

MODELAMENTO FÍSICO E MATEMÁTICO DO VAZAMENTO DE AÇO DA PANELA*

Thiago Araújo Santos de Oliveira¹

Weslei Viana Gabriel²

Salvatore Giuliano PeixotoTropia¹

João Victor Gomes Guimarães Ananias¹

Itavahn Alves da Silva³

Carlos Antônio da Silva³

Johne Jesus Mol Peixoto³

Resumo

O arraste de escória para o distribuidor, durante a drenagem de panelas de aço, tem grande impacto no rendimento metálico, limpidez e produtividade no processo de lingotamento contínuo. Modelamento físico e matemático foram utilizados para o estudo da formação do escoamento tipo vórtice e funil no esgotamento de panelas de aço. Em um modelo em escala 1:6,5 foi avaliada a influência da vazão de drenagem, altura inicial de líquido, temperatura do banho e estratificação da temperatura sobre a altura crítica (Hcr) de formação de vórtice. Para todas as condições experimentais, o valor de Hcr se mostrou crescente com o aumento da vazão, respeitando uma relação linear. Através da técnica de *Particle Image Velocimetry* – PIV observou-se o desenvolvimento do campo de velocidades sub-superficiais da água durante a drenagem em modelo de acrílico em escala 1:6,5. Os resultados das simulações fluidodinâmicas obtiveram bom acordo com os experimentos físicos, e foram capazes de representar a influência da vazão e da temperatura sobre o valor de Hcr.

Palavras-chave: Drenagem de panela; Vórtice; PIV; Modelamento numérico.

PHYSICAL AND MATEMATICAL MODELLING OF STEEL LADLE DRAINING

Abstract

Slag entrainment during steel ladle drainage plays an important role in metallic yield, cleanness and continuous casting productivity. Physical and numerical models were employed in order to study the vortex and funnel draining flow in steel ladle drainage. A 1:6.5 scale ladle model has been used in order to assess the influence of drainage flow, initial liquid height, bath temperature and thermal stratification inside the ladle on the liquid critical height (Hcr) for vortex onset. In all experimental conditions, the value of Hcr proportionally increased with drainage flow. The sub-superficial velocity field developed during the last moments of drainage has been measured using Particle Image Velocimetry – PIV. Computational Fluid Dynamics simulations shows a good agreement with results from physical modeling, and it is able to describe liquid flow rate and temperature influence over Hcr value.

Keywords: Ladle draining; Vortex; PIV; Numerical modeling.

¹ *Graduando em Engenharia Metalúrgica, Escola de Minas-UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.*

² *Eng. Metalurgista, MSc., Doutorando em Engenharia de Materiais, UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.*

³ *Eng. Metalurgista, Doutor, Professor, DEMET, EM-UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Durante o processo de lingotamento contínuo, o aço líquido é drenado a partir da panela para o distribuidor. À medida que se prossegue o esgotamento da panela, pode-se desenvolver acima da válvula de drenagem uma estrutura de fluxo denominada vórtice ou então o dreno funil. Neste instante, parte da escória sobrenadante na superfície do aço líquido é arrastada pelo canal, em direção ao distribuidor, resultando em contaminação do aço por inclusões não metálicas.

Devido ao efeito deletério das inclusões em propriedades físicas do aço, é de extremo interesse que se interrompa a drenagem da panela no momento de passagem da segunda fase para o distribuidor. Em contrapartida, o volume de aço retido em panela após a formação do vórtice, representa significativa perda no rendimento metálico do processo de lingotamento. Li et al. [1] argumentaram que a perda é de até 3ton de aço para painéis de diâmetro de 2-3m, altura de ~3m e operando com 200ton.

O uso de modelos físicos e numéricos é de grande valia para estudos no sentido de melhor entendimento do fenômeno de formação de vórtice durante a drenagem de painéis, e na proposta de melhorias do rendimento metálico e qualidade do aço produzido. [2-3]

Estão presentes na literatura diversos trabalhos acerca do mecanismo de formação do vórtice e fatores que afetam sua formação e desenvolvimento. A formação e desenvolvimento do vórtice são baseadas no princípio da conservação do momento angular, sendo fortemente influenciada por rotação residual no fluido. O dreno tipo funil, por sua vez, tem início nos últimos instantes da drenagem, quando o fluxo de material através da válvula é maior que o fluxo na direção da mesma, gerando um colapso na superfície ocasionando o fluxo radial para o orifício de saída [4].

Sato [5] avaliou a influência da vazão de drenagem na altura crítica da coluna de água na panela (H_{cr}), no início da passagem de ar. Foi constatado que, outras condições experimentais mantidas constantes, o aumento da vazão de 19 l/min para 28 l/min ocasionou um aumento de 51% em H_{cr} .

No presente trabalho, a drenagem do aço foi simulada através de modelamento físico, utilizando-se um modelo de uma panela de aço em escala 1:6,5. Foram avaliadas a influência da vazão de drenagem, da altura inicial de água (H_0), para os casos: isotérmico a 25°C e 50°C e para o caso não isotérmico a 50°C, sobre a altura crítica H_{cr} . Através de simulações fluidodinâmicas (CFD), utilizando-se o software ANSYS-CFX, foi construído um modelo numérico para o estudo da drenagem de painéis de aço. Os resultados deste modelo foram confrontados com os obtidos pelos testes no modelo físico. Também foram realizadas medições dos campos de velocidade da água na panela durante a drenagem, por meio da técnica de velocimetria por imagem de partículas (PIV), para caracterização do fluxo e aferição do modelo matemático.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Modelo físico

Um desenho esquemático com as dimensões do modelo em escala 1:6,5 é mostrado na figura 1. Água foi utilizada como fluido dinamicamente similar ao aço, as similaridades dinâmicas e cinemáticas foram estabelecidas de acordo com o número adimensional de Froude. A posição da sede de drenagem é a 100,75 mm do

centro da panela. No caso não-isotérmico estudou-se a influência de possíveis correntes convectivas resultantes da extração de calor pela passagem de 3 l/min de água a 25°C numa serpentina de cobre acoplada no exterior da parede lateral (em chapa galvanizada). Seis termorresistências foram utilizadas para monitoramento da temperatura da água nos testes isotérmico a 50°C e não isotérmico.

