



**UFOP**

Universidade Federal  
de Ouro Preto

**Universidade Federal de Ouro Preto**

**Escola de Minas**

**Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais**



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

**Autor:** Guilherme Santiago Queiroz

**Orientador:** Prof. D.Sc. Johne Jesus Mol Peixoto (DEMET/UFOP)

**Ouro Preto/MG  
Janeiro de 2022**

**Universidade Federal de Ouro Preto**  
**Escola de Minas**  
**Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais**

**PROJETO:** “Simulação fluido dinâmica 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

**Ouro Preto/MG**  
**Janeiro de 2022**



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

## ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA

Ao décimo terceiro dia do mês de janeiro de 2022, às 14 horas, por meio da plataforma de videoconferência Google Meet, foi realizada a defesa de monografia pelo aluno **Guilherme Santiago Queiroz**, sendo a comissão examinadora constituída pelo Prof. DSc. Johne Jesus do Mol Peixoto (Presidente), Prof. DSc. Carlos Antônio da Silva (DEMET/UFOP) e pelo Engenheiro Thiago Araújo Santos de Oliveira (Embraer S.A.). O aluno apresentou a monografia intitulada: “*Modelagem Física e Matemática do Basculamento e Drenagem do Reator BOF*”. A comissão deliberou, por unanimidade, pela aprovação da monografia, concedendo ao aluno um prazo de 15 dias para incorporar, no 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, 13 de janeiro de 2022.

Prof. DSc Johne Jesus Mol Peixoto  
Orientador – Presidente

Prof. Prof. DSc. Carlos Antônio da Silva  
Membro – DEMET/UFOP

Eng.º Thiago Araújo Santos de Oliveira  
Membro – Engenheiro de Desenvolvimento de produto (Embraer S.A.)

**Guilherme Santiago Queiroz**  
Aluno

## RESUMO

Durante a etapa de drenagem e basculamento do reator BOF (*Basic Oxygen Furnace*), pode ocorrer o arraste da escória para etapas seguintes do processo de beneficiamento. Para se limitar a passagem de escória, é necessária a suspensão de fluxo de aço, sacrificando o rendimento metálico, afetando diretamente o custo produtivo. No presente trabalho foi desenvolvido um modelo matemático no qual foi possível reproduzir fidedignamente a etapa de basculamento e drenagem. Os estudos foram conduzidos a partir da correlação de dados entre o modelo físico e o matemático. Nos experimentos em modelo físico na escala 1/15 do reator BOF original, foi empregada água e solução saturada de NaCl afim de simular o aço líquido, bem como óleos de silicone 200 e 500 cSt foram empregados para simular a escória, estando estes a temperatura de 25°C. O modelo físico foi basculado a partir da posição vertical e um tampão foi empregado para inibir a drenagem dos óleos de silicone nos primeiros instantes do basculamento. A partir da análise dos perfis de velocidade do modelo CFD (Computational Fluid Dynamics) foi possível caracterizar os fenômenos envolvidos no arraste da fase sobrenadante, bem como foi verificada a possível existência de zonas de desgaste por erosão na região do bocal.

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

## ABSTRACT

During the drainage and tipping stage of the BOF (Basic Oxygen Furnace) reactor, the slag can be carried-over to subsequent steps of the beneficiation process. To limit the passage of slag, it is necessary to interrupt the steel flow, sacrificing metal yield, directly affecting production costs. In the present work, a mathematical model was developed in order to describe BOF drainage. Data from a physical model have been correlated to this mathematical model. In the experiments in a physical model, water and NaCl solution were used in order to simulate liquid steel, oils with viscosity of 200 and 500 cSt were used to simulate slag. The physical model was tipped from the vertical position and a stopper was used to inhibit the drainage of oils during the rotation step of tapping. With this modified condition, the physical and CFD (Computational Fluid Dynamics) results of mass flowrate and the beginning of oil drag reached a good agreement. From the analysis of the velocity profiles of the CFD model it was possible to characterize the phenomena of dragging of the supernatant phase, as well as the possible existence of erosion wear zones in the tapping hole region was verified.

**Keywords:** BOF, Steel drainage, Mathematical Modeling, Physical Modeling.

# SUMÁRIO

RESUMO .....	III
ABSTRACT .....	IV
1 INTRODUÇÃO .....	1
2 MATERIAS E MÉTODOS.....	3
2.1 Modelo físico .....	3
2.2 Modelo Matemático .....	6
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	7
3.1 Basculamento e Drenagem .....	7
4 CONCLUSÃO .....	16
REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Dimensões do modelo; a) vista superior; b) vista lateral. ....	3
Figura 2.2 – Passos empregados na modelagem física. ....	5
Figura 2.3 - Malha e <i>Setup</i> do Modelo Matemático .....	6
Figura 3.1 - Massa Acumulada vs Tempo para solução de NaCl e óleo 200 cSt, sem utilização do tampão. ....	8
Figura 3.2 - Vazão Mássica vs Tempo para solução de NaCl e óleo 200 cSt, sem utilização do tampão. ....	8
Figura 3.3 - (A) Bocal com camada de óleo, (B) Bocal sem camada de óleo. ....	9
Figura 3.4 - Massa Acumulada vs Tempo para solução de NaCl e óleo 200 cSt, com utilização do tampão. ....	10
Figura 3.5 - Vazão Mássica vs Tempo para solução de NaCl e óleo 200 cSt, sem utilização do tampão. ....	11
Figura 3.6 - Perfil de velocidade no plano ZX, após 64 e 65s para condição com água e óleo 200cSt. ....	12
Figura 3.7 - Comparação entre o modelo CFD e o modelo físico para o início da formação do dreno e arraste da fase sobrenadante usando: (a) Água e óleo de silicone 200 cSt com tampão; (b) solução saturada de NaCl e óleo de silicone 200cSt com tampão. ....	13
Figura 3.8 - Resultados da comparação entre o modelo CFD e o modelo físico para o início da formação do dreno e arraste da fase sobrenadante usando água e óleo de silicone 200 cSt. ...	13
Figura 3.9 – Camada superficial de óleo usando água e óleo de silicone 500cSt no modelo CFD. ....	14
Figura 3.10 - Tensão de cisalhamento na parede do bocal para água e óleo de silicone 200 cSt sem tampão aos 70s da simulação matemática. ....	15

## LISTA DE TABELAS

<u>Tabela 2.1 Propriedades dos fluidos utilizados para simular a escória.</u>	4
---	---

## **LISTA DE SÍMBOLOS/SIGLAS**

BOF – Basic Oxygen Furnace

CFD - Computational Fluid Dynamics

## 1 INTRODUÇÃO

A escória possui um papel fundamental na cadeia produtiva do aço, atuando como mecanismo de controle das perdas térmicas, além de favorecer na qualidade da liga, evitando a oxidação do banho metálico pelo ar e atuando na captação de inclusões (SATO, 2007)

Durante o processo de refino do aço, ocorre a transferência do aço líquido entre diversos reatores, entretanto pode haver o arraste de escória, acarretando assim na contaminação da liga, aumentando a concentração de inclusões, gerando prejuízos ao produto acabado. (KUWANA *et al.*, 2008; KAMARAJ *et al.*, 2019)

Na etapa de basculamento e drenagem do reator BOF (Basic Oxygen Furnace) para a panela de transferência é praticamente inevitável entranhamento da escória, sendo necessária a interrupção do processo (FANDRICH, LUNGEN e WUPPERMANN, 2008). A suspensão precoce da operação de transferência vem a favorecer a qualidade, entretanto, minimiza a produtividade, resultando na perda de rendimento metálico e no aumento de custo produtivo (PATRA *et al.*, 2018).

