

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

Giancolli Cordoni Bellotto Alvares

Estudo do comportamento dos fluidos em um protótipo de um cadinho de Alto Forno durante
o seu esgotamento

Trabalho de Graduação apresentado ao
Departamento de Engenharia Química
da Universidade Federal de São Carlos
Orientadora: Prof^a. Dr^a. Gabriela Cantarelli Lopes

São Carlos - SP
2019

Banca Examinadora

Trabalho de graduação apresentado no dia 9 de dezembro de 2019 e composto pela banca:

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Gabriela Cantarelli Lopes – DEQ/ UFSCar

Convidado: Prof^o. Dr^o. Carlos Della Rovere – DEMa/UFSCar

Professora da disciplina: Prof^a Dr^a. Rosineide Gomes da Silva Cruz – DEQ/UFSCar

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a minha família que sempre me motivou e que tornou o sonho de me tornar engenheira em realidade. Aos meus amigos que, aqui em São Carlos, tornaram-se minha segunda família e sempre me apoiaram.

Gostaria de agradecer também a todas as pessoas que estagiaram comigo e que me mostraram o quão essencial é se trabalhar com o que ama e com pessoas que te impulsionam a crescer.

A minha orientadora, que foi uma mentora e um grande exemplo de professora.

Por todas as pessoas e professores que tive o prazer de conhecer durante a graduação e à EQ Júnior, que me proporcionou experiências além da grade curricular.

Resumo

A siderurgia é a ciência que se dedica aos estudos da produção e tratamento do aço, como obtenção do ferro metálico. Os processos mais antigos de obtenção de ferro metálico eram conduzidos em diversos tipos de fornos, atualmente utiliza-se o alto-forno. O alto forno é, essencialmente, um enorme trocador de calor contra-corrente e um reator químico, no qual o ferro gusa é produzido por minério de ferro a temperaturas superiores a 1500°C. Por conta das altas temperaturas, os materiais refratários estão sempre presentes nesses processos. Os materiais refratários são utilizados, pois suportam o ambiente agressivo do processo siderúrgico, conferindo resistência estrutural à corrosão e também evitando perdas de calor do aço para o meio. A condição do refratário do cadinho do alto forno é o principal fator limitante da vida de um alto forno. Também devido às altas temperaturas do processo, o uso de ferramentas que simulem o comportamento dos fluidos internos do cadinho pode apresentar vantagens em relação ao estudo experimental deste processo. Dessa forma, o presente trabalho de graduação teve como objetivo analisar o comportamento dos fluidos internos durante o esvaziamento do protótipo de um cadinho impresso em impressora 3D, variando a altura dos líquidos. Para isso, foi usado o *software* comercial Ansys Student v.19 – R2, que utiliza os métodos dos volumes finitos para a resolução das equações de Navier-Stokes e das equações de fechamento. Foram obtidos perfis de fases, velocidades e energia cinética turbulenta ao longo do tempo e, a partir deles, foi possível analisar como os fluidos se comportam durante o esvaziamento do cadinho, as zonas onde a velocidade e a energia cinética turbulenta são mais agravantes e a relevância da presença do homem-morto.

Abstract

Steel is the science dedicated to the studies of steel production and treatment, such as obtaining metallic iron. The oldest processes for obtaining metallic iron were conducted in various types of furnaces, currently using the blast furnace. The blast furnace is essentially a huge countercurrent heat exchanger and a chemical reactor in which pig iron is produced by iron ore at temperatures above 1500 ° C, because of the high temperatures, refractory materials are always present. in their processes. Refractory materials are used because they support the aggressive environment of the steelmaking process, providing structural resistance to corrosion and also avoiding heat loss from steel to the medium. The condition of the blast furnace refractory is the main limiting factor for the life of a blast furnace. Also due to the high process temperatures it is necessary to use tools that simulate the behavior of the internal crucible fluids. Thus, the present undergraduate work with the aid of the Ansys Student v.19 - R2 tool, which uses the finite volume methods to solve the necessary equations, analyzed the behavior of the internal fluids during the emptying of a printed crucible prototype. 3D printer, varying the height of the liquids. Thus, we obtained profiles of: phases, velocities and turbulent kinetic energy over time, thus, it was possible to analyze how the fluids behave during the emptying of the crucible, the zones where the velocity and turbulent kinetic energy are more aggravating and the relevance of the dead man's presence.

Lista de Figuras

Figura 1: Regiões Internas do Alto	8
Figura 2: Regiões Externas do Alto Forno	9
Figura 3: Relação entre o grau de modelagem e o custo de computacional dos modelos de turbulência	16
Figura 4: – Desenho em escala 1:10 em milímetros do Protótipo do Cadinho do Alto Forno	18
Figura 5: Protótipo do cadinho impresso em impressora 3D	19
Figura 6: Desenho da geometria utilizada na simulação	19
Figura 7: Desenho da malha utilizada na simulação	20
Figura 8: Geometria rotacionada no eixo de simetria	21
Figura 9: Geometria com condições de contorno adotadas	23
Figura 10: Geometria com zonas das fases da simulação 1	23
Figura 11: Geometria com zonas das fases da simulação 2	25
Figura 12: Perfil de velocidade da mistura no tempo $t = 0,05$ s – Simulação 1	26
Figura 13: Perfil de velocidade da mistura no tempo $t = 0,10$ s – Simulação 1	26
Figura 14: Perfil de velocidade da mistura no tempo $t = 0,30$ s – Simulação 1	27
Figura 15: Perfil de energia cinética turbulenta no tempo $t = 0,05$ s – Simulação 1	28
Figura 16: Perfil de energia cinética turbulenta no tempo $t = 0,10$ s – Simulação 1	28
Figura 17: Perfil de energia cinética turbulenta no tempo $t = 0,30$ s – Simulação 1	29
Figura 18: Perfil das fases no tempo $t = 0,05$ s – Simulação 1	29
Figura 19: Perfil das fases no tempo $t = 0,10$ s – Simulação 1	30
Figura 20: Perfil das fases no tempo $t = 0,30$ s – Simulação 1	30
Figura 21: Perfil de velocidade no tempo $t = 0,05$ s – Simulação 2	31
Figura 22: Perfil de velocidade no tempo $t = 0,10$ s – Simulação 2	31
Figura 23: Perfil de velocidade no tempo $t = 0,30$ s – Simulação 2	32
Figura 24: Perfil de energia cinética turbulenta no tempo $t = 0,05$ s – Simulação 2	32
Figura 25: Perfil de energia cinética turbulenta no tempo $t = 0,10$ s – Simulação 2	33
Figura 26: Perfil de energia cinética turbulenta no tempo $t = 0,30$ s – Simulação 2	33
Figura 27: Perfil das fases no tempo $t = 0,05$ s – Simulação 2	34
Figura 28: Perfil das fases no tempo $t = 0,10$ s – Simulação 2	34
Figura 29: Perfil das fases no tempo $t = 0,30$ s – Simulação 2	35
Figura 30: Visão esquemática das forças atuantes no cadinho de um alto forno e que determinam a posição do homem morto	36

Lista de Tabelas

Tabela 1: Definições da malha	20
Tabela 2: Propriedades físicas das fases.....	21
Tabela 3: Condições iniciais dos casos simulados.....	21
Tabela 4: Dados do Alto Forno real e do Protótipo	22
Tabela 5: Alturas de níveis de líquidos no cadinho	24
Tabela 6: Valores máximos das respostas para cada tempo analisado nas duas simulações	35

Lista de Equações

Equação (2.1): Equação de redução do óxido de ferro (III)	6
Equação (2.2): Equação de redução do teróxido de triferro	6
Equação (2.3): Equação de Boudouard	6
Equação (2.4): Equação de redução de óxido de ferro (II).....	6
Equação (3.1): Equação da continuidade para a mistura.....	14
Equação (3.2): Equação da velocidade média em massa da mistura.....	14
Equação (3.3): Equação da massa específica da mistura	15
Equação (3.4): Equação da quantidade de movimento para cada fase da mistura	15
Equação (3.5): Equação da diferença de velocidade de uma fase k em relação a velocidade média da mistura.....	15
Equação (3.6): Equação da viscosidade da mistura.....	15
Equação (3.7): Tensores de Reynolds	17
Equação (3.8): Viscosidade turbulenta.....	17
Equação (3.9): Equação de transporte modelo para energia cinética de turbulência (k).....	17
Equação (3.10): Equação de transporte modelo para sua taxa de dissipação (ϵ).....	17
Equação (3.11): Equação da produção de energia cinética turbulenta	18

SUMÁRIO

Agradecimentos	ii
Resumo	iii
Abstract	iv
Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	vi
Lista de Equações	vii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Siderurgia e Refratários.....	3
2.2. Alto Forno	5
2.2.1. Estrutura do Alto Forno.....	6
2.2.2. Cadinho e Homem Morto.....	9
2.2.3. Massa de tamponamento e Furo de Gusa.....	10
2.3. Modelagem dos Fluxos Internos do Cadinho.....	11
3. MATERIAIS E MÉTODOS	12
3.1. Fluidodinâmica Computacional	12
3.2. Modelos de Escoamentos Multifásicos	12
3.2.1. Abordagem Numérica	13
3.3. Equações de Navier-Stokes para a Abordagem de Volume de Fluido.....	14
3.4. Modelos de Turbulência.....	15
3.5. Geometria Simulada e Malha	18
3.6. Condições de Contorno	21
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
5. CONCLUSÃO	37
6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	37
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37

1. INTRODUÇÃO

O Alto Forno e mais especificamente o cadinho, objeto de estudo desse trabalho, faz parte da indústria siderúrgica. A Siderurgia é a ciência que se dedica aos estudos da produção e tratamento do aço, como a redução do óxido de ferro para obtenção do ferro a temperaturas superiores a 1500°C. Devido as condições extremas as quais o metal é submetido para finalmente chegar ao fim do ciclo como aço, os materiais refratários são exigidos no processo.

Graças a sua capacidade de suportar elevadas temperaturas, corrosão química e também atuar como um isolante térmico, os materiais refratários são de extremamente requisitados no processo siderúrgico.

Dessa forma, investigar como os componentes internos do cadinho se comportam e de que forma afetam o refratário e a massa de tamponamento é essencial para então, encontrar soluções de alcance operacional para controlar e minimizar o desgaste nos refratários.

A massa de tamponamento é utilizada para tampar o furo de gusa, por onde sai o ferro gusa, produto final do Alto Forno. Ao ser inserida no cadinho, ocorre um acúmulo de massa que é sinterizada no formato de um “cogumelo” que protege o refratário no interior do cadinho que, por sua vez, é o fator limitante da vida de um alto forno.

Devido ao ambiente extremamente hostil, as altas temperaturas e pressões exigidas no processo de obtenção do aço, além das inúmeras variáveis que compõe o Alto Forno, os estudos na área de Dinâmica dos Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics*, CFD na sigla em inglês) tem sido amplamente utilizada para a simulação e investigação do comportamentos dos fluidos internos do cadinho, para que dessa maneira, seja possível o prolongamento da campanha dos Alto Fornos.

Shao, L. (2013) descreveu um modelo otimizado de CFD, o modelo é capaz de levar em consideração as forças interfaciais entre líquidos imiscíveis. O modelo associa a abordagem de dois fluidos Eulerianos com um esquema de cálculo de interface linear por partes para rastreamento de interface, que é aplicado em modelos de Volume de Fluido. A força da interface demonstrou ter grande impacto no desempenho do cadinho em termos de taxas de saída de líquidos e ângulo de interface próximo ao furo de gusa. Dessa forma, o modelo melhorado de CFD deve ser considerado uma ferramenta promissora para estimar os fluxos de alto fornos e outros processos relacionados.

Portanto, ainda que o presente estudo esteja levando em consideração apenas um componente do Alto Forno, cadinho, e de maneira simplificada, a meta deste trabalho é, por meio do software de ensino ANSYS v19.2 Student, analisar o comportamento dos fluidos internos do cadinho. Para a realização desses estudos, foi gerada uma malha bidimensional do protótipo do cadinho feito em uma impressora 3D.

O principal incentivo para a produção deste trabalho, foi a experiência durante o estágio obrigatório no primeiro semestre de 2019. O estágio foi realizado na empresa Saint-Gobain, na unidade de Vinhedo – SP, mais especificamente, no Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento de Refratários e Cerâmicas de Alta Performance.

A história da Saint-Gobain se iniciou em 1665, quando Colbert fundou a Compagnie de Saint-Gobain por determinação do rei Luís XIV da França, para o fornecimento de espelhos para o Palácio de Versalhes. Ao longo dos anos, o Grupo Saint-Gobain diversificou suas atividades até se tornar hoje um dos maiores conglomerados industriais da atualidade, por meio de 1.200 empresas subdivididas em 5 grandes pólos de atuação: vidros planos, embalagens, produtos para construção, distribuição de materiais de construção e materiais de alta performance. Em 2016, o grupo atuava em 64 países e seu faturamento gira em torno de € 65 bilhões anuais.