As termorresistências foram nomeadas da seguinte forma: T4 e T5 na entrada e na saída da serpentina de cobre respectivamente. T0, T1, T2 e T3: no centro da panela encostado ao fundo, encostado ao fundo junto a parede, no centro a 50mm do fundo e no centro a 100mm do fundo, respectivamente Figura 1.

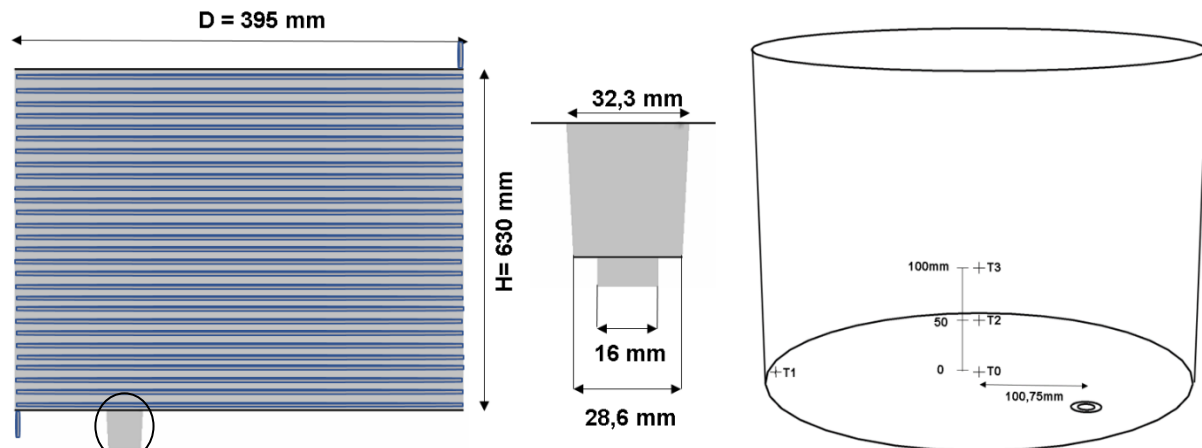


Figura 1. Detalhes do modelo físico em chapa galvanizada a) vista frontal da panela, destacando a serpentina, b) válvula da panela, c) vista da panela, destacando a localização dos termopares.

A vazão de drenagem do sistema foi controlada por meio de uma válvula de esfera acoplada a um motor DC, sendo que a abertura da mesma pode ser definida por meio de um sistema baseado em Arduino. O sistema conta ainda com a suspensão automática da drenagem, no momento de passagem de ar pelo orifício de saída da panela. Um sensor piezométrico foi acoplado ao fundo externo da panela, para captar a vibração gerada no momento da passagem de ar, e transmitir os valores de tensão produzida no cristal para uma placa de aquisição de dados (Arduino). O sistema recebe valores de tensão gerados em tempo real, e para valores maiores que o de referência, aciona o motor para fechamento completo da saída de água.

O experimento consiste inicialmente do enchimento da panela até o nível predeterminado, neste trabalho $H_0 = 100$ mm ou 200 mm. Posterior ao enchimento o líquido permanece em repouso durante 10 minutos ou 15 minutos, a depender da condição, no intuito de dissipar os movimentos residuais do líquido devido ao enchimento. A válvula de drenagem é então aberta e monitora-se a vazão (para os valores analisados de 9, 12 e 16 l/min) utilizando-se um medidor de vazão de palhetas no tubo de saída. Após fechamento da válvula, a água restante na panela é devidamente coletada, sua massa é medida, e o valor obtido utilizado para calcular a altura crítica H_{cr} . Para cada condição experimental foram realizados 10 experimentos, e calculada a média destes valores. As condições experimentais estão descritas na tabela 1.

Tabela 1. Condições experimentais

Tipo de experimento	Vazão inicial (l/min)	Altura Inicial H_0 (cm)	Tempo de <i>holding</i> (min)	Temperatura Inicial da água (°C)	Vazão de água na serpentina (l/min)
---------------------	-----------------------	---------------------------	-------------------------------	----------------------------------	-------------------------------------

Isotérmico 25°C	9,12 e 16	10 e 20	10	25	0
Isotérmico 50°C	9,12 e 16	12*	15	50	0
Não Isotérmico	16	20	15	50	3.0
PIV 25°C	16	20	10	25	0
PIV 50°C	16	20	15	50	0

*Para o caso isotérmico 50°C foi utilizada a altura de 12cm para se obter maior número de informação com a termoresistência na posição de 100mm.

2.1.1 Condição isotérmica a 50 °C

Para análise da influência da temperatura da água sobre o valor de Hcr, o procedimento consistiu no aquecimento da água a 55 °C, de modo que após o tempo de espera de 15 minutos o início da drenagem ocorresse a 50°C. A homogeneização do sistema durante o aquecimento foi confirmada pelo acompanhamento dos valores de temperatura, tal como detectados pelas termoresistências.

Ao se utilizar água aquecida a 50°C como líquido de trabalho nota-se a formação de um vórtice com canal bastante fino, gerando um grau de vibração não perceptível ao sensor piezelétrico (nos experimentos a 25°C os instantes iniciais de formação de vórtice coincidem com aumento perceptível de vibração). Desta forma o momento de fechamento da válvula de drenagem se deu pela observação da passagem de bolhas de ar pelo tubo transparente situado ao final da sede de vazamento.

