



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 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL
DA DRENAGEM DE UM REATOR BOF”***

Gustavo Santos Galante

Ouro Preto, 20 de Dezembro de 2019.

Gustavo Santos Galante

“Modelamento Físico e Simulação computacional da drenagem de um reator BOF”

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. Dr. Johnne Jesus Mol Peixoto

Ouro Preto, 20 de Dezembro de 2019.

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

G146m Galante, Gustavo Santos .
Modelamento Físico e Simulação computacional da drenagem de um reator
BOF. [manuscrito] / Gustavo Santos Galante. Gustavo Santos Galante. - 2020.
70 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Johne Jesus Mol Peixoto.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de
Minas.

1. Modelagem física. 2. Simulação (Computadores) . 3. BOF (Basic Oxygen
Furnance). 4. Aço - Drenagem. I. Galante, Gustavo Santos. II. Peixoto, Johne
Jesus Mol. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 681.5

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB:1716



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

ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA

Aos 20 dias do mês de dezembro de 2019, às 9 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 **Gustavo Santos Galante**, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores Johné Jesus do Mol Peixoto (Presidente), Héric Henrique Souza e Silva (IFMG/Campus Ouro Branco) e Antonio Marlon Barros Silva (IFMG/Campus Ouro Branco). O aluno apresentou a monografia intitulada **"Modelamento Físico e Simulação computacional da drenagem de um reator BOF"**. 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, 20 de dezembro de 2019.

Prof. DSc Johné Jesus Mol Peixoto
Orientador – Presidente

Prof. MSc Héric Henrique Souza e Silva
Membro - IFMG/ Campus Ouro Branco

Eng. MSc Antonio Marlon Barros Silva
Membro - IFMG/ Campus Ouro Branco

Gustavo Santos Galante
Aluno

RESUMO

Com o aumento da importância da qualidade do aço, o procedimento de transferência de reator para reator na cadeia de refino ganhou grande visibilidade. Durante o processo de transferência do reator BOF (*Basic Oxygen Furnance*) ou entre panelas a formação de escoamentos do tipo vórtice e do tipo dreno provoca o arraste de escória que resulta em contaminação do aço e refinamentos posteriores são necessários para se atingir as exigências de qualidade, aumentando assim os custos de produção. Diante deste fato, encontram-se na literatura muitos estudos relacionados a dispositivos que inibem ou retardam o desenvolvimento dos escoamentos citados e métodos de previsão da altura de formação destes escoamentos, a maioria sobre drenagem de panelas. O objetivo do presente trabalho foi criar uma simulação computacional que descreva a drenagem de reator BOF em escala e sua validação através de comparação com resultados de modelamento físico em modelo de acrílico em escala 1:15. A simulação computacional foi conduzida no software CFX 19.1 (*Ansys*®), utilizando os *softwares* internos do *Ansys* para confeccionar a geometria, malha e setup. As simulações matemáticas foram realizadas em regime transiente e os experimentos de modelagem física foram realizados apenas em metade do modelo do reator BOF com basculamento para simular o processo de drenagem do reator. Foram conduzidos experimentos utilizando detecção de formação de vórtice via detecção visual, curva de drenagem por gravimetria e utilização de óleos para simular a influência de fluido sobrenadante. Obteve-se ao final uma simulação que descreveu, com boa correlação, os fenômenos físicos presentes no basculamento de um reator BOF para simulações bifásicas (água/ar) e trifásicas com a presença de querosene para simular a escória. Foi possível identificar com a metodologia visual e gravimétrica os tempos de início de arraste de segunda fase para todas as simulações físicas e computacional para testes sem óleo e com querosene. Observou-se por fim uma tendência ao aumento do tempo de início de dreno, ou seja, diminuição da altura do fenômeno, quando se aumentava a viscosidade da fase sobrenadante.

Palavras-chave: modelagem física; simulação computacional; BOF; drenagem de aço.

ABSTRACT

With the increasing importance of steel quality, the reactor to reactor transfer process in the refining chain has gained great visibility. During the process of transferring the BOF (Basic Oxygen Furnance) reactor or between ladles, the formation of vortex and drain type flows causes slag drag which results in steel contamination and further refining is required to meet quality requirements thus increasing production costs. Given this fact, there are many studies in the literature related to devices that inhibit or retard the development of the cited flows and methods of predicting the height of formation of these flows, mostly on drainage of pots. The objective of the present work was to create a computational simulation that describes the scaled BOF reactor drainage and its validation through comparison with physical modeling results in a 1:15 scale acrylic model. The computational simulation was conducted using CFX 19.1 (Ansys®) software, using Ansys internal software to create geometry, mesh and setup. The simulations were performed in transient regime and the physical modeling experiments were performed in only half of the tipped BOF reactor model to simulate the reactor drainage process. Experiments were conducted using vortex formation detection via visual detection, gravity drainage curve and use of oils to simulate the influence of supernatant fluid. At the end, we obtained a simulation that described, with good correlation, the physical phenomena present in the tilting of a BOF reactor for biphasic (water / air) and triphasic simulations with the presence of kerosene to simulate the slag. It was possible to identify with the visual and gravimetric methodologies the drain start times for all physical and computational simulations for oil-free and kerosene tests. Finally, there was a tendency to increase the drain start time, that is, to decrease the height of the phenomenon when the viscosity of the supernatant phase was increased.

Keywords: physical modeling; computer simulation; BOF; steel drainage.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 3. 1 – escoamento no orifício no fundo de uma panela. a) escoamento tipo vórtice; b) escoamento tipo dreno..... | 5 |
| Figura 3. 2 - Características do funil de vórtice no ponto crítico de sua formação. | 6 |
| Figura 3. 3 - Características do funil de dreno no ponto crítico de sua formação. | 6 |
| Figura 3. 4 - Fator adimensional VN versus Adimensional de altura crítica. | 8 |
| Figura 3. 5 - Decaimento da velocidade tangencial com o tempo ($D = 1160$ mm, $H_i = 995$ mm)..... | 9 |
| Figura 3. 6 - Influência de (a) e (b) ND e LHs inicial, (c) DT, e (d)FR, nas curvas de drenagem durante o processo de rosca. | 10 |
| Figura 3. 7 - Influência de (a) DT, (b) LH inicial..... | 12 |
| Figura 3. 8 - Influência de (a) enchimento inicial FR e (b) ND em LH crítico para formação de vórtice (altura de vórtice)..... | 13 |
| Figura 3. 9 - Influência de (a) DT, (b) LH inicial..... | 14 |
| Figura 3. 10 - (a) enchimento inicial FR e (b) ND em LH crítico para formação de dreno (altura do dreno). | 15 |
| Figura 3. 11 - Mudança no sinal de vibração do distribuidor no início do arraste de escória da panela..... | 18 |
| Figura 3. 12 - Mudança na taxa de vazamento e sua derivada durante a drenagem de uma panela, devido ao arraste de escória. | 19 |
| Figura 3. 13 - Imagem da drenagem enquanto ocorre o início de arraste de escória na saída. | 20 |
| Figura 3. 14 – Exemplo de malha computacional para simulação de drenagem de panela..... | 21 |
| Figura 4. 1 - Dimensões do modelo; a) vista superior; b) vista lateral..... | 23 |
| Figura 4. 2 - Sistema de basculamento e aquisição dados..... | 24 |
| Figura 4. 3 - Diagrama esquemático do sistema PIV: (a) Configuração laser horizontal; (b) Configuração laser vertical. | 25 |
| Figura 4. 4 - Balança de precisão Marte AD16K do laboratório de Pirometalurgia do DEMET/UFOP. | 25 |
| Figura 4. 5 – Configuração de duas balanças. | 26 |
| Figura 4. 6 – Geometria do reator..... | 29 |
| Figura 4. 7 – Regiões de delimitações de refino. | 29 |

| | |
|---|----|
| Figura 4. 8 – Malha obtida com configuração M1. | 31 |
| Figura 5. 1 - Gráfico da comparação entre configurações de malhas e <i>timeSteps</i> e com simulação física. | 37 |
| Figura 5. 2 – Início do dreno modelo estático 12L; a) Simulação física; b) simulação computacional..... | 39 |
| Figura 5. 3 – Gráfico da primeira derivada da média dos testes das curvas de drenagem do físico, com modelo estático e uma balança. | 39 |
| Figura 5. 4 – Gráfico da primeira derivada da média dos testes das curvas de drenagem do físico, com modelo estático e duas balanças. | 40 |
| Figura 5. 5 – Gráfico da comparação entre curva média dos testes de drenagem físico sem óleo Versus CFD (Computacional). | 41 |
| Figura 5. 6 – Gráfico da comparação entre curva média dos testes de drenagem físicos com óleo Querosene Versus CFD (Computacional). | 42 |
| Figura 5. 7 – Simulação de óleos de silicone 500cSt, visão de perfil e topo do reator, com camada inicial de a) 25mm b) 50mm. | 43 |
| Figura 5. 8 – Gráfico da comparação entre curva média dos testes de drenagem dos testes físicos com óleo 500cSt Versus CFD (Computacional). | 44 |
| Figura 5. 9 - Simulação de óleo de silicone 200cSt, visão de perfil e topo do reator, com camada inicial de: a) 25mm; b) 50mm. | 45 |
| Figura 5. 10 - Gráfico da comparação entre curva média dos testes de drenagem físicos com óleo 200cSt Versus CFD (Computacional). | 45 |
| Figura 5. 11 – Comparação entre resultados do modelo físico e CFD do início do dreno durante o basculamento do reator BOF; a) Sem óleo; b) Água + óleo 500cst; c) Água + óleo 200cst; d) Água + querosene. | 47 |
| Figura 5. 12 – Gráfico da primeira derivada da média dos testes das curvas de drenagem do físico, com basculamento, uma balança e óleo de silicone 200cSt. | 48 |
| Figura 5. 13 - Gráfico da primeira derivada da média dos testes das curvas de drenagem do físico, com basculamento, uma balança e óleo de silicone 500cSt. | 49 |
| Figura 5. 14 - Gráfico da primeira derivada da média dos testes das curvas de drenagem do físico, com basculamento, uma balança e Querosene. | 49 |
| Figura 5. 15 - Gráfico da primeira derivada da média dos testes das curvas de drenagem do físico, com basculamento, uma balança e sem óleo. | 50 |
| Figura 5. 16 – CFD versus FÍSICO da curva da vazão mássica sem basculamento com água e sem presença de fluído sobrenadante. | 52 |

| | |
|---|----|
| Figura 5. 17- CFD versus FÍSICO da curva da vazão mássica com basculamento com água e sem presença de fluído sobrenadante. | 52 |
| Figura 5. 18 - CFD versus FÍSICO da curva da vazão mássica com basculamento com água e querosene como fluído sobrenadante. | 53 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 4. 1 - Propriedades dos fluidos utilizados para simular a escória..... | 27 |
| Tabela 4. 2 - Configurações de malhas obtidas para cada tipo de simulação..... | 31 |
| Tabela 4. 3 - Equações utilizadas na simulação computacional sem basculamento e suas aplicações..... | 34 |
| Tabela 4. 4 - Equações utilizadas na simulação computacional com basculamento e suas aplicações..... | 35 |
| Tabela 5. 1 – Tempos de início de arraste de segunda fase obtidos por diferentes técnicas. | 51 |

LISTA DE NOTAÇÕES

FR – Flow Rate (Vazão)

DT - Dwell Time (Tempo de permanência)

LH - Liquid Height (Altura do líquido)

ND - Nozzle Diameter (Diâmetro do Bocal)

COR - carryover ratio (Quantidade de Arraste)

BOF – Basic Oxygen Furnace

VN – Vortex Number

PIV - Particle Image Velocity

CFD - Computational Fluid Dynamics

SUMÁRIO

| | | |
|---|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2 | OBJETIVOS..... | 3 |
| | 2.1 Objetivo geral..... | 3 |
| | 2.2 Objetivos específicos..... | 3 |
| 3 | REVISÃO DA LITERATURA..... | 4 |
| | 3.1 Drenagem do Aço..... | 4 |
| | 3.2 Mecanismos de Arraste de Escória..... | 4 |
| | 3.3 Condições de Formação de Vórtice e Dreno..... | 5 |
| | 3.3.1 Principais parâmetros que influenciam a formação de escoamento tipo vórtice e dreno..... | 7 |
| | 3.4 Dispositivos Antivórtice..... | 17 |
| | 3.5 Mecanismos de Detecção da Passagem de Escória..... | 17 |
| | 3.6 Simulação Computacional..... | 20 |
| 4 | MATERIAS E MÉTODOS..... | 23 |
| | 4.1 Modelo Físico..... | 23 |
| | 4.2 Perfil de Velocidade via PIV..... | 24 |
| | 4.3 Curva de Drenagem por Gravimetria..... | 25 |
| | 4.4 Detecção do Início de Formação de Vórtice ou Dreno em Modelo Físico..... | 26 |
| | 4.5 Fluidos de Trabalho..... | 27 |
| | 4.6 Procedimento Experimental..... | 27 |
| | 4.7 Simulação Computacional..... | 28 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 37 |
| | 5.1 PIV..... | 37 |
| | 5.2 Simulação com Modelo Estático..... | 37 |
| | 5.2.1 Independência de Malha e <i>TimeStep</i> | 37 |

| | |
|--|----|
| 5.2.2 Início de formação de Dreno | 38 |
| 5.3 Simulações com Basculamento | 41 |
| 5.3.1 Curva de drenagem sem óleo..... | 41 |
| 5.3.2 Curva de drenagem com óleo | 41 |
| 5.3.3 Início de arraste de óleo/ar | 46 |
| 5.4 Validação da Simulação Computacional e Influência dos Fluidos Sobrenadantes | 50 |
| 5.5 Trabalhos Futuros | 53 |
| 6 CONCLUSÕES | 54 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 56 |

1 INTRODUÇÃO

O aumento crescente na busca por aço de qualidade e a grande competitividade no mercado mundial vem forçando a indústria siderúrgica a investir em pesquisas que gerem melhorias tecnológicas de alto impacto na qualidade do produto e redução de custos.

Neste contexto a aciaria se tornou um grande polo de pesquisas de melhoria, visto o grande potencial de avanços tecnológicos com ações simples. Geralmente, durante o processamento do aço líquido no setor, tem-se a transferência de reator para reator na cadeia de refino. Sendo assim, durante tais procedimentos pode haver o arraste de escória, comprometendo a qualidade do produto final.

O arraste de escória durante os estágios finais do processamento de aço líquido se dá pela formação de escoamentos do tipo vórtice e do tipo dreno durante o basculamento do reator BOF (*Basic Oxygen Furnance*) ou durante passagem de aço entre panela e distribuidores. (ANDRZEJEWSKI *et al.*, 1987).

Após o vazamento, se o aço não atinge as exigências de qualidade requeridas pelas etapas seguintes, deve-se adequar a composição com a adição de agentes desoxidantes e realização outras etapas de refino, o que aumenta o custo de produção.

A fim de reduzir o arraste de escória durante o esgotamento de reatores como panelas e BOF, geralmente é feita a interrupção prematura do vazamento. Assim evita-se formação dos escoamentos responsáveis pelo entranhamento de escória. No entanto, tal técnica compromete o rendimento metálico da aciaria, e conseqüentemente, tem impactos em seu custo de produção.

Várias técnicas de detecção de arraste de escória são empregadas a fim de diminuir a quantidade de escória carregada durante a drenagem dos reatores. Estas técnicas são baseadas em diferentes princípios físicos, como efeitos térmicos, ópticos, eletromagnéticos e de vibrações, relacionados às propriedades do aço e escória líquidos. Dispositivos de retardo de formação de vórtice também são utilizados a fim de diminuir a altura crítica de formação de vórtice e, conseqüentemente, reduzir o arraste de escória em etapas de processamento de aço. (HYOUNGBAE, 1998).

A informação disponível na literatura referente aos escoamentos do tipo vórtice e do tipo dreno durante o vazamento do vaso BOF para várias condições do processo ainda é limitada. É necessário um melhor entendimento da drenagem de reatores com forma complexa, tal como o BOF. Também é importante explorar possíveis mudanças no reator, presença de dispositivos retardadores de escoamento e técnicas de basculamento; que venha a diminuir o arraste de escória, prevendo ou retardando o início de vórtice, sem redução do rendimento metálico. Neste sentido, o presente trabalho teve o objetivo de desenvolver uma simulação computacional que reproduza, de forma mais fiel possível, o processo de drenagem em um modelo de acrílico de um reator BOF, em escala, a fim de investigar os fenômenos de escoamento do tipo vórtice e tipo dreno durante o basculamento e drenagem de um reator BOF.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Investigar os fenômenos de escoamento durante o basculamento e drenagem de um reator BOF utilizando simulação computacional e modelo físico.

2.2 Objetivos específicos

- Obter o perfil de velocidades do modelo físico via técnica PIV (*Particle Image Velocity*) e curva de drenagem via técnica de gravimetria;
- Identificar via modelamento físico, durante o basculamento e drenagem de reator BOF, o início de formação vórtice ou dreno;
- Desenvolver simulação fluidodinâmica computacional do processo de basculamento e vazamento do reator BOF;
- Validar simulação matemática com os resultados do modelo físico: dados de vazão mássica durante vazamento e o tempo de início de formação de escoamento tipo vórtice ou tipo dreno;
- Avaliar a influência dos óleos 200cSt, 500cSt e querosene como sobrenadantes sobre o início de formação de escoamentos tipo vórtice ou tipo dreno na simulação computacional;

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Drenagem do Aço

Sendo uma das operações principais presentes na fabricação do aço, a transferência de aço líquido entre recipientes, possui o grande desafio da drenagem controlada, a fim de minimizar o carregamento de escória junto ao aço durante a operação de transferência (KARAMAJ *et al.*, 2019).

Muitos pesquisadores têm estudado os mecanismos de arraste de escória e seu controle durante a transferência entre recipientes. Em sua maioria são estudos sobre drenagem de painéis.

3.2 Mecanismos de Arraste de Escória

Em processos de esvaziamento de painéis, Andrzejewski *et al.* (1987) determinaram dois tipos de escoamentos: vórtice e tipo dreno. A formação do escoamento do tipo vórtice ocorre na presença de movimento rotacional durante a drenagem; no início do vazamento a movimentação da superfície tem componentes predominantemente verticais, sendo as demais componentes muito pequenas, com o passar do tempo movimentações de pequenos diâmetros são observados em torno do canal de saída, algumas destas movimentações se estabilizam, aumentando de diâmetro e formando um eixo central até o fundo formando então um vórtice (Figura 3.1 a) (ANDRZEJEWSKI *et al.*, 1987).

Ao final do vazamento, quando a vazão no canal se torna menor que a capacidade de saída, tem-se a mudança de escoamento para o tipo dreno (Figura 3.1 b). Nesta situação é inevitável a passagem de escória, visto que o canal não pode ser inteiramente preenchido por aço. Este fenômeno pode ou não ser antecedido pelo vórtice. (ANDRZEJEWSKI *et al.*, 1987).

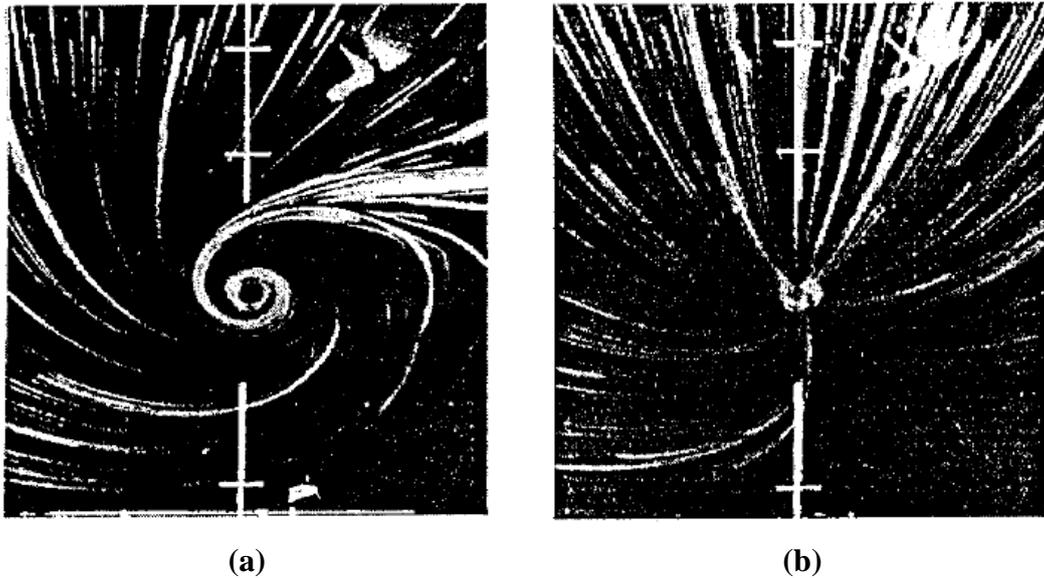


Figura 3. 1 – escoamento no orifício no fundo de uma panela. a) escoamento tipo vórtice; b) escoamento tipo dreno. (ANDRZEJEWSKI *et al.*, 1987).

