



Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de
Materiais
Campus Morro do Cruzeiro
Ouro Preto – Minas Gerais – Brasil



MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO **EM ENGENHARIA METALÚRGICA**

“MODELAMENTO FÍSICO E MATEMÁTICO DO VAZAMENTO DE ***AÇO DA PANELA”***

Thiago Araújo Santos de Oliveira

Ouro Preto, julho de 2019.

Thiago Araújo Santos de Oliveira

“Modelamento físico e matemático do vazamento do aço da panela”

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Metalúrgico.

Orientador: Prof. DSc. Johnne Jesus Mol Peixoto

Ouro Preto, julho de 2019



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA

Aos 12 dias do mês de julho de 2019, às 11 horas, na sala 3 da Escola de Minas - Campus Morro do Cruzeiro, foi realizada a defesa de monografia de graduação em Engenharia Metalúrgica pelo aluno **Thiago Araújo Santos de Oliveira**, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores Johnne Jesus Mol Peixoto (Presidente), Heric Henrique Souza e Silva, professor IF SUDESTE MG, e pelo Doutorando Weslei Viana Gabriel (REDEMAT). O aluno apresentou a monografia intitulada **"Modelamento físico e matemático do vazamento do aço da panela"**. A comissão deliberou, por unanimidade, pela aprovação da monografia, concedendo ao aluno um prazo de 15 dias para incorporar, ao texto final, as alterações sugeridas. Na forma regulamentar, lavrou-se a presente ata, que vai devidamente assinada pelos membros da comissão e pelo aluno.

Ouro Preto, 12 de julho de 2019.

Prof. DSc Johnne Jesus Mol Peixoto
Orientador – Presidente

Prof. MSc Heric Henrique Souza e Silva
Membro - IF SUDESTE MG Prof. Heric

Eng. MSc Weslei Viana Gabriel
Membro - Doutorando REDEMAT

Thiago Araújo Santos de Oliveira
Aluno

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	V
LISTA DE TABELAS	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	VIII
RESUMO	X
ABSTRACT	XI
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 Objetivos Gerais	3
2.2 Objetivos Específicos.....	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 Lingotamento Contínuo.....	4
3.2 Detecção de passagem de escória na drenagem do aço	4
3.3 Formação do vórtice	6
3.4 Formação do Dreno	7
3.5 Altura crítica (H_{cr}).....	9
3.6 Modelamento Físico.....	12
3.7 Modelamento Numérico.....	15
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	17
4.1 Modelo Físico	17
4.1.1 Condição isotérmico a 50°C	19
4.1.2 Condição não isotérmica	19
4.1.3 Velocimetria por imagem de partículas – PIV	21
4.2 Modelo matemático.....	22
4.2.1 Condições de contorno	25
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	28
5.1 Modelo Físico	28
5.1.1 Velocimetria por imagem de partículas – PIV	29
5.2 Modelo Numérico.....	32
6 CONCLUSÃO	35
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	35
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Desenho esquemático de máquina de lingotamento contínuo de placas.	4
Figura 3.2 - Esquema de espiras do sistema de detecção EDS de passagem de escória.	5
Figura 3.3 – Estágio de formação do canal de vórtice.	7
Figura 3.4 – a) Desenho esquemático das linhas de fluxo para os mecanismos: a) vórtice, b) dreno.	8
Figura 3.5 – Deformação da superfície para os mecanismos: a) vórtice, b) dreno.....	9
Figura 3.6 – Valores experimentais de H_c^* para diferentes valores de velocidade tangencial inicial. * Onde H_c representa o valor de H_{cr}	10
Figura 3.7 – Velocidade tangencial vs tempo de espera ($D=116\text{cm}$, $H_o=99,5\text{cm}$)	10
Figura 3.8 – a) Relação entre altura crítica H_c^* e vazão de drenagem (CONCEIÇÃO, 2018). b) Relação entre líquido retido e vazão de drenagem. *Onde H_c representa o valor de H_{cr}	11
Figura 3.9 – H_c^* vs V_{ei} para os valores de excentricidade (ϵ_c). Círculos: $\epsilon_c = 0$, quadrados: $\epsilon_c = 0.2$, triângulos: $\epsilon_c = 0.33$, triângulos invertidos: $\epsilon_c = 0.5$. * Onde H_c representa o valor de H_{cr}	12
Figura 3.10 – Formação do vórtice durante drenagem de água. Diâmetro de válvula de 20mm 100% aberta.....	14
Figura 3.11 Curva de dados de aquisição do sensor fotoelétrico durante a drenagem, destacando a formação do vórtice	15
Figura 3.12 a) Malha computacional de drenagem em panela. b) Linhas de fluxo calculas via modelamento numérico	16
Figura 4.1 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.....	17
Figura 4.2 Perfil de temperatura no interior da panela durante a passagem de água pela serpentina. *A seta no gráfico indica o início da drenagem.....	19

Figura 4.3 Perfil de temperatura no interior da panela durante a passagem de água pela serpentina.	20
Figura 4.4 Desenho esquemático do aparato experimental da técnica PIV....	21
Figura 4.5 Malha computacional tetraédrica utilizada nas simulações de drenagem (490 mil nós).....	25
Figura 4.6 Malha computacional destacando o refinamento na região de formação de esgotamento.	25
Figura 4.7 <i>Setup</i> das simulações numéricas do problema de drenagem em panela.....	26
Figura 5.1 Relação entre o valor de H_{cr} e a vazão de drenagem para os testes físicos.	28
Figura 5.2 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.....	30
Figura 5.3 Evolução do campo de velocidades, medido pela técnica PIV, durante a drenagem da panela no teste isotérmico 50°C e vazão de 16 l/min.....	31
Figura 5.4 (a) representação 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.....	32
Figura 5.5 (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).....	33
Figura 5.6 Correlação entre os valores de H_{cr} obtidos via modelamento físico e via CFD.	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Condições experimentais.....	18
Tabela 4.2 – Valores de propriedades físicas da água em função da temperatura	22
Tabela 4.3 – Equações de regressões das velocidades de saída do modelo físico durante a drenagem.	27
Tabela 5.1 – Comparação entre os resultados de Hcr obtidos pelos modelos físico e matemático.	34

LISTA DE SÍMBOLOS

α_i – Fração de fase i;

μ_{eff} - Viscosidade efetiva (Pa.s);

ΔT - Diferença de temperatura da água na saída e a entrada da serpentina (°C);

∇ - Operador Nabla;

μ_t - Viscosidade turbulenta;

CCD – *charge coupled device* (Dispositivo de carga acoplada);

CFD - *Computational Fluid Dynamics* (Fluidodinâmica Computacional);

$C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, C_{μ} , σ_k são constantes de valores: 1.43; 1.92; 0.09; 1.0 e 1.3 respectivamente;

DC – *Direct current* (Corrente continua);

ESD - *Electromagnetic Slag Detection* (Detecção eletromagnética de escória);

Fr – Adimensional de Froude;

H_{cr} , H_o – Altura crítica do líquido retido na panela devido a passagem de segunda fase pelo orifício de saída, Altura inicial de líquido na panela (m);

k - Energia de viscosidade turbulenta (m^2/s^2);

PIV - Particle Image Velocimetry (Velocimetria por imagem de partículas);

P_k - Taxa de produção de energia cinética devido a viscosidade e efeitos de empuxo;

RH – Desgaseificador (Ruhrstahl-Heraeus);

R_o = raio da válvula de saída (m);

S - Área lateral do cilindro correspondente à altura de água na panela (m^2);

t – Tempo (s);

T_0 , T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_5 – valores de temperatura lidos nas termoresistências (°C);

$V_{\theta i}$, V_p , V_m – Velocidade tangencial inercial; velocidade normal do fluido (m/s);

ε - Taxa de dissipação de energia cinética turbulenta (m^2/s^3);

ε_c – Excentricidade da válvula de saída;

λ - Razão de escala;

L_p, L_m – Comprimento característico (m);

$Q_m, Q_p, \dot{Q}$ – Vazão de líquido (L/min);

a – Aceleração do fluido (m/s²);

g – Aceleração da gravidade (m/s²);

m – Massa de fluido (kg);

C_p - Calor específico da água a pressão constante (J/kg*K);

U – Velocidade média do fluido (m/s);

ρ – Densidade do fluido (kg/m³);

RESUMO

O arraste de escória para o distribuidor, durante a drenagem de placas de aço, tem grande impacto no rendimento metálico, limpidez e produtividade no processo de lingotamento contínuo. Modelamentos físico e matemático foram utilizados para o estudo da formação do escoamento tipo vórtice e funil no esgotamento de placas 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 (H_{cr}) de formação de vórtice. Para todas as condições experimentais, o valor de H_{cr} 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 H_{cr} .

Palavras Chave: Drenagem de placa; Vórtice; PIV; Modelamento numérico.

ABSTRACT

Slag entrainment during steel ladle drainage plays an important role in metallic yield, cleanliness 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 (H_{cr}) for vortex onset. In all experimental conditions, the value of H_{cr} 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 was able to describe liquid flow rate and temperature influence over H_{cr} value.

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

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. (2014) 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 (LI *et al.*, 2014) e (RIBEIRO, 2014).

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 (SANKARANARAYANAN e GUTHRIE, 2002).

Sato (2007) 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 OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

Através de modelamento físico e numérico, caracterizar o escoamento de aço em processos de drenagem de painéis.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a influência da vazão de drenagem na altura crítica (H_{cr}) de formação de vórtice e dreno;
- Investigar a influência da altura inicial de líquido (H_o) em (H_{cr});
- Avaliar a influência da mudança de propriedades físicas da água, devido ao aquecimento, no valor de H_{cr} ;
- Estudar o efeito da estratificação de temperatura do líquido, no interior da panela, na altura crítica de formação do vórtice;
- Construir uma simulação matemática capaz de representar o fenômeno de escoamento, e validar utilizando os resultados obtidos no modelo físico.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Lingotamento Contínuo

O processo de lingotamento contínuo (Figura 3.1) tem a finalidade de transformar aço líquido em sólidos semiacabados através da solidificação controlada do aço. De maneira geral, o lingotamento contínuo compreende as seguintes operações: Drenagem de aço líquido da panela para o distribuidor; fluxo de metal líquido do distribuidor para o molde; formação de uma casca solidificada, no molde refrigerado a água; extração continua da peça; remoção de calor do núcleo da peça, ainda líquido, através de jatos de água pelos sprays de refrigeração sobre a superfície sólida do veio e o corte do material na dimensão desejada seguido da remoção dos lingotes.

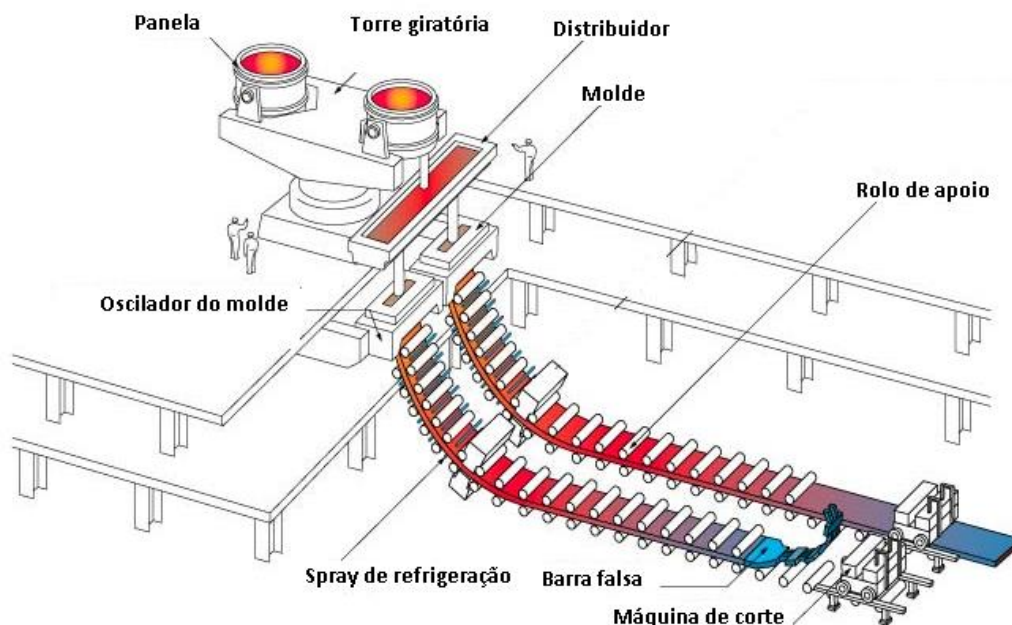


Figura 3.1 – Desenho esquemático de máquina de lingotamento contínuo de placas.

