



MODELAMENTO MATEMÁTICO DO ESCOAMENTO MULTIFÁSICO EM PANEAS DE ACIARIA E NOVA TÉCNICA DE PREVISÃO DE TEMPO DE MISTURA¹

Lucas Teixeira Costa²
Roberto Parreiras Tavares³
Bernardo Martins Braga⁴
Diego Lima Henrique Martins⁴
Helbert Felipe Lino⁴

Resumo

No presente trabalho foi desenvolvido um estudo sobre o escoamento multifásico em panela de aciaria para determinação do tempo de mistura por meio de simulação matemática fluidodinâmica. Para isso, foi realizado o monitoramento por pontos, prática comumente utilizada, e um novo método foi proposto ao calcular o desvio padrão da concentração de traçador em todo domínio computacional. Pelo novo método todas as regiões da panela são utilizadas para determinar o tempo de mistura e não mais pontos isolados como tem sido realizado. Dessa forma, os erros resultantes de monitoramento em pontos de recirculação ou favorecidos pelo escoamento são evitados. Foram feitos estudos da influência da posição e número de plugues na panela e vazão de argônio utilizada. Obteve-se, pelo critério proposto, os tempos de mistura para as condições testadas e finalmente, encontrar a melhor condição operacional ao comparar área do "olho" e tempo de mistura em função da vazão de argônio, para cada configuração de panela estudada.

Palavras-chave: Escoamento multifásico; Panela; Tempo de mistura; CFD.

MATHEMATICAL MODEL OF MULTIPHASE FLOW IN ARGON STIRRED LADLE AND A NEW TECHNIQUE FOR PREDICTION OF THE MIXING TIME

Abstract

The present work consists of a study of multiphase flow in argon stirred ladle to quantify mixing time by means of CFD simulation. Two methods were adopted to evaluate the mixing times, monitoring concentration of a tracer at certain points, a practice commonly used, and calculating the standard deviation of the concentration in the whole computational domain. By the new method all regions of the ladle are used to determination of the mixing time and no more isolated points as has usually been done. There have been studies of the influence of the position and number of plugs in the ladle and argon flow rate used. Mixing times for the conditions tested were determined. The effects of gas flow rate, number of the nozzles and position for tracer injection were evaluated. The size of the "eye" for these different conditions were also determined.

Key words: Multiphase flow; Ladle; Mixing time; CFD.

¹ Contribuição técnica ao 43º Seminário de Aciaria – Internacional, 20 a 23 de maio de 2012, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Membro ABM, Mestrando em Engenharia Metalúrgica - Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

³ Engenheiro Metalurgista, Ph D., Membro ABM, Professor da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

⁴ Graduando em Engenharia Metalúrgica - Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).



1 INTRODUÇÃO

A eficiência dos processos de refino secundário dos aços está diretamente relacionada com as condições de agitação da panela. É necessário promover a mistura de modo a acelerar a interação entre os reagentes na frente de reação e eliminar zonas mortas no interior da panela para que a concentração das ligas adicionadas esteja bem distribuída no seio do metal no menor intervalo de tempo possível. Além disso, é importante, acelerar a aglomeração e flotação de inclusões para garantir os rigorosos requisitos de qualidade dos aços. Portanto, é desejável estudar, por meio de testes experimentais e simulações matemáticas, as condições cinéticas ideais que garantam a obtenção do melhor desempenho operacional no tratamento de refino secundário.

O estudo dos fenômenos de escoamento em panelas agitadas por argônio vem sendo realizado em grande quantidade para diferentes configurações. Mazumdar e Gutrie⁽¹⁾ desenvolveram um trabalho experimental para panelas com plugue no centro e um plugue. São também encontrados trabalhos^(2,3) para dois plugues e deslocados do centro.

Atualmente, o estudo do tempo de homogeneização de reatores é realizado por meio da utilização de alguns pontos onde é monitorada a concentração do traçador ao longo do tempo. Determina-se o tempo de mistura quando o valor medido nos pontos alcança 95% da concentração final do material injetado. Entretanto, a metodologia utilizada apresenta falhas pois os pontos de monitoramento podem estar localizados em regiões de recirculação ou regiões de maior intensidade de mistura. Resultados obtidos dessa maneira pouco representativa tendem a determinar erroneamente o tempo gasto para obter mistura no reator estudado.