3.3 Condições de Formação de Vórtice e Dreno

Para a formação do escoamento tipo vórtice é necessário que o líquido contido na panela possua velocidades tangenciais residuais não nulas no início da operação (SANKARANARAYANAN e GUTHRIE, 2002).

Segundo Sankaranarayanan e Guthrie (2002), espera-se que as velocidades tangenciais se intensificassem em uma pequena região ao redor do eixo do bocal, com o passar do tempo da drenagem. Quando a velocidade tangencial local excede um valor crítico ($V_{\theta,cr}$), forma-se uma ondulação, formando um *dimple*, no local; existem um tempo crítico de formação de *dimple* ($t_{cr,dimple}$) e uma altura crítica de formação de *dimple* ($H_{cr,dimple}$). À medida que o processo continua, o *dimple* progressivamente estende sua cauda em direção ao bocal, e eventualmente se estabelece como um funil de vórtice totalmente desenvolvido, no tempo $t = t_{cr,vf}$ e altura do líquido $H = H_{cr,vf}$. A Figura 3.2 mostra as características de um funil de vórtice no seu ponto crítico.

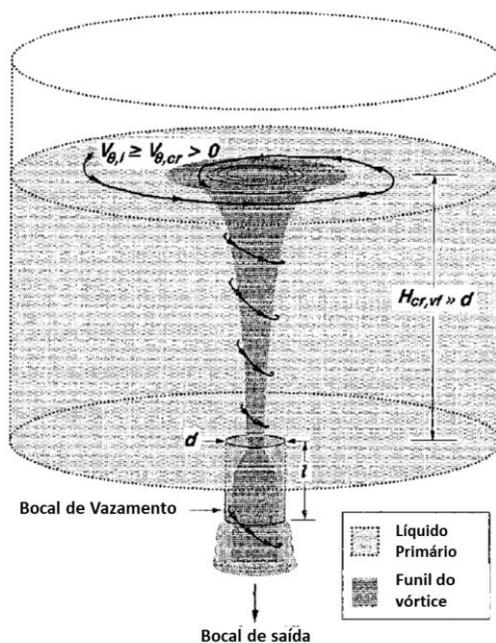


Figura 3. 2 - Características do funil de vórtice no ponto crítico de sua formação.
(SANKARANARAYANAN & GUTHRIE, 2002).

Sankaranarayanan e Guthrie (2002) chamaram um escoamento do tipo dreno de não vórtice, sendo que as características do seu funil no ponto crítico de formação são mostradas na Figura 3.3.

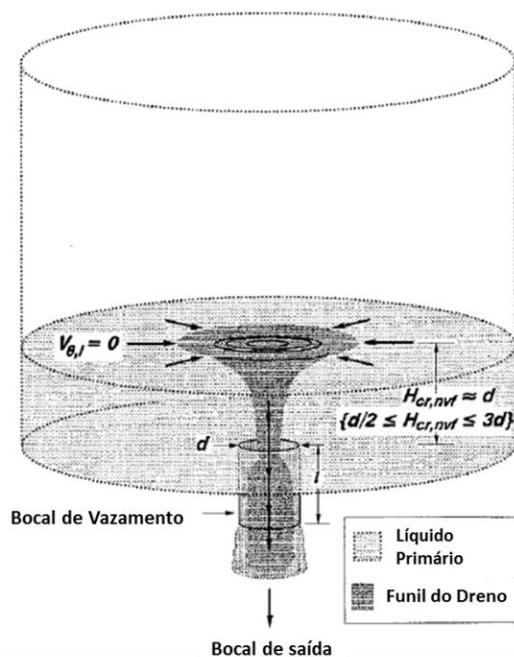


Figura 3. 3 - Características do funil de dreno no ponto crítico de sua formação.
(SANKARANARAYANAN e GUTHRIE, 2002).

A formação do escoamento do tipo dreno ocorre quando o líquido contido na panela é praticamente livre de movimento rotacional residual, muito do líquido que sai da panela é retirado da vizinhança de uma região hemisférica em torno da entrada do bocal de saída (ao contrário de um volume de controle cilíndrico estreito no caso de um funil de vórtice). Quando a soma total da vazão que entra normal ao volume de controle hemisférico se torna menor que a capacidade de vazão do bocal, então o fluido sobrenadante (líquido ou gás) é arrastado para formar um canal do tipo dreno ou não vórtice. (SANKARANARAYANAN e GUTHRIE, 2002).

3.3.1 Principais parâmetros que influenciam a formação de escoamento tipo vórtice e dreno

Sankaranarayanan e Guthrie (2002) realizaram experimentos com variação do diâmetro da panela (495mm e 1160mm) e de uma combinação adimensional que eles chamaram de *Vortex Number* (VN); para avaliar influência da velocidade angular do fluido no início e no decorrer da drenagem. Os autores, chegaram à conclusão, com base nos resultados experimentais mostrados na Figura 3.4, que com um pequeno aumento de VN tem-se um grande aumento na altura crítica de formação de vórtice, mostrando que a velocidade angular possui uma influência direta sobre a formação do escoamento tipo vórtice.

Sabendo que *Vortex Number* (VN) é o adimensional composto abaixo,

$$VN = \frac{\pi_4 \pi_3}{\pi_2} \quad (3.1)$$

Sendo,

$$\pi_3 = \frac{D}{H_i} ; \pi_2 = \frac{d}{H_i} ; \pi_4 = \frac{V_{\theta^i}}{V_{out,i}} \quad (3.2)$$

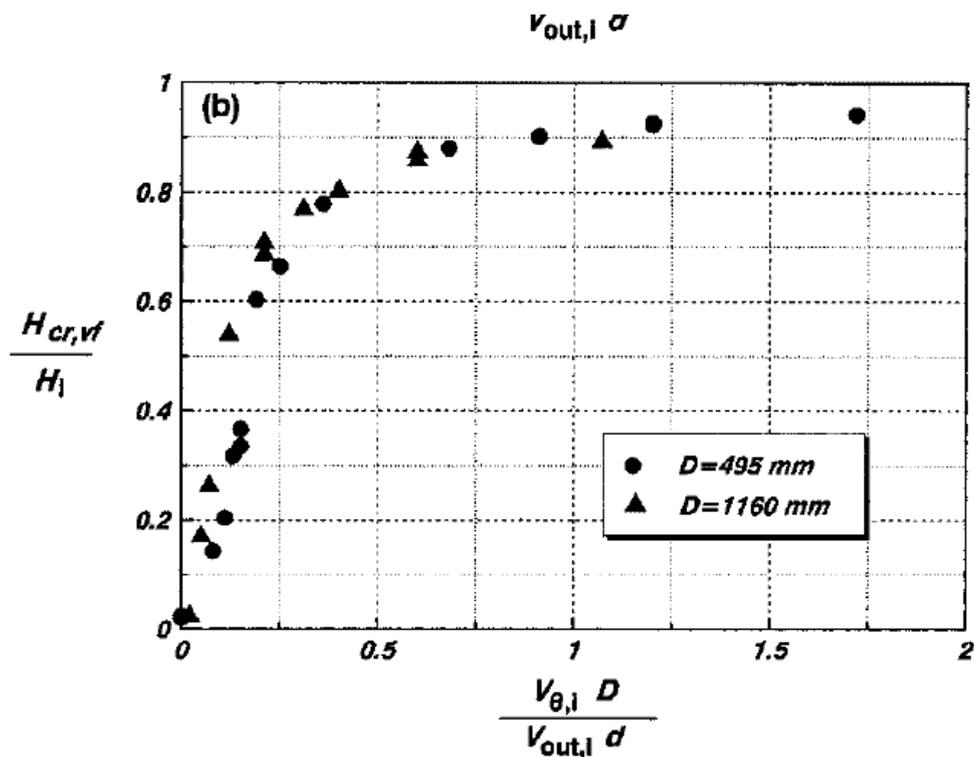


Figura 3.4 - Fator adimensional VN versus Adimensional de altura crítica.
(SANKARANARAYANAN e GUTHRIE, 2002).

Ainda em Sankaranarayanan e Guthrie (2002), é dito que a altura crítica de formação de dreno ($H_{cr,nvf}$) é conhecida por variar linearmente com o diâmetro do bocal d , de $0.5d$ a $3d$. $H_{cr,nvf}$ também é conhecido por variar em proporção direta com a vazão de saída, ou seja, quanto maior o diâmetro do bocal, maior será o valor de $H_{cr,nvf}$; bocais afiados mostraram um $H_{cr,nvf}$ maior do que bocais com uma geometria de entrada arredondada, outros parâmetros permanecendo inalterados. Por outro lado, $H_{cr,nvf}$ é conhecido por ser independente do diâmetro da panela D , excentricidade do bocal (localizado centralmente no fundo da panela, ou não), a forma do fundo do vaso e a altura inicial do líquido H_i , no início da drenagem.

No mesmo trabalho Sankaranarayanan e Guthrie (2002), obtiveram uma relação de decaimento da velocidade angular residual com o tempo de espera após a movimentação da panela e o início do vazamento. Pode ser observado na Figura 3.5, para tempos em torno de 25 minutos tem-se uma velocidade angular residual baixa, o que leva a uma baixa probabilidade de formação de vórtices.

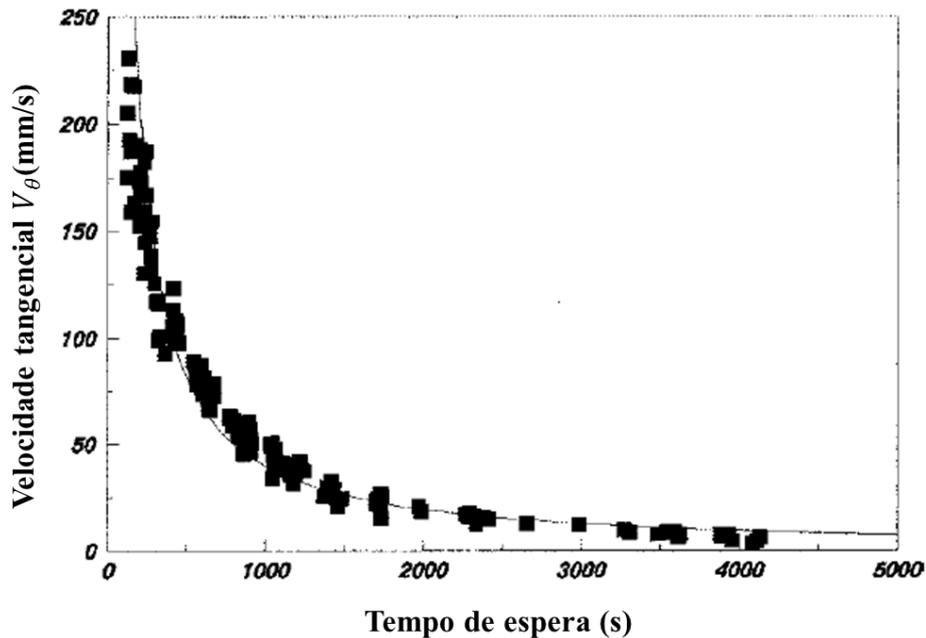


Figura 3. 5 - Decaimento da velocidade tangencial com o tempo ($D = 1160$ mm, $H_i = 995$ mm).

(SANKARANARAYANAN e GUTHRIE, 2002).

Mazzaferro *et al.* (2004) realizaram experimentos de esgotamento em panelas com modelamento físicos e matemáticos. O modelo físico foi empregado na verificação de ocorrência de escoamento do tipo vórtice e as simulações matemáticas no intuito de avaliar a formação do escoamento tipo dreno e a influência da geometria do bocal de vazamento. Estes autores concluíram que, em condições industriais, é provável que o escoamento do tipo vórtice não ocorra e que o mecanismo principal responsável pelo arraste de escória seja o escoamento tipo dreno.

Ainda em Mazzaferro *et al.* (2004), foi adotado para simulação matemática o método de elementos finitos, considerando o fluxo turbulento incompressível e nenhuma velocidade tangencial foi imposta como a condição inicial, uma vez que, apenas a formação do escoamento tipo dreno era objetivo de análise. Foram realizadas simulações em diferentes panelas industriais, com diferentes excentricidades de bocal de vazamento, diâmetros diferentes de bocal de saída e ângulos de 2° e 5° de inclinação do fundo. Os resultados numéricos mostram que para panelas com bocais excêntricos e secções transversais diferentes, a altura crítica depende apenas do diâmetro do bocal e não dependem da geometria do cone de descarga ou da inclinação do fundo.

Karamaj *et al.* (2019) publicaram resultados de experimentos em modelo de acrílico em uma escala 1:7 de apenas metade do reator BOF, na posição horizontal de drenagem. Foram realizados experimentos variando a altura inicial de líquido (LH), o diâmetro do bocal de saída (ND), a vazão de preenchimento do bocal (FR) e o tempo de espera para início de vazamento (DT). Além disso, foram avaliados os efeitos na perda de rendimento e a influência da escória sobrenadante na formação de escoamentos do tipo vórtice e dreno, utilizando óleos de coco, de mostarda e éter como fluidos similar a escória.

Os resultados em Karamaj *et al.* (2019), mostram que a curva de drenagem sofre grande influência dos valores de LH e ND, enquanto quase não é afetada por DT e FR durante o processo de drenagem do BOF. A Figura 3.6 apresenta um resumo dos resultados de Karamaj *et al.* (2019).

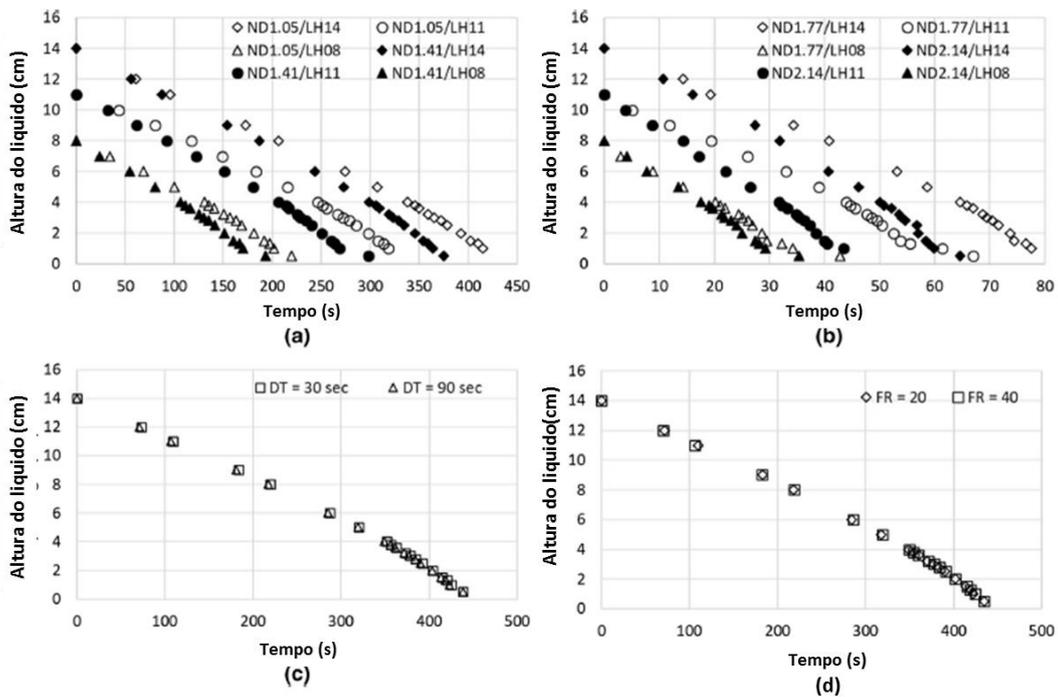


Figura 3. 6 - Influência de (a) e (b) ND e LHs inicial, (c) DT, e (d)FR, nas curvas de drenagem durante o processo de rosca.

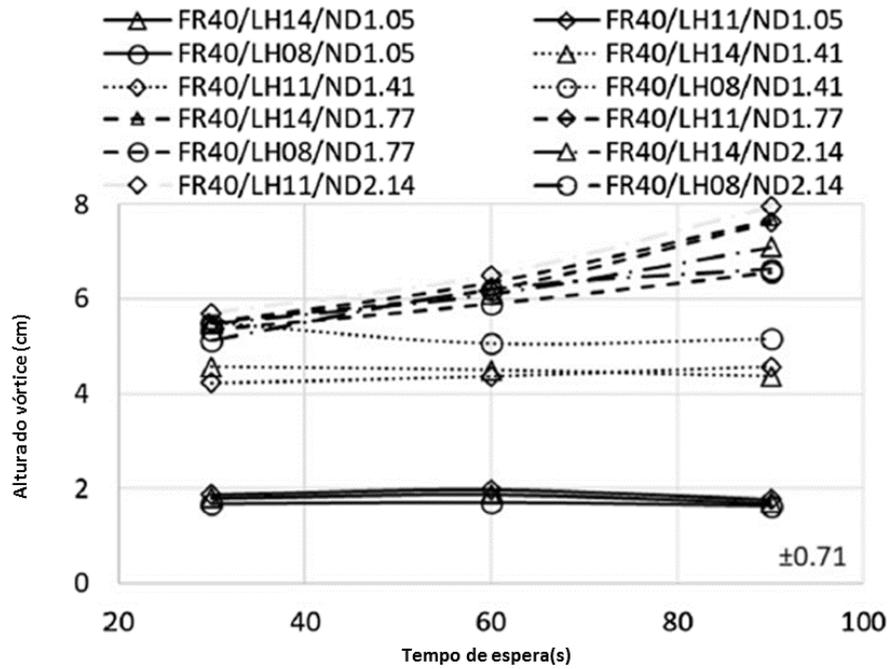
(KARAMAJ *et al.*, 2019).

Quanto aos efeitos dos parâmetros sobre a altura crítica de formação de vórtice, os autores, obtiveram os resultados mostrados nas Figuras 3.7 a 3.10. Na Figura 3.7(a) foi

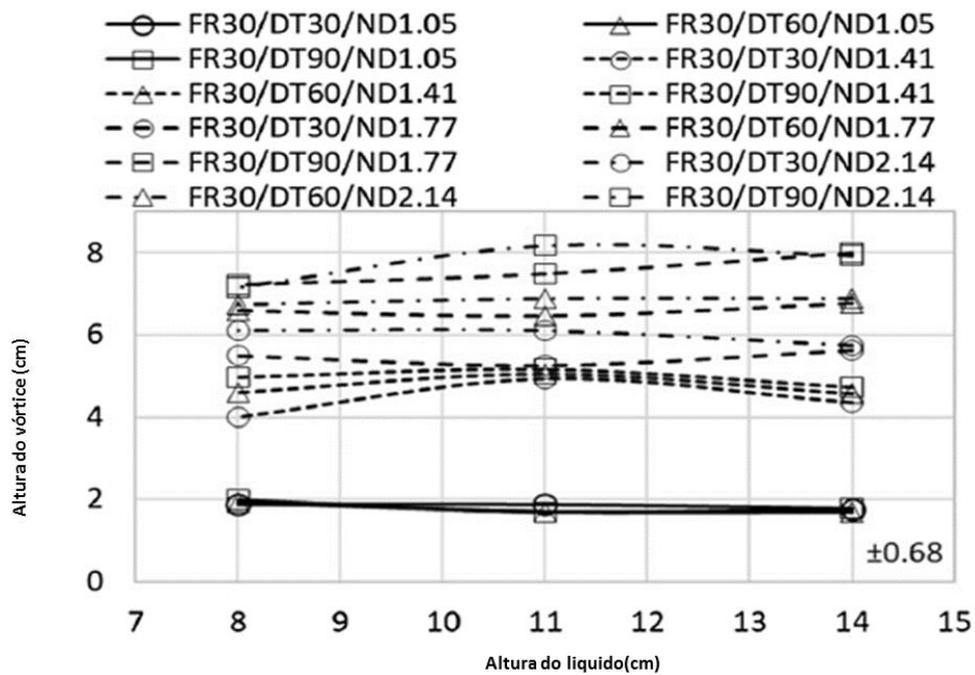
observado que não houve variação significativa da altura de formação do vórtice com o aumento de DT para os experimentos realizados com ND igual a 1,05cm e 1,41cm, mas foi observado um aumento considerável na altura crítica com um aumento de DT de 30segundos a 90segundos para os experimentos realizados com maiores valores de ND, 1,77cm e 2,14 cm. Na Figura 3.7 (b) nota-se que a altura do vórtice sofre pouca influência da LH inicial para todos os experimentos realizados. A partir da Figura 3.8 (a), observou-se que a influência de FR e DT na altura do vórtice é desprezível para os experimentos conduzidos com baixos valores de ND, enquanto o FR influencia pouco a altura do vórtice para os valores de ND de 1,77cm e 2,14 cm. Por fim, a altura do vórtice tem um aumento significativo quando ND aumenta de 1,05cm para 2,14 cm, como mostrado na Figura 3.8 (b).

