhorar o desempenho dessas operações metalúrgicas, torna-se importante o entendimento das condições de escoamento e homogeneidade, assim como da taxa de transferência de massa das reações metal-escória que ocorrem durante o tratamento de agitação do aço líquido. Os modelos físicos vêm sendo utilizados em estudos de escoamento e de tempos de mistura em panelas. Com eles é possível, de forma relativamente simples e econômica, verificar a influência de diversos parâmetros, como vazão de gás e posição de injetores, na qualidade do escoamento e da mistura.^(1,2)

Assim sendo, o objetivo desse trabalho é verificar a influência da vazão de gás, da posição de injetores de gás e adição de traçador; no comportamento do escoamento do aço e na determinação dos tempos de mistura.

2. Equipamentos e procedimento experimental

O modelo físico

A [Figura 1](#) mostra as dimensões principais do modelo físico da panela em escala 1:6, correspondente a uma panela industrial de 50 t. O modelo foi construído em acrílico e usa água a temperatura ambiente para simular o aço. O banho é agitado através da injeção de ar comprimido. Essa injeção é realizada através de duas diferentes posições, 1 e 2, no fundo da panela, como mostrado na [Figura 1b](#). A [Tabela 1](#) apresenta um resumo dos parâmetros mais importantes entre o modelo físico e a panela industrial.

Tabela 1 - Modelo de Água x Panela Industrial: parâmetros mais importantes.

	Panela (50 t)	Modelo de Água (1/6)
Fase líquida	Aço	Água
Densidade do líquido (kg/m ³)	7000	1000
Viscosidade Cinemática (m ² /s)	1x10 ⁻⁶	0,91x 10 ⁻⁶
Temperatura (°C)	1600	25
Diâmetro interno (mm)	2084	347
Altura do líquido (mm)	2000	333
Relação H/D	0,96	0,96
Dispositivo de injeção	Plug poroso	Orifício; d=2 mm
Tipo de gás a injetar	Argônio	Ar Comprimido
Vazão de gás (Nl/min)	30-160	2-9,5

Determinação do tempo de mistura

De acordo com o modelo físico mostrado na [Figura 1](#), antes do início de cada ensaio, esperava-se um tempo de quatro (04) minutos após o enchimento da panela com água, a fim de estabilizar o escoamento e garantir uma situação estacionária. Para cada ensaio, uma solução de ácido clorídrico (HCl - 50%) foi utilizada como traçador, onde aproximadamente 5 ml foram injetados na forma de pulso e sua concentração na água foi medida em função do tempo através de um sensor localizado em duas posições: (1) mergulhado a 50 mm da superfície do banho e a 55 mm da parede da panela e (2) introduzido 30 mm pelo fundo da panela na posição de 1/2 raio. As diferentes posições para adição do traçador e localização do sensor são apresentadas na [Figura 2](#). Cada configuração é caracterizada pela posição de injeção do gás (1/5 raio e 1/2 raio), do traçador (T) e do sensor (S). Os tempos de mistura foram determinados, na ausência da camada de escória, adotando-se como critério o valor de mistura de 95%. Define-se tempo de mistura correspondente ao grau de mistura de 95% ao tempo transcorrido até a concentração do traçador atingir a faixa de $\pm 5\%$ de sua concentração no estado estacionário. Um total de quatro (04) medidas de tempos de mistura foi realizado tomando-se o valor médio como tempo de mistura.

Para o cálculo da vazão de gás no modelo, adotou-se a Equação (1) utilizada por Mietz J. et al ⁽³⁾:

$$Q_{\text{modelo}} = \lambda^{5/2} Q_{\text{panela}} \quad (1)$$

onde:

$$Q_{\text{panela}} = Q_g^N \left(\frac{T_1}{T_N} \right) \left(\frac{p_N}{p_N + \frac{1}{2} \rho_l g H} \right) \quad (2)$$

p_N Pressão nas condições padrões - (N/m²)

Q_{panela} Vazão real de gás correspondente à pressão e à temperatura do aço líquido na panela - (m³/s)

(Q_g^N) Vazões-padrões utilizadas na indústria - (m³/s)

ρ_l Densidade do líquido - (kg/m³)

T Temperatura, l= líquido ; N= nas condições padrões - (K)

H Altura do banho - (m)

λ Fator de escala do modelo

Visualização do escoamento

A visualização do escoamento foi realizada pela adição de partículas poliméricas de densidade próximas à da água como traçadores e com iluminação simultânea de um plano de luz laser passando pelo centro da panela. Os ensaios foram registrados através de uma câmara de vídeo, as imagens obtidas foram processadas de forma a se obter uma análise qualitativa da velocidade do fluido. Essas foram analisadas em conjunto com os resultados de tempo de mistura. A fim de minimizar os efeitos de distorção da imagem provocados pela curvatura da panela, o modelo da panela foi inserido num reservatório retangular.