A obtenção de ligas com elevado grau de limpidez está diretamente relacionada com o controle do arraste de escória. A literatura destaca dois mecanismos como responsáveis pelo arraste da fase sobrenadante, o escoamento tipo vórtice e o escoamento tipo dreno. A presença destes fenômenos vem a alterar o padrão de escoamento do aço, proporcionando a passagem da escória para a etapa adjacente do processo (SANKARANARAYANAN e GUTHRIE, 2002; MAZZAFERRO *et al.*, 2004)

Destaca-se na literatura que a redução do arraste de escória acarreta no menor consumo de desoxidante, reduz a reversão do fosforo e aumenta a durabilidade dos refratários, logo, há a busca constante afim de se inibir e/ou retardar a formação dos mecanismos de arraste. Diversas técnicas são empregadas na identificação e na supressão do vórtice e do dreno, porém, assim que os fenômenos são identificados, recorre-se a interrupção do fluxo, gerando um grande volume de líquido remanescente no interior do reator (PISTORIUS, 2019).

No âmbito industrial, o processo produtivo do aço é realizado em condições que envolvem altas temperaturas, além do elevado custo que é intrínseco ao processo, dificultando desta

forma a condução dos estudos, em função das características citadas (DA CONCEIÇÃO, 2018). As técnicas de simulação física em modelos e a fluidodinâmica computacional, tornam possível a compreensão dos fenômenos envolvidos no escoamento e no arraste da escória (GALANTE, 2019).

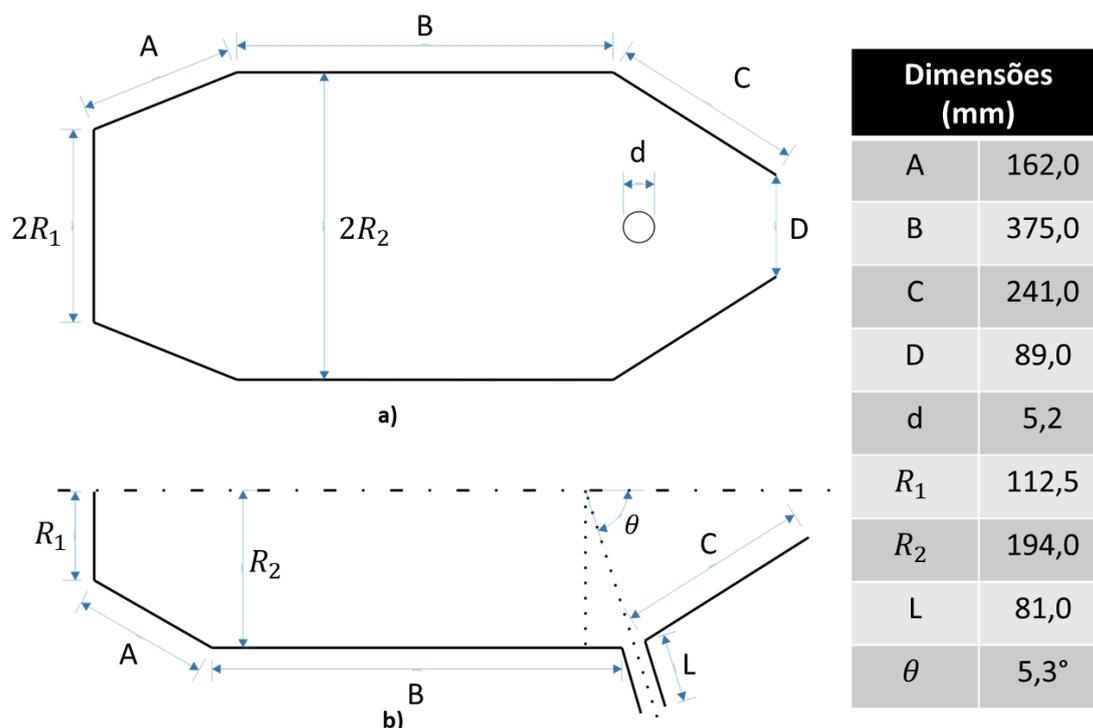
Neste contexto, o presente trabalho busca desenvolver por via da utilização da fluidodinâmica computacional uma simulação que reproduza fidedignamente o processo de basculamento e drenagem do conversor BOF, tornando possível o desenvolvimento de técnicas e mecanismos que venham a reduzir o arraste da escória, possibilitando a redução dos custos produtivos com o aumento do rendimento metálico, além de favorecer diretamente a qualidade da limpidez do aço e melhorar as propriedades mecânicas do produto acabado.

## 2 MATERIAS E MÉTODOS

### 2.1 Modelo físico

A modelagem física foi realizada em modelo na escala 1/15 do reator BOF de 315 toneladas. Na Figura 2.1 são apresentadas as dimensões características do reator a ser empregado no estudo. Assim como Kamaraj *et al* (2019), empregou-se a condição de simetria no modelo do reator, uma vez que está permite a observação dos fenômenos e vem otimizar a duração dos experimentos no modelo físico e posteriormente no modelo matemático. Uma solução saturada de água e NaCl foi utilizada, totalizando 6 litros para simular o aço líquido e uma camada de óleos 200/500cSt com 50mm de espessura foi utilizada para simular a escória. O reator foi rotacionado com velocidade angular de  $2,5^\circ/\text{s}$ .

Figura 2.1 – Dimensões do modelo; a) vista superior; b) vista lateral.



Fonte: Galante, 2019

Assim como em Hyoungbae (1998), a técnica de gravimetria foi aplicada para identificar o arraste da fase sobrenadante. Para este propósito, a massa drenada foi continuamente mensurada por uma balança analítica conectada ao um dispositivo A/D (analógico/digital), bem como a vazão e a variação da vazão foram calculadas. A redução repentina da drenagem

e o aumento da variação da vazão tornam possível a identificação da passagem da segunda fase.

A interface metal/escória foi simulada pela adição de óleos de silicone 200 cSt e 500 cSt, totalizando uma camada de 50mm destes óleos. A tabela 1 apresenta os valores das propriedades físicas dos óleos, (densidade, tensão interfacial e viscosidade).