Adaptado. Disponível em: < http://www.jfe-21st-cf.or.jp/chapter_2/2j_2_img.html >. Acesso em: 16, abr., 2019.

3.2 Detecção de passagem de escória na drenagem do aço

Para atender à crescente demanda por limpidez e qualidade do aço produzido em usinas integradas, cada vez mais se tem investido em melhoria dos processos de aciaria. Um ponto chave para obtenção de um produto livre de inclusões grosseiras é

o momento do esgotamento da panela de aço para distribuidor. Com o intuito de proteger o metal química e termicamente, na superfície do aço contido na panela existe uma camada de escória sobrenadante, com cerca de 5 a 20cm de espessura (MAZZAFERRO, 2004). Esta escória é suma importância, já que sendo formada majoritariamente por óxidos do sistema $\text{CaO-SiO-Al}_2\text{O}_3$ apresenta baixa condutibilidade térmica mantendo a temperatura em valores adequados para o lingotamento, durante o vazamento do aço para o distribuidor, além de oxidação do ferro pelo oxigênio presente no ar.

Entretanto é preciso evitar que esta escória seja transportada da panela para o distribuidor, o que ocasionaria contaminação do aço. Para evitar o problema do arraste de segunda fase para o distribuidor são utilizados mecanismos de detecção de passagem de escória. O sistema de detecção mais utilizado no mundo atualmente, é baseado na detecção por eletromagnetismo: ESD - *Electromagnetic Slag Detection*. É aplicada corrente alternada em um arranjo de espiras do sensor que por sua vez induz correntes do tipo *eddy* no metal líquido que escoar em seu interior em direção ao distribuidor. No momento de passagem de escória a condutividade magnética cai, gerando um aumento no campo magnético, devido a corrente induzida no metal, que é captado por um outro sistema de espiras (KATO, 1992), conforme visto na Figura 3.2. Neste momento é acusado para o operador o momento de acionar o fechamento da panela, para evitar contaminação.



Figura 3.2 - Esquema de espiras do sistema de detecção EDS de passagem de escória.

Disponível em: <<https://amepa.de/en/produkte/esd-electromagnetic-slag-detection/>>. Acesso em 10, maio, 2019).

3.3 Formação do vórtice

Piva et al. (2003) concluíram que a formação do canal de vórtice durante a drenagem se dá devido principalmente à presença campos de velocidade tangenciais e da posição da válvula de drenagem na panela. A presença destes campos ocorre devido a movimentação do fluido na panela durante as operações de aciaria. Sankaranarayanan e Guthrie (2002) argumentam que a explicação clássica para a formação do canal de vórtice é devido ao princípio de conservação da energia angular, de modo que, uma partícula de fluido na superfície do vórtice conserva seu momento angular progressivamente aumentando sua velocidade angular e se movendo em trajetória helicoidal em direção ao eixo de rotação do vórtice.

Em seu trabalho, Morales et.al (2013), afirmam que em processos de drenagem de panelas de aço não existe a formação do canal de vórtice antecipado, e sim apenas nos instantes finais da drenagem, um mecanismo conhecido como dreno funil. Entretanto os autores ainda afirmam que demais pesquisadores reportaram ter observado o desenvolvimento do vórtice anterior a formação do dreno.

Diversos autores, através de modelam física utilizando-se água como fluido similar ao aço, concordam que o desenvolvimento do vórtice se dá em quatro estágios, como observado na Figura 3.3. O primeiro estágio (*dimple*) ocorre quando ainda se tem grande quantidade de líquido na panela e os valores de velocidade rotacional na superfície são baixos. Neste momento uma pequena deflexão é observada na superfície do líquido, geralmente centrada no centro de rotação das partículas de água. Prosseguindo com a drenagem, as velocidades tangencias das partículas aumentam e o *dimple* começa a se estender para o fundo da panela dando origem ao segundo estágio de vórtice superficial. Com o aumento da velocidade tangencial é formado o terceiro estágio do desenvolvimento do vórtice, onde é possível verificar um canal intermediário em que sua ponta apresenta rápida rotação. Por fim se forma o vórtice completamente desenvolvido, em que se tem o arraste da fase sobrenadante ao líquido em direção a sede de vazamento.

Singh (2004) mostra que a taxa de progressão do vórtice pelos quatro estágios é fortemente dependente do campo de velocidades tangenciais no início da drenagem. Sendo que alto campo rotacional a estrutura do tipo *dimple* se transformaria quase instantaneamente em vórtice completamente desenvolvido, já para baixos valores

levaria maior tempo e o diâmetro do canal do vórtice também seria menor. Outro fator é que dificilmente o canal do vórtice é simétrico ao centro da sede de vazamento, conforme mostrado na Figura 3.3, para altos valores de velocidade tangencial inicial este canal se movimenta em direção as paredes da válvula de drenagem.

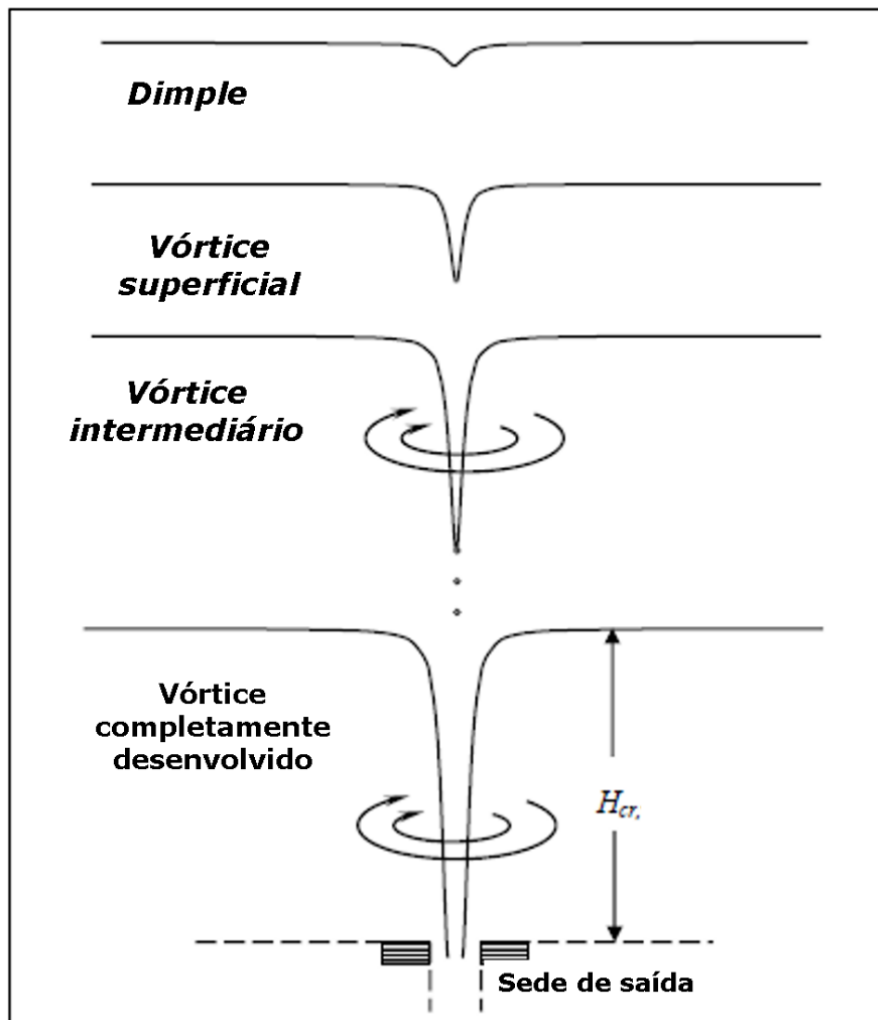


Figura 3.3 – Estágios de formação do canal de vórtice (SINGH, 2004).

3.4 Formação do Dreno

A razão para a formação do escoamento tipo dreno é que o fluxo de material em direção ao orifício de saída de panela, nos últimos instantes do esgotamento, se torna menor que o fluxo de líquido dentro do orifício de saída. Neste instante há um colapso na superfície de tal modo que é formado uma estrutura de funil ligando a superfície ao

centro do orifício de saída, e consequentemente o arraste de segunda fase. Foi mostrado que a altura crítica de formação do dreno é influenciada pelo diâmetro da válvula de saída e pouca influenciada pelo diâmetro ou excentricidade saída (NI *et al.*, 2012). Kojola *et al.* (2009), desenvolveram um modelo matemático que considera o feito de fase sobrenadante na predição do dreno, onde, foi constatado que a altura crítica de formação do dreno cresce com o aumento do diâmetro de saída e o aumento da densidade da segunda fase e é independente da viscosidade desta. Através de modelamento físico, Mazzaferro *et al.* (2004) também mostraram que a altura crítica de formação do dreno depende do diâmetro de saída da panela e que utilizando-se uma panela com fundo inclinado se tem um efeito de redução do conteúdo de aço remanescente na panela após passagem de segunda fase. Através de modelamento físico, Mazzaferro *et al.* (2004) indicaram a estrutura física dos tipos de escoamento, vórtice e dreno Figura 3.4 e Figura 3.5.

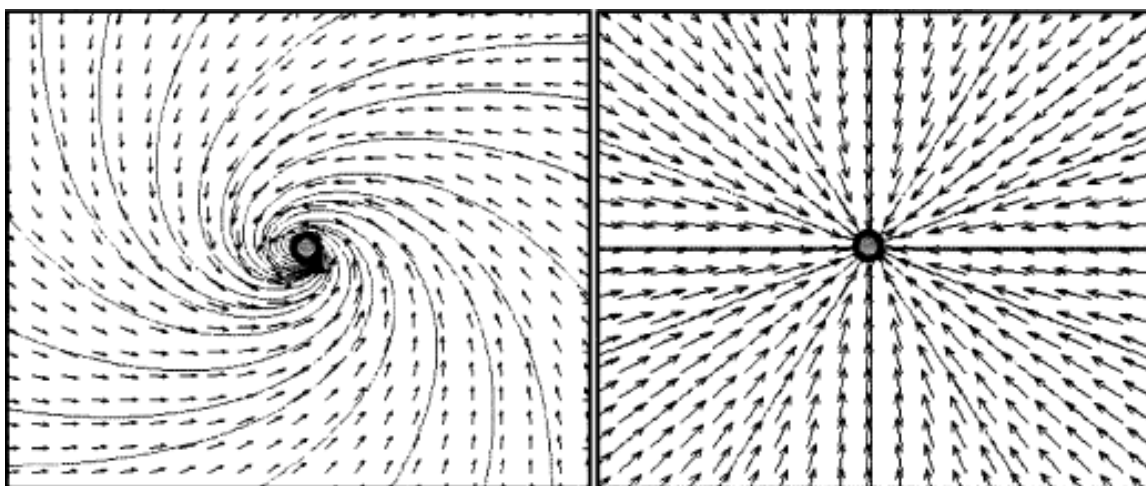


Figura 3.4 – a) Desenho esquemático das linhas de fluxo para os mecanismos: a) vórtice, b) dreno (MAZZAFERRO *et al.*, 2004).