2.1.2 Condição não isotérmica

O desenvolvimento de um perfil de temperatura estratificado no interior da panela foi obtido por meio da passagem de água a 25°C na serpentina acoplada à panela, durante 15 minutos, Figura 2. A vazão de água, de 3 l/min, na serpentina foi controlada utilizando-se o medidor de vazão do tipo magnético Rosemount.

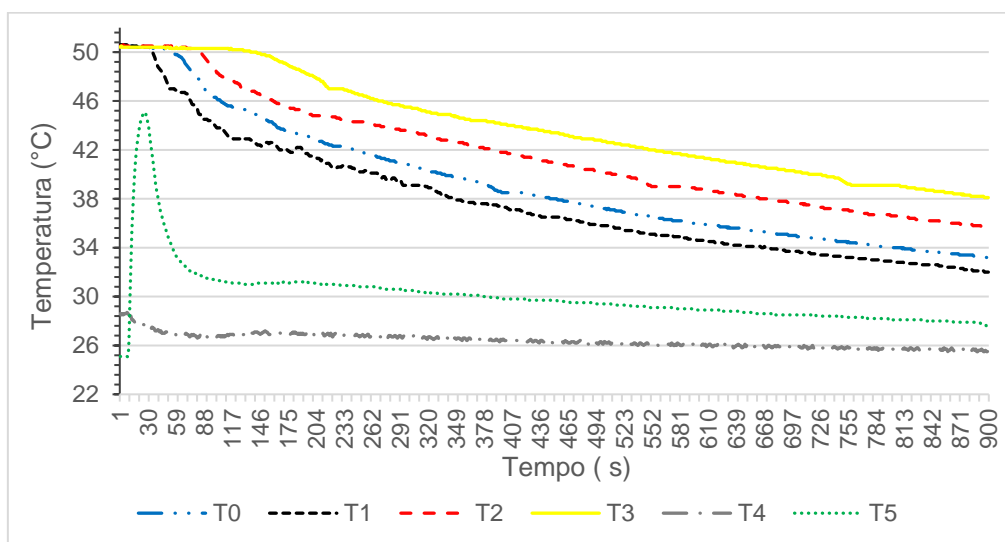


Figura 2. Perfil de temperatura no interior da panela durante a passagem de água pela serpentina.

De posse dos valores registrados da evolução da temperatura de entrada e saída da serpentina (termoresistências T4 e T5 respectivamente), durante o tempo de espera, calculou-se o fluxo térmico na parede lateral da panela, de acordo com a equação (1):

$$\dot{Q} \left(\frac{W}{m^2} \right) = \frac{\dot{m} * C_p * \Delta T}{S} \quad (1)$$

Onde \dot{m} é a vazão mássica de água na serpentina em kg/s; C_p o calor específico da água a pressão constante em J/kg.K; $\Delta T = (T_5 - T_4)$ a diferença de temperatura da água na saída e a entrada da serpentina e S a área lateral do cilindro correspondente à altura de água na panela, em m^2 .

Ao final do resfriamento a maior diferença de temperatura observada no interior da panela foi de $6^\circ C$, correspondente aos valores lidos nas termorresistências T_3 e T_1 , como observado no gráfico da figura 3. O principal objetivo do teste com troca de calor é verificar a influência das possíveis correntes convectivas, geradas no interior da panela devido à estratificação de temperatura do líquido, no valor de H_{cr} .

2.1.3 Velocimetria por imagem de partículas – PIV

A caracterização dos campos de velocidade durante a drenagem da panela via modelagem física foi realizada utilizando-se a técnica PIV. Esta técnica determina a velocidade do fluido através do cálculo do deslocamento de partículas, de mesma densidade que a água, em relação ao intervalo de tempo entre os pulsos disparados pelo laser [6]. Foram realizados dois testes para cada condição descrita na Tabela 1. Utilizou-se uma panela em acrílico, de dimensões idênticas a panela em aço galvanizado, na qual foi posicionado um plano de laser horizontal e paralelo ao fundo da panela, situado a 15mm do fundo, conforme a Figura 3. Após processamento das imagens capturadas pela câmera CCD, utilizando o software *DANTEC Dynamics*, obtêm-se os vetores velocidades instantâneos durante a drenagem da panela. Estes perfis de velocidades são utilizados para caracterizar o fenômeno de drenagem, visualizar a formação do escoamento tipo vórtice ou dreno, bem como parâmetro auxiliar na validação da simulação numérica desenvolvida. Traçou-se gráficos de velocidade através de valores obtidos do perfil ao longo da reta destacada na Figura 3, comparando os valores com os obtidos via CFD.