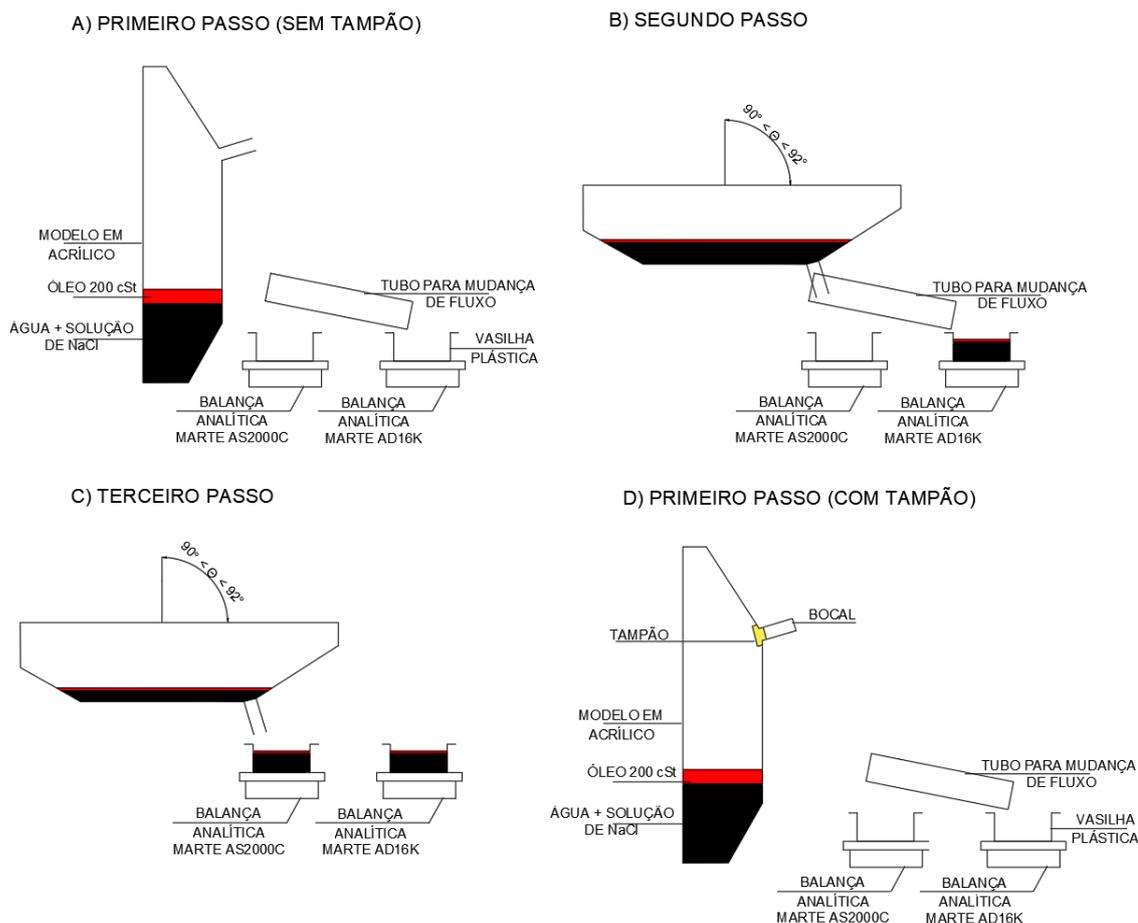
Tabela 2.1 Propriedades físicas dos óleos e da solução de NaCl.

Material	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Viscosidade mPa*s	Tensão interfacial (N/m)	
			Air	Solution
200 cSt	950	190	0,0389	0,0401
500 cSt	950	475	0,0394	0,0401
Solução NaCl	1170	1,56	0,0592	-

Fonte: O autor (2021)

A inclinação foi simulada com o modelo a partir da posição vertical, conforme mostrado na Figura 2.2A, e com uma velocidade de rotação de 2,5°/s, até atingir a posição de parada, que corresponde a um ângulo entre 90 e 92° com a posição vertical, Figura 2.2B. Após o preenchimento do modelo, foi utilizado um tempo de espera, que foi de 600s (SANKARANARAYANAN E GUTHRIE, 2002). Esse tempo de espera foi escolhido para garantir um banho quiescente no início do experimento. Caso contrário, os campos de velocidade residuais resultantes da agitação mecânica gerada pelo enchimento do reator afetariam diretamente o volume do fluido drenado antes da passagem da segunda fase, bem como a dissipação total desses campos se torna parte das condições de contorno aplicadas ao modelo matemático (SANTOS, 2006).

Figura 2.2 – Passos empregados na modelagem física.



Fonte: O autor (2021)

Conforme mostrado na Figura 2.2, duas balanças analíticas foram usadas para avaliar continuamente a massa drenada: MARS AD16K com capacidade de 16kg e sensibilidade de 0,1g, MARS AS2000C com capacidade de 2kg e sensibilidade de 0,01g. Esta última foi usada nos momentos finais da drenagem, onde ambos os líquidos estavam presentes no orifício do bocal. A maior precisão deste equipamento permitiu a fácil identificação do início do arrasto de óleo. Os experimentos foram repetidos pelo menos 3 vezes para cada condição.

A solução de NaCl foi usada para simular aço líquido, a fim de aumentar a diferença de densidade entre os líquidos usados para simular aço e escória, gerando assim uma maior queda no fluxo de massa devido à passagem da fase menos densa. Portanto, houve uma

maior precisão na identificação do arrasto da fase sobrenadante em função da precisão das balanças analíticas usadas na medição da massa drenada.

As seguintes condições foram simuladas no modelo físico:

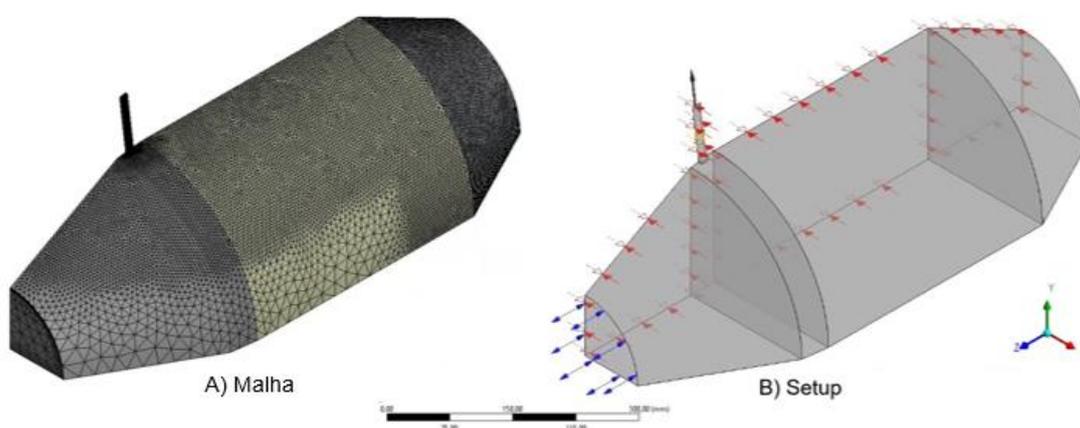
→ Água / óleo 200 cSt sem tampão; → Água / óleo 200 cSt com tampão;

→ Solução NaCl / óleo 200 cSt sem tampão; → Solução NaCl / óleo 200 cSt com tampão.