A Saint-Gobain no Brasil surgiu em 1937 com a implantação da Saint-Gobain Glass que possui seu parque fabril de vidros impressos localizada na cidade de São Vicente, São Paulo. Atualmente, no Brasil, são 57 fábricas, 17.000 funcionários, 43 centros de distribuição, 10 mineradoras, 70 lojas, 23 escritórios comerciais, 1 centro de pesquisa e desenvolvimento e R\$8,4 bilhões em vendas em 2016. Entre as principais marcas da Saint-Gobain no País estão a Brasilit, Carborundum, Isover, Norton, PAM, Placo, Sekurit, Weber e Telhanorte.

Mais especificamente sobre o projeto que foi iniciado durante o programa de estágio, a fabricação de um protótipo impresso em impressora 3D com um material polimérico, foi a geometria utilizada para a realização do presente trabalho. Inspirado em autores como Shibata, K. e Nogami, H., que montaram modelos físicos com o intuito de examinar o efeito da profundidade do cadinho no movimento das partículas do homem morto, cujo coque desliza em direção às ventaneiras e é consumido basicamente pela incorporação de carbono ao ferro gusa. Esta porção de coque tem sobre si grande parte do peso de toda a coluna de carga do alto forno, e, dependendo da relação de forças entre o peso de carga e o empuxo exercido pelo gusa, escória e ar soprado, pode ser ou não apoiada no fundo do cadinho, e estudar o comportamento de

formação do espaço livre de coque, respectivamente, foi construído um cadinho de escala 1:10 com o objetivo inicial de estudar o comportamento dos fluidos durante a drenagem do furo de gusa.

1.1. Objetivos

Os objetivos do trabalho são as análises dos comportamentos dos fluidos internos de um protótipo de um cadinho de Alto Forno durante o seu esvaziamento. A variável estudada foi o nível de líquido dentro do cadinho.

Mais especificamente, analisar o perfil de fases, velocidade e energia cinética turbulenta com o intuito de verificar os locais com maior desgaste no interior do cadinho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Siderurgia e Refratários

Dentro da história da metalurgia, temos a Idade do Cobre, das quais existem evidências arqueológicas que indicam o conhecimento do processo de obtenção de cobre, a partir de seus minérios, antes do ferro ser intencionalmente produzido pelo homem; a Idade do Bronze, onde ocorriam as misturas de cobre e estanho; e a Idade do Ferro. É de conhecimento geral que diversos povos ao redor do mundo dominavam as técnicas da produção de ferro a partir da redução de seus minérios, porém não há registros do período exato.

Os processos mais antigos de obtenção de ferro metálico eram conduzidos em diversos tipos de fornos, alguns deixados para receber um suprimento natural de ar e outros equipados com sopradores para obtenção de temperaturas mais elevadas (Moreira, 2009).

Atualmente utiliza-se o alto-forno, que teve sua primeira aparição na região do Reno, Alemanha. O alto-forno é um reator do tipo chaminé, contínuo e seu funcionamento é ininterrupto por anos.

As usinas podem ser classificadas quanto ao grau de integração utilizado no ciclo de produção do aço: Integradas ou Semi-integradas. As usinas Integradas são aquelas que possuem em sua planta os processos de redução, refino (primário e secundário) e lingotamento e, dentro do processo de refino primário utiliza-se o reator do tipo: conversor Linz-Donawitz ou conversor LD. Já nas usinas Semi-integradas o processo se inicia pelo refino, não contém a etapa de redução, partindo do ferro gusa, esponja ou sucata para a produção do aço. O reator utilizado na etapa de refino primário, forno elétrico à arco (FEA), também difere da Integrada.

No processo de fabricação do aço existem três etapas fundamentais: redução, refino e lingotamento. Existe também uma pré-etapa chamada de preparação da carga e todas são definidas a seguir.

A etapa de preparação da carga é feita com o objetivo de melhoria do rendimento e economia do processo. O carvão é destilado para obtenção do coque enquanto o minério de ferro é transformado em pelotas.

Durante o processo de redução, que ocorre no interior do alto-forno, as matérias primas são adicionadas pela parte superior do alto forno e acontece a redução do minério de ferro em ferro metálico. O ferro se liquefaz e transforma-se no que é chamado de ferro gusa ou ferro de primeira fusão, que é rico em carbono. Após a redução, saem do alto-forno o ferro gusa e a escória, ambos no estado líquido, e são separados pela diferença de densidade. O ferro gusa é vazado e transportado em carros torpedos até a aciaria.

A fase de refino é dividida em duas partes:

- Refino primário: Consiste no ajuste dos teores de carbono, fósforo e enxofre do ferro gusa. Como dito anteriormente, o ferro gusa possui uma alta percentagem de carbono em sua composição, cerca de 4%p, o que não é interessante comercialmente dado que os aços, para serem comercializados, precisam possuir, em média, quantidade inferiores a 2%p de carbono. Em usinas integradas esse processo é feito no conversor LD, oxigênio é injetado por meio de lanças ou pelo fundo do conversor ou ainda a combinação de ambos. Em usinas semi-integradas esse ajuste ocorre no forno elétrico à arco, as impurezas também são removidas pela injeção de oxigênio e a sucata é fundida por eletrodos.

- Refino secundário: Essa etapa é realizada inteiramente dentro da panela de aço, tanto nas usinas integradas quanto semi-integrada. Seus principais objetivos são: desoxidar o aço, regular sua composição química a fim de atender as normas exigidas e regular sua temperatura para a última etapa, o lingotamento. O refino secundário pode ser feito de maneiras distintas, sendo por meio da remoção de impurezas pela injeção de gases, reaquecimento por forno panela (uma abóboda contendo eletrodos fecha a panela e estabelece arco elétrico entre os eletrodos/aço líquido) e remoção de gases (forno a vácuo – RH, Ruhrstahl Heraeus)

O último passo do processo é a solidificação do aço fabricado a fim de produzir lingotes para os processos de conformação mecânica. Há dois tipos de lingotamento, sucintamente descritos abaixo:

- Convencional (ou fundição): o aço líquido é solidificado em lingoteiras estáticas ou moldes diversos;

- Contínuo: o metal líquido é solidificado em lingoteiras refrigeradas de forma a produzir placas ou tarugos continuamente.

O papel dos refratários na indústria siderúrgica é essencial, pois além de resistirem a circunstâncias extremas de temperatura sem fundir ou decompor, apresentam grande capacidade em permanecer não reativos e inertes quando expostos a ambientes severos. Os refratários também garantem a integridade e segurança ao processo, proporcionando adicionalmente isolamento térmico às instalações.

Diversos tipos de materiais e composições podem ser utilizados e isso, em grande parte, é o que caracteriza o desempenho de uma cerâmica refratária. Baseado nisso existem várias classificações: argila refratária, que tem como as principais matérias-primas argilas refratárias de alta pureza, normalmente misturas de alumina e sílica; de sílica, o qual o principal componente é a sílica; básica, ricos em periclásio, ou magnésio (MgO); e os especiais, utilizados em aplicações bem específicas. Alguns desses materiais são óxidos com purezas relativamente elevadas, muitos dos quais podem ser produzidos com baixa porosidade. Além disso, os refratários podem ser desenvolvidos para atender requisitos pré-estabelecidos, como reduzir o consumo de energia, aumentar sua vida útil, resistir a corrosão, suportar cargas, resistência a choques térmicos e etc.

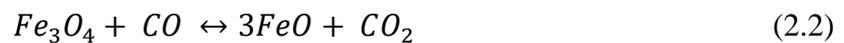
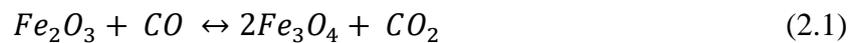
Existem inúmeros equipamentos siderúrgicos que possuem revestimento refratário, tais como coqueiras, panela de aço, conversores a oxigênio de aciaria, fornos elétricos a arco, caçambas de gusa e aço, etc., e o alto forno, que é um componente crucial na fabricação do aço. Utilizados na etapa de redução, a importância do estudo do alto forno e, particularmente, do cadinho, é devido a esse equipamento ser de difícil monitoramento por conta das altas temperaturas e pressões utilizadas e, dessa forma, seu controle de operação torna-se complexo.

2.2. Alto Forno

O Alto forno é um reator químico complexo que possui os três estados: gasoso, líquido e sólido. Possui uma altura de 20 a 30 metros, diâmetro de aproximadamente 10 a 12 metros, seu funcionamento é ininterrupto por anos e sua campanha pode variar de 10 a 20 anos.

Seu funcionamento ocorre em contra-corrente, onde basicamente gases quentes ascendentes trocam calor e reduzem as camadas de carga metálica que se deslocam no sentido descendente. O minério de ferro, coque, sinter, pelotas e fundentes são alimentados continuamente pelo topo do alto forno. Também são adicionados carvão fino moído pelas

ventaneiras com ar pré-aquecido a temperatura de cerca de 1200°C. O oxigênio contido no ar soprado entra em contato com o coque aquecido a aproximadamente 1500°C no “*raceway*” ou, na também chamada, Zona de combustão, e, por meio de uma reação exotérmica forma o dióxido de carbono (CO₂), equações 2.1 e 2.2, que reage instantaneamente com o carbono do coque e forma monóxido de carbono (CO) em uma reação endotérmica chamada reação de Boudouard, descrita na equação (2.3). O ar que é soprado pelas ventaneiras contém umidade (H₂O) que, também, reage com o carbono do coque e gera os gases redutores CO e H₂.



Caso algum produto não seja reduzido, é posteriormente reduzido em regiões que excedam temperaturas de 1000°C por meio da equação a seguir:



2.2.1. Estrutura do Alto Forno

O Alto Forno pode ser dividido em cinco zonas distintas. São elas (Fausta Gandra, 2006):

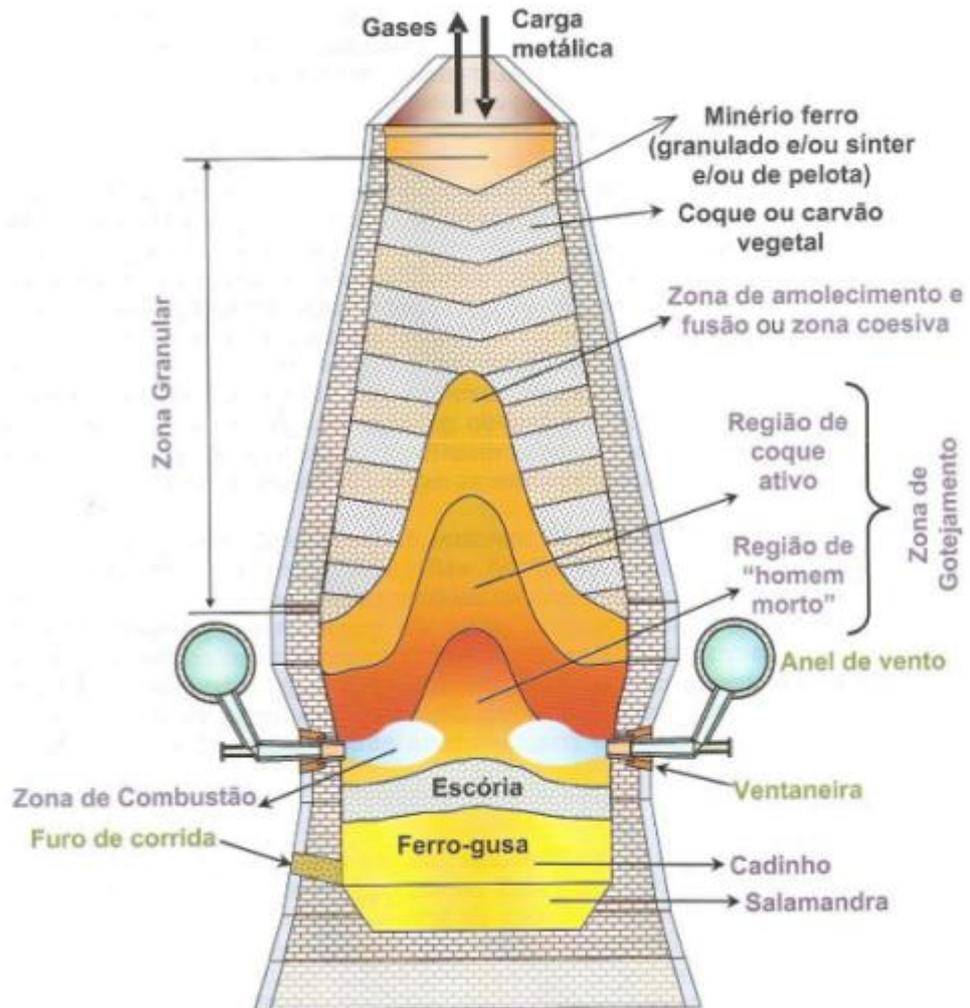
- Zona Granular: Localizada no topo do forno, é constituída por camadas alternadas de combustível/redutor (coque ou carvão vegetal) e carga metálica (minério granulado, sinter e pelota), cuja configuração é mantida mais ou menos inalterada ao longo do forno;
- Zona de amolecimento e fusão ou zona coesiva: Região constituída de camadas de combustível/redutor e de carga metálica semi-fundida;
- Zona de coque ativo: Região composta por um leito de combustível/redutor, através do qual escoam, em sentido descendente, metal e escória líquidos

provenientes da zona coesiva, e em sentido ascendente, os gases provenientes da região das ventaneiras. O combustível presente nesta região é continuamente consumido;

- Zona de combustão (*raceway*): Consiste de uma cavidade formada em frente às ventaneiras. Nessa região ocorre a queima do combustível com ar quente injetado;
- Zona de coque estagnante ou homem morto: Composta por uma coluna de coque, em contato com ferro-gusa e escória líquidos. O combustível dessa região é consumido muito lentamente, através da dissolução do carbono no ferro líquido.

