



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

**“Variações operacionais e seus impactos na separação de gusa e escória
em canal de corrida de alto-forno”**

Felipe Fontenelle Pittella

Ouro Preto, setembro de 2022

Felipe Fontenelle Pittella

“Variações operacionais e seus impactos na separação de gusa e escória em canal de corrida de 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, setembro de 2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

P688v Pittella, Felipe Fontenelle.
Variações operacionais e seus impactos na separação de gusa e escória em canal de corrida de alto-forno. [manuscrito] / Felipe Fontenelle Pittella. - 2022.
37 f.

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

1. Altos-fornos - Canal de Corrida. 2. Altos-fornos - Separação gusa-escória. 3. Altos-fornos - Modelo Fluxo Multifásico. I. Silva, Carlos Antônio da. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 658.5

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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Felipe Fontenelle Pittella

Variações operacionais e seus impactos na separação de gusa e escória em canal de corrida de alto-forno

Monografia apresentada ao Curso de Metalurgia da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Metalurgista

Aprovada em 9 de setembro de 2022

Membros da banca

PhD Carlos Antonio da Silva - Orientador (UFOP)
MSc Antonio Marlon Barros Silva - (IFMG Ouro Branco)
DSc Johne Jesus Mol Peixoto (UFOP)

Carlos Antonio da Silva, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 14/09/2022



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Antonio da Silva, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 14/09/2022, às 11:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0397749** e o código CRC **1BDC277A**.

RESUMO

O ferro-gusa e a escória provenientes do alto-forno são vazados em um canal de corrida. O mesmo tem como função conduzir o ferro-gusa até o carro torpedo, panela ou lingoteiras, enquanto a mistura gusa-escória se separa por diferença de densidade. A eficiência nessa parte do processo garante uma redução nas perdas metálicas, além de uma redução de custos nos processos subsequentes. Analisou-se como a variação das vazões de gusa/escória, o ângulo de vazamento e o início da corrida com escória no canal influenciam na separação gusa-escória. Os experimentos foram realizados em um modelo físico de um canal de corrida disponível no Laboratório de Pirometalurgia e Simulação da Universidade Federal de Ouro Preto, e a eficiência da separação mensurada por meio da razão entre a água e querosene (A/Q) que escoam pelo canal de escória ao longo do experimento, assim como testes de condutimetria para analisar o tempo mínimo de residência e a turbulência no canal de corrida. A partir dos resultados obtidos, a vazão mostrou-se como a condição mais influente na separação gusa-escória.

Palavras-chave: Canal de Corrida. Separação gusa-escória. Fluxo Multifásico.

ABSTRACT

Pig iron and slag from the blast furnace are poured into a running channel. Its function is to drive the pig iron to the torpedo car, pan or ingot molds, while the pig iron-slag mixture is separated by difference in density. Efficiency in this part of the process ensures a reduction in metal losses, as well as a reduction in costs in subsequent processes. It was analyzed how the variation of the flow rates of pig iron/slag, the angle of pouring and the beginning of the run with slag in the channel influence the pig iron-slag separation. The experiments were carried out in a physical model of a running channel available at the Laboratory of Pyrometallurgy and Simulation of the Federal University of Ouro Preto, and the separation efficiency was measured through the ratio between water and kerosene (A/Q) flowing through the slag channel throughout the experiment, as well as conductimetry tests to analyze the minimum residence time and turbulence in the race channel. From the results obtained, the flow proved to be the most influential condition in the pig iron-slag separation.

Keywords: Running Channel. Pig iron-slag separation. Multiphase Flow.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Representação esquemática do alto-forno e seu canal de corrida.....	13
Figura 3.2: Canal principal.....	14
Figura 3.3: Designs dos canais de corrida.....	15
Figura 3.4: Regiões do canal de corrida.....	16
Figura 4.1: Modelo físico de canal de corrida.....	19
Figura 4.2: Exemplo nomenclatura dos testes.....	21
Figura 4.3: Montagem experimental dos testes de condutimetria.....	23
Figura 4.4: Camada de escória prévia aos testes de separação.....	24
Figura 5.1: Gráfico da razão A/Q x $t(s)$ para a condição i31330.....	29
Figura 5.2: Gráfico da razão A/Q x $t(s)$ para a condição i31345.....	30
Figura 5.3: Gráfico da razão A/Q x $t(s)$ para a condição i71330.....	30
Figura 5.4: Gráfico da razão A/Q x $t(s)$ para a condição i71345.....	30
Figura 5.5: Gráfico geral da razão A/Q x $t(s)$	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Dados do modelo e protótipo	20
Tabela 4.2 – Posição dos condutivímetros	23
Tabela 5.1 – Resultados obtidos em cada condutivímetro para a condição i31030	25
Tabela 5.2 - Resultados obtidos em cada condutivímetro para a condição i31045	25
Tabela 5.3 -Resultados obtidos em cada condutivímetro para a condição i31330	25
Tabela 5.4 - Resultados obtidos em cada condutivímetro para a condição i31345	26
Tabela 5.5 - Resultados obtidos em cada condutivímetro para a condição i71030	26
Tabela 5.6 - Resultados obtidos em cada condutivímetro para a condição i71045	26
Tabela 5.7 - Resultados obtidos em cada condutivímetro para a condição i71330	27
Tabela 5.8 - Resultados obtidos em cada condutivímetro para a condição i71345	27
Tabela 5.9 – T _{min} médio no condutivímetro 3 para todas as condições testadas	27
Tabela 5.10 – Número de Peclet médio no cd3 para todas as condições testadas	28
Tabela A.1 – Resultados de separação gusa-escória para a condição i31330	35
Tabela A.2 – Resultados de separação gusa-escória para a condição i31345	35
Tabela A.3 – Resultados de separação gusa-escória para a condição i71330	36
Tabela A.4 – Resultados de separação gusa-escória para a condição i71345	36

LISTA DE SIMBOLOS

Pe	Número de Peclet
u	Velocidade do fluido
$D^{\text{turbulenta}}$	Difusividade turbulenta
σ^2	Variância
τ	Valor médio do tempo de residência

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 OBJETIVOS.....	12
2.1 Objetivo Geral	12
2.2 Objetivos Específicos	12
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1 Casa de Corrida de Alto-forno.....	13
3.1.2 Canal de Corrida de Alto-Forno	14
3.2 Separação Ferro-gusa e Escória em Canal de Corrida	16
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	19
4.1 Modelo Físico	19
4.1.2 Nomenclatura dos testes	21
4.1.3 Número de Peclet de turbulência.....	22
4.1.4 Testes de condutimetria.....	22
4.1.5 Separação gusa-escória.....	23
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
5.1 Dados Obtidos por Condutimetria.....	25
5.2 Separação Gusa-Escória	29
6 CONCLUSÕES	32
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33
APÊNDICE A – Resultados obtidos nos testes de separação gusa-escória	35

1 INTRODUÇÃO

O ferro gusa é uma liga ferrosa com teor de carbono entre 3,5% e 4,5%, obtida através de uma fusão redutora de minérios de ferro ou seus aglomerados (sínter e pelotas). Sua produção pode ocorrer nas seguintes categorias de processos: altos-fornos, fusão redutora e autoredução. Os altos-fornos são responsáveis por 95% da produção mundial de ferro, agregando vantagens econômicas e técnicas se comparados com os outros processos de produção (RIZZO, 2009).

