



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - UFOP  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
METALÚRGICA E DE MATERIAIS  
CAMPUS MORRO DO CRUZEIRO  
OURO PRETO – MINAS GERAIS – BRASIL**



## **MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA**

**“INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA E CONDIÇÕES  
OPERACIONAIS SOBRE A SEPARAÇÃO GUSA-  
ESCÓRIA NO CANAL DE CORRIDA DE UM ALTO-  
FORNO”**

**Isabela Guimarães Pereira Araújo**

**Ouro Preto, 11 de Janeiro de 2022**

**ISABELA GUIMARÃES PEREIRA ARAÚJO**

**“Influência da geometria e condições operacionais sobre a separação  
gusa-escória no canal de corrida de um alto-forno”**

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

**Orientador: Prof. PhD. Carlos Antônio da  
Silva**

**Ouro Preto, 11 de Janeiro de 2022**

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

A663i Araujo, Isabela Guimarães Pereira.  
Influência da geometria e condições operacionais sobre a separação gusa-escória no canal de corrida de um alto-forno. [manuscrito] / Isabela Guimarães Pereira Araujo. - 2022.  
52 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Carlos Antônio da Silva.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Metalúrgica .

1. Alto forno. 2. Fluxo Multifásico. 3. Separação gusa-escória. 4. Ferro Gusa. I. da Silva, Carlos Antônio. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 681.5

Bibliotecário(a) Responsável: Angela Maria Raimundo - SIAPE: 1.644.803



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 primeiro dia do mês de janeiro de 2022, às 14 horas, por meio da plataforma de videoconferência Google Meet, foi realizada a defesa de monografia pela aluna **Isabela Guimarães Pereira Araújo**, sendo a comissão examinadora constituída pelo Prof. PhD. Carlos Antônio da Silva (Orientador), pelo Prof. DSc Cláudio Batista Vieira (DEMET/UFOP) e pelo Prof. DSc. Johne Jesus Mol Peixoto (DEMET/UFOP). A aluna apresentou a monografia intitulada: *"Influência da geometria e condições operacionais sobre a separação gusa-escória no canal de corrida de um alto-forno"*. A comissão deliberou, por unanimidade, pela aprovação da monografia, concedendo à aluna 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 pela aluna.

Ouro Preto, 11 de janeiro de 2022.

  
Prof. PhD. Carlos Antônio da Silva  
Orientador – Presidente

  
Prof. DSc. Cláudio Batista Vieira  
Membro – DEMET/UFOP

  
Prof. DSc. Johne Jesus Mol Peixoto  
Membro – DEMET/UFOP

  
Isabela Guimarães Pereira Araújo  
Aluna

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Pedro Henrique, meu companheiro e amigo, pela paciência e por não soltar minha mão em nenhum momento durante esta caminhada. Tenho certeza que estará presente em todas as conquistas que acontecerão em minha vida.

À minha mãe, Adriana, pelo carinho, amor e pelo apoio incondicional. Sei que você nunca mediu esforços para que eu realizasse meus sonhos e alcançasse meus objetivos.

À minha irmã, Beatriz, por ser meu porto seguro quando precisei e por nunca me deixar desistir dos meus objetivos.

À minha Tia Marusia, pelo apoio e por todo o incentivo.

Ao meu primo, Arthur, por ser meu melhor amigo.

À minha Tia Lygia, *in memoriam*. Continue olhando por mim.

Ao meu primo, Rafael, por todo apoio e por me fazer acreditar que sou capaz de alcançar tudo que almejo.

À minha Tia Lili e ao meu Tio Netinho, por sempre me proporcionarem as melhores condições de estudo e por sempre acreditarem em meu potencial.

À minha Tia Jú e Tia Isis, pelos conselhos e por me ajudarem sempre que precisei.

Aos meus colegas de Belo Horizonte e Ouro Preto que me apoiaram e estiveram comigo durante toda a trajetória.

Ao meu amigo Felipe Pittella, pela ajuda durante a realização e coleta de dados deste trabalho.

À República Minas das Minas, por me dar apoio quando mais precisei e por sempre acreditar em mim. Sem vocês nada disso seria possível.

À Universidade Federal de Ouro Preto, ao DEMET e à Escola de Minas pelo ensino de qualidade, em especial ao mestre Prof. Carlos A. Silva pela partilha de conhecimentos, confiança, oportunidade de orientação neste trabalho e por tanta paciência.

Viva a Escola de Minas!

## RESUMO

No processo de fabricação de gusa em alto-forno, a escória e o gusa líquido são drenados do cadinho para um canal de material refratário e se separam devido à diferença de densidade, formando um fluxo bifásico no sistema. Devido a turbulência gerada no canal de corrida durante o vazamento, é comum que uma pequena parte do gusa líquido seja destinada ao canal de escória e vice-versa, em geral cerca de 2%. O presente trabalho visa estudar a influência do ângulo e outros fatores geométricos do furo de vazamento sobre a separação gusa-escória e caracterizar o comportamento do fluxo multifásico no interior do modelo. Para a realização desse trabalho, um modelo físico em acrílico foi utilizado e, com o auxílio de condutivímetros instalados ao longo do canal, o experimento de adição de traçador em pulso foi realizado para a obtenção da curva de Distribuição dos Tempos de Residência. De acordo com os dados experimentais deste estudo foi possível confirmar que canais de corrida de um alto-forno que apresentam um alto grau de turbulência tendem a apresentar pior eficiência de separação gusa-escória. Para uma mesma vazão, jatos de menor diâmetro implicam em maior taxa de aporte de energia cinética pelo jato e menores oportunidades de separação, em função dos maiores níveis de turbulência.

**Palavras-chave:** Canal de Corrida; Furo de Vazamento; Fluxo Multifásico; Separação gusa-escória.

## ABSTRACT

In the fabrication process of pig iron in blast furnace, the slag and the hot metal are drained from the crucible to a slag runner. The slag and the hot metal are then separated in virtue of the difference in density, forming a biphasic flow in the system. Given the turbulence caused in the runner during the casting, it is common that a small amount of hot metal is allocated to the slag runner and vice-versa, generally a rate around 2%. This paper seeks to study the influence of the angle and other geometric features of the casting tap hole in the separation of pig iron and slag, as well as to describe the multiphase flow behaviour in the model's interior. To achieve this, a physical model in acrylic was used, and with the help of conductivity meters installed along the runner, the addition experiment of the pulse-input of saline tracer was done to obtain the residence time distribution curve. According to the experimental data from this study, it is possible to confirm that blast furnace's runners that present a turbulence high grade tend to deliver a lower efficiency separating pig iron and slag. As for an equal jet vent of smaller diameter implies a bigger input rate of kinetic energy through the jet, and lower chances of separation, given the highest levels of turbulence.

**Keywords:** Runner; Tap Hole Casting; Multiphase Flow; Separation Pig Iron-Slag.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Seção transversal de um alto-forno para produção de ferro gusa.....	13
Figura 2 - Representação esquemática do canal de corrida.....	15
Figura 3 - Tipos de sistema de operação de um canal de corrida.....	16
Figura 4 - Regiões canal de corrida.....	17
Figura 5 - Modelo em acrílico utilizado nos experimentos.....	22
Figura 6 - Representação esquemática do canal de corrida para a realização dos testes e obtenção da curva DTR por condutimetria utilizada para os testes T1 e T3. ....	26
Figura 7 - Medições empregadas no canal de corrida para a realização dos testes T1 e T3. ....	27
Figura 8 - Representação esquemática do canal de corrida para a realização dos testes e obtenção da curva DTR por condutimetria utilizada para os testes T2 e T4. ....	27
Figura 9 - Montagem experimental utilizada durante os testes de eficiência de separação entre gusa e escória.....	30
Figura 10 - Ponto de impacto para diâmetro de jato igual a 8mm, aporte de energia 0,197W. a) Configuração T1, ponto de impacto a 23,4cm b) Configuração T2, ponto de impacto a 31,0cm. ....	33
Figura 11 - Ponto de impacto para diâmetro de jato igual a 13mm, aporte de energia 0,028W. a) Configuração T3, ponto de impacto a 18,0cm b) Configuração T4, ponto de impacto a 23,2cm ....	33
Figura 12 - Ponto de impacto no canal de corrida durante o vazamento de água e querosene no canal de corrida.....	38
Figura 13 - Evolução temporal de separação para configuração S1.....	39
Figura 14 - Evolução temporal de separação para configuração S2.....	40
Figura 15 - Evolução temporal de separação para configuração S3.....	40
Figura 16 - Evolução temporal de separação para configuração S4.....	41



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Informações do modelo e do protótipo.....	24
Tabela 2 - Posição de cada condutivímetro ao longo do canal.....	26
Tabela 3 - Correspondência geométrica entre os testes para obtenção da curva DTR e os testes de eficiência de separação .....	30
Tabela 4 - Dados experimentais para configuração T1 (diâmetro 8mm; impacto a 23,4cm) ..	34
Tabela 5 - Dados experimentais para configuração T2 (diâmetro 8mm; ponto de impacto a 31,0cm).....	35
Tabela 6 - Dados para configuração T3 (diâmetro 13mm; ponto de impacto a 18,0cm).....	35
Tabela 7 - Dados para configuração T4 (diâmetro 13mm; ponto de impacto a 23,2cm).....	36
Tabela 8 - Dados para S1 (8mm, corresponde a T1).....	46
Tabela 9 - Dados para S2 (8mm, corresponde a T2).....	47
Tabela 10 - Dados para S3 (13mm, corresponde a T3).....	48
Tabela 11 - Dados para S4 (13mm, corresponde a T4).....	49

## LISTA DE NOTAÇÕES

CE – Eficiência de Separação

C – Concentração de sal distribuída ao longo do canal

DTR – Distribuição de tempos de residência

$D^{\text{turbulenta}}$  – Difusividade turbulenta

Fr – Número de Froude

Pe – Número de Peclet

$t_{2\%}$  – Tempo mínimo de residência

$t_{\text{pico}}$  – Tempo correspondente ao valor máximo na curva C vs t

$\tau_{\text{AU}}$  – Tempo médio de residência

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	9
2. OBJETIVOS .....	11
2.1. Objetivo geral .....	11
2.2. Objetivos específicos .....	11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	12
3.1 O Alto-forno... ..	12
3.1.1. Ferro-gusa.....	13
3.1.2. Escória.....	13
3.1.3. Casa de corrida.....	14
3.1.4. Canal de alto-forno.....	14
3.1.5. Operação de vazamento: furo de corrida .....	17
3.2. Modelamento Físico de Canal de Corrida .....	19
4. MATERIAIS E MÉTODOS .....	22
4.1. Modelo Físico .....	22
4.1.1. Determinação do tempo de residência por condutimetria.....	25
4.1.2. Parâmetros utilizados na comparação das curvas DTR.....	29
4.1.3. Separação gusa/escória (água/óleo).....	29
4.1.4. Número de Peclet e potência de jato .....	30
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	33
5.1. Ponto de impacto do jato no canal.....	33
5.2. Tempo de Residência por Condutimetria .....	33
5.3. Avaliação da Separação Metal/Escória no Canal de Corrida .....	37
6. CONCLUSÕES .....	42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	43
ANEXO – TABELAS TESTES DE SEPARAÇÃO GUSA/ESCÓRIA.....	46

## 1. INTRODUÇÃO

O aço é uma liga metálica constituída de ferro e carbono (em geral até 2% em peso) e, eventualmente, outros elementos de liga. Esse tipo de material é amplamente utilizado na fabricação de bens de produção e bens de consumo, como, por exemplo, em eletrodomésticos, na indústria em geral, na fabricação de maquinário, veículos ou até mesmo na produção de energia. A versatilidade desse material permite que ele seja empregado em diversas atividades da vida cotidiana.

Heba e Nars (2019) acreditam que o processo de fabricação de ferro-gusa é aquele de maior consumo energético na metalurgia e é, nesse sentido, a etapa mais importante na fabricação do aço. Para a obtenção do ferro-gusa, três processos são empregados geralmente: processo de redução direta, processo de fundição direta e redução em alto-forno. Mesmo com a descoberta de novas formas de fabricação, o processo de obtenção de ferro-gusa pelo alto-forno continua sendo o método mais utilizado nas indústrias.

Pode-se definir como ferro-gusa uma liga de ferro-carbono que é utilizada como matéria-prima para a produção de aço. O ferro-gusa é o resultado de um processo de redução do minério de ferro, em que o agente redutor é o carbono. É comum que as usinas integradas via alto-fornos utilizem o coque como redutor e combustível em sua linha de produção. Em outras usinas, a produção de gusa ocorre em fornos de menor porte que substituem o coque por carvão vegetal (VITAL e PINTO, 2014).

O alto-forno é um reator térmico de cuba vertical que utiliza o carbono presente no carvão vegetal ou no carvão mineral para reduzir os óxidos de ferro que se encontram nos minérios utilizados como matéria-prima. O produto final de um alto-forno é o ferro-gusa líquido, que geralmente apresenta um teor final de carbono em torno de 4,5% (SARMENTO, 2006). Durante a produção do ferro-gusa, outros subprodutos são obtidos, como, por exemplo, a escória de alto-forno, as poeiras de topo e os gases de alto-forno.

A escória e o gusa líquido são vazados do cadinho para um canal de corrida e se separam devido à diferença de densidade, ficando a escória na parte superior e o gusa na parte inferior, formando-se um fluxo bifásico no sistema. O canal de corrida do alto-forno é uma calha cujas principais funções são promover a separação entre a escória e o gusa líquido e conduzir o gusa até o próximo local da linha de produção, por exemplo, até os carros torpedos (LELIS, ASSIS FILHO e FERRERIA, 2018).

