

INFLUÊNCIA DO REFRAATÁRIO DA VÁLVULA SUPERIOR NO COMPORTAMENTO DAS BOLHAS EM MODELO FÍSICO EM AGUA - LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE PLACAS*

Paulo Luiz Santos Junior¹

Carlos Antônio Silva²

Paula Regina Dutra³

Ana Flávia Capdeville R dos Santos⁴

Bernardo Fonseca A. de Carvalho⁵

Clenice Moreira Galinari⁶

Itavahn Alves Silva⁷

Resumo

Gás inerte é usualmente injetado no refratário da válvula superior durante o lingotamento contínuo visando minimizar a sucção de ar para o sistema e consequente oxidação do aço, deposição de inclusões e obstrução do sistema de refratários. Nesse contexto, esse estudo pretende investigar a formação e o comportamento das bolhas de gás no interior de um sistema com fluxo líquido, simulando o sistema de refratários, utilizando-se para isto da injeção via placas refratárias, com características distintas, produzidas a partir de receitas industriais da empresa RHI Magnesita. Esta investigação foi conduzida na região do refratário e na região da válvula submersa via modelo físico, em acrílico, e o efeito do refratário e das vazões de gás e líquido foram discutidos. As filmagens foram realizadas com câmera de alta velocidade à 3680 frames por segundo (fps), tendo sido implantada uma sistemática para medição do Diâmetro Médio (Dm) das bolhas e sua validação estatística. Os experimentos confirmaram o efeito do Refratário, do fluxo e da vazão de gás no diâmetro médio das bolhas para fluxo bifásico em canal.

Palavras-chave: Modelo físico; Lingotamento Contínuo; Válvula Superior; Refratário.

INFLUENCE OF THE REFRACTORY OF THE UPPER NOZZLE IN THE BEHAVIOR OF BUBBLES IN PHYSICAL MODEL OF WATER - CONTINUOUS CASTING OF SLABS

Abstract

Inert gas is usually injected into the upper nozzle refractory during continuous casting to minimize air suction into the system and the consequent oxidation of steel, inclusions formation, and clogging formation inside the refractory system. In this context, this study intends to investigate the formation and behavior of the gas bubbles inside a liquid flow system, simulating the refractory system, using the injection through refractory plates, with different characteristics, produced from industrial recipes of RHI Magnesita. This investigation was conducted in the refractory and submerged nozzle regions using a physical model constructed in acrylic, and the effect of the refractory and the gas and liquid flow rates were discussed. The recording was done with a high speed camera at 3680 frames per second (fps), and an methodology was implemented to measure the bubbles average diameter (Dm) and their statistical validation. The experiments confirmed the effect of the Refractory, the water and the gas flow in the Dm of the bubbles for a biphasic flow in a channel.

Keywords: Physical Modelling; Continuous Casting; Upper Nozzle; Refractory.

- ¹ Eng. Metalurgista, MSc., Coordenador Sistema de Qualidade/ Professor Assistente, RHI Magnesita/ Dep. Eng. Metalúrgica - PUC Minas, Contagem e Belo Horizonte, MG, Brasil.
- ² Eng. Metalurgista, Ph.D., Professor, DEMET, EM-UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.
- ³ Eng. Metalurgista, estudante pos-graduação, Dep. de Materiais, CDTN, Belo Horizonte, MG, Brasil.
- ⁴ Eng. Metalurgista, estudante, Dep. Eng. Metalúrgica, PUC Minas, Belo Horizonte, MG, Brasil.
- ⁵ Eng. Metalurgista, estudante, Dep. Eng. Metalúrgica, PUC Minas, Belo Horizonte, MG, Brasil.
- ⁶ Eng. Metalurgista, Ph.D, Quality Assurance Expert, RHI Magnesita, Contagem, MG, Brasil.
- ⁷ Eng. Metalurgista, DSc., Professor, DEMET, EM-UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a indústria automobilística tem constantemente demandado novos aços para a produção de automóveis, em especial, os aços ultra-baixo carbono. Além da ausência do carbono em sua microestrutura, estes aços demandam uma elevada limpidez, visto que durante os processos de laminação, estampagem e pintura, os defeitos provenientes da Aciaria podem se tornar evidentes, levando à redução de rendimento dos processos e/ou desvio de produtos para qualidades inferiores. Por sua vez, a demanda crescente da indústria automobilística por estes aços tem levado as usinas siderúrgicas produtoras de placas e os fornecedores de refratários ao desenvolvimento contínuo de tecnologias de novos materiais, projetos e processos.

Conforme Suzuki (2003) e Yuan (2008), para a produção de aço via lingotamento contínuo, a injeção de argônio (Ar) através dos refratários, principalmente via válvula superior, tem um papel fundamental no controle da obstrução, na melhora da uniformização da temperatura superficial do aço no molde e na promoção da separação das inclusões não metálicas. Por outro lado, quando as bolhas de Ar ficam presas na frente de solidificação durante o lingotamento, estas podem acarretar defeitos internos no processamento do aço.