Essas zonas são ilustradas na Figura 1.

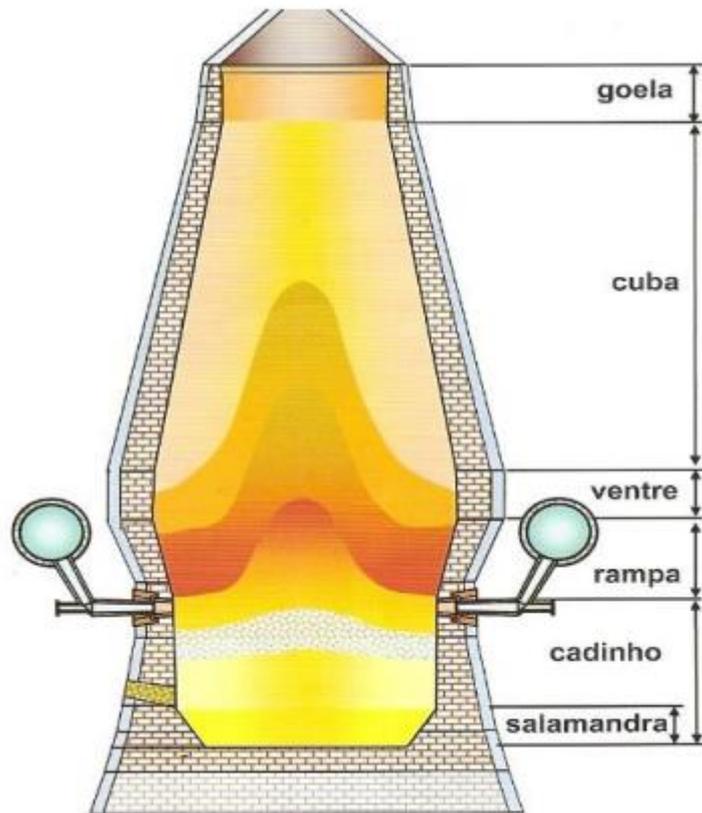
Figura 1: Regiões Internas do Alto



Forno (Rizzo, 2009)

As regiões externas do Alto forno também possuem divisões, conforme descritas na Figura 2 a seguir:

Figura 2: Regiões Externas do Alto Forno



Fonte: (Rizzo, 2009)

2.2.2. Cadinho e Homem Morto

Como citado anteriormente, o cadinho é a parte mais importante do alto forno pois a campanha de vida de um forno depende consideravelmente da durabilidade do refratário que reveste o seu interior.

No interior do cadinho não ocorrem mais reações e é onde ficam armazenados os líquidos fundidos, escória e ferro-gusa. Grande parte do cadinho também é preenchida pelo homem morto, que pode estar flutuando completamente no banho de líquidos fundidos, parcialmente ou assentado no fundo do cadinho.

A porosidade do homem morto é entre 0,3 e 0,5, o que indica que somente 30 a 50% do volume total é disponível para os líquidos se o homem morto preenche totalmente o cadinho (Shao, 2013).

A posição do homem morto tem grande influência sobre a erosão e formação da massa de tamponamento. Dependendo da localização e formato do homem morto, pode formar uma zona de recirculação de alta velocidade perto da massa e promover desgaste, segundo Chen et al. (2005), em 1985, Fukutake, em experimentos utilizando modelos bidimensionais, observou caminhos preferenciais do fluido até o furo de gusa. De acordo com ele, primeiro o líquido vai para baixo na região livre de coque, e posteriormente sobe para o furo de gusa.

Outro ponto é que, se o homem morto estiver muito afastado do furo de gusa no momento de injeção da massa, o “cogumelo” não será formado e, dessa forma, não protegerá o refratário.

Como não é possível obter medições de variáveis diretas do alto forno, devido sua alta temperatura e complexidade, modelos de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD, sigla em inglês) têm sido estabelecidos para os estudos e análises.

2.2.3. Massa de tamponamento e Furo de Gusa

A massa de tamponamento possui um papel fundamental na fabricação do ferro gusa. É ela que tampona o furo de gusa, que é perfurado quando o cadinho está preenchido com ferro gusa e escória, e é tamponado quando o fluxo dos mesmos termina. Qualquer tipo de falha da massa de tamponamento durante sua utilização significa comprometimento na fabricação do ferro gusa, podendo culminar na interferência e retardo da produção de aço. Para que se tenha uma ideia da severidade do ambiente no qual a massa de tamponamento opera, um simples furo de corrida pode produzir 5000 toneladas por dia de gusa (Ribeiro, 2010). Dependendo do volume do alto forno, ele possui um número de furos de gusa, podendo variar de 1 até 4 furos. Quando possui apenas um furo, o processo não é contínuo e quando há mais de um furo de gusa, usa-se sempre dois furos simultaneamente. Os furos de gusa podem ser de 2 a 4 metros de comprimento, o que pode demandar de 200 a 400 kg de massa para preencher o furo em um tempo entre 20 a 40 segundos (Ribeiro, 2010).

Outra função importante da massa de tamponamento é a proteção do refratário do cadinho. A massa inserida no furo de corrida irá se acumular e solidificar no interior do cadinho formando uma camada protetiva com o formato de um “cogumelo”, o qual é principalmente concentrado bem abaixo do furo de corrida e menos para as laterais e acima (Shao, 2013).

2.3 Modelagem dos Fluxos Internos do Cadinho

O Alto forno é um equipamento de extrema complexidade e com diversas variáveis, assim, com o objetivo de simplificar seu estudo, ele é dividido. Como já citado anteriormente, o cadinho é o principal elemento responsável pela longevidade de sua campanha. Desse modo, inúmeros trabalhos já foram realizados para simular o comportamento dos fluxos internos do cadinho. No início da década 70, diversos modelos bi e tridimensionais foram desenvolvidos no intuito de identificar o escoamento do líquido em meio poroso dentro do cadinho do alto-forno (Chatterjee et al., 1994). Havelange e Franssen (2002) estudaram sobre a erosão no cadinho durante o processo de tamponamento do furo de gusa e diz que a erosão causada pela transferência de massa no cadinho é o fator mais importante para a determinação da sua campanha. Ainda que o presente estudo não analise a transferência de massa, o estudo da quantidade de movimento durante o esvaziamento dos fluidos é o primeiro passo a ser feito.

Outros autores dedicaram-se a estudar o fluxo da escória e ferro gusa. (Shao e Saxén 2013) descrevem, a partir de um modelo integrado de CFD, o fluxo de ferro gusa e a erosão causados no cadinho por tensão de cisalhamento induzida pelo fluxo dos fluidos. O fluxo de líquido no cadinho do alto-forno é geralmente complexo e não aparece em um único regime de fluxo: os líquidos fundidos estão no regime de Baixo Número de Reynolds (LNR, sigla em inglês) à medida que gotejam no cadinho, enquanto se aceleram gradualmente à medida que se aproximam do furo de gusa, resultando em fluxos com regime de Alto Número de Reynolds (HRN, sigla em inglês) nas proximidades do furo de gusa. Além disso, a velocidade do fluxo aumenta nas zonas locais livres de coque devido a uma diminuição repentina na resistência ao fluxo.

Shao e Saxén (2013) também estudaram a interface de ferro gusa e escória na região do furo de gusa, esse trabalho descreve o comportamento transiente do fluxo de ferro gusa e escória no furo de gusa e foi simulado aplicando o modelo de Volume de Fluido, o mesmo adotado para este trabalho, o qual o cadinho foi projetado como um reservatório de líquido de volume finito para gerar condições apropriadas de entrada de fluxo para o furo de gusa e dessa forma aliviar consideravelmente a carga computacional, pois todas as dimensões do cadinho são grandes em comparação com o tamanho do furo de gusa. Os resultados calculados mostraram que o padrão de fluxo separado pode ser dominante no furo quando as vazões dos líquidos são comparáveis durante o vazamento.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Fluidodinâmica Computacional

A Fluidodinâmica Computacional ou CFD (do inglês *Computational Fluid Dynamics*), é a área do conhecimento que trata da simulação numérica de escoamentos de fluidos, transferência de calor e fenômenos relacionados, como reações químicas, combustão, aeroacústica etc. A Fluidodinâmica Computacional teve origem a partir da fusão de duas disciplinas: mecânica dos fluidos e cálculo numérico. As equações que regem o escoamento de fluidos têm origem na mecânica dos fluidos e podem ser resolvidas por meio de diferentes métodos numéricos.

Os métodos de discretização mais difundidos são o método das diferenças finitas, o método dos elementos finitos e o método dos volumes finitos, sendo este último o mais utilizado na fluidodinâmica computacional. Com esses métodos, troca-se o domínio contínuo por um domínio discreto, o qual um conjunto de volumes de controle é utilizado para representar o domínio original.

A equações algébricas são resolvidas em cada um dos volumes de controle, gerando um sistema de equações que deve ser resolvido numericamente. Essas equações são resolvidas com o apoio de softwares de Fluidodinâmica Computacional, os quais possuem capacidade para solucionar rapidamente e com precisão os mais diversos problemas de CFD.

3.2 Modelos de Escoamentos Multifásicos

De acordo com (Brennen, 2013) o termo fluxo multifásico é utilizado para se referir a qualquer fluxo de fluido que consiste em mais de uma fase ou componente. Entretanto, essa definição ainda é muito ampla, dessa forma, segundo Paladino, o sistema multifásico pode ser definido como uma região do espaço onde coexistem é a fração de dois ou mais fluídos imiscíveis separados por uma interface. Essa interface pode ser conexa, desconexa, ou uma combinação das duas interfaces, onde a mesma fase pode aparecer em forma contínua ou dispersa. Define-se uma interface conexa quando as dimensões das fases separadas são semelhantes, como por exemplo em um escoamento estratificado. Enquanto uma interface desconexa é definida como aquela em que as porções das fases separadas possuem grande disparidade dimensional como, por exemplo, um escoamento de bolhas.

3.2.1. Abordagem Numérica

Para a descrição das fases existem as abordagens Euleriana e Lagrangeana. Na Euleriana, o foco é sobre um domínio espacial fixo, em que as partículas não são seguidas individualmente. Esta formulação especifica a velocidade em cada ponto do espaço num dado instante de tempo e baseia-se na conservação de massa, energia e momento, em volumes de controle definidos. Já a abordagem Lagrangeana consiste em seguir todas as partículas do fluido, por exemplo, por meio de uma equação para a trajetória de cada partícula. Matematicamente, a descrição Lagrangiana dá a posição de cada partícula em todo instante de tempo.

Todavia, para escoamentos multifásicos, é necessária a descrição da interação entre as fases, surgindo daí, as abordagens Euleriana-Lagrangeana e Euleriana-Euleriana. A primeira é aplicada quando existe uma fase contínua e outra dispersa, baseando-se na aplicação das equações de conservação da quantidade de movimento para cada partícula. Já a segunda leva em consideração todas as fases, contínuas e dispersas, envolvidas como meios contínuos, em que as equações desenvolvidas se baseiam na conservação de massa, energia e momento, acrescentando termos de interação entre as fases. Nela ainda existem três tipos de métodos, sendo eles o Euleriano-Euleriano, o Modelo de Mistura e o Volume de Fluido.

O modelo Euleriano-Euleriano permite a modelagem de várias fases separadas, mantendo a interação. As fases podem ser líquidas, gases ou sólidos em praticamente qualquer combinação e as equações de quantidade de movimento e conservação de massa são resolvidas para cada fase.

O Modelo de Mistura é um modelo multifásico simplificado. Ele pode ser usado para modelar fluxos multifásicos onde as fases se movem em velocidades diferentes, modelar fluxos multifásicos homogêneos com acoplamento muito forte e fases se movendo na mesma velocidade e também são para calcular a viscosidade não newtoniana. É usado tanto para escoamentos multifásicos granular quanto para fluido-fluido, podendo ser aplicado como um substituto para o modelo Euleriano em situações no qual as leis de interface são desconhecidas ou pouco confiáveis, bem como para condições em que as fases secundárias apresentam uma ampla distribuição.

A abordagem de Volume de Fluido pode modelar dois ou mais fluidos imiscíveis, resolvendo um único conjunto de equações de momento no qual a fração volumétrica de cada

fase é obtida para cada volume de controle do domínio. Esta formulação baseia-se no fato de que dois ou mais fluidos (ou fases) não são interpenetrantes. Para cada fase adicionada ao modelo, uma variável de fração de volume da fase na célula computacional é introduzida. Em cada volume de controle as frações de volume de todas as fases se somam. Os campos para todas as variáveis e propriedades são compartilhadas pelas fases e representam valores médios do volume, desde que a fração do volume de cada uma das fases seja conhecida em cada local. Assim, as variáveis e as propriedades em qualquer célula são puramente representativas de uma das fases ou de uma mistura das fases, dependendo dos valores da fração volumétrica. Em outras palavras, se a fração de volume do fluido q^{th} na célula é denotado como α_q , então as seguintes três condições são possíveis:

$\alpha_q = 0$: A célula está vazia (do fluido q^{th})

$\alpha_q = 1$: A célula está cheia (do fluido q^{th})

$0 < \alpha_q < 1$: A célula contém a interface entre o fluido q^{th} e um ou mais outros fluidos.