Como o volume do cadinho é limitado, gusa e escória precisam ser drenados, de forma

contínua ou intermitente, para evitar que o acúmulo de material possa causar problemas operacionais. Uma abertura é realizada no cadinho, com o auxílio de uma haste perfuratriz, para que o gusa e a escória sejam drenados e se dê o início do processo de vazamento. Essa abertura é denominada furo de vazamento (LELIS, ASSIS FILHO e FERRERIA, 2018). Segundo Oliveira Jr. (2021), “fornos de alta capacidade trabalham com vazamento contínuo e possuem múltiplos furos e tendem a ter vazamento simultâneo de ferro-gusa e escória durante a maior parte da operação”.

Ao ocorrer a separação entre a escória e o gusa, espera-se que no dique de gusa esteja depositado apenas gusa, e no canal de escória apenas escória. Entretanto, por causa da turbulência gerada no canal de corrida durante o vazamento, é comum que uma pequena parte do gusa líquido seja destinada ao canal de escória e que uma quantidade de escória seja transportada para o dique de gusa. Do ponto de vista financeiro e da rentabilidade operacional, a perda de metal na escória é a situação mais preocupante, pois afeta diretamente a eficiência de produção (OLIVEIRA JR, 2021).

O tempo de permanência do gusa e da escória no canal é uma variável importante no processo de produção, pois, quanto maior for esse tempo de permanência, maior a oportunidade de separação entre gusa e escória. De acordo com Oliveira Jr. (2021), “o *skimmer* é um tipo de mobiliário que reduz a energia cinética dos fluidos, aumentando o tempo de permanência dos fluidos no canal e assim, promove separação metal-escória”. O *skimmer* também recebe o nome de dique de escória.

O presente trabalho visa estudar e analisar a influência da geometria do canal de corrida e do furo de vazamento sobre a separação metal-escória durante o vazamento do cadinho de um alto-forno.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo geral**

Estudar a influência do ângulo e de outros fatores geométricos do furo de vazamento, além das condições operacionais, sobre a separação entre gusa e escória em um canal de corrida de um alto-forno.

### **2.2. Objetivos específicos**

- ✓ Caracterizar o comportamento do fluxo multifásico no interior do modelo do canal de corrida;
- ✓ Com o auxílio de um traçador, caracterizar o comportamento fluidodinâmico no interior do modelo do canal de corrida;
- ✓ Avaliar a influência do furo de vazamento de um canal de corrida de um alto-forno, em função do diâmetro;
- ✓ Determinar a eficiência na separação metal-escória em diferentes condições de operação, como fatores geométricos do furo de corrida, taxa de vazamento e ponto de impacto.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

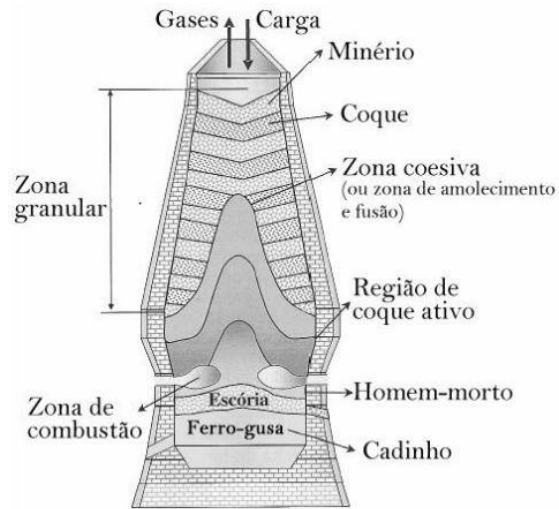
#### 3.1 O Alto-forno

O alto-forno é um reator metalúrgico destinado à fusão redutora do minério de ferro, que apresenta funcionamento contínuo e é constituído de uma carcaça metálica revestida de material refratário. Esse equipamento permite a ocorrência de diferentes reações entre a carga e o gás, não tem como objetivo principal realizar operações de refino, trabalha com gases em sentido contrário à carga e recebe apenas cargas sólidas (SILVA, 2011). De acordo com Heba e Nars (2019), o alto-forno é o principal sistema de produção mundial de gusa e utiliza como matéria-prima sínter, minério granulado, pelotas, coque ou carvão vegetal e fundentes. O alto-forno consegue produzir ferro-gusa líquido a uma temperatura de aproximadamente 1500°C, em quantidade e qualidade necessárias para dar sequência aos processos produtivos (MOURÃO et al., 2007).

O alto-forno é um reator industrial amplamente utilizado no setor metalúrgico e siderúrgico para a produção de ferro-gusa, matéria-prima empregada na produção de aço. Após a dosagem das matérias-primas como sínter, coque e minério de ferro, a correia transportadora transfere esses materiais, de forma alternada, para dentro do equipamento pelo topo do alto-forno. Ao mesmo tempo em que ocorre esse carregamento, ar pré-aquecido é soprado pelas ventaneiras, na parte inferior do forno, e entra em contato com o carvão e o coque presentes na zona de combustão (LELIS, ASSIS FILHO e FERRERIA, 2018). O oxigênio presente no ar soprado entra em contato com o coque e com o carvão pulverizado e provoca a reação de formação do monóxido de carbono, uma reação altamente exotérmica que libera uma quantidade significativa de calor (VELLOSO, 2006). Os gases ascendentes se encontram com a carga metálica e reagem fundindo-a e reduzindo-a. Esse processo dá origem ao ferro-gusa e à escória, que serão vazados posteriormente através do furo de vazamento, localizados na base do cadinho. Segundo Mourão et al. (2007), durante a operação do alto-forno, estima-se que a quantidade de escória produzida varia em torno de 200kg a 300kg para cada tonelada de ferro-gusa produzido.

A Figura 1 é uma representação de um alto-forno utilizado na produção de ferro em lingotes, com suas principais áreas evidenciadas, bem como a zona de redução, a zona de absorção de calor, a zona de fusão e a zona de combustão, com suas respectivas temperaturas.

Figura 1 - Seção transversal de um alto-forno para produção de ferro gusa



Adaptado de Rizzo, 2009 apud Barbieri 2018.

### 3.1.1. Ferro-gusa

Entende-se como ferro-gusa o produto imediato da redução do minério de ferro pelo coque, ou seja, o resultado da operação dos altos-fornos, que posteriormente será transformado em aço por meio de diferentes operações de conversão. Espera-se obter um gusa líquido composto de alguns elementos de liga, como, por exemplo, manganês, fósforo e silício, com teores de 92% a 95% de ferro e 3,5% a 5,0% de carbono, a uma temperatura em torno de 1500°C. O teor de carbono encontrado nos processos industriais geralmente é de 4,5% (MOURÃO et al., 2007).

O ferro-gusa deve apresentar características físico-químicas adequadas para garantir a eficiência da operação e condições produtivas favoráveis. A composição química do gusa líquido varia de indústria para indústria, conforme as exigências regionais e operacionais. Essa composição pode variar de acordo com o tipo de minério utilizado, da vazão de ar total soprado, do tipo de carvão utilizado, dentre outros parâmetros (RIZZO, 2009).

### 3.1.2. Escória

A escória de alto-forno é um subproduto gerado durante a fabricação do ferro-gusa, composto em sua maioria por óxidos ( $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), que sobrenada o gusa líquido devido à diferença de densidades entre as duas fases.

Segundo Rizzo (2009), o subproduto escória de alto-forno pode ser obtido de duas formas: na forma de escória bruta ou na forma de escória granulada. A formação da escória bruta ocorre quando se tem o resfriamento natural da escória líquida proveniente do alto-forno,



ou seja, um resfriamento lento ao ar livre. Nesse caso, é classificada como um tipo de rejeito. O resultado desse resfriamento é um material cristalizado, maciço e com fases cristalinas distintas. Esse tipo de escória é de difícil utilização, devido a sua elevada dureza, pois apresenta elevados custos para sua fragmentação.

Nos dias atuais, a escória de alto-forno é resfriada de forma controlada para ocorrer a formação da escória granulada. Geralmente, essa escória é submetida a um resfriamento rápido logo após a saída dos canais de corrida do alto-forno. Essa escória apresenta características físico-químicas adequadas para seu reaproveitamento em diferentes setores industriais, como, por exemplo, na fabricação de cimento, e é classificada como um coproduto da produção de aço. A propriedade mais importante da escória granulada é o seu potencial hidráulico, que permite que, quando cominuída em contato com a água, a escória endureça.

### **3.1.3. Casa de corrida**

A casa de corrida de um alto-forno é a região onde o ferro-gusa e a escória são conduzidos através do sistema de canais principais e auxiliares e se separam devido à diferença de densidade. A massa específica da escória é de aproximadamente  $1,5\text{t/m}^3$  e do ferro-gusa é de  $6,8\text{t/m}^3$  (RIZZO, 2009). Segundo Oliveira Jr (2021), “as dimensões e robustez desses canais variam de acordo com a produção do alto-forno”. A capacidade de produção do alto-forno e as dimensões no cadinho são as variáveis que determinam quantos furos de vazamento serão perfurados na casa de corrida, variando de um até quatro furos.

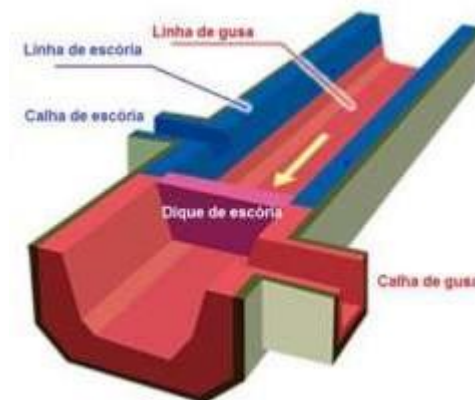
### **3.1.4. Canal de alto-forno**

O canal de alto-forno possui como funções principais conduzir e direcionar o gusa líquido proveniente do alto-forno para os vagões de transportes, painéis ou carros torpedos; uniformizar a temperatura do metal durante o vazamento; separar o ferro-gusa da escória, como já citado neste trabalho. O canal precisa ter comprimento suficiente para promover a separação efetiva das duas fases presentes (metal-escória). Segundo Rezende et al. (2014), “o canal de alto-forno consiste em uma calha de cerca de 20m de comprimento e pouco mais de 1m de largura e profundidade”. Essa dimensão de canal é aplicada em grandes alto-fornos, que apresentam uma produção em torno de 10000t/dia (KIM, OZTURKI e FRUEHAN, 1998).

Os canais de vazamento dos alto-fornos de maiores dimensões são constituídos de um canal principal, composto por carcaças metálicas refratárias móveis, ligado ao furo de

vazamento de gusa através de uma carcaça de metal fixa. O *skimmer* presente no canal principal atua como uma espécie de barreira, que retém a escória flutuante do metal e que posteriormente será escoada lentamente. Após o vazamento, o gusa líquido segue pelo canal secundário, com uma inclinação mínima de 3°, até o dique de gusa, e a escória líquida é conduzida em outra rota de canais secundários, com inclinação em torno de 7°, até o granulador ou poço de escória. O design do canal principal é definido de acordo com as dimensões e layout da casa de corrida (RIZZO, 2009). A Figura 2 apresenta em detalhes um canal de corrida com um *smimmer*, calha de gusa e calha de escória.

Figura 2 - Representação esquemática do canal de corrida



Adaptado de Duarte (2015).

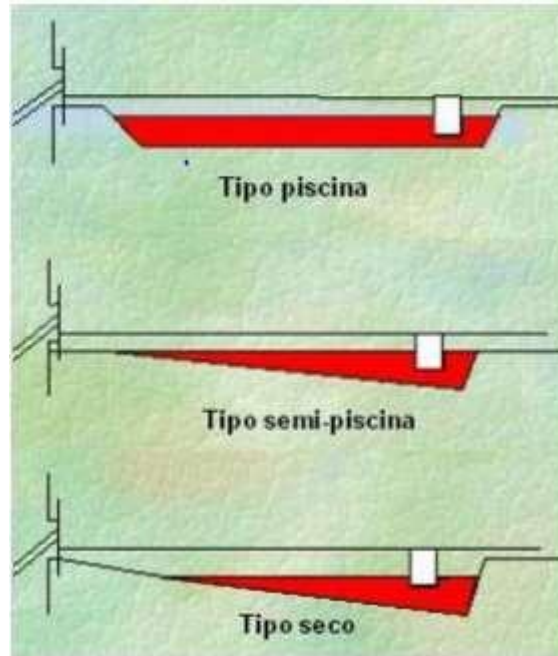
Um canal principal com maior seção transversal reduz a velocidade de vazamento do metal e da escória e reduz o desgaste do refratário, uma vez que diminui a turbulência gerada durante o vazamento. Por apresentar uma seção maior, esse tipo de design aumenta o tempo de permanência dos materiais no canal, o que facilita a separação metal-escória. Segundo Rizzo (2009), os projetos mais recentes tendem a apresentar em seus formatos canais mais retilíneos e menores, de modo a reduzir a geração de fumos e as perdas térmicas, diminuir o custo de montagem do canal e facilitar a limpeza e a manutenção.

Segundo Ghosh et al. (1986), o canal de corrida pode ser operado em três sistemas diferentes:

1. Sistema piscina: o canal opera constantemente cheio e apresenta inclinação de 1-3%;
2. Sistema semi-piscina: o canal opera de maneira a assegurar que o ponto de impacto do banho tenha 100-200ml de profundidade e apresenta inclinação de 3-5%;
3. Sistema não-piscina ou tipo seco: o fluxo de vazamento impacta diretamente o canal e apresenta inclinação maior que 5%.

A Figura 3 apresenta um tipo de cada sistema de operação citado. À medida que a inclinação do canal aumenta, o tempo de residência diminui. (GHOSH et al., 1986).