O presente trabalho faz a determinação do tempo de mistura por um novo critério ao realizar o cálculo de desvio padrão da concentração do traçador para cada elemento de volume da panela. Dessa forma, obtém-se um resultado mais representativo pois ao contrário do método de pontos de monitoramento, leva-se em conta todas as regiões do reator.

Foram avaliadas as falhas existentes na metodologia de determinação do tempo de mistura por pontos e como os valores determinados variam de acordo com a posição de monitoramento e do ponto de adição do traçador.

Por meio do desvio padrão da concentração do traçador pretende-se estudar a influência da posição e da quantidade de plugue poroso assim como da vazão de argônio no tempo de mistura.

2 METODOLOGIA

Utilizou-se um modelo matemático trifásico, de superfície livre e domínio em escala industrial para estudo do tempo de mistura determinados de duas formas, pontos isolados de monitoramento e desvio padrão da concentração do traçador. Em seguida, os resultados foram comparados e definiu-se o uso de desvio padrão como novo critério para estudo do tempo de mistura.

Os efeitos de posição e quantidade de plugues e vazão foram estudados por este novo método.



2.1 Geometria Analisada

A Tabela 1 apresenta as dimensões da panela estudada.

Domínio e descrição	Condição
Altura total (m)	3,30
Diâmetro da base (m)	2,32
Diâmetro do topo (m)	2,50
Diâmetro do plugue (cm)	7,60
Altura de aço (m)	2,50
Espessura da camada de escória (m)	0,13
Capacidade (ton. aço)	80

Diferentes condições foram simuladas, incluindo variações de vazão de gás inerte e de localização de plugues. Para injeção com um plugue, foi considerada simetria e apenas metade da panela foi simulada.

A Figura 1 apresenta esquematicamente as três configurações modeladas.

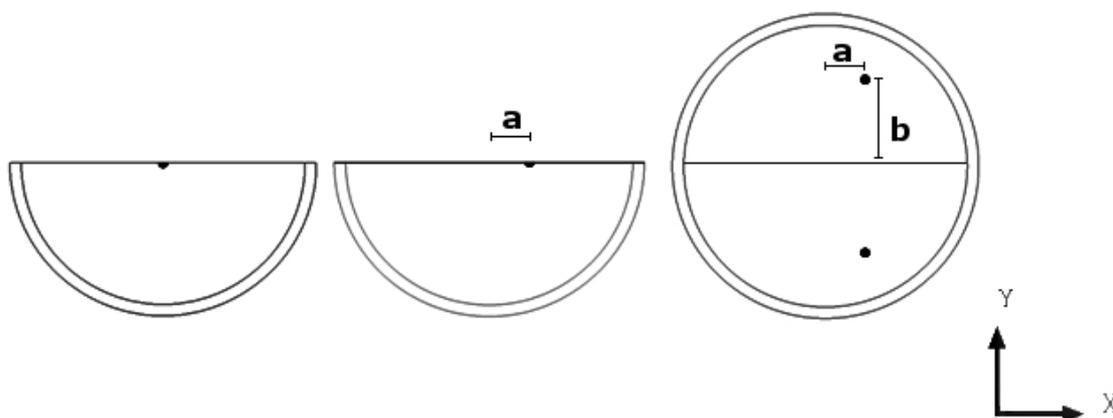


Figura 1. Vista do fundo da panela com a localização dos plugues porosos nas três configurações simuladas. Para a origem no centro da panela, tem-se $a = 0,324$ m; e $b = \pm 0,712$ m.

2.2 Modelo Matemático

2.2.1 Características gerais do modelo

Tridimensional, turbulento, trifásico (aço-escória-argônio), superfície livre.

2.2.2 Modelos de interação gás-líquido adotados

- Modelo *Grace*, 2, para forças de arraste;
 - *Lift Force* 0,5 e modelo *Lopes de Bertodano* 0,3 para forças de não-arraste;
 - modelo *Sato Enhanced Eddy Viscosity* em transferência de turbulência
- Coefficiente de tensão superficial: aço-argônio = 1,6; aço-escória = 1,18; e argônio-escória = 0,8 (N/m).⁽⁴⁾



2.2.3 Etapas das simulações

As simulações foram realizadas em duas etapas: estado estacionário, em que são resolvidas as grandezas de turbulência e determinados os perfis de velocidade, e em seguida estado transiente. Adota-se esse procedimento porque o traçador não altera o perfil de velocidade e, além disso, resulta em economia de tempo computacional.