## 2.2 Modelo Matemático

A simulação matemática foi desenvolvida no software Ansys CFX, versão acadêmica 20.1R. A geometria empregada possui as mesmas dimensões do modelo físico. Foi utilizada a condição de simetria, desta forma há uma redução significativa no tempo empregado nos cálculos computacionais, tornando mais viável a aplicação de uma região com elevado refino nos elementos da malha. A Figura 3.A, apresenta a malha computacional empregada no modelo matemático, onde há a predominância de elementos tetraédricos. Foi realizado o refino da malha nos locais nos quais havia a presença dos fluidos, todavia, o refino foi intensificado na região do bocal em função da grande turbulência gerada pelo escoamento dos líquidos nesta região.

Figura 2.3 - Malha e *Setup* do Modelo Matemático



Fonte: O autor (2021)

Os seguintes parâmetros foram adotados no modelo CFD: Escoamento tridimensional, isotérmico em regime transiente, com modelo de turbulência  $k-\epsilon$ . As condições iniciais do modelo matemático são similares a do modelo físico, onde foi adotado que os fluidos se

encontravam estáticos à 25°C. O nível inicial da solução aquosa e a espessura do camada de óleo foram estabelecidas pela fração volumétrica em função de z. Assim como em Gabriel *et al* (2019), as seguintes equações foram resolvidas: Continuidade, Navier Stokes, Viscosidade Efetiva, Energia Cinética de Turbulência, Dissipação da Energia Cinética de Turbulência e Viscosidade Turbulenta.

Como critério de convergência da simulação matemática foi adotado erro residual do RMS abaixo de  $10^{-5}$ . O *TimeStep* adotado foi de 10ms para um tempo total de simulação de 90s.

A Figura 3.B, apresenta o setup, no qual foram empregas as seguintes condições de contorno:

- Paredes – Condição de não deslizamento;
- Saídas – Pressão relativa igual a 0;
- Aberturas – Pressão relativa igual a 0.

As seguintes condições foram simuladas no modelo CFD (todas sem tampão):

- Água / óleo 200 cSt; → Água / óleo 500 cSt com tampão;
- Solução NaCl / óleo 200 cSt; → Solução NaCl / óleo 500 cSt.

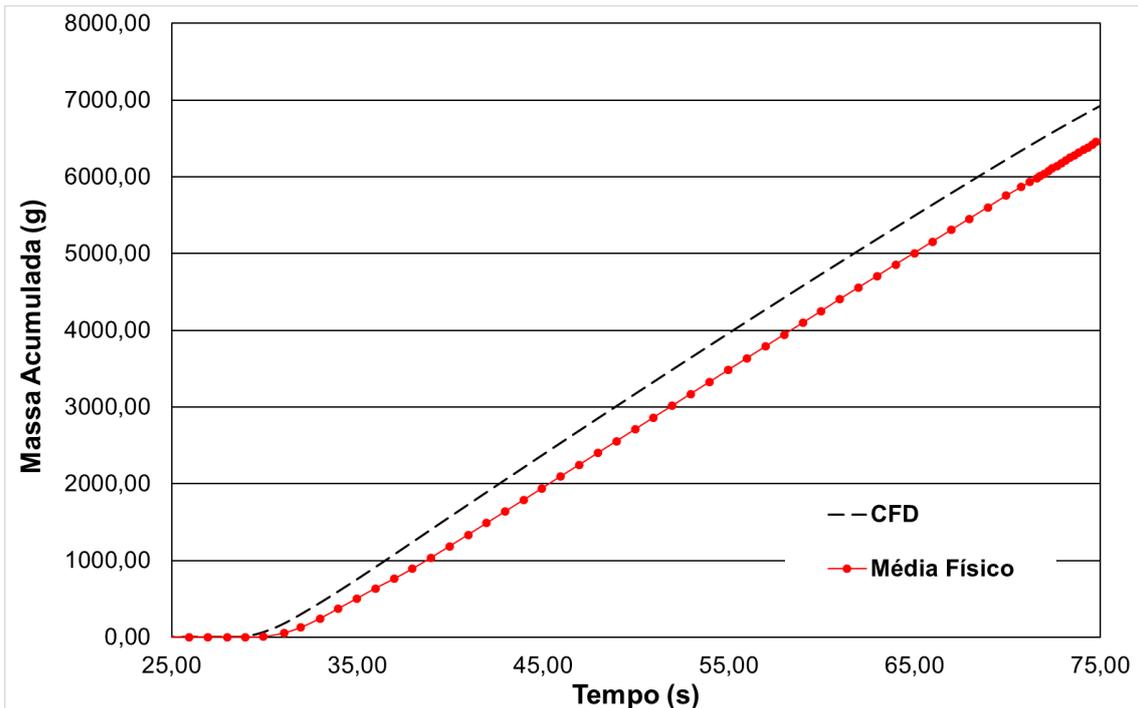
### **3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **3.1 Basculamento e Drenagem**

A partir da análise das curvas de massa acumulada, geradas a partir da técnica de gravimetria, para os testes sem a aplicação do dispositivo controlador de fluxo (tampão), pode ser observado um desvio entre os dados obtidos a partir da correlação entre o CFD e modelo físico, conforme Figuras 3.1 e 3.2.

