

ARRASTE DE ESCÓRIA DURANTE A DRENAGEM DE AÇO*

Henrique Silva Furtado¹
Johne Jesus Mol Peixoto²
Weslei Viana Gabriel²
Carlos Antonio da Silva³
Itavahn Alves da Silva³
Ciro Azevedo Silva⁴

Resumo

O arraste de escória devido à formação de vórtices durante o esgotamento de um reator compromete a qualidade do aço, reduz o rendimento metálico e aumenta o custo de produção da aciaria. Neste estudo, avaliou-se o comportamento do jato de aço ao longo do vazamento, utilizando-se um modelo em acrílico reduzido e simplificado. Nos experimentos somente com água, houve redução de 77% na vazão após a estabilização do vórtice e redução de 57% na flutuação média do jato. Com a presença de um óleo com viscosidade de 500cSt, a redução da flutuação média do jato após a estabilização do vórtice foi menor, de cerca de 16%. Portanto o jato apresenta comportamentos distintos de acordo com a natureza da segunda fase. Em ambos os casos, um sensor ultrassônico foi capaz de detectar a formação do vórtice e consequente arraste de outras fases, evidenciando um pico na flutuação média.

Palavras-chave: Arraste de escória; Esgotamento de panelas; Modelagem física; Vórtice.

SLAG CARRY-OVER DURING DRAINAGE OF STEEL

Abstract

Slag carry-over due to vortex formation during drainage of vessels compromises steel quality, reduces the metallic yield and increases the steelmaking production cost. In this work, the steel jet behavior while teeming a reactor was evaluated using a small and simplified plexiglass model. In the experiments using only water, there has been detected a reduction of 77% on the flow rate after the vortex stabilization and a reduction of 57% on the average jet fluctuation. In the presence of a 500cSt viscosity oil, the reduction of the average fluctuation of the jet was smaller, close to 16%. Therefore the jet shows different behaviors according the properties of the second phase. In both cases an ultrasonic sensor was capable to detect the vortex formation, and thus, the carry-over of the second phase, showing a short and intense increase on the jet fluctuation.

Keywords: Slag carry-over; Ladle teeming; Physical modeling; Vortex.

¹ Pesquisador, AMT Research Center, Brasil.

² Engenheiro Metalúrgico, Doutorando em Engenharia de Materiais, Redemat, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

³ Engenheiro Metalúrgico, Ph.D., Professor, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

⁴ Graduando em Engenharia Metalúrgica, Escola de Minas, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil

1 INTRODUÇÃO

Kuwana et al. [1] e Mazumdar et. al [2] apontam que é operação comum, durante as rotas convencionais de produção do aço, a transferência de metal líquido recoberto por escória entre diferentes reatores metalúrgicos. Assim, como observado por Andrzejewski et al. [3], dados os altos requisitos de qualidade impostos pelo mercado siderúrgico, controlar parâmetros operacionais que interferem neste fator é de extrema importância, visto que mesmo com os avanços obtidos nas últimas décadas em relação à capacidade de refino do aço através da metalurgia secundária, tal refino pode ser parcial ou completamente comprometido por fatores como reoxidação, contaminação por desgaste excessivo ou má seleção de materiais refratários, ou então arraste de escória entre reatores.

Sato et al. [4] citam que apesar de a escória ser essencial na produção do aço, atuando na remoção de inclusões, redução das perdas térmicas e oxidação do aço pelo ar, seu arraste e consequente contaminação do aço vem sendo bastante estudado nas últimas décadas, visto que este fenômeno causa sérios problemas, como a redução no rendimento metálico (e consequente aumento no custo de produção), redução da qualidade do produto fabricado, aumento no ataque químico dos refratários e consequente limitação no número de corridas por sequência, ou mesmo sucateamento da corrida.

Segundo Sankaranarayanan e Guthrie [5], durante operações de vazamento de aço líquido de panelas, os mecanismos responsáveis pelo arraste de escória envolvem dois tipos distintos de escoamento, tipo vórtice e tipo dreno (Figura 1). O vórtice ocorre quando existem componentes resultantes de velocidade tangencial na superfície do aço, acima de um valor crítico que é capaz de produzir o turbilhão, enquanto o dreno ocorre nos estágios finais do vazamento (independente de prévia ocorrência do vórtice), quando a vazão na válvula torna-se inferior à sua capacidade de drenagem.