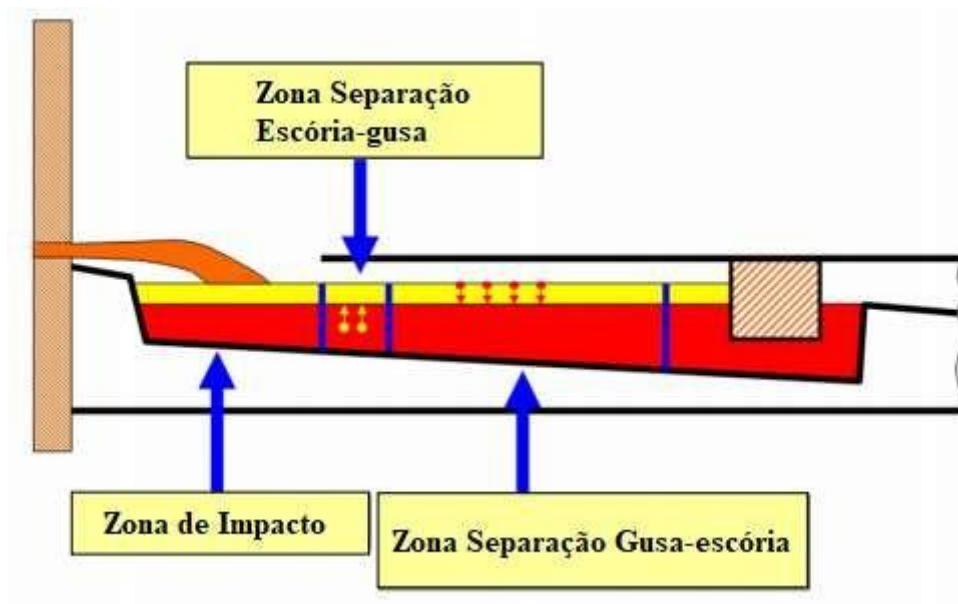
Figura 3 - Tipos de sistema de operação de um canal de corrida



Disponível em Duarte (2015).

Marinelli et al. (2008) divide o canal de corrida em três áreas principais. A primeira região é apelidada de Zona de Impacto, e apresenta uma região com uma alta taxa de mistura entre a escória e o metal, devido à presença de fluxo turbulento. Essa área se estende por 2 metros a 3 metros do furo de corrida e o tempo mínimo de residência da mistura (metal-escória) é cerca de 10 segundos. A região seguinte se estende entre 1 metro e 2 metros e é denominada Zona de Separação Escória-Gusa. Nessa área, começa a separação das gotas de escória da mistura, pelo mecanismo de flotação. Por fim, a terceira região é denominada Zona de Separação Gusa-Escória, onde as gotas de gusa presentes na mistura decantam e retornam ao seio do banho. Essa região está localizada na parte final do canal de corrida e encontra-se aproximadamente a 10 metros do furo de vazamento. A Figura 4 é uma representação esquemática das regiões de um canal de corrida.

Figura 4 - Regiões canal de corrida



Adaptado de Marinelli et al. (2008).

Segundo Rezende et al. (2014), o tempo de vida de um canal é determinado pelo desgaste do revestimento refratário, sendo as regiões de desgaste acentuado aquelas nas laterais (nas interfaces gusa-escória) e a zona de impacto. O fundo do canal é levemente atacado e desgastado com um leve arredondamento na região de impacto do jato. “As condições de operação extremas dificultam uma reprodução experimental consoante com a realidade industrial, tornado difícil o estudo deste processo”.

### 3.1.5. Operação de vazamento: furo de corrida

Como já citado, é limitado o volume do cadinho que armazena gusa e escória. O acúmulo de ferro-gusa no cadinho é prejudicial à produção, pois pode desencadear uma série de problemas operacionais que afetam diretamente a taxa de produção do forno, como, por exemplo, o atraso de manutenção e limpeza no canal de corrida, um desgaste maior de refratário e falha do maquinário responsável pelo vazamento (GEYER e HALIFA, 2014).

De acordo com Tanzil et al. (1984), o comportamento interno dentro do cadinho durante o vazamento é determinado pelo movimento das interfaces:

- I. Líquido/líquido - gusa/escória
- II. Gás/líquido – gases do alto-forno/escória

As operações de vazamento do cadinho dependem do movimento das interfaces e suas posições em relação à posição do furo de vazamento. A interface gusa/escória apresenta três níveis de altura diferentes em relação ao furo de corrida: abaixo do nível, no mesmo nível e

acima do nível. Esses níveis implicam diretamente em como os fluidos serão vazados. Quando a interface gusa/escória está abaixo do nível do furo de vazamento, a escória é vazada primeiro e em seguida gusa e escória são vazados simultaneamente. Quando a interface está no mesmo nível que o furo de corrida, escória e gusa são vazados de forma simultânea até o fim do vazamento. Quando a interface gusa/escória está localizada acima do nível do furo de vazamento, apenas gusa é vazado. Além disto, quando a interface gás/líquido atinge a altura do furo de corrida, ou seja, mesmo nível, é o momento de se encerrar o vazamento, por tamponamento total do furo.

Durante a operação de vazamento do cadinho, o nível de líquido presente nele se altera. Inicialmente temos o aumento do nível da interface líquido/líquido no cadinho durante as pausas entre os vazamentos. Quando o furo é aberto novamente, apenas gusa é vazado e o nível total de líquido continua crescente, isso porque o volume drenado é menor que o volume depositado no cadinho. Ao final da operação de vazamento, tem-se o início do vazamento de escória e, simultaneamente, gusa. Por fim, o nível da interface decresce até o final da operação (OLIVEIRA JR, 2021).

Shao e Saxém (2013) consideraram o funcionamento de um alto-forno real e simularam o comportamento dos fluidos no furo do canal de corrida por um modelamento físico. O modelo proposto considerou o comportamento de dois líquidos imiscíveis, ou seja, líquidos que, quando misturados em qualquer proporção, formam uma substância heterogênea (neste trabalho os líquidos imiscíveis utilizados são água e óleo querosene), que flui através de um tubo inclinado (simulando o furo de corrida), e identificou o efeito das variáveis: ângulo de inclinação, diâmetro do tubo, taxas de fluxo e propriedades físicas dos materiais. Classificaram então os padrões de fluxo:

- I. Fluxo Disperso: acontece quando a diferença entre as taxas de fluxo dos líquidos é suficientemente alta para quebrar a estabilidade da interface. A fase mais rápida penetra e se dispersa na fase mais lenta, promovendo a mistura entre os líquidos.
- II. Fluxo Estratificado: ocorre quando as taxas de fluxo dos líquidos possuem a mesma ordem de grandeza. A fase mais densa permanece no inferior do tubo e a fase menos densa na parte superior do tubo. Ambas mantêm continuidade.

Durante a drenagem do cadinho existe uma maior probabilidade de ocorrer o fluxo estratificado e apenas o diâmetro interno do furo de vazamento influencia diretamente e significativamente os padrões de fluxo. Porém, outras características operacionais, como, por exemplo, a rugosidade, podem interferir na estabilidade das interfaces (SHAO e SAXÉM,

2013).

### 3.2. Modelamento Físico de Canal de Corrida

Os alto-fornos ao longo do tempo evoluíram, e os atuais, de grande porte, apresentam mais de um furo de corrida. Por isso, foi necessário reformular as formas e métodos de vazamento para atingir altas taxas de vazamento atreladas a uma redução de custo de operação. Uma das alternativas para se otimizar a utilização dos alto-fornos é melhorar o processo de separação de gusa e escória no canal de corrida. Entretanto, os poucos estudos disponíveis não trazem resultados significativos que justifiquem sua implementação na linha de produção das indústrias (OLIVEIRA JR, 2021). Durante a operação de vazamento, gusa e escória são drenados pelo furo de corrida e são depositados no canal de corrida em altas velocidades. Esse comportamento provoca a mistura desses fluidos na região de impacto do jato. Estima-se que a perda de gusa, que é arrastado pela escória, chegue a 2,2% em massa de escória vazada (SHESTOPALOV et al., 1988 apud OLIVEIRA JR, 2021).

De acordo com Begnis e Brandaleze (2006), podem-se citar como fatores que interferem na separação gusa/escória:

- I. Velocidade de decantação/deposição: é a velocidade que uma gota ou partícula move-se em um meio diferente, seja em processo de decantação ou de flutuação. Essa variável depende principalmente da diferença de densidade e do tamanho de partícula dos líquidos;
- II. Tempo de permanência: o intervalo de tempo necessário para a separação das gotas de metal no fluxo multifásico deve ser tal que permita a separação eficaz durante sua permanência no canal de corrida. Esse fator é controlado a partir das características geométricas do canal. Esse parâmetro é mais controlável que a velocidade de deposição;
- III. Dissipação de energia: a forma como a energia do jato é absorvida pelo sistema pode afetar a separação gusa/escória, devido ao tamanho das gotas e à quantidade em que são misturadas no fluxo turbulento do canal;
- IV. Turbulência no canal: uma alta turbulência no canal de corrida tende a reduzir a flotação de gotas/partículas devido ao efeito de mistura. O tempo de residência do material no canal aumenta, pois, devido à turbulência, as gotas/partículas passam por diferentes redemoinhos;
- V. Escória entranhada no ferro-gusa: existe uma velocidade crítica entre as fases presentes no fluxo multifásico do canal, que quando extrapolada pode resultar em gotas de

metal aprisionadas na camada de escória e vice-versa.

De acordo com Cameron et al. (2020), o aumento de volume do canal de escória resulta em um maior tempo de residência (o que favorece a separação), e é possível aumentar o tempo de residência alterando-se apenas a inclinação do canal. Além disto, fatores geométricos que podem ser alterados para otimizar a separação do canal de corrida são o ângulo e o diâmetro do furo de vazamento. O aumento do ângulo representa um aumento da turbulência na zona de impacto do jato no canal, o que resulta em uma alta mistura e um maior desgaste das paredes do canal.

Kim, Ozturki e Freuhan (1998) utilizaram diferentes tipos de óleos (escórias) com viscosidades diferentes e concluíram que, com o aumento da viscosidade desses óleos, tem-se um maior arraste de água (ferro-gusa) do sistema. Diante disso, o controle da composição química da escória é de extrema importância, e é possível prever sua viscosidade antes do vazamento. Outro ponto que os pesquisadores observaram foi que, à medida que a espessura da camada de óleo aumenta, há um maior aprisionamento de água no canal. Outra variável importante no sistema é a velocidade pela qual a camada de óleo se movimenta no sistema. Em um sistema de fluxo multifásico têm-se duas velocidades de escoamento diferentes. A fase de maior velocidade pode entranhar-se na de menor velocidade, o que explica a penetração de óleo em água e vice-versa. Quando se aumenta a vazão total do sistema, uma maior turbulência é formada na região de impacto do jato, por isso, é necessário operar em vazões semelhantes/próximas de água e óleo.

No processo de vazamento do ferro-gusa e da escória em um canal de corrida, encontramos duas camadas principais (fluxo multifásico): a camada superior é composta de gotículas de ferro-gusa líquido dispersas na escória e a camada inferior é composta de gusa líquido com gotas de escória dispersas. Do ponto de vista da separação metal/escória, a condição mais crítica para a linha de produção é a camada superior, pois ela afeta diretamente o rendimento metálico da operação, devido a ser responsável pela perda de gusa líquido por oclusão. Diante dessa situação, é possível estimar a eficiência de separação da camada de escória a partir da Lei de Stokes (OLIVEIRA JR, 2021):

$$V_D = \frac{2}{9 \eta_{esc}} R^2 g (\rho_{gusa} - \rho_{escória}) \quad (3.1)$$

Para Oliveira Jr (2021), “o intervalo de tempo disponível para sedimentação/separação é ditado pela fração do comprimento do canal que se comporta como um reator de fluxo pistão e a

velocidade média da camada de escória.”

$$t_u = \frac{\alpha L}{V_{esc}} \quad (3.2)$$

Próximo ao canal de descarga de escória espera-se apenas uma camada de escória, cuja altura pode ser calculada por:

$$H = V_D t_u \quad (3.3)$$

Sendo assim, a Eficiência de Separação (CE) pode ser calculada pela equação abaixo:

$$CE = \frac{H}{H_o} = \frac{V_D}{V_S} \frac{\alpha L}{H_o} \quad (3.4)$$

em que L e W são comprimento e largura do canal, respectivamente;  $V_{esc}$  é a velocidade média de escória; R é o raio das gotas de gusa; g é a aceleração da gravidade; H é a altura da camada de escória limpa;  $\alpha$  representa a fração do reator que se comporta como fluxo pistão;  $t_u$  significa o tempo disponível para a separação ocorrer;  $H_o$  é a altura da camada de escória;  $V_D$  é a velocidade terminal das gotas de gusa;  $\eta_{esc}$  é a viscosidade da escória.



## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

A parte experimental deste trabalho foi realizada — respeitadas as condições impostas pela política da UFOP de enfrentamento à pandemia — no Laboratório de Pirometalurgia e Simulação da Universidade Federal de Ouro Preto. Para a realização da pesquisa empregou-se a modelagem física para avaliar a influência da geometria e condições operacionais no escoamento multifásico no canal de corrida de alto-forno.

### 4.1. Modelo Físico

O modelo físico utilizado neste trabalho é proveniente da dissertação de mestrado “Modelagem do Fluxo Multifásico em Canal de Alto-forno com Foco na Melhoria da Eficiência de Separação Metal-Escória” de Oliveira Jr (2021). O modelo foi construído em acrílico, para replicar taxa de vazamento da ordem de 6ton/min, tempo médio de vazamento de 50 minutos e escala 1:10 em relação ao canal de corrida real de um alto-forno com capacidade de produção em torno de 7000ton/dia. A Figura 5 apresenta o modelo físico utilizado neste trabalho.