Nesse contexto, Suzuki (2003) demonstra que o tamanho das bolhas de gás injetadas na válvula superior e depois lançadas pela saída da válvula submersa para o molde dependem do material poroso, da taxa de injeção de gás, da velocidade do fluido (vazão/ área da seção transversal) e da estrutura da SEN.

Lee et al (2009) desenvolveu estudo para investigar o comportamento inicial de bolhas, em modelo em água, utilizando amostras revestidas de refratário de MgO poroso, para simular o refratário da válvula superior e o contacto aço-argônio com diferentes permeabilidades, através da filmagem na região da válvula superior com câmera de alta velocidade (4.000 quadros por segundo). Demonstrando por sua vez que o tamanho da bolha tende a reduzir com a elevação da velocidade do fluido e tende a tornar-se maior com o aumento da taxa de injeção de gás. Outro ponto relevante abordado é que a utilização de materiais porosos com variadas distribuições de tamanho de poro permite modificar o tamanho médio da bolha.

Thomas (1997) observou via modelo físico em água de um lingotamento contínuo com injeção de gás via poro único na região da válvula superior que o gás injetado apresentava diferentes formatos de bolha e comportamentos em função da velocidade do fluxo de água e da taxa de injeção de gás. Para baixas velocidades do fluxo de água e baixas taxas de injeção de gás, se observa a formação uniforme de bolhas esféricas a partir da saída do poro, que depois suavemente se soltam e acompanham o fluxo do líquido. Já para velocidades intermediárias o gás injetado se solta da parede, mas permanece próximo desta, e as bolhas são normalmente alongadas.

Neste sentido LIU (2014), comenta que para o gás ser liberado da interface refratário/líquido para dentro da massa líquida, é necessária uma elevação de pressão para se vencer a força de tensão superficial, a fim de se aumentar a curvatura, formar, e por fim liberar as bolhas. Todavia, para sistemas dinâmicos a

vazão do fluido tem efeito determinante no tamanho da bolha, ou seja, para maiores vazões a bolha é liberada da superfície do refratário antecipadamente com diâmetro menor de bolha que na situação de vazões reduzidas ou em condição estática.

Banderas et al (2005) por sua vez, estudou o fluxo bifásico gás-líquido dentro da válvula submersa (SEN) e no molde para placas e a sua influência na região superior do molde. Utilizou um modelo físico, gravação de vídeo, simulações matemáticas e analisador de velocidade de partículas por imagens (ParticleImageVelocimetry – PIV). Observou que grandes quantidades de gás (razão entre vazões de gás e de líquido) e elevadas velocidades no lingotamento levam ao aumento da quantidade de bolhas e do tamanho destas, devido à velocidade do processo de coalescência ser superior ao de ruptura das bolhas.

Nesse contexto, esse estudo pretende investigar a formação e o comportamento de bolhas de gás no interior de um sistema com fluxo líquido, simulando o sistema de refratários, utilizando-se para isto da injeção via placas refratárias, com características distintas, produzidas a partir de receitas industriais da empresa RHI Magnesita. Esta investigação foi conduzida na região do refratário e na região da válvula submersa via modelo físico, em acrílico, e o efeito do refratário e das vazões de líquido e de gás foram discutidos. As filmagens foram realizadas com câmera de alta velocidade à 3600fps tendo sido definida uma sistemática para medição do tamanho médio das bolhas, bem como de sua validação estatística. Os experimentos confirmaram o efeito do refratário, do fluxo de líquido e da vazão de gás no diâmetro médio das bolhas para fluxo bifásico em canal.

Este estudo permite ampliar o entendimento do efeito do refratário no comportamento do gás em um sistema de lingotamento contínuo de aço e seus efeitos metalúrgicos.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia - Modelos Físicos estático e dinâmico

As placas refratárias foram fabricadas em escala piloto no laboratório do Centro de Pesquisa da RHI Magnesita nas dimensões de 40x160x60mm com refratários porosos utilizados em aplicações industriais, conforme receita destes produtos. Posteriormente, de maneira a se reduzir a variabilidade, o tratamento térmico destas peças foi realizado nos fornos túneis juntamente com peças industriais.

Numa primeira fase dos estudos construiu-se um modelo físico estático, para avaliação da nucleação e o comportamento das bolhas em água. O modelo em acrílico foi construído de maneira a permitir uma injeção homogênea de ar em uma das faces do refratário (ver Figura 1- a). A peça refratária foi cortada com espessura de ~23 mm perpendicular ao sentido de prensagem e depois montada em uma caixa em acrílico. Esta caixa foi colocada no interior de um recipiente com água a 25°C. Na parte inferior da caixa em acrílico se conecta o tubo por onde se injeta ar.