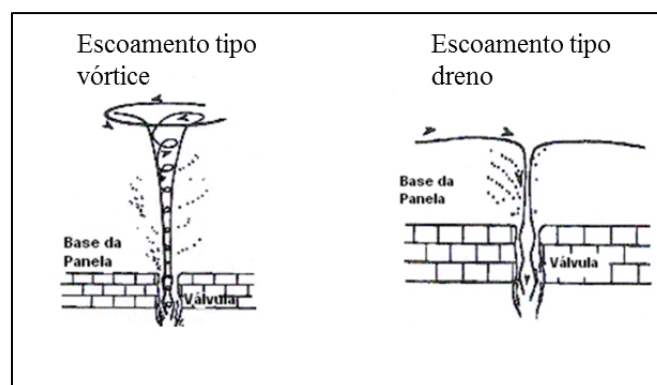


Figura 1. Esquematisação dos escoamentos tipo vórtice e tipo dreno, por Sankaranarayanan e Guthrie [4].

Santos et al. [6] evidenciam que diversos estudos foram realizados, sobre o processo de arraste de escória sob diferentes perspectivas, analisando fatores como volume inicial de líquido na panela, tempo de espera entre enchimento e vazamento, presença e propriedades do fluido sobrenadante (escória), presença e geometria de dispositivos anti-vórtice, vazão, geometria e disposição da válvula, dentre outros fatores. Estes autores observaram que, fixados parâmetros geométricos e a

quantidade inicial de fluido, um dos fatores (ao lado da vazão) mais importantes para a ocorrência ou não de vórtice é o tempo de espera, pois este se relaciona com o momento angular residual no momento de abertura da válvula de vazamento.

Segundo Rodrigues et al. [7], Andrzejewski et al. [3] e Sato [4], a operação mais comum para se evitar o arraste excessivo de escória é a interrupção prematura do vazamento, e, para tanto, existem várias maneiras de se detectar o início do arraste de escória, fundamentados em efeitos ópticos, térmicos, eletromagnéticos, de pressão ferrostática, micro-ondas e de padrões de vibração.

Apesar de terem analisado a drenagem de placas via modelagem matemática, Tan et al. [8] lembram que estudos via modelagem física, que utilizam água e óleos diversos simulando respectivamente o aço e escória líquidos, são comuns para a avaliação de problemas de processos siderúrgicos, pois apresentam baixo custo, maior versatilidade e segurança de execução quando comparados à experimentos em plantas industriais.

Neste contexto, com este trabalho, buscou-se fazer uma descrição física do jato de aço durante o processo de drenagem de reatores metalúrgicos, analisando através de técnicas de modelagem física, o padrão de oscilação durante a passagem de outras fases através da água.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Utilizou-se um modelo em acrílico reduzido e simplificado, cujas dimensões estão especificadas na Figura 2. As marcas A, B e C, correspondem às alturas de 220mm, 180mm e 120mm, respectivamente.

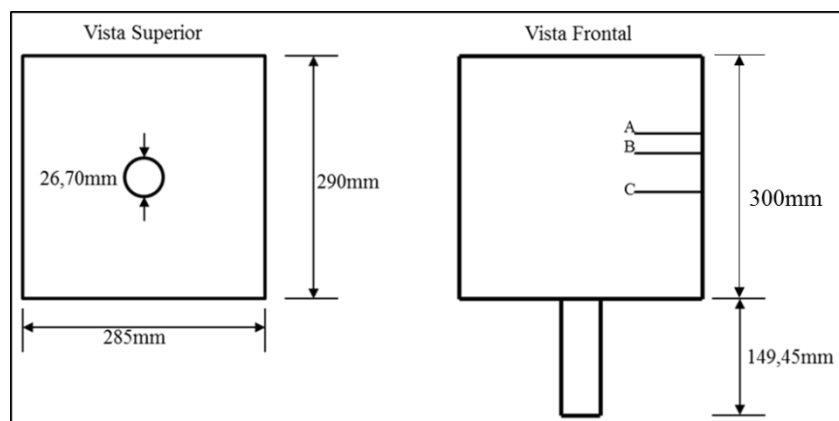


Figura 2. Representação do modelo em acrílico utilizado nos experimentos.

A água à temperatura ambiente foi utilizada para simular o aço, enquanto óleos de silicone com diferentes viscosidades foram empregados para simular a presença de uma camada de escória, cuja espessura foi definida como 20mm.

O procedimento experimental se constituiu em encher o modelo, até a marca A, com a entrada de líquido tangente a uma de suas laterais de forma a induzir um fluxo rotacional. Atingida a marca A, esperou-se 45s para o início do vazamento. A análise do comportamento do jato foi realizada através de um sensor ultrassônico modelo SICK UM12-1172211 de resolução 0,069mm, sendo iniciada quando a água atingia

a marca B. Em C, tem-se a marca da altura média em que se observava o início da formação do vórtice. O ponto definido para a medição da flutuação do jato foi numa altura de 40mm após a saída do mesmo pelo tubo de vazamento. A Figura 3 apresenta um resumo da montagem experimental utilizada.