Figura 5 - Modelo em acrílico utilizado nos experimentos



Disponível em Oliveira Jr (2021).

Para que se possam utilizar os resultados obtidos no modelo físico para o reator industrial é necessário que alguns critérios de similaridade sejam empregados (OLIVEIRA JR, 2021). O presente estudo utiliza a similaridade de Froude para a realização dos experimentos, que relaciona a força de inércia com a força peso. De acordo com Oliveira Jr. (2021), a relação entre modelo e protótipo pode ser descrita como:

$$Fr_{Modelo} = Fr_{Prototipo} \quad (4.1)$$

o que implica em:

$$\left(\frac{V^2}{gL}\right)_M = \left(\frac{V^2}{gL}\right)_P \quad (4.2)$$

em que V representa a velocidade característica do sistema (m/s), g é a aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>) e L é o comprimento característico do sistema (m).

Sendo  $\lambda$  o fator de escala, se encontram as seguintes relações de transformação:

$$\text{Área: } \frac{A_M}{A_P} = \lambda^2 \quad (4.3)$$

$$\text{Velocidade: } \frac{V_M}{V_P} = \lambda^{0,5} \quad (4.4)$$

$$\text{Volume: } \frac{V_M}{V_P} = \lambda^3 \quad (4.5)$$

$$\text{Dimensão: } \frac{L_M}{L_P} = \lambda \quad (4.6)$$

$$\text{Tempo: } \frac{t_M}{t_P} = \lambda^{0,5} \quad (4.7)$$

$$\text{Vazões volumétricas: } \frac{Q_M}{Q_P} = \lambda^{2,5} \quad (4.8)$$

Outros dados geométricos e valores de propriedades dos fluidos utilizados no modelo e no protótipo são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Informações do modelo e do protótipo

<b>Característica do canal de corrida</b>		<b>Protótipo</b>	<b>Modelo</b>
<b>Dados gerais</b>	Posição do <i>skimmer</i> (m)	16,00	1,60
	Abertura do <i>skimmer</i> (m)	0,20	0,02
	Comprimento (m)	18,80	1,88
	Altura do canal de escória (mm)	700	70
	Altura do canal de gusa (mm)	665	66,50
	Temperatura (°C)	1500	25
<b>Propriedades dos fluidos</b>	<b>Viscosidade</b>		
	Gusa/água (m Pa.s)	5,70	1,00
	Escória/Querosene	0,20	2,25
	<b>Razão entre Densidades</b>		
	Gusa/escória   água/querosene	2,8	1,22
	<b>Tensão superficial (N/m)</b>		
Gusa/escória   água/querosene	1,2	0,072	
<b>Dados do processo</b>	Vazão de gusa/água	6ton/min (95kg/s)	3L/min
	Tempo de vazamento (min)	50	16
	Vazão de escória ( <i>slag rate</i> )	1,8ton/min (30kg/s)	3L/min

Adaptado de Oliveira Jr. (2021).

Oliveira Jr. (2021) menciona que “a força motriz para a separação entre os dois fluidos (água/querosene; gusa/escória) é a diferença de densidade”. Em um canal de corrida real, a razão de densidades entre o gusa e a escória é alta. Para que o experimento seja válido, seria necessário utilizar um óleo com uma densidade próxima a  $0,33\text{kg/m}^3$ , para se obter a mesma proporção entre os fluidos. O óleo escolhido para simular a escória no canal de corrida e realizar os testes foi o óleo querosene, que, de acordo com o produtor (Querosene Jacaré, 2020), apresenta uma densidade de  $810\text{kg/m}^3$  e viscosidade de aproximadamente 2,25cP (CETESB, 2019).

Para representar a realidade de um vazamento de gusa e escória em um canal de corrida, água e óleo (querosene) foram colocados em dois recipientes diferentes e bombeados separadamente. Ambos se misturam apenas no bico de vazamento. Nesse experimento, o jato incide no canal com um ângulo de  $40^\circ$ . Esse ângulo se manteve constante durante todos os experimentos realizados.

Durante a realização dos testes para a determinação do tempo de residência (bem como para os outros experimentos de separação) do fluxo multifásico no canal, utilizou-se água como fluxo modelador na vazão de 6L/min, e o diâmetro interno do bico de vazamento utilizado foi de 8mm e 13mm. Além disso, estima-se que o ponto de impacto do jato no canal de corrida varie entre 20cm e 35cm.

#### 4.1.1. Determinação do tempo de residência por condutimetria

A determinação do tempo de residência por condutimetria é um método amplamente aplicado em trabalhos de modelagem física, como por exemplo em lingotamento contínuo. Dois experimentos são comumente aplicados para se obter a curva de Distribuição do Tempo de Residência (DTR): experimento de pulso e experimento de degrau (BRAGA, 2019).

Para Braga (2019), um distribuidor que opera em regime permanente apresenta diferentes porções de gusa líquido que o adentram em um determinado instante de tempo  $t = 0s$  e demandam tempos diferentes para saírem do equipamento. Essa distribuição de tempos, ou seja, a diferença desses tempos, é denominada de distribuição de tempos de residência (DTR).

De acordo com Kechichian et al. (2010), um fluido multifásico que escoar em um canal de alto-forno apresenta suas partículas com velocidades de escoamento distintas, e a DTR dessas partículas é determinada pelas condições do processo e pela característica do escoamento. A curva DTR oferece informações importantes para a análise e otimização de qualquer processo operacional. Assim, é possível determinar seus melhores parâmetros operacionais e otimizar a linha de produção estudada.

Este trabalho utiliza a metodologia de pulso para obtenção da curva DTR. A técnica consiste na injeção de um pulso de traçador, neste caso uma solução salina saturada de KCl (cloreto de potássio) no tubo de vazamento do canal de corrida (no instante  $t = 0s$ ) (BRAGA, 2019). Com o auxílio dos condutivímetros (neste trabalho, utilizam-se quatro) instalados em pontos específicos ao longo do canal de corrida, mede-se a variação da condutividade da água, devido à alteração da concentração de sal em cada região do canal de corrida.

Os dados de *condutividade versus tempo* gerados por cada condutivímetro são transferidos por meio de uma placa A/D a um arquivo de computador, permitindo a determinação de curvas DTR (OLIVEIRA JR, 2021). A Tabela 2 apresenta esquematicamente os locais em que os condutivímetros (Cds) estão fixados durante a realização dos testes e a Figura 6 mostra uma representação esquemática da realização do experimento no canal de corrida.

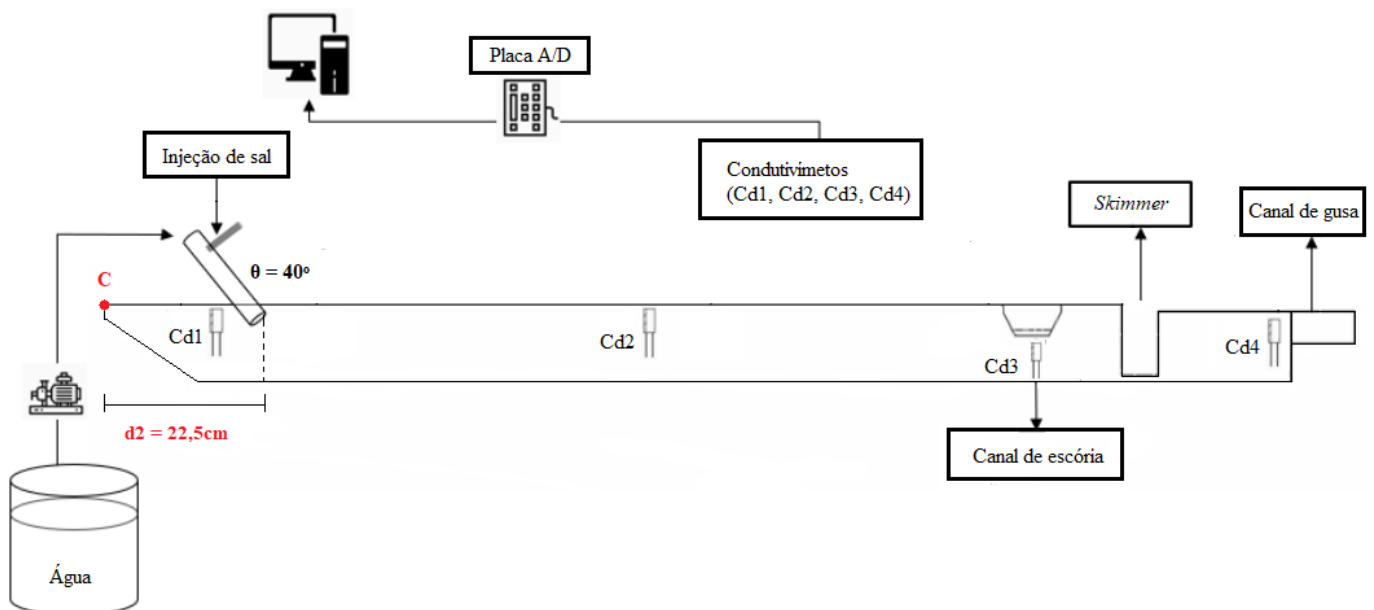
Tabela 2 - Posição de cada condutivímetro ao longo do canal

Condutivímetro	Altura (mm)*	Distância (mm)**
Cd1	55	75
Cd2	60	835
Cd3	45	1320
Cd4	30	1670

Obs.: \* medida a partir do fundo do canal; \*\* medida na direção horizontal a partir do ponto C, Figura 6

O condutivímetro Cd1 está fixado um pouco antes da zona de impacto do jato, Cd2 está fixado aproximadamente no ponto onde o fluxo deixa a região turbulenta, Cd3 está localizado em frente ao canal de escória (saída de escória) e Cd4 está posicionado próximo ao dique de gusa.

Figura 6 – Esquema do canal de corrida para a realização dos testes nas condições T1 e T3.



Adaptado de Oliveira Jr (2021).

Para os experimentos referentes às condições denominadas T1, T2, T3 e T4, utilizou-se a montagem representada nas Figuras 6 e 8. O tubo de vazamento foi fixado a um ângulo de  $40^\circ$  do canal de corrida. A distância ( $d1$ ), da extremidade do tubo de vazamento até o nível de líquido presente no canal, foi igual a 6,8cm. O ponto de impacto do jato no fundo do canal depende também da posição do tubo de descarga em relação ao início do canal, medida pela distância ( $d2$ ), bem como da velocidade do jato na extremidade do tubo (a qual é determinada pelo diâmetro interno do tubo ( $d$ ) e vazão de líquido): ver Figura 7. T1 corresponde a  $d$  igual a

8mm,  $d_2$  igual a 22,5cm, resultando em ponto de impacto  $P_i$  igual a 23,4cm. T2 corresponde a  $d$  igual a 8mm,  $d_2$  igual a 29,0cm, resultando em ponto de impacto  $P_i$  igual a 31,0cm. T3 corresponde a  $d$  igual a 13mm,  $d_2$  igual a 22,5cm, resultando em ponto de impacto  $P_i$  igual a 18,0cm. T4 corresponde a  $d$  igual a 13mm,  $d_2$  igual a 29,0cm, resultando em ponto de impacto  $P_i$  igual a 23,2cm.

Para cada condição foram realizados cinco experimentos.

Figura 7 – Posição do jato de líquido em relação ao canal de corrida para a realização dos testes T1, T2, T3 e T4.