O alto-forno consiste em um reator metalúrgico de cuba vertical de grande altura. As matérias-primas do processo (fundentes, minérios ou aglomerados, carvão vegetal ou coque) são carregadas pelo topo do forno. Os gases em ascensão, provenientes da queima dos combustíveis com o oxigênio soprado pelas ventaneiras, são responsáveis por reduzir a carga ferrífera, transformando-a em ferro-gusa, o qual fica depositado no cadinho. O gusa então é vazado para um canal de corrida de alto-forno, uma calha de cerca de 20m de comprimento e pouco mais de 1m de largura e profundidade (REZENDE, 2008). O canal tem como função direcionar o gusa para os carros-torpedo ou lingoteiras, enquanto separa por diferença de densidade o ferro e a escória.

A eficiência da separação gusa-escória é um fator determinante para a redução dos custos de produção e da composição do material. A perda metálica na escória pode atingir porcentagens superiores a 2,5%, enquanto a escória conduzida junto ao metal pode aumentar os custos com o refino do gusa (BEGNIS e BRANDALEZE, 2006). Este trabalho busca estudar como certas condições operacionais afetam a separação gusa-escória, com o intuito de melhorar sua eficiência, reduzir custos atrelados ao processo e melhorar a qualidade final do material.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar como condições operacionais afetam a eficiência da separação gusa-escória em canal de corrida de alto-forno.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar como a variação das vazões de gusa/escória afeta a separação;
- Mensurar a influência do ângulo de vazamento;
- Estudar o início do vazamento com escória no canal.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Casa de Corrida de Alto-forno

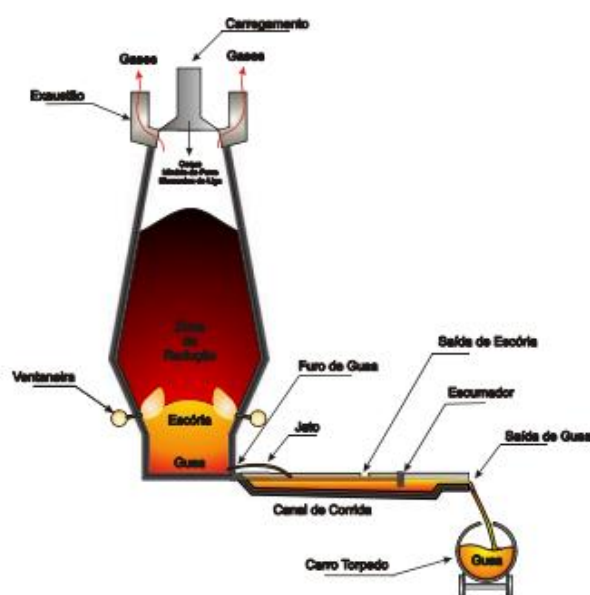
A casa de corrida é onde o ferro-gusa e a escória derivadas do alto-forno são vazados em um sistema de canais situados no piso e se separam devido a diferença em sua massa específica. A massa específica do ferro-gusa é de $6,8t/m^3$ e a da escória é de aproximadamente $2,5t/m^3$ (ALLIBERT et al., 1995).

Dependendo das dimensões do cadinho e da capacidade do alto-forno podem existir de 1 à 4 furos de corrida na casa de corrida de um alto-forno (RIZZO, 2009). A robustez e as dimensões dos canais (principal e secundário) também dependem da capacidade do alto-forno. Em indústrias de médio e grande porte o gusa no canal de corrida é direcionado diretamente para os carros-torpedo enquanto em indústrias de pequeno porte o gusa é destinado a lingoteiras giratórias (OLIVEIRA JR., 2021). Rizzo (2009, p.207), ao descrever o direcionamento da escória na casa de corrida, afirma:

“ A escória líquida no canal principal é conduzida através de outra linhas de canais refratários, com inclinação em torno de 7° , para o granulador de escória ou para o poço de escória (*dry pit*) ou para panelas/potes, conforme o *layout* de cada usina e a disponibilidade momentânea dos equipamentos”.

A Figura 3.1 representa esquematicamente o vazamento do alto-forno em um canal de corrida e o despejo do ferro-gusa no carro-torpedo.

Figura 3.1 - Representação esquemática do alto-forno e seu canal de corrida

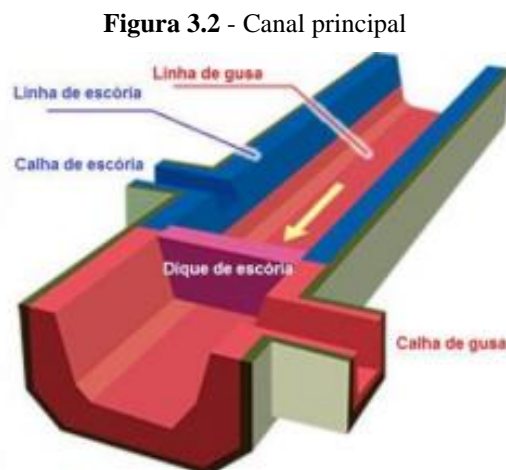


(REZENDE, 2008).

3.1.2 Canal de corrida de Alto-Forno

O canal de corrida em um alto-forno tem a função de conduzir o ferro-gusa proveniente do reator até o carro-torpedo, panela ou lingoteiras. Ao longo do canal ocorre a separação da mistura gusa-escória, assim como a homogeneização da temperatura do metal líquido. O canal principal possui um dique de escória (*skimmer*) que funciona como uma barreira física com a função de reter a escória sobrenadante e direcioná-la para um canal secundário (RIZZO, 2009).

Segundo Rezende (2008), “O canal de alto-forno consiste em uma calha de cerca de 20m de comprimento e pouco mais de 1m de largura e profundidade.” O formato do canal principal depende das dimensões e do *layout* da casa de corrida. Canais de corrida longos, profundos e largos são utilizados em altos-fornos de alta produção, empregando revestimentos refratários de alto custo e qualidade, enquanto altos-fornos de menores dimensões utilizam canais curtos, rasos e estreitos, além de um revestimento refratário de menor custo e qualidade. Os canais de corrida são projetados para cumprir determinados requisitos, como por exemplo: proporcionar uma boa separação da mistura gusa-escória, facilitar a manutenção, se adequar ao *layout* da casa de corrida e possuir um custo compatível (RIZZO, 2009). A composição de um canal principal pode ser observada na Figura 3.2.



Adaptado de (DUARTE, 2015).

Segundo Ghosh *et al.* (1986), existem dois sistemas de construção de canal de corrida.

- (1) Sistema de canal fixo – O sistema está permanentemente conectado com a casa de corrida, tendo seu reparo e a manutenção dos refratários feitos no local.

- (2) Sistema de canal substituível – O sistema contém um canal removível, possibilitando sua substituição, seja por inteiro ou em seções. O reparo e a manutenção dos refratários são feitos em local separado, distante da casa de corrida, possibilitando que um melhor trabalho seja feito.

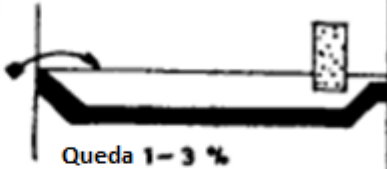
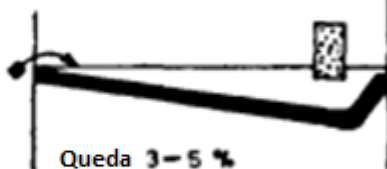
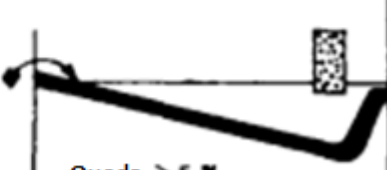
Os canais do tipo (1) são empregados em altos-fornos de pequeno e médio porte, enquanto do tipo (2) são utilizados em altos-fornos de alta capacidade devido ao elevado número de operações de vazamento.