2.2.4 Independência de malha

As malhas são do tipo não-uniforme, com refinamento nas regiões em que ocorre encontro das fases e zonas mais turbulentas. A Tabela 2 apresenta as características da malhas utilizadas.

Tabela 2. Número de elementos de volume e nós das malhas adotadas

	1 plugue - centro	1 plugue - 0,28R	2 plugues
Elementos de volume	684.259	684.809	1.427.248
Nós	142.722	142.753	290.844

O domínio foi considerado isotérmico, assumindo que a convecção natural tem pouca relevância na definição dos perfis de velocidade. As simulações foram realizadas na temperatura de 1.600°C.

As propriedades físicas dos materiais envolvidos no modelamento são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Propriedades dos materiais simulados^(4,5)

	Aço	Escória	Argônio
Densidade - ρ (kg/m ³)	7.200	2.700	1.874
Viscosidade μ - (Pa s)	$6,2 \times 10^{-3}$	$6,5 \times 10^{-1}$	$2,25 \times 10^{-5}$

Foi utilizado o software ANSYS - CFX 13 para resolver as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e grandezas de turbulência.

Considerou-se para o modelamento: duas fases como fluido contínuo (aço e escória) e fluidos newtonianos; uma fase como fluido disperso (argônio); tamanho de bolha constante (12 mm), desconsiderando os fenômenos de coalescência e quebra.

2.3 Simulações

Atualmente, o estudo do tempo de mistura é realizado tomando-se dois ou três pontos de leitura da concentração do traçador injetado mesmo sabendo que a leitura pode não representar a condição real no interior da panela como um todo. Além disso, o ponto de injeção do traçador é um aspecto muito relevante, e pode ser fonte de erro na avaliação das condições de mistura, que têm sido negligenciado na literatura consultada. Levando esses fatores em consideração, o estudo do escoamento do aço em panelas agitadas por argônio foi desenvolvido nas seguintes etapas:

- obtenção dos perfis de velocidade;
- escolha de pontos críticos para adição de traçador;
- determinação do tempo de mistura por pontos; e
- determinação do tempo de mistura por desvio padrão.



No presente trabalho, foram adotados 6 pontos de adição de traçador, escolhidos a partir dos perfis de velocidade obtidos para cada uma das três configurações adotadas. A Figura 2 apresenta os pontos escolhidos em função dos perfis de velocidade.

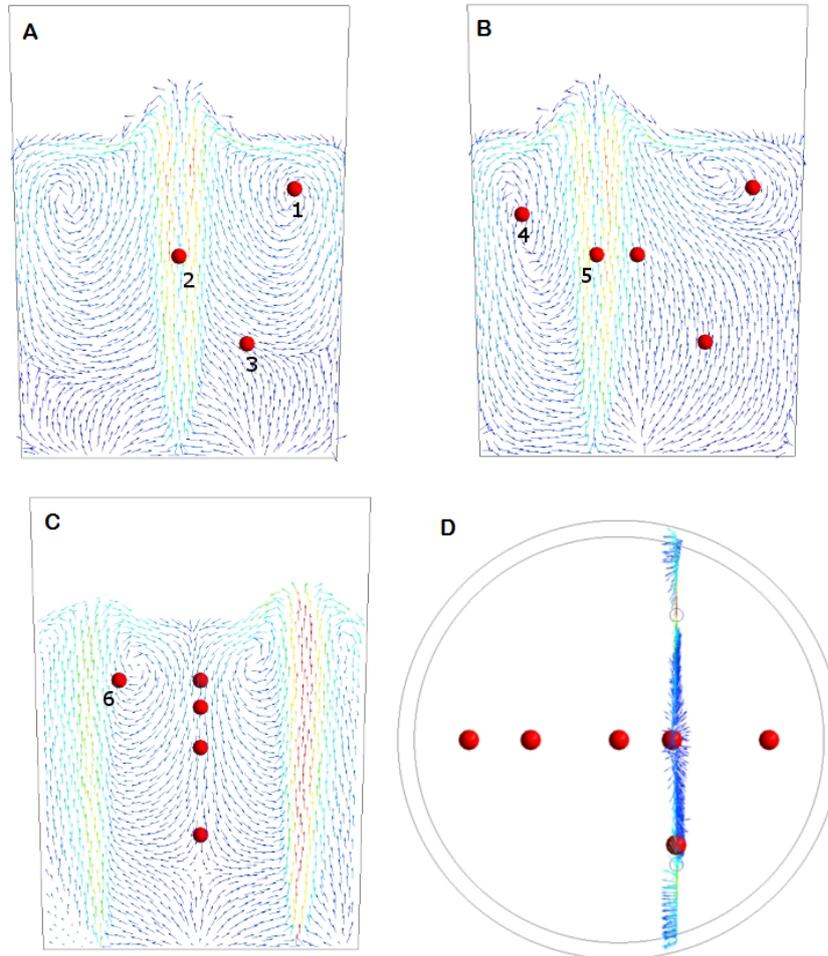


Figura 2. Localização dos pontos de injeção para as diferentes configurações simuladas.