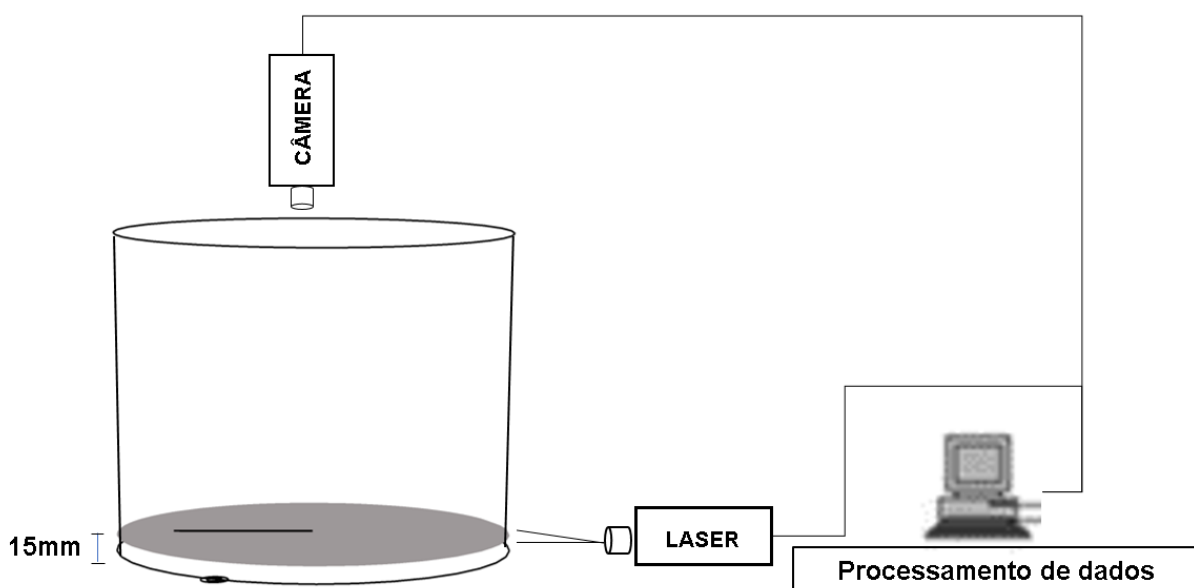


Figura 3. Desenho esquemático do aparato experimental da técnica PIV.

2.2. Modelo matemático

Para as simulações matemáticas foi utilizado o *software* CFX (ANSYS®). O modelo descreve o fluxo transiente, bifásico (água e ar) durante o processo de drenagem. Os valores das propriedades físicas da água usadas no modelamento matemático, são mostrados na tabela 2. O volume de fluido na panela foi dividido em duas regiões, uma contendo água até a altura inicial H_0 , logo acima uma camada de ar. A simulação foi conduzida com fluxo turbulento de água/ar (modelo $k-\epsilon$), considerados como fluidos incompressíveis. A formação do escoamento tipo vórtice é um fenômeno complexo com número de Reynolds maior que 4000 [8]. Dessa maneira o fluxo na panela, durante a drenagem, pode ser descrito por modelos turbulentos. O *software* resolve as equações de conservação de massa (continuidade) e conservação de quantidade de movimento (Navier-Stokes), bem como a equação de conservação de energia para a condição não isotérmica. Detalhes deste equacionamento podem ser encontrados em Conceição [9].

Tabela 2. Valores de propriedades físicas da água em função da temperatura.

Temperatura	Viscosidade (Pa.s)	Densidade (kg/m ³)	Tensão superficial Água/ar (N/m)
25°C ^(a)	0,00089 ^(a)	997 ^(a)	0,0720 ^(a)
50°C ^(b)	0,00054 ^(b)	981 ^(c)	0,0679 ^(d)

* Dados retirados de: (a) = [7]; (b) = [9]; (c) = [12]; (d) = [13].

A simulação para o caso não isotérmico foi conduzida em duas etapas: na primeira, considera-se a panela com fluido até à posição 20cm, temperatura inicial de 50°C e válvula de saída fechada. Extrai-se calor da mesma pela aplicação de um fluxo térmico na parede lateral por 15 minutos. Após este período, inicia-se a segunda etapa, que corresponde à drenagem, utilizando como condição inicial o resultado obtido na primeira. Para a primeira etapa, devido ao baixo gradiente térmico observado no interior da panela via modelagem física, foi considerada a condição de escoamento laminar. O segundo caso (drenagem) foi conduzido utilizando-se o modelo de turbulência $k-\epsilon$. Para modelar a transferência de calor foi adotado o modelo homogêneo *Thermal energy* [7].

Empregou-se uma malha tetraédrica contendo cerca de 490 mil nós. O teste independência da malha foi realizado para a condição isotérmica com H_0 igual a 100mm, adotando altura crítica H_{cr} obtida pelo modelo numérico como critério para escolha da melhor malha, em comparação aos resultados do modelo físico. As equações de conservação foram discretizadas segundo o esquema *high resolution*. Para os testes isotérmicos foi escolhido como critério de convergência o valor de RMS (*root mean square*) sendo 10^{-5} e 10^{-4} para os não isotérmicos.

2.2.1 Condições de contorno

A escolha das condições de contorno estabelecidas no modelo numérico está de acordo com as condições físicas no domínio da panela. Foram consideradas:

- Paredes: Toda extensão lateral da panela, fundo e sede de vazamento respeitando a condição de não deslizamento (*no slip wall*);
- Superfície livre (superior da panela): superfície livre da panela contendo a camada de ar considerada como plana e aberta (*opening*);

- Interface Água/Ar: modelo homogêneo de superfície livre (*Homogeneous Free Surface model*);
- Saída: Extremidade inferior da sede de vazamento por onde é drenada a água, considerada como saída (*outlet*) com valor de velocidade de fluido normal a superfície. Para cada condição (Tabela 1), foi utilizada uma expressão para a velocidade de saída advinda de regressão dos valores de vazão obtidos no modelo físico;
- Transferência de calor: Para o caso não isotérmico foi considerado um fluxo de calor (W/m^2) na parede lateral da panela através de uma expressão, calculada a partir modelo físico, utilizando-se o fluxo de calor dado pela equação (1), durante os 900s do procedimento experimental. As demais paredes foram consideradas adiabáticas, e a superfície livre como condição de abertura a 25°C.

2.3 Resultados e Discussão

2.3.1 Modelo Físico:

A figura 4 apresenta a média dos resultados de altura crítica obtidos no modelo físico, para cada condição da Tabela 1. As vazões escolhidas (9 a 16 l/min), de acordo com o adimensional de Froude, são equivalentes a taxas de enchimento de distribuidor de 7,6 a 13,4 ton/min. A variável resposta para avaliar os resultados dos testes, foi a altura de líquido (H_{cr}) retida na panela após passagem de ar pela sede de vazamento. Para todas as condições experimentais simuladas, foi possível verificar um aumento de H_{cr} com o aumento da vazão de drenagem. Foi obtida uma relação linear entre H_{cr} e a vazão de drenagem para todos os casos estudados. Essa mesma tendência foi observada em outros trabalhos [9-10].