3. Resultados e discussão

Os resultados dos tempos de mistura de 95% estão apresentados na [Figura 2](#) em função da vazão de gás para as diferentes configurações testadas. De um modo geral, todas as curvas apresentam o mesmo comportamento, isto é, os tempos de mistura diminuem com o aumento da vazão de gás até um valor acima do qual a vazão não apresenta influência significativa. Resultados experimentais de outros investigadores ^(2,4,5,6) mostram que o comportamento dos tempos de mistura frente à variação da vazão de gás segue uma função exponencial do tipo $Q^{0,33}$. Os resultados de tempos de mistura encontrados ajustam-se também a uma função exponencial, com expoentes apresentando valores próximos a -0,33, com exceção das posições 8 e 9, onde os valores dos expoentes foram de -0,83 e -0,69, respectivamente. A esse respeito, Sinha e McNallan⁽⁷⁾, também relatam ter encontrado altos valores experimentais para os expoentes. Os autores salientam que isto ocorre nas regiões de pior mistura (sensor no fundo da panela) e esse efeito ocorre em função da homogeneização ocorrer por difusão molecular, pois o escoamento nessas regiões não é turbulento.

As [Figuras 2a](#) e [b](#) apresentam os tempos de mistura para uma injeção do gás a 1/5 de raio e a 1/2 raio, e pode-se observar comportamentos diferentes em relação ao local de medida (sensores localizados na superfície do

banho e no fundo da panela), isto é, para 1/5 de raio as taxas de mistura são mais rápidas na superfície que no fundo, o contrário valendo para a posição a 1/2 raio. Esse comportamento está em acordo com os resultados obtidos por outros investigadores ^(1,4,6,8), os quais sustentam que os tempos de mistura são influenciados pelas posições de medida.

Ainda em relação às [Figuras 2a e b](#), pode-se observar que, com a mudança da posição de injeção de gás de 1/5 de raio para 1/2 raio, em relação à posição de medida no fundo da panela, os tempos de mistura apresentam-se maiores para a posição de 1/5 de raio do que para a posição a 1/2 raio. Isto é causado pela formação de diferentes perfis de escoamento, que são gerados com a mudança de posição de injeção de gás, os quais aumentam a velocidade do fluido no fundo da panela, concordando com os resultados de Mietz J. et al ^(4,9).

Dessa forma conclui-se que o perfil de escoamento é um importante parâmetro que influencia os tempos de mistura.

Como mostrado nas [Figuras 3a-d](#), que apresentam os resultados experimentais da visualização do escoamento para uma vazão de 110 NL/min, constata-se que há diferenças entre os perfis de escoamento e velocidades do fluido (magnitude dos vetores-velocidade) no fundo da panela, para os pontos de injeção de gás em questão.

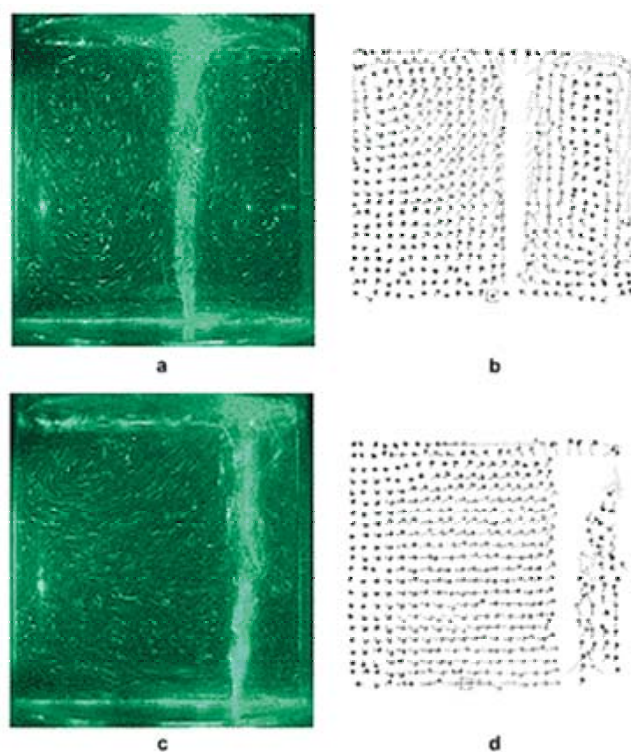


Figura 3 - Perfil de escoamento e vetores-velocidades para as diferentes posições de injeção de gás: a-b) um injetor, posição a 1/5 de raio c-d) um injetor, posição a 1/2 raio. Vazão 110 NI/min.