Karamaj *et al.* (2019) avaliaram também os efeitos sobre altura crítica de formação de dreno (Figura 3.9 e 3.10). Nota-se que a altura de crítica de formação de dreno não é influenciada pela LH inicial (Figura 3.9 (a)) e nem pela vazão inicial de preenchimento do bocal FR (Figura 3.9 (b)). Porém existe uma diminuição na altura crítica quando FR vai de 30l/min para 40l/min para ND alto (Figura 3.10 (a)). Destaca-se o aumento significativo na altura do dreno com aumento de ND de 1,05cm a 2,14 cm (Figura 3.10 (b)).

A altura crítica do escoamento tipo dreno pode ser vista, segundo Karamaj *et al.* (2019), como fortemente influenciada pelo ND e pouco influenciada pelo FR com maiores valores de ND (2,14cm). Enquanto no escoamento do tipo vórtice é fortemente influenciada por ND, mas as influências de FR e DT se tornam significativas apenas para ND maiores.



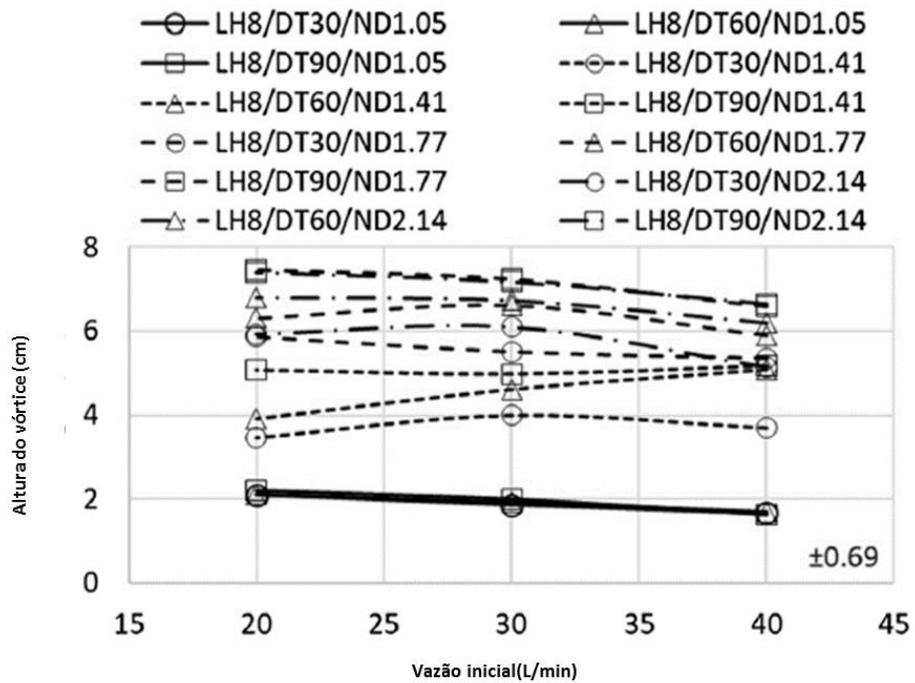
(a)



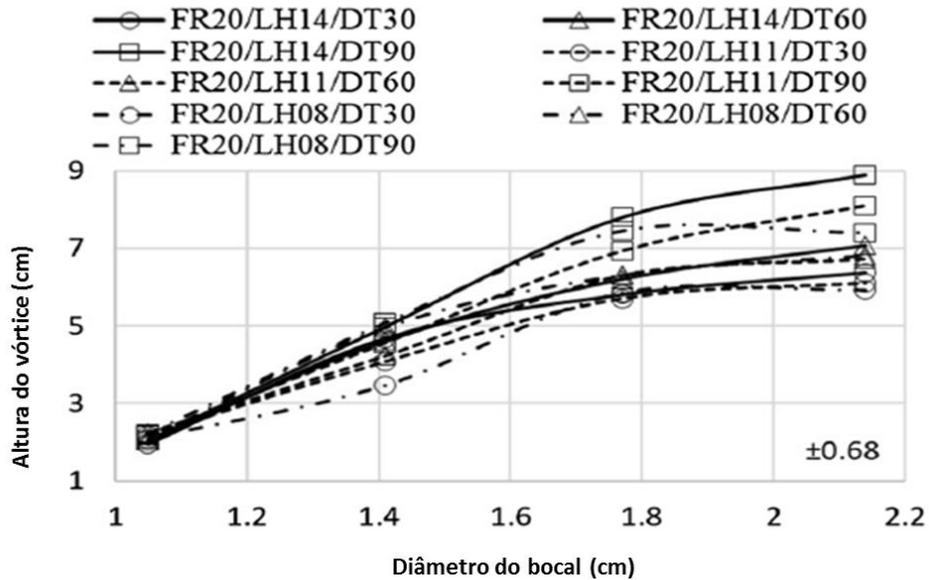
(b)

Figura 3. 7 - Influência de (a) DT, (b) LH inicial.

(KARAMAJ *et al.*, 2019).



(a)



(b)

Figura 3. 8 - Influência de (a) enchimento inicial FR e (b) ND em LH crítico para formação de vórtice (altura de vórtice).

(KARAMAJ *et al.*, 2019).

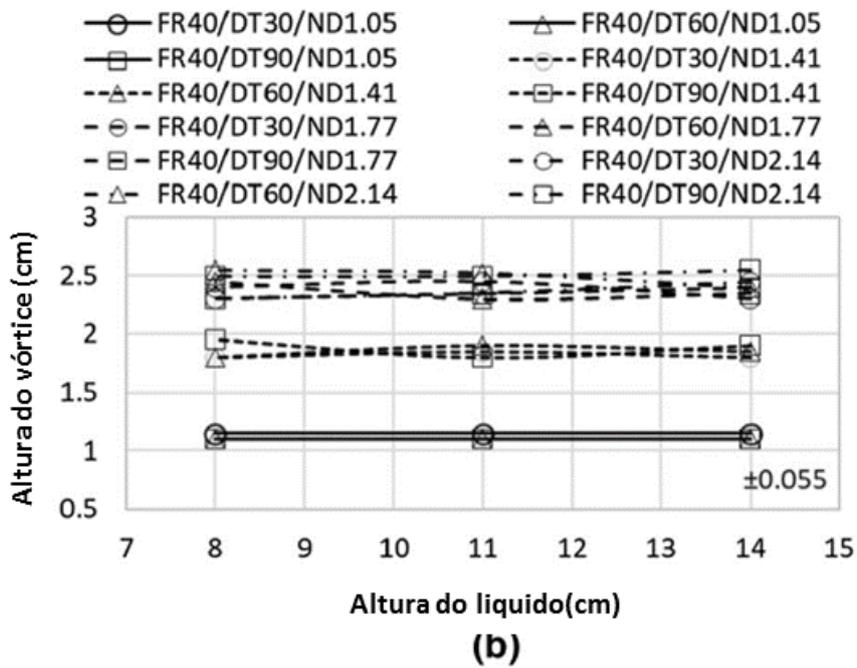
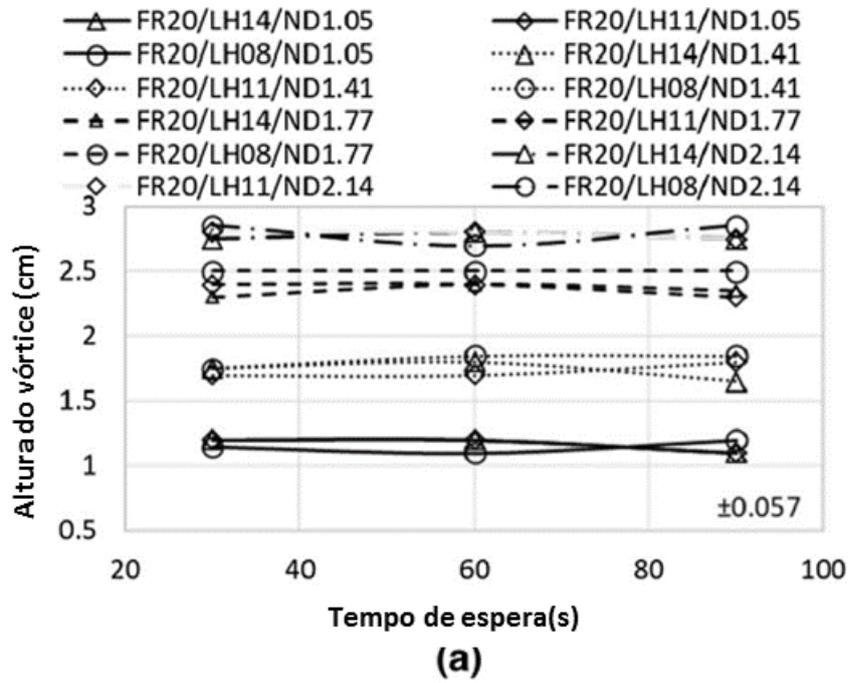
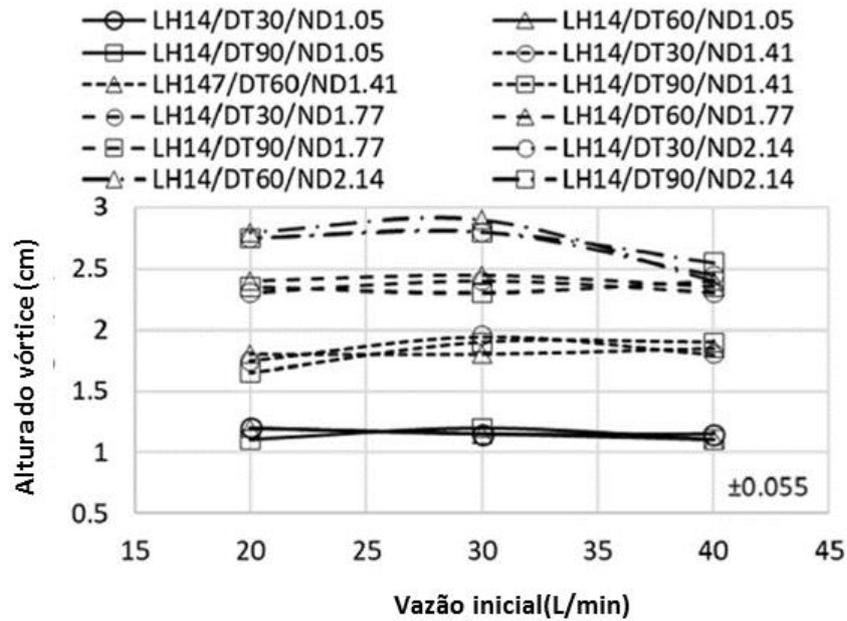
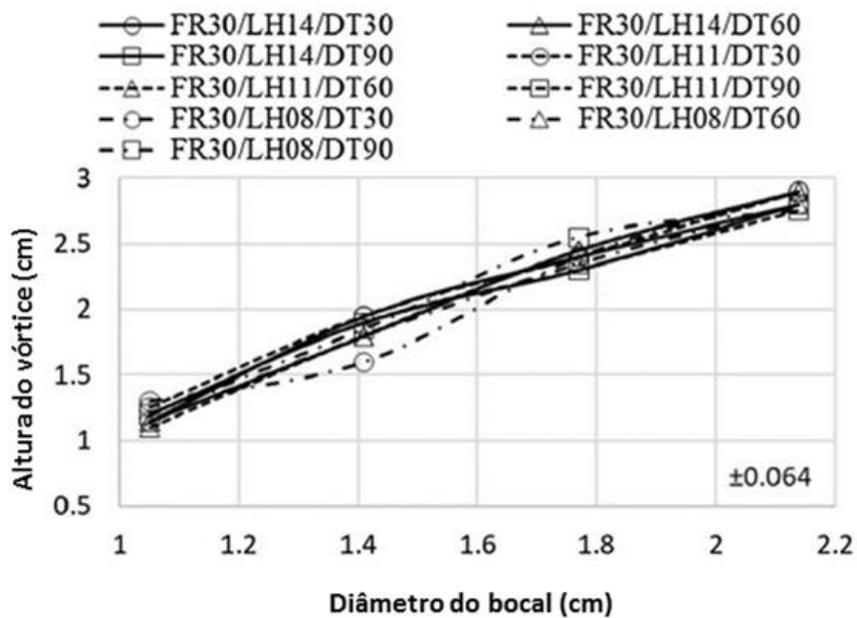


Figura 3. 9 - Influência de (a) DT, (b) LH inicial.

(KARAMAJ *et al.*, 2019).



(a)



(b)

Figura 3. 10 - (a) enchimento inicial FR e (b) ND em LH crítico para formação de dreno (altura do dreno).

(KARAMAJ *et al.*, 2019).

Ainda em Karamaj *et al.* (2019), foi observado que a perda de rendimento apresenta um aumento com o aumento de ND, uma diminuição com o aumento de LH inicial e pouca

influência dos valores de FR e DT. Karamaj *et al.* (2019) também verificaram que a presença da fase sobrenadante diminui a altura crítica para formação de vórtices (exceto menor ND - 1,05 cm). No entanto, a presença do fluido sobrenadante, aumenta a altura crítica para a formação do escoamento tipo dreno. A altura do vórtice, a altura do dreno e a perda de rendimento aumentam com o aumento na quantidade de fase sobrenadante. A perda de rendimento durante o processo de drenagem aumenta com o aumento do diâmetro do bocal com e sem a fase sobrenadante. Vale a pena salientar que o óleo de coco apresentou, comparado aos outros óleos, menor perda de rendimento, porém maior arraste de escória, exceto para ND de 1.41cm.

Por fim, ressalta-se que os experimentos de Karamaj *et al.* (2019) não consideraram os efeitos do basculamento do reator BOF, que produz um perfil de velocidades iniciais que pode influenciar nos fenômenos de drenagem.

Silva (2018) também conduziu experimentos com em modelo de acrílico, só que em uma escala 1:15, de apenas metade do reator BOF. O autor conduziu experimentos com variados fluidos sobrenadantes, um sensor ultrassônico para detectar o arraste de escória e uma câmera de alta velocidade para caracterizar os escoamentos. Todo o conjunto experimental foi basculado à velocidade de 2,5°/s na etapa inicial dos experimentos até a posição horizontal de vazamento, contendo uma volume de 12L de água. Em testes com fluido sobrenadantes foram usados vários óleos com uma camada de 25mm. Concluiu-se que o sensor foi capaz de detectar o arraste da segunda fase, dependendo da posição do sensor, e o arraste na maioria dos óleos foi do tipo dreno, com exceção para o querosene como sobrenadante que foi distinto.

Sato *et al.* (2009) conduziram experimentos de simulação a frio em panela construída em acrílico sem ou com a presença de óleo de silicone 50 cSt, para simular escória. Foi verificada uma significativa diferença da altura de formação do vórtice quando se simula o esvaziamento da panela com a presença do óleo de silicone, sendo que a altura de detecção do vórtice foi 372% mais alta do que a condição sem a fase sobrenadante.

Sato *et al.* (2009) ainda verificaram, após experimentos alterando a vazão de 19 L/min para 28 L/min, com demais parâmetros constantes, um aumento na altura crítica de formação de vórtice de 12 mm para 18 mm.

3.4 Dispositivos Antivórtice

Em 2006, Santos propôs a utilização de barreiras próximas ao furo de vazamento de uma panela, como dispositivos antivórtices, com objetivo de diminuir o volume do aço residual remanescente na panela. Os resultados obtidos por este autor indicam que, nas condições experimentais estudadas, os anteparos não foram efetivos na redução do volume residual na panela e, inclusive, a presença dos mesmos pode aumentar o residual de líquido.

Entretanto, Sato *et al.* (2007) verificaram que em panelas a presença de um dispositivo antivórtices com um desenho próximo a de um disco sobrenadante gerou uma redução na altura crítica de formação de vórtice de 1,41% (17mm) para 1,00% (12mm), uma diferença de quase 41%. Além disso, segundo Steffen (1987, apud SATO *et al.*, 2007), válvulas tampões tendem a minimizar a formação de vórtice.

Silva (2018) utilizou também um dardo em escala 1:15 para avaliar o efeito da redução na vazão sobre o arraste da fase sobrenadante e sua detecção. O autor observou que aconteceu um retardo no início do arraste de escória devido ao uso de tal técnica.

3.5 Mecanismos de Detecção da Passagem de Escória

A prevenção bem-sucedida do arraste de escória depende do momento de interrupção da drenagem do vaso. No fim, a decisão de interromper a drenagem é um compromisso, sendo quase impossível maximizar a qualidade sem sacrificar o rendimento e/ou a produtividade, ou vice-versa. Se a transferência de aço líquido for interrompida cedo demais, o rendimento será prejudicado. Um atraso muito grande em parar a drenagem resultará em arraste de escória. É geralmente aceito que a prevenção efetiva de arraste de escória depende da habilidade de dominar três subáreas mutuamente independentes: a supressão dos mecanismos de arraste de escória, a detecção precisa do fluxo de escória e a minimização do tempo de atraso entre a detecção de escória e o final real da drenagem (SINGH, 2004).

Os sistemas de detecção e interrupção do arraste de escória podem ser divididos, segundo Hyoungbae (1998), em 4 categorias: método “slag-cut”, método de controle de nível do metal líquido, método de sistemas de detecção de fim de drenagem e método de supressão de vórtice.

Hyoungbae (1998) cita, dentro do método de sistemas de detecção de fim de drenagem, a detecção visual da escória como a mais simples das metodologias de detecção. No entanto a fim de obter acesso visual o aço líquido deve ser drenado sem qualquer cobertura durante os últimos estágios de drenagem, o que resulta na reoxidação do aço líquido. Este autor diz ainda que, com base no fato que o fluxo composto de escória e aço possui menor energia de impacto do que uma corrente volumetricamente equivalente de aço líquido apenas, sensores de vibração dispostos na saída de drenagem de painéis podem ser usados para detectar o arraste de escória como mostra a Figura 3.11 abaixo. E mesmo pensando que o uso do sensor de vibração se baseia em observações empíricas, o fato de que o sensor permite vazamento completamente encoberto, excluindo a reoxidação, é uma vantagem definitiva.

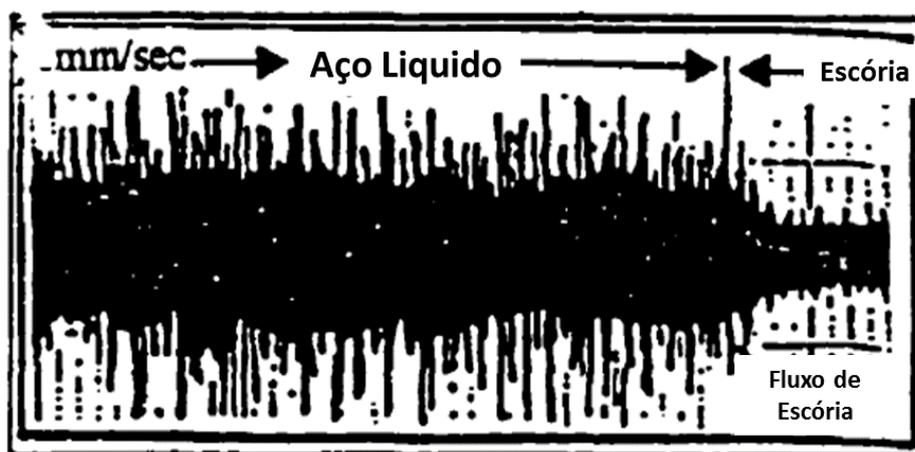


Figura 3. 11 - Mudança no sinal de vibração do distribuidor no início do arraste de escória da panela.

(HYOUNGBAE, 1998).

Hyoungbae (1998) cita também a detecção de arraste de escória por gravimetria, onde o sistema monitora continuamente o peso da panela durante a drenagem, o sinal que é continuamente alimentado a um computador que realiza o cálculo em tempo real das

primeiras e segundas derivadas temporais do peso da panela, que são a taxa de vazamento e taxa de variação da taxa de vazamento, respectivamente. O início do arraste da escória resulta em diminuição na taxa de vazamento, e assim provoca um aumento drástico na taxa de variação da curva da taxa de vazamento (Figura 3.12). Um alarme de escória geralmente é configurado quando o gradiente na taxa de variação da vazão excede um valor pré-selecionado.

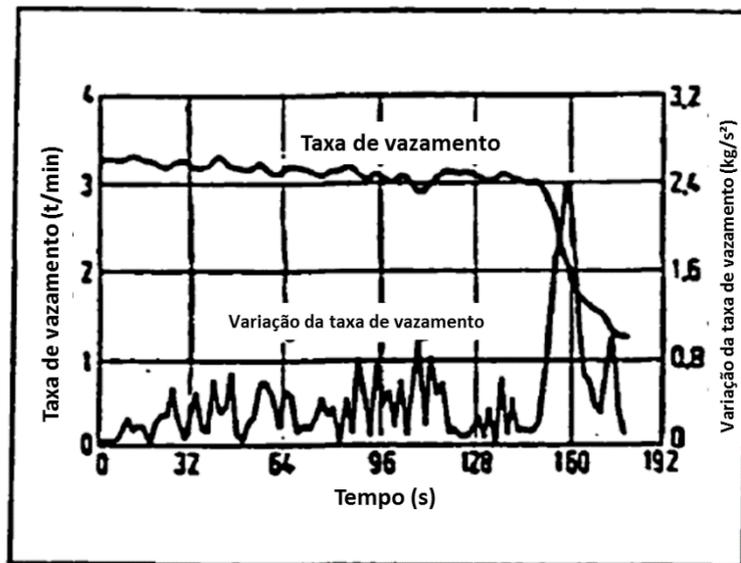


Figura 3. 12 - Mudança na taxa de vazamento e sua derivada durante a drenagem de uma panela, devido ao arraste de escória.