Escolheu-se inicialmente para a panela com plugue no centro três pontos de injeção: zona de re-circulação, pluma e zona de encontro de fluxos (Figura 2a). Na Figura 2b, foram adicionados mais dois pontos: pluma e re-circulação. As Figuras 2c e 2d mostram os cinco pontos anteriormente definidos e a adição de mais um ponto localizado na região de pluma da panela de dois plugues. Dessa forma, adotou-se o mesmo modo de injeção de traçador nas diferentes configurações de plugues da panela estudada. O monitoramento de concentração do traçador adicionado foi realizado em 7 pontos distribuídos no domínio. A Tabela 4 apresenta as coordenadas cartesianas dos pontos escolhidos para injeção de traçador e dos pontos de monitoramento.

**Tabela 4.** Localização dos pontos de injeção de traçador e monitoramento de sua concentração

	X (m)	Y (m)	Z altura(m)
P tr1	-0,85	0	2
P tr2	0	0	1,5
P tr3	-0,5	0	0,85
P tr4	0,85	0	1,8
P tr5	0,3	0	1,5
P tr6	0,324	-0,6	2
P m1	0	0	0,6
P m2	0	0	1,8
P m3	0,9	-0,3	0,6
P m4	0,9	-0,3	1,8
P m5	0,9	-0,3	2,4
P m6	-0,65	-0,65	1
P m7	-0,65	-0,65	2

As simulações foram realizadas nas vazões 20 Nm³/h, 30 Nm³/h e 40 Nm³/h. Quando utilizada a configuração de dois plugues, adotou-se os valores 25% e 75% para distribuir a vazão total.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi utilizado o critério padrão de 95% e 105% da concentração final do traçador no ponto de monitoramento para determinar o tempo de mistura.

3.1 Efeitos da Localização dos Pontos de Injeção e Monitoramento

A Figura 3 apresenta gráficos normalizados da variação da concentração de traçador com o tempo e confirma a influência da localização dos pontos de injeção e monitoramento de traçador.

