



**Universidade Federal de Ouro Preto**  
**Escola de Minas**  
**Departamento de Engenharia de Metalúrgica e de Materiais**  
**Campus Morro do Cruzeiro**  
**Ouro Preto – Minas Gerais – Brasil**



**AVALIAÇÃO DA DESSULFURAÇÃO DO AÇO NO REATOR RH POR  
MEIO DA INJEÇÃO DE MATERIAL POR LANÇA SUBMERSA -  
MODELAMENTO FÍSICO**

**Thalys Bruno de Souza Ventura**

**Ouro Preto, março de 2025**

**Thalys Bruno de Souza Ventura**

**AVALIAÇÃO DA DESSULFURAÇÃO DO AÇO NO REATOR RH POR  
MEIO DA INJEÇÃO DE MATERIAL POR LANÇA SUBMERSA -  
MODELAMENTO FÍSICO**

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. DSc. Johne Jesus Mol Peixoto**

**Ouro Preto, março de 2025**



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
REITORIA  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE  
MATERIAIS



**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Thalys Bruno de Souza Ventura**

**Avaliação da Dessulfuração do Aço no Reator RH por Meio da Injeção de Material por Lança Submersa -  
Modelamento Físico**

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

Aprovada em 13 de março de 2025.

**Membros da banca**

Dr. Johne Jesus do Mol Peixoto - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)  
PhD. Carlos Antônio da Silva - Membro (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Dr. Antônio Marlon Barros Silva - Membro (Instituto Federal de Minas Gerais - Campus Ouro Branco)

Johne Jesus do Mol Peixoto, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 11/06/2025



Documento assinado eletronicamente por **Johne Jesus Mol Peixoto, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/06/2025, às 16:19, 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](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0928341** e o código CRC **69B28074**.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me deu forças e sabedoria para trilhar este caminho, mesmo diante das adversidades. À Jesus Cristo, meu Salvador, que foi e sempre será minha fonte de inspiração e fé e à Virgem Maria, minha mãe, que com seu acolhimento e intercessão, me guiou em momentos de desespero e me fortaleceu nas minhas decisões.

À minha amada avó Efigênia, cujo amor e exemplo inabaláveis continuam a me inspirar, mesmo após seu descanso eterno. À minha mãe Vera, cuja presença e ensinamentos ainda ecoam em minha vida e me acompanham em cada passo, mesmo que já não esteja mais entre nós fisicamente.

Ao meu pai Francisco, que, ao longo de toda minha vida, desempenhou tanto o papel de pai quanto o de mãe, sem jamais medir esforços para me apoiar em tudo o que precisei.

Ao meu orientador, Dr. Johnne, por todo apoio e ensinamentos, e aos amigos que construí no laboratório: Bennardo, Ana, Davi, Sid, Willian, Fernanda e Igor, pela paciência, dedicação e pelas contribuições fundamentais para a concretização deste trabalho.

À FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) pelo apoio e financiamento ao projeto APQ-02501-24. Esse incentivo foi fundamental para o avanço das nossas pesquisas e para a promoção de novos conhecimentos na área, permitindo o desenvolvimento de soluções inovadoras e o fortalecimento da ciência.

E por fim, não poderia deixar de expressar minha eterna gratidão à República Pulgatório e os moradores Kuririca, Preguiça, Club Social, Obelix, Unissex, Kiabo e Derramado, que me acolheram no momento mais difícil da minha vida. O acolhimento e apoio me permitiram seguir com meu propósito, e por isso, enquanto eu respirar, serei grato.

A todos que, direta ou indiretamente, estiveram ao meu lado nesta jornada, meu sincero agradecimento.

## RESUMO

A demanda por aços de alta qualidade tem impulsionado a dessulfuração no refino secundário. Além de desgaseificação e descarburização, o desgaseificador RH (Ruhrstahl-Heraeus) vem sendo usado para reduzir teores de enxofre, particularmente para a produção de em aços com ultrabaixo teor de enxofre ( $[S] < 10 \text{ ppm}$ ). Este procedimento é realizado através da introdução de material na câmara de vácuo, onde a turbulência inicial favorece a reação entre aço e escória. Contudo, a escória gerada é cisalhada e levada para o vaso inferior, voltando à superfície da panela, onde sua estagnação interrompe o processo de dessulfuração. Tendo em vista que matérias-primas com menor percentual de enxofre são escassas e caras, um aumento na eficiência de dessulfuração no refino secundário deve ser alcançada. Neste trabalho, estudou-se a dessulfuração do aço no reator RH por meio da injeção de material dessulfurante por uma lança submersa, posicionada na panela em locais favoráveis à dispersão do reagente. Foram empregadas técnicas de modelamento físico para caracterizar o comportamento do processo no reator. Testes de condutivimetria foram realizados para determinar a taxa de circulação e o tempo de mistura no modelo de reator RH, além de filmagens que caracterizaram o fluxo e a dispersão de gotas do material injetado. Também foram conduzidos testes de transferência de massa, utilizando timol como traçador (enxofre) e óleo de soja como dessulfurante, com o objetivo de caracterizar a dessulfuração por meio de análises do coeficiente aparente de transferência de massa. Os resultados obtidos demonstraram que o aumento da vazão de gás tanto no RH quanto na lança, otimizaram o tempo de mistura e a taxa de circulação e que, a elevação da vazão de gás, especialmente na lança, promoveu uma transferência de massa mais eficiente, resultando na redução da concentração do traçador na fase aquosa e indicando uma melhora substancial na remoção de enxofre do aço. As filmagens mostraram que, incrementos na vazão de gás, provocam redução no tempo de dispersão e circulação, tanto para o corante quanto para o óleo.

**Palavras-chave:** Modelamento Físico. Dessulfuração do Aço. Transferência de Massa. Desgaseificador RH. Refino Secundário. Emulsificação aço-escória.

## ABSTRACT

The demand for high-quality steels has driven the need for desulfurization in secondary refining. In addition to degassing and decarburization, the RH (Ruhrstahl-Heraeus) degasser has been used to reduce sulfur content, particularly for the production of ultra-low sulfur steels ( $[S] < 10$  ppm). This process is carried out through the introduction of material into the vacuum chamber, where the initial turbulence promotes the reaction between steel and slag. However, the generated slag is sheared and carried to the lower vessel, returning to the ladle surface, where its stagnation interrupts the desulfurization process. Given that raw materials with low sulfur content are scarce and expensive, increasing desulfurization efficiency in secondary refining is essential. In this study, the desulfurization of steel in the RH reactor was investigated through the injection of desulfurizing material using a submerged lance, positioned in the ladle at locations favorable for reagent dispersion. Physical modeling techniques were employed to characterize the process behavior in the reactor. Conductivity tests were conducted to determine the circulation rate and mixing time in the RH reactor model, along with video recordings that characterized the flow and droplet dispersion of the injected material. Mass transfer tests were also conducted using thymol as a tracer (representing sulfur) and soybean oil as a desulfurizing agent to characterize the desulfurization process through analyses of the apparent mass transfer coefficient. The results showed that increasing the gas flow rate, both in the RH and in the lance, optimized the mixing time and circulation rate. Furthermore, increasing the gas flow rate, especially in the lance, promoted more efficient mass transfer, resulting in a reduction in the tracer concentration in the aqueous phase and indicating a substantial improvement in sulfur removal from steel. The video recordings demonstrated that increasing the gas flow rate reduced both the dispersion and circulation times for the dye and the oil.

**Keywords:** Physical Modeling. Steel Desulfurization. Mass Transfer. RH Degasser. Secondary Refining. Steel-Slag Emulsification.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Efeito do teor do enxofre na quantidade de trincas longitudinais em placa.....	16
Figura 3.2 - Efeito do teor do enxofre na resiliência transversal .....	16
Figura 3.3 - Efeito do teor de enxofre na resistência ao impacto e na temperatura de transição dúctil-frágil.....	17
Figura 3.4 - Fluxograma simplificado da aciaria .....	18
Figura 3.5 - Esquema de um reator RH.....	20
Figura 3.6 - Reatores de degaseificação: (A) Degaseificador RH; (B) EDA/SSRF ( <i>Revolutionary Degassing Activator/Single Snorkel Refining Furnace</i> ); (C) degaseificação em tanque (VD).....	21
Figura 3.7 - Esquema do processo RH-BPI: Representação da injeção de pó pelo fundo da panela no degaseificador RH. ....	24
Figura 4.1 - Modelo físico do reator RH em escala 1:7,5 existente no LAPSIM/EM/UFOP..	28
Figura 4.2 - Fluxograma que resume as principais variáveis, técnicas, e resultados gerados neste trabalho.....	30
Figura 4.3 – a) Curva experimental típica de concentração de traçador (KCl) versus tempo; b) Diagrama esquemático do sistema de medição de taxa de circulação pelo método da Condutivimetria.....	32
Figura 4.4 - Representação esquemática da configuração do processo do RH nos testes de condutivimetria para avaliação do tempo de mistura: (a) lança centralizada (b) lança descentralizada .....	33
Figura 4.5 - Representação esquemática da configuração do processo do RH nos testes de transferência de massa para avaliação do coeficiente aparente de transferência de massa: (a) lança centralizada (b) lança descentralizada .....	35
Figura 5.1 - Relação do tempo de mistura e a vazão de gás pelos bicos injetores do RH e na lança centralizada .....	38
Figura 5.2 - Variação do tempo de mistura em função da vazão de gás pelos bicos injetores do RH e na lança descentralizada.....	39
Figura 5.3 - Relação da taxa de circulação em resposta à combinação de aumentos na vazão de gás pelos bicos injetores do RH e na lança em posição centralizada.....	41
Figura 5.4 - Relação da taxa de circulação em resposta à combinação de aumentos na vazão de gás pelos bicos injetores do RH e na lança em posição descentralizada.....	42