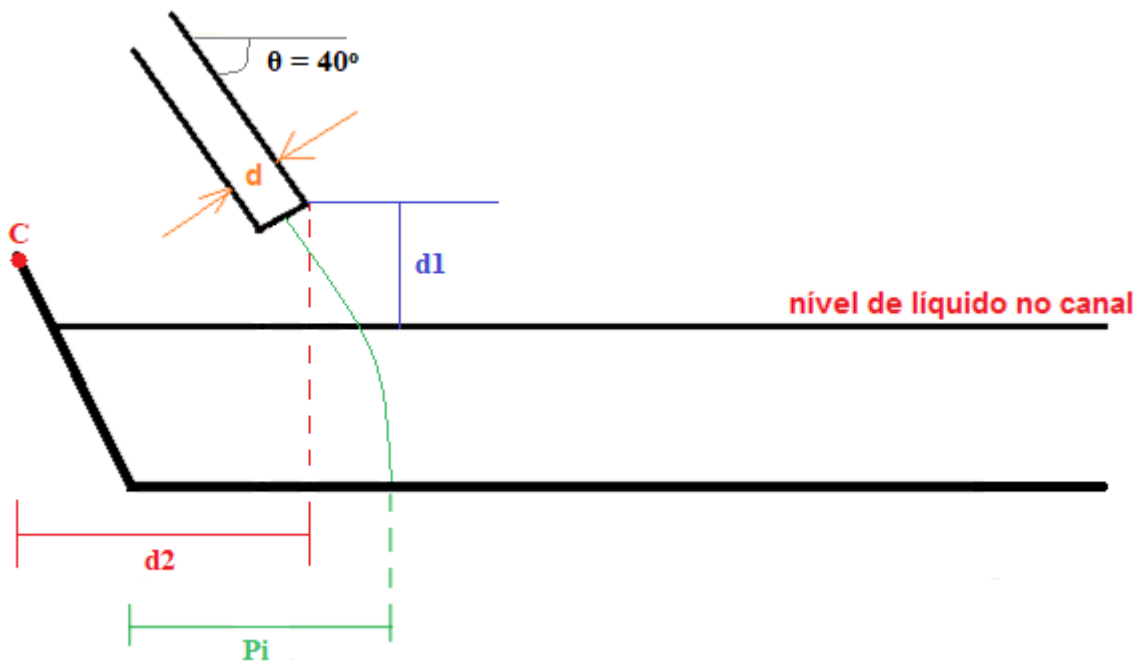
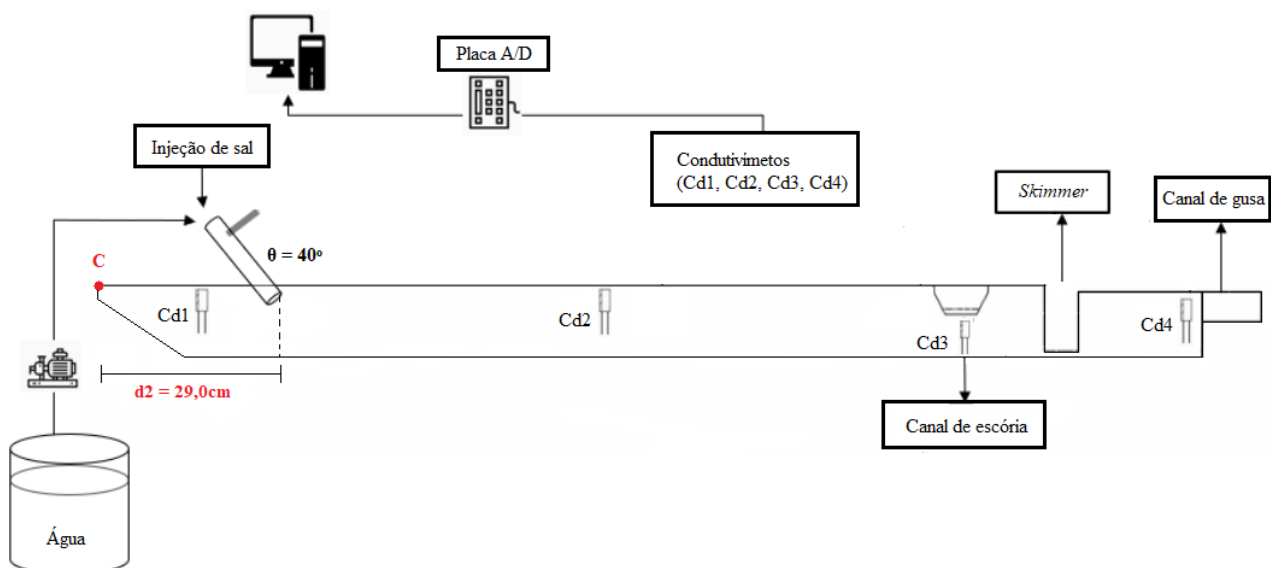


Figura 8 – Esquema do canal de corrida para a realização dos testes nas condições T2 e T4.



A partir da aplicação dessa metodologia é possível calcular a variação no tempo da variável  $E$  ( $s^{-1}$ ), ver Braga (2019):

$$E = \frac{C}{M/Q} = \frac{V C}{M(V/Q)} = \frac{V C}{M \tau} \quad (4.9)$$

$$\tau = \frac{V}{Q} \quad (4.10)$$

Outra forma de representar a mesma informação é empregar a função:

$$E_{\theta} = \frac{V C}{M} = E \tau \quad (4.11)$$

$$\theta = \frac{t}{\tau} \quad (4.12)$$

em que  $V$  é o volume do canal ( $m^3$ ),  $C$  é a concentração de sal distribuído ao longo do canal, em cada ponto, em  $kg/m^3$ ,  $M$  é a massa de KCl injetada ( $kg$ ),  $Q$  é a vazão volumétrica de fluido que entra no canal ( $m^3/s$ ),  $\theta$  é o tempo adimensional e  $\tau$  é o tempo nominal de residência do fluido ( $s$ ). A curva  $E_{\theta}(\theta)$  representa a curva DTR de um canal de corrida na forma de densidade de probabilidade e em unidades adimensionais. “Fisicamente,  $E_{\theta}(\theta)d\theta$  expressa a fração de material que entrou no distribuidor no tempo adimensional  $\theta = 0$  e o deixa entre os tempos adimensionais  $\theta$  e  $\theta + d\theta$ ” (BRAGA, 2019).

$$\int_0^{\infty} E(\theta)d\theta = 1 \quad (4.13)$$

$$\int_0^{\infty} E_{\theta}(\theta)\theta d\theta = 1 \quad (4.14)$$

A equação (4.13) é uma expressão proveniente do balanço de massa do traçador utilizado para obtenção da curva DTR, nesse caso KCl, e será sempre válida, desde que não

ocorra nenhum erro numérico ou experimental. Por outro lado, a equação (4.14) assume que todo volume calculado do canal ( $V$ ) está disponível para o escoamento dos fluidos. Essa hipótese deixa de ser válida caso existam zonas mortas completamente estagnadas no distribuidor (BRAGA, 2019).

#### **4.1.2. Parâmetros utilizados na comparação das curvas DTR**

Geralmente, as curvas DTR são aplicadas para comparar e analisar o comportamento fluidodinâmico de distribuidores de lingotamento contínuo, e mais recentemente em canal de corrida de um alto-forno (OLIVEIRA JR, 2021). Porém, a comparação direta das curvas não é indicada e conveniente (BRAGA, 2019). O mais conveniente é comparar valores de parâmetros de cada curva DTR entre as várias configurações.

O presente trabalho utiliza os seguintes parâmetros para fins de comparação: tempo de residência mínimo ( $t_{2\%}$ ), tempo de residência médio ( $\tau_{AU}$ ), tempo correspondente ao valor máximo de concentração na curva  $C$  vs  $t$  ( $t$ -pico) e número de Peclet ( $Pe$ ).

#### **4.1.3. Separação gusa/escória (água/óleo)**

A avaliação da eficiência da separação gusa/escória foi realizada em regime transiente. Ao início de cada experimento, faz-se necessário esperar que o modelo físico atinja regime permanente com o fluxo de água no canal a uma vazão predeterminada, nesse caso aproximadamente 6L/min. Em seguida, introduz-se o óleo querosene no canal no instante  $t = 0s$  e a amostragem no canal de escória é realizada em intervalos de tempo previamente determinados (30 segundos). A vazão de querosene para cada experimento realizado seguiu constante em 3L/min.

Durante o experimento, a influência do diâmetro interno do bico de vazamento foi avaliada junto com a eficiência da separação de gusa/escória (água/querosene). As vazões de água e querosene foram mantidas constantes, sob um jato no canal de corrida com um ângulo de  $40^\circ$ , e os fluidos foram vazados simultaneamente durante aproximadamente 4 minutos.

Foram realizados quatro testes, em quatro condições distintas: separação S1, separação S2, separação S3 e separação S4. Os resultados serão apresentados nas Tabelas 8 a 11. Os testes foram realizados em triplicata. A eficiência de separação foi calculada para cada uma das quatro condições distintas, pela razão entre água e querosene na calha de saída de escória:



$$CE = \left(\frac{A}{Q}\right) * 100$$

(4.15)

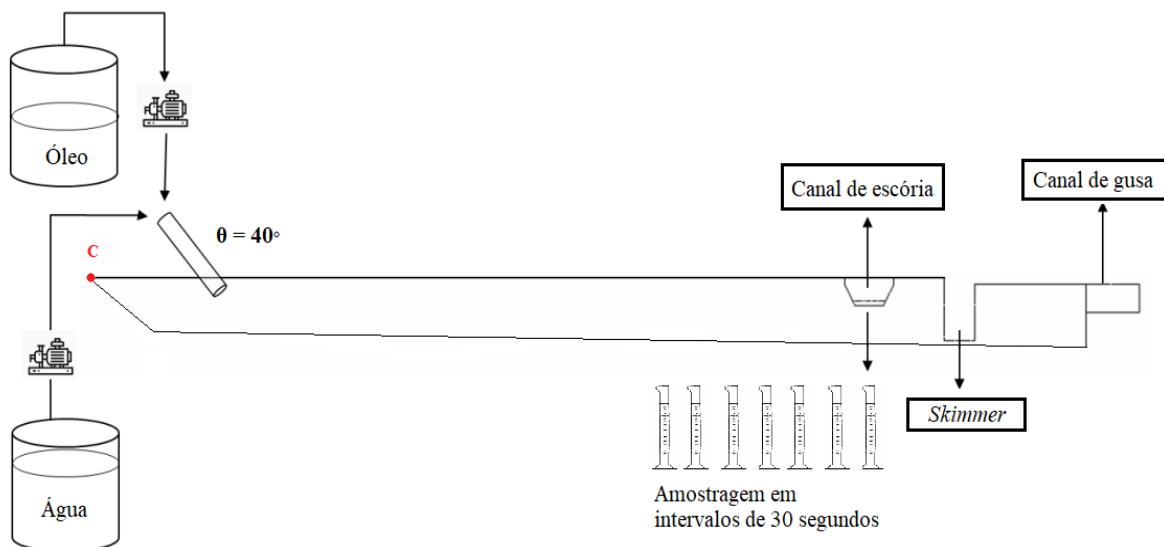
Para a realização dos testes de separação empregaram-se as mesmas configurações geométricas dos testes realizados para a determinação da curva DTR. A Tabela 3 apresenta a correspondência entre os testes.

Tabela 3 - Correspondência geométrica entre os testes para obtenção da curva DTR e os testes de eficiência de separação

Testes de Separação (água-óleo)	Correspondência geométrica entre os testes DTR
S1	T1
S2	T2
S3	T3
S4	T4

A Figura 9 representa um desenho esquemático da montagem do canal de corrida, para a realização dos testes de separação:

Figura 9 - Montagem experimental utilizada durante os testes de eficiência de separação entre gusa e escória



#### 4.1.4. Número de Peclet e potência de jato

O valor de número de Peclet é determinado de acordo com o proposto por Levenspiel

(1999). O canal é um reator com fronteiras fechadas (não existe *backflow*) tal que:

$$\frac{\sigma^2}{\tau^2} = \frac{2}{Pe} - 2 \frac{1 - e^{-Pe}}{Pe^2} \quad (4.16)$$

em que  $\sigma^2$  é a variância,  $\tau$  é o valor médio do tempo de residência. O número de Peclet assim determinado é a razão entre a intensidade de transporte de matéria por convecção ( $VL$ ) e por difusão turbulenta ( $D^{turbulenta}/L$ ), isto é:

$$Pe = \frac{VL}{D^{turbulenta}} \quad (4.17)$$

Assim, quanto menor o valor do número de Peclet, maior a turbulência naquele ponto do canal, o que é desfavorável à separação entre gusa e escória.

O número de Peclet portanto se relaciona com o estado de turbulência no canal, que por sua vez é dependente da taxa de aporte de energia cinética relativa ao impacto do jato contra o líquido no canal. Essa taxa pode ser calculada como ( $W$ ):

$$W = Q * \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (4.18)$$

em que  $W$  (kJ/s) é a taxa de aporte de energia cinética provinda pelo jato,  $V$  é a velocidade média de líquido no jato (m/s),  $Q$  (m<sup>3</sup>/s) é a vazão de água no jato e  $\rho$  é a densidade da água. A velocidade do fluido no jato pode ser estimada como:

$$V = \frac{Q}{\pi R^2} \quad (4.19)$$

em que  $R$  é o raio do jato (raio interno do tubo).

Sendo assim:

Para diâmetro interno de 8mm tem-se:

$$V = 1,989 \frac{m}{s} \quad (4.20)$$

Logo, a taxa de aporte de energia cinética será:

$$W = 0,197 \frac{J}{s} \quad (4.21)$$

Analogamente, para o diâmetro interno de 13mm tem-se:

$$V = 0,754 \frac{m}{s} \quad (4.22)$$

$$W = 0,028 \frac{J}{s} \quad (4.23)$$

Portanto espera-se turbulência significativamente maior no caso de jato com 13mm de diâmetro e menores valores de número de Peclet.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Ponto de impacto do jato no canal

O tubo que define o diâmetro do jato de líquido incidente sobre o canal foi posicionado a 40 graus em relação à horizontal, mas em duas posições diferentes em relação ao início do canal. A vazão foi mantida constante em 6lpm. Portanto, para cada um dos diâmetros de jato, 8mm ou 13mm, a velocidade de descarga atinge valor específico assim como a trajetória do jato. Os pontos de impacto se alteram como mostrado na Figura 10, e a taxa de aporte de energia cinética proveniente do jato varia de 0,028(J/s) até 0,197(J/s). Sendo assim, observa-se que, independentemente do diâmetro interno do tubo de vazamento utilizado, o ponto de impacto no canal apresentará maior valor quando for posicionado a uma distância maior do início do canal (nesse caso, do ponto C). Além disso, nota-se que, quanto menor o diâmetro interno do furo de vazamento, maior será a distância de seu ponto de impacto.

Figura 10 - Ponto de impacto para diâmetro de jato igual a 8mm, aporte de energia 0,197W. a) Configuração T1, ponto de impacto a 23,4cm b) Configuração T2, ponto de impacto a 31,0cm.