Pode-se observar, [Figura 3a](#), que, para a posição 1/5 de raio, duas regiões não simétricas de recirculação do líquido em ambos lados do jato de gás estendem-se desde a superfície até próximo do fundo da panela, apresentando um vórtice do lado esquerdo perto da superfície.

Para 1/2 raio, [Figura 3c](#), um grande circuito de recirculação a esquerda do jato de gás cobre a maior parte da panela até o fundo, com o escoamento do líquido apresentando-se de maneira transversal, assim como também um pequeno vórtice do lado esquerdo perto da superfície. Forma-se, também, uma pequena área de recirculação, à direita do jato de gás, comprimida e próxima à parede da panela. Por outro lado, através da análise qualitativa do escoamento do fluido no fundo da panela, a injeção a 1/5 de raio, [Figura 3b](#), mostra regiões de baixa velocidade, as zonas mortas. Já para 1/2 raio, [Figura 3d](#), a velocidade do fluido tende a aumentar no fundo da panela diminuindo as zonas mortas.

Outro comportamento a ser observado é o apresentado nas [Figuras 2c-d](#), as quais mostram que os tempos de mistura para a posição de injeção do gás a 1/5 de raio são menores do que para a injeção do gás a 1/2 raio. Xie e colaboradores⁽¹⁰⁾ e Joo e Guthrie⁽⁵⁾, em suas observações experimentais com modelos físicos, ressaltam que a pluma inclina-se quando a posição de injeção do gás é deslocada do centro da panela para a parede. Tal fato provocaria o atrito da pluma com as paredes do modelo consumindo parte da energia a ser transferida ao líquido e conduzindo a um aumento dos tempos de mistura, assim como um desgaste do refratário existente nessa região da panela. Becker e Oeters⁽¹¹⁾ ressaltam que maiores tempos de mistura poderão ser encontrados para uma excentricidade a 1/2 raio com modelos em escalas menores (1:5, 1:7, 1:8). Todas essas afirmações estão de acordo com os resultados apresentados. Na [Figura 3](#), por exemplo, são mostradas as plumas formadas para as diferentes posições de injeção testadas. Pode-se observar, [Figura 3c](#), para a posição de injeção de gás a 1/2 raio, que ocorre a inclinação lateral da pluma, o que resulta num contato mais pronunciado com a parede da panela na parte superior. O aumento da vazão reforça esse efeito.

As [Figuras 2e e f](#), para a condição de injeção do gás a 1/5 de raio, e as [Figuras 2g e h](#), para a condição de injeção do gás a 1/2 raio, mostram os resultados dos tempos de mistura tendo-se variado os pontos de adição do traçador, independentemente da localização do sensor. Como pode ser observado, para uma injeção a 1/5 de raio, os menores tempos de mistura foram obtidos com adição do traçador na pluma, posições (3) e (8), quando comparadas com as posições (2), (6) e (7), próximas às paredes.

O mesmo comportamento, na redução dos tempos de mistura, verifica-se para uma injeção a 1/2 raio para as posições (4) e (9) com adição perto da região da pluma. Esse efeito está relacionado com a alta turbulência perto da pluma, fazendo com que o traçador se espalhe e se misture, por conseqüência, os tempos de mistura são menores quando comparados com as demais posições. Ensaio realizados com injeção de corante confirmam esses resultados.

Equações para Tempos de Mistura

Os valores experimentais obtidos no modelo físico podem ser transferidos para os tempos de mistura em uma panela industrial através da Equação 3, reportada por Mazumdar e Guthrie para sistemas com injeção de gás central.⁽¹²⁾

$$\tau_{\text{modelo}} = \lambda^{5/6} \tau_{\text{Pan. Indus(calculado)}} \quad (3)$$

Paralelamente, a fim de se compararem os resultados calculados com a Equação 3, foram realizadas determinações de tempos de mistura numa panela industrial, mediante a adição de ligas Fe-Mn, no intervalo de vazões 40 a 50 NI/min. Os tempos de mistura medidos foram em média de 330 s (5,5 min). Na [Tabela 2](#), podem ser vistos os tempos de mistura medidos no modelo físico, os calculados com a Equação 3 e o obtido na panela industrial. Para a faixa de vazões analisadas e para uma configuração a 1/5 raio, pode observar-se a existência de uma razoável aproximação entre o valor calculado e o medido na panela industrial.