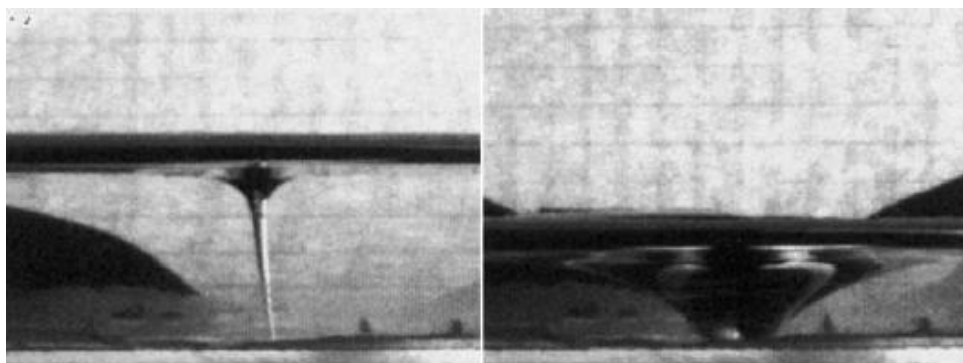


Figura 3.5 – Deformação da superfície para os mecanismos: a) vórtice, b) dreno (MAZZAFERRO *et al.*, 2004).

3.5 Altura crítica (H_{cr})

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 (H_{cr}), representa significativa perda no rendimento metálico do processo de lingotamento.

Diversos autores estudaram os principais fatores que influenciam no valor de H_{cr} na drenagem de panela, dentre estes podem-se destacar os trabalhos de (KOJOLA *et al.*, 2009) e (SANKARANARAYANAN e GUTHRIE, 2002). De acordo com os autores, os principais fatores relacionados à altura de formação do vórtice e dreno são: velocidade tangencial inicial, vazão de vazamento, excentricidade da sede de vazamento, altura inicial de líquido na panela, temperatura do líquido e tempo de espera do líquido no interior da panela antes do vazamento (tempo de *holding*).

Piva *et al.* (2003) considerando o escoamento em uma panela com furo central, a evolução de altura da coluna de líquido controlada pela força da gravidade e desconsiderando os efeitos do atrito, obtiveram uma relação entre H_{cr} e a velocidade tangencial inicial V_{ei} , Figura 3.6. Desta análise, puderam concluir que a altura crítica de formação do vórtice é fortemente influenciada pelo campo de velocidades residual e que nestas condições o valor se estabiliza para velocidade tangencial maior que 2cm/s.

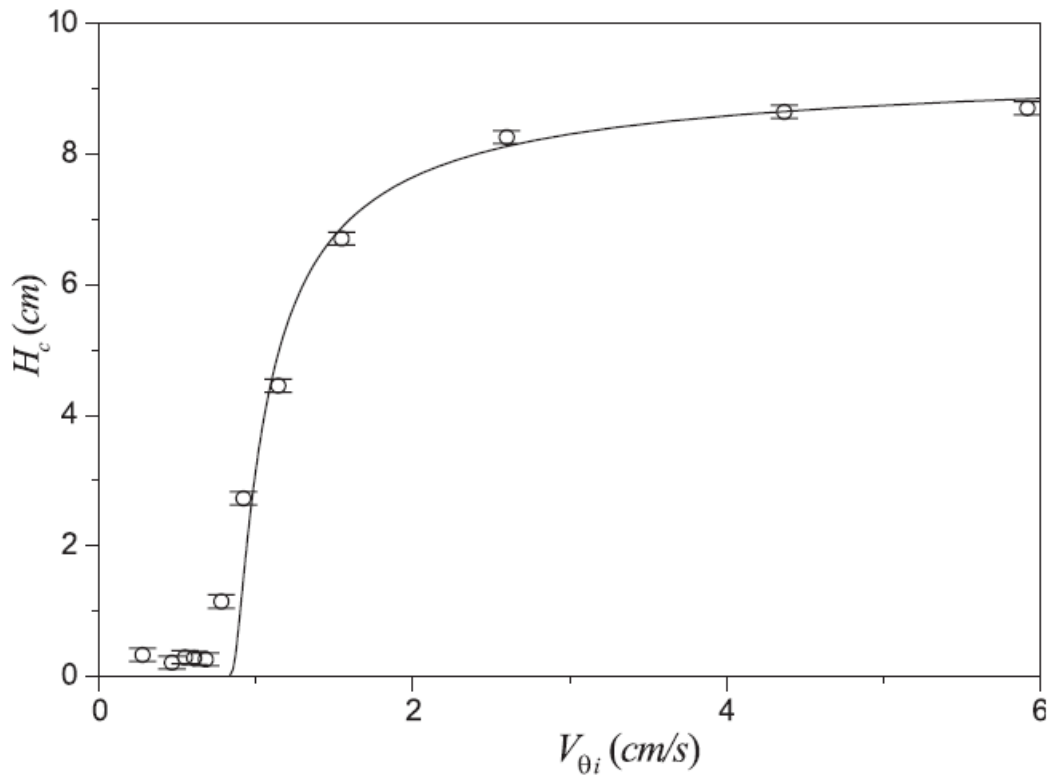


Figura 3.6 – Valores experimentais de H_c^* para diferentes valores de velocidade tangencial inicial. * Onde H_c representa o valor de H_{cr} . (PIVA *et al.*, 2004).

Os valores de velocidade tangencial diminuem com o aumento do tempo de espera, Figura 3.7. Pode-se argumentar que devido a efeitos viscosos do líquido com as paredes, para tempos suficientes longos >1000s ocorre a mitigação dos campos residuais de velocidades na panela.

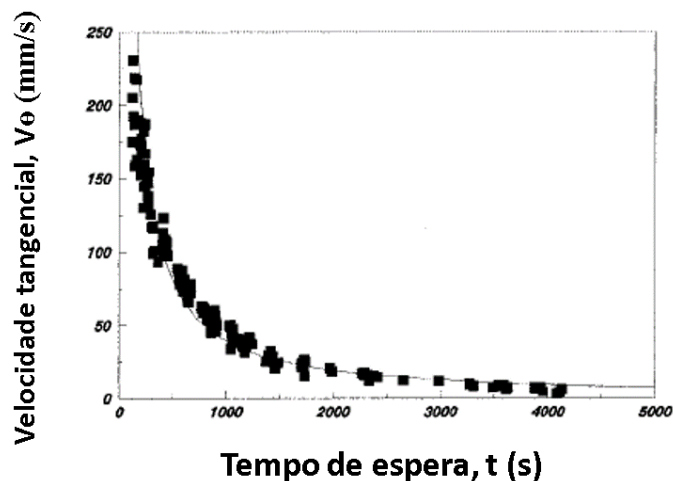


Figura 3.7 – Velocidade tangencial vs tempo de espera ($D=116\text{cm}$, $H_0=99,5\text{cm}$) (SANKARANARAYANAN e GUTHRIE, 2002).

Os trabalhos propostos por Kojola *et al.* (2009) e Sankaranarayanan e Guthrie (2002), apontam que o aumento na vazão de drenagem acarreta em aumento da altura crítica de formação do vórtice e do dreno. Pode-se argumentar que devido ao aumento das forças inerciais e consequente aumento da energia de rotação, estes dois mecanismos de fluxo atuam prematuramente em comparação a menores vazões. Ainda, pode se dizer que maior vazão reflete em menor tempo de residência do líquido na panela, que por sua vez dificulta ou impede a mitigação de campos de velocidade residuais empregados pelos processos de vazamento e refino do aço.

Essa relação pode ser vista nos trabalhos de Conceição (2018) e Santos (2009), em que através de modelamento físico os dois autores chegaram em uma relação linear do valor de água retido na panela com a vazão de drenagem Figura 3.8.

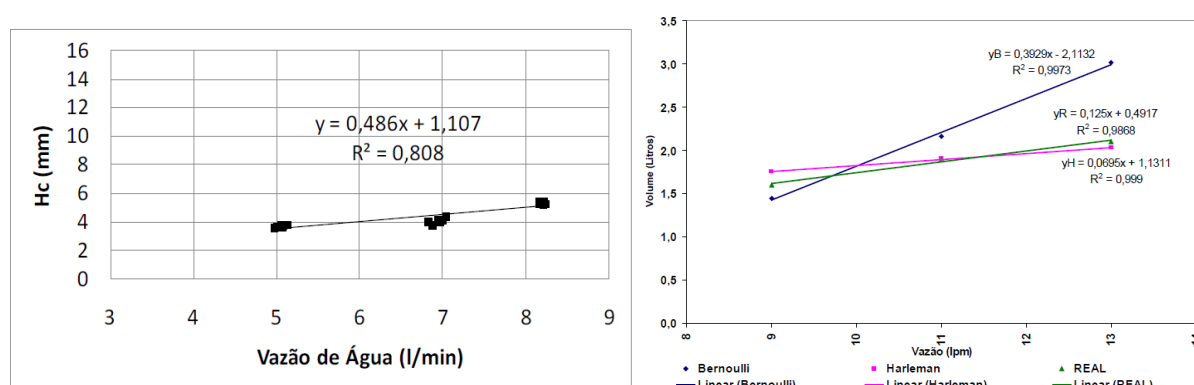


Figura 3.8 – a) Relação entre altura crítica H_c^* e vazão de drenagem (CONCEIÇÃO, 2018). b) Relação entre líquido retido e vazão de drenagem. *Onde H_c representa o valor de H_{cr} . (SANTOS, 2009).

O efeito da excentricidade da sede de vazamento, juntamente com o efeito de velocidade residual, foi estudado por Piva (2003). O autor conduziu experimentos de vazamento de água em panela de acrílico com altura inicial de líquido de $H_o = 10\text{cm}$, raio do orifício de vazamento $R_o = 0,25\text{cm}$ e diversas excentricidades (ϵ_c), definida como a razão entre a posição radial do orifício de vazamento e o raio da panela. Conclui-se, a partir deste trabalho, que os maiores valores de H_{cr} são para os vazamentos de excentricidade $\epsilon_c = 0$ (centro da panela) e quando o valor de V_{ei} é alto suficiente, H_{cr} tende a ser assintótico, o que indica que independentemente do valor de ϵ_c é esperado a formação de vórtice para estes valores de V_{ei} . Por outro lado, para baixos valores de velocidade residual, o campo rotacional não é capaz de formar o funil de vórtice até

os últimos instantes do esgotamento, momento este, que outra estrutura de fluxo passa a atuar, o dreno funil Figura 3.9. O autor argumenta ainda que, para valores intermediários de $V_{\theta i}$ existe uma transição entre estas estruturas de fluxo, de modo que quanto maior o valor de ε_c , mais abrupta é esta transição.

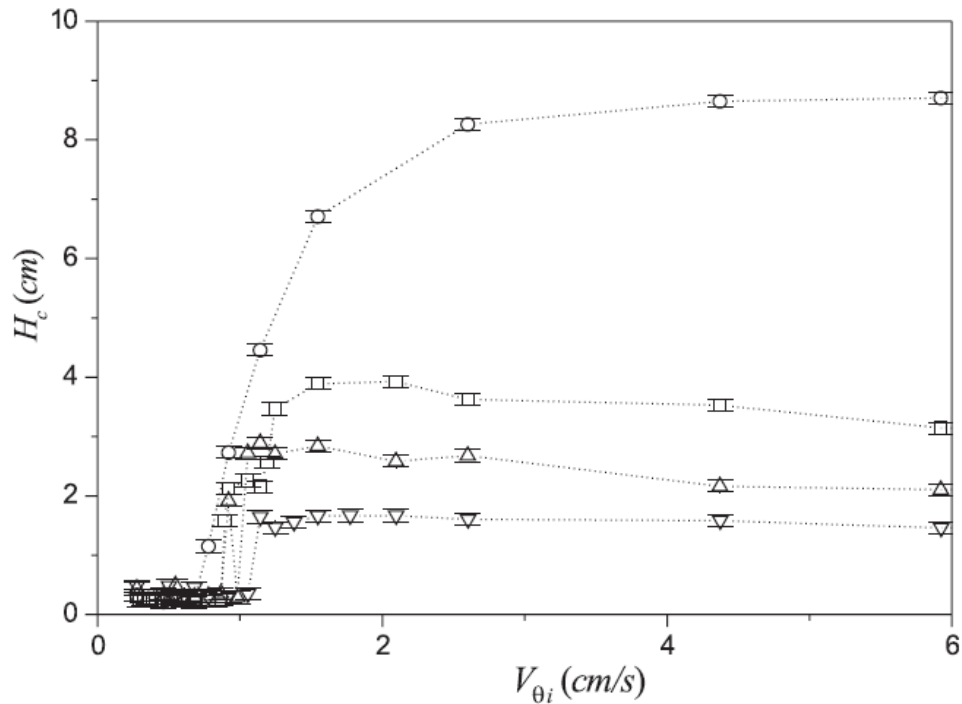


Figura 3.9 – H_c^* vs $V_{\theta i}$ para os valores de excentricidade (ε_c). Círculos: $\varepsilon_c = 0$, quadrados: $\varepsilon_c = 0.2$, triângulos: $\varepsilon_c = 0.33$, triângulos invertidos: $\varepsilon_c = 0.5$. * Onde H_c representa o valor de H_{cr} (PIVA, 2003).