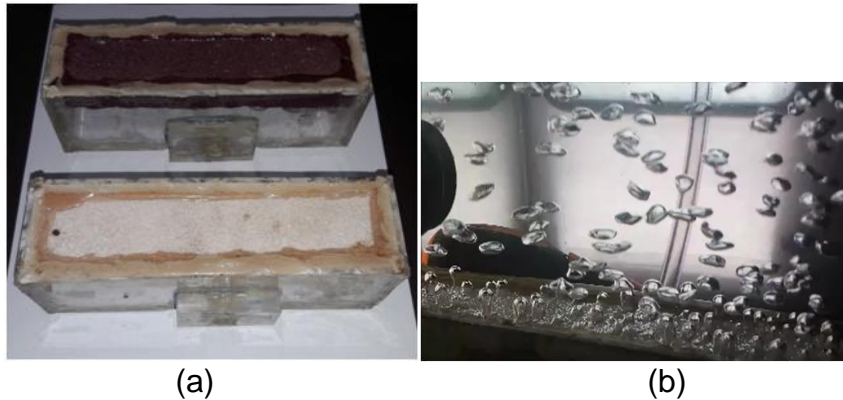


Figura 1: Caixa construída em Acrílico para fixação do Refratário; foto em perspectiva (a) Foto filmagem a 3680 fps modelo estático em água com injeção de ar (b)

Para determinação do tamanho de bolha foram realizadas filmagens com câmera de alta velocidade a 3680 fps com foco na superfície do refratário e acima deste (Figura 1 -b).

Na segunda etapa construiu-se modelo em água em acrílico e com as dimensões internas similares às válvulas industriais, e em escala 1:2. As placas refratárias planas foram montadas de maneira a permitir a injeção homogênea de gás em lados opostos da caixa acrílica que representa a válvula superior. A montagem do modelo em acrílico foi realizada com seu posicionamento na vertical para que o sentido do empuxo fosse contrário ao fluxo de água, similar a condição operacional do sistema de refratários (Yuan, 2008), com recipiente de coleta na saída e válvula para controle de fluxo, ambos para simular no modelo a pressurização do sistema de refratários com válvula gaveta (ver Figura 2). As filmagens foram realizadas nas posições denominadas refratário e tubo, conforme indicado na Figura 2.

As vazões de água utilizadas foram de 80, 100, 120 e 140lpm equivalentes às condições de lingotamento para aços com aplicação em parte exposta, conforme discutido por Santos, 2012; estas vazões foram determinadas com base em critério de similaridade. Sugere-se que a similaridade é atingida se a razão entre vazões de líquido e gás se mantiverem, comparando-se máquina industrial e modelo. A vazão de água foi ajustada com o auxílio de um medidor de vazão mássica (Rosemountmagneticflowmeter) e inversor de frequência para controle de rotação da bomba.

As taxas de injeção de ar utilizadas foram 1, 2, 3 e 4 NI/min, similares às adotadas em processos industriais, com o ajuste visando uma dada vazão específica por área superficial de refratário (Nm^3/m^2). O gás utilizado na simulação em água, em substituição ao argônio (Ar), foi o ar. O controle de vazão de gás foi realizado utilizando-se reguladores de pressão e medidor de vazão mássica OMEGA da série FMA.

A filmagem foi realizada com câmera de alta velocidade posicionada em frente às seguintes regiões: caixa (refratário) e tubo (válvula submersa); na velocidade de 3680 frames/s, mesma faixa de velocidade utilizada por Lee, 2009 e Thomas, 1997 (Figura 2 - a).