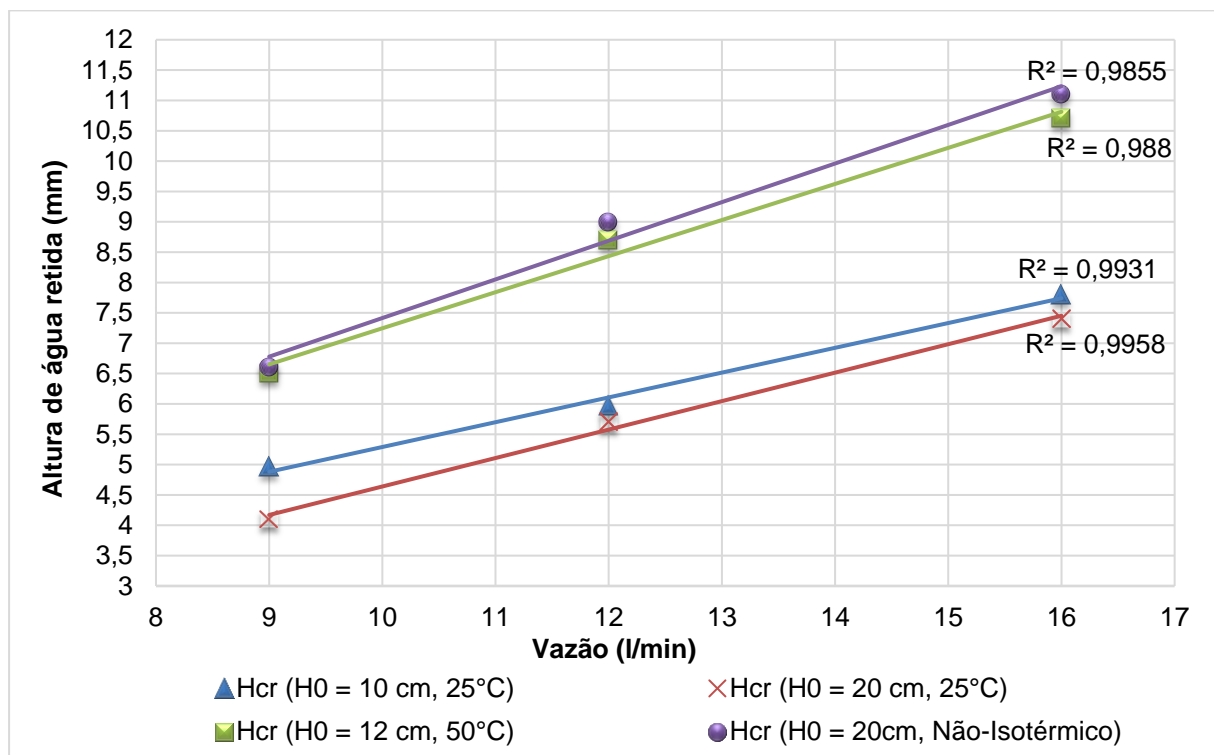


Figura 4. Relação entre o valor de H_{cr} e a vazão de drenagem para os testes físicos.

Da Figura 4 observa-se também que, para os testes isotérmicos a 25°C e alturas iniciais de $H_o = 10$ e 20 cm, não houve grande diferença no valor de Hcr, sendo em média 7% maior para $H_o = 10$ cm. Sankaranarayanan [4] afirma que quanto maior a altura inicial de aço na panela, menor o valor de Hcr. Pode-se argumentar que para $H_o = 20$ cm haverá mais tempo para que se dissipem possíveis campos residuais de velocidades persistentes após o tempo de 10 minutos de espera, acarretando menor altura de líquido retido na panela em comparação a $H_o = 10$ cm.

Também foi analisado o caso isotérmico, a 50°C, e as possíveis influências no valor de Hcr devido às mudanças nas propriedades físicas da água (viscosidade, densidade e tensão superficial). Foi constatado que, os experimentos conduzidos a $H_o = 10$ cm e 50°C obtiveram valores de Hcr cerca de 30% maiores em comparação aos de $H_o = 10$ cm e 25°C. Para tal caso, pode-se destacar a influência da diminuição da viscosidade e tensão interfacial da água devido ao aquecimento. O atrito viscoso é responsável pela mitigação final do campo de velocidades gerado durante o enchimento; então uma maior viscosidade pode suprimir a formação antecipada do vórtice [1]. Além do mais um valor mais elevado de tensão interfacial corresponde a uma maior capacidade da interface em resistir à deformação; a formação do canal ou *dimple* se torna mais difícil. Em seu trabalho Kojola [11] concluiu que, para o dreno tipo funil, menor valor de tensão interfacial ocasiona aumento de Hcr.

Para o teste não isotérmico, como visto em Figura 5, os valores de Hcr foram em média 36% maiores em comparação ao caso $H_o = 20$ cm e 25°C. Estes valores não diferem significativamente dos obtidos para o caso isotérmico a 50°C. Esta combinação de resultados sugere que a mudança na viscosidade da água apresenta maior influência sobre o valor de Hcr em comparação as possíveis correntes convectivas geradas pelo gradiente térmico desenvolvido sob as condições experimentais dos testes não isotérmicos.

2.3.2 Velocimetria por imagem de partículas – PIV:

Para melhor entendimento do fenômeno de formação de vórtice, os perfis de velocidade instantânea da água foram medidos num plano a 15 mm do fundo da panela a cada 0,2s durante a drenagem. A sequência de desenvolvimento do campo rotacional, para o teste isotérmico a 25°C é mostrada na Figura 5.