Figura 5.5 - Variação da concentração do traçador orgânico (timol) por tempo em condições experimentais de vazão de gás em 7,5NL/min na lança e 70NL/min nos bicos injetores do RH .....	43
Figura 5.6 - Queda da concentração do traçador orgânico (timol) por tempo m condições experimentais de vazão de gás em 10NL/min na lança e 120NL/min nos bicos injetores do RH .....	44
Figura 5.7 - Influência da vazão de gás na lança centralizada sobre o coeficiente aparente de transferência de massa.....	45
Figura 5.8 - Influência da vazão de gás na lança descentralizada sobre o coeficiente aparente de transferência de massa.....	45
Figura 5.9 - Comportamento de traçador na panela do RH em diferentes condições de vazão de gás (a) lança centralizada (b) lança descentralizada.....	48
Figura 5.10 - Comportamento do fluxo de traçador na câmara de vácuo em diferentes condições de vazão de gás (a) lança centralizada (b) lança descentralizada.....	49
Figura 5.11 - Comportamento do fluxo de óleo na panela RH em diferentes condições de vazão de gás (a) lança centralizada (b) lança descentralizada.....	51
Figura 5.12 - Artigo publicado na 8ª edição do ABM Week em 2024 .....	57

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 3.1 - Relações adimensionais relevantes na modelagem física do RH. ....	27
Tabela 4.1 - Descrição das características do modelo físico.....	29

## LISTA DE NOTAÇÕES

K\_L10Q120 - Coeficiente aparente de transferência de massa nas condições de vazão de gás em 10NL/min na lança e 120NL/min nos bicos injetores do RH;

K\_L10Q70 - Coeficiente aparente de transferência de massa nas condições de vazão de gás em 10NL/min na lança e 70NL/min nos bicos injetores do RH;

K\_L5Q120 - Coeficiente aparente de transferência de massa nas condições de vazão de gás em 5NL/min na lança e 120NL/min nos bicos injetores do RH;

K\_L5Q70 - Coeficiente aparente de transferência de massa nas condições de vazão de gás em 5NL/min na lança e 70NL/min nos bicos injetores do RH;

K\_L7.5Q120 - Coeficiente aparente de transferência de massa nas condições de vazão de gás em 7.5NL/min na lança e 120NL/min nos bicos injetores do RH;

K\_L7.5Q70 - Coeficiente aparente de transferência de massa nas condições de vazão de gás em 7.5NL/min na lança e 70NL/min nos bicos injetores do RH;

L10Q120 - Vazão de gás em 10NL/min na lança e 70NL/min nos bicos injetores do RH;

L10Q70 - Vazão de gás em 10NL/min na lança e 70NL/min nos bicos injetores do RH;

L5Q120 - Vazão de gás em 5NL/min na lança e 120NL/min nos bicos injetores do RH;

L5Q70 - Vazão de gás em 5NL/min na lança e 70NL/min nos bicos injetores do RH;

RH-BPI: *RH-Degasser Ladle Bottom Powder Injection;*

## LISTA DE SIGLAS

RH - Ruhrstahl Heraeus

$K_{eq}$ : Constante de equilíbrio da reação

$P_{CO}$ : Pressão parcial do monóxido de carbono (em atm).

$P_{H_2}$ : Pressão parcial do hidrogênio (em atm)

$P_{N_2}$ : Pressão parcial do nitrogênio (em atm)

$h_C$ : Atividade henryana do carbono no aço

$h_O$ : Atividade henryana do oxigênio no aço

$h_H$ : Atividade henryana do hidrogênio no aço

$h_N$ : Atividade henryana do nitrogênio no aço

$C_i$  – Concentração final do traçador na fase líquida (ppm ou mol/L)

$C_0$  – Concentração inicial do traçador na fase líquida (ppm ou mol/L)

$K_i$  – Coeficiente aparente de transferência de massa ( $s^{-1}$ )

$t_i$  – Tempo de reação (s)

## **LISTA DE SIMBOLOS**

$\Delta G^\circ$  - Variação da energia livre de Gibbs padrão (J/mol)

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	12
2	OBJETIVOS .....	14
	2.1    Objetivos Gerais .....	14
	2.2    Objetivos Específicos .....	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	15
	3.1    Efeito do enxofre no aço .....	15
	3.2    Refino secundário de aços.....	18
	3.3    Desgaseificador RH – Ruhrstahl Heraeus .....	19
	3.4    Dessulfuração em RH.....	22
	3.5    Modelamento Físico do Processo RH .....	26
4	MATERIAIS E MÉTODOS .....	28
	4.1    Materiais.....	28
	4.2    Procedimento Experimental .....	29
	4.3    Determinação da taxa de circulação .....	31
	4.4    Determinação do Tempo de Mistura .....	32
	4.5    Experimentos de Transferência de Massa .....	34
	4.6    Caracterização qualitativa do Fluxo por Filmagens .....	36
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	38
	5.1    Tempo de Mistura .....	38
	5.1.1    Influência da vazão de gás sobre o tempo de mistura .....	38
	5.2    Taxa de Circulação .....	40
	5.2.1    Influência da vazão de gás sobre a taxa de circulação do líquido.....	40
	5.3    Transferência de Massa .....	43
	5.4    Caracterização de Fluxo por Filmagens .....	47
	5.4.1    Caracterização de fluxo pela trajetória de traçador .....	47
	5.4.2    Caracterização de fluxo pela trajetória de gotas de óleo .....	49
6	CONCLUSÃO .....	52
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	53
	APENDICE - PUBLICAÇÃO CIENTÍFICA .....	57

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo Peixoto (2019), a presença de enxofre no aço, geralmente em forma de inclusões de sulfeto, é prejudicial as suas propriedades essenciais, como ductibilidade e resistência à fadiga. O enxofre é presente em diversas matérias-primas usadas na cadeia de fabricação do aço. A remoção do enxofre em uma ou mais etapas do processo de transformação metalúrgica é necessária para produzir aços de alta qualidade. A dessulfuração, que geralmente ocorre durante o pré-tratamento do gusa e/ou no estágio de refino secundário do aço, mostra-se como uma alternativa eficaz na remoção desse contaminante ao longo da cadeia produtiva do aço, o que proporciona um produto final de alta qualidade.

Silva (2002) relata que a presença dessas inclusões resulta em uma redução na tenacidade, conformabilidade, resistência mecânica, soldabilidade, resistência à corrosão, e resistência à fragilização por trincas a frio. Além disso, observa-se que o enxofre pode comprometer a qualidade superficial de materiais laminados. Silva (2012) ressalta que devido aos vários efeitos negativos do enxofre na liga, os padrões exigidos pela indústria siderúrgica mundial esperam que os teores desejados de enxofre no aço sejam inferiores a 0,015% em peso e para os aços especiais sejam entre 0,001% e 0,003% em peso.

Portanto, devido à necessidade de atender aos padrões de qualidade, o processo RH (Ruhrstahl-Heraeus) torna-se uma alternativa interessante no refino secundário de aços, pois além de sua alta capacidade de dessulfuração, se destaca entre os demais métodos de refino devido à sua versatilidade e eficiência. Ele não apenas garante uma alta produtividade, mas também tem alta capacidade de remoção de inclusões, descarburização, adição de elementos de liga e remoção de gases indesejados ao processo (Zhang *et al.*, 2014).