3.6 Modelamento Físico

Na maior parte dos casos, os experimentos conduzidos acerca de processos metalúrgicos são impraticáveis em escala industrial, devido ao alto custo operacional e técnico, fatores de segurança e limitação na observação dos fenômenos físicos que ocorrem dentro dos reatores. Para contornar esses problemas muito tem se investido em simulações físicas dos processos industriais. Tendo como suporte técnico a teoria dos números adimensionais π -numbers, modelos em escala reduzida são construídos para se avaliar os processos metalúrgicos em laboratórios com considerável redução de custos e boa representatividade na obtenção de dados experimentais. Os π -numbers expressam relações entre forças que governam o fenômeno a ser estudado. Singh (2004) indica que as forças governantes no processo de drenagem em painéis

são: força gravitacional, forças inerciais e forças viscosas. Dessas forças pode-se derivar o adimensional de Froude (Fr) Equação 3.1:

$$Fr = \frac{\text{Força Inerciais}}{\text{Força Gravitacional}} = \frac{V * \rho * a}{m * g} = \frac{V}{\sqrt{g * L}} \quad (3.1)$$

Onde Fr é o adimensional de Froude, V velocidade do fluido, ρ é a densidade do fluido, a é a aceleração do fluido, m é a massa de fluido no volume de controle, g é a aceleração da gravidade e L é o comprimento característico da panela. Considerando equivalência fluidodinâmica se têm:

$$\frac{Vp}{\sqrt{g * Lp}} = \frac{Vm}{\sqrt{g * Lm}} \quad (3.2)$$

Simplificando a equação (3.2), sabendo que:

$$\lambda = \frac{Lm}{Lp} \quad (3.3)$$

Chega-se à expressão que relaciona a velocidade do fluido no modelo com o a velocidade no protótipo:

$$Vm = \lambda^{0,5} * Vp \quad (3.4)$$

A relação entre as vazões de fluido no modelo e no protótipo podem ser derivadas utilizando as áreas dos mesmos:

$$Qm = \lambda^{2,5} * Qp \quad (3.5)$$

Onde Qm é a vazão volumétrica de líquido no modelo e Qp é a vazão volumétrica no protótipo.

Estão presentes na literatura diversos experimentos conduzidos via simulação física do processo drenagem de aço em panelas. Morales (2013) via modelo de panela em escala 1:3, correspondendo a 150ton de aço, estudou a influência da abertura de válvula de drenagem sob a altura crítica de líquido retido. O autor também realizou medições do campo de velocidade da água utilizando-se a técnica PIV. O plano de

laser foi posicionado na horizontal paralelo, a distância de 0,05m em relação ao fundo da panela, possibilitando captar claramente a formação do vórtice a cima da sede de vazamento Figura 3.10.

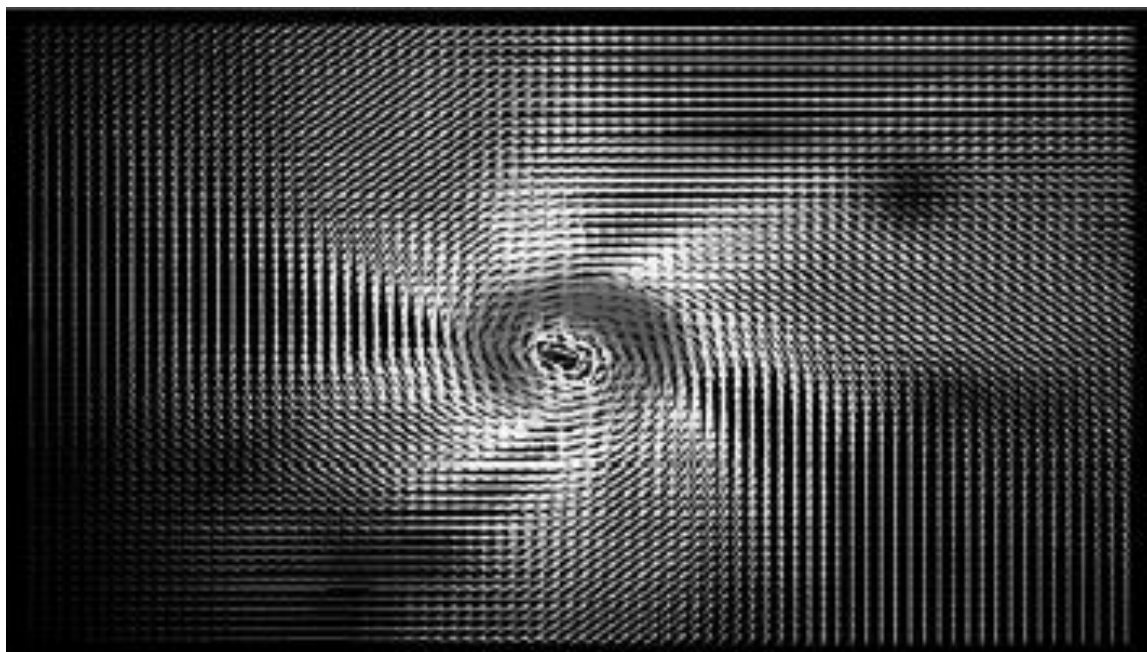


Figura 3.10 – Formação do vórtice durante drenagem de água. Diâmetro de válvula de 20mm 100% aberta. (MORALES, 2013).

Conceição (2018) em seu trabalho, avaliou a formação de vórtice em modelo construído em acrílico de escala 1:6,5. Utilizando-se um sensor fotoelétrico na saída da válvula de drenagem, onde, quando o ar era arrastado seja pela formação do dreno ou vórtice o sensor acusava uma pequena variação nos valores de tensão lidos pelo aparelho, devido a mudança de velocidade do feixe ao atingir o sensor. Neste instante a saída de água era interrompida manualmente, enquanto os valores de tensão eram acompanhados, como mostrado na Figura 3.11.

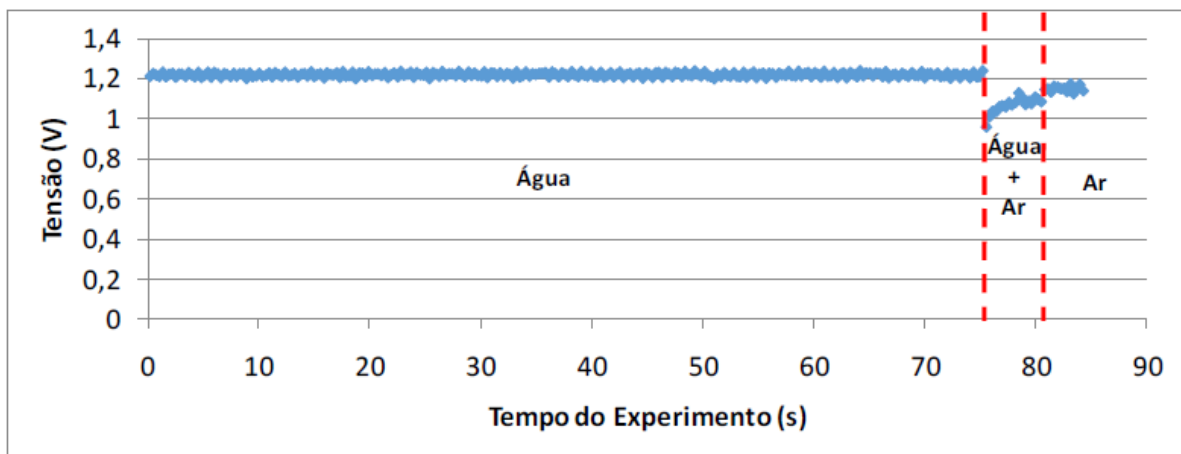


Figura 3.11 Curva de dados de aquisição do sensor fotoelétrico durante a drenagem, destacando a formação do vórtice (CONCEIÇÃO, 2018).

3.7 Modelamento Numérico

Devido a versatilidade das soluções numéricas, possibilitadas com o grande avanço do poder de cálculo dos computadores, grande esforço tem sido aplicado na criação de modelos matemáticos de processos industriais.

A análise numérica consiste na criação de uma modelo robusto capaz de representar com confiabilidade os fenômenos observados no processo físico. Para tal, é necessário criar uma geometria que representa o espaço físico do volume de controle do processo a ser estudado. Os cálculos dos valores das variáveis do problema, por exemplo: velocidade do fluido, pressão e temperatura são regidos por equações físicas que descrevem a natureza do fenômeno estudado. A metodologia mais comumente utilizada é o método dos volumes finitos em que o problema a ser estudado é dividido em domínios subdivididos em pequenas regiões denominadas nós, onde os cálculos são efetuados e armazenados (discretização). O conjunto de nós e seus elementos (vértices) é denominado malha de cálculo. A malha, é então submetida as entradas e definições do problema, por exemplo escolha das equações que regem o fenômeno, modelos de turbulência, condições iniciais e de contorno, critérios de parada e convergência, etc.

Na Figura 3.12 a) é mostrado um exemplo de malha computacional para o processo de drenagem de água em panela (MAZZAFERRO *et al.*, 2004). Em Figura 3.12 b) linhas de fluxo como resultado do esgotamento da panela, obtido via simulação numérica CFD (MORALES, 2013).

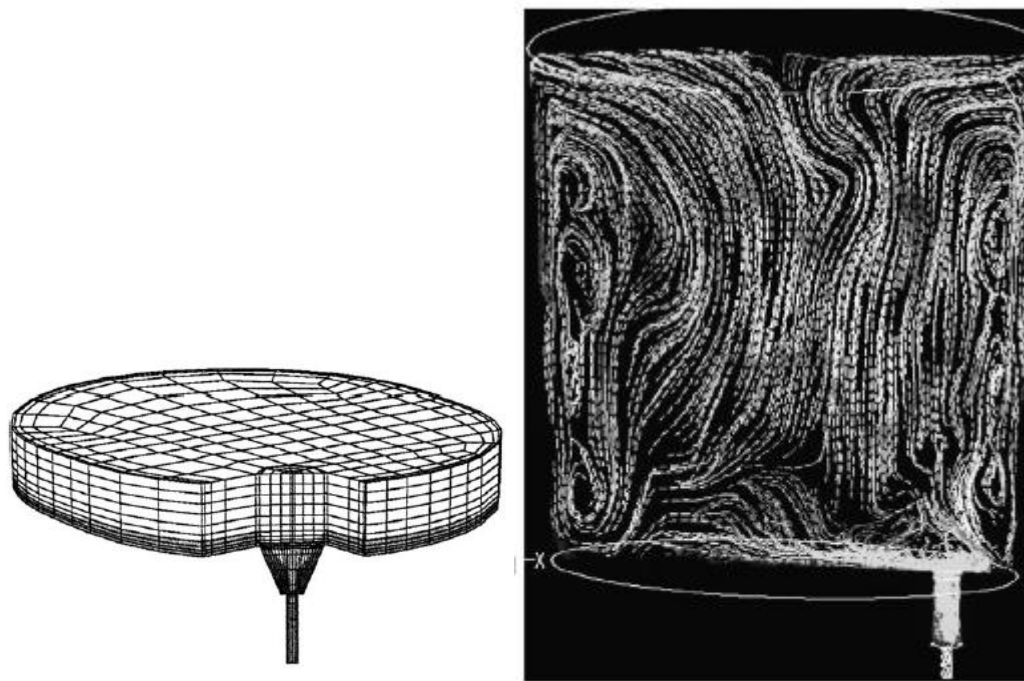


Figura 3.12 a) Malha computacional de drenagem em panela (MAZZAFERRO *et al.*, 2004). b) Linhas de fluxo calculas via modelamento numérico (MORALES,2013).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Modelo Físico

Um desenho esquemático com as dimensões do modelo construído em chapa de aço galvanizado em escala 1:6,5 é mostrado na Figura 4.1. 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 4.1.