No estágio inicial do vazamento as componentes horizontais de velocidade na direção da sede de válvula são de pequena magnitude; este comportamento perdura até 40s após o início das medições e 11cm de água na panela. De acordo com o princípio de conservação do momento angular, as partículas de fluido aumentam suas velocidades tangenciais à medida que o nível de água na panela vai diminuindo; após ser atingido um valor crítico de velocidade de rotação, se tem o início do primeiro estágio de formação de vórtice, a estrutura tipo *dimple* [4]. Visualmente é percebido um pequeno colapso na superfície da água e um redemoinho tende a se estender, como sugere a recirculação observada na Figura 5, aos 60s e altura de líquido na panela de 6,5cm. O pequeno vórtice consegue se desenvolver à medida que as velocidades tangenciais vão aumentando. Aos 80s, com 2,0cm de líquido na panela, é possível verificar um intenso campo de velocidades tangenciais, momento este, em que se está na iminência da formação do vórtice completamente desenvolvido, e arraste de segunda fase através da sede. Sendo assim, nos primeiros 40s (metade do conteúdo de líquido na panela) de teste, o campo de velocidades superficiais da água na panela tem orientação radial em

direção ao centro da sede, após este instante, o campo de velocidades torna-se circular, devido ao aumento da energia de rotação no fluido.

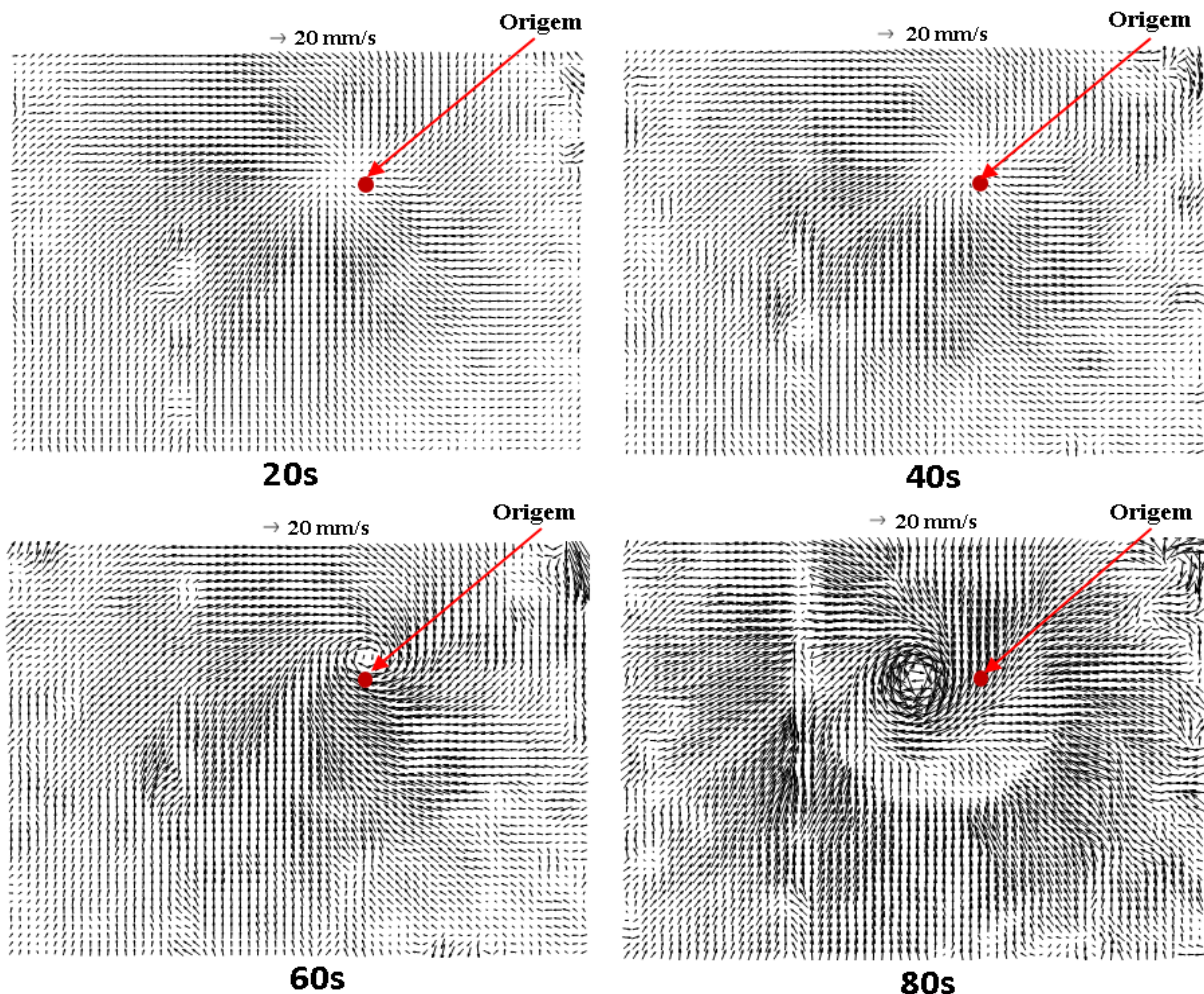


Figura 5. Evolução do campo de velocidades, medido pela técnica PIV, durante a drenagem da panela no teste isotérmico 25°C e vazão de 16 l/min.

2.3.3 Modelo Numérico:

Para comparação quantitativa dos valores de velocidade, no modelo numérico foi avaliada a velocidade superficial da água ao longo da linha 1, posicionada na direção radial no centro da sede de vazamento, figura 6(a). Esta linha está contida na área de atuação do plano de laser do equipamento PIV (16 cmx16 cm) nas medições de velocidade. Os valores de velocidade superficial obtidos pelo modelo matemático e os calculados pelo PIV, ao longo da linha 1 são mostrados na figura 6(b).