(HYOUNGBAE, 1998).

Industrialmente, Patra *et. al.* (2018) desenvolveram um sistema de detecção em BOF utilizando câmeras infravermelho, sem contato com o reator e o fluxo de aço, que fornecem imagens térmicas infravermelhas que são utilizadas para se interromper o fluxo na drenagem. A diferença de emissividade entre escória e aço resulta em uma escória que possui temperatura maiores que o aço que podem ser vistas pelo termovisor desenvolvido. Os autores obtiveram resultados capazes de identificar a passagem de escoria como mostra a Figura 3.13. Esse método trás muitas vantagens, principalmente o fato de ser uma técnica sem contato com direto com o processo, resultando em baixa manutenção.

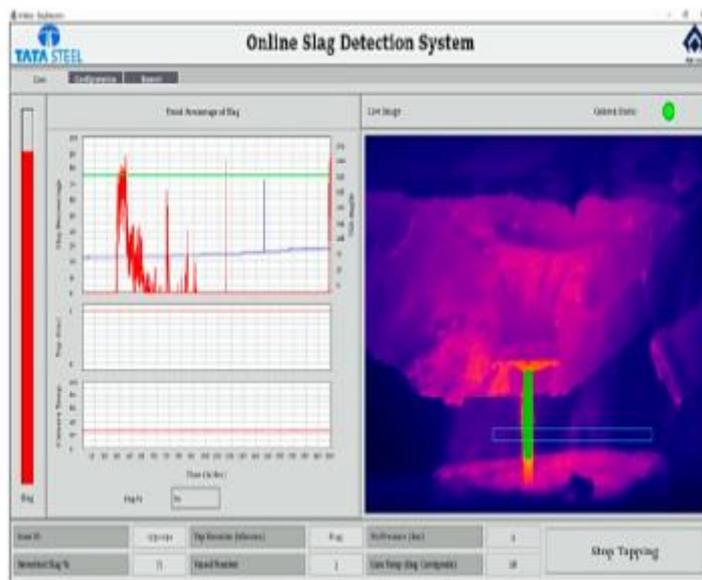


Figura 3. 13 - Imagem da drenagem enquanto ocorre o início de arraste de escória na saída.

(PATRA *et. al.*, 2018)

3.6 Simulação Computacional

Da Conceição (2018) avaliou a influência da configuração de diferentes sedes de vazamento de panela na altura crítica para a formação do dreno e para tal realizou simulação em modelos físicos de acrílico e correlacionou com modelo computacional em Ansys. O autor criou uma malha computacional para aplicar as equações de escoamento em toda geometria, a malha foi mais detalhada (Refinada) em regiões do reator onde o escoamento foi mais complexo. O modelo numérico previu com bastante exatidão a altura de formação do dreno, com boa correlação aos resultados obtidos no modelo físico e pôde provar que existe uma diferença de altura entre as duas sedes avaliadas justificando a diferença de comportamento dos modelos físicos sede padrão e sede modificada. A Figura 3.14 mostra um exemplo de malha computacional e seu refino na zona da sede, região que é alvo de estudo e onde o escoamento é mais complexo.

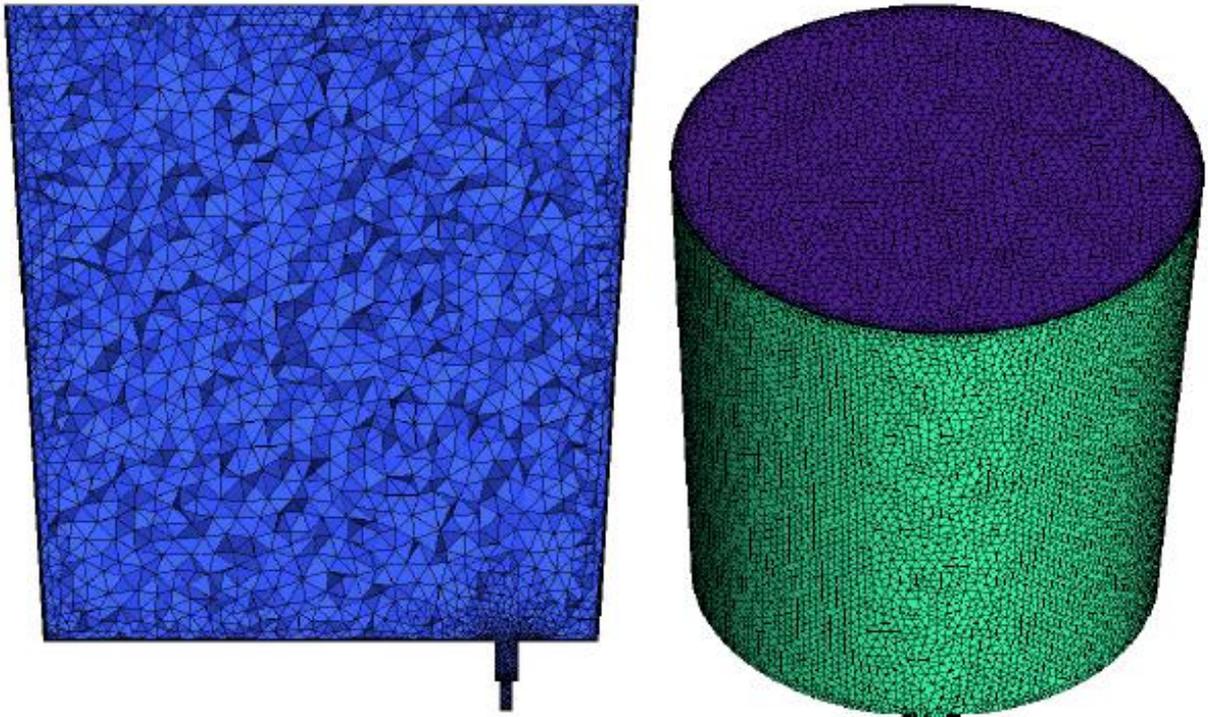


Figura 3. 14 – Exemplo de malha computacional para simulação de drenagem de
 panela.
 (DA CONCEIÇÃO, 2018).

Kuwana *et al.* (2008) realizaram experimentos em panelas com modelos físicos em escala e simulação via pacote comercial CFD (Fluent Inc.). Nos modelos físicos, os autores aplicaram a técnica PIV (*Particle Image Velocimetry*) para medir o campo de velocidade tangencial do líquido e o fluxo bidimensional na seção transversal vertical ao longo do eixo. A simulação computacional foi conduzida para testar a aplicabilidade do modelo para descrever o processo de drenagem.

Os autores se basearam na formulação do modelo de fração de volume de fluido (VOF), onde se tem duas ou mais fases que não são interpenetrantes, no caso deles água e ar. A seguinte Equação 3.1 de continuidade para a fração de volume, α , da água é resolvida:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + u \times \nabla \alpha = 0 \tag{3. 1}$$

onde t é o tempo e u é o vetor velocidade.

Além da equação de continuidade, é também resolvida uma única equação de momento com a densidade média da fração de volume e a viscosidade. A tensão superficial é tratada como um termo fonte na equação de momentum usando o modelo de força de superfície contínua (CSF). O fluxo foi assumido como assimétrico, laminar e incompressível. Como condição inicial, adotou-se uma distribuição linear simples da velocidade tangencial, Equação 3.2:

$$u_{\theta} = \Omega r, \quad u_r = u_z = 0 \quad (3.2)$$

onde Ω é a velocidade angular.

O modelo proposto por Kuwana *et al.* (2008) foi capaz de identificar a formação de vórtice, e quando comparado com o modelo físico descreveu bem o fenômeno levando em conta a altura crítica de formação do vórtice.

Apesar da simulação computacional ser uma ferramenta muito útil para modelamento de reatores metalúrgicos e vir mostrando bons resultados de representação, como os obtidos por Kuwana *et al.* (2008) e DA CONCEIÇÃO (2018), são escassos os estudos tanto de simulações físicas quanto de computacionais tendo como objeto de pesquisa a drenagem de reatores BOF.

4 MATERIAS E MÉTODOS

4.1 Modelo Físico

Para realizar os experimentos foi usado um modelo físico em acrílico, obedecendo a um fator de escala 1:15, de um sistema BOF. As dimensões principais do modelo são apresentadas na Figura 4.1. Para facilitar o trabalho de observação dos fenômenos e devido à simetria do reator, o modelo foi confeccionado em um corte transversal, semelhante a Karamaj et al (2019) e Silva (2018).

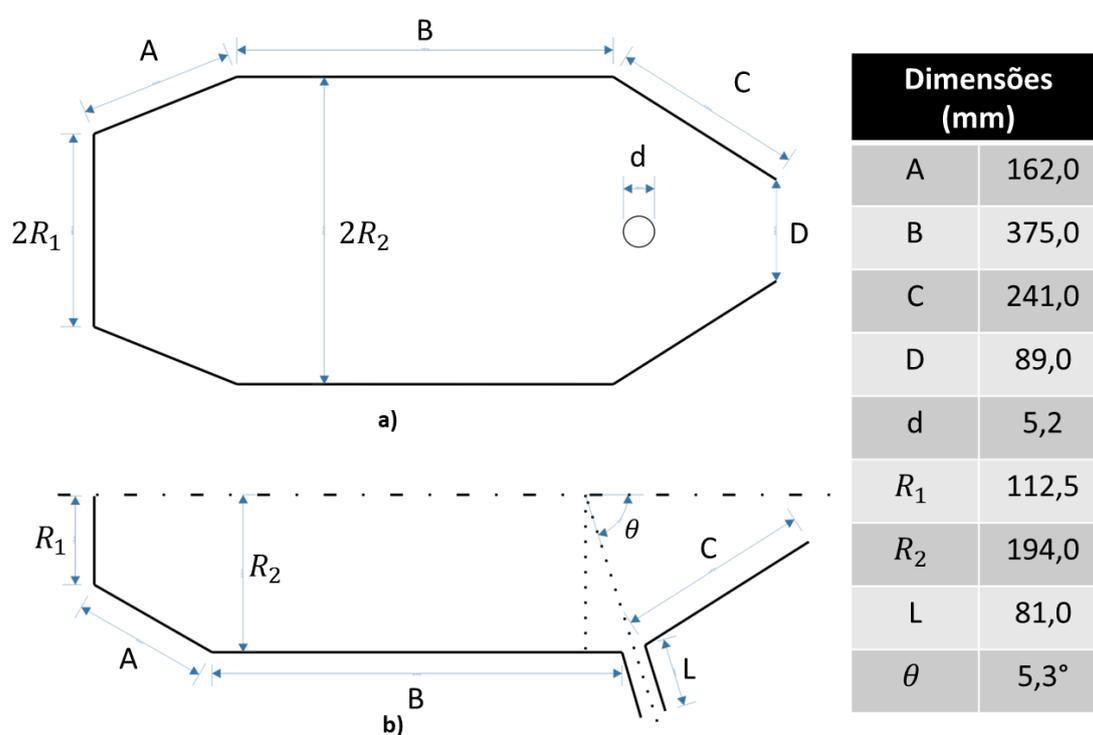


Figura 4. 1 - Dimensões do modelo; a) vista superior; b) vista lateral.

O sistema de controle do basculamento que foi utilizado é composto por um motor, uma caixa de transmissão e um inversor de frequência. O inversor foi programado para se obter uma velocidade de 2,5°/s. Na Figura 4.2 é mostrado um esquema do sistema de basculamento do modelo de acrílico e o conjunto de aquisição de dados utilizado nos experimentos.

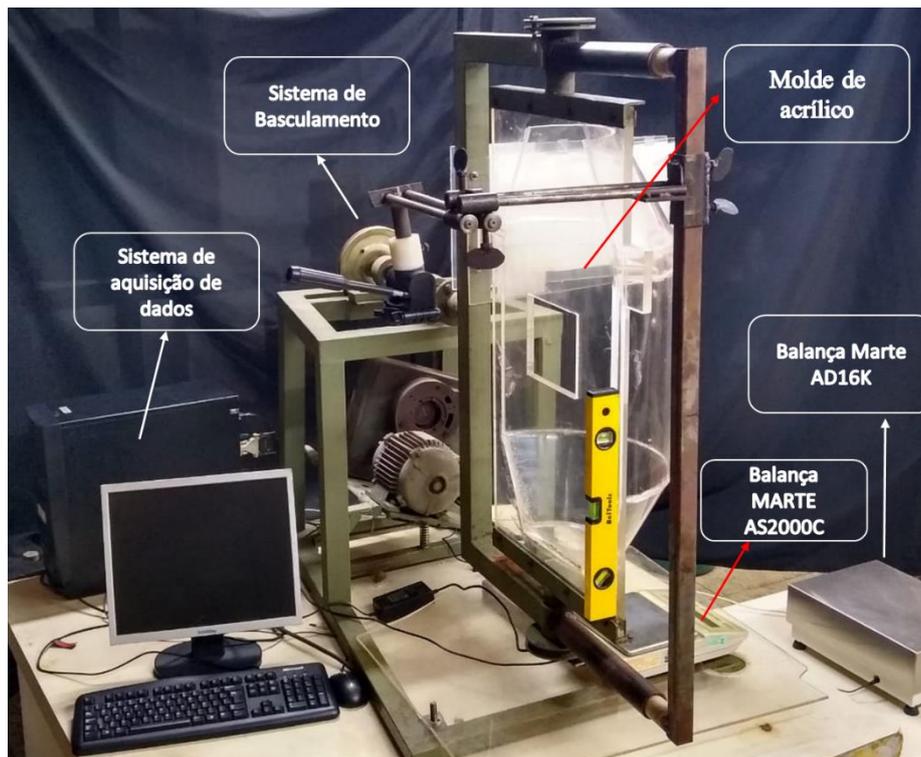


Figura 4. 2 - Sistema de basculamento e aquisição dados.

4.2 Perfil de Velocidade via PIV

A técnica PIV foi utilizada para análise quantitativa do fluxo. Nesta técnica, partículas de poliamida com 5 μm de diâmetro em suspensão na água são iluminadas por pulsos de laser de feixe duplo, enquanto um par de quadros (imagens) é adquirido através de uma câmera CCD Flow-Sense 2ME. Essas imagens usadas para calcular as variáveis de campo de fluxo através do software Dynamics Studio (DANTEC®). Após aquisição de uma sequência de imagens, entre os pulsos sucessivos do laser, estas são processadas no software, onde através de interpolação é calculada a velocidade pelo movimento das partículas. Foram feitas tentativas com configuração com laser na horizontal e na vertical, assim como em Kuwana *et al.* (2013) (Figura 4.3).

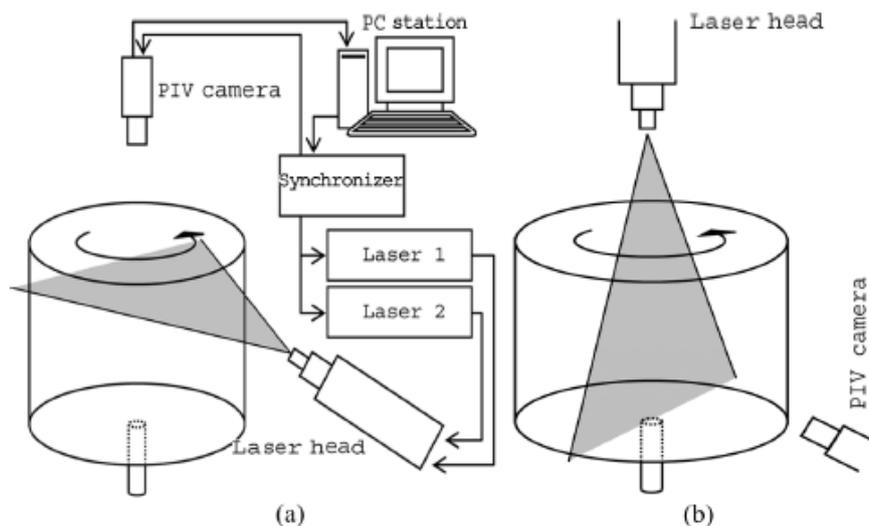


Figura 4. 3 - Diagrama esquemático do sistema PIV: (a) Configuração laser horizontal;
 (b) Configuração laser vertical.
 (KUWANA *et al.* 2013)

4.3 Curva de Drenagem por Gravimetria

As curvas de drenagem do modelo físico foram obtidas por gravimetria. Foi utilizada uma balança de precisão MARTE AD16K (Figura 4.4), capacidade até 16 kg e precisão 0.1g, para aquisição de dados de vazão mássica. Com estes dados foram construídas as curvas de drenagem do modelo físico.



Figura 4. 4 - Balança de precisão Marte AD16K do laboratório de Pirometalurgia do DEMET/UFOP.

O sistema de aquisição da balança foi conectado a um computador e a aquisição dos dados feita com um programa executável no *prompt* de comando do sistema operacional do computador. Os dados obtidos foram posteriormente tratados e resultados usados para se concluir os objetivos.

Além disto, para detecção de início de passagem de segunda fase, foram feitas curvas de drenagem com uma configuração de duas balanças para simulações físicas com apenas água, como mostra a Figura 4.5. A motivação para tal configuração foi obter um número maior de dados próximo a região de formação de escoamentos vórtice e ou dreno para que através das curvas de drenagem fosse possível identificar o início destes escoamentos. A segunda balança utilizada foi uma MARTE AS2000C, de capacidade até 2 kg (Precisão de 0.01g) e com configuração de aquisição de dados no modo ‘Rápido’.



Figura 4. 5 – Configuração de duas balanças.

4.4 Detecção do Início de Formação de Vórtice ou Dreno em Modelo Físico

A detecção do início formação de vórtice ou dreno foi feita de forma visual, foram realizadas filmagens com uma câmera Sony HDR-C405. A câmera foi posicionada num suporte ajustável. O início de vórtice e ou dreno foi identificado através da análise das filmagens pelo *Software VirtualDub 4.0* e caracterizado pelo surgimento completo da cauda do escoamento no bocal da saída.

A detecção também foi feita via derivação das curvas gravimétricas de drenagem do reator com fase sobrenadante e sem fase sobrenadante, para detecção de início de arraste de escória ou ar. Os pontos onde se tem inflexão na inclinação da curva são resultados de uma queda na vazão pela passagem de segunda fase, sendo assim identificadas na execução da primeira derivada da curva de drenagem.

4.5 Fluidos de Trabalho

Assim como em SILVA (2018), água a temperatura ambiente foi utilizada para simular o aço, enquanto a escória foi simulada por 3 tipos de óleos, variando em densidade, viscosidade e propriedades interfaciais, conforme mostra a Tabela 4.1.

Tabela 4. 1 - Propriedades dos fluidos utilizados para simular a escória.

(SILVA, 2018)

| Fluido | Viscosidade | | Densidade (kg/m ³) | Tensão Interfacial (mN/m) | |
|-----------|-------------|-------|-----------------------------------|---------------------------|---------------|
| | cSt | mPa*s | | Fluido - Ar | Fluido - água |
| A | 500 | 475 | 950 | 39.4 | 35.7 |
| B | 200 | 190 | 950 | 38.9 | 33.7 |
| Querosene | 2.29 | 2.18 | 820 | 21.9 | 18.3 |

4.6 Procedimento Experimental

Os experimentos no modelo físico do reator BOF foram conduzidos da seguinte forma:

- Posicionamento do modelo na vertical, posição considerada como 0°;
- Enchimento do modelo com 6L de água, tempo mínimo de espera de 10min para eliminar campos de velocidade residuais;
- No caso de experimentos com fluido sobrenadante simulando escória, adição de uma camada de 25mm de óleo, tempo de espera de 5min;
- Posicionamento da câmera;
- Acionamento do inversor de frequência para basculamento e, ao mesmo tempo, a aquisição de dados da balança, interrompendo o inversor quando o nível acoplado ao modelo indicasse que o mesmo está cruzando a posição horizontal,

colocando o modelo em uma posição de parada de 96° a 98° , considerando posição inicial vertical;

- A aquisição de dados da balança era acionada assim que o teste tivesse início. Se a configuração com duas balanças estivesse sendo utilizada, quando a balança de capacidade maior atingia cerca de 10,5 kg, retirava-se o canal que desviava o fluxo e o teste terminava na balança de menor capacidade e maior precisão.

Além dos testes com basculamento, foram feitos testes sem basculamento, o reator foi posicionado na horizontal, com o volume total de água (12L), sem camada de óleo e o restante dos procedimentos foram mantidos iguais aos comentados acima.