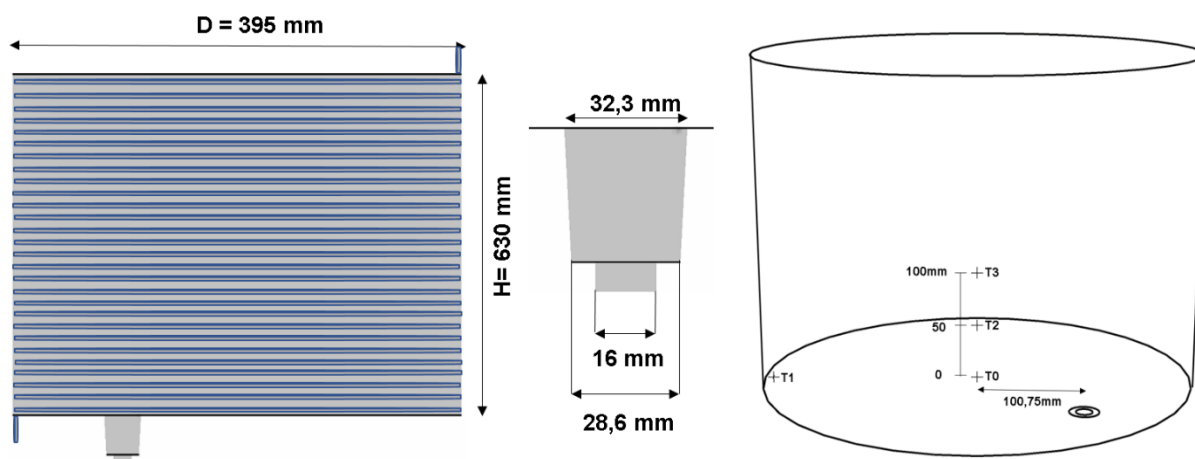


Figura 4.1 Detalhes do modelo físico em chapa galvanizada a) vista frontal da panela, destacando a serpentina, b) válvula da panela, c) vista da panela, destacando a localização dos termopares.

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 piezelétrico 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 $H_0 = 10\text{cm}$ ou 20cm . 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 4.1.

Tabela 4.1 – Condições experimentais

Tipo de experimento	Vazão inicial (l/min)	Altura Inicial H_0 (cm)	Tempo de holding (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 10cm.*

4.1.1 Condição isotérmico a 50°C

Para análise da influência da temperatura da água sobre o valor de H_{cr} , 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 termorresistências Figura 4.2. A queda acentuada da temperatura nos instantes de drenagem, observadas na Figura 4.2, é devido ao fato da superfície de água na panela passar pelas termoresistências e estas ficarem em contato com o ar.

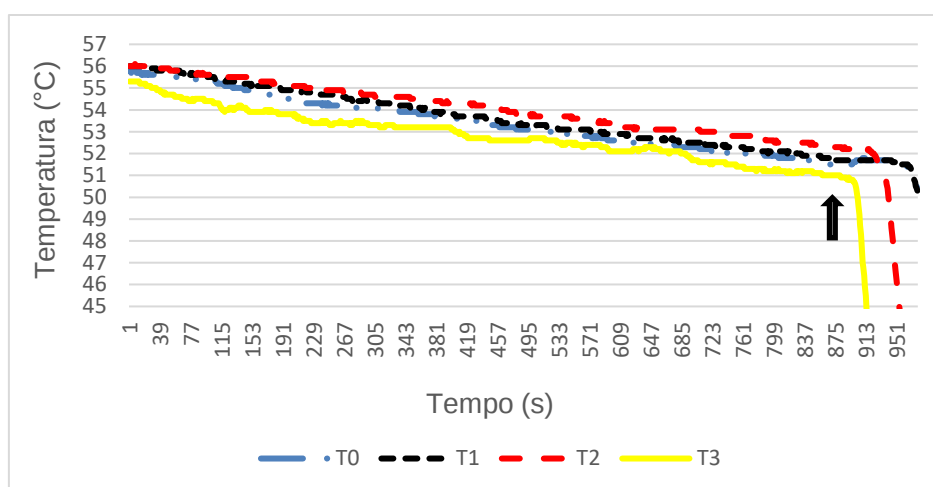


Figura 4.2 Perfil de temperatura no interior da panela durante a passagem de água pela serpentina.

*A seta no gráfico indica o início da drenagem.

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.

4.1.2 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 4.2. A vazão de água, de 3 l/min, na serpentina foi controlada utilizando-se o medidor de vazão do tipo magnético Rosemount.

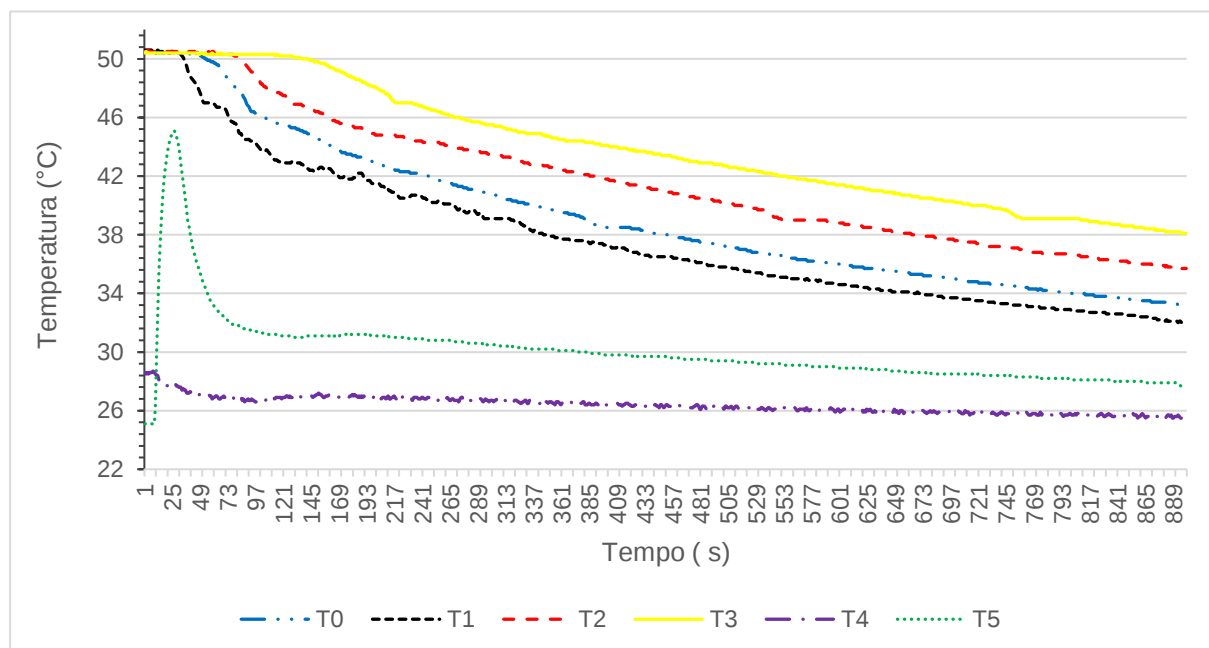


Figura 4.3 Perfil de temperatura no interior da panela durante a passagem de água pela serpentina.

De posse dos valores registrados da evolução da temperatura de entrada e saída da serpentina (termorresistências T4 e T5 respectivamente), durante o tempo de espera, calculou-se o fluxo térmico na parede lateral da panela, de acordo com a equação (4.1):

$$\dot{Q} \left(\frac{W}{m^2} \right) = \frac{\dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T}{S} \quad (4.1)$$

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 m².

Ao final do resfriamento a maior diferença de temperatura observada no interior da panela foi de 6°C, correspondente aos valores lidos nas termorresistências T3 e T1, como observado no gráfico da Figura 4.3. 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} .

4.1.3 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 (SINGH, 2004). Foram realizados dois testes para cada condição descrita na Tabela 4.1. 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 esquematizado na Figura 4.4. Após processamento das imagens capturadas pela câmera CCD, utilizando o software *DANTEC Dynamics*, obtém-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 das estruturas de fluxo desenvolvidas durante a drenagem, bem como 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 4.4, comparando os valores com os obtidos via CFD.

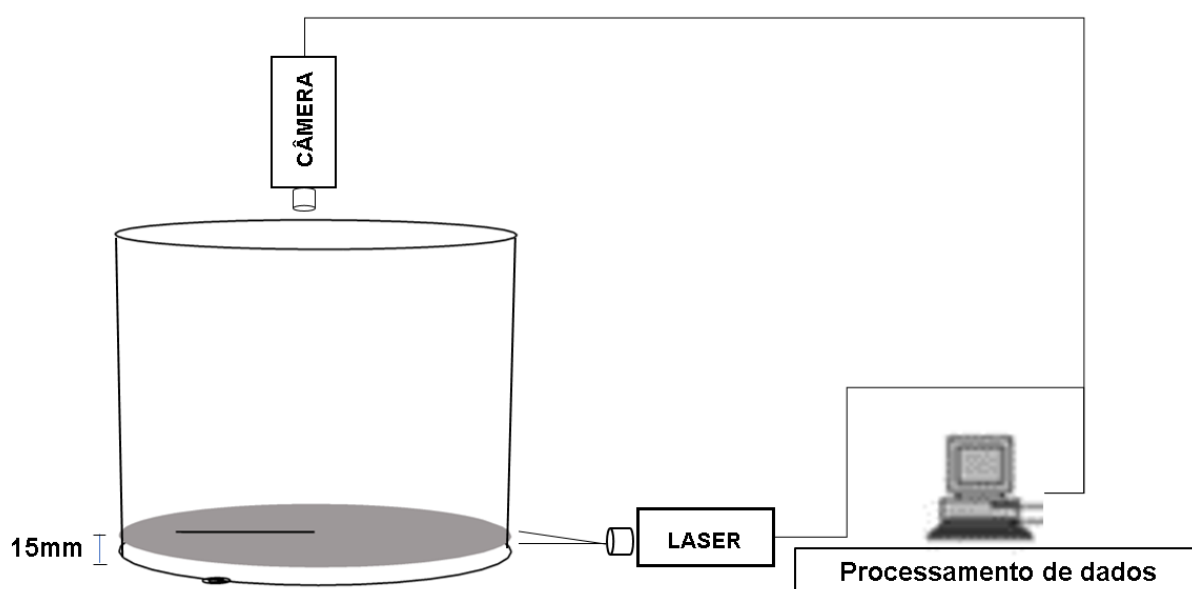


Figura 4.4 Desenho esquemático do aparato experimental da técnica PIV.

4.2 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 4.2. Inicialmente 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- ϵ), considerados como fluidos incompressíveis. A formação do escoamento tipo vórtice é um fenômeno complexo com número de Reynolds maior que 4000 (TAN e ZHANG, 2017). Dessa maneira o fluxo na panela, durante a drenagem, pode ser descrito por modelos turbulentos.

Tabela 4.2 – 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) = Ansys Inc (2017); (b) = Conceição (2018); (c) = Jones (1992); (d) = Cini et al. (1972).