E com base no valor local de α_q , as propriedades e variáveis apropriadas serão atribuídas a cada volume de controle dentro do domínio.

3.3 Equações de Navier-Stokes para a Abordagem de Volume de Fluido

A equação da continuidade para o modelo utilizado no trabalho, Volume de Fluido, é descrita pela equação 3.1. Os termos de transferência de massa entre as fases e o termo de geração não aparecem pois não foram considerados no problema simulado.

$$\frac{\partial(\rho_m)}{\partial t} + \nabla(\rho_m \mathbf{u}_m) = 0 \quad (3.1)$$

O qual \mathbf{u}_m é a velocidade média em massa da mistura:

$$\mathbf{u}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k}{\rho_m} \quad (3.2)$$

α_k é a fração volumétrica para cada fase k de um número n de fases. A massa específica da mistura (ρ_m) é obtida por meio da equação a seguir:

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (3.3)$$

Já a equação de transferência de quantidade de movimento é representada na equação 3.4:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_m u_m)}{\partial t} + \nabla(\rho_m u_m u_m) \\ = \nabla p + \rho_m g + F + \nabla[\mu_m(\nabla u_m + \nabla u_m^T)] \\ + \nabla \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k u_{d,k} u_{d,k} \right) \end{aligned} \quad (3.4)$$

No qual F é força de corpo, g é a aceleração da gravidade, p é a pressão manométrica e $u_{d,k}$ é a diferença de velocidade de uma fase k em relação a velocidade média da mistura que é representada pela equação abaixo:

$$u_{d,k} = u_k - u_m \quad (3.5)$$

A viscosidade da mistura é obtida a partir da equação:

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k \quad (3.6)$$

O qual μ_k é a viscosidade de cada fase presente na mistura.

3.4 Modelos de Turbulência

No regime de escoamento laminar o fluido se move de forma suave e organizada em camadas ou lâminas, não existe mistura macroscópica de camadas adjacentes de fluido. O processo de transição de um regime laminar para um regime turbulento foi identificado por

Osborn Reynolds em 1883, e ocorre pela introdução de perturbações num escoamento inicialmente estável (laminar). Essas perturbações são amplificadas, multiplicadas e se transformam em turbulências.

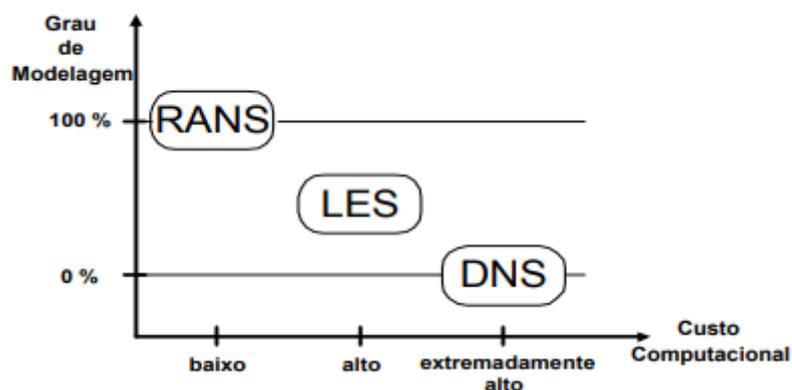
A turbulência é uma característica do escoamento e não do fluido, ela ocorre nas três dimensões, é um fenômeno contínuo, altamente dissipativo e difusivo e por isso é um fenômeno complexo de descrever. Existem três formas de se modelar a turbulência: DNS (*Direct Numerical Simulation*), LES (*Large Eddy Simulation*) e RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*).

As equações da técnica RANS são obtidas através de um conjunto de médias das equações do Navier-Stokes e da continuidade. O elemento crítico da modelagem RANS é a representação das tensões de Reynolds ou tensões turbulentas que descrevem os efeitos das flutuações de pressão e velocidades (Rezende, 2009).

Nesta técnica, as grandes escalas, consideradas como os turbilhões que contém energia, são calculadas diretamente e, para as pequenas escalas, utilizam-se modelos de escalas sub malha (Rodi, 2006). Neste caso, a formulação é necessariamente transiente e tri-dimensional. (Rezende, 2009)

Na figura abaixo, é possível identificar os três modelos de turbulência de acordo com o seu grau de modelagem e custo operacional.

Figura 3: Relação entre o grau de modelagem e o custo de computacional dos modelos de turbulência



Fonte: (Rezende, 2009)

Por conta do alto custo operacional dos modelos LENS e DNS, a modelagem utilizada é o RANS. As equações da modelagem de RANS são obtidas por meio da substituição das velocidades ($u_i = \bar{u}_i - u'_i$) nas equações de continuidade e quantidade de movimento e aplicando a média temporal dessas equações.

Após a substituição das velocidades, os tensores de Reynolds aparecem nas equações, eles são responsáveis pela descrição das turbulências que ocorrem no escoamento.

Alguns autores desenvolveram hipóteses para sua descrição, que se ajustam melhor para cada tipo de problema. Neste trabalho a hipótese selecionada foi a de Boussinesq. Um dos modelos que adotam a proposta de Boussinesq, dentre outros, é o modelo k- ϵ de modelagem da turbulência. Devido ao seu baixo custo computacional e por ter uma precisão razoável, este modelo é largamente utilizado. Nesse modelo os tensores de Reynolds são descritos de forma similar aos tensores de tensão laminar:

$$\overline{\tau_{turb}} = \mu_{turb}(\nabla u + \nabla u^T) - \frac{2}{3}\mu_{turb}\nabla u \bar{I} \quad (3.7)$$

A equação 3.8 introduz o conceito de viscosidade turbulenta, μ_{turb} , que no modelo k- ϵ é determinada pela equação a seguir, na qual k e ϵ representam, respectivamente, a energia cinética turbulenta e taxa de dissipação turbulenta:

$$\mu_{turb,m} = \rho_m C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3.8)$$

O modelo k- ϵ é um modelo semi-empírico baseado na adição de uma equação de transporte modelo para a energia cinética de turbulência (k) e outra para sua taxa de dissipação (ϵ):

$$\frac{\partial(\rho_m k)}{\partial t} + \nabla(\rho_m u_m k) = \nabla\left(\frac{\mu_{turb,m}}{\sigma_k} \nabla k\right) + G_{k,m} - \rho_m \epsilon \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial(\rho_m \epsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho_m u_m \epsilon) = \nabla\left(\frac{\mu_{turb,m}}{\sigma_\epsilon} \nabla \epsilon\right) + \frac{\epsilon}{k}(C_{1\epsilon} G_{k,m} - C_{2\epsilon} \rho_m \epsilon) \quad (3.10)$$

$G_{k,m}$ é a produção de energia cinética turbulenta devido a forças viscosas descrita na equação abaixo:

$$G_{k,m} = \mu_{\text{turb},m} (\nabla u_m + \nabla u_m^T) : \nabla u_m \quad (3.11)$$

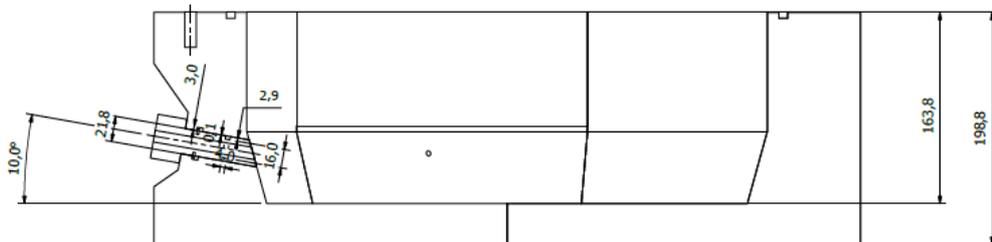
As constantes $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, C_μ , σ_k , σ_ε presentes nas equações 3.8, 3.9 e 3.10 a 3.11 foram adotadas de acordo com Laquini (2014) com os valores apresentados a seguir:

$$C_{1\varepsilon} = 1,44; C_{2\varepsilon} = 1,92; C_\mu = 0,09; \sigma_k = 1,0; \sigma_\varepsilon = 1,3$$

3.5 Geometria Simulada e Malha

A geometria utilizada foi de um protótipo impresso em impressora 3D, (ilustrado na figura 5) com um material polimérico, produzido durante o estágio obrigatório, a escala utilizada foi de 1:10. A geometria simulada foi baseada em um Alto Forno real, Alto Forno da Usina da Saint-Gobain Canalização, localizada na cidade de Barra Mansa - RJ. Ela possui um cadinho com diâmetro interno menor do que 4,10 metros, diâmetro interno maior do que 4,44 metros, diâmetro externo de 6,026 metros, e possui apenas um furo de gusa (Figura 4).

Figura 4: – Desenho em escala 1:10 em milímetros do Protótipo do Cadinho do Alto Forno



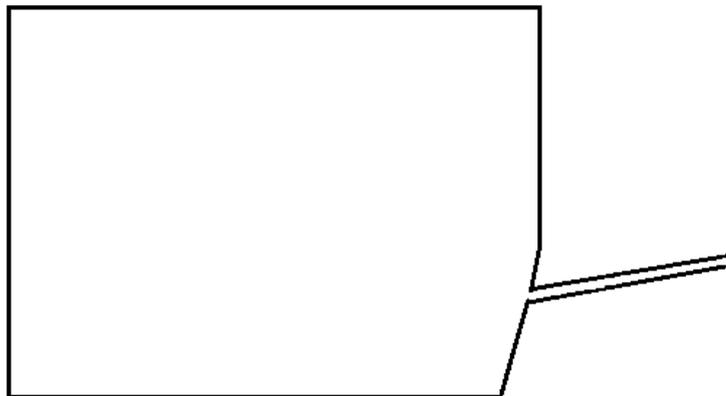
Fonte: Arquivo Pessoal

Figura 5: Protótipo do cadinho impresso em impressora 3D



Fonte: Arquivo Pessoal

Figura 6: Desenho da geometria utilizada na simulação



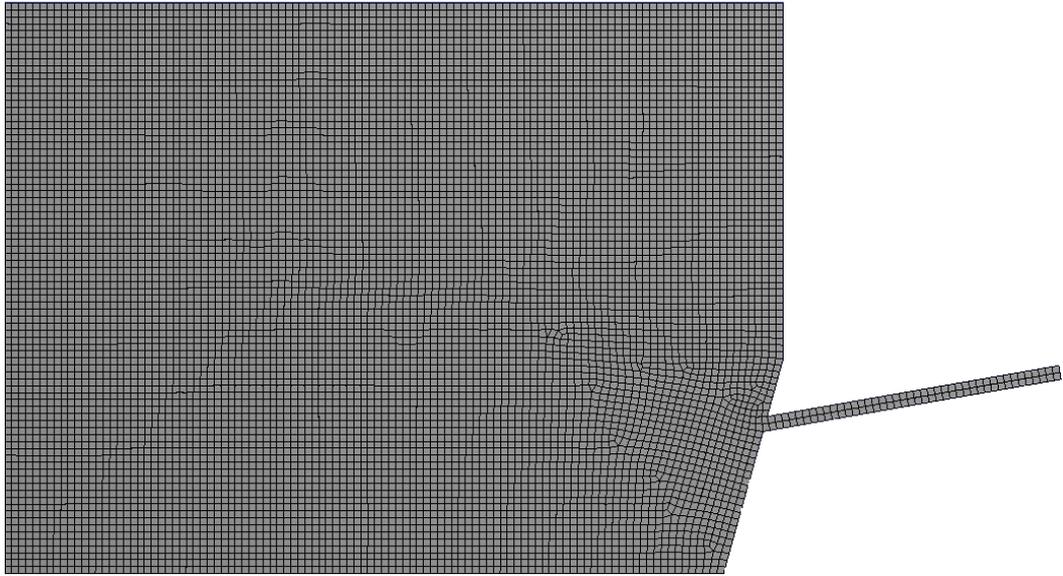
Fonte: Arquivo Pessoal

Para a simulação foi utilizada uma geometria bidimensional representada na Figura 6. Apenas sua metade foi representada devido a simulação ter sido feita em geometria

axissimétrica que, apesar de não possuir uma simetria perfeita foi aplicada para simplificação do problema. Na figura 7 é representada a geometria rotacionada para melhor entendimento.

A malha aplicada foi uma malha quadrilateral, por se tratar de uma geometria bidimensional. A Figura 6 traz o desenho da malha utilizada e a Tabela 1, suas características.