Por fim foram feitos testes com pulverização de talco na superfície, para 12L, com intuito de verificação de presença se movimento rotacional, posicionando a câmera voltada para a região da simetria e centrada na região do bocal de saída.

Algumas limitações quanto à reprodução das condições industriais reais de basculamento de um reator BOF foram levadas em consideração. Reproduzir os fluxos residuais do fim de sopro é de extrema dificuldade de ser realizado em laboratório, portanto não foram considerados neste trabalho. Além disso, tem-se que a diferença de densidades entre escória e aço líquidos é muito superior àquela entre os fluidos utilizados no modelamento físico. Sendo assim, realizar o basculamento a partir dos fluidos em repouso é uma condição que apresenta maior reprodutibilidade estatística, mas que ainda não representa completamente o fenômeno de basculamento do reator BOF.

4.7 Simulação Computacional

As simulações matemáticas foram realizadas utilizando software CFX 19.1 (Ansys®), versão acadêmica. A geometria do reator foi construída no software *Design Modeler* e suas dimensões são iguais às dimensões do modelo físico. Foi construída uma geometria do reator completo e depois foi suprimida metade do reator, como mostra a Figura 4.6 abaixo, para que a geometria final fosse idêntica ao modelo físico. A geometria foi dividida em quatro corpos com o auxílio da ferramenta *Slice* para facilitar a construção da malha.

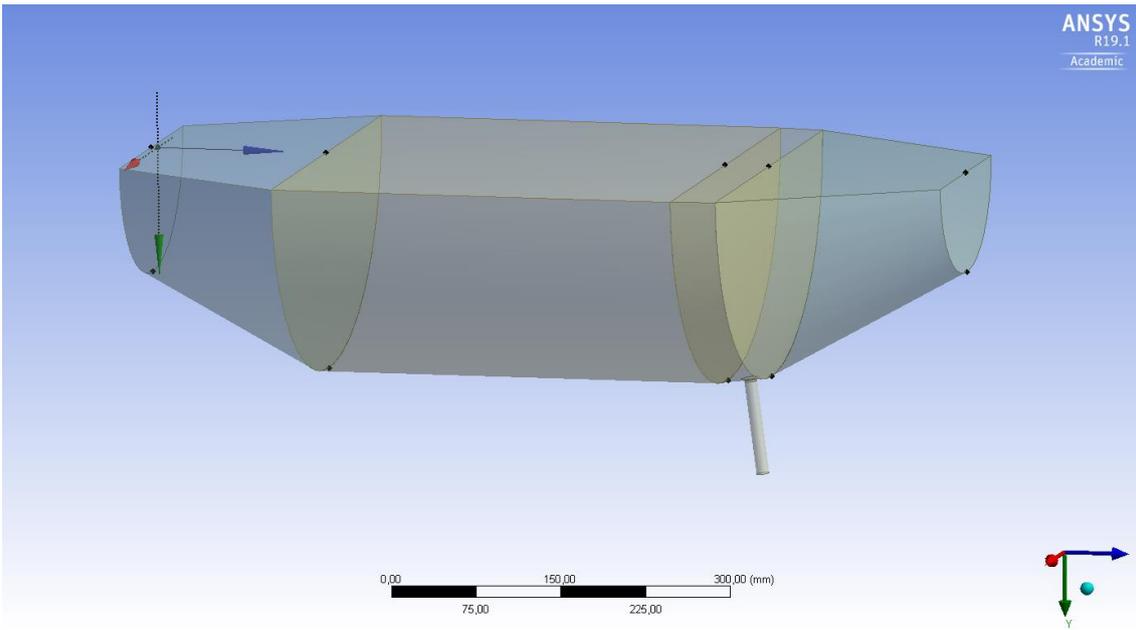


Figura 4. 6 – Geometria do reator.

Ainda na construção da geometria foram construídos um cilindro para delimitar uma região de refino próxima ao bocal de saída e um paralelepípedo para uma região de refino onde haveria fluido no reator (Figura 4.7). Ambas as formas foram criadas com a opção *Add frozen* selecionada no item *Operation*.

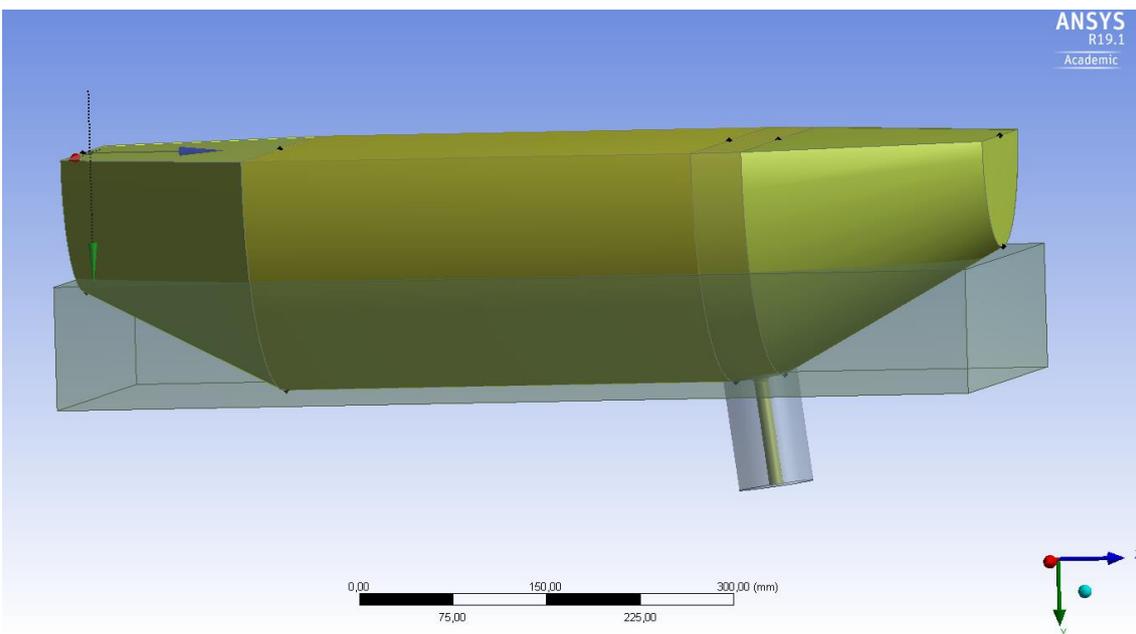


Figura 4. 7 – Regiões de delimitações de refino.

A construção da malha foi realizada pelo software *Meshing Modeler*, com predominância de elementos tetraédricos, e uma região de maior refino foi criada nas proximidades do bocal de saída e onde haveria presença de fluido, estas regiões foram delimitadas por um cilindro e por um paralelepípedo previamente criados na geometria, utilizando a ferramenta *Element sizing*, opção *Body of influence*.

A convergência da simulação foi verificada segundo condições de erro residual e desequilíbrio no domínio. Foi considerado como critério de convergência valores de erro residual do RMS abaixo de 10^{-5} e domínio possuindo desequilíbrios inferiores a 1% (*imbalance*).

Foi feito um estudo de independência de malha para garantir que a solução também fosse independente do tamanho da malha. Após a verificação da convergência, via Resíduos RMS e desequilíbrios no domínio, e comparação com os resultados do modelo físico; a malha foi refinada em uma relação de número de elementos de 1.5 vezes a malha anterior e verificado se mantinha condições de convergências já citadas e se representava o fenômeno físico (Dentro de uma tolerância de 10% de erro), caso positivo então a solução era independente da malha, caso negativo então um novo refino seria feito e processo se repetiria a te alcançar a independência da malha.

Por fim obteve-se com a ferramenta *sizing* dois refinamentos *BodySizing* com *Type:Element Size* que geraram um refino de malha de 20mm no corpo do reator e na região próxima ao bocal de saída uma malha de 5mm. A mesma ferramenta foi utilizada para se obter um *FaceSizing*, de 1mm de refino, nas faces do bocal de saída. A ferramenta *BodySizing* foi utilizada com *Type:Body of Influence* delimitados pelos corpos *frozen* criados previamente na geometria e por fim foi aplicada a ferramenta *inflation* (5 camadas e *growth rate* 1,2) em todas as paredes do reator e a ferramenta *Method* configurada como *MultiZone* no cilindro central. Todo este refino resultou em três configurações de malha indicadas na Tabela 4.2.

Tabela 4. 2 - Configurações de malhas obtidas para cada tipo de simulação.

| Nome | Testes | Número de nós | Refino região do paralelepípedo | Refino região do bocal |
|------|---|---------------|---------------------------------|------------------------|
| M1 | 12L (água/ar) e 6L (água/ 25mm de óleo 200cSt) | 290k | 5mm | 2mm |
| M2 | 6L (água/ar), (água/querosene) e (água/ 25mm e 50mm de óleo 500cSt) | 192k | 6mm | 2mm |
| M3 | 6L (água/50mm óleo de silicone 200cSt) | 350k | 4mm | 2mm |

A malha na configuração M1 pode ser observada na Figura 4.8 e mostra a malha obtida após teste de independência de malhas.

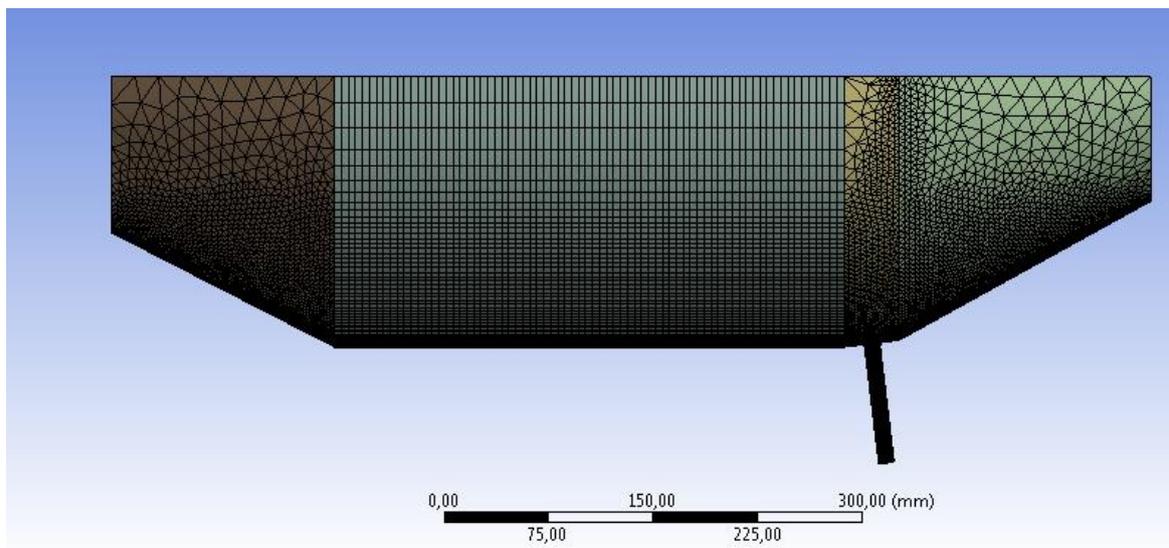


Figura 4. 8 – Malha obtida com configuração M1.

O modelo matemático considera o escoamento tridimensional e turbulento; os fluidos newtonianos, incompressíveis, sistema isotérmico (a 25°C), pressão ambiente igual a 1atm. As propriedades físicas da água e do ar foram os valores padrões a 25°C e o modelo de turbulência adotado é o modelo k-ε. As equações a serem resolvidas, segundo Gabriel *et al.* (2019), são:

Continuidade:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla * (\rho U) = 0 \quad (4.1)$$

Navier Stokes:

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla * (\rho U \otimes U) - \nabla (\mu_{eff} \nabla U) = -\nabla p + \nabla * (\mu_{eff} \nabla U)^T + B \quad (4.2)$$

Viscosidade efetiva:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (4.3)$$

Energia Cinética Turbulenta:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \nabla * (\rho U k) = \nabla * \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (4.4)$$

Dissipação de Energia Cinética Turbulenta:

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla * (\rho U \varepsilon) = \nabla * \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 1} \rho \varepsilon) \quad (4.5)$$

Viscosidade Turbulenta:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.6)$$

Onde ρ é a densidade média (kg / m³); \mathbf{B} é a força do corpo (N / m³); t é o tempo (s); ∇ é o operador Nabla; \mathbf{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); \mathbf{k} é a energia cinética turbulenta (m² / s²); \mathbf{P}_k é a taxa de produção de energia cinética devido aos efeitos de viscosidade e flutuabilidade; ϵ é a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta (m² / s³); $C_{\epsilon 1}, C_{\epsilon 2}, C_{\mu}, \sigma_k$ são constantes.

A interação entre as fases foi avaliada pelo modelo *Free Surface* do CFX, semelhante ao trabalho desenvolvido por Gabriel *et al.* (2019) para descrever o comportamento metal escória no molde de Beam Blank. As equações pertinentes são:

$$\mathbf{U}_i = \mathbf{U}, \quad 1 \leq i \leq 3 \quad (4.7)$$

$$\rho = \sum_{i=1}^3 \rho_i \alpha_i \quad (4.8)$$

$$\mu = \sum_{i=1}^3 \mu_i \alpha_i \quad (4.9)$$

$$\sum \alpha_i = 1 \quad (4.10)$$

Onde α_i é a fração volumétrica da fase i , ρ_i é a densidade da fase i ; μ_i é a viscosidade da fase i e \mathbf{U}_i é a velocidade da fase i . Além disso, foram criados os materiais para simulação de fase sobrenadante com as propriedades dos óleos mostrados na Tabela 4.1.

As simulações foram realizadas no regime transiente, com as condições iniciais de altura de líquido e espessura de camada de óleo de acordo com os valores utilizados no modelo

físico, e velocidade inicial nula em todos os pontos. Foram aplicadas as seguintes condições de contorno:

- Em todas as paredes do reator foi considerada a condição de não deslizamento com presença de água e ar como fluidos presentes no corpo do reator e óleo em simulações contendo fase sobrenadante.
- As superfícies de saída foi o bocal, configurada como saída de água (*outlet* com pressão relativa igual a 0), e a parte superior do reator, aberta (*opening* com pressão relativa igual a 0) e configurada para entrada/saída de ar.

Nas simulações computacionais foram criadas algumas expressões para auxiliar o software na identificação de fases presentes, condição inicial dos fluidos, pressão hidrostática, monitoramento de vazão, velocidade angular de basculamento do reator (teta) e cálculo de massa drenada. Algumas equações diferem na simulação sem basculamento e nas simulações com basculamento.

As equações utilizadas nas simulações sem basculamento podem ser vistas abaixo na Tabela 4.3.

Tabela 4. 3 - Equações utilizadas na simulação computacional sem basculamento e suas aplicações.

| Aplicação | Fórmula | Eq. |
|---|---|---------|
| Fração volumétrica inicial de água | VOFagua: $\text{if}(z \leq 145[\text{mm}], 1,0)$ | (4.11) |
| Fração volumétrica inicial de ar | VOFar: $1-\text{VOFagua}$ | (4. 12) |
| Ângulo de rotação durante o basculamento | teta: $\text{if}(t \leq 36[\text{s}], 0.0436[\text{radian s}^{-1}] * t, 1.57[\text{radian}]);$ | (4. 13) |
| Aceleração da gravidade (y) | gy: g | (4. 14) |
| Pressão exercida pela coluna de ar + água | preassure: $(\text{VOFagua} * 997[\text{kg} * \text{m}^{-3}] + \text{VOFar} * 1.185[\text{kg} * \text{m}^{-3}]) * g * \text{abs}(0.145[\text{m}] - z);$ | (4. 15) |

As equações utilizadas nas simulações com basculamento são vistas na Tabela 4.4:

Tabela 4. 4 - Equações utilizadas na simulação computacional com basculamento e suas aplicações.

| Aplicação | Fórmula | Eq. |
|---|---|---------|
| Fração volumétrica inicial de água | VOFagua: $\text{if}(z \leq 145[\text{mm}], 1,0)$ | (4. 16) |
| Fração volumétrica inicial de óleo | VOFoleo: $\text{if}(z \leq 170[\text{mm}], 1,0) - \text{VOFagua};$ | (4. 17) |
| Fração volumétrica inicial de ar | VOFar: $1 - \text{VOFagua}$ | (4. 18) |
| Ângulo de rotação durante o basculamento | teta: $\text{if}(t \leq 36[\text{s}], 0.0436[\text{radian s}^{-1}] * t, 1.57[\text{radian}]);$ | (4. 19) |
| Aceleração da gravidade (y) | gy: $g * \sin(\text{teta});$ | (4. 20) |
| Aceleração da Gravidade (z) | gz: $-g * \cos(\text{teta});$ | (4. 21) |
| Pressão exercida pela coluna de ar + água | preassure: $(\text{VOFagua} * 997[\text{kg} * \text{m}^{-3}] + \text{VOFar} * 1.185[\text{kg} * \text{m}^{-3}]) * g * \text{abs}(0.145[\text{m}] - z);$ | (4. 22) |

Essas expressões foram adicionadas na construção do setup da simulação. Após validação da simulação computacional bifásica água/ar, para as simulações com rotação, foi adicionado a terceira fase, o óleo, com uma camada de 25mm assim como o feito na simulação física. As propriedades dos óleos (Tabela 4.1) foram introduzidas nos materiais criados no setup.

Além disto, foram criados pontos de monitoramento, em todas as configurações, para se obter os dados de interesse para a construção da curva de drenagem e vazão mássica no modelo computacional. As equações que representam estes pontos de monitoramento são mostradas abaixo.

vazao: `agua.massFlow()@saida;`

(4. 23)

volumeagua: 6[kg]-volumeInt(agua.vf)@BOF*997[kg*m⁻³];

(4. 24)

Volumeoleo: volumeInt(oleo.vf)@BOF*820[kg m⁻³];

(4. 25)

Por fim os resultados das simulações físicas com e sem a presença de fluidos sobrenadantes foram comparadas com os resultados do modelo computacional para fim da validação final do modelo obtido.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 PIV

Não foi possível fazer a caracterização do fluxo pelo perfil de velocidades obtidos pela técnica PIV, pois, devido a geometria curva do modelo de acrílico houve desvio do plano do laser tanto na configuração horizontal quanto na vertical, resultando em iluminação irregular e de pouca intensidade sobre as partículas, tornando inviável a aplicação desta técnica no modelo físico partido do reator BOF.

5.2 Simulação com Modelo Estático

5.2.1 Independência de Malha e *TimeStep*

Inicialmente avaliou-se a independência da simulação computacional quanto a malha e *timeStep* adotados, para simulação com 12L estático. Partiu-se de uma malha com 178mil nós e um *timeStep* de 10ms. A Figura 5.1 mostra os resultados da curva de drenagem utilizando a malha já citada, das outras configurações adotadas para validação de independência e resultados de 3 simulações físicas na horizontal estático, sem presença de óleo e obtidas na balança de precisão MARTE AD16K, na forma de uma média de cinco testes.

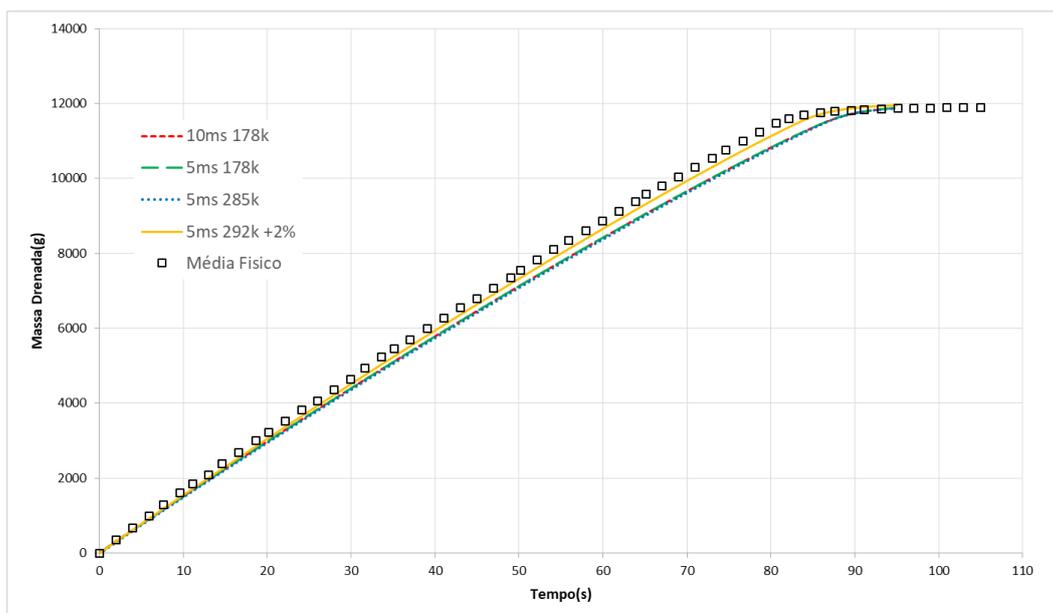


Figura 5. 1 - Gráfico da comparação entre configurações de malhas e *timeSteps* e com simulação física.