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 são apresentados abaixo:

Equação da continuidade:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (4.2)$$

Navier Stokes:

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) - \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U)^T + B \quad (4.3)$$

Viscosidade efetiva:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (4.4)$$

Energia cinética turbulenta:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla * (\rho U k) = \nabla * \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla K \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (4.5)$$

Dissipação de energia cinética turbulenta:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla * (\rho U \varepsilon) = \nabla * \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (4.6)$$

Viscosidade turbulenta:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.7)$$

Onde, ρ é o valor de densidade média da água (kg/m^3); B é a força de corpo (N/m^3); t é o tempo (s); ∇ é o operador de Nabla; U é a velocidade média (m/s); μ_{eff} é a viscosidade efetiva (Pa.s); μ é a viscosidade molecular (Pa.s); μ_t é a viscosidade turbulenta (Pa.s); k é a energia cinética turbulenta (m^2/s^2); P_k é a taxa de produção de energia cinética devido a viscosidade e efeitos de empuxo; ε é a taxa de dissipação de energia cinética turbulenta (m^2/s^3); $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, C_μ , σ_k são constantes. Os valores destas constantes são: 1.43; 1.92; 0.09; 1.0 e 1.3 respectivamente.

Modelo de superfície livre – *Free Surface Model*:

O modelo de superfície livre foi empregado para modelar a interface água/ar. Nessa formulação *Medium* se refere a mistura entre diferentes fases em variadas proporções e consequentemente com variações em algumas propriedades tais como viscosidade, e densidade. Foi aplicado o modelo multifásico homogêneo – *homogeneous multifase model*, onde, os fluidos compartilham os campos de velocidades e turbulência. O modelamento da interface entre as fases água/ar é resolvido através de um balanço de conservação de massa:

$$\frac{\partial(\alpha_i \rho_i)}{\partial t} + \nabla(\alpha_i \rho_i \mathbf{u}_i) = 0 \quad (4.8)$$

onde α_i é fração da fase i, ρ_i é a densidade da fase i e $\mathbf{u}_i$ é a velocidade da fase i.

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. Extraí-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 fluxo laminar para simular a movimentação do fluido no interior da panela devido a convecção natural resultante da estratificação de temperatura. O segundo caso (drenagem) foi conduzido utilizando-se o modelo de turbulência k- ϵ . Para modelar a transferência de calor foi adotado o modelo homogêneo *Thermal energy* (ANSYS CFX, 2017).

Empregou-se uma malha tetraédrica contendo cerca de 490 mil nós, Figura 4.5. Para diminuir os erros devido as aproximações numéricas, a região de maior interesse (o fundo da panela e acima da válvula, onde se caracteriza um fluxo rotacional intenso devido as estruturas de fluxo tipo vórtice realizou-se um maior refinamento a fim de caracterizar melhor o fenômeno, Figura 4.6. Nesta região empregou-se a técnica *multizone* para refinar a interface água/ar, e no fundo do reator (parede) foi utilizada a ferramenta *inflation* com 5 camadas (*growth rate* = 1,2, *maximum thickness* = 0,003m).

O teste independência da malha foi realizado para a condição isotérmica com H_0 igual a 10cm, adotando a comparação com a altura crítica H_{cr} obtida pelo modelo numérico como critério para escolha da melhor malha. As equações de conservação foram discretizadas segundo o esquema *high resolution*. Foi utilizado como critério de convergência o valor de RMS (*root mean square*) sendo 10^{-5} para os testes isotérmicos e 10^{-4} para os não isotérmicos.

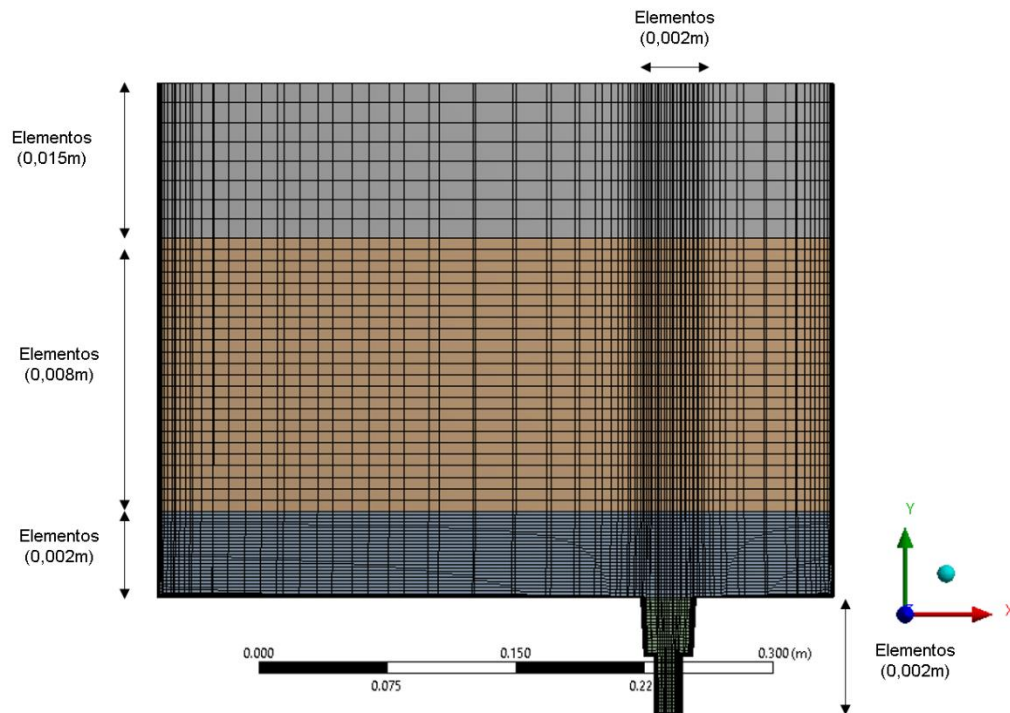


Figura 4.5 Malha computacional tetraédrica utilizada nas simulações de drenagem (490 mil nós).

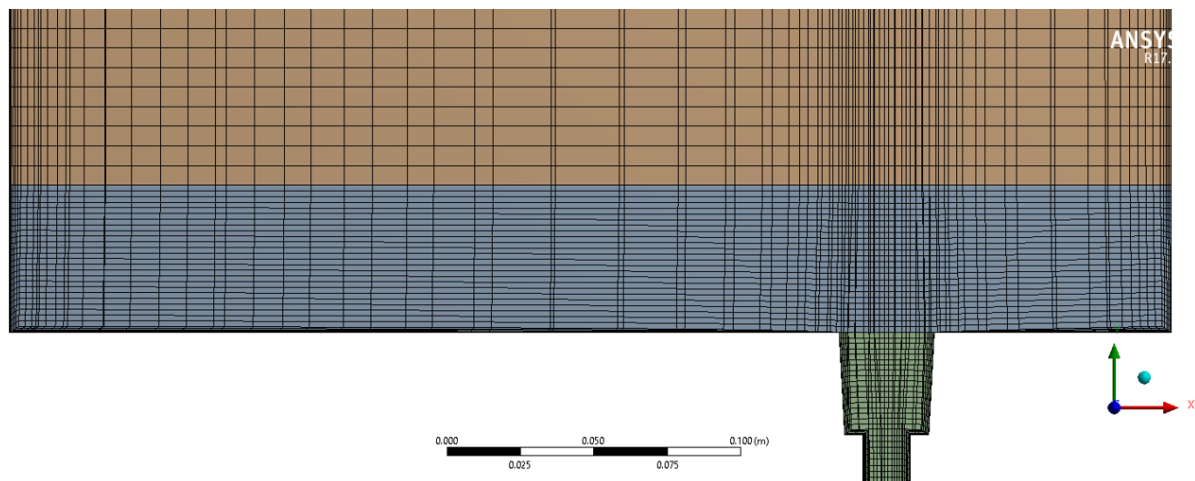


Figura 4.6 Malha computacional destacando o refinamento na região de formação de esgotamento.

4.2.1 Condições de contorno

A escolha das condições de contorno estabelecidas no modelo numérico foi de acordo com as condições físicas no domínio da panela, Figura 4.7. 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 4.1), foi utilizada uma expressão para a velocidade de saída advinda de regressão dos valores de vazão obtidos no modelo físico Tabela 4.3;
- Transferência de calor: Para o caso não isotérmico foi considerado um fluxo de calor (W/m^2) na parede lateral da panela calculado a partir de uma expressão $(-0,0022 \cdot t + 3,8605) \cdot 1000$, obtida no modelo físico via Equação (4.1), durante os 900s do procedimento experimental. As demais paredes foram consideradas adiabáticas, e a superfície livre como condição de abertura a 25°C .

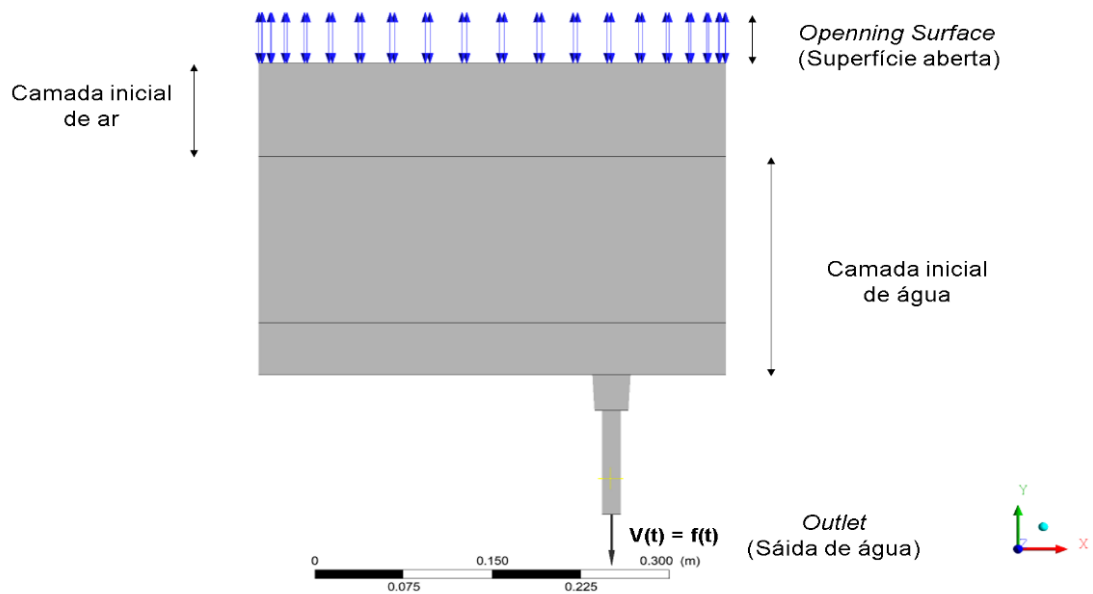


Figura 4.7 Setup das simulações numéricas do problema de drenagem em panela.

Tabela 4.3 – Equações das velocidades de saída do modelo físico durante a drenagem.

Condição Experimental CFD	Altura Inicial Ho (cm)	Vazão inicial (L/min)	$[V(t) = f(t)]$ (m/s)
Isotérmico 25°C	10	9	$-4 \cdot (10^{-6}) \cdot t^2 - 0,0004 \cdot t + 0,7633$
		12	$-3 \cdot (10^{-5}) \cdot t^2 + 0.0004 \cdot t + 0.9695$
		16	$-7 \cdot (10^{-5}) \cdot t^2 + 0.0009 \cdot t + 1.3174$
	20	9	$-0,0005 \cdot t + 0,7418$
		12	$-0.0008 \cdot t + 1.0099$
		16	$6 \cdot (10^{-6}) \cdot t^2 - 0.002179 \cdot t + 1.384$
Isotérmico 50°C	12	9	$-2 \cdot (10^{-6}) \cdot t^2 - 0,0005 \cdot t + 0,7518$
		12	$4 \cdot (10^{-6}) \cdot t^2 - 0,0014 \cdot t + 0,9951$
		16	$1 \cdot (10^{-5}) \cdot t^2 - 0.0028 \cdot t + 1.3408$
	20	9	$-0,0005 \cdot t + 0,7418$
		12	$-0.0008 \cdot t + 1.0099$
		16	$6 \cdot (10^{-6}) \cdot t^2 - 0.002179 \cdot t + 1.384$
Não isotérmico	20	9	$-0.0005 \cdot (t - 900) + 0.7418$
		12	$-0.0008 \cdot (t - 900) + 1.0099$
		16	$-2 \cdot (10^{-6}) \cdot t^2 - 0,0014 \cdot t + 1.3291$

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Modelo Físico

A Figura 5.1 apresenta a média dos resultados de altura crítica obtidos no modelo físico, para cada condição da Tabela 4.1. As vazões escolhidas (9 a 16 l/min), de acordo com o adimensional de Froude, são equivalentes a taxas de enchimento do 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 (CONCEIÇÃO, 2018; SANTOS, 2006).