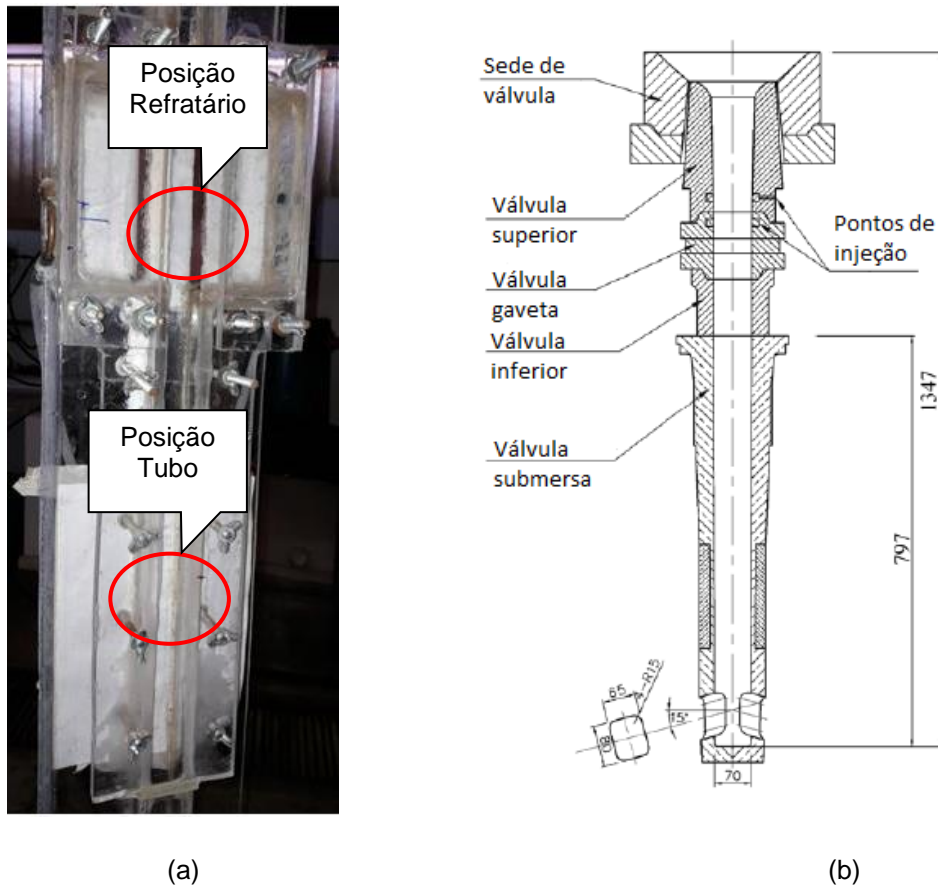


Figura 2: (a) Foto modelo físico em acrílico (b) e Configuração típica conforme YUAN (2008) de montagem refratária para os sistemas de válvula gaveta.

As filmagens foram separadas em frames sendo cada arquivo de vídeo composto por 500 quadros. Em seguida, foi feita a seleção aleatória das imagens, com uso de tabela de números aleatórios, até se obter 30 imagens. Caso a imagem selecionada não possuísse bolhas ou se encontrasse distorcida, ela era descartada e uma nova imagem era selecionada aleatoriamente. Cada imagem selecionada foi editada utilizando-se o software editor de imagens GIMP de uso livre. As bolhas foram selecionadas e depois as imagens (frames) convertidas em imagem monocromática (preto:bolhas e branco:fundo). Em cada frame foram selecionadas apenas as bolhas nítidas, desconsiderando-se aquelas que estivessem fora de foco, borradas ou aglomeradas com outras bolhas. A Figura 3 representa a conversão de um dos frames em um arquivo de imagem com uso do software GIMP.

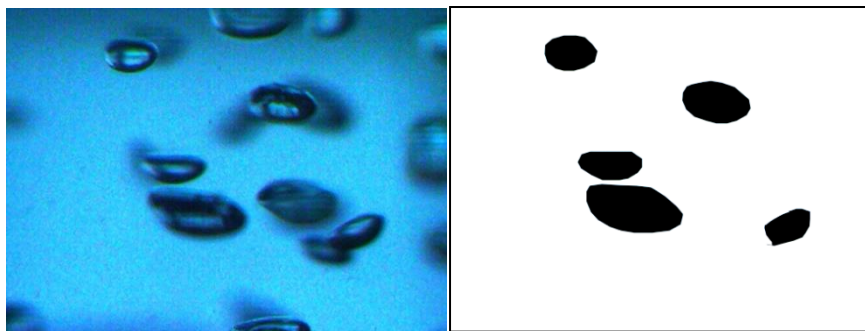


Figura 3: Exemplo imagem convertida em figura binária

As imagens monocromáticas foram avaliadas pelo software ImageJ para determinação da área média e o do diâmetro médio das bolhas.

2.2- Modelo Físico Estático: Diâmetro Médio das Bolhas

As medições relativas às dimensões das bolhas na posição 7cm acima do refratário são apresentadas na Tabela 1 para os materiais refratários 1 (261cD, menos permeável) e 2 (928cD, mais permeável).

Tabela 1: Diâmetro médio (Dm) das bolhas posição acima do refratário para o material 1 e 2

NI/min de ar	Diâmetro (mm)									
	Material 1					Material 2				
	Média	Desvio Padrão	Quant. bolhas	Máx.	Mín.	Médio	Desvio Padrão	Quant. bolhas	Máx.	Mín.
1	5,33	0,69	29	7,39	4,13	2,24	0,48	76	3,54	1,24
2	5,00	0,91	34	7,50	3,74	2,34	0,47	112	3,90	1,52
3	4,96	1,07	34	7,33	3,56	2,51	0,54	111	3,79	1,06
4	4,43	0,61	37	6,17	3,48	2,47	0,57	108	4,09	1,26
Média	4,93	0,82		7,10	3,73	2,39	0,51		3,83	1,27

Para o material 1 (menor permeabilidade) o diâmetro médio (Dm) das bolhas é 4,93mm, enquanto que para o material para o material 2 (maior permeabilidade) o Dm ficou em 2,39mm. O diâmetro médio das bolhas apresenta um comportamento inversamente proporcional ao da permeabilidade do refratário, ou seja, maior permeabilidade implica em bolhas menores. Vários fatores influenciam na porosidade e na permeabilidade do material cerâmico, tais como: formato e tamanho dos grãos, empacotamento, força de prensagem e sinterização.