Os valores de velocidades obtidos pela simulação CFD apresentam a mesma tendência de aumento ao se aproximar do centro da válvula na direção radial, que é observada na curva dos valores calculados pela técnica PIV. Em ambos os casos os valores de componentes horizontais de velocidade se aproximam de zero no centro da sede, uma vez que nesta região a principal componente da velocidade é na direção vertical.

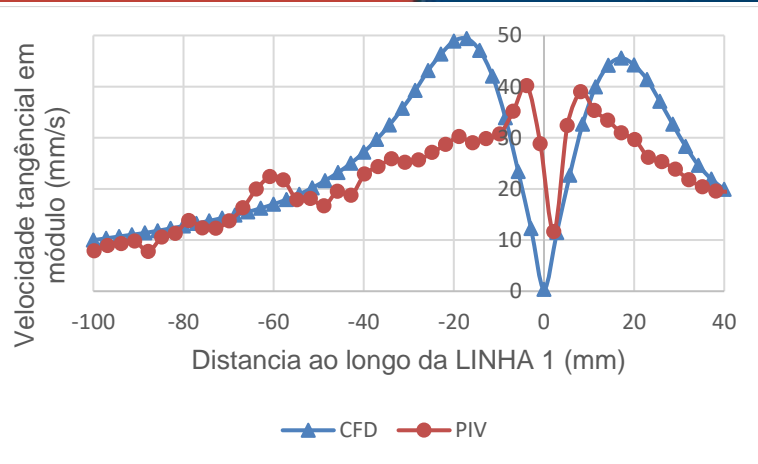
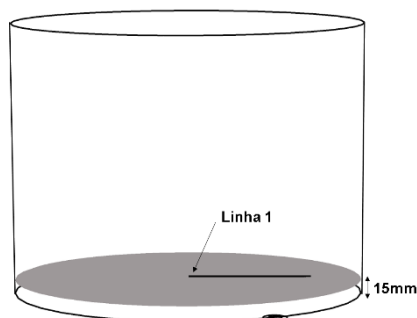


Figura 6. (a) figura esquemática da panela com a localização da linha 1 utilizada na análise; (b) gráfico dos valores de velocidade calculados pelo modelo matemático e via PIV para 70s de drenagem (4cm de líquido na panela) no caso isotérmico a 25°C, $H_o = 20$ cm e 16 l/min.

Para determinação da altura de formação do vórtice ou funil nas simulações matemáticas foi considerado o momento em que a vazão mássica de água na saída da válvula apresentasse uma redução de 30% para o caso isotérmico a 25°C e 15% para as demais condições, conforme Figura 7. Essa diferença em critério é decorrente das mudanças de estrutura de fluxo detectadas no modelo físico. A queda repentina de vazão se dá pelo arraste de ar, de menor densidade em relação a água, pelo orifício de saída [9].

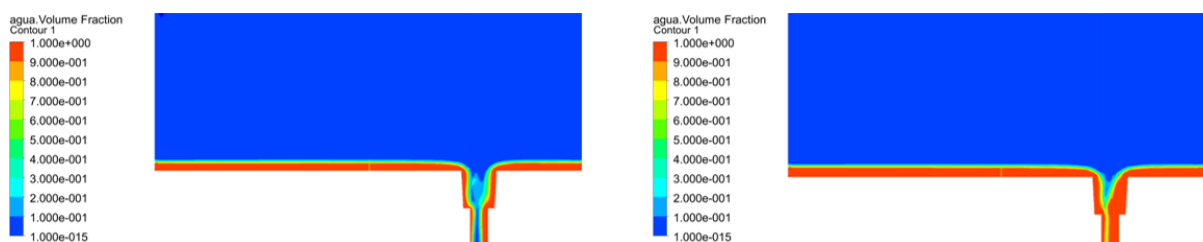


Figura 7. (a) Queda de 30% da vazão devido a formação do dreno (teste isotérmico 25°C, 16 l/min). (b) Queda de 15% de vazão devido a formação do vórtice (teste isotérmico 50°C, 16 l/min).

Os dados obtidos pelo modelo numérico foram confrontados com aqueles adquiridos no modelo físico e o resultado pode ser verificado na Tabela 3, alcançando satisfatória correspondência (diferença menor que 15%). Além disso, o modelo matemático foi capaz de prever a influência das variáveis (vazão de drenagem e temperatura da água) sobre a altura crítica de líquido retido na panela. Obteve-se uma boa correlação linear entre os resultados obtidos via modelamento físico e CFD, conforme apresentado na Figura 8.

Tabela 3. Comparação entre os resultados de Hcr obtidos pelos modelos físico e matemático.

Condição Experimental	Altura Inicial H_o (mm)	Vazão inicial (L/min)	Hcr Modelo Físico (mm)	Hcr Modelo Numérico (mm)
Isotérmico 25°C	100	9	5,0	5,6
		12	6,0	6,6
		16	7,8	8,4
		9	4,1	5,2

Isotérmico 50°C	200	12	5,7	6,3
		16	7,4	8,3
	120*	9	6,5	7,2
		12	8,7	8,1
		16	10,7	10,2
	200	9	-	6,4
12		-	7,8	
16		-	9,4	
Não isotérmico	200	9	6,6	7,8
		12	9,0	9,7
		16	11,0	10,5

*Para o caso isotérmico 50°C foi utilizada a altura de 12 cm para se obter maior número de pontos com a termorresistência na posição de 100mm.