Primeiro observa-se uma boa concordância entre simulação física e os dados computacionais, dentro dos 10% de erro considerado, passando pelo primeiro critério de convergência adotado.

Podem ser observados dois resultados para cada simulação computacional, isto se deve pois para cada simulação a curva de drenagem foi obtida por dois métodos. O primeiro método se trata do cálculo direto da massa drenada pela Equação 4.16 e o segundo através da vazão (*massflow*) através do bocal ao longo do tempo. Os resultados mostram que, mesmo passando de uma malha de 178mil nós para uma de 285mil nós e mantendo o mesmo *timeStep*, não houve mudança como se observa no gráfico anterior. Mantendo-se a malha em 178mil e passando o *timeStep* de 10ms para 5ms também não foi observada mudança na solução final, isto indica que além de independente da malha, a simulação computacional, está também independente do *timeStep*. Foi feito por último um teste com aumento de 2% da área de vazão do bocal, aumento assim o diâmetro do bocal. Com esta modificação obteve-se uma malha mais representativa comparando ao fenômeno físico, a malha resultante foi de 292mil nós, mostrada na figura 5.1.

Decidiu-se utilizar a malha de 292mil nós para simulação tendo em vista as simulações com óleo e sua complexidade e a partir desta então foram feitas as simulações com basculamento sem presença de fluido sobrenadante e basculamento com fluido sobrenadante.

5.2.2 Início de formação de Dreno

Para verificar se havia a presença de vórtice durante a drenagem foram feitas filmagens superiores com talco na parte da simetria do reator e observou-se que não houve, no início de arraste de ar, a presença de movimento rotacional suficiente para caracterizar um escoamento do tipo vórtice.

A Figura 5.2 mostrada abaixo mostra os resultados obtidos das filmagens do bocal para detecção de início de dreno para condição de modelo estático, horizontal e 12L; e resultados da simulação computacional.

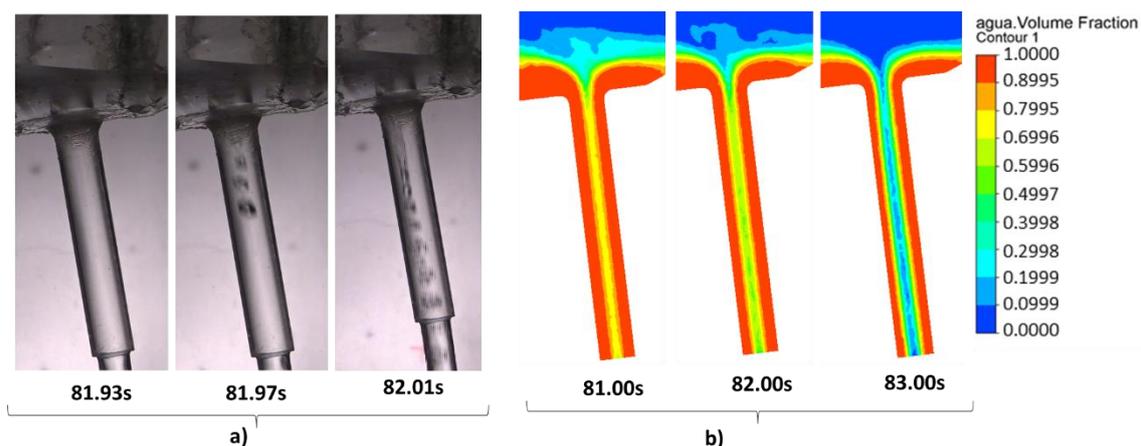


Figura 5. 2 – Início do dreno modelo estático 12L; a) Simulação física; b) simulação computacional.

Observou-se uma boa concordância do experimento físico com a simulação computacional, sendo o início de dreno do físico por volta de 82segundos e do computacional por volta de 83segundos, caracterizando uma diferença de 1,2% de um para o outro.

A partir da curva de drenagem experimental obtida com a balança MARTE AD16K, fez-se a primeira derivada dos dados e obteve-se a curva de vazão mostrada na Figura 5.3.

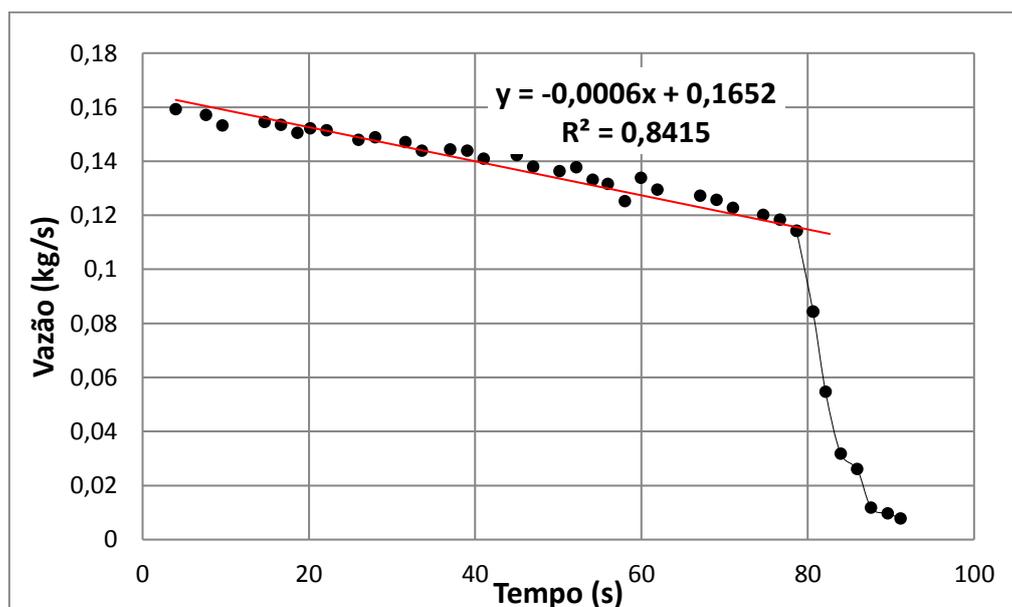


Figura 5. 3 – Gráfico da primeira derivada da média dos testes das curvas de drenagem do físico, com modelo estático e uma balança.

Observou-se na curva de vazão obtida uma queda na vazão característica do escoamento do tipo dreno. Considerando uma diminuição de 10% da vazão atual, obtida com a equação da linha de tendência do trecho antes da queda, foi obtida um início do dreno entre 78.65segundos e 80.63segundos. Este valor foi obtido em um intervalo com poucos pontos como se observa no gráfico anterior, sendo assim optou-se por utilizar outra balança com maior precisão para obter um intervalo menor e mais representativo.

Os resultados obtidos utilizando a configuração com duas balanças para leitura da drenagem nos últimos 1.5L de água do reator físico são apresentados na Figura 5.4.

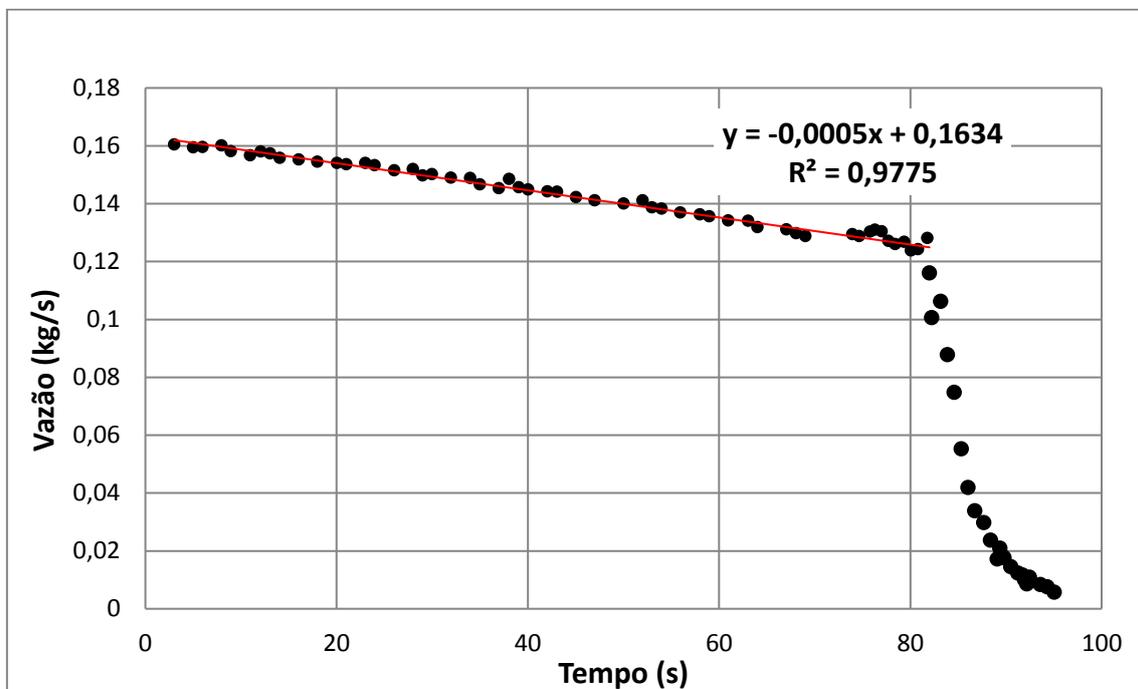


Figura 5. 4 – Gráfico da primeira derivada da média dos testes das curvas de drenagem do físico, com modelo estático e duas balanças.

Nestes resultados utilizando o mesmo critério já citado de queda de vazão obteve-se um início de dreno entre 82.00segundos e 82.23segundos. Este resultado coincide com o valor obtido nas filmagens.

5.3 Simulações com Basculamento

5.3.1 Curva de drenagem sem óleo

Foram feitas 3 simulações físicas sem óleo e obtidas uma média dessas simulações, assim como nos testes com modelo estático. Foram conduzidos testes com volume inicial de água de 6L. Esta média foi confrontada com a simulação computacional (CFD) para validação e os resultados da comparação são mostrados na Figura 5.5 abaixo.

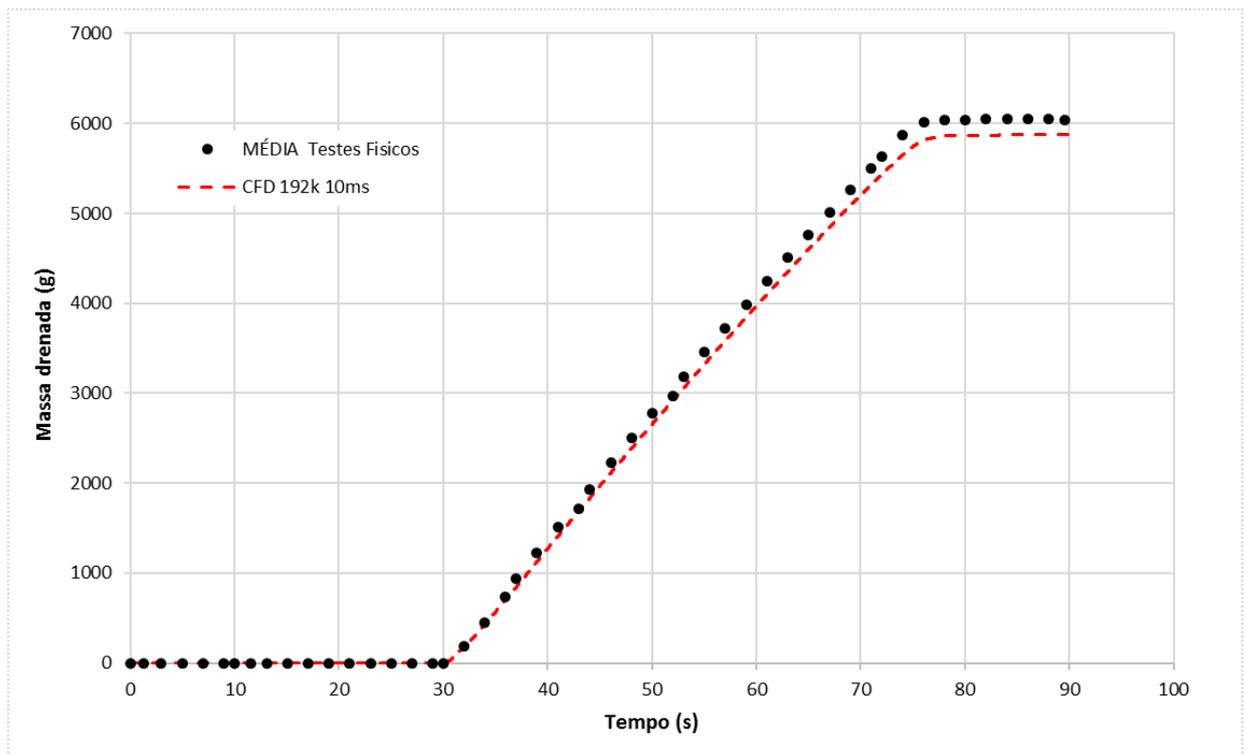


Figura 5. 5 – Gráfico da comparação entre curva média dos testes de drenagem físico sem óleo Versus CFD (Computacional).

Houve uma boa correlação da simulação física com a computacional com uma malha de 192mil nós e *timeStep* de 10ms, com isto passou-se para simulações com presença de fluido sobrenadante.

5.3.2 Curva de drenagem com óleo

Os testes com óleo foram feitos na configuração com apenas uma balança, a MARTE AD16K, pois a balança de maior precisão possui uma capacidade máxima inferior a necessária para os testes com óleo.

Os resultados dos testes utilizando-se o Querosene como fluido sobrenadante está apresentado na Figura 5.6. A malha utilizada foi a de 192mil nós e *timestep* de 10ms.

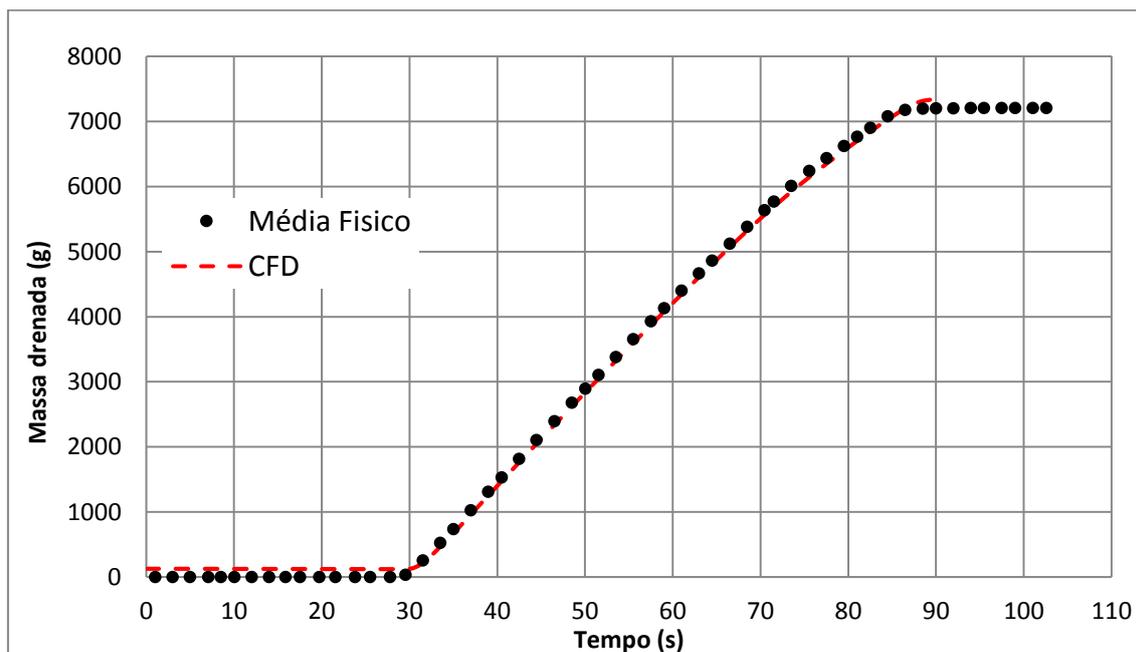


Figura 5. 6 – Gráfico da comparação entre curva média dos testes de drenagem físicos com óleo Querosene Versus CFD (Computacional).

Para as simulações CFD com óleos de silicone não houve boa correlação entre computacional e físico. Ocorreu durante as simulações computacionais o surgimento de uma abertura na camada de óleo e acúmulo do fluido na região acima do bocal de saída que não foi observada nas simulações físicas, tal fenômeno pode ser devido a uma grande redução da espessura da camada de fluido sobrenadante ao final do basculamento. O valor da espessura final foi obtido utilizando da Equação 5.1 e dos valores de área inicial e final obtidos na simulação computacional.

$$A_i \times E_i = A_f \times E_f \tag{5. 1}$$

Houve uma redução de 25mm para 9mm na espessura da camada de fluido sobrenadante e com isto em mente foi feito um aumento na camada inicial de óleo de 25mm para 50mm mantendo uma malha de 192mil nós, isto inicialmente para o óleo de 500cSt. Os resultados podem ser observados na Figura 5.7 e na Figura 5.8.

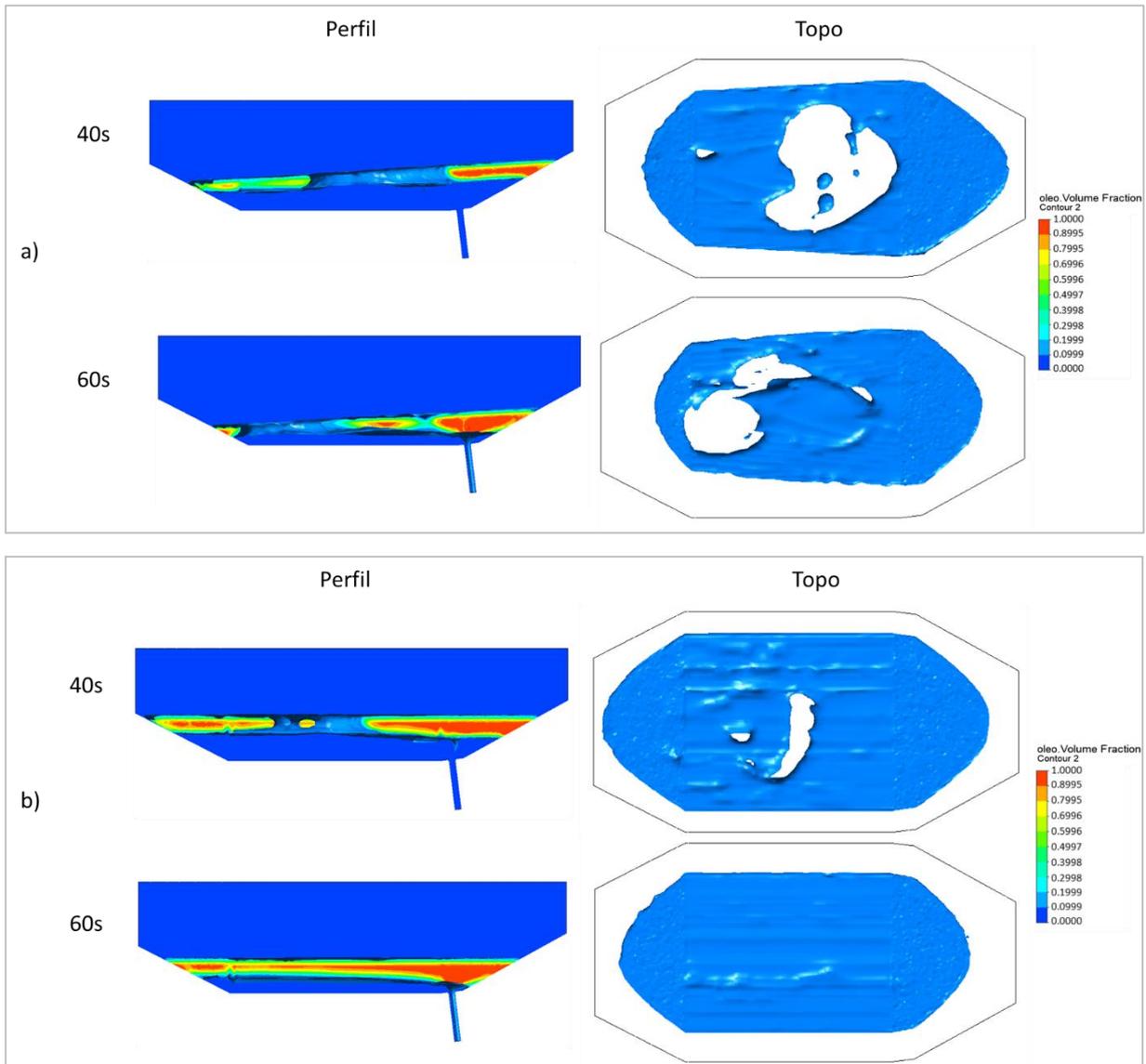


Figura 5. 7 – Simulação de óleos de silicone 500cSt, visão de perfil e topo do reator, com camada inicial de a) 25mm b) 50mm.