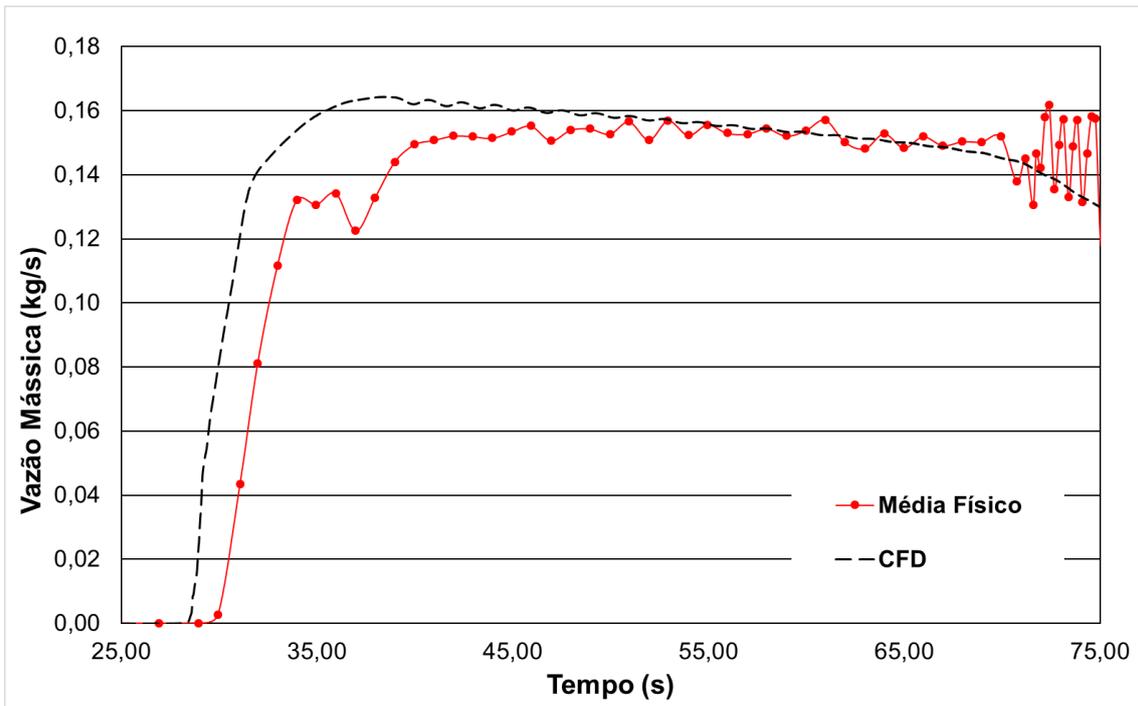
Resultados semelhantes foram observados nos experimentos conduzidos por Galante (2019), onde o autor utilizou querosene para simular a camada de escória, encontrando boa concordância entre os resultados obtidos pelo modelo CFD e por simulação física. Isto provavelmente veio a ocorrer em função da baixa viscosidade do querosene, logo nenhuma camada de óleo veio a se formar no bocal de drenagem.

Figura 3.1 - Massa Acumulada vs Tempo para solução de NaCl e óleo 200 cSt, sem utilização do tampão.



Fonte: O autor (2021)

Figura 3.2 - Vazão Mássica vs Tempo para solução de NaCl e óleo 200 cSt, sem utilização do tampão.

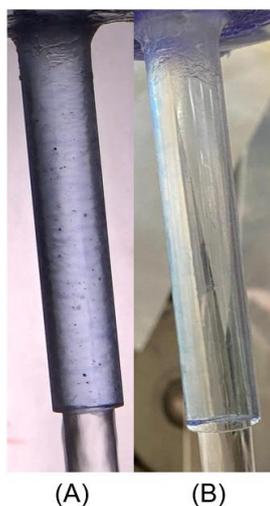


Fonte: O autor (2021)

Durante o processo de drenagem do BOF é inevitável o arraste da escória junto ao aço líquido para a panela de transferência (PATRA, SARKAR e TIWARI, 2018). Afim de evitar a drenagem da fase sobrenadante nos momentos iniciais do basculamento no modelo físico, onde o óleo avança em direção ao bocal de saída anteriormente a água e a solução de NaCl, foi realizada a inserção de um tampão com diâmetro nominal igual ao diâmetro interno do bocal de saída. O tampão foi inserido no bocal anteriormente ao enchimento do reator e removido posteriormente no momento em que o reator atinge a posição de parada, conforme Figura 2.2D. Nos testes físicos onde o tampão foi utilizado, um  $\Delta t$  igual a 5 s foi subtraído do tempo total de experimento, em função de não haver fluxo no bocal neste período de 5 s.

Ao observarmos a Figura 3.2, nota-se uma significativa redução da vazão no modelo físico entre 29 e 50s, quando comprado aos primeiros momentos da drenagem. Entretanto, nos momentos seguintes há um ganho na vazão até o início da passagem da segunda fase. As variações observadas podem ser explicadas pela formação de uma película de óleo, que vem a molhar a superfície do bocal, reduzindo assim sua secção transversal e a vazão do líquido. A película de óleo pode ser observada na Figura 3.3A. Todavia, parte desta camada vem a ser lavada em função das forças de fricção, reduzindo assim a espessura da camada de óleo e implicando no aumento da vazão durante entre 37 e 46 segundos. Silva (2018) também realizou experimentos em um reator BOF, onde verificou o molhamento das paredes internas do bocal, resultando em mudanças na média da flutuação da superfície do jato. Isto não é esperado na prática, uma vez que a escória não molha os tijolos refratários de magnésio-carbono muito bem.

Figura 3.3 - (A) Bocal com camada de óleo, (B) Bocal sem camada de óleo.

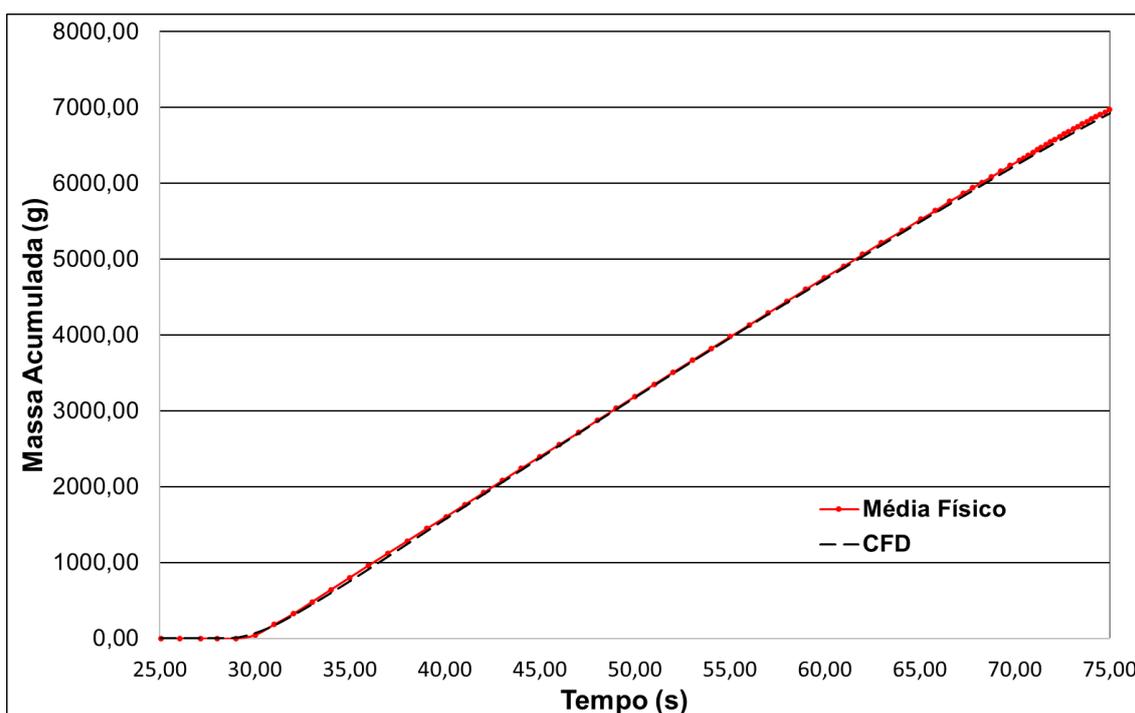


Fonte: O autor (2021)

Devido à baixa concordância entre os modelos, foi realizada a implementação do tampão. Desta forma não houve a formação da camada de óleo durante os primeiros momentos do basculamento, como mostrado na Figura 3.3B. Os resultados das mudanças são apresentados nas Figura 3.7.