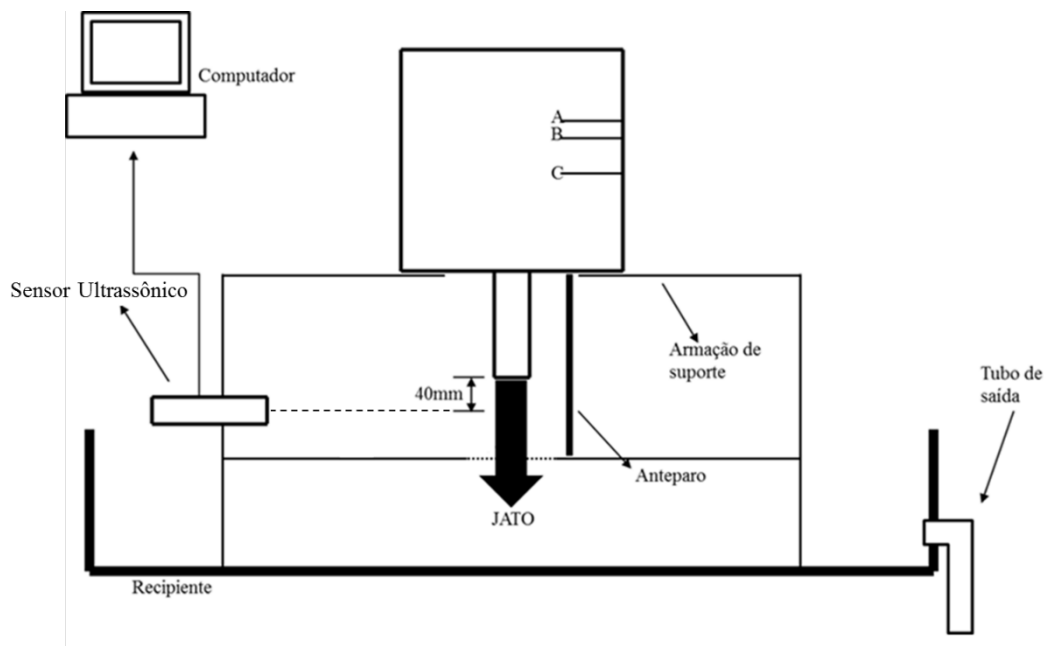


Figura 3. Esquema da montagem experimental utilizada.

Os dados enviados do sensor para o computador foram tratados de forma a se obter um gráfico relacionando a distância do sensor à superfície do jato, em função do tempo, podendo-se investigar variações do padrão de flutuação com a passagem de outras fases.

Utilizou-se ainda uma câmera AOS S-PRI de alta velocidade, a fim de se captarem imagens para melhor avaliar e descrever o comportamento do jato durante o vazamento.

Calculou-se ainda a vazão média de água nas condições de vazamento sem e com a presença do vórtice. Inicialmente, para o cálculo da vazão sem a presença do vórtice ao longo do jato, calculou-se o tempo em que o nível de água percorreu a distância entre as marcas B e C, então, a vazão média foi tomada como sendo a variação do volume de água neste intervalo de tempo.

Analogamente, para o cálculo da vazão média quando havia a presença de vórtice, utilizou-se o tempo em que se observava a formação do mesmo até o final do vazamento, e a variação de volume água neste intervalo de tempo foi tomada como sendo a vazão média.

Por fim, a vazão média global foi calculada como a razão entre o volume inicial e o tempo para esvaziamento completo do modelo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Vazão de água

Como citado por Tan et. al [8], com a formação do vórtice, o arraste de escória (ou da segunda fase) preenche a parte interior do jato e acarreta na redução da vazão de aço. Assim, as vazões médias de água foram calculadas para as condições antes e após o aparecimento do vórtice. Os resultados estão sumarizados na Tabela 1, abaixo, mostrando que com o surgimento do vórtice houve uma redução de aproximadamente 77% na vazão média.

Tabela 1. Vazões em cada etapa do esvaziamento

| Condição | Vazão (L/min) |
|---|---------------|
| Início do vazamento até a formação do vórtice | 66.84 |
| Formação do vórtice até esvaziamento completo | 15.57 |
| Vazão média global | 19.80 |

3.2 Detecção do vórtice e variação na flutuação média do jato

Primeiramente foram realizados experimentos somente com água para analisar a viabilidade da detecção da formação do vórtice (passagem de ar através do jato de água) pelo sensor ultrassônico. A Figura 4 apresenta a curva típica obtida nos experimentos.