O processo funciona com o aço líquido circulando de forma ascendente e descendente entre uma panela e uma câmara submetida à vácuo. O fluxo de aço é conduzido por dois tubos (pernas de subida e descida) que conectam a panela e a câmara de vácuo. A intensidade da circulação do aço durante esse processo afeta a velocidade das reações, a homogeneização do material na panela e, em um nível mais amplo, a produtividade do equipamento. Para favorecer a circulação do aço, além do vácuo gerado no sistema, um gás inerte, geralmente argônio, é injetado em uma das pernas. Quando a câmara é evacuada, cria-se uma diferença de pressão entre o interior da câmara e a superfície do aço líquido na panela. O gás injetado em uma das pernas facilita a elevação do aço nesta área, e essa variação na altura da coluna de aço dentro da câmara gera a circulação do material.

Ao longo do tempo, o processo RH passou por ajustes contínuos para alcançar índices de qualidade superior, graus de limpidez mais altos, controle rígido da composição química final, maior produtividade e redução de custos.

Além de suas funções convencionais de desgaseificação e descarburação, muitos reatores RH também podem ser empregados para a dessulfuração (Ghosh, 2001). No entanto, é importante ressaltar que nem todas essas funções possuem a mesma relevância. A utilização dessas técnicas varia conforme a demanda e as adaptações na rota de produção, que influenciam a escolha do processo, as instalações necessárias e as práticas operacionais.

O desenvolvimento de modelos físicos de processos em escala laboratorial é uma técnica fundamental na pesquisa científica e no desenvolvimento de novas aplicações e tecnologias. Essa técnica envolve a construção de sistemas em escala reduzida que, de acordo com critérios de similaridade, reproduzem as condições de um fenômeno ou processo. A capacidade de realizar experimentos controlados em um ambiente seguro e replicável é um grande benefício do modelamento físico. Isso facilita a observação de resultados e a coleta de dados precisos, permitindo aos pesquisadores estudar fenômenos complexos sob condições conhecidas e ajustáveis.

Este estudo concentrou-se na dessulfuração do aço por meio de um modelo físico que simula o processo RH, aplicando um método inovador de injeção de material dessulfurante por meio de uma lança submersa, considerado uma alternativa promissora aos processos convencionais. O objetivo principal foi otimizar os parâmetros operacionais do processo RH visando reduzir ao máximo o tempo de mistura, elevar a taxa de circulação e a taxa de transferência de massa entre o banho e o dessulfurante, cumprindo as especificações exigidas pela indústria e garantindo maior desempenho e qualidade nas operações de refino secundário, refletindo diretamente na qualidade do aço produzido.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivos Gerais**

O objetivo geral deste trabalho é avaliar parâmetros de processo do reator RH no estudo da dessulfuração de aço por meio de injeção de material dessulfurante via lança submersa na panela (vaso inferior) do desgaseificador RH, utilizando modelamento físico.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Realizar ensaios de condutivimetria para quantificar a taxa de circulação do líquido e o tempo de mistura em diferentes condições operacionais, promovendo variações na vazão de gás injetada, tanto pela lança quanto pelos bicos injetores da perna de subida do reator RH, a fim de avaliar os efeitos desses parâmetros no desempenho do processo de mistura e circulação.

- Avaliar, por meio de ensaios de transferência de massa no modelo a frio, a taxa de transferência entre fases aquosa e oleosa utilizando um traçador, com o objetivo de determinar o coeficiente aparente de transferência de massa ( $K$ ) e caracterizar o comportamento do processo em termos de eficiência de dessulfuração.

- Caracterizar qualitativamente, por meio de filmagens de alta resolução, a dinâmica de dispersão e circulação do traçador anilina e do óleo de soja, em diferentes condições operacionais na panela de líquido.

- Comparar diferentes configurações da lança de injeção do material dessulfurante, avaliando o impacto de sua posição no desempenho do processo. O objetivo é determinar a configuração que maximize a taxa de circulação, otimize o tempo de mistura e promova uma transferência de massa mais eficiente, visando melhorar a eficiência da dessulfuração no reator RH.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, é apresentada a revisão bibliográfica referente ao estudo em questão. Essa seção teve como objetivo consolidar e discutir os principais conceitos, teorias e pesquisas prévias que embasaram o desenvolvimento do trabalho.

#### 3.1 Efeito do enxofre no aço

O aço é a liga metálica de maior uso na sociedade, e seus requisitos de qualidade são crescentes. O teor de enxofre tem recebido especial atenção, haja visto o efeito deletério desse elemento nas propriedades do aço. À medida que se obtém aços com menor teor de enxofre, ganha-se em qualidade superficial, melhoram-se as propriedades mecânicas. Para aços elétricos de grão não orientado (GNO) há uma melhoria significativa nas propriedades magnéticas (Silva *et al.*, 2022; Zulhan; Schrade; Patriona, 2013; Wei; Zhu; Yu, 2000; Peixoto *et al.*, 2018).

A maior parte do enxofre do aço é advinda do ferro-gusa, sendo que esse elemento é incorporado ao gusa no interior do alto-forno (Silva *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2022; Riboud, 1985; Torres, 2017). No alto-forno, dada as condições redutoras e uso de um volume elevado de escória com um conteúdo razoável de CaO, a maior parte do enxofre é levado à escória (Silva *et al.*, 2021; Riboud, 1985; Schrama *et al.*, 2017; Pistorius; Vermaak, 1999; Ghosh, 2001), porém os teores remanescentes no gusa demandam tratamento posterior.

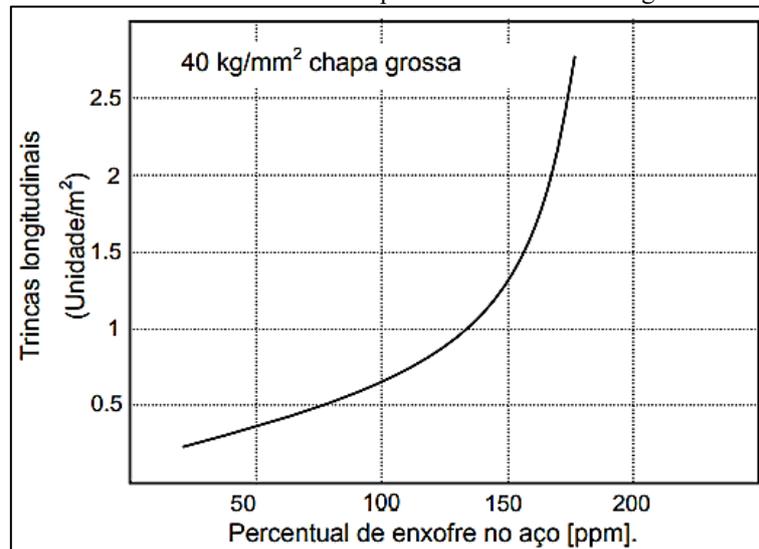
Após o alto-forno, é prática comum a dessulfuração em processos de pré-tratamento de gusa, onde se tem uma remoção de enxofre considerável, da ordem de 90% (Riboud, 1985; Ghosh, 2001). Porém, para aços ULS (*Ultra-low-Sulfur*), em que se necessita um teor de enxofre inferior a 10ppm, uma dessulfuração adicional é requerida (Silva *et al.*, 2021; Schrama *et al.*, 2017).

Em geral, o enxofre afeta a maioria das propriedades mecânicas dos aços, tem-se como consequência a redução da ductilidade e da resistência ao impacto. Os sulfetos de podem ser iniciadores de trincas em materiais sob alta tensão (Anderson, 1999).

A soldabilidade dos aços também é negativamente afetada pelo enxofre. Isso ocorre porque o enxofre forma compostos com ponto de fusão mais baixo do que o aço, aumentando o risco de trincas. Além disso, esse elemento é especialmente prejudicial para a qualidade superficial, principalmente em aços de baixo carbono e baixo manganês (Chiaverini, 2012). Por esta razão, normalmente um limite máximo de enxofre ou relação %Mn/%S é utilizado para a maioria dos aços (Chiaverini, 2012). Na Figura 3.1 (NKK, 1999), é ilustrada a influência do

teor de enxofre na qualidade superficial de uma placa de aço, destacando a relevância desse elemento na determinação da qualidade do produto.