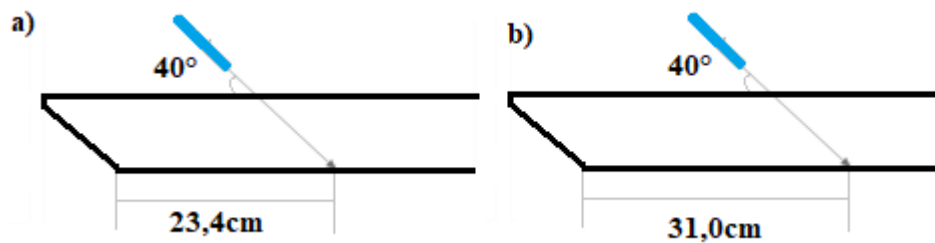
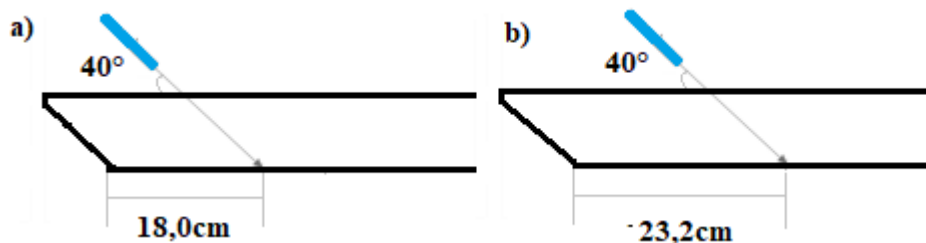


Figura 11 - Ponto de impacto para diâmetro de jato igual a 13mm, aporte de energia 0,028W. a) Configuração T3, ponto de impacto a 18,0cm b) Configuração T4, ponto de impacto a 23,2cm



### 5.2. Tempo de Residência por Conductimetria

A técnica de determinação de curvas de distribuição de tempos de residência (DTR) é

amplamente utilizada para caracterização macroscópica de fluxo em distribuidores de lingotamento contínuo, e foi adaptada por Oliveira Jr (2021) para canal de corrida de alto-forno. Neste trabalho utiliza-se o tempo mínimo de residência,  $t_{2\%}$ , como parâmetro que determina a eficiência da separação metal-escória. Quanto maior o tempo mínimo de residência do gusa líquido no canal de corrida, maior será a zona de fluxo pistonado, isso em analogia ao que se encontra no estudo de distribuidores, como por exemplo em Alves (2014).

O tempo de pico,  $t$ -pico, é definido como o tempo em que a concentração atinge valor máximo na curva DTR, ou seja, representa a maior quantidade de elementos presentes no fluido que deixam o canal de corrida no mesmo instante.

O número de Peclet está relacionado ao estado de turbulência. Quanto maior seu valor, menor a turbulência, menor o grau de dispersão/mistura, e mais próximo o fluxo se encontra da situação de fluxo pistonado.

As Tabelas a seguir representam os dados coletados durante os cinco testes realizados para as quatro condições distintas (T1, T2, T3 e T4) citadas no item 4.1.1 deste trabalho.

Tabela 4 - Dados experimentais para configuração T1 (diâmetro 8mm; impacto a 23,4cm)

		<b>Cd1</b>			<b>Cd2</b>		
<b>Exp</b>	<b>t2% (s)</b>	<b>t-pico (s)</b>	<b>Peclet</b>	<b>t2% (s)</b>	<b>t-pico (s)</b>	<b>Peclet</b>	
01	9,619	18,789	1,306	13,129	23,840	1,107	
02	23,730	26,031	2,322	11,859	31,090	0,931	
03	13,020	15,869	1,407	9,670	13,619	0,635	
04	7,861	11,260	0,904	9,561	19,781	0,945	
05	7,301	17,461	0,872	9,551	20,320	0,636	
Média	12,306	17,882	1,362	10,754	21,730	0,851	
Desvio Padrao	5,523	4,384	0,479	1,348	5,222	0,170	
		<b>Cd3</b>			<b>Cd4</b>		
<b>Exp</b>	<b>t2% (s)</b>	<b>t-pico (s)</b>	<b>Peclet</b>	<b>t2% (s)</b>	<b>t-pico (s)</b>	<b>Peclet</b>	
01	43,609	63,990	4,739	59,430	90,580	8,005	
02	40,150	72,990	3,850	61,680	85,520	8,474	
03	36,299	52,779	2,663	56,789	88,650	7,433	
04	31,641	63,391	2,588	49,771	83,771	7,146	
05	41,791	57,611	3,138	56,461	82,441	7,404	
Média	38,698	62,152	3,396	56,826	86,192	7,692	
Desvio Padrao	3,902	6,203	0,738	3,657	2,759	0,439	

Tabela 5 - Dados experimentais para configuração T2 (diâmetro 8mm; ponto de impacto a 31,0cm)

		<b>Cd1</b>			<b>Cd2</b>		
<b>Exp</b>	<b>t2% (s)</b>	<b>t-pico (s)</b>	<b>Peclet</b>	<b>t2% (s)</b>	<b>t-pico (s)</b>	<b>Peclet</b>	
01	11,260	14,660	1,886	7,910	15,211	0,445	
02	18,070	21,969	2,203	7,359	8,459	0,483	
03	10,221	36,801	1,660	6,811	9,611	0,388	
04	10,160	22,691	1,825	6,211	6,211	0,480	
05	15,979	19,439	1,889	6,260	6,859	0,300	
Média	13,138	23,112	1,893	6,910	9,270	0,419	
Desvio Padrao	2,980	6,755	0,161	0,595	2,922	0,063	
		<b>Cd3</b>			<b>Cd4</b>		
<b>Exp</b>	<b>t2% (s)</b>	<b>t-pico (s)</b>	<b>Peclet</b>	<b>t2% (s)</b>	<b>t-pico (s)</b>	<b>Peclet</b>	
01	38,391	59,320	3,021	55,910	86,451	6,787	
02	33,840	55,309	2,233	51,910	75,639	6,496	
03	29,439	61,131	2,441	49,820	72,500	6,139	
04	31,701	51,471	2,297	53,721	79,811	6,449	
05	33,719	54,920	2,259	50,359	74,369	6,367	
Média	33,418	56,430	2,450	52,344	77,754	6,448	
Desvio Padrao	2,701	3,125	0,269	2,046	4,535	0,191	

Tabela 6 - Dados para configuração T3 (diâmetro 13mm; ponto de impacto a 18,0cm)

		<b>Cd1</b>			<b>Cd2</b>		
<b>Exp</b>	<b>t2% (s)</b>	<b>t-pico (s)</b>	<b>Peclet</b>	<b>t2% (s)</b>	<b>t-pico (s)</b>	<b>Peclet</b>	
01	9,111	17,080	1,357	21,031	35,262	1,553	
02	10,221	37,410	2,062	16,430	29,439	1,449	
03	7,471	21,311	1,246	19,551	36,301	1,668	
04	8,621	19,611	1,073	19,000	31,141	1,330	
05	14,230	27,301	1,786	15,930	34,711	0,970	
Média	9,931	24,543	1,505	18,388	33,371	1,394	
Desvio Padrao	2,122	6,629	0,333	1,760	2,394	0,219	
		<b>Cd3</b>			<b>Cd4</b>		
<b>Exp</b>	<b>t2% (s)</b>	<b>t-pico (s)</b>	<b>Peclet</b>	<b>t2% (s)</b>	<b>t-pico (s)</b>	<b>Peclet</b>	
01	48,881	64,811	6,240	64,201	92,111	9,054	
02	43,619	67,449	3,767	62,340	85,580	8,294	
03	46,141	68,660	3,957	63,441	87,721	8,355	
04	42,131	64,100	3,296	64,100	94,691	8,256	
05	49,830	74,529	2,887	62,619	89,311	8,586	
Média	46,120	67,910	4,029	63,340	89,883	8,509	
Desvio Padrao	2,694	3,384	1,065	0,689	2,933	0,270	

Tabela 7 - Dados para configuração T4 (diâmetro 13mm; ponto de impacto a 23,2cm)

		Cd1			Cd2		
Exp	t2% (s)	t-pico (s)	Peclet	t2% (s)	t-pico (s)	Peclet	
01	5,170	9,119	0,484	18,840	35,369	1,816	
02	5,711	7,410	0,537	20,650	33,279	2,788	
03	5,111	10,211	1,093	22,131	37,461	3,024	
04	4,559	12,529	0,868	19,340	40,980	3,620	
05	5,219	7,520	1,891	23,070	37,512	4,962	
Média	5,154	9,358	0,975	20,806	36,920	3,242	
Desvio Padrao	0,334	1,733	0,465	1,467	2,338	0,948	
		Cd3			Cd4		
Exp	t2% (s)	t-pico (s)	Peclet	t2% (s)	t-pico (s)	Peclet	
01	48,449	73,049	4,129	66,189	87,330	9,613	
02	44,760	67,721	3,047	62,010	94,740	9,574	
03	49,381	70,410	5,644	65,852	94,250	9,615	
04	50,699	79,758	3,863	66,629	95,680	10,352	
05	51,359	68,160	3,690	66,410	92,441	10,015	
Média	48,930	71,820	4,075	65,418	92,888	9,834	
Desvio Padrao	2,116	4,015	0,787	1,573	2,713	0,279	

O condutímetro cd3 se encontra junto ao canal de descarga de escória, antes do *skimmer*. Gusa ocluso na escória, nessa localidade, deve ser descarregado junto com a escória, o que implica em perdas metálicas. Pontos de impacto mais próximos do canal de escória (T2 comparado com T1) implicam em menores valores de t2% e menor oportunidade de separação, vide Tabelas 4 e 5. A diferença é irrelevante quando as configurações T3 e T4 são comparadas.

Em qualquer configuração, quanto mais um determinado condutímetro se situa próximo do ponto de impacto, maior deve ser o grau de turbulência captado por ele, isto é, menores os valores de número de Peclet. Então valores comparativamente altos de número de Peclet são obtidos já ao final do canal, perto do ponto de descarga de escória. Nesse ponto, quanto maior o número de Peclet, mais próximo o fluxo se encontra de fluxo pistonado, o que favorece a separação. Novamente as diferenças são evidentes (em favor de T1) ao se compararem T1 e T2, e irrelevantes ao se compararem T3 e T4.

As diferenças entre as configurações T1 e T3 advêm exclusivamente do diâmetro do jato (a vazão é a mesma, o posicionamento do bico é o mesmo, e o ângulo do bico é o mesmo). Jatos de menor diâmetro implicam em velocidade média maior, maior taxa de aporte de energia cinética e pontos de impacto mais próximos do canal de descarga de escória. Espera-se que a configuração T1 seja menos efetiva para a separação, o que se reflete, vide Tabelas 4 e 6, em

menores valores de  $t_2\%$  para a configuração T1 e menores valores de número de Peclet para a configuração T1.

Enfim, as condições que se referem ao jato com diâmetro de 13mm ocasionam menor turbulência no canal e maior oportunidade de separação.

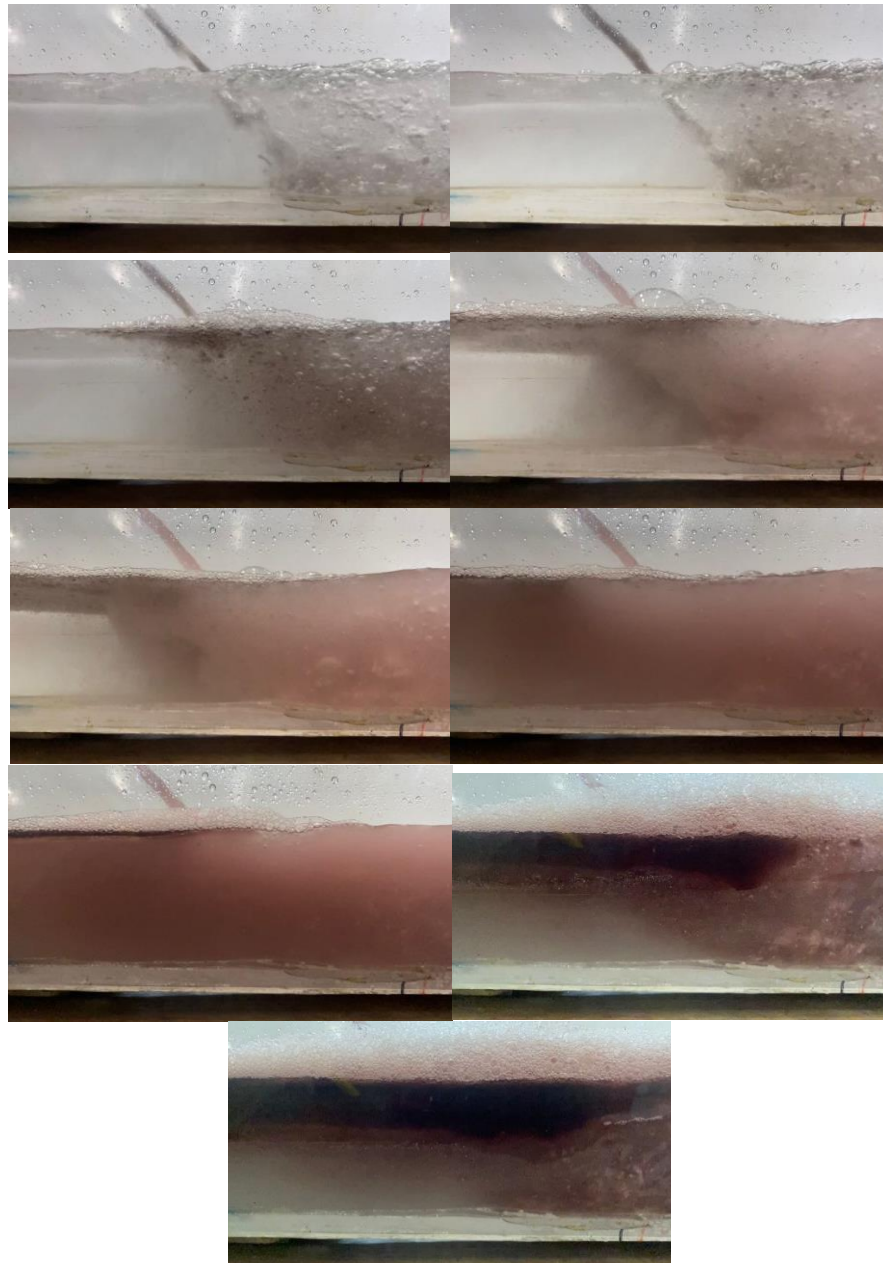
### **5.3. Avaliação da Separação Metal/Escória no Canal de Corrida**

Como citado no item 3.2 deste trabalho, durante a operação de vazamento, gusa e escória são drenados simultaneamente pelo furo de corrida e são depositados no canal de corrida em altas velocidades. Esse comportamento ocasiona mistura desses fluidos na região de impacto do jato, mas, por diferença de densidade entre gusa e escória, existe uma tendência à separação ao longo do canal. Alguns dos fatores que interferem na separação gusa/escória foram citados por Begnis e Brandaleze (2006). O presente trabalho estudou o efeito do diâmetro do jato (e logo da taxa de aporte de energia cinética do jato) sobre a eficiência da separação gusa/escória em um canal de alto forno.