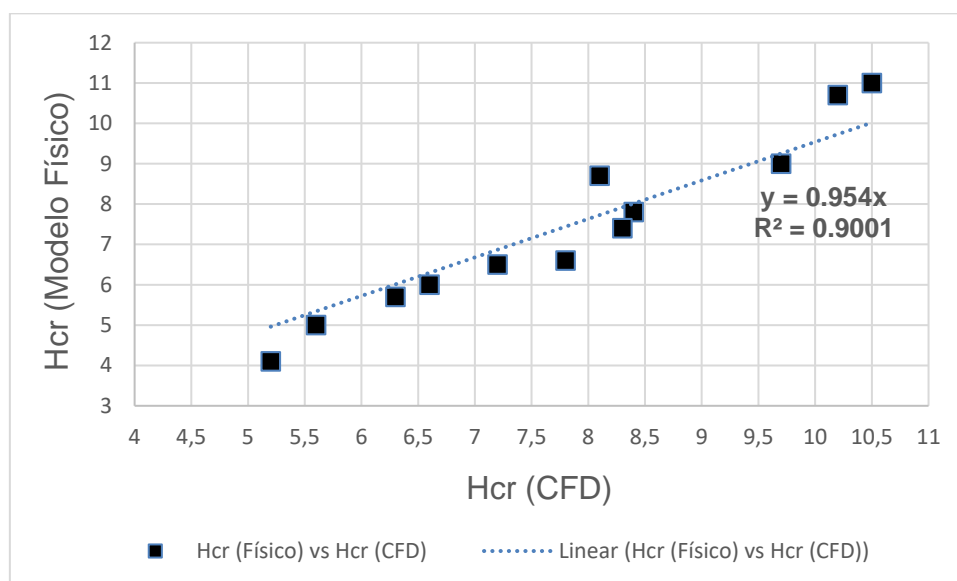


Figura 8. Correlação entre os valores de Hcr obtidos via modelamento físico e via CFD.

3 CONCLUSÃO

- Para todos os experimentos conduzidos, a quantidade de líquido retido após passagem de segunda fase (Hcr) se mostrou maior com o aumento da vazão de drenagem. A relação entre Hcr e a vazão de drenagem foi obtida satisfatoriamente por ajuste linear.
- Em relação a altura inicial, para $H_o = 10$ cm o valor de Hcr foi em média 7% maior que o obtido para $H_o = 20$ cm.
- O aumento de temperatura resultou em valores de Hcr cerca de 30% maiores que os obtidos a 25°C. O principal fator atribuído a este aumento, seria a diminuição da força viscosa que exerce importante influência em suprimir o campo residual de velocidades, bem como à diminuição de tensão interfacial, responsável pela estabilização da superfície.
- O caso não-isotérmico não apresentou diferença significativa em relação ao teste isotérmico a 50°C. Mas em média, os valores de Hcr foram superiores cerca de 36% em relação aos experimentos isotérmicos a 25°C.

- Utilizando-se a técnica PIV, foi possível observar a evolução do campo de velocidades tangenciais da água ao longo do processo de drenagem, até a iminência de formação do vórtice completamente desenvolvido.
- O modelo numérico foi capaz de prever o momento da formação do vórtice/dreno, e, portanto, os valores de Hcr obtidos no modelo físico.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fapemig, Capes e ao CNPq.

REFERÊNCIAS

- 1 Li HX, Wang Q, Lei H, Jiang JW, Guo ZC, He JC. Mechanism Analysis of Free-Surface Vortex Formation during Steel Teeming. ISIJ International. 2014; 54(7): 1592-1600.
- 2 Kojola N, Takagi S, Yokoya S, Jönsson P. Prediction and Disarming of Drain Sink Formation during Unsteady-state Bottom Teeming. ISIJ International. 2009; 49(1): 1-9.
- 3 Ribeiro BAB. Análise Numérica e Experimental do Processo de Vazamento de Aço Líquido da Panela de Aço para Distribuidores no Processo de Lingotamento Contínuo. Dissertação [Mestrado em engenharia Metalúrgica] – UFMG; 2014.
- 4 Sankaranarayanan R, Guthrie RIL. Slag entraining vortexing funnel formation during ladle teeming: similarity criteria and scale-up relationships. Ironmaking & Steelmaking. 2002; 29(2): 147-153.
- 5 Sato CT. SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESCÓRIA / AÇO DURANTE O ESGOTAMENTO DA PANELA ATRAVÉS DE MODELAGEM FÍSICA. Dissertação [Mestrado em engenharia Metalúrgica] – UFMG; 2007.
- 6 Singh PK. SCALE MODEL EXPERIMENTS AND NUMERICAL STUDY ON A STEEL TEEMING PROCESS. Dissertação [Mestrado em engenharia Metalúrgica] - University of Kentucky; 2004.
- 7 Ansys Inc.: ANSYS CFX- Solver Theory Guide, Release 18.2, Canonsburg, PA, 2017, pp. 153-213.
- 8 Tan DP, Ni Y. X, Zhang LB. Two-fase sink vortex suction mechanism and penetration dynamic characteristics in ladle teeming process. Journal of Iron and Steel Research International. 2017; 24: 196–202.
- 9 Conceição PVS. Rendimento Metálico Durante Vazamento de Painelas de Aço. Dissertação [Mestrado em engenharia Metalúrgica] – UFOP; 2018.
- 10 Santos SDS. Estudo do Mecanismo de Formação de Vórtice Durante a Etapa de Vazamento do Aço da Panela para o Distribuidor do Lingotamento Contínuo da CST Através da Modelagem Física. Dissertação [Mestrado em engenharia Metalúrgica] – UFOP; 2006.
- 11 Kojola N, Yokoya S, Jönsson P. Effect of Interfacial Energy on the Drain Sink Formation Height. ISIJ International. 2009; 49(4): 463-469.
- 12 Jones FE, Harris GL. ITS-90 Density of Water Formulation for Volumetric Standards Calibration. J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. 1992; 97(3): 335-340.
- 13 Cini R, Loglio G, Ficalbi A. Temperature Dependence of the Surface Tension of Water by the Equilibrium Ring Method. Journal of Colloid and Interface Science. 1972; 41(2): 287-292.