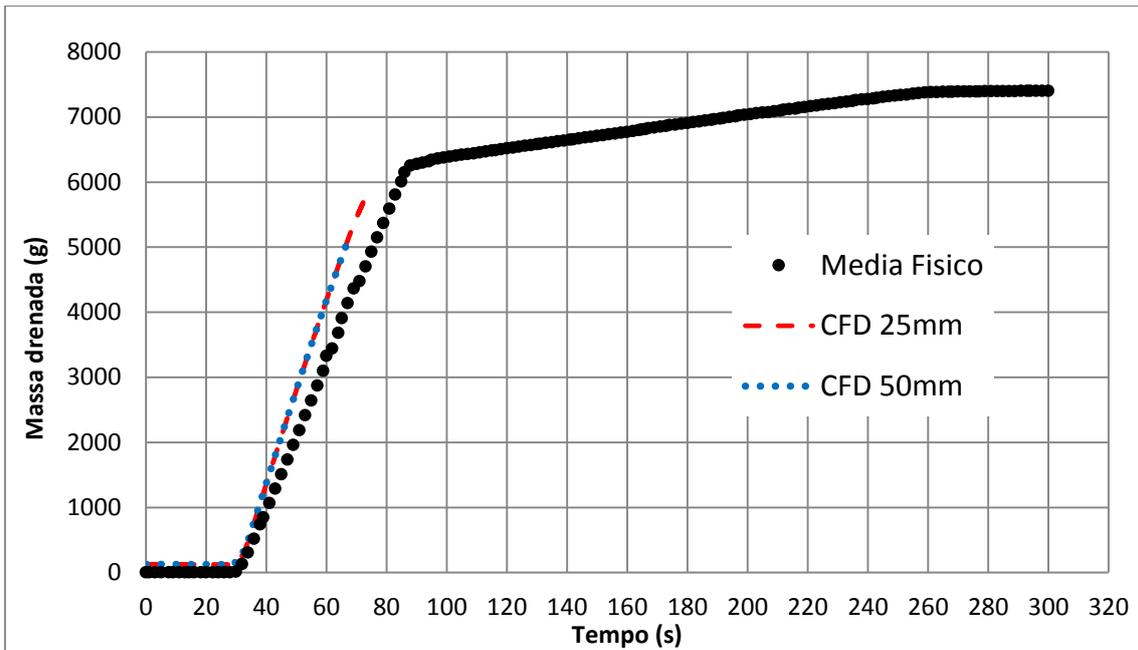
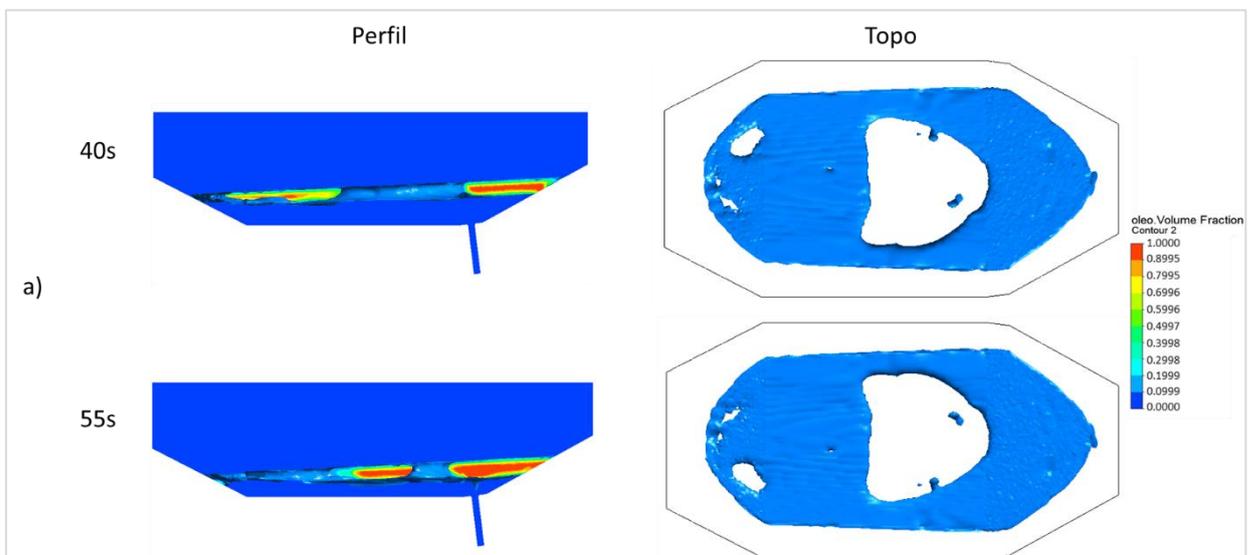


Figura 5. 8 – Gráfico da comparação entre curva média dos testes de drenagem dos testes físicos com óleo 500cSt Versus CFD (Computacional).

Como não se observou uma melhora na convergência e o problema da abertura na superfície se manteve decidiu-se passar para o óleo de 200cSt e além do aumento da camada, utilizar uma malha de 350mil nós, com refino 4mm na região da camada de óleo (Tabela 4.2). Os resultados destas mudanças podem ser observados no Gráfico 5.9 e na Figura 5.10.



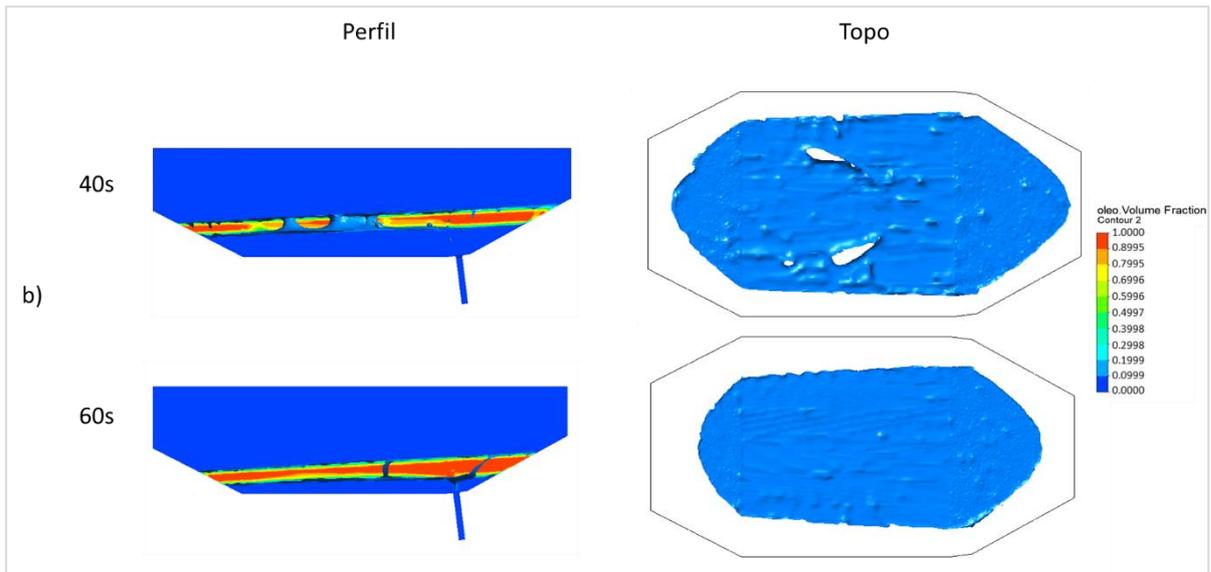


Figura 5. 9 - Simulação de óleo de silicone 200cSt, visão de perfil e topo do reator, com camada inicial de: a) 25mm; b) 50mm.

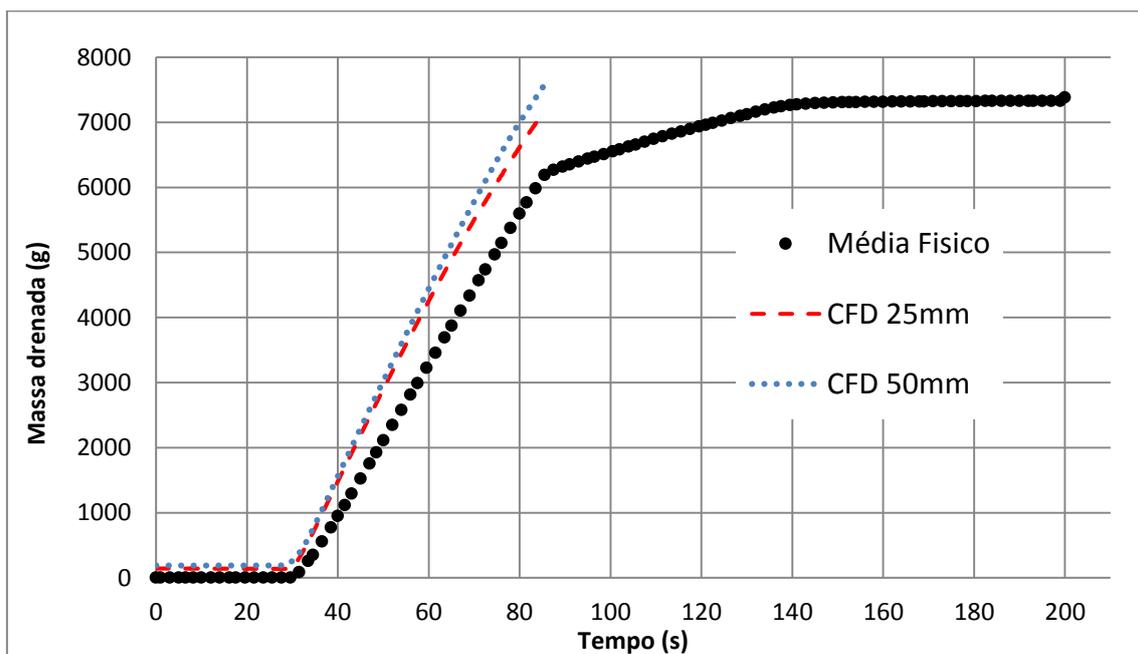


Figura 5. 10 - Gráfico da comparação entre curva média dos testes de drenagem físicos com óleo 200cSt Versus CFD (Computacional).

Considerando as simulações físicas um comportamento semelhante pôde ser observado para os óleos de silicone 200cSt e 500cSt, mas distinto para o Querosene. Uma primeira inflexão da curva pode ser observada nas curvas dos óleos de silicone e mais tarde uma segunda inflexão próximo ao fim da drenagem. A primeira indica uma diminuição na vazão que caracteriza o escoamento do tipo dreno e o início do arraste de fluido. A

segunda caracteriza o arraste de ar ao final da drenagem. Para o querosene não se consegue observar a primeira inflexão e, portanto, a primeira derivada de todas as curvas foi feita para melhor precisão na identificação do arraste, nos óleos de silicone e no Querosene. Apenas as simulações com o querosene como fase sobrenadante obteve boa correlação com a simulação computacional. Para os óleos de silicone, sugere-se realizar simulações com menor tamanho de elemento na região da interface e também, menor valor de *timestep*.

5.3.3 Início de arraste de óleo/ar

Nos testes com basculamento foram feitas filmagens e simulações computacionais sem a presença de fluido sobrenadante e com a presença de fluido sobrenadante. A Figura 5.11 mostra as imagens das filmagens no início do dreno para testes sem óleo e com os três óleos utilizados como fluído sobrenadante.

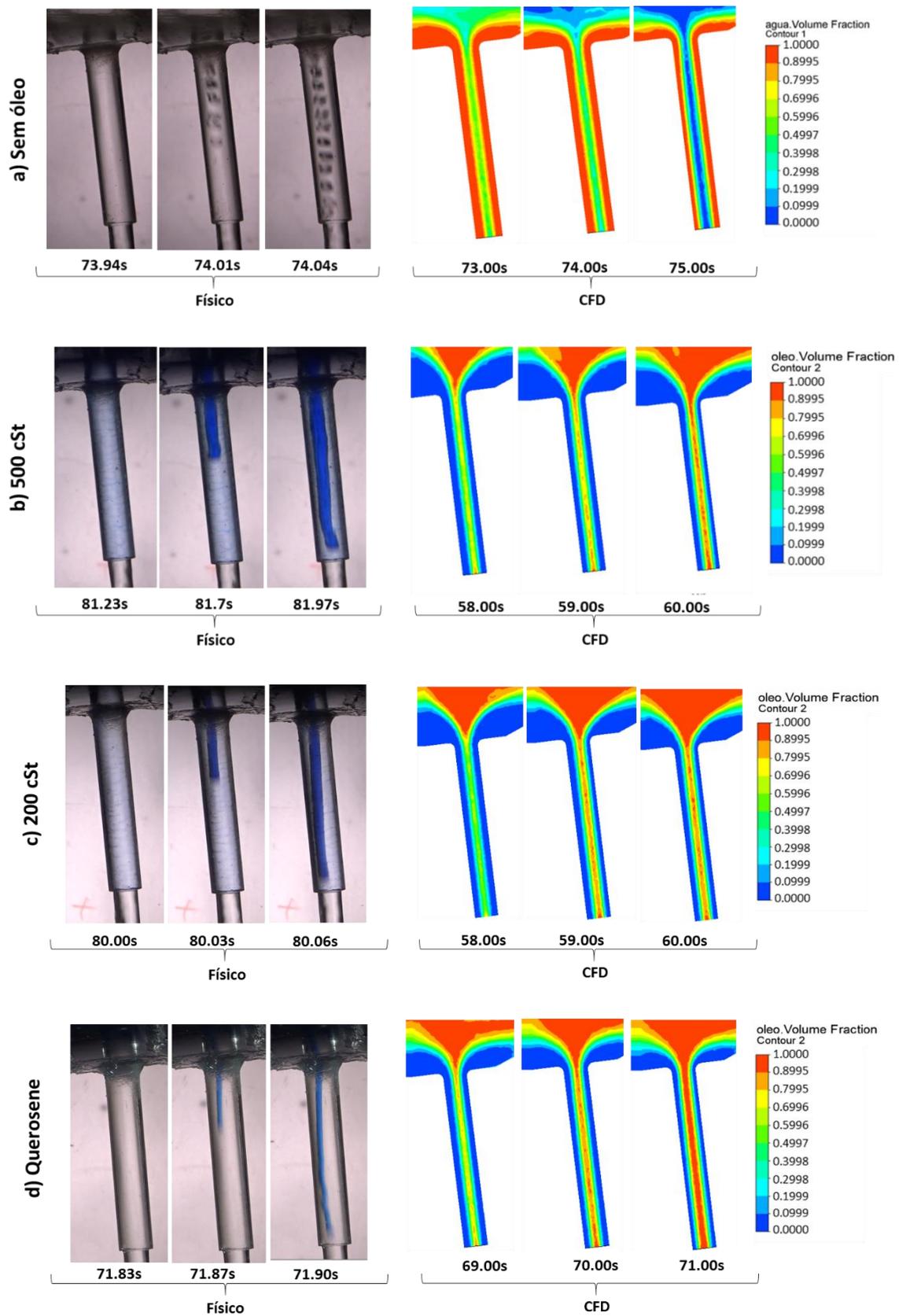


Figura 5. 11 – Comparação entre resultados do modelo físico e CFD do início do dreno durante o basculamento do reator BOF; a) Sem óleo; b) Água + óleo 500cst; c) Água + óleo 200cst; d) Água + querosene.

Para os valores de CFD para os óleos de silicone observou-se um tempo precoce devido ao fenômeno já observado anteriormente de surgimento de abertura e acúmulo de fluido acima do bocal, aumentando a altura de início de dreno. No caso das simulações computacionais sem óleo e com querosene observou-se boa concordância entre físico e CFD.

As derivações das curvas de drenagem obtidas deram resultado às Figuras 5.12, 5.13, 5.14 e 5.15, mostrados abaixo.

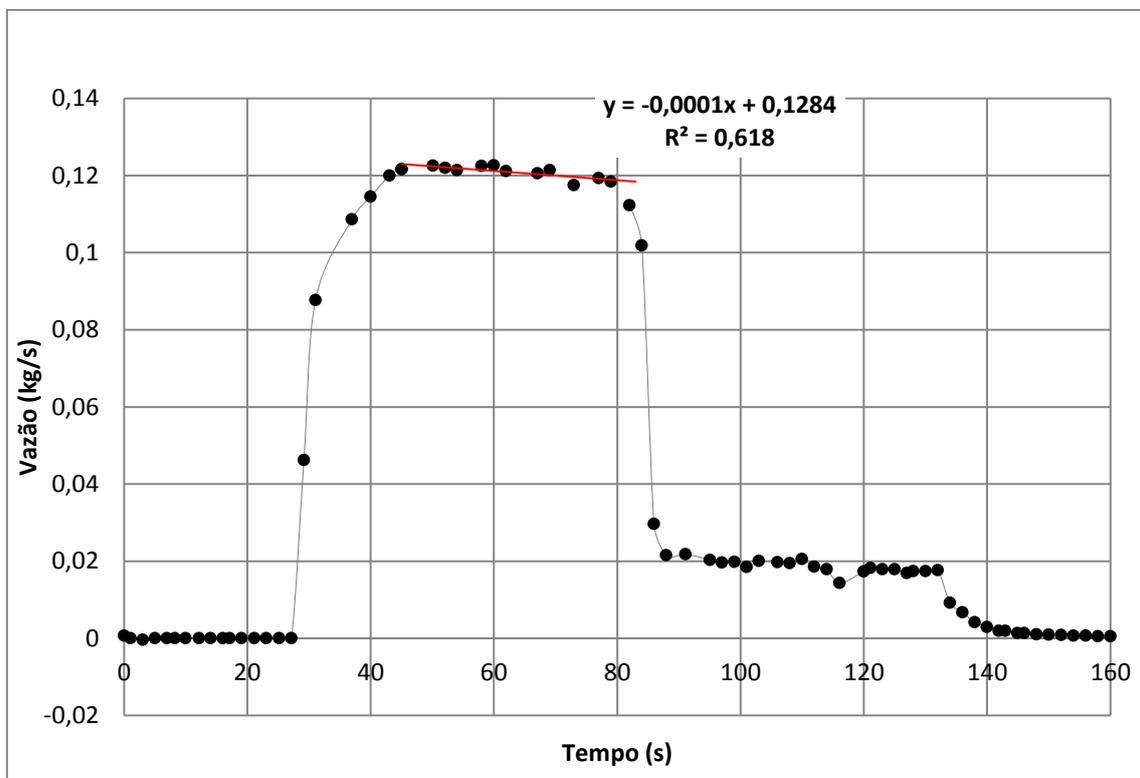


Figura 5. 12 – Gráfico da primeira derivada da média dos testes das curvas de drenagem do físico, com basculamento, uma balança e óleo de silicone 200cSt.

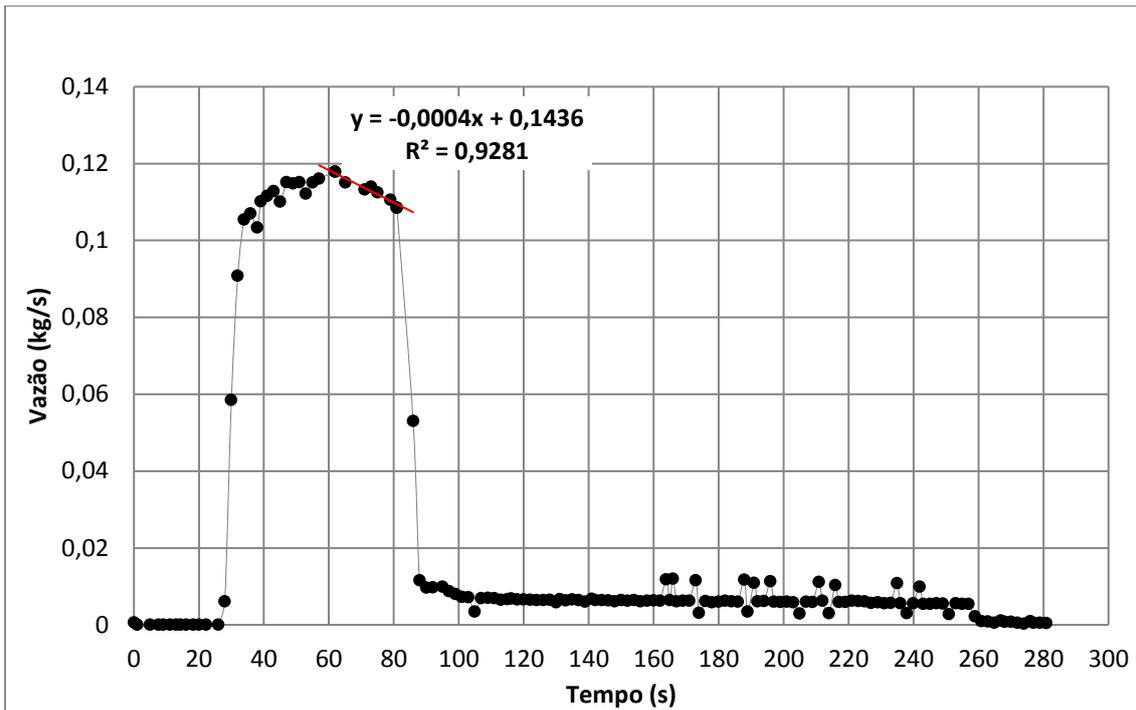


Figura 5. 13 - Gráfico da primeira derivada da média dos testes das curvas de drenagem do físico, com basculamento, uma balança e óleo de silicone 500cSt.