A Figura 12 apresenta uma visão da região de impacto do jato, desde o instante  $t = 0s$  (início do vazamento conjunto) até  $t = 240s$  (quase ao final dos experimentos de separação). As imagens foram obtidas para a condição correspondente a S2 (jato de 8mm de diâmetro).



Figura 12 - Ponto de impacto no canal de corrida durante o vazamento de água e querosene no canal de corrida.



É evidente que se trata de um fluxo trifásico, contendo as fases água (gusa), querosene (escória) e ar. A fase gasosa se separa rapidamente, em função do elevado valor de empuxo sobre as bolhas. A mistura água-óleo persiste, em proporções variáveis, até o fim do canal.

Nesses experimentos as vazões de água e óleo foram mantidas constantes, em 6lpm e 3lpm, respectivamente. Entretanto, no caso real, essas proporções são alteradas ao longo do vazamento. Por exemplo, de acordo com Oliveira Jr (2021), no momento de abertura do furo de corrida de um alto forno apenas gusa é vazado, até que com o decorrer do tempo gusa e escória são vazados juntos e se separam por diferenças de densidade.

Para analisar o efeito do diâmetro do jato foram realizados testes com configurações

denominadas S1, S2, S3, e S4, as quais correspondem às denominações anteriores T1, T2, T3 e T4. As Tabelas 8 a 11, que estão apresentadas nos Anexos desse trabalho, representam os dados obtidos para cada condição analisada. As Figuras 13 a 16, apresentam graficamente a evolução da separação ao longo do tempo, ou seja, a razão de água e querosene ao longo do tempo. Além disso, o último gráfico valida o experimento, pois é possível perceber que os testes atingiram *steady state* e que os pontos são equivalentes.

Figura 13 - Evolução temporal de separação para configuração S1

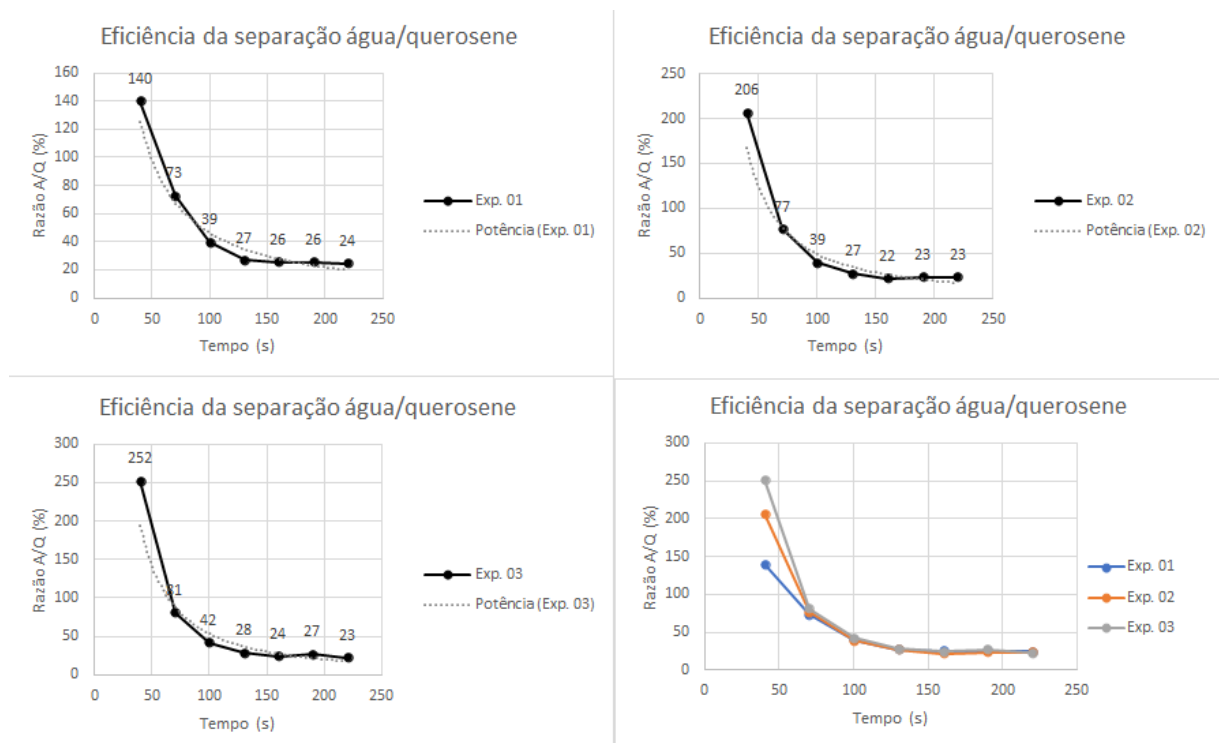


Figura 14 - Evolução temporal de separação para configuração S2

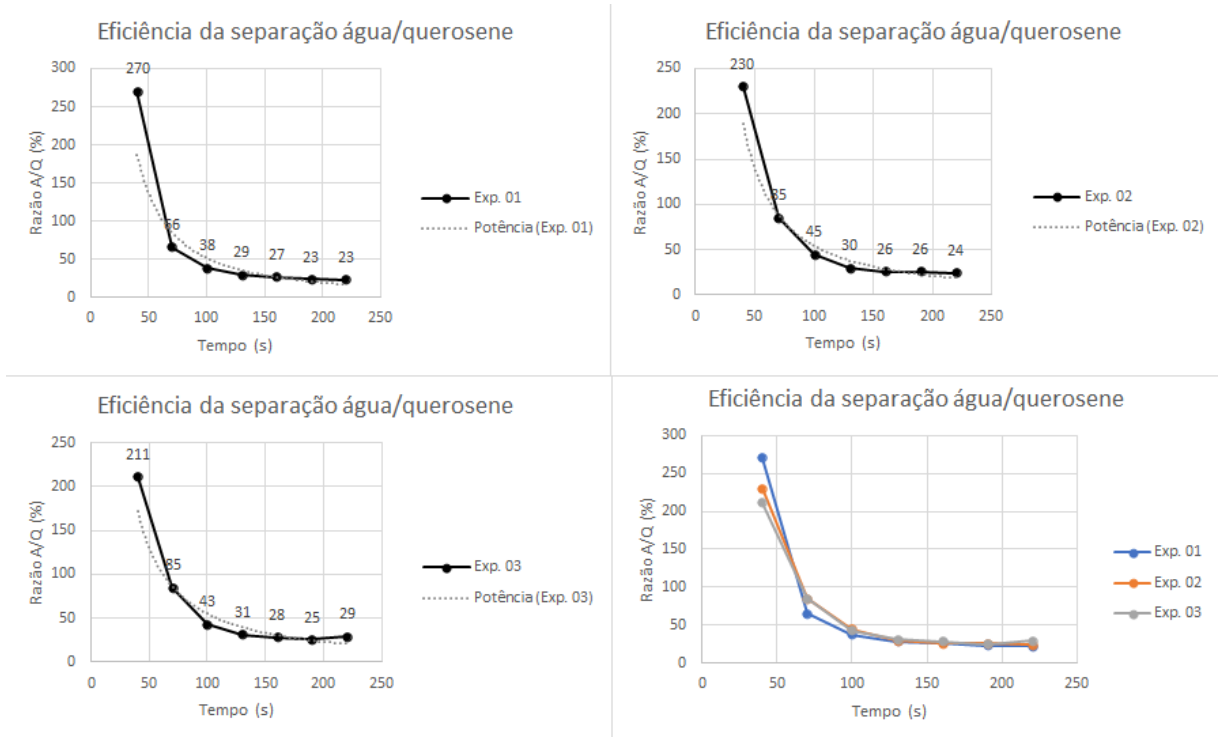


Figura 15 - Evolução temporal de separação para configuração S3

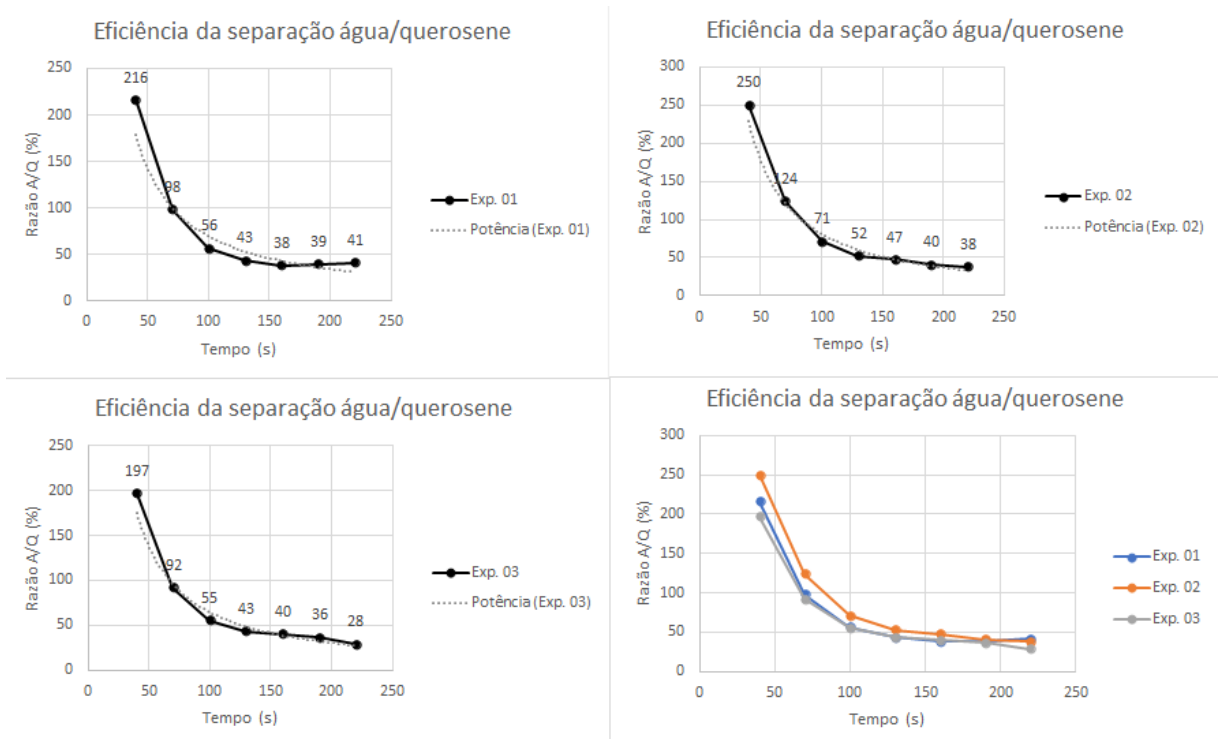
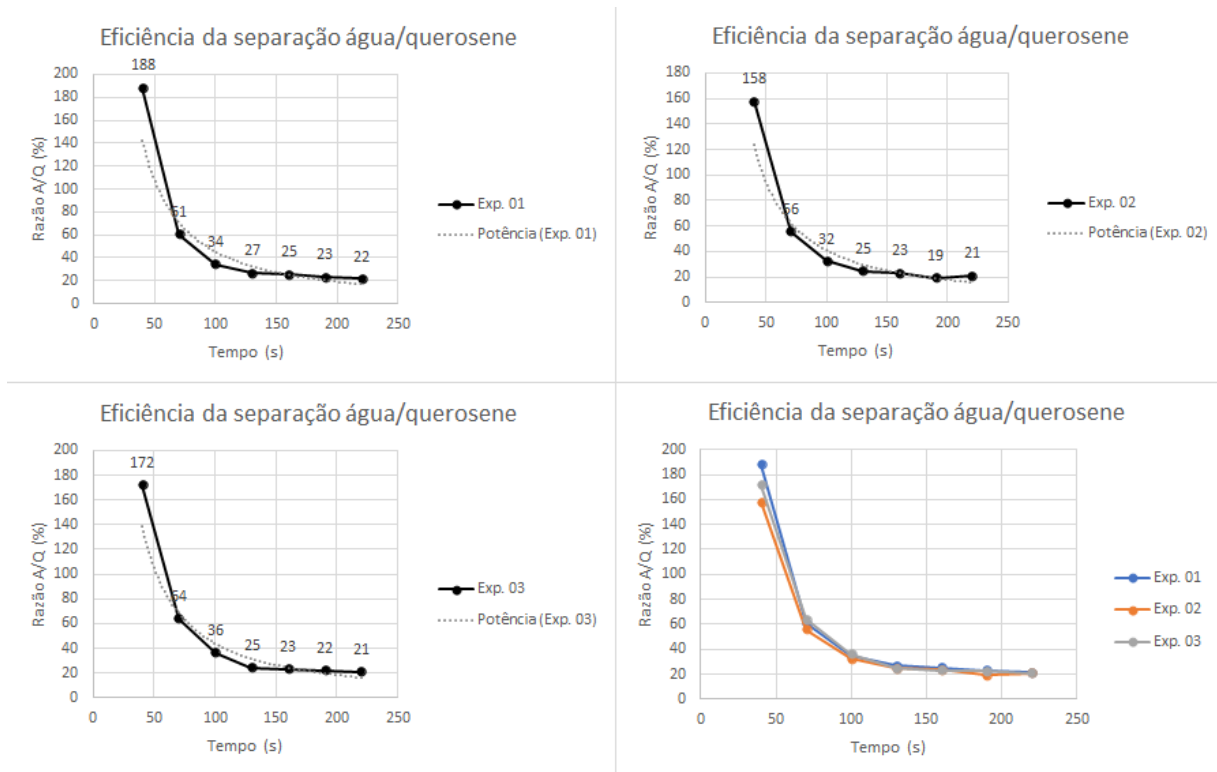


Figura 16 - Evolução temporal de separação para configuração S4



As piores condições de separação são para valores mais elevados de razão A (água)/Q (querosene) no canal de descarga de escória. Em concordância com os dados das curvas DTR, a diferença de desempenho entre configurações S3 (T3) e S4 (T4), com menor intensidade de aporte de energia cinética, é irrisória. A pior situação de separação é obtida para a configuração S2 (T2), a qual corresponde a um ponto de impacto mais próximo da descarga de escória e maior energia cinética do jato.