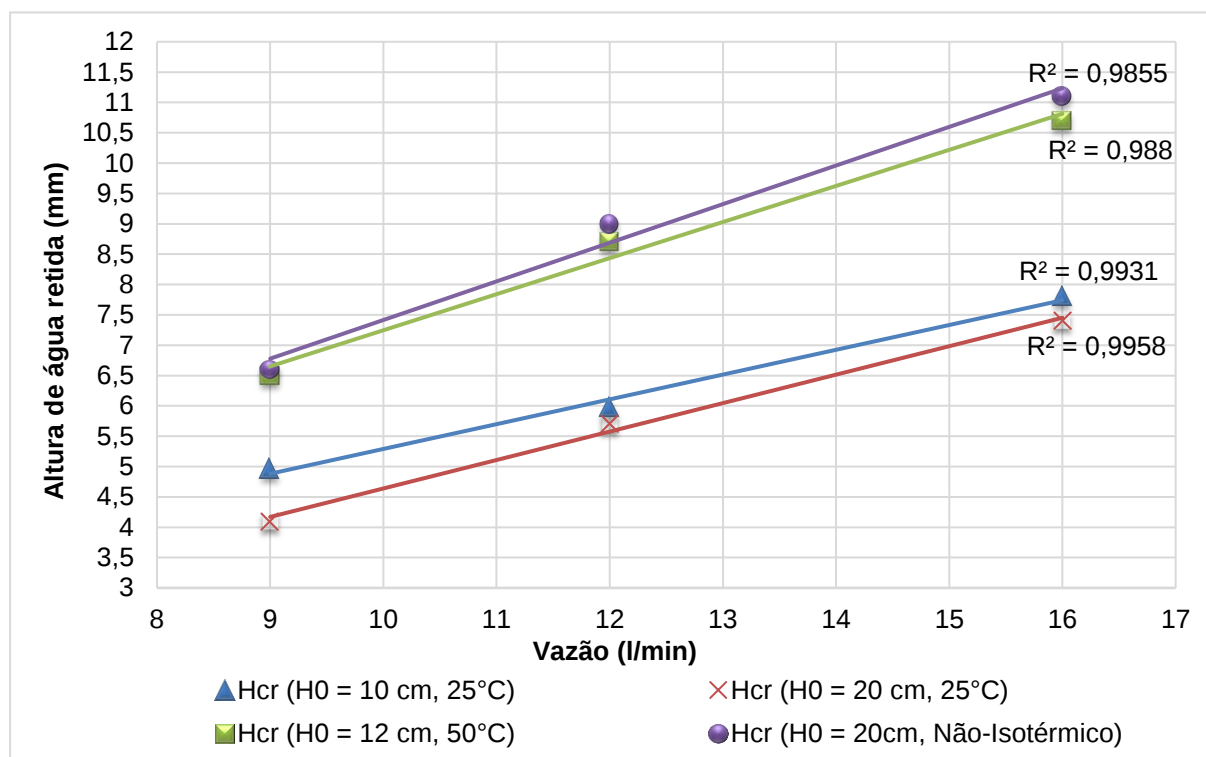


Figura 5.1 Relação entre o valor de H_{cr} e a vazão de drenagem para os testes físicos.

Da Figura 5.1 observa-se também que, para os testes isotérmicos a 25°C e alturas iniciais de $H_0 = 10$ e 20 cm, não houve grande diferença no valor de H_{cr} , sendo em média 7% maior para $H_0 = 10$ cm. Sankaranarayanan (2002), afirma que quanto maior a altura inicial de aço na panela, menor o valor de H_{cr} . 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 H_{cr} 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 H_{cr} 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 (LI et al., 2014). 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 (2009) concluiu que, para o dreno tipo funil, menor valor de tensão interfacial ocasiona aumento de H_{cr} .

Para o teste não isotérmico, como visto em Figura 5, os valores de H_{cr} foram em média 36% maiores em comparação ao caso $H_o = 20\text{cm}$ 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 H_{cr} em comparação as possíveis correntes convectivas geradas pelo gradiente térmico desenvolvido sob as condições experimentais dos testes não isotérmicos.

5.1.1 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 5.2.

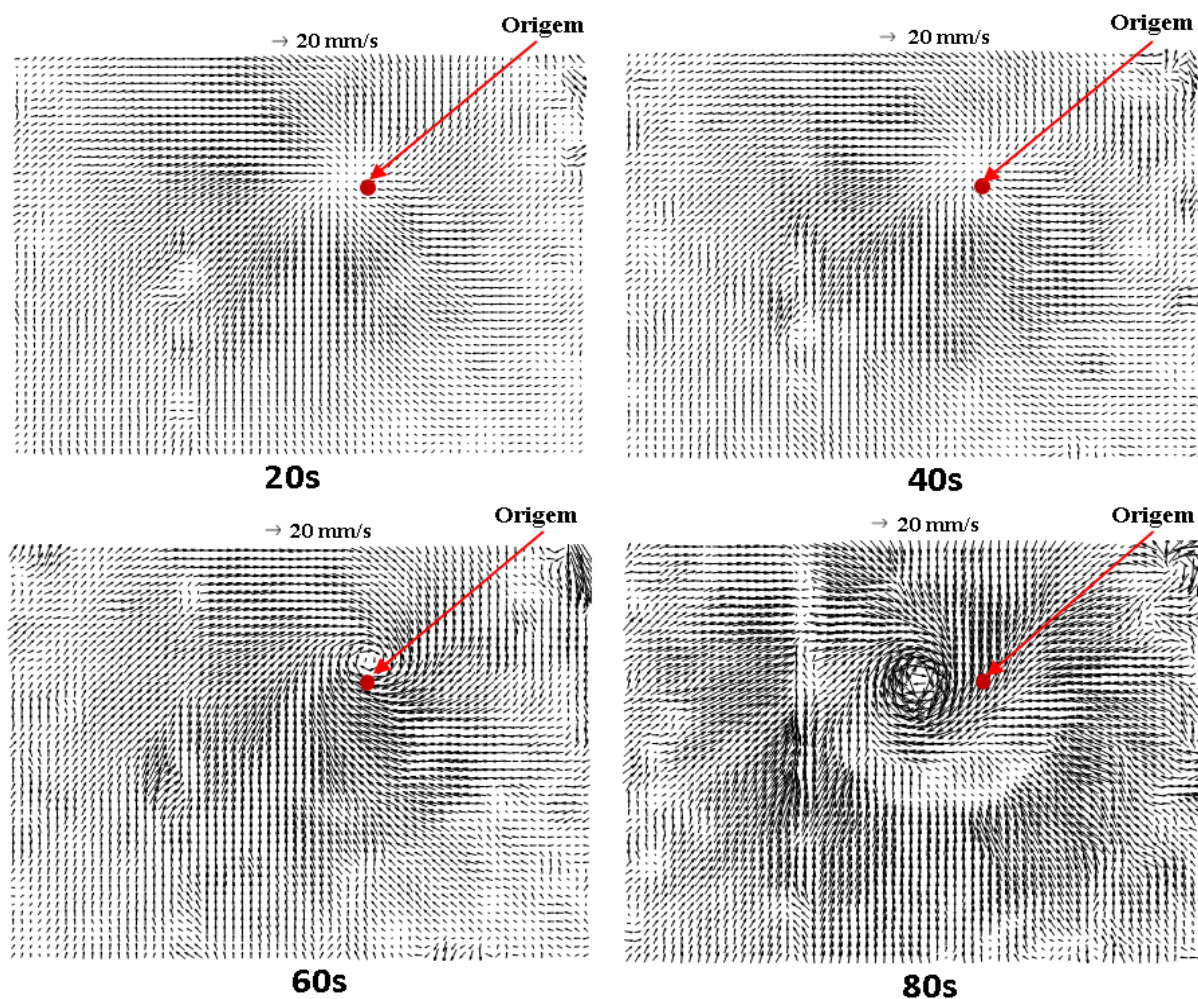


Figura 5.2 Evolução do campo de velocidades, medido pela técnica PIV, durante a drenagem da panela no teste isotérmico 25°C e vazão de 16 l/min.

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* (SANKARANARAYANAN e GUTHRIE, 2002). Visualmente é percebido um pequeno colapso na superfície da água e um redemoinho tende a se estender, como sugere a recirculação observada na Figura 5.2, 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.

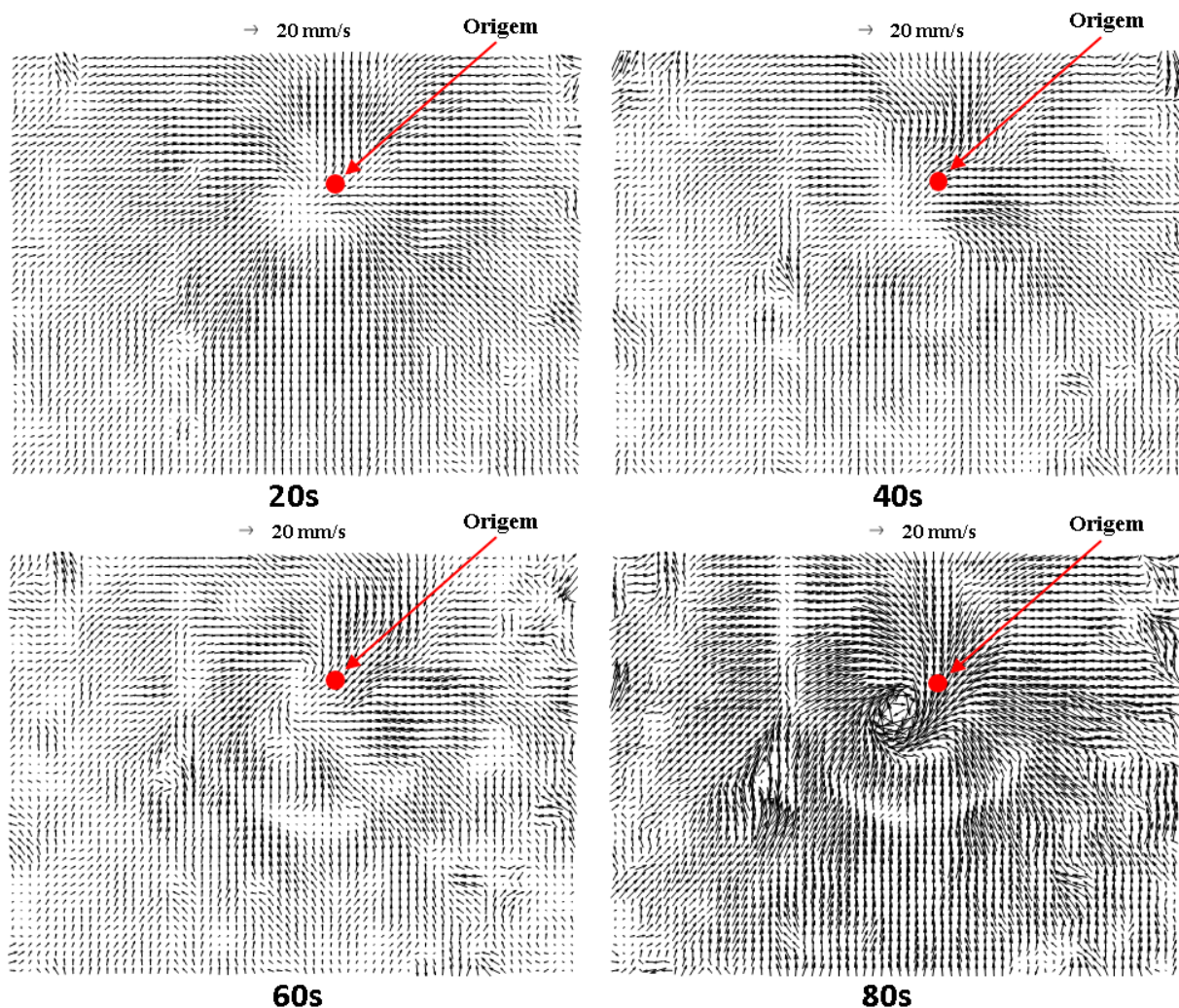


Figura 5.3 Evolução do campo de velocidades, medido pela técnica PIV, durante a drenagem da panela no teste isotérmico 50°C e vazão de 16 l/min.