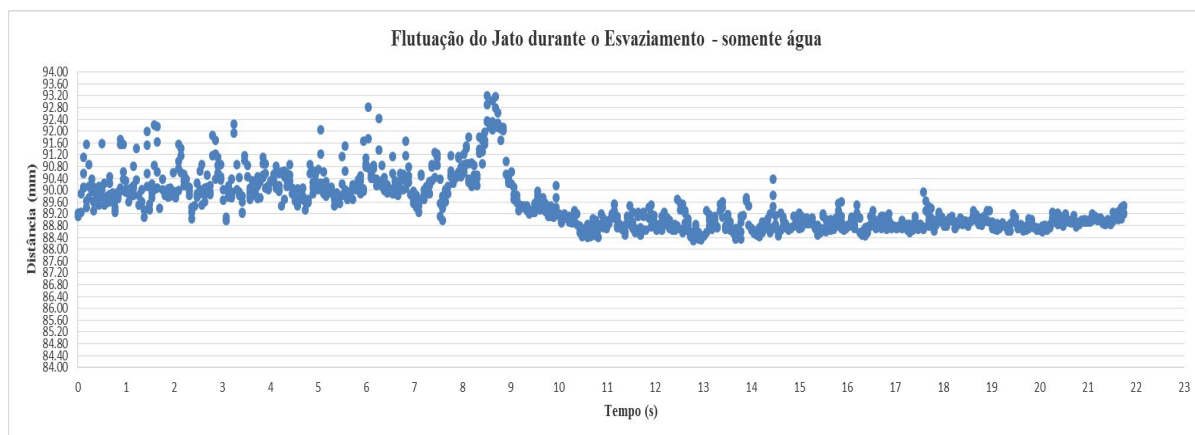


Figura 4. Análise da flutuação do jato durante o esvaziamento, somente com água.

Inicialmente, aproximadamente de 0s à 8s, não há passagem de ar, e observa-se um padrão constante de flutuação. Nos instantes entre 8s e 9s, observa um pico na flutuação, caracterizando a passagem de bolhas pelo jato, e consequente formação do vórtice. Posteriormente, com o vórtice já formado, o jato se estabiliza, com uma região central preenchida de ar envolta por uma região de água, exibindo flutuação menor do que nos períodos iniciais, onde não há a presença de vórtice.

Matematicamente, a flutuação do jato apresentada na Tabela 2 foi calculada através do desvio-padrão dos dados, observado em intervalos de tempo iguais para cada condição (presença e ausência do vórtice).

Tabela 2. Variação na flutuação média do jato com a formação do vórtice

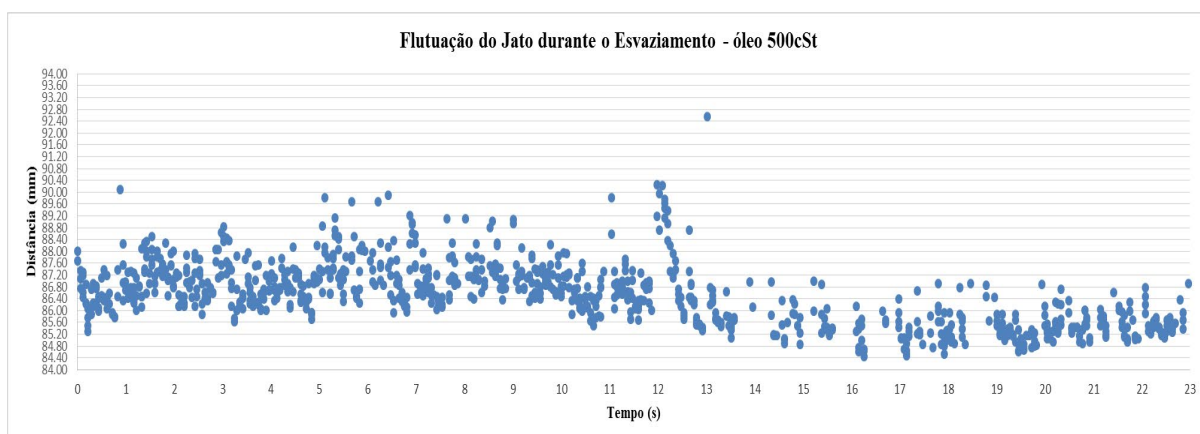
| Teste | Flutuação (mm) | |
|--------------------|----------------|-----------|
| | Água | Água + ar |
| 1 | 0.66 | 0.29 |
| 2 | 0.63 | 0.32 |
| 3 | 0.72 | 0.26 |
| Média (mm) | 0.67 | 0.29 |
| Desvio-padrão (mm) | 0.05 | 0.03 |

Analisando os valores da Tabela 2, nota-se que houve uma redução de 56,7% na flutuação média do jato devido à formação do vórtice. Este efeito de variação na oscilação do jato devido à passagem de outras fases também foi observado por Tan et. al [8]. Note-se que este cálculo não leva em conta o aumento inicial de flutuação causado pela passagem das primeiras bolhas antes da formação do vórtice em si (período entre 8s e 9s do gráfico da Figura 4).