Ghosh *et al.* (1986) também diferenciam os canais de corrida com base em seu *design* nos sistemas de acumulação do metal no canal, conforme indicado abaixo:

- (1) Sistema de piscina: O canal possui uma queda de 1%-3% e está constantemente cheio de ferro-gusa.
- (2) Sistema de semi-piscina: Um banho de ferro-gusa é mantido com uma altura de aproximadamente 100mm-200mm na zona de impacto e possui uma queda de 3%-5% no canal.
- (3) Sistema não-piscina: O vazamento é feito diretamente no canal, esse possuindo uma queda maior que 5%

Os sistemas acima são retratados na Figura 3.3.

Figura 3.3 - Designs dos canais de corrida

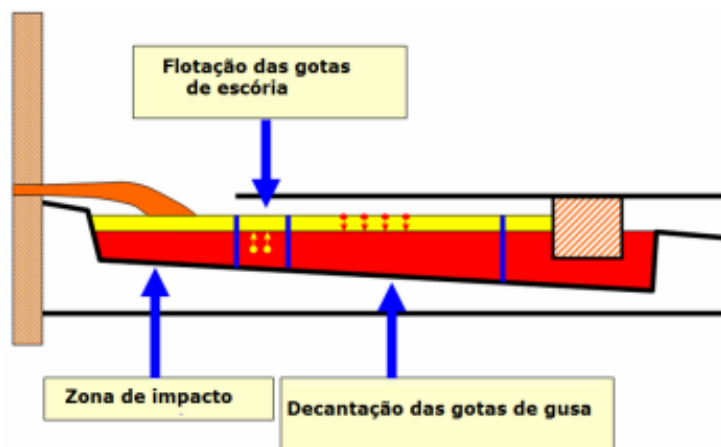
Tipo	DESIGN
Piscina	 <p data-bbox="778 1458 948 1485">Queda 1-3 %</p>
Semi-Piscina	 <p data-bbox="778 1671 948 1697">Queda 3-5 %</p>
Não-Piscina	 <p data-bbox="788 1895 938 1921">Queda > 5 %</p>

Adaptado de (GHOSH *et al.*, 1986).

Ainda de acordo com Ghosh *et al.* (1986), os canais de corrida de altos-fornos de alta capacidade devem ser construídos no sistema de piscina, já que o banho de ferro-gusa aumenta a proteção contra o desgaste. Altos-fornos com volume interno de até 1000m³ podem operar no sistema semi-piscina ou não-piscina, todavia, altos-fornos com volumes internos maiores, mais de 2000m³, estão cada vez mais sendo construídos no sistema de piscina e com canais substituíveis.

Marinelli *et al.* (2008) identificaram três regiões no canal de corrida. A primeira região é denominada Área de Impacto, a qual se estende por 2m a 3m do furo de corrida e é caracterizada por um fluxo turbulento que intensifica a mistura gusa-escória. Essa mistura permanece na região por aproximadamente 10 segundos. A segunda região é definida pela flotação das gotas de escória e se estende por mais 1m a 2m a partir da Área de Impacto. Na última região as gotas de ferro-gusa ainda presentes na escória decantam de volta para o banho. Essa região contempla os últimos 10m do canal antes do *skimmer*. Na Figura 3.4 podem ser observadas as três regiões identificadas pelos autores.

Figura 3.4 - Regiões do canal de corrida



Adaptado de (MARINELLI *et al.*, 2008).

3.2 Separação Ferro-gusa e Escória em Canal de Corrida

Como já citado anteriormente, ao longo do canal de corrida ocorre a mistura do ferro-gusa e a escória vazada do alto-forno devido, principalmente, ao fluxo turbulento na Área de Impacto. Com o aumento da capacidade dos altos-fornos, dos furos de corrida e do número de vazamentos veio à tona a preocupação com a melhoria da eficiência do processo e com a

redução dos custos operacionais. A otimização do processo de separação gusa-escória nos canais de corrida pode ser uma alternativa para suprir essa demanda (OLIVEIRA JR, 2021).

Kim, Ozturki e Fruehan (1998) descreveram o processo de separação gusa-escória no canal de corrida. A mistura gusa-escória, ao fluir pelo canal, começa a se separar. O gusa assenta para baixo devido a diferença de densidade, formando um fluxo bifásico. A separação do metal e da escória continua à medida que os líquidos fluem pelo canal e conseqüentemente espera-se que ocorra a separação completa das duas fases na região do *skimmer*. Os autores, entretanto, afirmam que alguma quantidade de metal ainda é transportada pela escória, ao mesmo tempo em que alguma quantidade de escória é conduzida junto ao metal através da abertura sob o *skimmer*. As perdas de metal na escória podem atingir porcentagem superiores a 2,5%.

Além das perdas, a ineficácia na separação pode afetar os processos subsequentes aos quais a escória e o ferro-gusa serão submetidos. A presença de metal na escória gera o risco de explosões durante o processo de granulação da escória, além de reduzir a qualidade dos produtos provenientes da escória. A porção de escória carregada pelo ferro líquido pode afetar a eficiência do processo de dessulfuração, devido ao sua composição com alto teor de enxofre e baixa basicidade Kim, Ozturki e Fruehan (1998).

Os fatores que afetam a separação gusa-escória foram descritos por Kim, Ozturki e Fruehan (1998) e Begnis e Brandaleze (2006), eles são:

- (1) Velocidade de separação: a diferença de densidade e o tamanho da partícula afetam como uma partícula ou gota se movem em um meio diferente, seja para flotar ou decantar. Em um regime laminar as gotas respondem à Lei de Stokes.
- (2) Tempo de permanência: para um separação bem sucedida o tempo de permanência da mistura gusa-escória no canal deve ser maior que o tempo de assentamento das gotas de ferro presentes na camada de escória. Este fator pode ser controlado pela taxa de fluxo dos líquidos e pelas dimensões geométricas do canal.
- (3) Dissipação de energia: A eficiência da separação é afetada pela taxa de dissipação de energia do fluxo proveniente do vazamento. O tamanho das gotas também é afetado por essa taxa.

- (4) Turbulência no canal: enquanto as gotas, seja de escória ou metal, estão sob o efeito da turbulência, seu assentamento será impedido. Esse fato aumenta o tempo de permanência necessário para ocorra a decantação/flotação das gotas.
- (5) Nível da interface: em um fluxo bifásico o nível da interface determina a velocidade do fluxo em cada fase e, portanto, o equilíbrio dinâmico de forças entre as duas fases. Com a queda do nível da interface, existirá uma menor possibilidade de que as gotas de gusa sejam carregadas pela escória devido ao aumento no tempo de permanência.
- (6) Entranhamento da escória na fase metálica: caso uma certa velocidade crítica entre as fases seja atingida, pode ocorrer o entranhamento de gotas de escória na fase metálica.

Kim, Ozturki e Fruehan (1998) concluíram em seu trabalho que a quantidade de metal carregado pela escória é determinada pelas variáveis do processo, assim como a geometria do canal de corrida. Foi encontrado que a perda de gusa na escória cresce:

- Linearmente com o volume de escória;
- Com a taxa de vazamento do forno;
- Linearmente com a viscosidade da escória;
- Significativamente quando o nível de ferro está acima da exigência para o balanço da força gravitacional.