Observou-se o mesmo comportamento de desenvolvimento de fluxo rotacional durante a drenagem da panela para o teste isotérmico a 50°C Figura 5.3. Em relação aos vetores de velocidade instantânea observados em Figura 5.2 e Figura 5.3 verifica-

se que aos 80s (cerca de 2cm de líquido na panela para ambos os casos) os valores de velocidades são ligeiramente maiores para o caso a isotérmico a 50°C.

5.2 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 5.4(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 5.4(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.

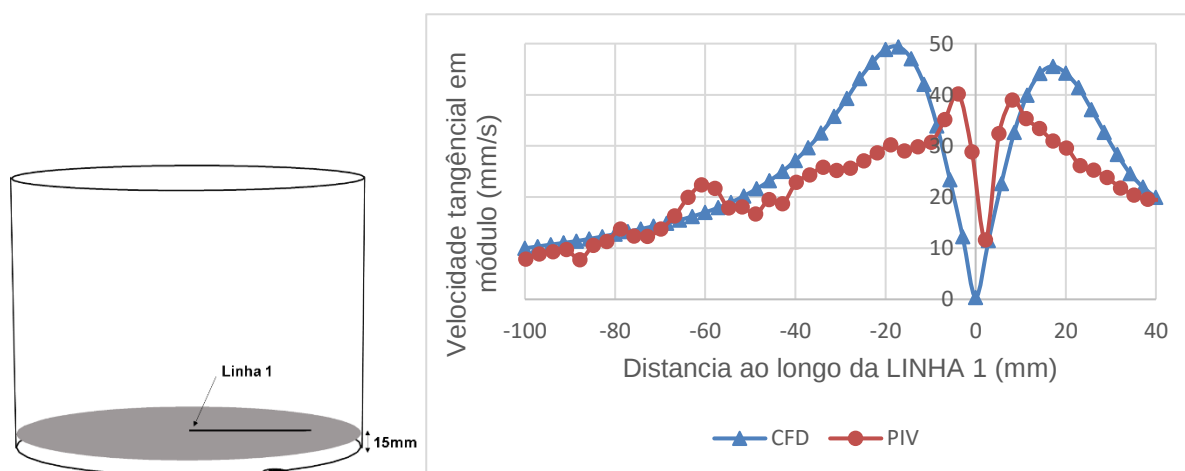


Figura 5.4 (a) representação esquemática da panela com a localização da linha 1 utilizada na análise; (b) gráfico dos valores de velocidade calculados pelo modelo matemático e via PIV para 70s de drenagem (4cm de líquido na panela) no caso isotérmico a 25°C, $H_0 = 20$ cm e 16 l/min.

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 5.5. 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 (CONCEIÇÃO, 2018).

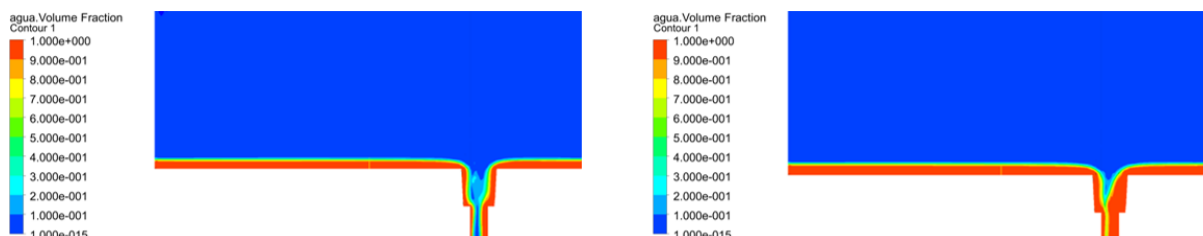


Figura 5.5 (a) Queda de 30% da vazão devido a formação do dreno (teste isotérmico 25°C, 16 l/min).
(b) Queda de 15% de vazão devido a formação do vórtice (teste isotérmico 50°C, 16 l/min).

Os dados obtidos pelo modelo numérico foram confrontados com aqueles adquiridos no modelo físico e o resultado pode ser verificado na Tabela 5.1, 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 5.6.

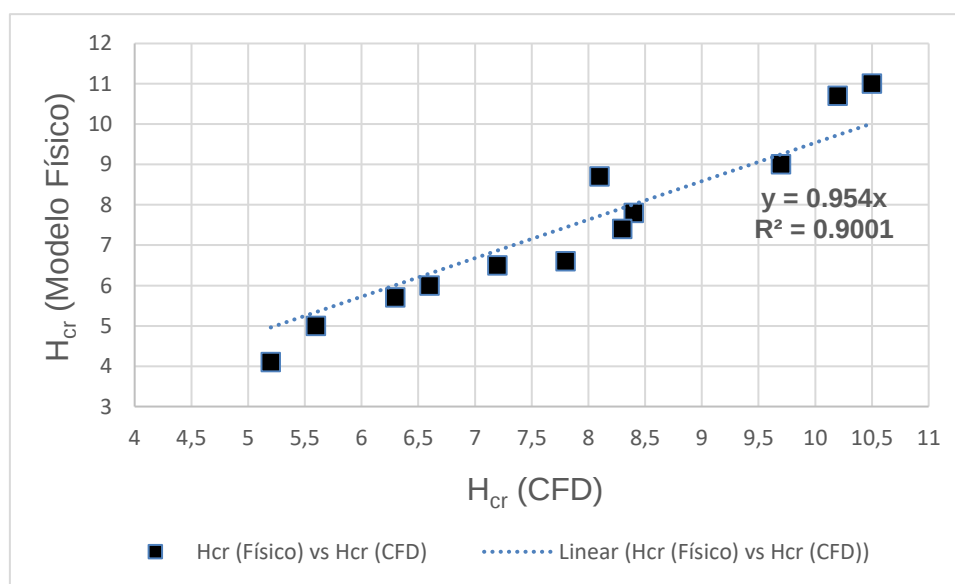


Figura 5.6 Correlação entre os valores de H_{cr} obtidos via modelamento físico e via CFD.

Tabela 5.1 – Comparação entre os resultados de Hcr obtidos pelos modelos físico e matemático.

Condição Experimental	Altura Inicial Ho (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
	200	9	4,1	5,2
		12	5,7	6,3
		16	7,4	8,3
Isotérmico 50°C	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 120 mm para se obter maior número de pontos com a termorresistência na posição de 100mm.*

6 CONCLUSÃO

- Para todos os experimentos conduzidos, a quantidade de líquido retido após passagem de segunda fase (H_{cr}) se mostrou maior com o aumento da vazão de drenagem. A relação entre H_{cr} e a vazão de drenagem foi obtida satisfatoriamente por ajuste linear.
- Em relação à altura inicial, para $H_0 = 10$ cm o valor de H_{cr} foi em média 7% maior que o obtido para $H_0 = 20$ cm.
- O aumento de temperatura resultou em valores de H_{cr} 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 H_{cr} 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 H_{cr} obtidos no modelo físico.

O presente trabalho resultou, também, na publicação de um artigo científico, intitulado “Modelamento físico e matemático do vazamento de aço da panela” a ser apresentado no congresso da ABM WEEK 2019.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar a influência da fase sobrenadante sobre a altura crítica;
- Estudar os efeitos das estratégias de reenchimento do distribuidor sobre a vazão de drenagem da panela;
- Conduzir simulações trifásicas água/óleo/ar para avaliar o efeito da camada sobrenadante. Realizar também simulações utilizando as propriedades do aço e escória para estudar o fenômeno em escala industrial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ansys Inc.: ANSYS CFX- Solver Theory Guide, Release 18.2, Canonsburg, PA, 2017, pp. 153-213.

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**, v. 41, n.2, p. 287-292, 1972.

CONCEIÇÃO, P. V. S. Rendimento Metálico Durante Vazamento de Painéis de Aço. 2018. 84 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Rede Temática em Engenharia de Materiais – REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

JONES, F.E; HARRIS, G. L. ITS-90 Density of Water Formulation for Volumetric Standards Calibration. **Journal of research of the National Institute of Standards and Technology**, v. 97, n.3, p. 335-340, 1992.

KATO, H. Quality improvement of unstable zone by ladle slag detection system for continuous casting. CAMP-Iron and Steel Institute of Japan, 5, 1992.

KOJOLA, N; TAKAGI, S; YOKOYA, S; JÖNSSON, P. Prediction and Disarming of Drain Sink Formation during Unsteady-state Bottom Teeming. **Iron and Steel Institute of Japan International**, v. 49, n. 1, p. 1-9, 2009.

KOJOLA, N; YOKOYA, S; JÖNSSON, P. Effect of Interfacial Energy on the Drain Sink Formation Height. **Iron and Steel Institute of Japan International**, v. 49, n. 4, p. 463-469, 2009.

LI, H.X; WANG, Q; LEI, H; JIANG, J.W; GUO, Z.C; HE, J.C. Mechanism Analysis of Free-Surface Vortex Formation during Steel Teeming. **Iron and Steel Institute of Japan International**, v. 54, n. 7, p. 1592-1600, 2014.

MAZZAFERRO, G. M; PIVA, M; FERRO, S. P; BISSIO, P; IGLESIAS, M; CALVO, A; GOLDSCHMIT, M. B. Experimental and numerical analysis of ladle teeming process. **Ironmaking & Steelmaking**, v. 31, n. 6, p. 1-6, 2004.

MORALES, R. D; DÁVILA-MALDONADO, O; CALDERÓN, I; MORALES-HIGA, K. Physical and mathematical models of vortex flows during the last stages of steel draining operations from a ladle. **Iron and Steel Institute of Japan International**, v. 53, n. 5, p. 782-791, 2013.

PIVA, M; IGLESIAS, M; BISSIO, P; CALVO, A. Experiments on vortex funnel formation during drainage. **Psysica A**, v. 329, p. 1–6. 2003.

RIBEIRO, B. A. B. Análise Numérica e Experimental do Processo de Vazamento de Aço Líquido da Panela de Aço para Distribuidores no Processo de Lingotamento Contínuo. 2014. 65 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

SANKARANARAYANAN, R; GUTHRIE, R. I. L. Slag entraining vortexing funnel formation during ladle teeming: similarity criteria and scale-up relationships. **Ironmaking & Steelmaking**, v. 29, n. 2, p. 147-153, 2002.

SANTOS, S. D. S. 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. 2006. 101 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Rede Temática em Engenharia de Materiais – REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.

SATO, C. T. SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESCÓRIA / AÇO DURANTE O ESGOTAMENTO DA PANELA ATRAVÉS DE MODELAGEM FÍSICA. 2007. 81 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

SINGH, P. K. SCALE MODEL EXPERIMENTS AND NUMERICAL STUDY ON A STEEL TEEMING PROCESS. 2004. 54 folhas. Master's Theses (Master of Science in the College of Engineering) - University of Kentucky UKnowledge, Lexington, 2004.

TAN, D. P; NI, Y. X; ZHANG, L. B. Two-phase sink vortex suction mechanism and penetration dynamic characteristics in ladle teeming process. **Journal of Iron and Steel Research International**, v. 24, p. 196–202. 2017.