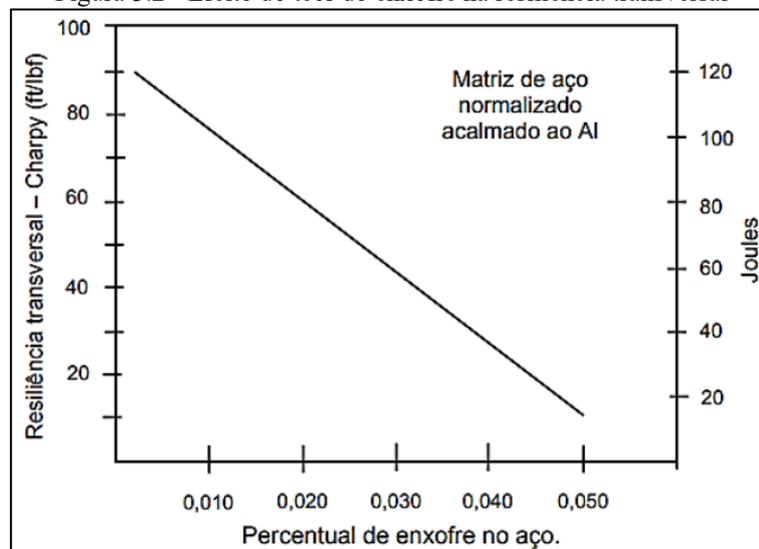
Figura 3.1 - Efeito do teor do enxofre na quantidade de trincas longitudinais em placa



Fonte: NKK (1999)

Na Figura 3.2 (Silva, 1976), são apresentados os resultados experimentais que demonstram que a presença de enxofre faz diminuir a resistência ao impacto Charpy, reforçando a importância de controlar esse elemento para otimizar a performance mecânica do material.

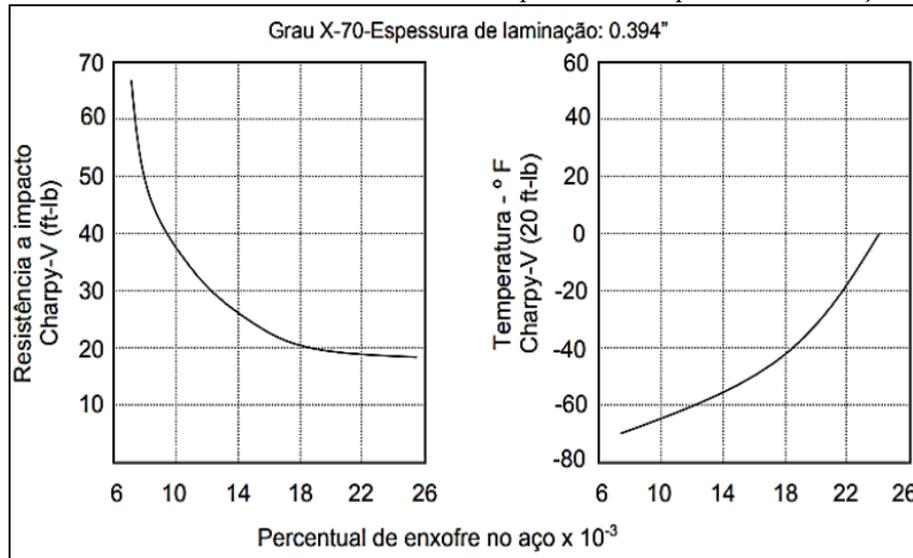
Figura 3.2 - Efeito do teor do enxofre na resiliência transversal



Fonte: Silva (1976)

Enfatiza-se também na Figura 3.3 (Orton, 1974) a redução na resistência mecânica ao impacto à medida que o teor de enxofre no aço aumenta.

Figura 3.3 - Efeito do teor de enxofre na resistência ao impacto e na temperatura de transição dúctil-frágil



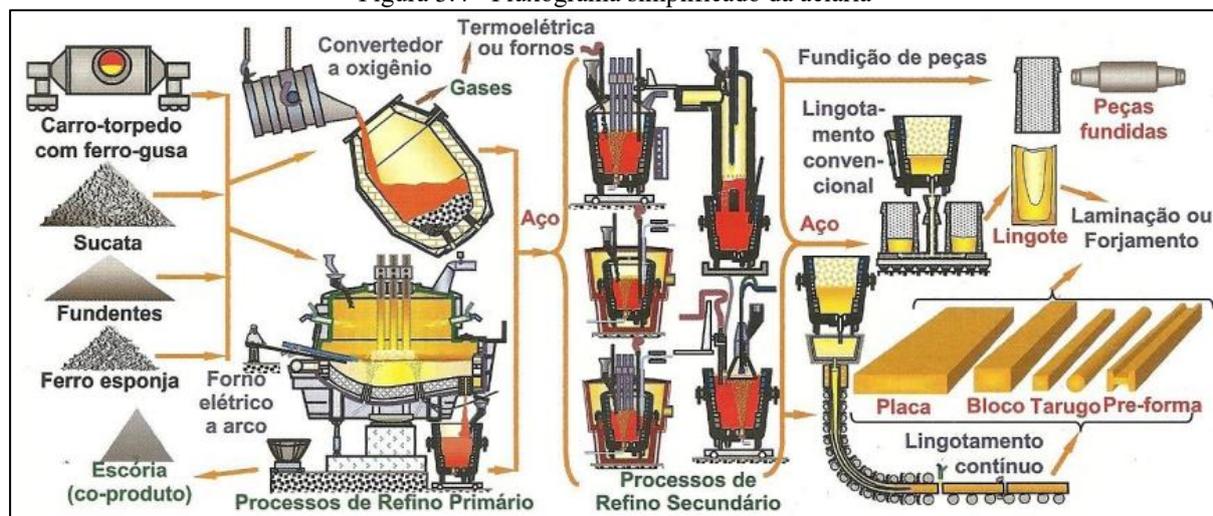
Fonte: Orton (1974)

Durante o refino primário, que é uma etapa oxidante de refino, a reação de dessulfuração é pouco efetiva, e inclusive, pode haver ressulfuração do aço, devido à escória passante do pré-tratamento de gusa, ou mesmo enxofre presente na sucata ou em adições ao processo. Assim, qualquer dessulfuração extra deve ser realizada no refino secundário, onde se tem, além da presença de escória básica, baixo potencial de oxigênio (Silva *et al.*, 2021; Riboud, 1985; Schrama *et al.*, 2017 ; Pistorius; Vermaak, 1999).

O único modo efetivo de remover enxofre do aço no RH é ter uma grande dispersão do agente dessulfurante (escória básica) no aço, do contrário, com agente dessulfurante somente na escória de topo, tem-se baixo grau de dessulfuração (Silva *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2022).

Para uma dessulfuração efetiva, além dos requisitos termodinâmicos de escória básica e aço desoxidado, é importante que se tenha um contato íntimo entre aço e escória (emulsificação) que garante uma transferência de enxofre do aço até a escória com maior velocidade e, portanto, menores teores dessa impureza e/ou menor tempo de processamento serão alcançados (Silva *et al.*, 2021; Peixoto, 2019). A Figura 3.4 apresenta um fluxograma básico da aciaria, destacando o posicionamento dos processos de refino primário e secundário.

Figura 3.4 - Fluxograma simplificado da aciaria



Fonte: Rizzo (2006)

### 3.2 Refino secundário de aços

O refino secundário de aços é uma etapa importante do processo de fabricação siderúrgica, que está localizado entre o refino primário e o lingotamento, cumprindo várias funções importantes para produzir produtos de alta qualidade que atendem às demandas das indústrias contemporâneas (Bolota, 2007).

Esse refino é necessário para eliminar impurezas residuais que podem ficar no aço líquido após a fusão primária do metal. Impurezas como hidrogênio, nitrogênio, enxofre, fósforo e oxigênio podem alterar as propriedades do aço, tornando-o menos resistente, quebradiço ou inadequado para alguns usos. Usando métodos e equipamentos específicos de refino, é possível remover essas impurezas e garantir que o aço final seja purificado. Além de remover impurezas, o refino secundário permite que a composição química do aço seja ajustada com precisão. Isso é necessário para atender a vários requisitos de aplicações industriais, como resistência, ductilidade, usinabilidade, resistência à corrosão, entre outras. A adição controlada de elementos de liga durante o refino secundário pode melhorar significativamente as propriedades mecânicas do aço, tornando-o mais adequado para uso em uma ampla gama de produtos e componentes (Bolota, 2007).

No refino secundário, o desgaseificador RH apresenta um uso crescente, uma vez que este reator tem alta efetividade na produção de aços de alta limpidez (baixo valor de oxigênio total), na remoção de gases dissolvidos no banho (nitrogênio e hidrogênio) e na descarburização (sob a forma de CO). A remoção desses componentes ocorre pela circulação do aço entre uma câmara de vácuo e uma panela de transferência (Peixoto, 2019).

O processo de desgaseificação por meio do sistema RH é uma alternativa eficiente no refino secundário de aços, essencial para a remoção de gases indesejados dissolvidos no banho, como hidrogênio (H), nitrogênio (N) e oxigênio, que podem causar fragilização e defeitos no produto final. Essa técnica é particularmente eficaz na descarburização do aço e na remoção de gases e inclusões, permitindo um ajuste fino da composição química e do aquecimento do material. O refino secundário de aços tem sido aprimorado ao longo dos anos para atender à crescente demanda por materiais com ultrabaixos teores de carbono, com o desgaseificador a vácuo RH se destacando como uma solução avançada para melhorar a qualidade e as propriedades do aço (Bolota, 2007).