Conforme se pode observar o valor de Dm da bolhas do material 1 (menor permeabilidade) apresenta uma redução com o aumento da vazão. A menor permeabilidade do refratário acarreta em posições de nucleação fixas no refratário (ver figura 4, a e b). Nesta condição o aumento da vazão implica em uma elevação da pressão o que por sua vez acarreta na liberação das bolhas com Dm menores. LIU (2014) e Lee et al (2009) comentam que para o gás ser liberado da interface refratário/líquido para dentro da massa líquida, é necessária uma elevação de pressão para se vencer a força de tensão superficial, a fim de se aumentar a curvatura, formar, e por fim liberar as bolhas. Este fenômeno somado ao fato de as bolhas estarem distantes umas das outras acarreta na redução do tamanho médio das bolhas com o aumento da vazão de gás.

Já para o material 2 (maior permeabilidade) tem-se um suave aumento do diâmetro médio das bolhas com aumento da vazão de ar. Isto pode ser explicado pelo aumento dos pontos de nucleação das bolhas na superfície do refratário e a consequente coalescência destas (união de bolhas) após seu desprendimento da superfície durante sua ascensão (Figura 4, c e d). O fenômeno de ruptura e coalescência é discutido e apresentado por Bandeiras, 2005.

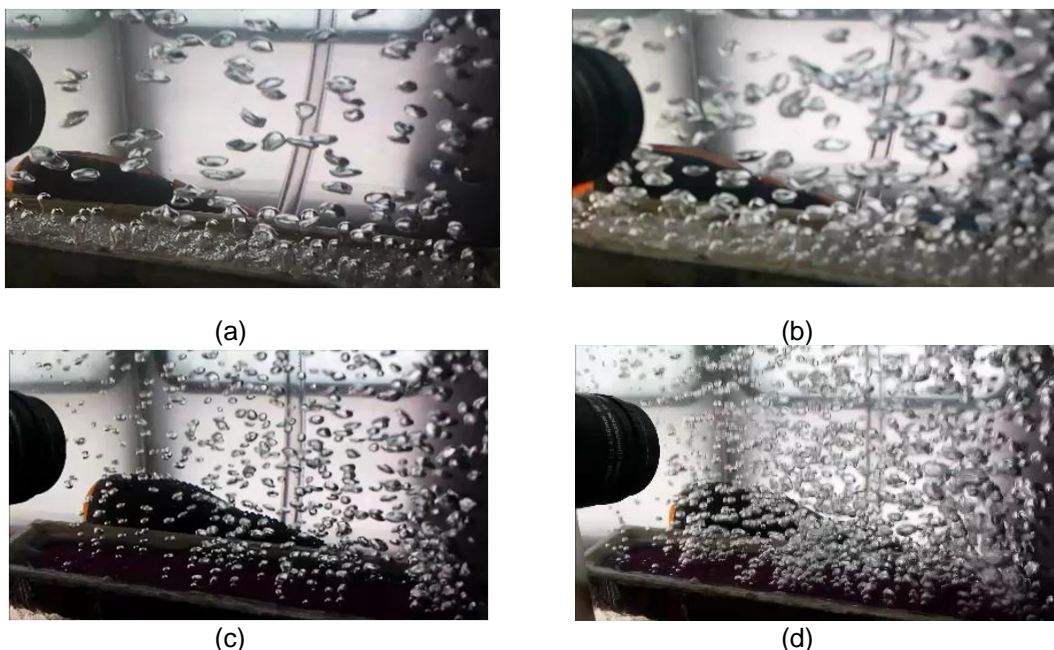


Figura 4: Filmagem sobre o modelo físico estático; material 2 com 1NI/min (a) e 4NI/min (b), e material 3 com 1NI/min (c) e 4NI/min (d).

2.3 Modelo Físico Dinâmico: Diâmetro Médio das Bolhas

A Tabela 2 apresenta os diâmetros médios das bolhas e o desvio padrão para a posição de observação tubo (30cm abaixo do refratário) materiais refratários 1 (permeabilidade 261 cD) e 2 (permeabilidade 928 cD)

Tabela 2: Tamanho médio das bolhas (mm) em função da vazão de água lpm e vazão de gás NI/min na posição de observação tubo – refratários 1 e 2.

Material	Vazão		Diâmetro (mm)								
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	
	Ar		1 NI/min		2 NI/min		3 NI/min		4 NI/min		
1	Água (lpm)	80	2,942	0,962	3,252	0,899	3,201	0,770	-	-	
		100	2,635	0,672	3,008	0,833	3,248	0,723	3,191	0,910	
		120	3,142	0,951	3,323	0,862	3,436	0,837	-	-	
2	Água (lpm)	Ar		1 NI/min		2 NI/min		3 NI/min		4 NI/min	
		80	1,775	0,567	1,898	0,418	-	-	-	-	
		100	1,493	0,648	1,592	0,526	1,814	0,452	1,991	0,354	
		120	1,335	0,521	1,530	0,494	1,742	0,427	1,700	0,548	
		140	1,334	0,467	1,679	0,568	1,926	0,584	-	-	
160	1,497	0,546	-	-	-	-	-	-			

(*) O número de bolhas medidas varia de 62 a 81 para cada condição.