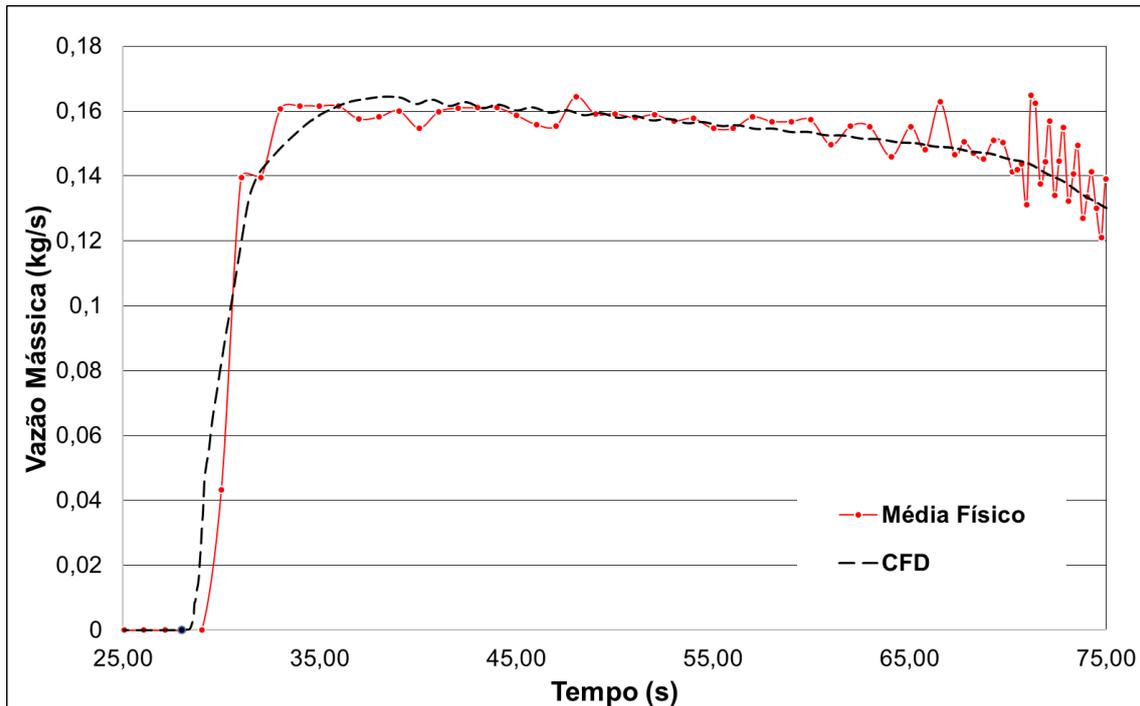
A Figura 3.4, apresenta a curva massa acumulada vs tempo para a drenagem realizada com a instalação do tampão. Nesta condição onde não houve a formação da camada de óleo, o modelo CFD apresentou uma excelente concordância com o modelo físico. A excelente concordância também pode ser observada na Figura 3.5 na curva vazão mássica vs tempo. Desta forma o modelo CFD é capaz de prever o modelo de drenagem, tornando possível o estudo do escoamento através do modelo CFD.

Figura 3.4 - Massa Acumulada vs Tempo para solução de NaCl e óleo 200 cSt, com utilização do tampão.



Fonte: O autor (2021)

Figura 3.5 - Vazão Mássica vs Tempo para solução de NaCl e óleo 200 cSt, sem utilização do tampão.

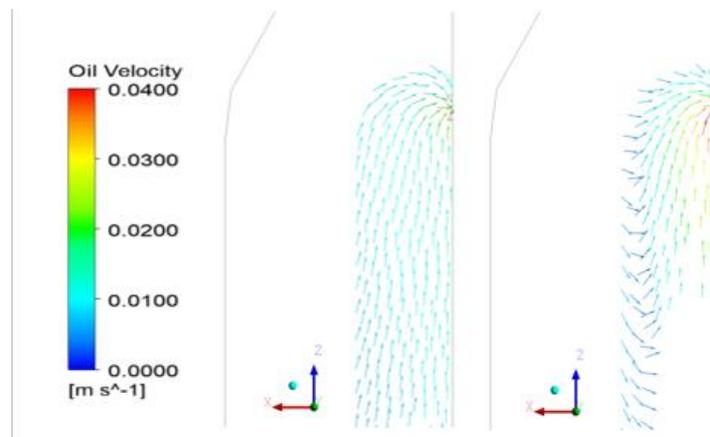


Fonte: O autor (2021)

A escoria oriunda do processo BOF que é transferida para os demais reatores acarreta no aumento do consumo de desoxidantes, bem como diminuí a vida útil dos refratários e causa a reversão do fósforo (PISTORIUS, 2019). Dois diferentes mecanismos podem causar o colapso da superfície do banho metálico no momento da drenagem e promover o arraste da segunda fase, o vórtice e o dreno (MAZZAFERRO *et al.*, 2004).

O perfil de velocidade obtido a partir do modelo CFD, nos momentos antecedentes ao arraste da fase sobrenadante podem ser observados na Figura 3.6. Observa-se um perfil de velocidade radial, caracterizando assim a formação do dreno. Galante (2019) e Silva (2018), obtiveram resultados semelhantes através da modelagem física do reator BOF.

Figura 3.6 - Perfil de velocidade no plano ZX, após 64 e 65s para condição com água e óleo 200cSt.