### **3.3 Desgaseificador RH – Ruhrstahl Heraeus**

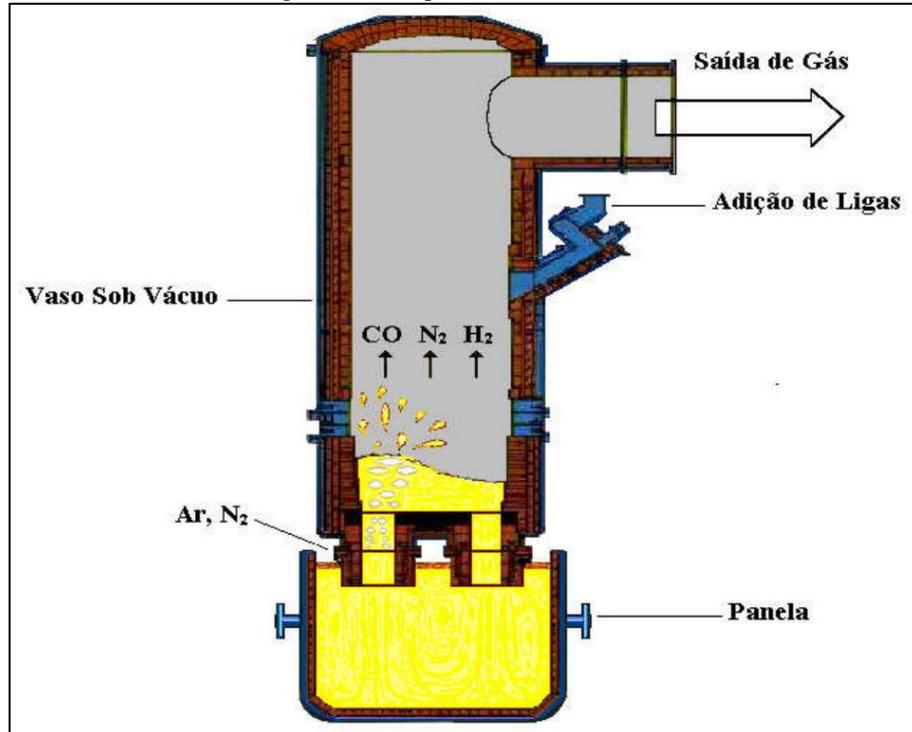
Os primeiros métodos de desgaseificação a vácuo surgiram na década de 1950. O primeiro deles foi o método de desgaseificação a jato em 1955, seguido pelo DH (1956), RH (1959), VD (1960), VOD (Descarbonetação a Vácuo com Oxigênio) e VAD (1965). Cada nome desses processos é derivado do local ou das empresas responsáveis por seu desenvolvimento, ou representa um resumo do método em si (Rizzo, 2006).

Desde a década de 1950, os processos de desgaseificação têm sido amplamente utilizados na produção de aço, com destaque para o desgaseificador em panela (VD) e o desgaseificador RH. O VD baseia-se na submissão do aço a pressões reduzidas, favorecendo a remoção de gases indesejáveis. Por outro lado, o desgaseificador RH recircula o aço entre a panela de transferência e uma câmara a vácuo, permitindo a remoção de carbono, nitrogênio, hidrogênio e oxigênio. Ambos os processos têm sido amplamente adotados na indústria siderúrgica, com o desgaseificador RH sendo preferencial para corridas de maior volume, devido ao seu excelente desempenho de mistura e tempo de ciclo curto (Zulhan; Schrade; Patriona, 2013).

Emi (2015) explica de forma clara o princípio operacional do reator RH: ele é composto por uma perna de subida e uma de descida, que são instaladas na parte inferior de uma câmara de vácuo e mergulhadas no aço líquido presente na panela; bicos de injeção de gás são instalados na perna de subida. Quando o vácuo é aplicado, uma parte do aço líquido é sugada para a base do vaso de vácuo. Em seguida, argônio (Ar) é injetado pelos bicos na perna de subida, promovendo o movimento ascendente e descendente do aço, que retorna à panela pela perna de descida da câmara de vácuo, criando um ciclo de recirculação do aço líquido. Este ciclo de circulação entre a panela e a câmara de vácuo influencia tanto a cinética das

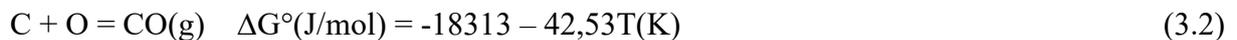
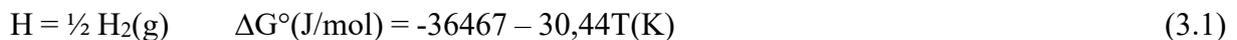
reações de refino secundário quanto a taxa de homogeneização do banho e a remoção de inclusões, desempenhando um papel crucial na produtividade do equipamento (Neves; Oliveira; Tavares, 2009). A Figura 3.5 demonstra simplificada os componentes do reator RH.

Figura 3.5 - Esquema de um reator RH



Fonte: Almeida *et al.* (2005)

Do ponto de vista termodinâmico, as reações de desgaseificação são altamente sensíveis à pressão, uma vez que envolvem a liberação de produtos gasosos. A diminuição da pressão parcial na câmara de vácuo facilita a remoção de hidrogênio, nitrogênio e carbono dissolvidos no metal líquido, como mencionado por Carvalho *et al.* (1977). As reações relevantes, 3.1 a 3.6, incluem:



As constantes de equilíbrio das reações são, respectivamente:

$$K_{eq} (1) = (P_{H_2})^{0,5} / h_h \quad (3.4)$$

$$K_{eq} (2) = P_{CO} / h_C \cdot h_O \quad (3.5)$$

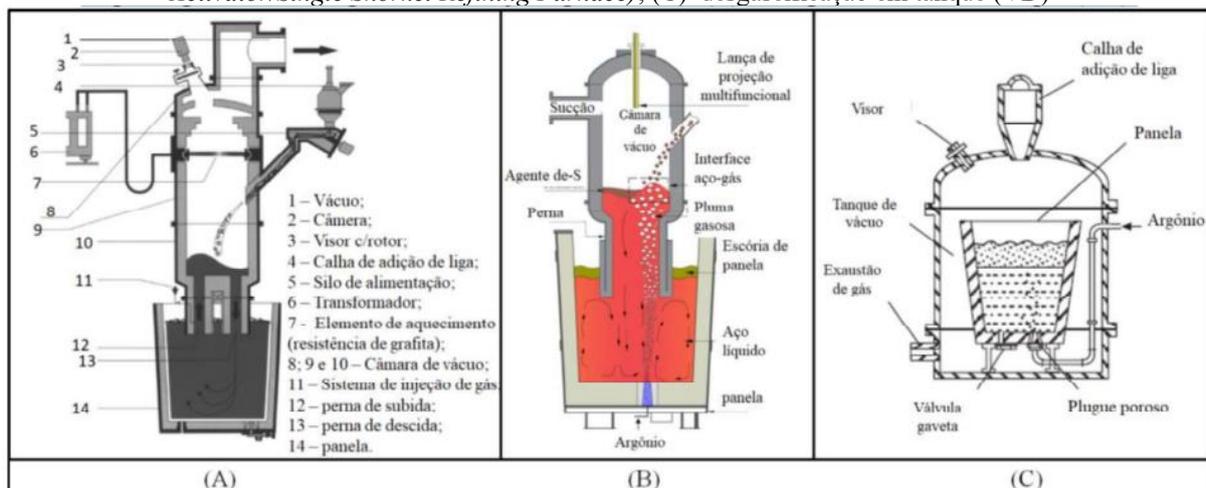
$$K_{eq} (3) = (P_{N_2})^{0,5} / h_N \quad (3.6)$$

em que:

- $K_{eq}$ : Constante de equilíbrio da reação.
- $P_{CO}$ : Pressão parcial do monóxido de carbono (em atm).
- $P_{H_2}$ : Pressão parcial do hidrogênio (em atm).
- $P_{N_2}$ : Pressão parcial do nitrogênio (em atm).
- $h_C$ : Atividade henryana do carbono no aço.
- $h_O$ : Atividade henryana do oxigênio no aço.
- $h_H$ : Atividade henryana do hidrogênio no aço.
- $h_N$ : Atividade henryana do nitrogênio no aço.

Além da desgaseificação, o desgaseificador RH desempenha outras funções importantes, como flotação e remoção de inclusões, descarburização para produção de aços com ultra-baixo teor de carbono e adição de elementos de liga. A escolha entre desgaseificador RH e VD é influenciada pelo volume da corrida e pelos tipos de aço a serem produzidos. Enquanto o RH é dominante em corridas de maior volume, o VD é mais eficiente na dessulfuração devido à intensa interação entre escória e metal (Zulhan; Schrade; Patriona, 2013). A Figura 3.6 ilustra três tipos de reatores de desgaseificação: (A) Desgaseificador RH; (B) REDA/SSRF (*Revolutionary Degassing Activator/Single Snorkel Refining Furnace*); (C) Desgaseificação em tanque (VD).