De forma análoga, foram realizados experimentos de vazamento com uma camada de 20mm de óleo de silicone com viscosidade igual à 500 cSt, simulando uma camada de escória líquida sobrenadante ao aço.

O gráfico mostrado na Figura 5 apresenta a curva característica dos experimentos realizados com essa configuração, sendo que, neste caso, houve uma redução de 16,4% na flutuação média do jato, mais branda do que no caso em que se utilizou somente água nos experimentos.

Observa-se que em ambos os casos há um pico de agitação no jato no momento da formação do vórtice, seguida de uma redução na intensidade de flutuação, que foi mais intensa no caso em que houve somente a passagem de ar.

**Figura 5.** Análise da flutuação do jato durante o esvaziamento, com a presença da camada de óleo 500cSt.

3.3 Comportamento do jato durante o vazamento

As imagens da Figura 6, obtidas com a câmera de alta velocidade, mostram detalhadamente o comportamento do jato durante o vazamento.

No estágio inicial, onde há somente água sendo vazada, observam-se dois comportamentos distintos do jato. O primeiro mostra-se mais estável, com espalhamento apenas nas partes inferiores. Já no segundo, que precede o início da formação do vórtice, observa-se maior espalhamento nas regiões inferiores, além de uma maior turbulência na superfície como um todo.

Considerando o vazamento com presença de vórtice, existem também diferentes estágios, como se observa nas imagens da Figura 7. O processo se inicia com a dragagem de pequenas bolhas conforme o vórtice se aproxima da extremidade do tubo de vazamento (Figuras 7.a, 7.b e 7.c). Em seguida, ocorre uma intensa e rápida agitação do jato (Figura 7.d), e posteriormente, quando já há de fato um canal estável de ar formado, o padrão de flutuação é alterado, tornando-se mais suave, com intensidade reduzida, Figuras 7.e e 7.f.

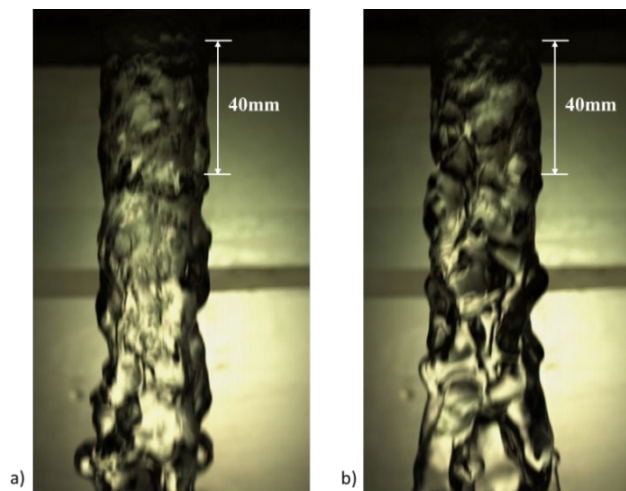


Figura 6. Detalhe do jato nos estágios iniciais do vazamento.

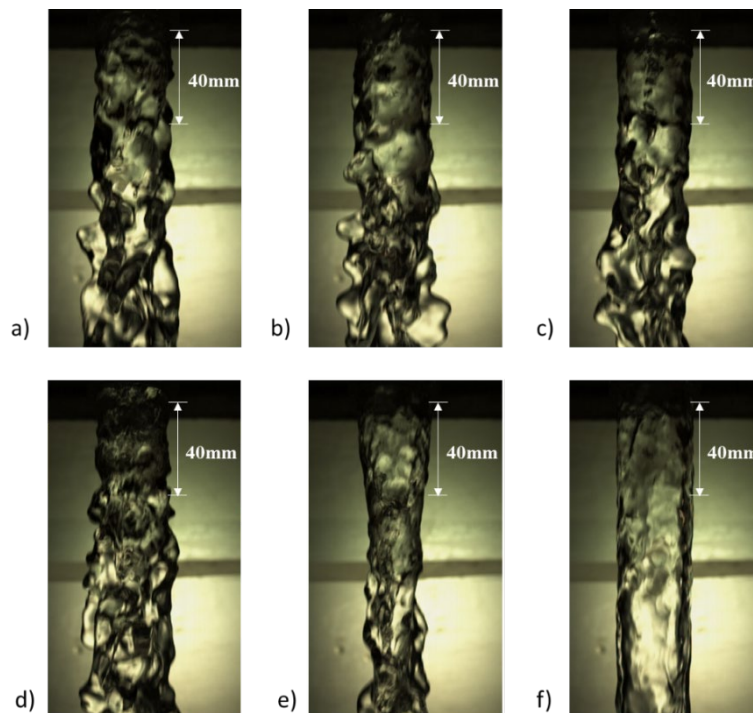


Figura 7. Detalhe do comportamento do jato durante vazamento – a), b) e c) dragagem das primeiras bolhas; d) pico de agitação; e) e f) estabilização do canal de ar através do jato e suavização na flutuação.