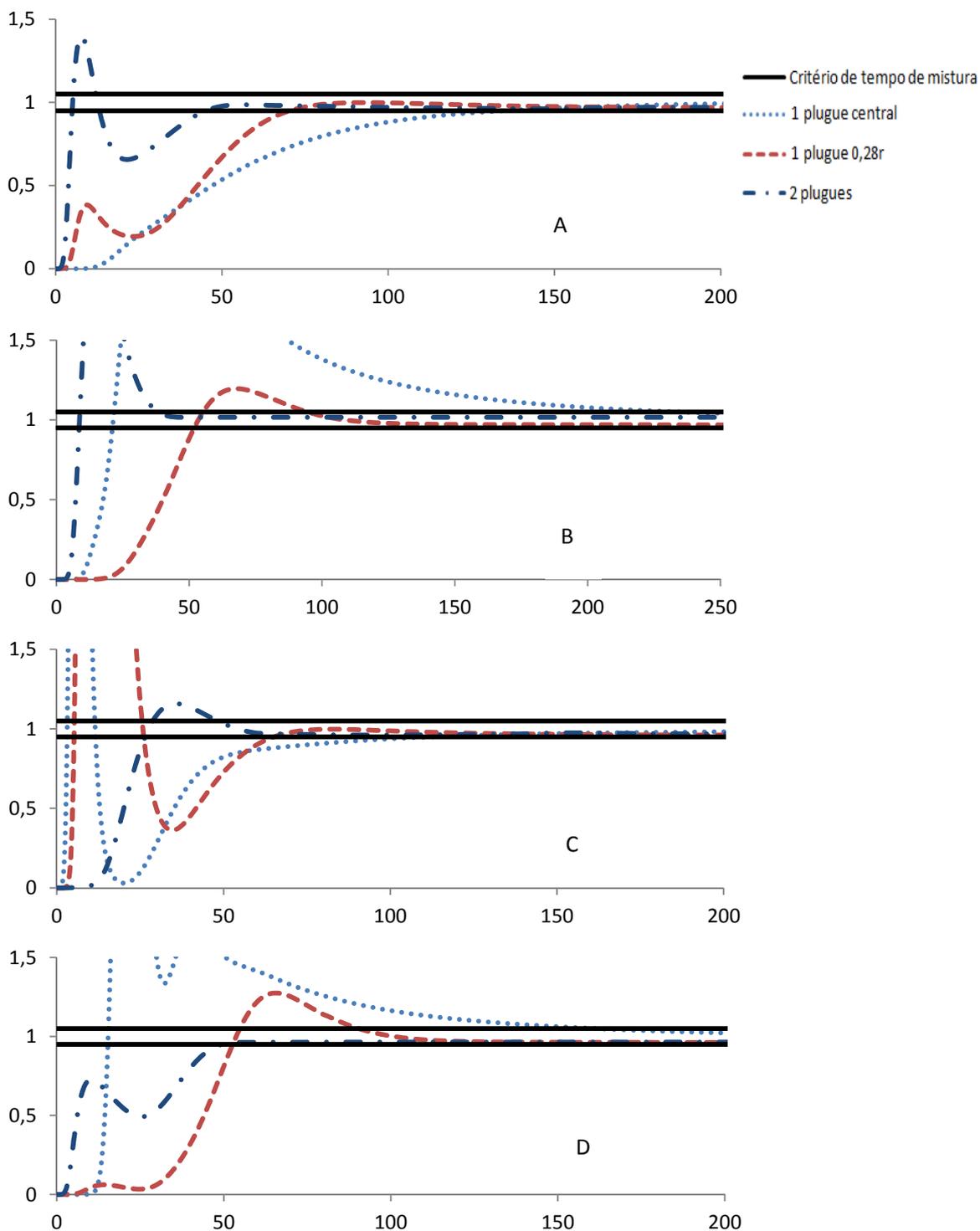


Figura 3. Variação da concentração de traçador com o tempo: A, B - localização do traçador (P tr1) e ponto de leitura P m2 e P m6, respectivamente; C, D - localização do traçador (P tr3) e pontos de leitura P m2 e P m6 respectivamente.

A Tabela 5 apresenta os valores de tempo de mistura determinados na Figura 3.

**Tabela 5.** Exemplos de tempos de mistura determinados em pontos na panela para vazão de 20 Nm³/h

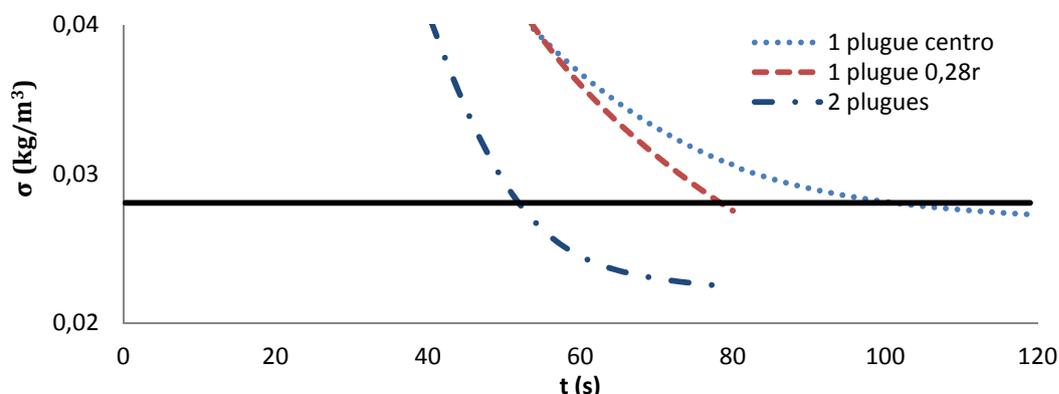
Traçador	Ponto	Tempo de mistura (s)		
		1 plugue centro	1 plugue 0,28r	2 plugues
Posição 1	P m2	133	68	45
	P m6	234	93	37
Posição 3	P m2	107	63	47
	P m6	159	88	50

Percebe-se que os tempos de mistura variam com a posição da adição do traçador e com o ponto de medida para todos os casos modelados. Os dados obtidos mostram que a variação é mais significativa para panela com um plugue no centro, sendo que para a panela de dois plugues, essa variação é menor, levando a concluir que a influência dos pontos de adição e monitoramento são menos importantes nessa condição. Apesar disso, a metodologia adotada para determinação do tempo de mistura não leva a resultados representativos dos processos de refino secundário do aço.