Esses resultados estão associados ao fato de que líquidos em propriedades físicas constantes, tem sua velocidade de fluxo na corrente da fase superior como fato determinante na eficiência de separação.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado por meio de experimentos em um modelo físico de um canal de corrida disponível no Laboratório de Pirometalurgia e Simulação do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Ao longo dos experimentos algumas condições operacionais foram testadas visando uma melhor separação gusa-escória, sendo elas:

- Variação das vazões de gusa/escória;
- Diferentes ângulos de vazamento;
- Iniciar o vazamento com escória no canal.

4.1 Modelo Físico

O modelo físico utilizado foi construído em acrílico para a 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), em escala 1:10 comparado a um canal de corrida real de um alto-forno com uma produção de 7000t/dia e uma taxa de vazamento da ordem de 6t/min com um tempo médio de vazamento de 50 minutos. O modelo pode ser contemplado na Figura 4.1.

Figura 4.1 - Modelo físico de canal de corrida.



(OLIVEIRA JR., 2021).

De acordo com Oliveira Jr. (2021) o critério de similaridade de Froude, que relaciona a força de inércia com a força peso, deve ser utilizado na realização dos testes no modelo físico, o que resulta nas relações entre modelo e protótipo dispostas nas Equações 4.1 e 4.2:

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

Logo:

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

Sendo V a velocidade característica do sistema (m/s), g a aceleração da gravidade (m/s²) e L um comprimento característico do sistema (m).

Por meio deste critério e do fator de escala λ obtém-se as seguintes relações entre modelo e protótipo, obtém-se as Equações 4.3 a 4.8:

$$\text{Dimensão: } \frac{L_M}{L_P} = \lambda; \quad (4.3)$$

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

$$\text{Tempo: } \frac{t_M}{t_P} = \lambda^{0,5} \quad (4.5)$$

$$\text{Área: } \frac{A_M}{A_P} = \lambda^2 \quad (4.6)$$

$$\text{Vazões volumétricas: } \frac{Q_M}{Q_P} = \lambda^{2,5} \quad (4.7)$$

$$\text{Volume: } \frac{V_M}{V_P} = \lambda^3 \quad (4.8)$$

A Tabela 4.1 contém dados gerais e propriedades dos fluídos utilizados no modelo e protótipo.

Tabela 4.1 - Dados do modelo e protótipo

	Características do canal de corrida		Protótipo	Modelo
Dados Gerais	Comprimento (m)		18,8	1,88
	Posição do skimmer (m)		16	1,6
	Abertura do skimmer (m)		0,2	0,02
	Altura do canal de gusa (mm)		665	66,5
	Altura do canal de escória (mm)		700	70
	Temperatura (°C)		1500	25
Propriedades dos fluidos	Razão entre densidades	Gusa/escória Água/querosene	2,8	1,22
		Gusa Água (m Pa.s)	5,7	1
	Viscosidade	Escória querosene	0,2	2,25
		Tensão Superficial (N/m)	Gusa/escória Água/querosene	1,2

Adaptado de (OLIVEIRA Jr., 2021)

A diferença de densidade entre os fluídos utilizados (água/querosene) para simular o vazamento de gusa/escória é essencial, já que é a responsável pela separação. Porém para manter a mesma razão entre densidades entre o gusa e a escória seria necessário um óleo de densidade próxima à $0,33\text{kg/m}^3$. Não foi possível encontrar um óleo com densidade tão discrepante da água, logo foi utilizado óleo querosene para simular a escória no canal, que de acordo com seu fabricante Querosene Jacaré (2020), possui uma densidade de 810kg/m^3 (OLIVEIRA JR., 2021).

Durante os experimentos realizados vários parâmetros foram alterados, dentre eles o ângulo de vazamento (realizando experimentos nos ângulos de 30° e 45°), a vazão de gusa (variada entre $3,5\text{L/min}$ e 7L/min) e o diâmetro do tubo de vazamento (alterando-se entre 10mm e 13mm). Dessa forma, foram testadas 8 condições buscando averiguar em qual se daria uma melhor eficiência de separação gusa/escória.

4.1.2 Nomenclatura dos testes

Para melhor visualização das condições testadas os experimentos foram nomeados da seguinte forma:

1. Ordem do teste;
2. Vazão utilizada;
3. Diâmetro utilizado;
4. Ângulo utilizado em relação a vertical.

Dando origem a uma classificação que pode ser visualizada na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Exemplo nomenclatura dos testes.



O símbolo (i) foi utilizado quando o dado é referente à média entre todos os testes (1, 2, 3, ...) realizados para determinada condição.

4.1.3 Número de Peclet de turbulência

O número de Peclet é determinado pela razão entre intensidade de transporte de matéria por convecção e a difusão turbulenta, desta forma obtém-se a Equação 4.9.

$$Pe = \frac{uL}{D_{turbulenta}} \quad (4.9)$$

Os números de Peclet obtidos foram determinados pela Equação 4.10 proposta por Levenspiel (1999), considerando o canal de corrida como um reator de fronteiras fechadas em que não existe *backflow*.

$$\frac{\sigma^2}{\tau^2} = \frac{2}{Pe} - 2 \frac{1 - e^{-Pe}}{Pe^2} \quad (4.10)$$

4.1.4 Testes de condutimetria

Os testes de condutimetria são amplamente utilizados em modelagem física, na maioria das vezes como uma forma de avaliar o tempo de residência de um fluido num reator. Neste trabalho vários parâmetros foram obtidos durante os testes de condutimetria, os principais parâmetro analisados foram o número de Peclet e o tempo mínimo de residência (Tmin.).

O teste de condutimetria consiste na injeção em forma de pulso de uma solução salina no bico de vazamento (BRAGA, 2019). Condutivímetros presentes ao longo do canal de corrida são responsáveis por medir a variação da condutividade da água, que se deve a variação da concentração do sal em cada região. O sal utilizado nos experimentos foi o cloreto de potássio (KCl) em forma de uma solução salina saturada. Estes condutivímetros são conectados a uma placa de aquisição de dados que é responsável por enviar os dados ao computador. Um programa é responsável pelo tratamento destes dados, dando como resposta vários parâmetros e dentre eles o número de Peclet e Tmin.

Na Figura 4.3 é possível observar a montagem dos condutivímetros (destacados por círculos vermelhos) ao longo do modelo do canal de corrida.

Figura 4.3 – Montagem experimental dos testes de condutimetria.



A Tabela 4.2 mostra a posição de cada condutivímetro, medida em relação à extremidade do modelo próxima ao furo de vazamento.

Tabela 4.2 – Posição dos condutivímetros.

Condutivímetro	Distância (cm)
cd1	7,5
cd2	83,5
cd3	132
cd4	167

Os testes de condutimetria foram realizados 5 vezes para cada condição buscando garantir a precisão dos valores obtidos, os quais foram tratados em uma planilha para posterior análise e discussão dos resultados.

4.1.5 Separação gusa-escória

A eficiência na separação gusa-escória foi mensurada por meio da razão entre a água e querosene (A/Q) que escoaram pelo canal de escória ao longo do experimento. Os fluidos foram coletados em 9 provetas de 1L para posterior análise da razão A/Q. As coletas foram realizadas intervaladas de 30 segundos em 30 segundos, sendo a primeira coleta no instante $t = 30s$, totalizando um tempo experimental de 4 minutos e 30 segundos. A avaliação foi realizada em regime transiente admitindo-se que ao início do vazamento o canal se

encontrava parcialmente preenchido com camadas bem definidas de gusa e escória e que apenas gusa é vazado pelo furo de corrida. A camada de escória era mantida em aproximadamente 1cm (medidos com o auxílio de uma régua acoplada ao canal) em todos os testes, fato que pode ser observado na Figura 4.4.