As imagens da Figura 8 mostram a formação do vórtice a partir da superfície da água durante o esvaziamento.

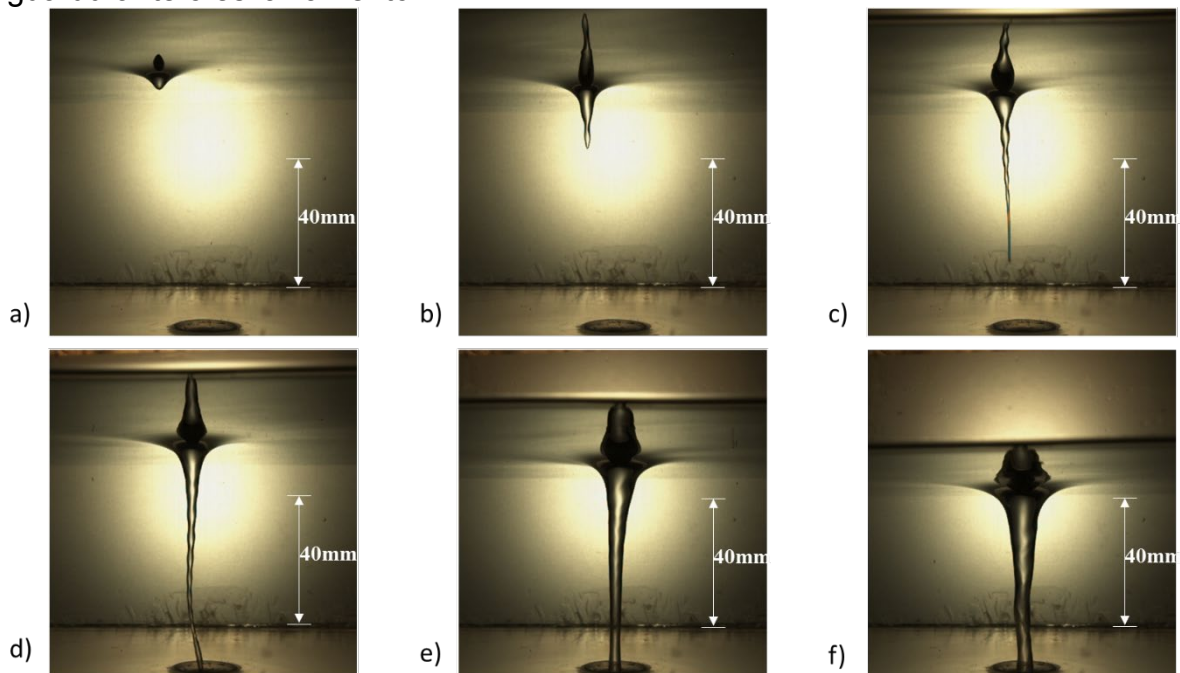


Figura 8. Formação do vórtice a partir da superfície, em vista frontal – a), b) e c) surgimento e avanço do vórtice para o canal de vazamento); d), e) e f) formação, estabilização e crescimento do canal de ar através do jato.

Comparando as imagens das Figuras 7 e 8, nota-se que o comportamento observado na Figura 7.d é a consequência daquele descrito na Figura 8.d, ou seja, nos momentos iniciais de formação do vórtice, quando ocorre agitação intensa do jato.

No caso da presença do óleo 500cSt simulando a escória, há algumas diferenças no comportamento do jato. A sequência de imagens da Figura 9 apresenta os principais estágios observados nos experimentos realizados com essa configuração.

Inicialmente (Figura 9.a) tem a flutuação inicial, em que há somente água sendo vazada. Em seguida (Figura 9.b), observa-se a dragagem das primeiras partículas de óleo, com leve aumento na turbulência da superfície do jato. Em seguida, na Figura 9.c, tem-se a formação de um estreito canal interno de óleo, no entanto, o padrão de oscilação não sofre grandes alterações. As Figuras 9.d e 9.e mostram o crescimento e estabilização do canal interno de óleo, com oscilação mais branda do jato. Na sequência (Figura 9.f), há a passagem das primeiras bolhas de ar junto com o óleo e uma consequente alteração no padrão de oscilação. Na Figura 9.g já se observa um canal de ar formado através do jato, com pouquíssima quantidade de óleo, e finalmente, na Figura 9.h, o padrão de oscilação no final do esvaziamento torna-se suave e estável, similar ao observado nos experimentos em que se utilizou somente água.