Para o material 2 (permeabilidade 928 cD) com vazão de gás fixa se observa uma tendência de redução do diâmetro médio (D_m) das bolhas para vazões de água de 80 a 120lpm, já a partir de 140lpm tem-se novamente a elevação do D_m (Figura 5). Ao avaliar-se o material 1 (permeabilidade 261 cD) é possível observar um comportamento similar com a inflexão ocorrendo para uma vazão de água de 100lpm, contudo com menor variação do valor de D_m (Tabela 2). Conforme

discutido por Bandeiras 2005, para baixas vazões da fase líquida tem-se o efeito do arraste na redução do tamanho médio das bolhas, enquanto que para vazões maiores (número de Reynolds maiores) o efeito de coalescência nas bolhas se torna mais significativo que o de desintegração (ruptura), efeito este observado para ambos os materiais.

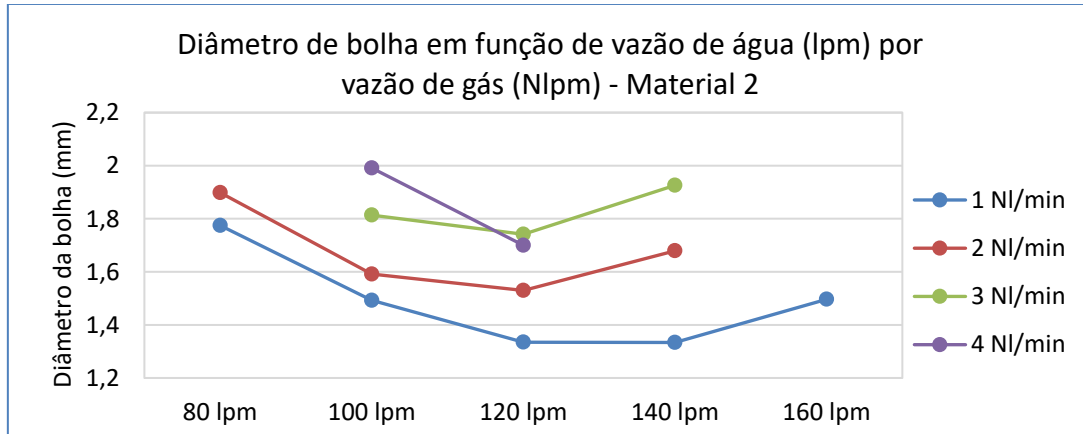


Figura 5: Diâmetro médio das bolhas em função da vazão de água por vazão de gás para o material 2.

Ao comparar-se uma mesma condição de vazão de água com a elevação da vazão do gás têm-se um aumento do tamanho médio de bolha (D_m) em ambos os materiais (Tabela 2 e Figura 6). Conforme discutido anteriormente com aumento da vazão tem-se o efeito de coalescência sobrepondo-se ao efeito de ruptura das bolhas. Isto por sua vez explica o aumento do valor de D_m das bolhas com aumento da vazão de ar na condição dinâmica, fenômeno discutido por Bandeiras 2005.

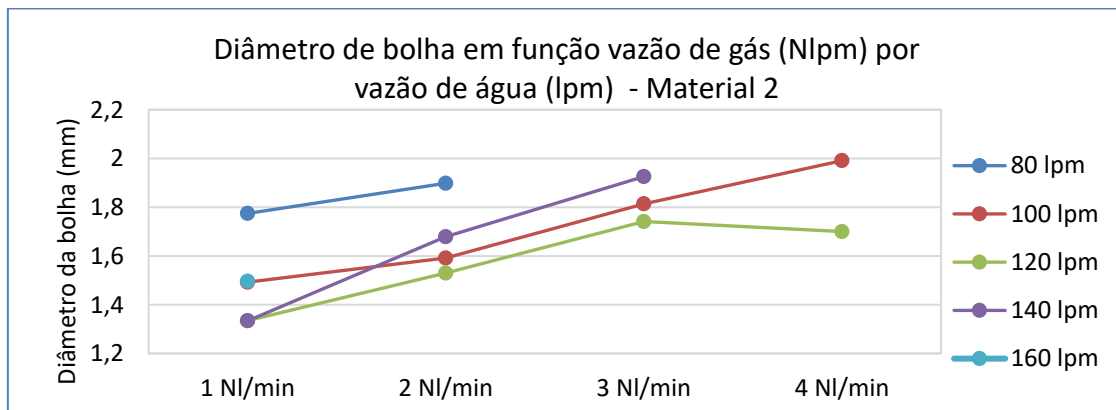


Figura 6: Diâmetro médio das bolhas em função da vazão de gás por vazão de água para o material 2.