Sendo assim, foi realizada a determinação do tempo de mistura por meio do desvio padrão das concentrações que considera todos os pontos da panela na condição simulada. O tempo de mistura foi atingido quando o desvio padrão satisfaz o critério mostrado na Equação 1.

$$\text{Desvio padrão} = 0,15 \times \text{Concentração média de traçador} \quad (1)$$

As curvas de variação do desvio padrão da concentração de trocador ao longo da mistura estão apresentadas na Figura 4 para as três configurações estudadas.

**Figura 4.** Desvio padrão da concentração de traçador nas três configurações de plugues para a vazão 20 Nm³/h.

Pelo critério adotado os tempos de mistura para as posições de plugue, no centro e 0,28 r e com dois plugues para o traçador injetado no ponto (P tr2) são respectivamente: 101 segundos, 78 segundos e 52 segundos.

3.2 Efeitos da Vazão de Gás

A influência da variação da vazão de gás nos casos estudados é apresentada na Figura 5.

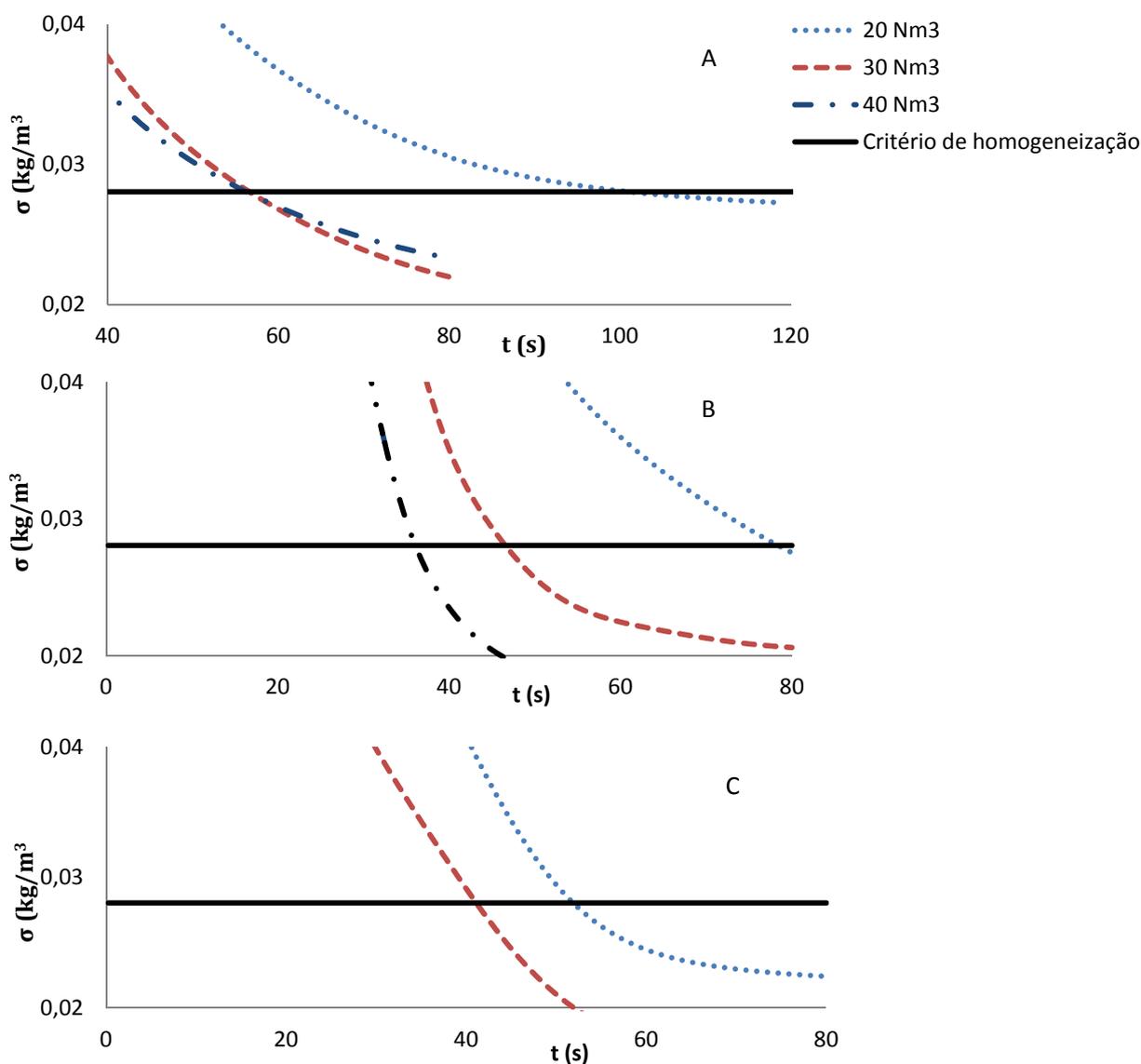


Figura 5. Efeitos da variação de vazão de gás no tempo de mistura em panela de plugue central, 0,28R e dois plugues (a), (b) e (c), respectivamente.

A Tabela 6 apresenta os valores de tempo de mistura obtidos pelo método de desvio padrão e critério proposto pela Equação 1 para as três configurações simuladas em diferentes vazões.

Tabela 6. Variação da vazão para estudo de tempo de mistura e área de "olho"

Vazão (Nm ³ /h)	1 plugue - centro			1 plugue - 0,28R			2 plugues		
	20	30	40	20	30	40	20	30	40
Tempo de mistura (s)	101	55	54	78	47	36	52	41	-
Área do olho (m ²)	0,31	0,36	0,41	0,33	0,39	0,43	0,29	0,40	-



Os dados da Tabela 6 indicam que o critério de determinação do tempo de mistura pelo desvio padrão pode ser aplicado no estudo do escoamento em painéis de aço variando-se a vazão de gás e a posição do plugue poroso.

O uso de dois plugues permite trabalhar com vazões mais baixas, da ordem de 20 Nm³/h, pois fornece menores tempos de mistura e área de “olho” que as demais configurações.