Tabela 2 - Cálculo dos tempos de mistura para a panela industrial.

Injeção de gás: 1/5 r Sensor na superfície	Modelo Físico		Panela Industrial
	Vazão (NI/min)	Experimental	Calculado (Eq.3)
30	62 (s)	276 (s) 4,6 (min)	Adições de Fe-Mn 5,5 (min)
50	51 (s)	228 (s) 4 (min)	

Conclusões

Os resultados referentes à determinação de tempos de mistura obtidos com ajuda de um modelo físico da panela permitiram concluir que:

- Os tempos de mistura diminuiram com o aumento da vazão de gás até um determinado valor no qual sua influência não é mais significativa.
- Os tempos de mistura são influenciados pela posição da adição do traçador e da localização do sensor.
- A posição da adição do traçador na pluma ou em suas vizinhança mostrou-se favorável para a redução dos tempos de mistura.
- A mudança de posição do ponto de injeção de gás de 1/5R para 1/2R modificou o perfil de escoamento, diminuindo as regiões de baixa velocidade (zonas mortas) no fundo da panela; porém não reduzindo os tempos de mistura.
- Os valores calculados com a equação de tempos de mistura de Mazumdar apresentaram boa concordância com os resultados obtidos na planta.

Referências bibliográficas

1. MAZUMDAR, D., GUTHRIE, R. I. L. The physical and mathematical modeling of gas stirred ladle systems. *ISIJ International*, v. 35, n.1, p.1-20, 1995. [[Links](#)]
2. OETERS, F., PLUSCHKELL, W., STEINMETZ, WILHELMI H. Fluid flow and mixing in secondary metallurgy. *Steel Research*, v.59, n.5, p. 192-201, 1988. [[Links](#)]
3. MIETZ, J., SCHNEIDER, S., OETERS, F. Model experiments on mass transfer in ladle metallurgy. *Steel research*, v. 62, n. 1, p. 1-9, 1991. [[Links](#)]
4. MIETZ, J., OETERS, F. Model experiments on mixing phenomena in gas-stirred melts. *Steel Research*, v. 59, n. 2, p. 52-59, 1988. [[Links](#)]
5. JOO, S., GUTHRIE, R.I.L. Modeling flows and mixing in steelmaking ladles designed for single- and dual-plug bubbling operations. *Metallurgical Transactions B*, v. 23B, p.765-778, December 1992. [[Links](#)]
6. MIAO-YONG ZHU, TAKEO INOMOTO, IKUO SAWADA, TSE-CHIANG HSIAO Fluid flow and mixing phenomena in the ladle stirred by argon through multi-tuyere. *ISIJ International*, v.35, n. 5, p. 472-479, 1995. [[Links](#)]
7. SINHA, U.P., Mc NALLAN, M. J. Mixing in ladles by vertical injection of gas and gas-particle jets/ A water model study. *Metallurgical Transactions B*, v. 16B, p. 850-853, December 1985. [[Links](#)]
8. MAZUMDAR D., GUTHRIE R. I. L. Mixing models for gas stirred metallurgical reactors. *Metallurgical transactions B*, v. 17B, p. 725-733, December 1986. [[Links](#)]
9. MIETZ, J., OETERS, F. Flow field and mixing with eccentric gas stirring. *Steel Research*, v. 60, n. 9, p. 387-394, 1989. [[Links](#)]
10. XIE Y., ORSTEN S., OETERS F. Behaviour of bubbles at gas blowing into liquid wood,s metal. *ISIJ International*, v. 32 , n.1, p. 66-75, 1992. [[Links](#)]
11. BECKER, J., OETERS, F. Model experiments of mixing in steel ladles with continuous addition of the substance to be mixed. *Steel Research*, v. 69, n.1, p. 8-16, 1998 . [[Links](#)]
12. MAZUMDAR, D. Dynamic similarity considerations in gas-stirred ladle systems. *Metallurgical Transactions B*, v. 21B, p. 925-928, October 1990. [[Links](#)]

Artigo recebido em 04/12/2001 e aprovado em 02/02/2002.



Todo o conteúdo do periódico, exceto onde está identificado, está licenciado sob uma [Licença Creative Commons](#)

Escola de Minas

Praça Tiradentes, 20
35400-000 Ouro Preto MG - Brazil
Tel: (55 31) 3551-4730



editor@rem.com.br