Avaliando-se os valores de D_m obtidos no modelo dinâmico para a condição de vazão de água de 80lpm com os resultados do modelo estático (Tabela 3) têm-se uma redução média de 41% e 23% para os materiais 1 e 2, respectivamente. O efeito do arraste do fluido no tamanho das bolhas é discutido por SUZUKI (2003) e THOMAS (1997). Outro ponto é o efeito da permeabilidade do refratário sobre o valor de D_m das bolhas, confirmado pelos resultados do modelo físico estático e dinâmico, ou seja, maior permeabilidade menor D_m e vice-versa.

Tabela 3: Tamanho médio das bolhas (mm) em função da vazão de água lpm e vazão de gás NI/min. Posição de observação Tubo – Materiais Refratários 1 e 2

Dm	Material 1			Material 2		
Condição	Estático	Dinâmico Vazão água	Diferença %	Estático	Dinâmico Vazão água	Diferença %
Vazão de ar NI/min		100 lpm			100 lpm	
1	5,33	2,64	51%	2,24	1,49	33%
2	5,00	3,01	40%	2,34	1,59	32%
3	4,96	3,25	35%	2,51	1,81	28%
4	4,43	3,19	28%	2,47	1,99	19%
Dm Médio	4,93	2,91	38%	2,39	1,84	28%

Para modelo físico dinâmico os fatores determinantes dos valores de Dm são:

- o material refratário (função da permeabilidade);
- coalescência e ruptura das bolhas em fluxo bifásico gás água (Bandeiras, 2005).

O comportamento de redução do valor de Dm observado no modelo estático com o aumento da vazão de gás para material 1 não influencia o Dm em modelo dinâmico. Este efeito é discutido por Lee (2009), Suzuki (2003) e LIU (2014).

Conforme discutido por Santos, Junior (2013) o diâmetro das bolhas influencia na condição do fluxo no molde de lingotamento contínuo, por exemplo, com diâmetro maiores de bolhas tem-se a modificação do fluxo no molde, desvio do fluxo da fase contínua em direção a superfície do molde (reduzindo ou até mesmo eliminando a formação do duplo rolo) e conseqüentemente o aumento da turbulência na superfície. Este aumento de turbulência por sua vez pode acarretar na elevação dos defeitos no produto. Isto por sua vez demonstra que o diâmetro da bolha no molde, e os mecanismos que determinam o tamanho, a ruptura e a coalescência das bolhas, é fator crítico na determinação do comportamento da fase gasosa no molde, conforme discutido também por Banderas et al (2005).

2.3 Avaliação Estatística – Modelo Dinâmico

A Tabela 4 apresenta os resultados dos testes de hipótese realizados comparando os diâmetros da população de bolhas nas vazões de 1 e 4NI/min de ar para os materiais 1 e 2 com vazões de 100 e 120lpm de água na posição tubo. A hipótese considerada foi a de que o diâmetro médio das bolhas para uma vazão de gás de 1NI/min é menor do que para a vazão de 4NI/min com intervalo de confiança de 95%. Para todas as condições avaliadas a hipótese proposta foi confirmada. Conforme discutido no item 2.2 a vazão de gás é um item determinante do tamanho médio das bolhas sendo o mecanismo de ruptura e coalescência responsável por esta diferença (Bandeiras, 2004).

Tabela 4: Teste de hipótese comparando tamanho de bolha em condições diferentes para um mesmo material no modelo dinâmico

	Vazão de água	Hipótese	Valor-p	Avaliação da hipótese
Material 2	100	Diâmetro médio para vazão 1NL/min < diâmetro médio para vazão 4NL/min	< ,001	Verdadeira
	120	Diâmetro médio para vazão 1NL/min < diâmetro médio para vazão 4NL/min	< ,001	Verdadeira
Material 1	100	Diâmetro médio para vazão 1NL/min < diâmetro médio para vazão 4NL/min	0,006	Verdadeira
	120	Diâmetro médio para vazão 1NL/min < diâmetro médio para vazão 4NL/min	< ,001	Verdadeira

Outro ponto verificado foi à diferença entre os materiais refratários. A tabela 5 apresenta os resultados do teste de hipótese comparando o diâmetro médio das bolhas dos dois materiais para mesma condição de vazão de água e gás com intervalo de confiança de 95%. Nos testes avaliou-se a hipótese de que o diâmetro médio das bolhas utilizando Material 2 (maior permeabilidade) é menor do que o diâmetro médio das bolhas produzidas com o Material 1 (menor permeabilidade). As condições avaliadas são para a posição tubo modelo dinâmico. Todos os resultados confirmam o efeito do material no diâmetro médio das bolhas.