Os valores dos parâmetros utilizados para caracterizar a separação no canal devem depender ainda de outros parâmetros geométricos, como o ângulo de aproximação do jato (aqui mantido fixo em 40 graus), da geometria do canal, das vazões de água e óleo, bem como das propriedades físicas destes fluidos. Portanto essas conclusões são específicas destas condições experimentais descritas.

## 6. CONCLUSÕES

Canais de corrida de um alto forno que apresentam um alto grau de turbulência tendem a apresentar pior eficiência de separação gusa-escória.

Para melhorar a eficiência de separação em um canal de corrida de um alto forno, é necessário aumentar o tempo de residência do sistema e/ou o tempo mínimo de residência.

Para uma mesma vazão, jatos de menor diâmetro implicam em maior taxa de aporte de energia cinética pelo jato e menores oportunidades de separação, em função dos maiores níveis de turbulência.

O diâmetro interno do tubo de vazamento não interfere diretamente no ponto de impacto do canal. O mesmo apresentará maior valor quando for posicionado à uma distância maior do início do canal de corrida (no caso deste trabalho, do ponto C representado nas Figuras).

Para um mesmo ângulo de incidência do jato de vazamento no canal de corrida, furos de vazamento de menor diâmetro interno implicam em um maior valor de ponto de impacto.

Pontos de impactos mais próximos do canal de corrida resultam em menores valores de tempo de residência ( $t_2$ ).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, J. G. **Melhoria no Padrão de Escoamento do Aço Líquido no Distribuidor do Lingotamento Contínuo 01 da APERAM Inox América do Sul**. 2014. 64f. Dissertação (Mestrado em Metalurgia Extrativa) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.
- BARBIERI, C. C. T. **Avaliação da Combustibilidade de Carvão Brasileiro Para Injeção em Altos-fornos em Simulador de PCI e em Termobalança**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.
- BEGNIS, J. S. S.; BRANDALEZE, E. Simulación del canal del alto horno n°2 por médio de modelos físicos. **Estudos Tecnológicos**, v. 2, n. 1: 1-12, Janeiro/Junho 2006.
- BRAGA, B. M. Aprimoramento das Técnicas de Simulação dos Fenômenos Associados ao Escoamento do Aço em Distribuidores para Lingotamento Contínuo. In: PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA, M. E. D. M. **Tese de Doutorado**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.
- CAMERON, I. et al. **Blast Furnace Ironmaking: analysis, control and optimization**. [S.l.]: Elsevier, 2020.
- CETESB. Companhia Ambiental de São Paulo. **Ficha de Informação de Produto Químico: Querosene**. São Paulo/SP: CETESB, 2019. Disponível em: <[https://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha\\_completa1.asp?consulta=QUEROSEN E](https://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha_completa1.asp?consulta=QUEROSEN E)>. Acesso em: 19 No. 2021.
- DUARTE, A. K. Curso: Fundamentos Refratários. **Seminários Alafar 2015**, Santiago do Chile, Outubro 2015.
- GEYER, P. G.; HALIFA, Z. Blast furnace tapping practice at ArcelorMittal South Africa, Vanderbijlpark Works. **The Southern African Institute of Mining and Metallurgy Furnace Tapping Conference**, 2014.
- GHOSH, N. K. et al. Improvement in Blast Furnace Trough Mixes in India. **Transactions of the Indian Ceramic Society**, 1986. 156 - 161.
- HE, Q. et al. Cold Model Study of Blast Gas Discharge from the Taphole during the Blast Furnace Hearth Drainage. **ISIJ International**, v. 5, p. 774-778, 2012.
- HEBA, A.-K.; NARS, M. I. Reduction Characteristics of High Phosphorus Iron Ore in Reducing Parameters Similar to Blast Furnace Conditions. **Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering**, v. 7, p. 294-306, September 2019.
- KECHICHIAN, V. et al. Determinação da Distribuição do Tempo de Residência em Pasteurizador Bitubular com Fluido Newtoniano. **XVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química**, Foz do Iguaçu/PA, 19-22 Setembro 2010. 4397.
- KIM, H.; OZTURKI, B.; FRUEHAN, R. J. Slag-metal Separation in the Blast Furnace

Trough. **ISIJ International**, v. 38, n. 5, p. 430 - 439, 1998.

LELIS, M. A.; ASSIS FILHO, V. D. P.; FERRERIA, K. C. Estudo das variáveis do furo de corrida de um alto-forno. **ABM Week**, São Paulo, n. 4, 2-4 Outubro 2018.

LEVENSPIEL, Octave. The Dispersion Model. In: **Chemical Reaction Engineering**. 3rd edition. ed. New York/NY: John Wiley & Sons, 1999. cap. Chapter 13, ISBN 0-471-25424-X.

MARINELLI, P. et al. Main runners Cooled by forced air: experience Ternium Plant General Savio. [S.l.]: [s.n.], 2008.

MOURÃO, M. B. et al. **Introdução à Siderurgia**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, 2007.

OLIVEIRA JR, M. M. D. Modelagem do fluxo multifásico em canal de alto-forno com foco na melhoria da eficiência de separação metal-escória. In: OLIVEIRA JR, M. M. D. **Dissertação de Mestrado**. Ouro Preto - MG: Universidade Federal de Ouro Preto, 2021.

QUEROSENE JACARÉ. **Guia do Querosene**. Contagem/MG: Querosene Jacaré, 27 maio 2020. Disponível em:  
<<https://querosenejacare.com.br/querosene/#:~:text=Tem%20uma%20viscosidade%20fina%20e%20uma%20densidade%20entre,querosene%20%C3%A9%20composto%20por%20uma%20mistura%20de%20hidrocarbonetos>>. Acesso em: 19 Novembro, 2021.

REZENDE, R. V. P. et al. Escoamento de Ferro-gusa em Canal de Alto-forno e Sua Relação Com o Desgaste do Revestimento Refratário. **XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química - COBEQ**, Florianópolis/SC, 19 - 22 Outubro 2014.

RIZZO, E. M. D. S. **Processo de Fabricação de Ferro-gusa em Alto-forno**. São Paulo/SP: Associação Brasileira de Metalurgia e Mineração - ABM, 2009.

SARMENTO, A. C. M. Fabricação de ferro-gusa em alto-forno. **Programa de Educação Continuada - Cursos ABM**, p. 11, 2006.

SHAO, L.; SAXÉM, H. Flow Patterns of Iron and Slag in the Blast Furnace Taphole. **ISIJ International**, v. 53, p. 1756-162, 2013.

SHESTOPALOV, I.I et al. Improving the Separation of Smelting Products in The Main Trough of a Blast Furnace. **Chelyabinsk Metallurgical Combine**, URSS, v. 3, p. 194-195, June 1988.

SILVA, J. N. S. S. Siderurgia. In: SILVA, J. N. S. S. **Sistema Escola Técnica Aberta do Brasil**. Belém do Pará - PA: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, v. 2, 2011.

TANZIL, W. B. U. et al. Experimental Model Study of the Physical Mechanisms Governing Blast Furnace Herth Drainage. **ISIJ Meeting**, Tokio, v. 24, p. 198-205, April 1984.

VELLOSO, C. M. Otimização da operação do alto-forno 1 da V&M do Brasil com "Stave Coller" Através da Distribuição de carga no topo do forno. In: PPGEM, P. D. P, 2006.

VITAL, M. H. F.; PINTO, M. A. C. Condições para a sustentabilidade da produção de carvão vegetal para a fabricação de ferro-gusa no Brasil. **Siderurgia - BNDES Setorial**, v. 30, n. 1, p. 237-297, 2014.



## ANEXO – TABELAS TESTES DE SEPARAÇÃO GUSA/ESCÓRIA

Tabela 8 - Dados para S1 (8mm, corresponde a T1)

<b>Experimento 1</b>					
Ti (s)	Tf (s)	Vt (ml)	A (ml)	Q (ml)	Razão A/Q (%)
40	54	960	560	400	140
70	82	950	400	550	73
100	112	990	280	710	39
130	142	995	210	785	27
160	171	980	200	780	26
190	203	1030	210	820	26
220	232	1020	200	820	24
<b>Experimento 2</b>					
Ti (s)	Tf (s)	Vt (ml)	A (ml)	Q (ml)	Razão A/Q (%)
40	54	980	660	320	206
70	83	1000	435	565	77
100	112	960	270	690	39
130	143	1030	220	810	27
160	172	970	175	795	22
190	203	1000	190	810	23
220	232	950	180	770	23
<b>Experimento 3</b>					
Ti (s)	Tf (s)	Vt (ml)	A (ml)	Q (ml)	Razão A/Q (%)
40	55	950	680	270	252
70	84	960	430	530	81
100	113	910	270	640	42
130	143	950	210	740	28
160	173	980	190	790	24
190	201	980	210	770	27
220	231	970	180	790	23

Tabela 9 - Dados para S2 (8mm, corresponde a T2)

<b>Experimento 1</b>					
Ti (s)	Tf (s)	Vt (ml)	A (ml)	Q (ml)	Razão A/Q (%)
40	52	980	670	310	216
70	81	1010	500	510	98
100	110	1015	365	650	56
130	140	980	295	685	43
160	170	1020	280	740	38
190	201	1030	290	740	39
220	230	1030	300	730	41
<b>Experimento 2</b>					
Ti (s)	Tf (s)	Vt (ml)	A (ml)	Q (ml)	Razão A/Q (%)
40	52	980	700	280	250
70	81	950	525	425	124
100	110	940	390	550	71
130	140	960	330	630	52
160	171	980	315	665	47
190	201	990	285	705	40
220	231	980	270	710	38
<b>Experimento 3</b>					
Ti (s)	Tf (s)	Vt (ml)	A (ml)	Q (ml)	Razão A/Q (%)
40	51	980	650	330	197
70	80	960	460	500	92
100	110	940	335	605	55
130	140	1000	300	700	43
160	170	980	280	700	40
190	200	965	255	710	36
220	230	950	210	740	28

Tabela 10 - Dados para S3 (13mm, corresponde a T3)

<b>Experimento 1</b>					
Ti (s)	Tf (s)	Vt (ml)	A (ml)	Q (ml)	Razão A/Q (%)
40	57	1000	730	270	270
70	84	1010	400	610	66
100	114	1020	280	740	38
130	144	960	215	745	29
160	174	1020	215	805	27
190	204	1000	190	810	23
220	234	980	180	800	23
<b>Experimento 2</b>					
Ti (s)	Tf (s)	Vt (ml)	A (ml)	Q (ml)	Razão A/Q (%)
40	56	990	690	300	230
70	85	1000	460	540	85
100	115	1000	310	690	45
130	145	1000	230	770	30
160	174	970	200	770	26
190	203	970	200	770	26
220	234	980	190	790	24
<b>Experimento 3</b>					
Ti (s)	Tf (s)	Vt (ml)	A (ml)	Q (ml)	Razão A/Q (%)
40	57	980	665	315	211
70	86	980	450	530	85
100	115	970	290	680	43
130	145	985	235	750	31
160	175	970	215	755	28
190	205	985	200	785	25
220	236	970	220	750	29

Tabela 11 - Dados para S4 (13mm, corresponde a T4)

<b>Experimento 1</b>					
Ti (s)	Tf (s)	Vt (ml)	A (ml)	Q (ml)	Razão A/Q (%)
40	52	980	640	340	188
70	81	980	370	610	61
100	111	980	250	730	34
130	141	950	200	750	27
160	170	970	195	775	25
190	201	970	180	790	23
220	232	960	170	790	22
<b>Experimento 2</b>					
Ti (s)	Tf (s)	Vt (ml)	A (ml)	Q (ml)	Razão A/Q (%)
40	51	980	600	380	158
70	79	950	340	610	56
100	109	940	230	710	32
130	138	960	190	770	25
160	169	980	185	795	23
190	199	990	160	830	19
220	230	980	170	810	21
<b>Experimento 3</b>					
Ti (s)	Tf (s)	Vt (ml)	A (ml)	Q (ml)	Razão A/Q (%)
40	50	965	610	355	172
70	80	975	380	595	64
100	109	960	255	705	36
130	139	990	195	795	25
160	169	990	185	805	23
190	199	990	180	810	22
220	229	990	170	820	21