Figura 7: Desenho da malha utilizada na simulação



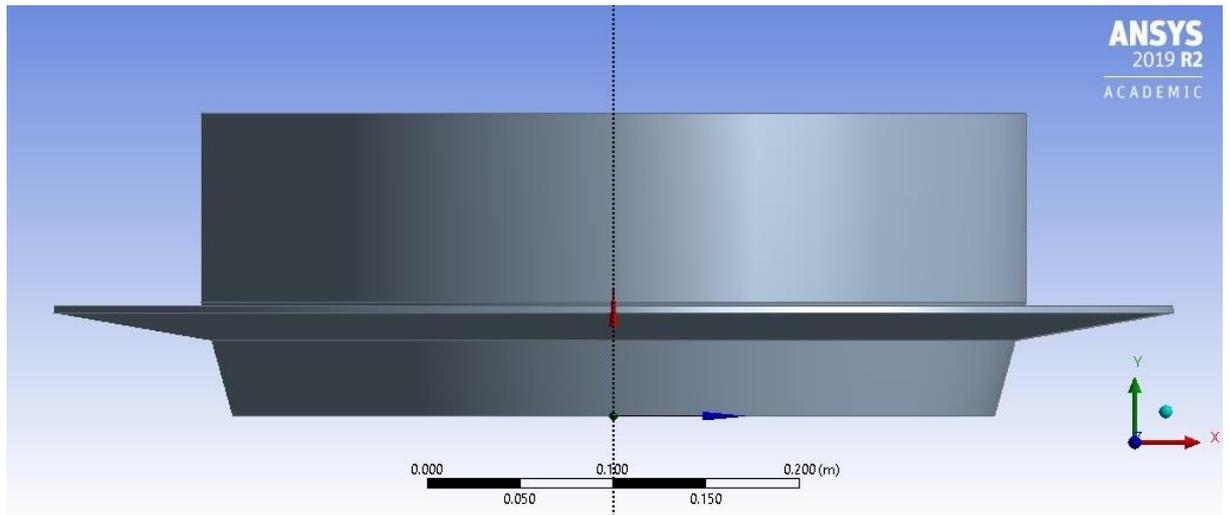
Fonte: Arquivo Pessoal

Tabela 1: Definições da malha

Número de elementos	9072
Número de nós	9304
Tamanho de cada elemento	2 mm

Fonte: Arquivo Pessoal

Figura 8: Geometria rotacionada no eixo de simetria



Fonte: Arquivo Pessoal

3.6 Condições de Contorno

As propriedades das fases contidas na simulação foram consideradas constantes e estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Propriedades físicas das fases

Fase	Densidade [kg/m ³]	Viscosidade [cP]
Ar	$1,225 \times 10^{-6}$	$1,7894 \times 10^{-2}$
Ferro líquido	7,3	25
Escória	2,7	310

Fonte: Arquivo Pessoal

Dois casos com condições iniciais distintas foram simulados no presente trabalho, apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Condições iniciais dos casos simulados

Caso	Pressão [Pa]	Nível inicial de líquido [mm]
1	200000	137,92
2	200000	100,00

Fonte: Arquivo Pessoal

Os dois níveis de líquidos foram simulados para analisar o comportamento do esgotamento do cadinho, com o volume útil totalmente cheio, 84% do volume total (137,92 mm de altura) e com 100 mm de altura, volume baseado de nível máximo de enchimento do cadinho ($E_C^{máx}$), explicado detalhadamente mais abaixo.

A pressão de entrada foi determinada a partir da velocidade que, por sua vez, foi calculada de acordo com a produtividade média por volume útil do Alto Forno real, como apresentado na Tabela 4.

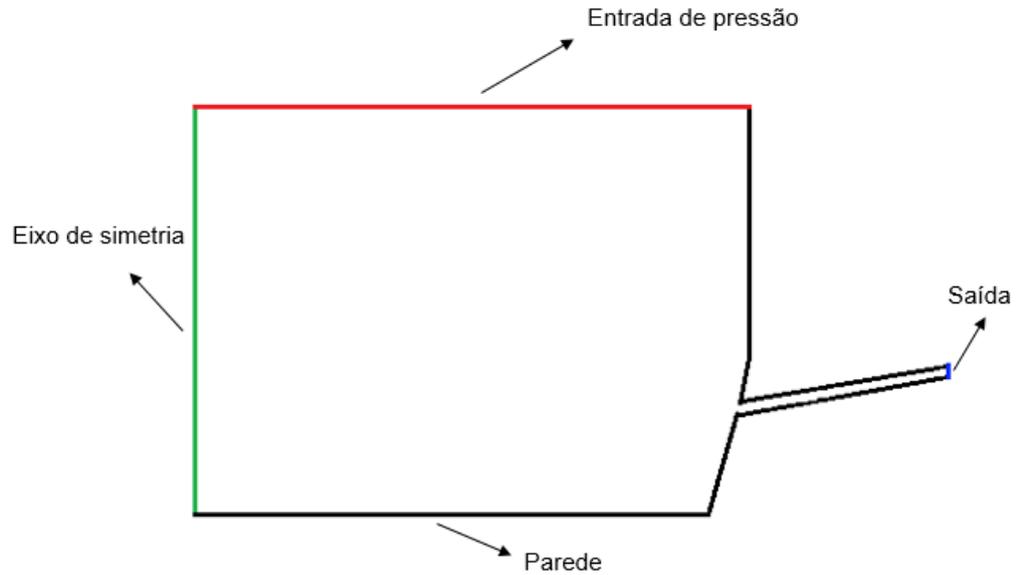
Tabela 4: Dados do Alto Forno real e do Protótipo

Produtividade média por volume útil [ton/dia/m ³]	1,6
Velocidade de saída (Alto Forno real) [m/s]	12,20
Pressão absoluta de entrada (Alto Forno Real) [Pa]	400000
Volume total interno do cadinho real (logo abaixo das ventaneiras) [m ³]	25
Volume total interno (Protótipo) [m ³]	0.025
Volume interno útil do cadinho real [m ³]	21
Volume interno útil (Protótipo) [m ³]	0,021

Fonte: Arquivo Pessoal

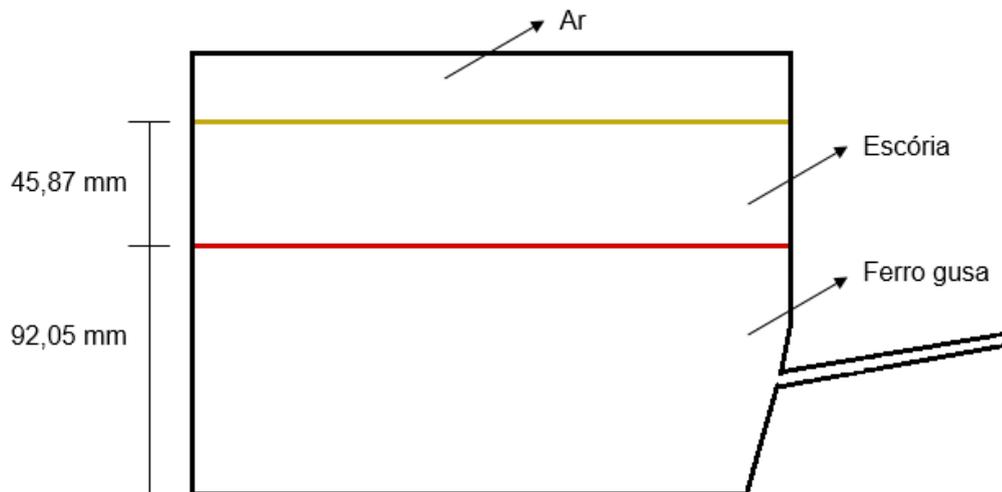
O volume interno útil do cadinho pode variar de 80% a 85% do volume interno total, dependendo do Alto Forno avaliado. Foi adotado neste trabalho o valor de 84% devido a informações da Usina.

Para a simulação utilizou-se um passo de tempo de 0,01 segundos e uma quantidade de 500 passos de tempo, totalizando 5 segundos de simulação total. Entretanto, ao observar a entrada de ar no furo de gusa, a simulação foi interrompida antes de atingir os 5 segundos. O critério de convergência utilizado foi de 10^{-4} . Para o acoplamento pressão velocidade foi utilizado o método PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators) que é mais indicado para escoamentos em regime transiente. As condições de contorno da geometria são ilustradas na Figura 8.

Figura 9: Geometria com condições de contorno adotadas

Fonte: Arquivo Pessoal

Por ser uma simulação multifásica, utilizando o modelo de Volume de Fluido, é necessário a criação de zonas para definir a localização inicial de cada fase. O primeiro caso simulado foi o do volume útil totalmente cheio, ilustrado na Figura 10.

Figura 10: Geometria com zonas das fases da simulação 1

Fonte: Arquivo Pessoal

Foram utilizados valores de altura nível de líquido 28% de escória em volume, que corresponde a um valor de nível de escória padrão na usina, e, conseqüentemente de 56% de ferro gusa, também em volume.

Para a segunda simulação foi adotado um valor de acordo com Fukutake e Okabe (1981) que dizem que considerando o cadinho totalmente preenchido com o leito de combustível sólido, o índice máximo de enchimento do cadinho que assegure uma operação normal do alto-forno deve seguir, entre outras suposições:

- O máximo volume de líquido corresponde a um nível equivalente a 80% da altura entre as ventaneiras e o furo de corrida.

É importante ressaltar de que nesse trabalho não foi levado em consideração o volume ocupado pelo homem morto. Dessa forma, o volume ocupado considerado ideal para o funcionamento do cadinho ainda deve ser menor.

Levando em consideração o valor adotado por (Fausta Gandra, 2006) de nível máximo de enchimento do cadinho ($E_C^{máx}$) de 12% acima do nível correspondente à altura do furo de gusa até as ventaneiras, acima desse valor começarão a ocorrer problemas. Na tabela 5, abaixo, é possível ver as alturas dos níveis de acordo com cada autor, para o problema estudado:

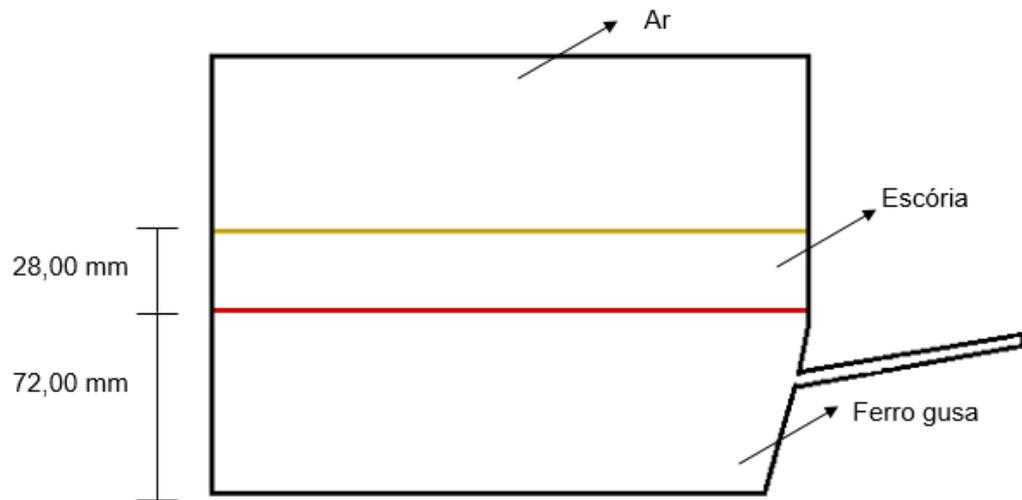
Tabela 5: Alturas de níveis de líquidos no cadinho

Altura do furo de gusa até as ventaneiras [mm]	115,14
Altura máxima de nível de líquidos segundo (Fututake, T; Okabe, 1981) [mm]	92,12
Altura máxima de enchimento do cadinho segundo (Fausta Gandra, 2006) [mm]	103,2

Fonte: Arquivo Pessoal

Dessa maneira, a geometria considerada para o segundo caso está ilustrada na Figura 11.