Percebe-se que para painéis com plugue central, a vazão de gás de 30 Nm³/h é a mais indicada, pois não apresentou melhora significativa no tempo de mistura enquanto teve a área de “olho” aumentada com vazão de 40 Nm³/h. Para plugue descentralizado, obtém-se melhores resultados de tempo de mistura e abertura de “olho”, sendo portanto mais indicado caso se utilize apenas um plugue.

Portanto, o critério desenvolvido no presente trabalho permite definir, com maior precisão, a vazão de argônio mais apropriada para cada tipo de configuração de plugue poroso.

4 CONCLUSÃO

Foi desenvolvido um critério para determinação do tempo de mistura pelo cálculo do desvio padrão das concentrações de traçador em todo domínio computacional. Os valores obtidos pelo desvio padrão são mais representativos, pois levam em conta todos os elementos de volume da panela modelada, ao contrário da prática de monitoramento em pontos isolados. Elimina-se, dessa forma, a necessidade de encontrar o melhor ponto de medida para a condição da panela utilizada.

Diante dos dados representativos obtidos, a ferramenta matemática para previsão do escoamento e mistura do reator mostrou-se mais convincente que os modelos físicos.

Os valores calculados de tempo de mistura e área do “olho” permitiram concluir que a utilização de dois plugues na panela fornece melhores condições de mistura além de menor exposição do aço ao ar atmosférico.

REFERÊNCIAS

- 1 Mazumdar, D; Guthrie, R., The Physical and Mathematical Modelling of Gas Stirred Ladle Systems. ISIJ Internacional 1995, V.35 No.1
- 2 KIM, S.; FRUEHAN, R., "Physical Modeling of Liquid/Liquid Mass Transfer in Gas Stirred Ladles. Metall. Trans. B, Volume 18B, 1987, pp. 673-680
- 3 HAIDA, O., BRIMACOMBE, J., Physical-model study of solute inhomogeneity in injection refining process. Scaninject-III, Luleå, 1983.
- 4 PATIL, S.; SATISH, D.; PERANANDHANATHAN, M.; MAZUMDAR, D., Mixing Models for Slag Covered, Argon Stirred Ladles. ISIJ Internacional 2010, V.50 No.8, p1117 - 1124
- 5 MILLS, K., Viscosities of molten slags. In: Slag Atlas. Düsseldorf, 1995. 2nd edition 2008.