Tabela 5: Teste de hipótese comparando tamanho de bolha de materiais diferentes nas mesmas condições no modelo dinâmico

Vazão de água (lpm)	Vazão do gás (NI/min)	Hipótese para diâmetro médio da bolha	Valor-p	Avaliação da hipótese
80	1	Material 2 <Material 1	< .001	Verdadeira
100	1	Material 2 <Material 1	< .001	Verdadeira
100	4	Material 2 <Material 1	< .001	Verdadeira
120	1	Material 2 <Material 1	< .001	Verdadeira
120	4	Material 2 <Material 1	< .001	Verdadeira

A condição de vazão de água não foi avaliada pois conforme discutido anteriormente tem-se uma inversão do fenômeno de ruptura e coalescência de bolhas em função da turbulência (Figura 5).

3 CONCLUSÃO

- Os valores médios de diâmetro (D_m) das bolhas são afetados pela condição dinâmica (vazão de água em canal). A redução média do valor de D_m para condição dinâmica foi de 41% e 23% para os materiais 1 e 2 ($D_{m1} > D_{m2}$), respectivamente. O efeito do arraste do fluido no tamanho das bolhas é discutido por SUZUKI (2003) e THOMAS (1997).
- Para fluxo bifásico em canal, sendo água a fase contínua e ar a fase dispersa, a condição predominante (ruptura ou coalescência) é dependente da vazão da fase contínua. Ao se elevar a vazão da fase contínua (80 até 120 lpm de água) o mecanismo predominante é de ruptura (aumento vazão \rightarrow redução dos valores de D_m). Contudo, aumentando-se ainda mais a vazão (>120 lpm) o mecanismo de coalescência passa a ser o predominante (aumento da vazão \rightarrow aumento do D_m) (Figura 6). Este resultado confirma o fenômeno de

coalescência e ruptura das bolhas em fluxo bifásico água/ gás discutido por Bandeiras (2005).

- O efeito do material (permeabilidade) sobre os valores de D_m das bolhas é inverso, ou seja, maior permeabilidade implica em menor valor de D_m . O que confirma o efeito do refratário no valor de D_m das bolhas. O refratário é significativo para a determinação do D_m das bolhas no canal, apesar do efeito do fluxo na ruptura e coalescência das bolhas (tabela 5).
- O aumento da fração da fase dispersa favorece a coalescência das bolhas, ou seja, a elevação da vazão de ar implica em aumento do valor de D_m das bolhas no canal, conforme demonstrado estatisticamente no item 2.3 (Tabela 4).
- O comportamento de redução do valor de D_m observado no modelo estático com o aumento da vazão de gás para material 1 não foi notado para o material 2, para o qual predominou a coalescência das bolhas. Com base nestes resultados pode-se dizer que este comportamento seria irrelevante para modelo dinâmico (fluxo bifásico em canal). Fenômeno discutido por Lee (2009), Suzuki (2003) e LIU (2014).

Agradecimentos

Ao Centro de Pesquisa e Desenvolvimento (CPqD) RHI MAGNESITA - Unidade de Contagem-MG, a Fundação Gorceix, ao CNPq, a FAPEMIG, e a PUC Minas (Projetos FIP 1º/2017- 336-S1 e 1º/2016-10295), pelos respectivos apoios.

REFERÊNCIAS

- 1 BANDERAS, A. R.; et al. Dynamics of two-phase downwards flows in submerged entry nozzle and its influence on the two-phase flow in the mold. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 31, p 643-665, 2005, Mexico.
- 2 RUI LIU and BRIAN G. THOMAS. Model of Gas Flow Through Porous Refractory Applied to an Upper Tundish Nozzle. *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International*. volume 46B, February, 2014.
- 3 SANTOS JUNIOR, P. et al. Distribuição de gás inerte e seu efeito sobre o campo de fluxo durante o lingotamento contínuo de placas: modelamento matemático. *Seminário de Aciaria da ABM, Internacional, 2013, Araxá, Brasil*.
- 4 SUZUKI, H. et al. "Structure of Porous Upper Nozzle for Tundish and Gas Bubble Behavior". *Shinagawa Technical Report*, 2003.
- 5 THOMAS, B. et al. "Behavior of Argon Bubbles during Continuous Casting of Steel". *ISS 80th Steelmaking Conference*, p. 375-384. 1997.
- 6 THOMAS, B. G.; BAI, H. Turbulent Flow of Liquid Steel and Argon Bubbles in Slide-Gate Tundish Nozzles: Part I. Effect of Operation Conditions and Nozzle Design. *Metallurgical and materials transactions*. Vol. 32B. Abril, 269 p. Illinois, 2001.
- 7 YAVUZ, M. M.; SENGUPTA, J. "Nozzle Design for ArcelorMittal Dofasco's No 1 Continuous Caster for Minimizing Sliver Defects". *AISTech 2010 Proceedings - Volume II*.
- 8 YUAN, F. "Numerical simulation of Al_2O_3 deposition at a nozzle during continuous casting". *Journal of the University of Science and Technology Beijing*, Vol 15, Number 3, p. 227, Jun. 2008.