Figura 11: Geometria com zonas das fases da simulação 2



Fonte: Arquivo Pessoal

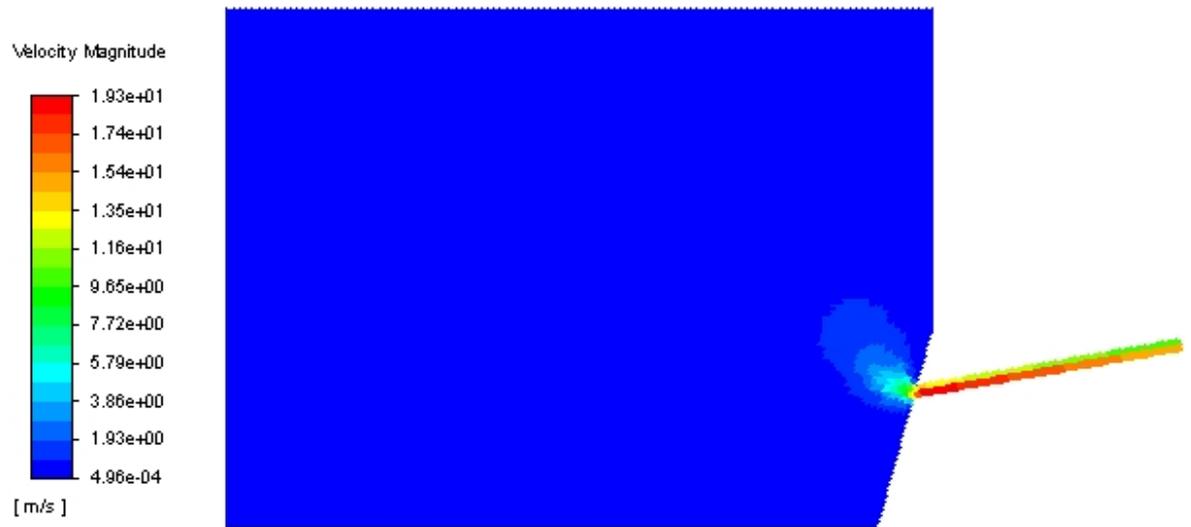
Um valor entre 92,12 mm e 103,12 mm, de 100mm, foi adotado afim de facilitar a construção da geometria e continuar dentro valores estabelecidos na tabela 4 descritos como nível máximo de líquidos e nível máximo de enchimento do cadinho que corresponde a 61,05% do volume total. Para esse caso também foi utilizado 28% de escória em volume e 33% de ferro gusa em volume.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As simulações realizadas neste trabalho foram feitas com o intuito de se analisar a fluidodinâmica das fases internas do cadinho a fim de confirmar a influência do nível de líquidos no comportamento das mesmas durante o esvaziamento do cadinho. Casos como os simulados a seguir só poderiam ser analisados e, portanto, otimizados graças a ferramentas que possibilitam presumir comportamentos em ambientes hostis como esse. A primeira simulação realizada foi com o volume útil totalmente cheio, que representa um total de 84% do volume do cadinho.

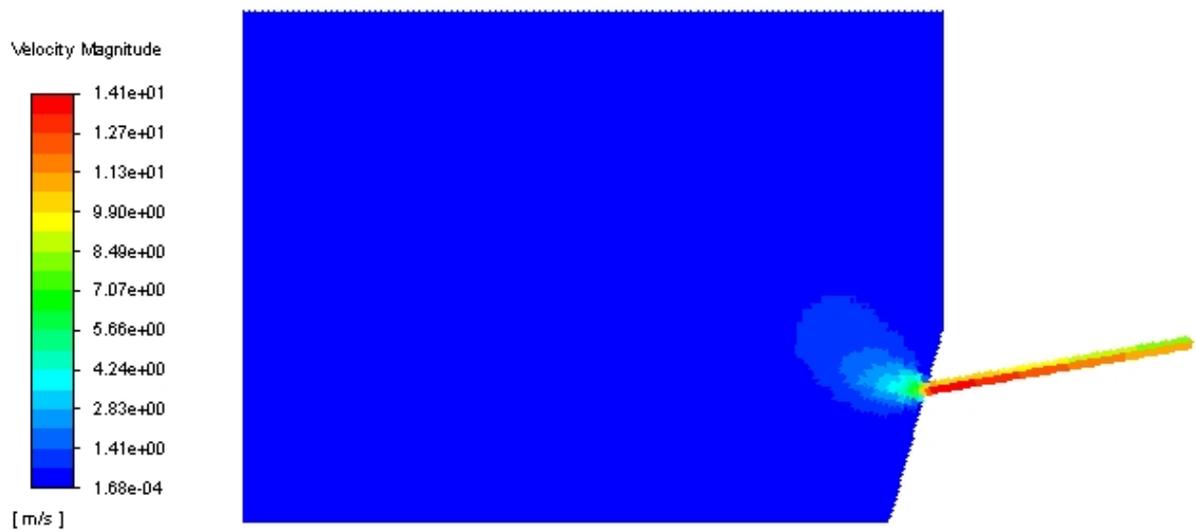
Afim de obter uma análise mais completa, foram feitas comparações em três tempos distintos: 0,05 s, 0,10 s e 0,30 s, para ambas as simulações e registrou-se o perfil de velocidade, de fase de mistura e de energia cinética turbulenta (k).

Figura 12: Perfil de velocidade da mistura no tempo $t = 0,05$ s – Simulação 1



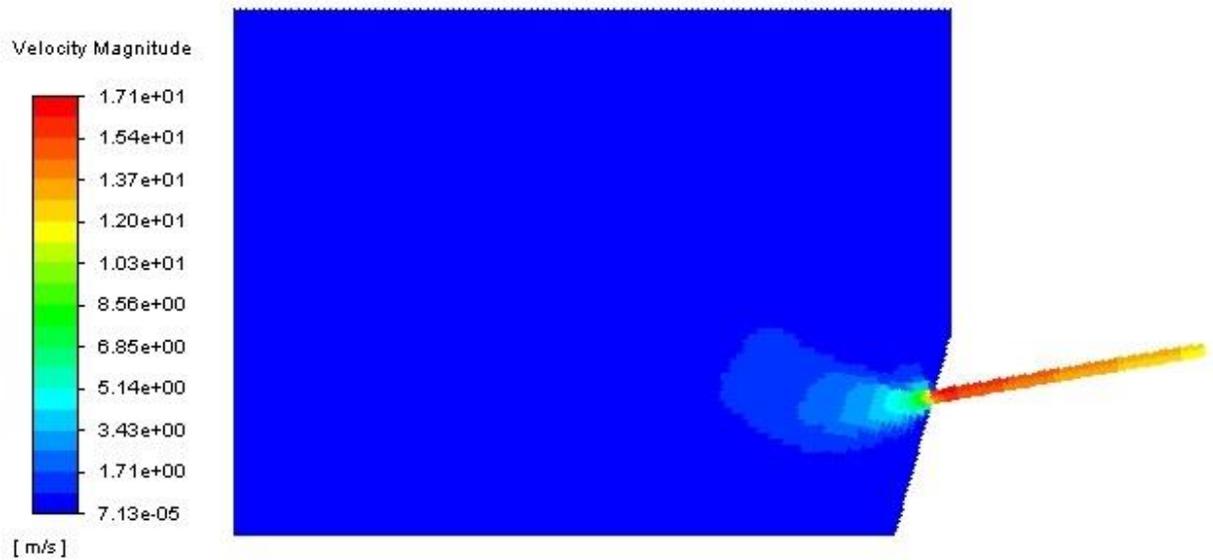
Fonte: Arquivo Pessoal

Figura 13: Perfil de velocidade da mistura no tempo $t = 0,10$ s – Simulação 1



Fonte: Arquivo Pessoal

Figura 14: Perfil de velocidade da mistura no tempo $t = 0,30$ s – Simulação 1



Fonte: Arquivo Pessoal

Podemos ver, a partir dos resultados apresentados nas Figura 12 e 13, que a velocidade começa com um valor máximo de 19,0 m/s mas logo chega em 14,1 m/s, valor relativamente próximo ao valor calculado na tabela 4, de 12,2 m/s, isso significa que o valor de pressão adotada está de acordo com a real.

Pelo perfil da velocidade também é possível notar que a velocidade máxima está na entrada do furo de gusa, o que era esperado pois ao diminuir a área a pressão tende a diminuir e assim a velocidade tende a aumentar.

O aumento da velocidade faz com que a turbulência também aumente nessa região e, conseqüentemente, o desgaste na massa de tamponamento. É possível notar isso com os perfis de energia cinética turbulenta ao longo dos tempos 0,05 s, 0,10 s e 0,30 s retratados nas figuras 15, 16 e 17 respectivamente:

Figura 15: Perfil de energia cinética turbulenta no tempo $t = 0,05$ s – Simulação 1



Fonte: Arquivo Pessoal

Figura 16: Perfil de energia cinética turbulenta no tempo $t = 0,10$ s – Simulação 1



Fonte: Arquivo Pessoal

Figura 17: Perfil de energia cinética turbulenta no tempo $t = 0,30$ s – Simulação 1

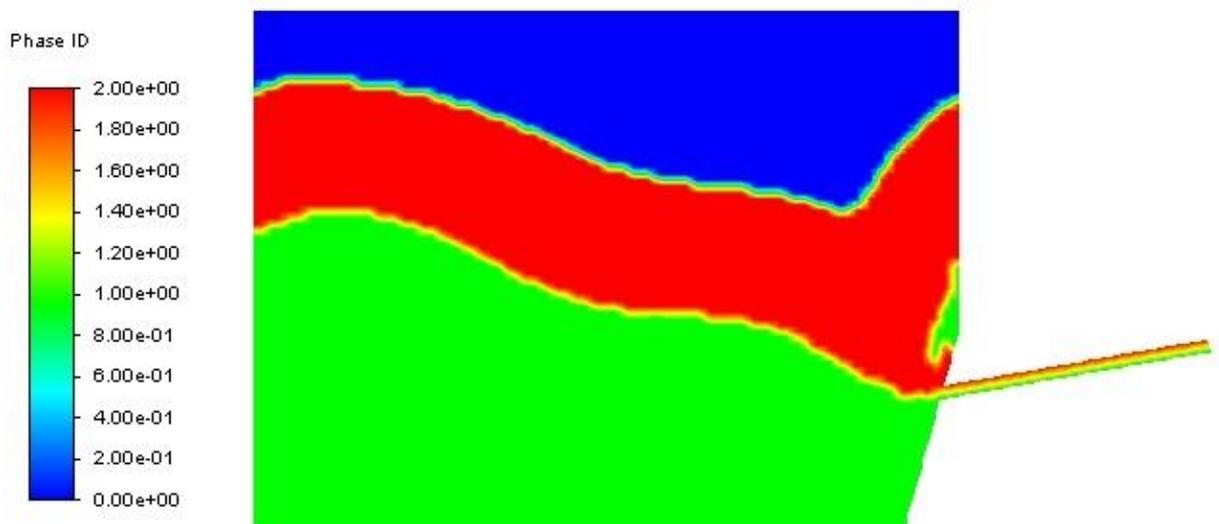


Fonte: Arquivo Pessoal

A partir dessas figuras, é notório que ao aumentar a velocidade a turbulência também aumentará e assim, causará maiores desgastes.

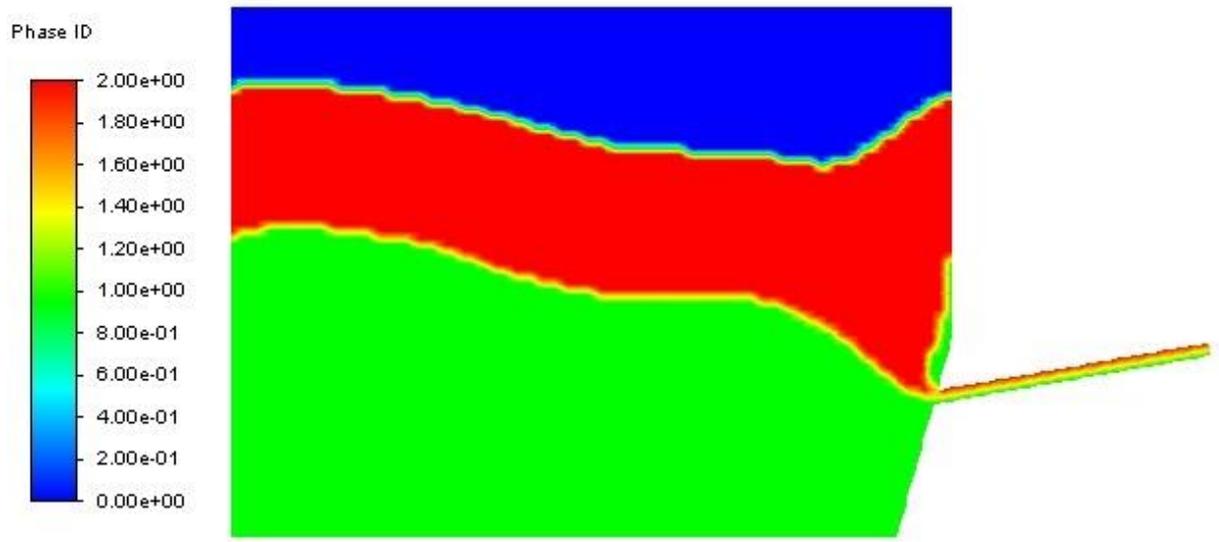
Outro ponto importante na avaliação dos resultados é o comportamento das fases durante o esgotamento. É possível observar nas Figuras 18, 19 e 20 o comportamento do ar e da escória, a partir do instante 0,30 s, é possível ver o ar abrindo caminho até o furo de gusa antes que todo o ferro gusa seja vazado. Nas figuras a seguir, as cores azul, vermelha e verde representam o ar, a escória e o ferro gusa, respectivamente.