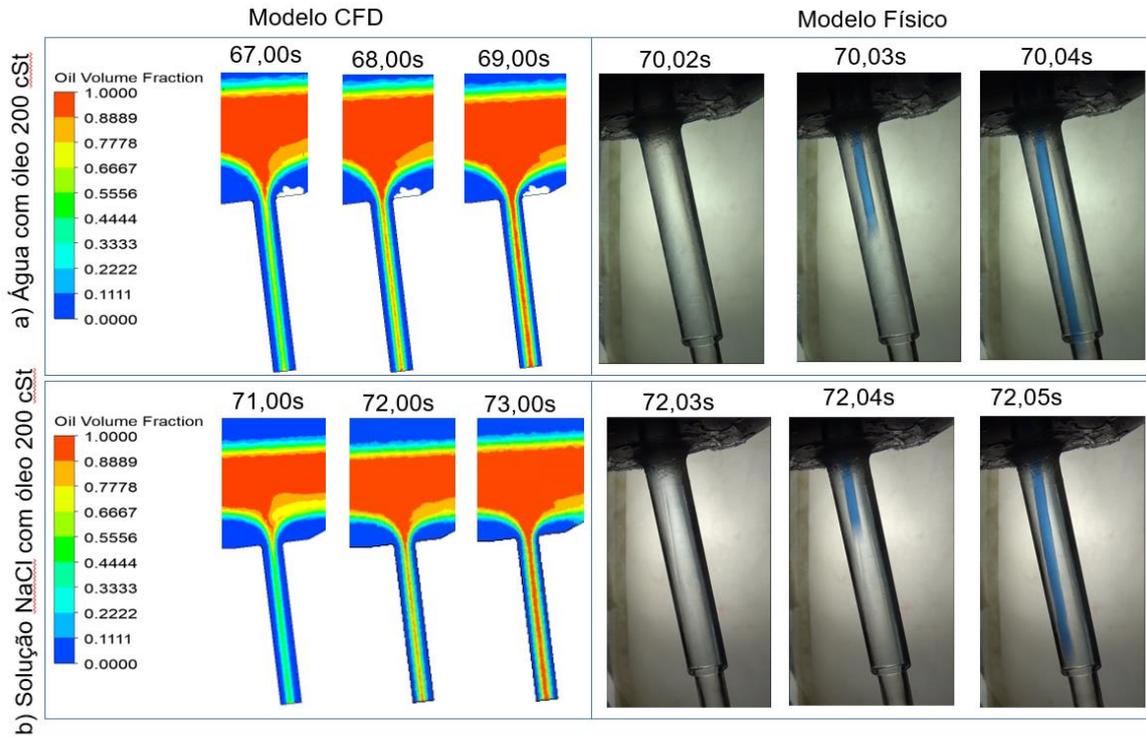
Fonte: O autor (2021)

Foram realizadas filmagens do bocal durante a realização dos testes no modelo físico onde observou-se a formação do dreno e o arraste da segunda fase. As imagens obtidas na filmagem foram confrontadas com o modelo CFD, conforme Figura 3.7 A e B.

Os modelos apresentaram uma boa concordância para ambas as condições apresentadas na Figura 3.7, onde o modelo CFD foi capaz de prever a formação do dreno.

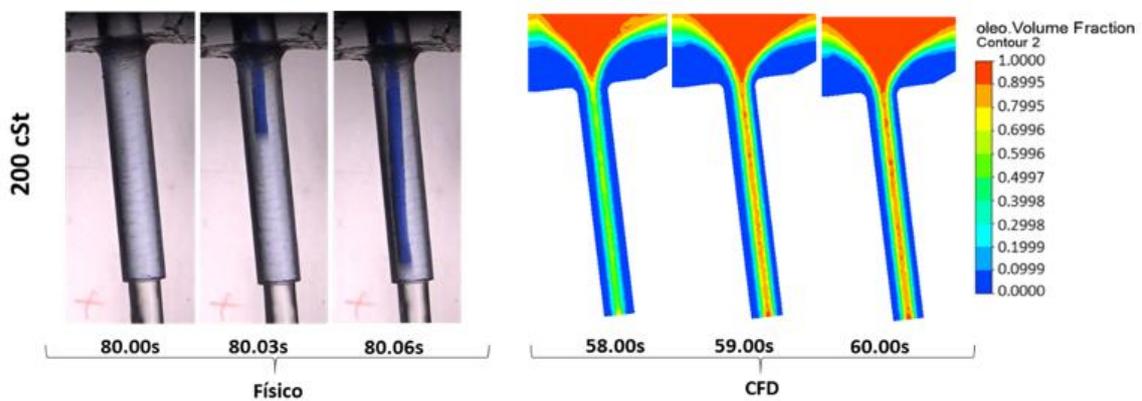
Previamente, Galante (2019) conseguiu desenvolver simulações físicas e simulações fluido dinâmicas para o processo de basculamento e drenagem do reator BOF. O autor obteve uma ótima concordância para a configuração bifásica (água/ar) e para simulações trifásicas onde foi empregada querosene para simular a camada de escória. Entretanto o autor não obteve boa concordância entre o modelo CFD e o modelo físico quando realizou o emprego de óleos de silicone 200 e 500 cSt para simular a camada de escória, conforme Figura 3.8. Neste presente trabalho foram realizadas melhorias a partir do trabalho desenvolvido por Galante (2019), onde foi possível obter uma boa concordância entre os modelos para a condição do emprego do óleo de silicone 200cSt para simular a camada de escória.

Figura 3.7 - Comparação entre o modelo CFD e o modelo físico para o início da formação do dreno e arraste da fase sobrenadante usando: (a) Água e óleo de silicone 200 cSt com tampão; (b) solução saturada de NaCl e óleo de silicone 200cSt com tampão.



Fonte: O autor (2021)

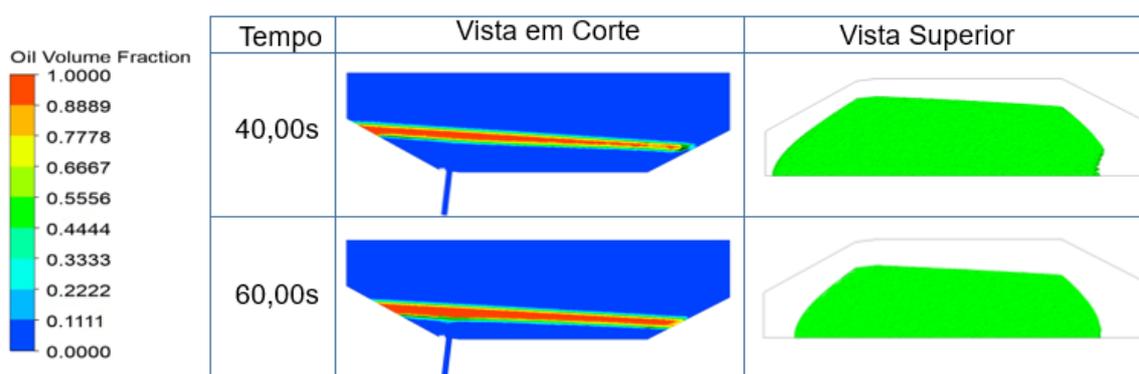
Figura 3.8 - Resultados da comparação entre o modelo CFD e o modelo físico para o início da formação do dreno e arraste da fase sobrenadante usando água e óleo de silicone 200 cSt.



Fonte: Adaptado de Galante (2019).

Uma validação adicional do modelo CFD pode ser feita pela comparação do comportamento de espalhamento da segunda fase (óleo) durante o basculamento do reator. Como necessário, há uma camada de óleo quase uniforme, como mostrado na Figura 3.9, em relação a drenagem da água com óleo 200 e 500 cSt sem a implementação do tampão.

Figura 3.9 – Camada superficial de óleo usando água e óleo de silicone 500cSt no modelo CFD.