Figura 4.4 – Camada de escória prévia aos testes de separação.



O impacto inicial do jato foi sobre banhos estáticos. Diferentes vazões de água e ângulos de vazamento foram empregadas de forma a refletir diferentes condições de vazamento. Foram realizados três testes para cada condição.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Dados Obtidos por Condutimetria

Utilizando-se da técnica de condutimetria foi possível obter valores de número de Peclet e T_{min} em cada condutivímetro, referentes a cada condição testada. Estes dados estão contemplados nas Tabelas 5.1 a 5.8 separadas por condição testada.

Tabela 5.1 – Resultados obtidos em cada condutivímetro para a condição i31030

i31030								
	Peclet				Tmin (s)			
	cd1	cd2	cd3	cd4	cd1	cd2	cd3	cd4
t1	1,829	1,870	6,593	5,240	18,129	23,730	100,621	86,672
t2	1,748	2,186	6,842	5,135	18,668	25,918	100,789	87,277
t3	2,100	2,110	6,531	5,173	18,402	24,551	93,320	88,211
t4	2,206	1,897	5,861	4,908	19,332	25,480	103,090	84,691
t5	2,123	2,435	9,157	4,868	20,539	23,621	92,820	85,629
Média	2,001	2,100	6,997	5,065	19,235	24,893	97,505	86,452
Desv.p	0,200	0,231	1,261	0,166	0,953	1,021	5,210	1,587

Tabela 5.2 - Resultados obtidos em cada condutivímetro para a condição i31045

i31045								
	Peclet				Tmin (s)			
	cd1	cd2	cd3	cd4	cd1	cd2	cd3	cd4
t1	2,984	3,221	9,201	6,053	16,098	23,129	81,508	81,508
t2	2,808	3,696	8,451	5,836	13,078	24,121	69,648	85,910
t3	2,845	3,585	9,248	5,890	15,270	25,820	73,992	83,332
t4	2,980	3,228	8,643	5,978	15,000	25,047	73,488	87,277
t5	2,997	3,221	7,655	6,188	15,160	22,238	67,988	85,238
Média	2,923	3,390	8,640	5,989	14,921	24,071	73,325	84,653
Desv.p	0,089	0,232	0,650	0,139	1,114	1,437	5,231	2,261

Tabela 5.3 -Resultados obtidos em cada condutivímetro para a condição i31330

i31330								
	Peclet				Tmin (s)			
	cd1	cd2	cd3	cd4	cd1	cd2	cd3	cd4
t1	2,581	2,803	6,723	8,260	16,371	29,723	96,613	111,012
t2	2,175	2,695	10,272	6,012	14,180	28,070	114,301	94,641
t3	2,562	2,500	8,564	5,613	12,418	29,000	91,289	93,379
t4	2,820	2,965	10,338	6,421	18,180	31,250	97,770	96,781
t5	2,963	3,158	15,571	5,689	17,301	29,551	123,738	89,910
Média	2,620	2,824	10,294	6,399	16,508	29,519	104,742	97,145
Desv.p	0,300	0,252	3,301	1,088	1,719	1,163	13,674	8,143

Tabela 5.4 - Resultados obtidos em cada condutivímetro para a condição i31345

i31345								
	Peclet				Tmin (s)			
	cd1	cd2	cd3	cd4	cd1	cd2	cd3	cd4
t1	2,497	2,965	7,966	5,887	10,098	25,430	75,469	86,730
t2	2,077	3,119	8,939	6,689	9,180	26,750	83,488	89,258
t3	2,220	3,194	10,787	5,863	12,141	31,410	118,688	88,758
t4	2,408	3,479	9,438	5,980	11,199	30,699	99,078	86,281
t5	2,556	3,290	10,012	5,990	10,270	29,930	74,199	90,238
Média	2,352	3,209	9,428	6,082	10,578	28,844	90,184	88,253
Desv.p	0,199	0,192	1,068	0,344	1,130	2,610	18,765	1,689

Tabela 5.5 - Resultados obtidos em cada condutivímetro para a condição i71030

i71030								
	Peclet				Tmin (s)			
	cd1	cd2	cd3	cd4	cd1	cd2	cd3	cd4
t1	2,310	0,319	1,955	4,838	22,797	9,230	30,098	50,367
t2	2,848	0,661	3,369	5,045	25,039	13,559	35,527	51,348
t3	2,576	1,687	5,278	5,361	20,477	13,289	40,969	52,340
t4	2,348	1,070	2,131	4,919	22,742	12,410	33,070	48,672
t5	2,731	1,228	3,914	4,961	22,031	11,258	41,309	51,961
Média	2,563	0,993	3,329	5,025	22,617	11,949	36,195	50,938
Desv.p	0,234	0,526	1,366	0,202	1,646	1,766	4,907	1,470

Tabela 5.6 - Resultados obtidos em cada condutivímetro para a condição i71045

i71045								
	Peclet				Tmin (s)			
	cd1	cd2	cd3	cd4	cd1	cd2	cd3	cd4
t1	1,577	1,390	4,271	7,482	17,020	14,988	41,137	58,219
t2	1,463	0,856	2,642	6,252	16,699	16,699	38,070	55,859
t3	1,664	1,301	2,349	5,752	17,141	19,172	43,453	59,703
t4	1,975	1,018	2,649	5,111	18,070	18,070	41,238	54,371
t5	1,820	0,932	2,784	5,824	15,102	13,070	39,000	53,059
Média	1,700	1,099	2,939	6,084	16,833	16,400	40,580	56,242
Desv.p	0,202	0,234	0,761	0,881	1,246	2,431	2,109	2,723

Tabela 5.7 - Resultados obtidos em cada condutivímetro para a condição i71330

	i71330							
	Peclet				Tmin (s)			
	cd1	cd2	cd3	cd4	cd1	cd2	cd3	cd4
t1	2,998	0,379	1,793	4,440	19,500	16,422	44,051	55,359
t2	3,138	1,071	3,818	4,961	20,371	17,301	42,891	54,148
t3	3,101	1,020	3,325	4,981	21,859	14,547	40,590	55,199
t4	2,581	0,340	1,617	3,082	15,441	16,480	44,332	50,539
t5	3,096	0,899	2,428	5,203	22,410	19,340	44,930	59,270
Média	2,983	0,742	2,596	4,533	19,916	16,818	43,359	54,903
Desv.p	0,231	0,355	0,956	0,858	2,757	1,734	1,716	3,122

Tabela 5.8 - Resultados obtidos em cada condutivímetro para a condição i71345

	i71345							
	Peclet				Tmin (s)			
	cd1	cd2	cd3	cd4	cd1	cd2	cd3	cd4
t1	2,733	1,349	2,530	5,831	15,555	15,555	40,656	58,445
t2	2,820	1,120	2,368	5,380	18,070	15,602	48,441	58,270
t3	2,815	1,030	1,619	4,068	19,340	19,340	46,852	62,512
t4	2,815	0,744	2,075	5,201	15,430	15,430	41,742	59,813
t5	2,618	0,788	2,311	5,630	14,391	16,422	44,273	58,773
Média	2,760	1,006	2,181	5,222	16,557	16,470	44,393	59,563
Desv.p	0,087	0,249	0,354	0,688	2,062	1,652	3,295	1,754

O tempo mínimo de residência (Tmin) é um parâmetro que pode prever a eficiência da separação gusa-escória. Admite-se que quanto maior o Tmin, maior a oportunidade de separação. A análise do Tmin contemplou principalmente condutivímetro 3 (cd3), o qual está localizado em frente ao canal de escória. Para melhor visualização dos dados, a Tabela 5.9 contempla os valores do Tmin apenas no cd3 para cada condição.