Figura 3.6 - Reatores de desgaseificação: (A) Desgaseificador RH; (B) EDA/SSRF (*Revolutionary Degassing Activator/Single Snorkel Refining Furnace*); (C) desgaseificação em tanque (VD)



Fonte: Adaptado de: (A) Ghosh (2001) ; (B) Dai *et al.* (2020) e (C) Turkdogan (1996)

### 3.4 Dessulfuração em RH

A dessulfuração em reator RH é fundamental na fabricação de aço para atender aos padrões de qualidade, reduzindo os teores de enxofre. Okano *et al.* (1997) destacam a implementação industrial desse processo na Wakayama Steel Works, usando injeção de dessulfurante pulverizado na câmara de vácuo do reator RH, trazendo vantagens como menor consumo de dessulfurante e tempo reduzido de refino do aço em comparação com a dessulfuração convencional em forno panela. No entanto, Schrade, Nicolai e Zulhan (2015) ressaltam que a vida útil do refratário da câmara de vácuo é limitada, o que restringe a ampla adoção desse método.

Em geral, para eliminar o enxofre dissolvido no aço, empregam-se escórias sintéticas (uma combinação de óxidos previamente preparados) com alto poder de absorção de enxofre, baixa presença de alumina ativa, ausência de óxidos instáveis como FeO e MnO, e temperatura de fusão reduzida (Costa, 2012).

As Equações (3.7) e (3.8) descrevem as reações químicas que ocorrem durante a dessulfuração do aço, quando o alumínio é usado como agente desoxidante. Essas reações têm lugar na interface entre a escória e o metal, onde o enxofre e o alumínio dissolvidos na massa metálica são transportados por convecção até a zona limite e, por difusão, entram em contato com a escória dessulfurante (Costa, 2012).



A diferença de potencial químico de enxofre em cada lado da interface entre a escória e o aço é a força motriz da dessulfuração. O processo de dessulfuração é uma operação metalúrgica realizada em temperaturas elevadas, geralmente em torno de 1873K, e a velocidade da reação química é notavelmente rápida. Portanto, a reação química não é susceptível de ser a etapa limitante do processo. Em vez disso, sugere-se que a etapa limitante seja a transferência de enxofre do metal líquido para a interface escória-aço, ou a transferência de íons sulfeto ( $\text{S}^{2-}$ ) da interface para dentro da escória ou do pó injetado (Ghosh, 2001; Costa, 2012; Zhu *et al.*, 2016).

Wei, Zhu e Yu (2000) e Ghosh (2001) enfatizam as condições favoráveis do processo de refino no reator RH para a dessulfuração do aço, destacando a redução do potencial de oxigênio para níveis baixos e a importância de baixos teores de enxofre e oxigênio para alcançar

níveis reduzidos de nitrogênio. Wei, Zhu e Yu (2000) também validam a eficácia da dessulfuração em reator RH por injeção de pó na câmara de vácuo, evidenciando a necessidade de modelos cinéticos para prever a taxa de dessulfuração sob diferentes condições operacionais.

Estudos adicionais, como o de Zhang, Zeng e Pan (2012), exploraram o uso de escória pré-fundida e dessulfurantes para tratar aços elétricos, visando teores finais de enxofre abaixo de 80ppm. Essas pesquisas ressaltam a diversidade de abordagens e desafios envolvidos na dessulfuração em reator RH, demonstrando a importância contínua da pesquisa e desenvolvimento para atender às demandas da indústria siderúrgica.

Zulhan, Schrade e Patriona (2013) refinaram um modelo cinético previamente desenvolvido por Wei, Zhu e Yu (2000), fornecendo previsões mais precisas sobre o teor de enxofre durante o processo de tratamento em reator RH por injeção de pó. O modelo foi validado e integrado ao sistema de automação de uma planta siderúrgica por Schrade, Nicolai e Zulhan (2015), contribuindo para uma dessulfuração mais eficiente e econômica.

Costa e Tavares (2015) realizaram simulações numéricas para analisar a dessulfuração do aço líquido no reator RH, destacando a importância da agitação dentro da câmara de vácuo para favorecer a reação de dessulfuração. Zhu *et al.* (2016) propuseram um modelo matemático baseado em considerações termodinâmicas, cinéticas e operacionais para prever a evolução do teor de enxofre durante o tratamento em reator RH, auxiliando na compreensão e otimização do processo de dessulfuração.

Conforme menciona Liu, Lou e Zhu (2023), desenvolver um processo de dessulfuração RH mais eficiente também é uma preocupação para as siderúrgicas, pois a capacidade de dessulfuração do desgaseificador RH ainda é insuficiente no processo real de refino. Portanto, é necessária uma dessulfuração profunda no desgaseificador RH.

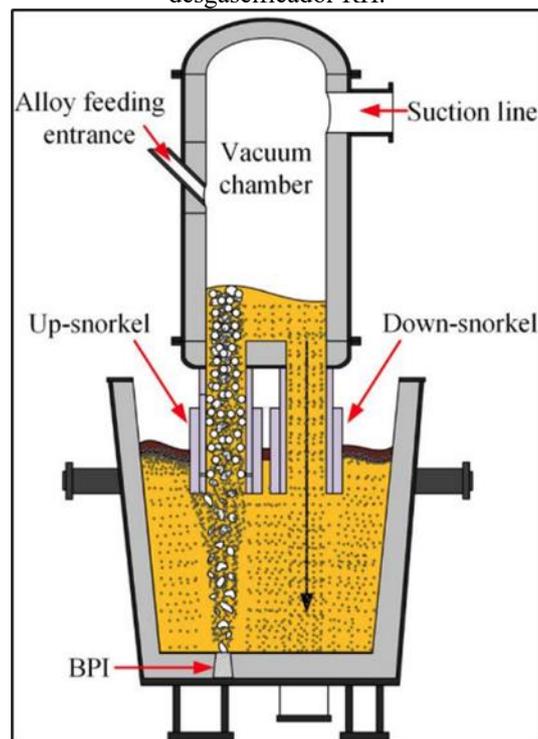
O processo de refino RH-BPI (*Ladle Bottom Powder Injection*) proposto por Liu, Lou e Zhu (2023) envolve a injeção de gás transportador e pó dessulfurante no aço líquido através de um bocal no fundo da panela. Isso gera padrões de fluxo complexos. Estudos anteriores mostraram que a adição de sopro de argônio no fundo da panela pode melhorar a eficiência do processo, mas a localização específica e a vazão de gás são cruciais devido à influência no padrão de circulação do desgaseificador RH, afetando a eficiência de mistura e a circulação.

Liu, Lou e Zhu (2023) discutiram as complexidades associadas à injeção de pó no sistema RH-BPI. Em comparação com apenas o sopro de argônio, a introdução de pó pode

modificar a forma da pluma de bolhas, pois a maior força de inércia do fluxo de gás-pó pode enfraquecer as características de deflexão do fluxo de bolhas. Isso demanda uma avaliação cuidadosa do comportamento do fluxo e da abrasão das pernas no processo RH-BPI. Além disso, o transporte e a distribuição das partículas de pó dessulfurante no desgaseificador RH são muito complexos.

Quando uma grande quantidade de pó é injetada, parte pode flutuar diretamente na escória superior da panela, enquanto o restante pode entrar na câmara de vácuo para participar da circulação. Isso é influenciado pelo modo de fluxo e pelos parâmetros de injeção de pó, afetando diretamente a eficiência de dessulfuração e a taxa de utilização de pós. Assim, há uma necessidade de estudos adicionais sobre o escoamento do líquido e as características de transporte de pó no RH-BPI. A Figura 3.7 apresenta a nova configuração de processo do RH proposta por (Liu, Lou e Zhu (2023)).

Figura 3.7 - Esquema do processo RH-BPI: Representação da injeção de pó pelo fundo da panela no desgaseificador RH.



Fonte: Liu, Lou e Zhu (2023)

Atualmente, a dessulfuração no RH é praticada via adição ou sopro de agente dessulfurante na câmara de vácuo desse desgaseificador. Apesar da turbulência na câmara de vácuo ser, inicialmente, favorável à dessulfuração, o intenso fluxo de aço cisalha e arrasta a escória da câmara para a panela de transferência. As gotas de escória formadas são rapidamente

flotadas até a escória de topo da panela que, tornando-se ineficazes para a dessulfuração (Silva *et al.*, 2021; Peixoto, 2019; Dai *et al.*, 2020).