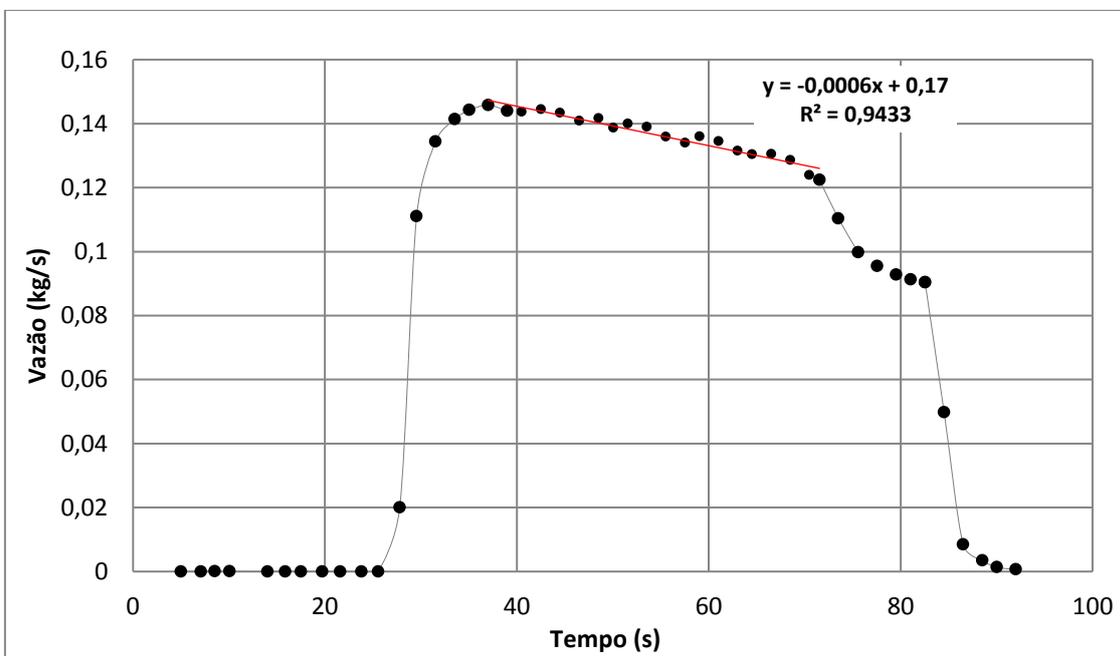


Figura 5. 14 - Gráfico da primeira derivada da média dos testes das curvas de drenagem do físico, com basculamento, uma balança e Querosene.

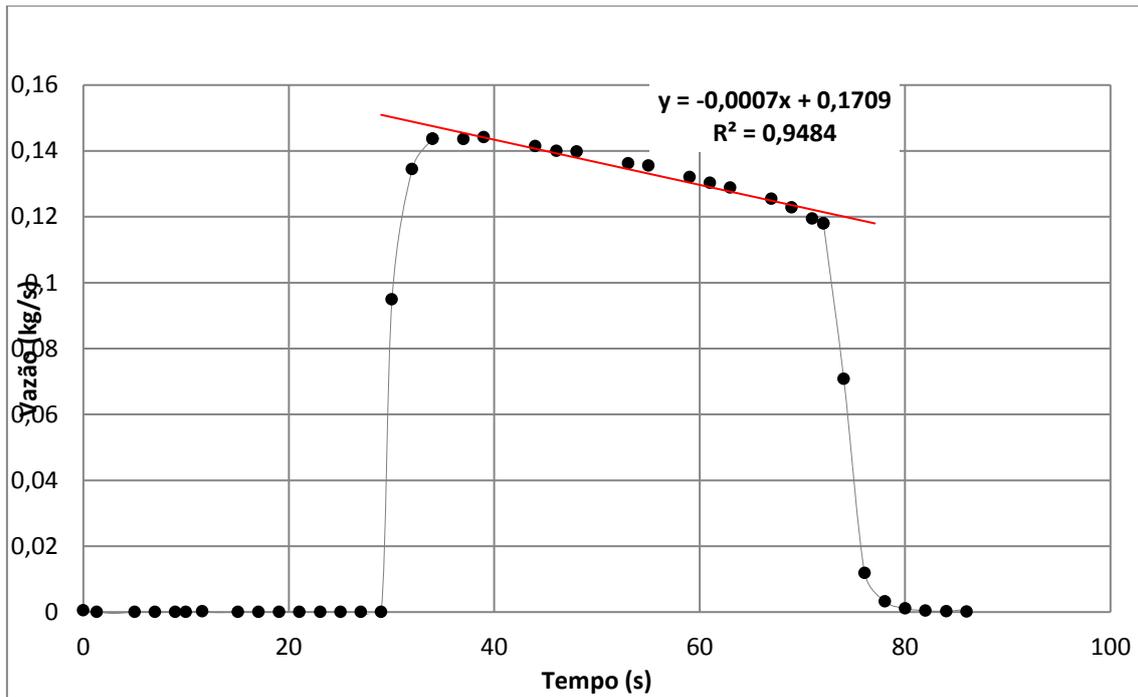


Figura 5. 15 - Gráfico da primeira derivada da média dos testes das curvas de drenagem do físico, com basculamento, uma balança e sem óleo.

Utilizando como critério a diminuição da vazão em 10% da vazão atual nas curvas vistas obtidos os valores de início de arraste de segunda fase para todos os óleos.

5.4 Validação da Simulação Computacional e Influência dos Fluidos Sobrenadantes

Compilando todos os dados de início de araste de segunda fase obteve-se para fins de validação obteve-se a Tabela 5.1, mostrada a seguir.

Tabela 5. 1 – Tempos de início de arraste de segunda fase obtidos por diferentes técnicas.

| Configur ação | Filmag ens | Gravime tria | CFD | % Diferença (Gravimetria- Filmagem)/Fil magem | %Diferença (CFD- Filmagem)/Fil magem |
|--------------------------------------|-----------------------|-------------------------|------------|--|---|
| Água/ar estático | 81.93 – 82.01 | 82.00 – 82.23 | 81 - 83 | 0.18 | 0.04 |
| Água/ar basculame nto | 73.94 – 74.04 | 72.06 – 74.04 | 73 - 75 | 1.27 | 0.01 |
| Querosene | 71.83 – 71.90 | 71.54 – 73.52 | 69 - 71 | 0.92 | 2,60 |
| 200cSt | 80.00 – 80.06 | 82.00 – 83.98 | - | 3.70 | - |
| 500cSt | 81.23 – 81.97 | 80.96 – 85.96 | - | 2.28 | - |

Para o querosene como fluido sobrenadante obteve-se boa correlação com a simulação computacional, com diferença entre o físico (Filmagens e Gravimetria) e CFD muito menor que os 10% de tolerância, considerado inicialmente como critério do trabalho em questão. O mesmo pode ser visto para as simulações sem presença de sobrenadante, tanto para basculamento quanto para estático. Para os óleos de silicone pode-se observar um erro de 3segundos entre a filmagem e a técnica de gravimetria, o que é explicado pela pequena diferença de densidade entre o óleo de silicone e a água. Porém, para a simulação CFD não foi possível obter dados satisfatórios.

Além das curvas de drenagem versus CFD, já mostradas para simulações com basculamento com apenas água, basculamento com água e querosene e sem basculamento com apenas água, pode-se observar nas curvas de vazão mostradas nas 5.16, 5.17 e 5.18 uma aproximação dentro do critério de 10% e também a semelhança nos comportamentos das curvas.

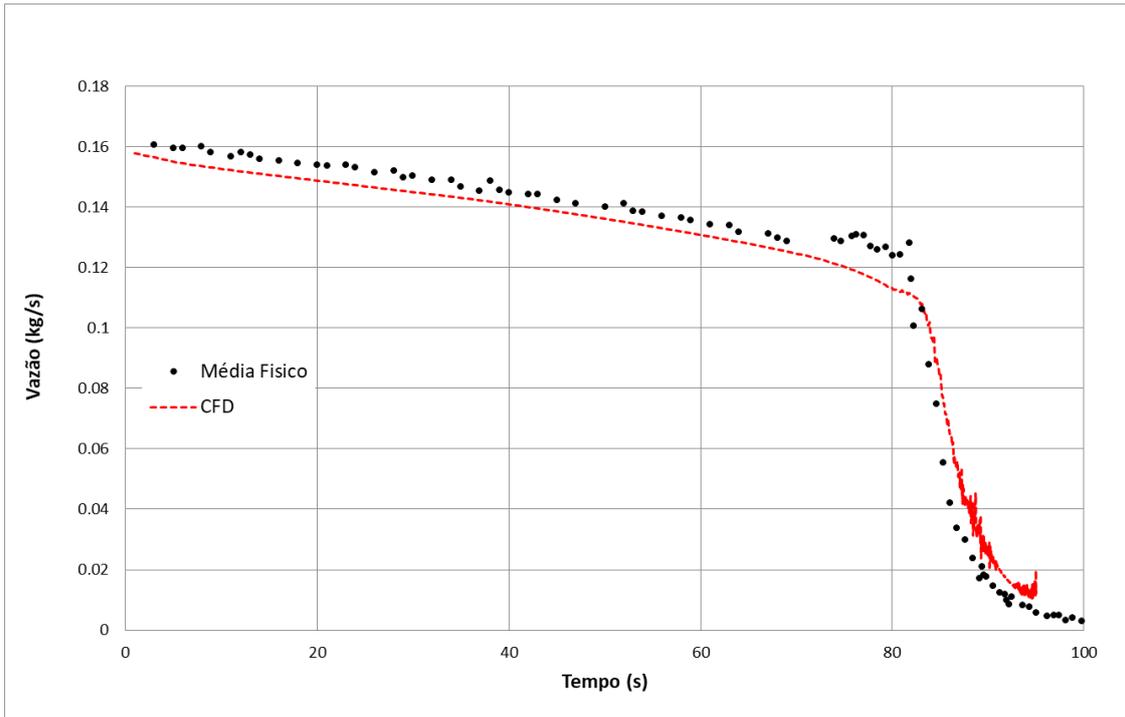


Figura 5. 16 – CFD versus FÍSICO da curva da vazão mássica sem basculamento com água e sem presença de fluido sobrenadante.

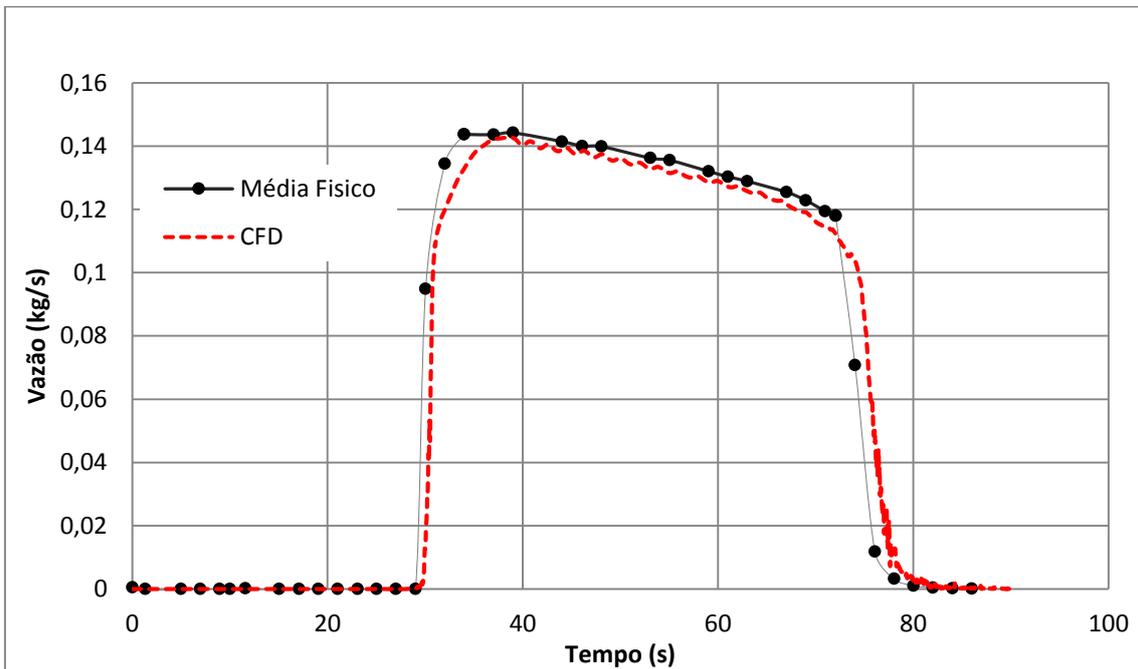


Figura 5. 17- CFD versus FÍSICO da curva da vazão mássica com basculamento com água e sem presença de fluido sobrenadante.

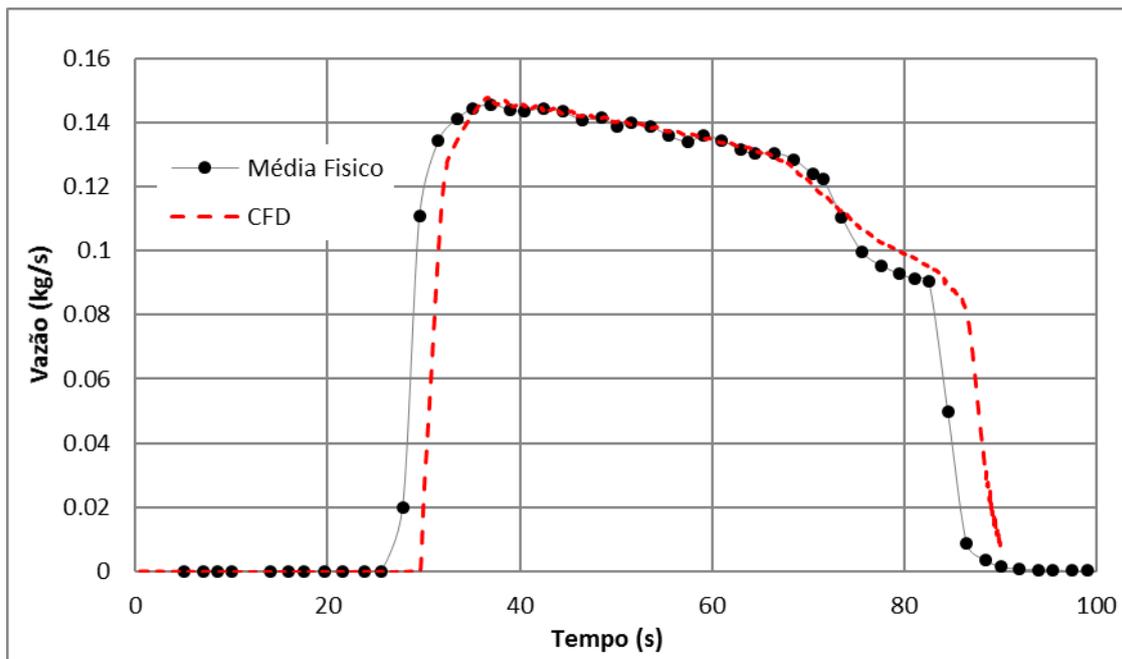


Figura 5. 18 - CFD versus FÍSICO da curva da vazão mássica com basculamento com água e querosene como fluido sobrenadante.

Diferentemente de Karamaj *et al.* (2019) que também conduziram experimentos semelhantes e chegaram à conclusão que a presença de fluido sobrenadante diminui a altura de início de formação de escoamento tipo vórtice e aumento da altura de início de tipo dreno, neste trabalho em questão, somente o querosene apresentou este comportamento, enquanto os óleos de silicone utilizados como fluido sobrenadante apresentaram tempo de início de escoamento tipo dreno maior que os testes sem fluido sobrenadante, ou seja, uma altura menor de início de formação de dreno.

5.5 Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros sugere-se um refino maior da malha na região com presença de óleo e nas interfaces entre as fases presentes e passo de tempo (*timeSteps*) menores. Tais melhorias não foram implementadas devido ao tempo insuficiente no cronograma do trabalho em questão.

Outra sugestão para trabalhos futuros seria o estudo da influência de dispositivos antivórtice em simulação computacional e também simulações em escala industrial, utilizando propriedades do aço e escória.

6 CONCLUSÕES

- Foi possível desenvolver, com uma ótima concordância com as simulações físicas, uma simulação fluidodinâmica computacional do processo de basculamento e vazamento do reator BOF em estudo, para configuração bifásica (água/ar) e para simulações trifásicas utilizando querosene para simular a camada de escória.
- O modelo matemático obtido foi validado pela comparação das curvas de drenagem obtidos com o tempo de início de dreno nas filmagens. Exceto para os óleos de silicone, houve uma boa correlação entre CFD e filmagens, obtendo uma diferença entre os dois de 0.04% para simulação estática e 0.01% no basculamento, ambas sem fluido sobrenadante. Para as comparações com querosene obteve uma diferença de 2.6%. As três situações possuindo boa convergência entre os métodos.
- Comparando o método gravimétrico (Derivação da curva de drenagem) com as filmagens obtiveram-se valores bem próximos de identificação de dreno, com relação a filmagens e método de gravimetria, para todos os experimentos físicos, provando que a metodologia de gravimetria é passível de utilização. A diferença na simulação estática foi de 0.18%, no basculamento sem óleo de 1.27%, para o óleo de querosene de 0.92%, óleo de silicone 200cSt 3.7% e no de 500cSt foi 2.28%.
- Considerando apenas simulações físicas observou-se que para óleos de silicone obteve-se um tempo de início de dreno maior, aproximadamente 80segundos para o 200cSt e 82segundos para o de 500cSt. Esse comportamento pode estar associado ao aumento de viscosidade visto que o óleo de querosene obteve tempo menor, 71segundos. Ou seja, observou-se uma diminuição da altura de início de dreno com o aumento da viscosidade.
- Por fim para os óleos de silicone não foi possível obter uma simulação computacional que convergiu com os resultados físicos. A espessura final da camada de fluido sobrenadante pode ter sido um dos motivos, mas seu aumento

não gerou melhora na concordância dos resultados quando comparado com início de dreno e a curva de drenagem do físico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRZEJEWSKI, P. DIENER, A. PLUSCHKELL, W. Model investigations of slag flow during last stages of ladle teeming. **Steel Research**, v. 58, n. 12, p. 547-552. 1987.

DA CONCEIÇÃO, P. V. S. **Rendimento Metálico Durante Vazamento de Painéis de Aço**. 2018. 97f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

GABRIELL, W. V., PEIXOTO, J. J. M., QUEIROZ, G. S., DA SILVA, C. A., DA SILVA, I. A., SESHADRI, V. **Numerical and Physical Simulation of the Fluid Flow in a Beam Blank Mold Fed Through the Center of the Web**. The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International 2019.

HYOUNGBAE, K. **Physical Modelling of Two Phase Flows in Ladle-Shroud Systems**. 1998. 111f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculty of Graduate Studies and Research, McGill University, Montreal, Canadá, 1998.

KAMARAJ, A., MANDAL, G.K. ROY, G.G. **Control of Slag Carryover from the BOF Vessel During Tapping: BOF Cold Model Studies**. The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International 2018. VOLUME 50B, 438-458, Fevereiro de 2019.

KUWANA, K. HASSAN, M. I. SINGH, P. K. SAITO, K. e NAKAGAWA J. **Scale Model Experiment and Numerical Simulation of a Steel Teeming Process**. Materials and Manufacturing Processes, 23: 407–412, 2008.

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 and Steelmaking**, v. 31, n.6, p. 1-6. 2004.

PATRA, P. SARKAR A. TIWARI A. **Infrared-based slag monitoring and detection system based on computer vision for basic oxygen furnace.** Ironmaking & Steelmaking. Maio de 2018.

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

SANTOS, S. 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. 113f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – REDEMAT, Escola de Minas, 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. 98f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

SATO, C. T. RAMIRES, M. TAVARES, R. P. **Avaliação do Comportamento Escória/Aço Durante o Esgotamento da Panela por meio de Modelagem Física.** *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*, v. 5, n. 4, p. 210-214. 2009.

SILVA, C. A. **Modelagem física da detecção do arraste de escória durante a drenagem de um reator BOF.** 2018. 45f. Monografia (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Departamento de Engenharia Metalúrgica DEMET, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

SINGH, P. K. **SCALE MODEL EXPERIMENTS AND NUMERICAL STUDY ON A STEEL TEEMING PROCESS.** 2004. University of Kentucky Master's Theses. 317), 2004.