Figura 18: Perfil das fases no tempo $t = 0,05$ s – Simulação 1



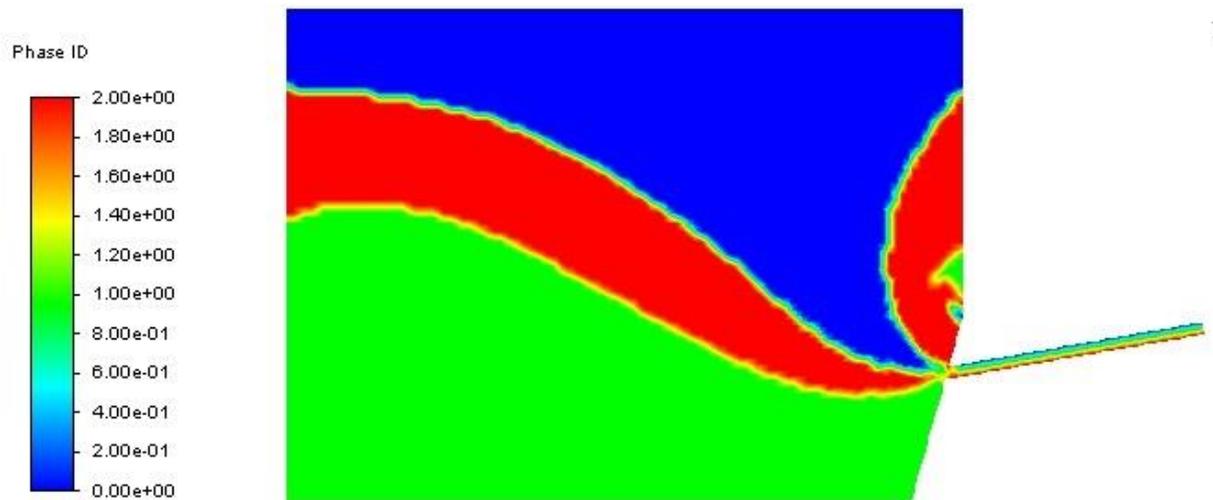
Fonte: Arquivo Pessoal

Figura 19: Perfil das fases no tempo $t = 0,10$ s – Simulação 1



Fonte: Arquivo Pessoal

Figura 20: Perfil das fases no tempo $t = 0,30$ s – Simulação 1



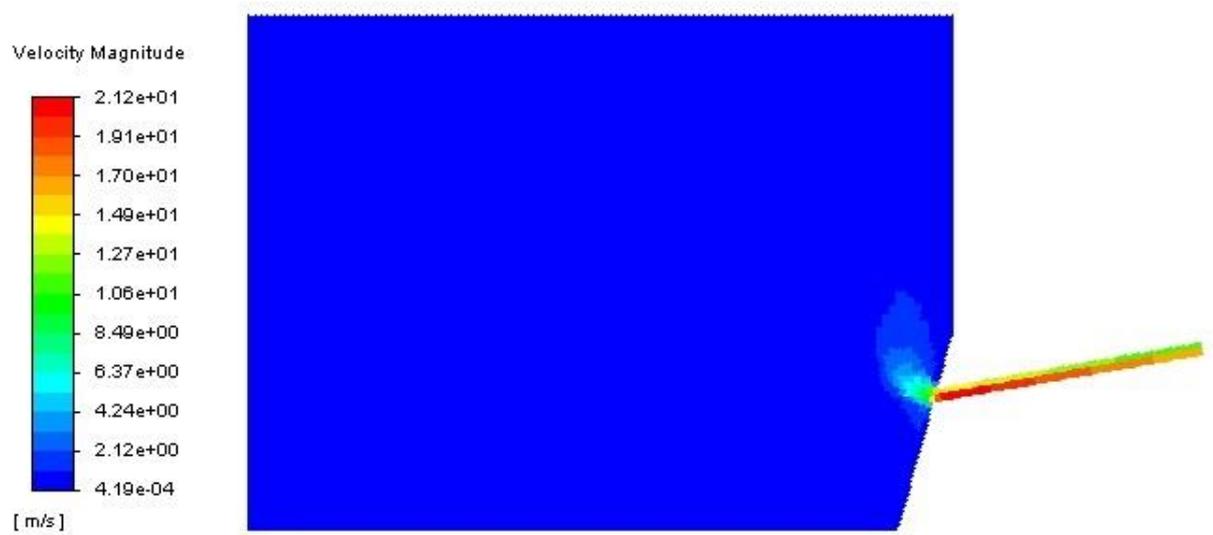
Fonte: Arquivo Pessoal

Os resultados observados na simulação são condizentes, pois com uma altura de nível de líquidos maior do que a altura máxima de enchimento do cadinho, apresentada na Tabela 4, ocorre um problema: uma vazão de ar e uma vazão de escória são observadas no furo antes do esgotamento do ferro gusa, já no tempo $t = 0,30$ s e dessa forma, um acúmulo de líquidos em seu interior.

Já para a pressão, foi mantida constante a 10^5 Pa durante todo o escoamento.

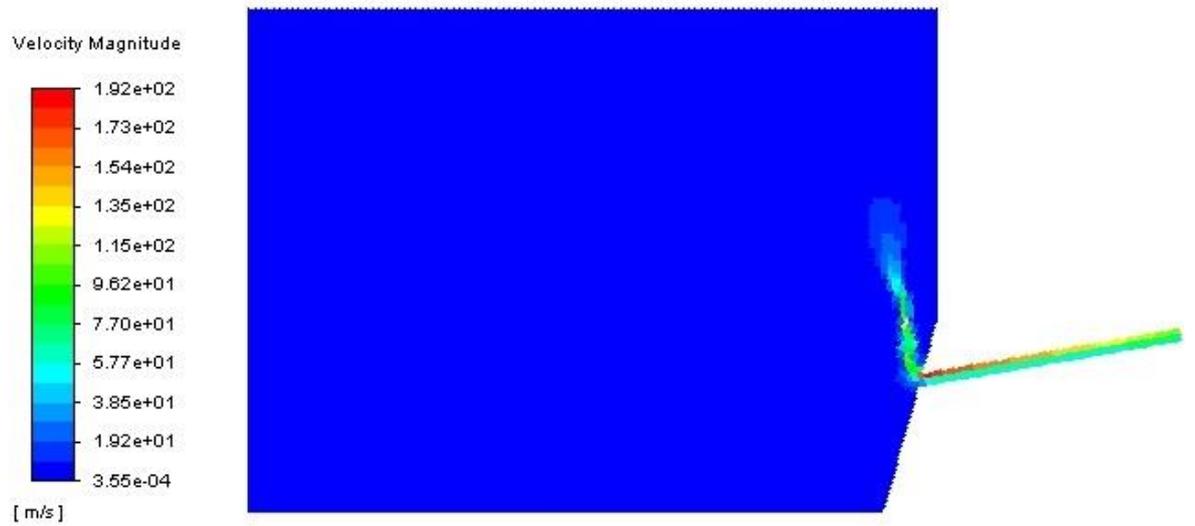
Para a segunda simulação foi adotada a geometria de fases da Figura 11.

Figura 21: Perfil de velocidade no tempo $t = 0,05$ s – Simulação 2



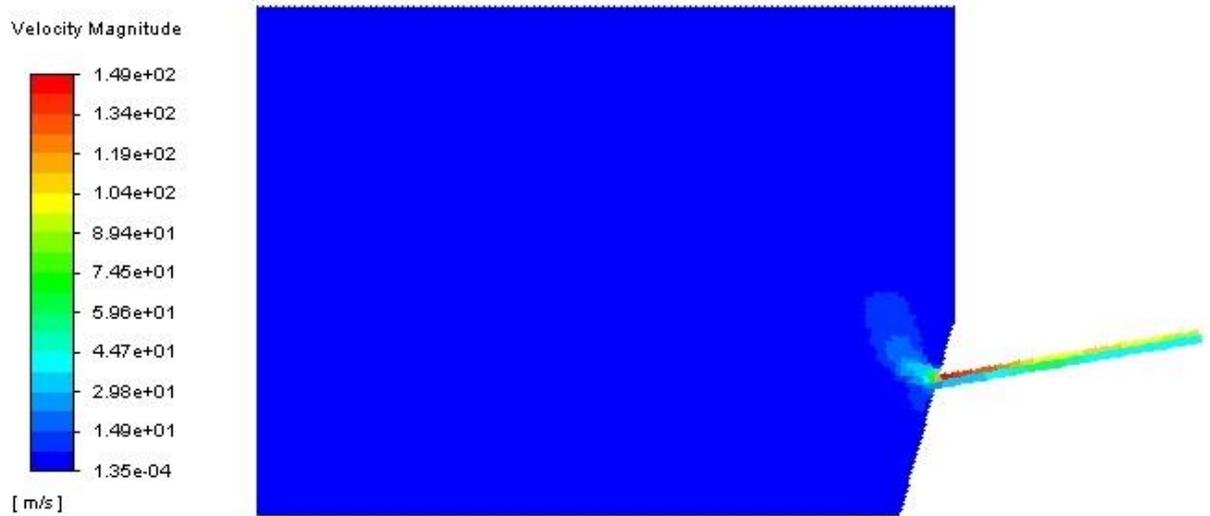
Fonte: Arquivo Pessoal

Figura 22: Perfil de velocidade no tempo $t = 0,10$ s – Simulação 2



Fonte: Arquivo Pessoal

Figura 23: Perfil de velocidade no tempo $t = 0,30$ s – Simulação 2



Fonte: Arquivo Pessoal

Para o caso 2, o volume de líquido inicial no cadinho foi inferior, no perfil de velocidade no tempo $t = 0,10$ s a velocidade máxima já está 192 m/s, o que significa que o ar já entrou no furo de gusa e, nesse caso, somente o ar está escoando pelo furo.

O comportamento do perfil de energia cinética turbulenta para o caso 2 difere do caso 1, pois a velocidade já no instante $t = 0,10$ s está em 149,0 m/s, logo, como a energia cinética turbulenta aumenta à medida que a velocidade aumenta, na figura 25, ela já atinge o valor de $29300 \text{ m}^2/\text{s}^2$

Figura 24: Perfil de energia cinética turbulenta no tempo $t = 0,05$ s – Simulação 2



Fonte: Arquivo Pessoal

Figura 25: Perfil de energia cinética turbulenta no tempo $t = 0,10$ s – Simulação 2



Fonte: Arquivo Pessoal

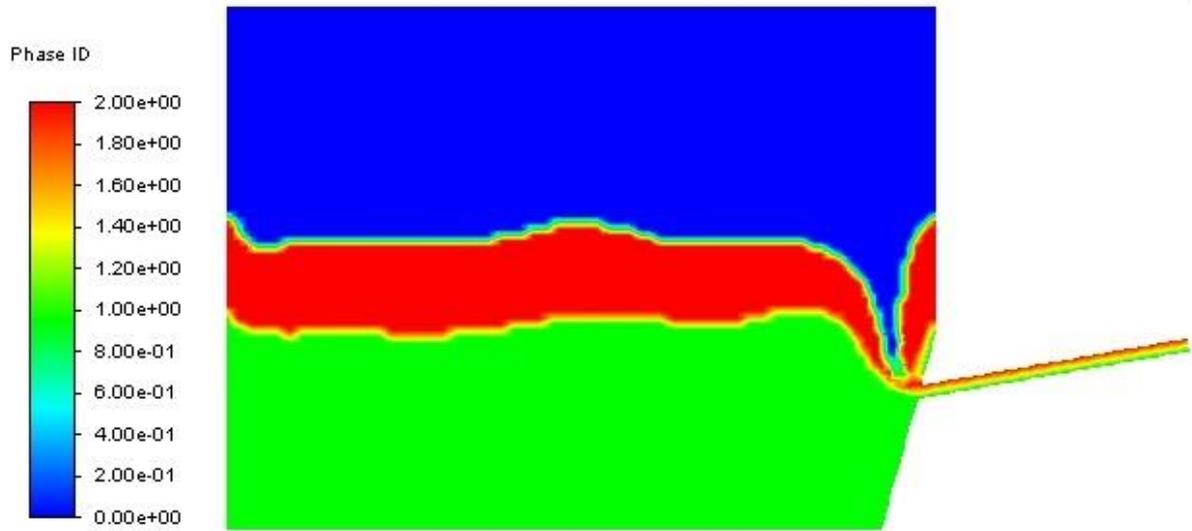
Figura 26: Perfil de energia cinética turbulenta no tempo $t = 0,30$ s – Simulação 2



Fonte: Arquivo Pessoal

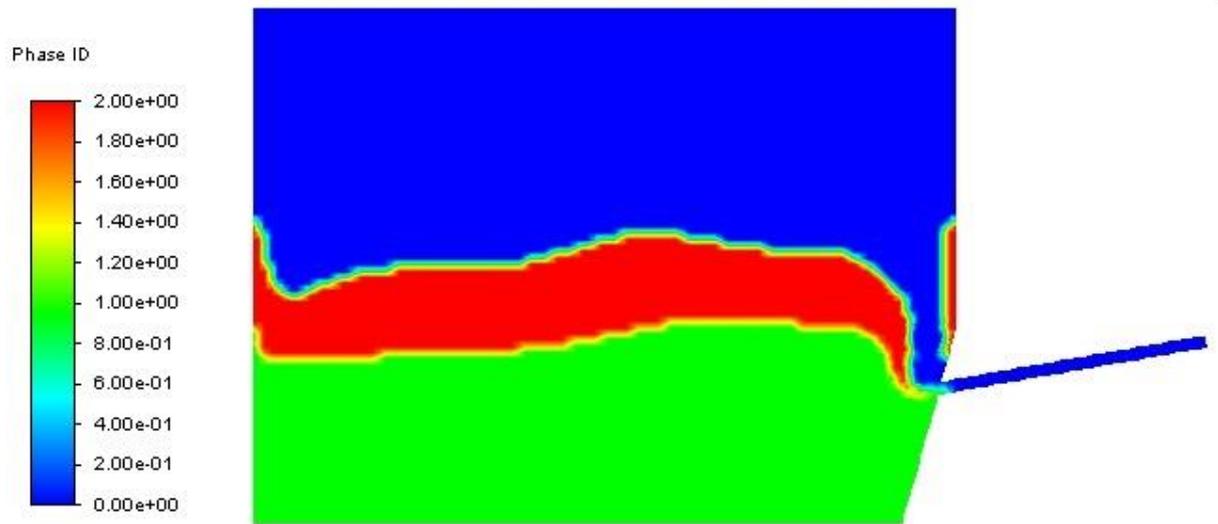
Já sobre o comportamento das fases do fluido durante o esvaziamento, é possível observar na Figura 28, que o mesmo fenômeno ocorrido na simulação 1, ocorre na simulação 2, porém em um tempo menor de simulação, de 0,10 segundos. Isso ocorre devido ao menor nível de líquidos presente nesta simulação.