Esse fenômeno de arraste do agente dessulfurante da câmara de vácuo para a escória de topo na panela de transferência ocorre em poucos minutos (2min a 4min.) (Silva *et al.*, 2021). Segundo Yang *et al.* (2013) é possível incrementar a dessulfuração durante o processamento no RH mediante uma redução na taxa de circulação. Porém, com a redução na vazão de gás na perna de subida, normalmente se tem maior perda térmica, redução na produtividade e na efetividade de descarburização e de desgaseificação, o que culmina em maior custo de processo (Silva *et al.*, 2021).

Silva *et al.* (2021) descreveram um incremento na dessulfuração de 19,5% para 31,44% à medida que a taxa de circulação foi reduzida (pela redução na vazão de gás na perna de subida de 140Nm<sup>3</sup>/h para 90Nm<sup>3</sup>/h). Segundo os autores, como a redução na taxa de circulação foi somente durante o período de dessulfuração (~4 minutos) não é esperado os efeitos adversos relatados por Yang *et al.* (2013). Peixoto (2019) ressalta que essa técnica de dessulfuração por adição de material à câmara de vácuo deve ser considerada para correções moderadas no teor de enxofre, não sendo, portanto, uma técnica para se alcançar elevados valores de dessulfuração.

Por sua vez, Silva *et al.* (2021) propuseram uma modificação no RH, que consiste na redução no comprimento da perna de descida tal que o jato de aço advindo da câmara de vácuo seja capaz de arrastar a escória de topo para o interior do aço, promovendo, portanto, a dessulfuração contínua. As posições estudadas por esses autores foram com a descarga da perna de descida na interface metal escória e acima dessa. Embora promissora, ainda há muitas dificuldades para sua implementação, como por exemplo o elevado volume de escória necessário e controle exigido de posicionamento da extremidade da perna de descida com relação à interface metal-escória e à interface ar-escória, tendo em vista que a exposição do jato de descida resulta em falha catastrófica da condição de vácuo.

Por outro viés, Wang *et al.* (2022) sugeriram utilizar como agente dessulfurante esferas compósitas adicionadas na câmara de vácuo do RH. Essas esferas são prontamente arrastadas para a panela de transferência e explodem, devido a decomposição do carbonato existente em seu interior. Dessa explosão, geram-se pequenas gotas de escória e partículas, responsáveis pela remoção de enxofre do aço. Utilizando 5kg/t dessas esferas, Wang *et al.* (2022) conseguiram reduzir o percentual de enxofre do aço tratado no RH de cerca de 50ppm a 30ppm para valores

da ordem de 10ppm a 20ppm. Embora eficiente, essa tecnologia é de difícil emprego, tendo em vista a dificuldade que se tem de produzir esse material em camadas e armazenar as esferas produzidas.

### **3.5 Modelamento Físico do Processo RH**

Os estudos conduzidos por Nakanishi, Szekely e Chang (1975), Seshadri e Souza Costa (1986), Kamata *et al.* (1998), Ahrenhold e Pluschkell (1998) representam contribuições significativas ao entendimento do processo de desgaseificação a vácuo RH. Esses pesquisadores utilizaram modelos físicos como ferramentas eficazes para validar modelos matemáticos e realizar previsões aplicáveis a contextos industriais. Embora amplamente empregados, esses modelos físicos apresentam algumas limitações, como a subestimação da expansão das bolhas de gás devido aos efeitos térmicos e de pressão na câmara de vácuo, devido às pressões de ensaio menores em comparação aos processos industriais. Os ensaios conduzidos com essas ferramentas visam medir a taxa de circulação e determinar os efeitos de variáveis específicas nessa taxa de circulação e no escoamento do líquido no equipamento RH. Geralmente, esses estudos utilizam métodos semelhantes, substituindo o aço-argônio por água e empregando condições isotérmicas estacionárias.

Conforme destacado por Marins (2011), é crucial que haja mais do que apenas similaridade dimensional para garantir a precisão da correspondência entre o modelo e o equipamento real. Além disso, é essencial que exista uma semelhança mecânica, térmica e química entre ambos. Modelar o comportamento do aço utilizando água como fluido de trabalho apresenta maior simplicidade e viabilidade prática. Entretanto, é essencial assegurar que as observações feitas no modelo físico a frio sejam representativas do fenômeno real.

Para isso, é necessário não apenas estabelecer uma correspondência geométrica entre o reator industrial e o modelo reduzido, mas também identificar e aplicar os números adimensionais mais relevantes que governam o processo no sistema RH. Esses parâmetros garantem que as condições de fluxo nos dois sistemas sejam equivalentes, considerando tanto a dinâmica quanto a cinemática do processo. No caso das simulações físicas no reator RH, a correspondência entre o protótipo industrial e o modelo físico é assegurada por cinco grupos adimensionais, conforme descrito na Tabela 3.1 (Peixoto, 2019 e Seshadri *et al.*, 2006).

Tabela 3.1 - Relações adimensionais relevantes na modelagem física do RH.

Adimensional	Expressão	Significado físico
Nº de Froude	$F_r = \frac{v^2}{gD}$	Razão entre força de inércia do líquido e a força peso do mesmo.
Nº de Reynolds	$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$	Razão entre força de inércia e a força de natureza viscosa, do líquido
Vazão relativa	$N_{va} = \frac{G}{vD^2}$	Fração de volume da perna de subida que é ocupada pelo gás injetado
Nº modificado de Froude	$F_{rm} = \frac{u_g^2 \rho_g}{\varphi g \rho_l}$	Razão entre força de inércia do gás no ponto de injeção e o peso do líquido a ser deslocado
Razão geométrica, cinemática e de densidade	$\frac{\varphi}{D}; \frac{u_g}{v}; \frac{\rho_g}{\rho_l}$	

Fonte: Peixoto (2019)

Onde:

- V - velocidade do líquido ( $Lt^{-1}$ );
- D - diâmetro interno da perna (L);
- $\rho_L$  - massa específica do líquido ( $ML^{-3}$ );
- $\rho_g$  - massa específica do gás ( $ML^{-3}$ );
- $\mu$  - viscosidade dinâmica do líquido ( $ML^{-1}t^{-1}$ );
- g - aceleração da gravidade ( $Lt^{-2}$ );
- G - vazão de gás ( $L^3t^{-1}$ );
- $u_g$  - velocidade do gás no bico ( $Lt^{-1}$ );
- $\varphi$  - diâmetro do bico (L);
- M - unidade de massa;
- L - unidade de comprimento;
- t - unidade de tempo.

Detalhes complementares acerca dos parâmetros adimensionais aplicados no modelo físico são apresentados por Peixoto (2019).

O detalhamento das condições operacionais, bem como das técnicas empregadas para determinação de condições de mistura e circulação, e de transferência de massa, encontram-se descritos de forma abrangente na metodologia.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

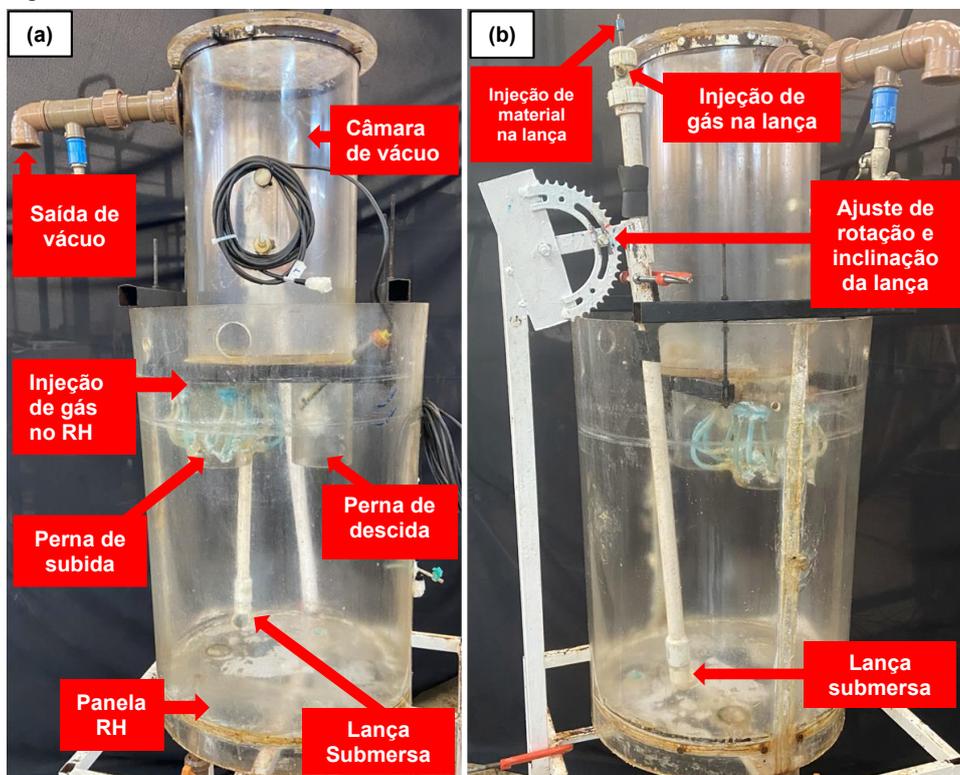
### 4.1 Materiais

Neste estudo, foi adotado um modelamento físico para investigar o posicionamento e o modo de operação de uma lança de injeção de material dessulfurante no aço contido na panela submetida ao processo de tratamento no RH. O objetivo principal foi avaliar condições de injeção de dessulfurante, garantindo simultaneamente suas funções primárias de degaseificação e descarburação, além de fornecer uma nova função de dessulfuração.