Tabela 5.9 – Tmin médio no condutivímetro 3 para todas as condições testadas

Condição	cd3 / Tmin (s)
i71030	36,1946
i71045	40,5796
i71330	43,3588
i71345	44,3928
i31045	73,3248
i31345	90,1844
i31030	97,50475
i31330	104,7422

Comparados os resultados para as várias condições, observou-se que a vazão tem uma grande influência sobre a eficiência de separação. Todas as condições testadas a 7L/min apresentaram valores de T_{min} muito inferiores às condições equivalentes testadas a 3,5L/min. Na vazão de 7L/min constatou-se que um maior ângulo de incidência do jato (45°) levou a maiores valores de T_{min}, enquanto na vazão de 3,5L/min um menor ângulo de incidência (30°) provocou maiores valores para o T_{min}. Dessa forma, o parâmetro de T_{min} se mostrou inconclusivo sobre a influência do ângulo sobre a eficiência de separação gusa-escória. No que tange ao diâmetro do furo de corrida, todas as condições com 13mm de diâmetro levaram a maiores valores de T_{min}, comparadas às condições com 10mm de diâmetro.

O número de Peclet é relacionado ao nível de turbulência no canal, quanto menor seu valor maior a turbulência. Igualmente ao parâmetro T_{min}, foi considerado que uma menor turbulência no condutivímetro 3 (cd3) acarretaria em uma melhor separação gusa-escória. Na Tabela 5.10 podem ser observados os valores médios do número de Peclet para cada condição testada.

Tabela 5.10 – Número de Peclet médio no cd3 para todas as condições testadas

Condição	cd3 / Peclet
i71345	2,1806
i71330	2,5962
i71045	2,939
i71030	3,3294
i31030	6,9968
i31045	8,6396
i31345	9,4284
i31330	10,2936

Novamente, a influência da vazão sobre a eficiência de separação mostrou-se discrepante. A vazão de 7L/min proporcionou valores muito inferiores do número de Peclet, se comparados à vazão de 3,5L/min. Na maioria das condições testadas, o ângulo de 45° apresentou menores valores de número de Peclet, embora muito próximos. Fenômeno que só não ocorreu nas condições i31030 e i31045. Mais uma vez, a variação no ângulo de incidência se mostrou inconclusiva. As condições i71345 e i71330 apresentaram os menores números de Peclet no condutivímetro cd3 enquanto as condições i31345 e i31330 os maiores números de

Peclet. Considerando a premissa anterior estas condições apresentaram a pior separação gusa/escória e a melhor respectivamente. Desta forma, a análise do número de Peclet não se mostrou conclusiva sobre a diferença do diâmetro sobre a eficiência de separação.

5.2 Separação Gusa-Escória

Os testes de separação gusa-escória foram realizados para uma quantidade reduzida de condições. A análise dos resultados, parâmetros T_{min} e Peclet obtidos nos testes de condutimetria, permitiu observar que os testes se mostraram inconclusivos sobre a influência do ângulo de incidência sobre a separação. Desta forma, optou-se por realizar os testes de separação com um diâmetro de furo de corrida fixo, fato que se mostrou ainda mais interessante ao se observar os resultados obtidos quanto ao parâmetro número de Peclet, onde as condições com diâmetro de 13mm apresentaram os menores (i71345 e i71330) e maiores (i31345 e i31330) números de Peclet. Logo, os testes de separação contemplaram as condições de diâmetro 13mm.

Os resultados obtidos nos testes de separação gusa-escória são mostrados no APÊNDICE – A. Para melhor apresentação dos mesmos, foram construídos gráficos evidenciando o progresso da razão entre água e querosene (A/Q) ao longo do tempo de experimento (t). As Figuras 5.1 a 5.4 mostram graficamente os resultados obtidos para cada condição.