Figura 27: Perfil das fases no tempo $t = 0,05$ s – Simulação 2



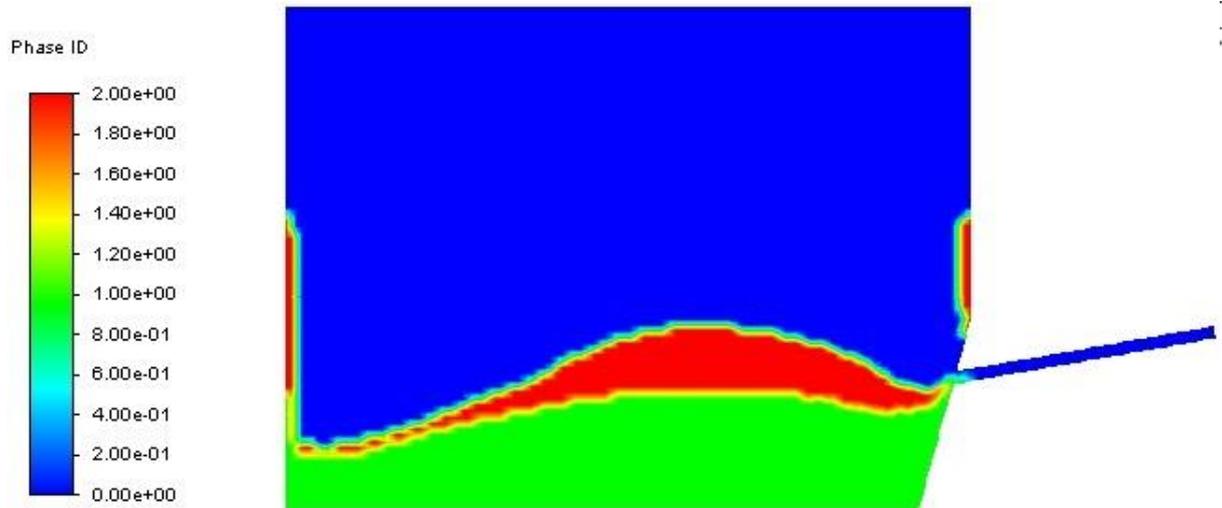
Fonte: Arquivo Pessoal

Figura 28: Perfil das fases no tempo $t = 0,10$ s – Simulação 2



Fonte: Arquivo Pessoal

Figura 29: Perfil das fases no tempo $t = 0,30$ s – Simulação 2



Fonte: Arquivo Pessoal

Uma justificativa para que ocorra esse fenômeno nos dois casos com níveis diferentes de líquidos é o fato de o problema simulado não levar em consideração o volume ocupado pelo homem morto. Dessa maneira, com a presença do homem morto o volume dos líquidos atingiria níveis acima do furo de gusa e, dessa forma, facilitaria o esgotamento do ferro gusa no interior do cadinho.

A tabela abaixo apresenta os resultados dos valores máximos atingidos para as respostas estudados:

Tabela 6: Valores máximos das respostas para cada tempo analisado nas duas simulações

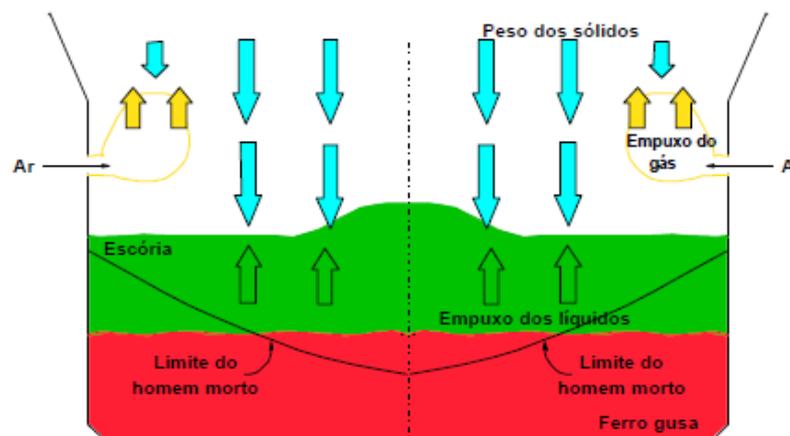
	Simulação 1			Simulação 2		
Tempo [s]	0,05	0,10	0,30	0,05	0,10	0,30
Velocidade máxima [m/s]	19,30	14,10	17,10	21,20	192,00	149,00
Energia cinética turbulenta máxima [m²/s²]	3110	2980	4470	3690	29300	32100
Pressão [Pa]	10 ⁵	10 ⁵	10 ⁵	10 ⁵	10 ⁵	10 ⁵

Fonte: Arquivo Pessoal

De acordo com os resultados obtidos e mesmo que ainda as simulações não levem em consideração a presença do homem morto e transferências de calor e massa, foi possível observar que o comportamento dos fluidos quando o cadinho está somente preenchido por fluidos, não foi o desejado para que uma corrida seja bem sucedida, pois a escória saiu antes do ferro gusa acabar e o ar também, que significa o sopro que é quando sai ar pelo furo de gusa, o que não é o ideal. Não esvaziar corretamente o cadinho pode ocasionar problemas. Segundo Brännbacka (2004), a não drenagem eficaz de ferro e da escória pode resultar em altos níveis de líquido dentro do cadinho, o que tem efeitos adversos na estabilidade, produtividade e eficiência do forno. A situação torna-se perigosa se o nível de escória aumentar excessivamente, pois a escória quimicamente agressiva pode destruir as ventaneiras e, assim, causar vazamento de água nos líquidos fundidos, o que, por sua vez, pode levar à explosão e colocar em risco os funcionários da usina.

Também é possível confirmar que a presença do homem morto influencia diretamente no caminho percorrido pelos líquidos. Segundo Fausta Gandra (2006), a movimentação dos líquidos no cadinho é muito influenciada pela situação de flutuação, ou não do homem morto. Quando o homem morto se apresenta assentado no cadinho, o fluido tende a ir diretamente para o furo de gusa. Por outro lado, quando o homem morto está flutuando, o líquido primeiramente vai para a região sem coque e, posteriormente, segue para o furo de gusa. A Figura 30 apresenta a posição do homem morto e as forças que atuam sobre ele.

Figura 30: Visão esquemática das forças atuantes no cadinho de um alto forno e que determinam a posição do homem morto



Fonte: (Figueira; Tavares, 2003)

5. CONCLUSÃO

No caso da simulação 2, na qual é utilizado o nível de líquidos mais baixo, é possível observar que dentro de um espaço de tempo mais curto do que na primeira simulação, de 0,10 segundos, já ocorre o sopro, o que faz sentido pois a condição inicial é de um nível mais baixo de líquidos com a mesma pressão do caso 1. Na simulação 1, observa-se que leva mais tempo para o ar entrar no furo de gusa.

Dessa maneira, é possível concluir de que a presença do homem morto é de suma importância, visto que quando ele é desconsiderado, faz com que haja uma vazão de ar antecipada no furo de gusa e uma drenagem ineficaz do cadinho. O homem morto e sua posição dentro do cadinho influenciam na drenagem do mesmo.

Ainda que o perfil de velocidade tenha sido como o esperado (uma maior velocidade na entrada e diminuição da mesma ao longo do furo de gusa, o que conseqüentemente acarreta em uma maior turbulência e portanto, um maior desgaste do refratário nessa região), fica evidente que a consideração do homem morto no sistema é indispensável para o estudo do esvaziamento do cadinho.

6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros sugere-se a adição do homem morto na simulação. De acordo com (Chang, C.M. et al., 2009) quando o homem morto está flutuando mais próximo ao fundo do cadinho, isso deixa menos espaço livre e formará um fluxo mais rápido. Foi descoberto também, que a erosão mais agressiva é formada no centro do fundo do cadinho quando o homem morto está flutuando com 30 centímetros e 50 centímetros, mas a parte mais severa da erosão é causada nas laterais, quando o homem morto está flutuando a 10 centímetros do fundo. Isso é porque o ferro líquido é comprimido e flui em direção as laterais do cadinho. Outro ponto observado, foi a porosidade do homem morto, Chang, C.M. et al., (2009) concluíram que uma distribuição uniforme de porosidade no homem morto é útil para diminuir a taxa de erosão. Dessa forma, além da adição do homem morto e estudar as variáveis que isso implica, analisar sua porosidade também é relevante para o fluxo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ansys, Inc. **ANSYS FLUENT 12.0 - Theory Guide**. Ansys, Inc, 2009.

2. Ansys, Inc. **ANSYS FLUENT 12.0 - UDF Manual**. Ansys, Inc, 2009.
3. BRÄNNBACKA, J. (ÅBO A. U. **Model Analysis of Dead-man Floating State and Liquid Levels in the Blast Furnace Hearth**.
4. BRENNEN, C. E. Fundamentals of multiphase flow. **Fundamentals of Multiphase Flow**, p. 1–345, 2013.
5. CHANG, C.M. *et al.* Numerical prediction on the erosion in the hearth of a blast furnace during tapping process. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, [S. l.], p. 1-11, 25 mar. 2009.
6. CHATTERJEE, A. ROY, A. K. PRASAD, A. S. SHUKLA, K. P. SAHA, J. K.; KUMAR, T. S. P. Hearth Conditions in a Blast Furnace with Particular Reference to Hot Metal Drainage. **Tata Steel, India**, p. 54–61, 1994.
7. CHEN, A.; ELSAADAWY, E.; LU, W. K. Physical Modelling of Flows in the Blast Furnace Hearth. **Iron & Steel Technology Conference Proceedings**, v. 1, p. 9–12, 2005.
8. FAUSTA GANDRA, B. **Desenvolvimento de modelo matemático do fluxo de líquidos no cadinho do alto-forno**. Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.
9. FIGUEIRA, R. N.; TAVARES, R. P. **Aerodinâmica do Alto Forno: Fenômenos Aero e Hidrodinâmicos na Zona Úmida**. UFMG, 2003.
10. **FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL: O QUE É?**.ESSS. Disponível em: <<https://www.esss.co/blog/fluidodinamica-computacional-o-que-e/>>. Acesso em 14/11/2019
11. FUKUTAKE, T.; OKABE, K. The Hearth Drainage of the Blast Furnace. **International Blast Furnace Hearth and Raceway Symposium, Newcatle**, p. 2.1-11, 1981.
12. GARBERS-CRAIG, A.M. How cool are refractory materials?. **The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 108, p. 1-16, 1 set. 2006.
13. LAQUINI, Rapahel. **ESCOAMENTO DE GÁS ÚMIDO EM GEOMETRIA COM EXPANSÃO 3:2**. 2014. 41 p. Projeto de Graduação (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, 2014.
14. MOREIRA, F. M. Siderurgia.p. 1–22.
15. NOGAMI, Hiroshi *et al.* Cold-model Experiments on Deadman Renewal Rate Due to Sink–Float Motion of Hearth Coke Bed. **ISIJ International**, v. 44, n. 12, p. 2127–2133, 13 jul. 2004.
16. REZENDE, A. L. T. Análise Numérica da Bolha de Separação do Escoamento. p. 263, 2009.
17. RIBEIRO, A. S. **ANÁLISE SISTÊMICA DAS MASSAS DE TAMPONAMENTO PARA ALTOS- FORNOS**.
18. RIZZO, ERNANDES MARCOS DA SILVEIRA. **Processo da fabricação de ferro-gusa em Alto-Forno**. 2016. ed. atual. Brasil: ABM, 2009. 278 p.
19. RODI, W. DNS and LES of some engineering flows. **Fluid Dynamics Research**, v. 38, n. 2–3, p. 145–173, 2006.
20. SHAO, L. **Model-based Estimation of Liquid Flows in the Blast Furnace Hearth and Taphole**. Abor Akademi University, 2013.
21. SHAO, L.; SAXÉN, H. A simulation study of two-liquid flow in the taphole of the blast furnace. **ISIJ International**, v. 53, n. 6, p. 988–994, 2013.
22. SHIBATA, Kouichirou *et al.* Dynamics of Dead-man Coke and Hot Metal Flow in a Blast Furnace Hearth. **ISIJ International**, v. 30, n. 3, p. 208-215, 13 out. 1989.