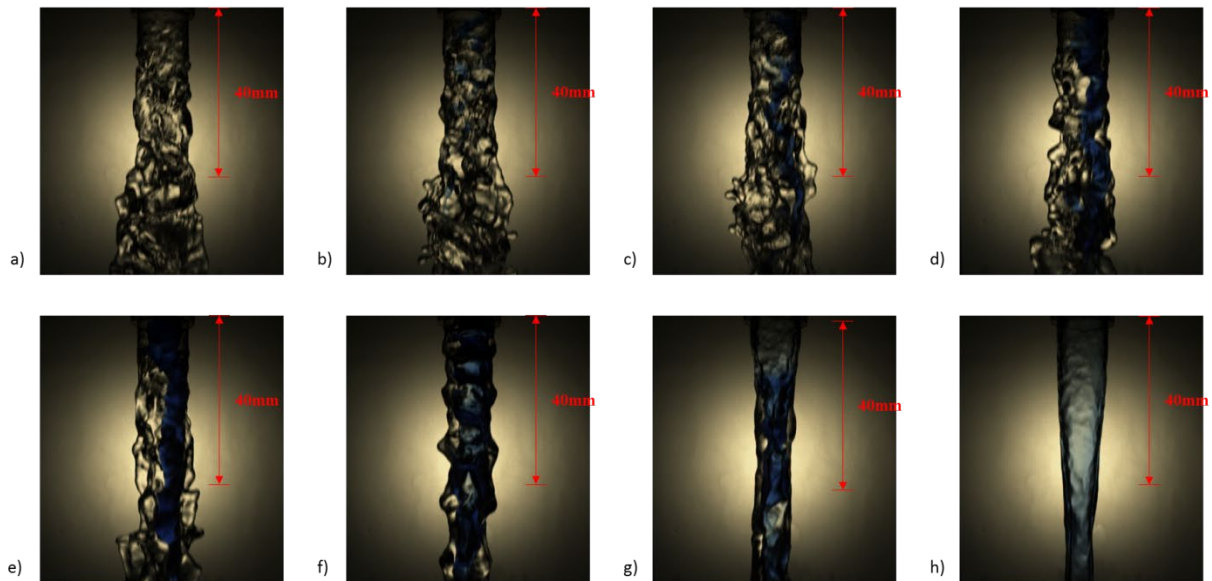


Figura 9. Comportamento do jato durante o vazamento em experimento realizado com uma camada de 20mm de óleo de viscosidade 500cSt simulando a presença de escória.

As imagens da Figura 10 mostram a formação do vórtice a partir da interface água-óleo, em vista frontal, e apresenta a formação de um canal com ângulo mais acentuado a partir da superfície para a entrada do tubo de vazamento, em comparação com os experimentos realizados somente com água.