Figura 5.1 – Gráfico da razão A/Q x t(s) para a condição i31330

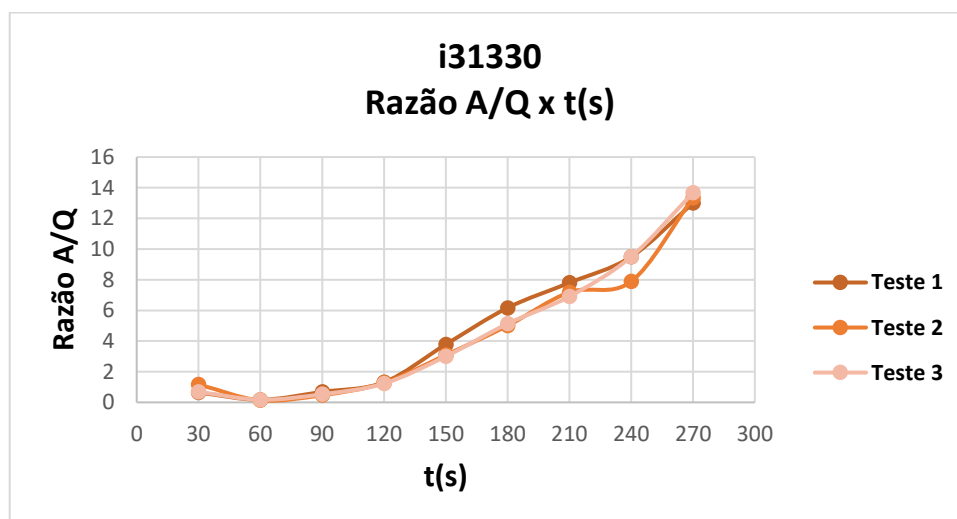


Figura 5.2 – Gráfico da razão A/Q x t(s) para a condição i31345

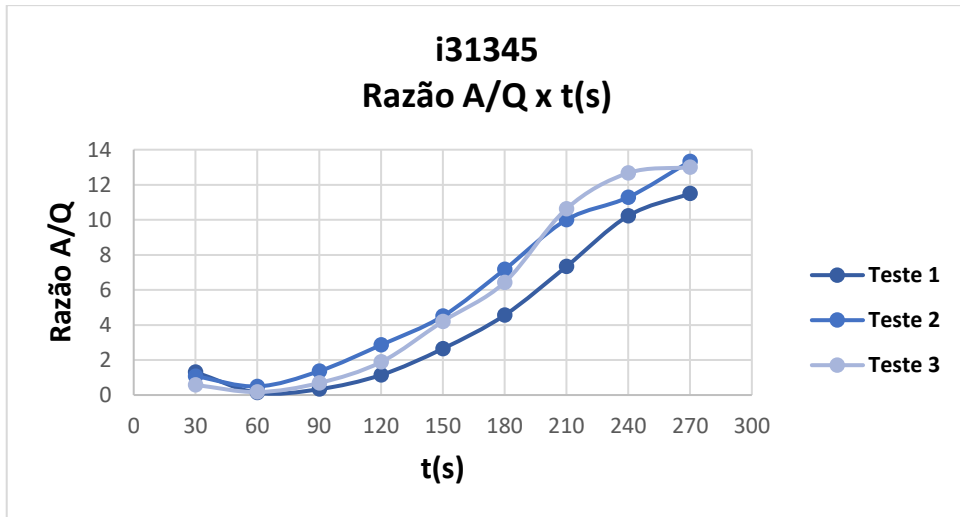


Figura 5.3 – Gráfico da razão A/Q x t(s) para a condição i71330

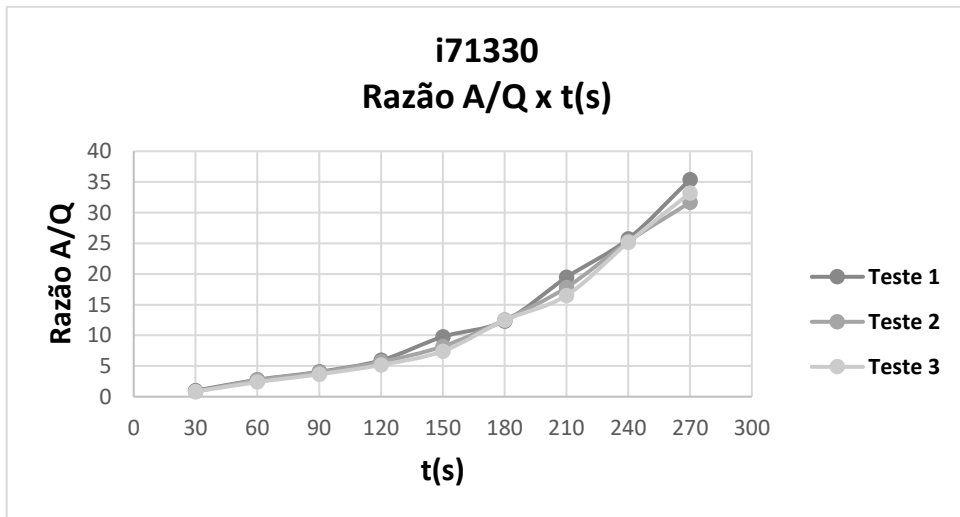
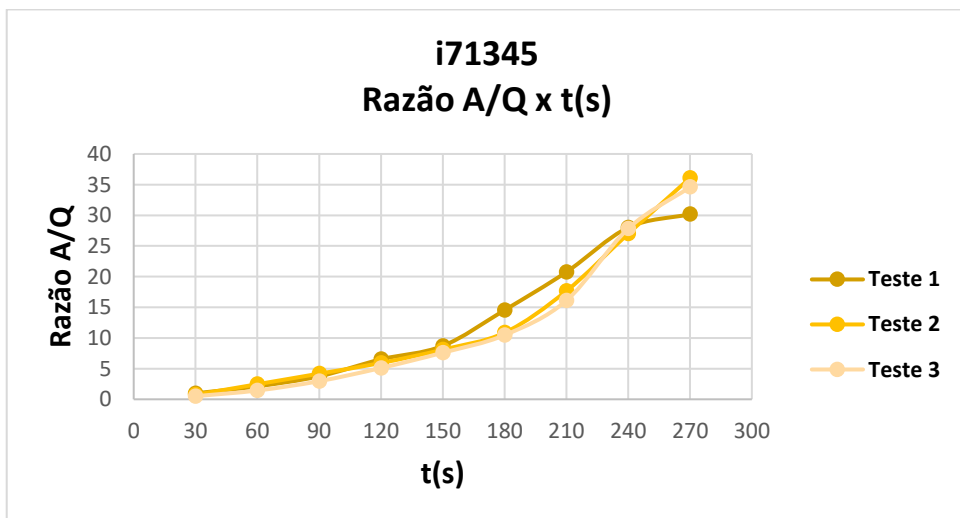


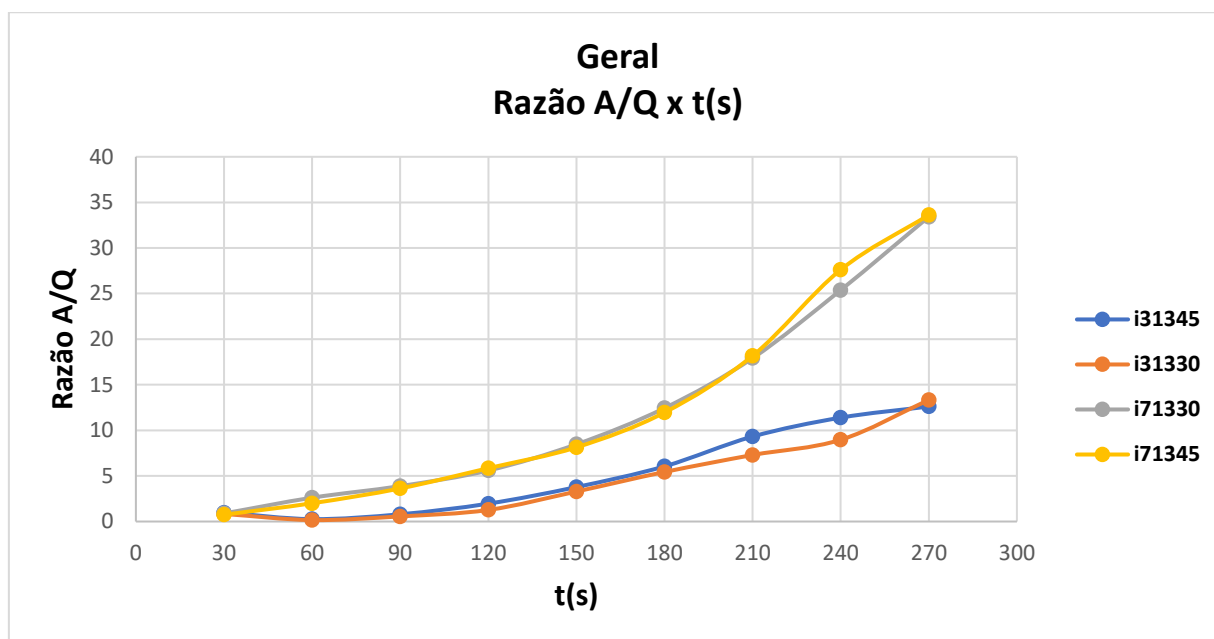
Figura 5.4 – Gráfico da razão A/Q x t(s) para a condição i71345



Todos as repetições apresentaram o mesmo comportamento, validando os testes.

Para possibilitar uma melhor visualização dos resultados foi construído um gráfico geral, contemplando as médias dos resultados de cada condição, facilitando a comparação entre todas elas. A Figura 5.5 apresenta este gráfico geral.

Figura 5.5 – Gráfico geral da razão A/Q x t(s)



Os dados apresentados neste gráfico mais uma vez permitem notar que a vazão é a principal variável na eficiência de separação gusa escória. Fator que condiz com os resultados obtidos por Kim, Ozturki e Fruehan (1998), onde foi observado que a perda de gusa na escória cresce com a taxa de vazamento do forno. A vazão de 7L/min apresentou uma razão A/Q mais elevada, ou seja, perdeu-se mais água (gusa) pelo canal de escória durante o período experimentado. Os resultados para as mesmas vazões se exibiram de forma similar, independentemente do ângulo.

6 CONCLUSÕES

A vazão é o principal fator que influencia na separação gusa-escória. Maiores vazões tendem a apresentar uma maior turbulência e um menor tempos de residência, acarretando em pior separação. De maneira oposta, menores vazões apresentam o efeito inverso.

Para os ângulos testados (30° e 45°), a influência sobre a separação se mostrou inconclusiva.