Fonte: O autor (2021)

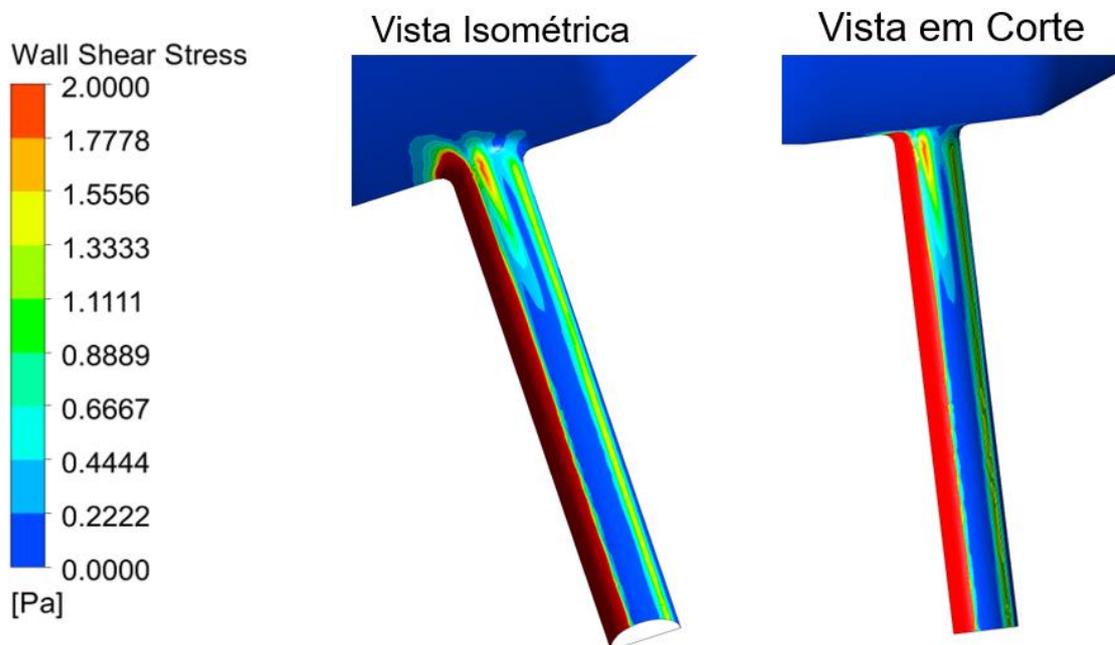
Kamaraj *et al.* (2019) em seus estudos empregando modelagem física em um reator BOF que se encontrava estático, buscou compreender a influência do diâmetro do bocal na altura de formação do dreno. Seus resultados mostraram que quanto maior o diâmetro do bocal, maior é a altura de formação do dreno, resultando assim no arraste precoce da segunda fase. Entretanto, os estudos de Kamaraj *et al.* (2019) ignoram os campos de velocidades induzidos pelo basculamento do reator até a posição final de drenagem. Como mostrado, há inicialmente um escoamento radial rumo ao bocal, afetando diretamente o entranhamento da escória (CONCEIÇÃO, 2018).

O modelo CFD pode então ser aplicado para analisar as tendências de desgaste dos refratários. Durante a realização de experimentos via modelagem física e matemática em um modelo RH, Melo *et al.* (2019) validou o uso da distribuição o de tensão de cisalhamento para prever pontos preferências de erosão refratária. O autor também observou, como esperado, que altas velocidades de fluídos resultam em maior taxa de erosão. No presente estudo, a tensão de cisalhamento da parede foi avaliada, conforme mostrado na Figura 3.10.

Esses resultados indicam uma zona de erosão preferencial na base e no corpo do bocal (DIGNANI *et al.*, 2012). A erosão pode resultar na alteração da secção interna do orifício de drenagem, alteração do fluxo e, conseqüente, nos fenômenos de arraste da segunda fase.

A boa concordância entre o modelo CFD e o modelo físico do reator BOF permite o desenvolvimento de novos padrões de rotação do reator, alteração da geometria do bocal, que poderiam ser aplicados para reduzir o tempo de tamponamento e diminuir o arrastamento de escória. Mudanças geométricas do reator também podem ser desenvolvidas no modelo Gabriel *et al.* (2018), permitindo o teste de várias configurações que garantirão a redução da erosão da camada refratária, a redução da altura de formação do dreno e, conseqüentemente, o aumento do rendimento do metal. Simulações computacionais também podem ser desenvolvidas para a condição real, usando aço e escória. No entanto, o custo computacional deve ser observado, devido à complexidade do modelo para essa condição, exigindo o alto refinamento da malha e condições não isotérmicas que afetam as propriedades físicas.

Figura 3.10 - Tensão de cisalhamento na parede do bocal para água e óleo de silicone 200 cSt sem tampão aos 70s da simulação matemática.



Fonte: O autor (2021)

## 4 CONCLUSÃO

Foi realizada uma modelagem física e matemática da drenagem do BOF. Os principais resultados são:

- A formação da camada de óleo na superfície interna do orifício de drenagem reduz a área efetiva da seção transversal, aumenta o tempo de drenagem e leva a uma diferença significativa entre o modelo CFD e os resultados experimentais;
- A partir do perfil de velocidades gerado nos momentos anteriores ao arrasto da fase sobrenadante, é possível caracterizar a formação do dreno;
- A implementação do tampão nos momentos iniciais da drenagem para evitar a passagem de óleo através do orifício de drenagem durante a rotação do BOF reduz o molhamento da superfície interna do bocal por óleos de silicone e permite uma boa concordância entre CFD e modelos físicos;
- Este modelo CFD pode ser aplicado para desenvolver novos padrões de rotação do BOF, e também estudos para melhorar a geometria do orifício de drenagem, bem como é capaz de prever o desgaste do refratário devido à erosão.

## REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

DA CONCEIÇÃO, P. V. S. **Rendimento Metálico Durante Vazamento de Painelas 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.

DIGNANI, M.L. CAMELLI, S. VAZQUEZ, A. LABADIE, M. **Main properties for the selection of converter tap-halo material**. Procedia Materials Science. 1: 382-388, 2012.

FANDRICH, R., LUNGEN, B., WUPPERMANN, D. Actual review on secondary metallurgy. In: ATS INTERNATIONAL STEELMAKING CONFERENCE, 2007, Paris. **Proceedings [...]**, 2008, p. 364-374.

GABRIEL, 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.

GALANTE, S. G. **Modelamento físico e simulação computacional da drenagem de um reator BOF**. 2019. 69f. Monografia (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Departamento de Engenharia Metalúrgica DEMET, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 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.

MELO, P.H. PEIXOTO, J.J. GALANTE, G.S. LOIOLA, B.H. SILVA, C.A. SILVA, I.A. SESHADRI, V. **The influence of flow asymmetry on refractory erosion in the vacuum chamber of a RH degasser.** Elsevier B.V. Junho 2019.

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.

PISTORIUS, P.C. **Slag carry-over and the production of clean steel.** *Furnace Tapping Conference*, v. 119, n.6, p. 557-561. 2019.

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.

**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.