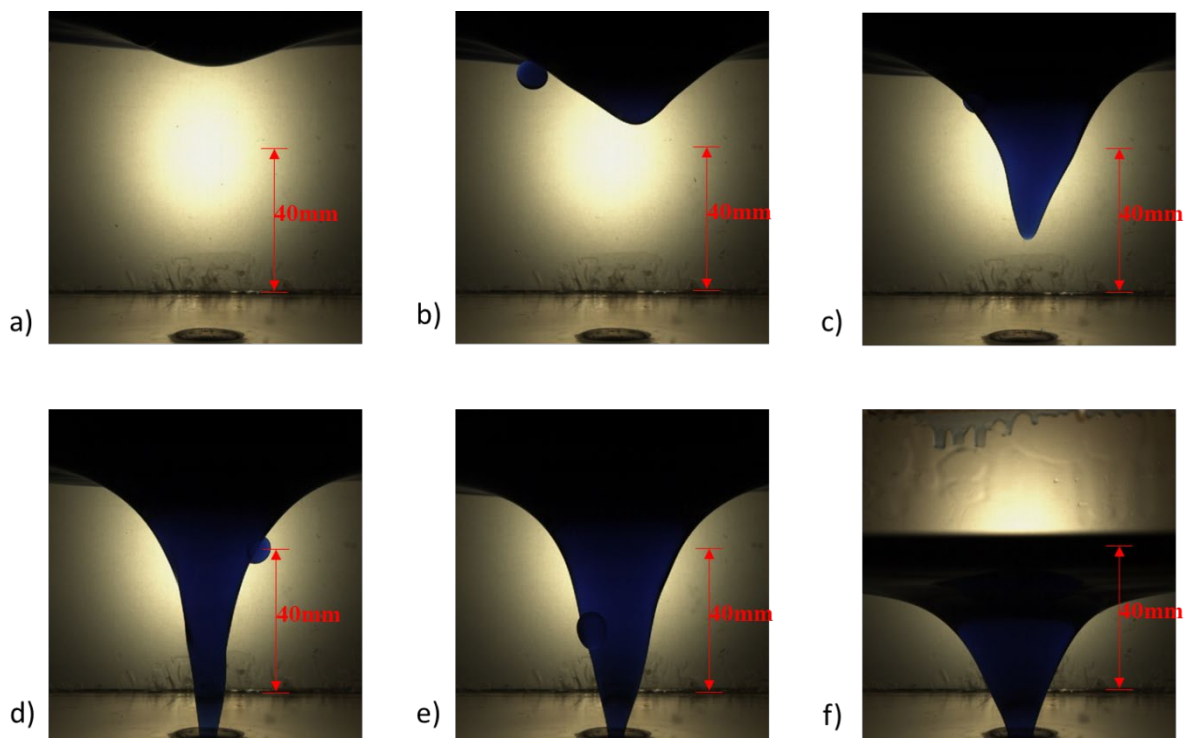


Figura 10. Formação do vórtice a partir da interface água-óleo 500cSt.

Comparando o comportamento e variação na flutuação média do jato após a formação do vórtice, nos experimentos com e sem o óleo de silicone, confirma-se que há significativa diferença entre as duas condições, confirmando o que Sato et. al [4] observaram.

4 CONCLUSÃO

Através da análise dos gráficos obtidos com o sensor ultrassônico e das imagens obtidas com câmera de alta velocidade, pode-se observar que nos experimentos somente com água houve uma redução de aproximadamente 77% na vazão devido à formação do vórtice e consequente formação de um canal interno de ar através do jato de água, e a flutuação média do jato sofreu uma redução de aproximadamente 57% após a formação do vórtice. Já nos experimentos com óleo de silicone simulando a escória, a redução na flutuação média do jato foi mais branda, em torno de 16%, sendo que o comportamento do jato durante o vazamento apresenta maiores variações do que no caso contendo somente água.

Em ambas as condições, o sensor ultrassônico foi capaz de detectar a passagem da segunda fase (ar e/ou óleo) durante o vazamento, evidenciando um pico na flutuação, resultado de uma maior turbulência na superfície do jato, causada durante a estabilização de um canal interno da segunda fase através do mesmo.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional do Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Fundação Gorceix, à FAPEMIG e à ArcelorMittal Tubarão pelo apoio.

REFERÊNCIAS

- 1 Kuwana K, Hassan MI, Singh PK, Saito K, Nakagawa J. Scale-model Experiment and Numerical Simulation of a Steel Teeming Process. *Materials and Manufacturing Processes*. 2008; 23:407-412.
- 2 Mazumdar S, Pradhan N, Bhor PK, Jagannathan KP. Entrainment during Tapping of a model Converter using two Liquid Phases. *ISIJ International*. 1995. 35(1):92-94.
- 3 Andrzejewski P, Diener A, Pluschkell W, Vanino G, Weber L, Hage-Jewasinski H, Sucker D, Schwerdtfeger K, Dubke M, Spitzer KH. Fluid Flow Phenomena of Metal and Slag during Drainage of Metallurgical Vessels. *Verein Deutscher Eisenhüttenleute*. 1986; 97-118.
- 4 Sato CT, Ramires M, Tavares RP. Avaliação do Comportamento Escória/Aço durante o Esgotamento da Panela por meio de Modelagem Física. *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*. 2009; 5(4):210-214.
- 5 Sankaranarayanan R, Guthrie RIL. Slag Entrainment through a “Funnel” Vortex during Ladle Teeming Operations. *Steelmaking Conference*. 1992; 665-664.
- 6 Santos SS, Furtado HS, Silva CA, Silva IA, Seshadri V. Modelagem Física da formação de Vórtice durante o Vazamento do Aço de uma Panela. *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*. 2008; 5(1):12-16.
- 7 Rodrigues EF, Miranda AM, Rocha LJC. Numerical Simulation of Fluid Dynamics during Steel Draining of Ladle. *Asociación Argentina de Mecánica Computacional*. 2010; 29:3825-3845.
- 8 Tan D, Ni Y, Zhang L. Two-phase sink vortex suction mechanism and penetration dynamic characteristics in ladle teeming process. *Journal of Iron and Steel Research, International*. 2017; 24:669-677.