Maiores diâmetros do furo de corrida apresentam maior tempo mínimo de residência, ou seja, uma melhor oportunidade de separação gusa-escória.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLIBERT, M.; EISENHÜTTENLEUTE, V. D.; GAYE, H.; GEISELER, J.; JANKE, D.; KEENE, B. J.; KIRNER, D.; KOWALSKI, M.; LEHMANN, J.; MILLS, K. C.; NEUSCHÜTZ, D.; PARRA, R.; SAINT-JOURS, C.; SPENCER, P. J.; SUSA, M.; TMAR, M. e WOERMANN, E. **Slag Atlas**. 2ed. Düsseldorf: Verlag Stahleisen, 1995. 616p.

BEGNIS, J. S. S.; BRANDALEZE, E. Simulación del canal del alto horno n°2 por medio de modelos físicos. **Estudios Tecnológicos**, v. 2, n. 1, p. 1-12, 2006

BRAGA, B. M. **Aprimoramento das técnicas de simulação dos fenômenos associados ao escoamento do aço em distribuidores para lingotamento contínuo**. 2019. 154f. Tese. Doutorado em Engenharia Metalúrgica - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2019.

DUARTE, A. K. Refratários para fornos de reaquecimento. In: SEMINÁRIO ALAFAR, 2015, Santiago do Chile, Chile. **Curso de Fundamentos em Refratários**, 2015, p. 1-101.

GHOSH, N. K.; GARAI, S. K.; BHATTACHARYA, A. K.; BARUA, S.; DASGUPTA, A. K. Improvement in Blast Furnace Trough Mixes in India. **Transactions of the Indian Ceramic Society**, v. 45, n. 6, p. 156-161, 1986

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.

LEVENSPIEL, O. **Chemical Reaction Engineering**. 3ed. Nova York: John Wiley & Sons, Inc, 1999. 668p.

MARINELLI, P.; MIRABELLI, J. J.; BELTRÁN, D.; GÓMEZ, O. D.; CAMELLI, S.; RIMOLDI, M. J. **Main runners Cooled by forced air: experience Ternium Plant General Savio**. Ternium Planta General Savio, San Nicolás: 2008, 13p. Disponível em: <https://docplayer.net/64983976-Main-runners-cooled-by-forced-air-experience-ternium-plant-general-savio.html>. Acesso 26 mai. 2022.

OLIVEIRA JR, M. M. D. **Modelagem do fluxo multifásico em canal de alto-forno com foco na melhoria da eficiência de separação metal-escória**. 2021. 101f. Tese. Mestrado em Engenharia de Materiais - Rede Temática em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil, 2021.

REZENDE, R.V.P. **Modelagem Matemática e Desenvolvimento de Metodologia Computacional para a Simulação numérica do Escoamento Bifásico de Ar e Ferro-Gusa em Canal de Alto-forno** 2008. 192f. Tese. Mestrado em Engenharia Mecânica - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 2008.

RIZZO, E. M. D. S. **Processo de Fabricação de Ferro-gusa em Alto-forno**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Mineração, 2009. 277p.

APÊNDICE A – Resultados obtidos nos testes de separação gusa-escória

Tabela A.1 – Resultados de separação gusa-escória para a condição i31330

i31330									
Teste	t(s)	A	Q	A/Q	Teste	t(s)	A	Q	A/Q
Teste 1	30	170	265	0,642	Teste 2	30	280	240	1,167
	60	65	375	0,173		60	50	370	0,135
	90	175	255	0,686		90	160	340	0,471
	120	255	195	1,308		120	280	220	1,273
	150	340	90	3,778		150	340	110	3,091
	180	370	60	6,167		180	350	70	5,000
	210	390	50	7,800		210	395	55	7,182
	240	380	40	9,500		240	355	45	7,889
	270	390	30	13,000		270	400	30	13,333
Teste 3	30	240	350	0,686	Média	30	x	x	0,831
	60	80	460	0,174		60	x	x	0,161
	90	170	320	0,531		90	x	x	0,563
	120	270	220	1,227		120	x	x	1,269
	150	345	115	3,000		150	x	x	3,290
	180	385	75	5,133		180	x	x	5,433
	210	380	55	6,909		210	x	x	7,297
	240	380	40	9,500		240	x	x	8,963
	270	410	30	13,667		270	x	x	13,333

Tabela A.2 – Resultados de separação gusa-escória para a condição i31345

i31345									
Teste	t(s)	A	Q	A/Q	Teste	t(s)	A	Q	A/Q
Teste 1	30	300	230	1,304	Teste 2	30	280	260	1,077
	60	60	460	0,130		60	170	345	0,493
	90	130	390	0,333		90	300	220	1,364
	120	280	245	1,143		120	400	140	2,857
	150	370	140	2,643		150	360	80	4,500
	180	410	90	4,556		180	430	60	7,167
	210	440	60	7,333		210	400	40	10,000
	240	460	45	10,222		240	395	35	11,286
	270	460	40	11,500		270	400	30	13,333
Teste 3	30	190	330	0,576	Média	30	x	x	0,986
	60	80	470	0,170		60	x	x	0,264
	90	220	320	0,688		90	x	x	0,795
	120	350	186	1,882		120	x	x	1,961
	150	420	100	4,200		150	x	x	3,781
	180	450	70	6,429		180	x	x	6,050
	210	425	40	10,625		210	x	x	9,319
	240	380	30	12,667		240	x	x	11,392
	270	390	30	13,000		270	x	x	12,611

Tabela A.3 – Resultados de separação gusa-escória para a condição i71330

i71330									
Teste	t(s)	A	Q	A/Q	Teste	t(s)	A	Q	A/Q
Teste 1	30	440	450	0,978	Teste 2	30	410	490	0,837
	60	675	245	2,755		60	690	255	2,706
	90	750	185	4,054		90	730	185	3,946
	120	770	130	5,923		120	795	140	5,679
	150	830	85	9,765		150	820	100	8,200
	180	850	69	12,319		180	815	65	12,538
	210	875	45	19,444		210	890	50	17,800
	240	900	35	25,714		240	885	35	25,286
	270	885	25	35,400		270	855	27	31,667
Teste 3	30	400	475	0,842	Média	30	x	x	0,886
	60	630	265	2,377		60	x	x	2,613
	90	730	200	3,650		90	x	x	3,883
	120	725	140	5,179		120	x	x	5,593
	150	780	105	7,429		150	x	x	8,464
	180	810	65	12,462		180	x	x	12,440
	210	825	50	16,500		210	x	x	17,915
	240	880	35	25,143		240	x	x	25,381
	270	830	25	33,200		270	x	x	33,422

Tabela A.4 – Resultados de separação gusa-escória para a condição i71345

i71345									
Teste	t(s)	A	Q	A/Q	Teste	t(s)	A	Q	A/Q
Teste 1	30	450	460	0,978	Teste 2	30	375	500	0,750
	60	645	305	2,115		60	590	240	2,458
	90	730	195	3,744		90	690	165	4,182
	120	750	115	6,522		120	740	125	5,920
	150	740	85	8,706		150	770	95	8,105
	180	800	55	14,545		180	760	70	10,857
	210	830	40	20,750		210	795	45	17,667
	240	840	30	28,000		240	810	30	27,000
	270	845	28	30,179		270	830	23	36,087
Teste 3	30	315	620	0,508	Média	30	x	x	0,745
	60	560	390	1,436		60	x	x	2,003
	90	680	230	2,957		90	x	x	3,627
	120	740	145	5,103		120	x	x	5,848
	150	760	100	7,600		150	x	x	8,137
	180	785	75	10,467		180	x	x	11,956
	210	805	50	16,100		210	x	x	18,172
	240	835	30	27,833		240	x	x	27,611
	270	865	25	34,600		270	x	x	33,622