Nessa abordagem, o dessulfurante é arrastado pelo gás dentro da lança e disperso no líquido dentro da panela. O objetivo dessa estratégia é aumentar o tempo de residência do agente dessulfurante no interior do aço, resultando em um aprimoramento significativo do grau de dessulfuração.

A modelagem a frio foi conduzida por meio de um modelo físico construído em acrílico, reproduzindo em escala  $\lambda = 1:7,5$  as características de um reator industrial com capacidade de 315 toneladas, conforme ilustrado na Figura 4.1. Neste modelo foram realizados experimentos e simulações buscando uma compreensão aprofundada de seu comportamento e desempenho sob diferentes condições operacionais.

Figura 4.1 - Modelo físico do reator RH em escala 1:7,5 existente no LAPSIM/EM/UFOP.



Fonte: Autor (2024)

Os dados geométricos do modelo físico são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Descrição das características do modelo físico

<b>Características do reator (modelo físico)</b>		<b>Dado</b>
	Pontos de injeção de gás (Perna de subida)	16 bicos
	Pontos de injeção de gás (lança)	1 entrada
	Pontos de injeção de óleo (lança)	1 entrada
<b>Dados operacionais</b>	Capacidade de vácuo (mbar)	984
	Temperatura de trabalho (°C)	25
	Fluido	Água
	Densidade do fluido (kg/m <sup>3</sup> )	1000
<b>Vaso</b>	Diâmetro interno(mm)	299,33
	Altura(mm)	65
<b>Vaso inferior (Panela)</b>	Di superior (mm)	490
	Di inferior (mm)	460
	Altura(mm)	566
	Altura líquido (mm)	500
<b>Pernas</b>	Comprimento (mm)	205,33
	Diâmetro interno (mm)	100
	Distância entre as linhas do centro (mm)	180
	Profundidade de imersão (mm)	60
<b>Sistema de injeção de gás</b>	Gás	Ar comprimido
	Vazão (NL/min)	70-120
	Densidade do gás (kg/m <sup>3</sup> )	1,123
	Distância entre níveis de injeção (mm)	23,33
	Diâmetro do bico de injeção (mm)	2,4
<b>Dados da Lança</b>	Distância do fundo da panela (mm)	50
	Diâmetro do tubo (mm)	12,5
	Vazão de Gás (NL/min)	5, 7.5, 10, 15
	Comprimento (mm)	100
	Vazão média de óleo (mL/min)	150

Fonte: Autor (2024)

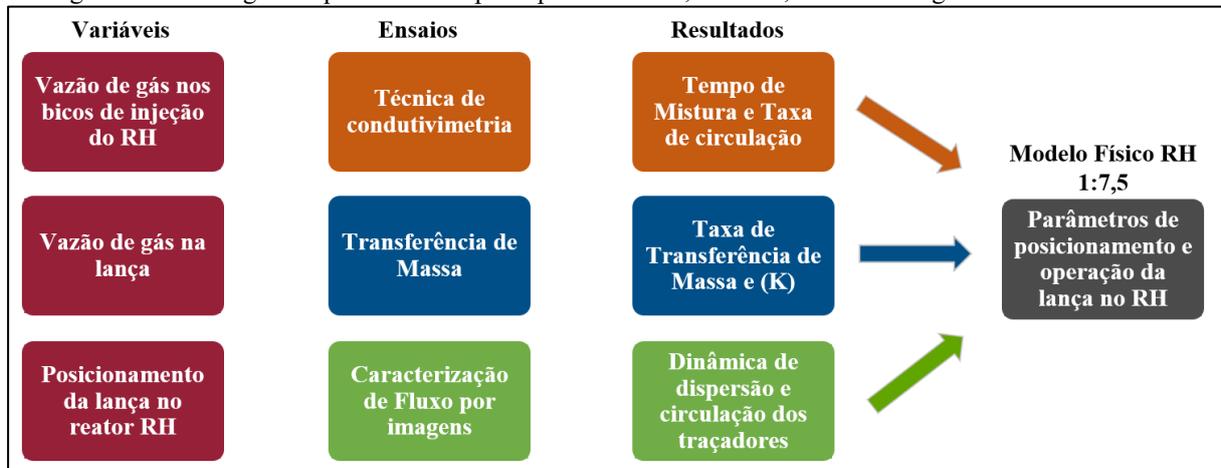
## 4.2 Procedimento Experimental

A estratégia experimental deste trabalho foi desenvolvida para avaliar a nova proposta de processo do desgaseificador RH, utilizando como variáveis de resposta a taxa de circulação, o tempo de mistura, o comportamento das fases contínua e dispersa, e a taxa de transferência de timol da solução aquosa para o óleo.

O comportamento metal-escória foi analisado por meio de filmagens da dispersão de óleo (simulando a escória) e de traçadores na água (representando o aço). As variáveis de processo consideradas incluíram a vazão de gás inerte tanto na lança de injeção quanto na perna de subida do RH, a posição de injeção do gás pela lança e a quantidade de material injetado.

A Figura 4.2 apresenta o fluxograma das variáveis, técnicas, e resultados gerados neste trabalho.

Figura 4.2 - Fluxograma que resume as principais variáveis, técnicas, e resultados gerados neste trabalho.



Fonte: Autor (2024).

As variáveis que foram analisadas no modelo físico foram:

- Vazão de gás pelos bicos injetores do RH posicionados na perna de subida (70NL/min, 80NL/min, 90NL/min, 110NL/min, 120NL/min);
- Vazão de gás pela lança (0NL/min, 5NL/min, 7,5NL/min, 10NL/min, 15NL/min);
- Posição centralizada da lança, na vertical (90°), perpendicular ao fundo da panela, posicionada a uma distância de 3cm da parede lateral da panela. Sua posição é equidistante em relação às pernas de subida e descida do reator RH.
- Posição descentralizada da lança, posicionada a 3cm da parede da panela, o que favorece o fluxo de gás e material na perna de subida. Sua orientação axial apresenta uma inclinação de 16° em relação à direção paralela ao eixo das pernas, enquanto na direção radial, a inclinação é de 26°, em relação à parede da panela. Além disso, a ponta da lança está posicionada a 5 cm do fundo da panela.
- A lança de injeção possui dois bicos concêntricos em formato L (saídas perpendiculares ao eixo da lança), um para saída de gás e outro para material injetado (óleo), permitindo injeção simultânea e melhor interação com o banho.

Nos ensaios de transferência de massa (timol e óleo), destaca-se a utilização do óleo de soja, pois o mesmo pode ser recuperado para reutilização em novos experimentos. Para isso, após o teste de extração de massa, o óleo que absorve timol é recolhido e separado da solução aquosa, seguindo então para uma estufa a 70°C, onde permanece por cerca de 24h. Este aquecimento promove a volatilização do timol presente do óleo de soja, e o efeito sobre as propriedades do

óleo (densidade, viscosidade e tensão interfacial) é desprezível, permitindo, portanto, a reutilização do óleo em novos experimentos de extração de timol da solução aquosa.

### 4.3 Determinação da taxa de circulação

No estudo físico do reator RH, o Método da Condutivimetria é amplamente utilizado para determinar a taxa de circulação, como relatado nos trabalhos de Seshadri e Souza Costa (1986), Vargas (2000), Kishan e Dash (2009), entre outros. Essa técnica envolve a injeção de um traçador em forma de solução salina na câmara de vácuo ou na perna de subida, seguida pela análise da concentração do sal na perna de descida, utilizando medições da variação de condutividade da água. A condutividade é monitorada continuamente por meio de um condutímetro que está conectado a uma placa de aquisição de dados; um software registra e processa as informações de cada ensaio.

Os valores medidos são convertidos em concentrações após uma calibração prévia, possibilitando a construção de uma curva de concentração em função do tempo (Figura 4.3a). Com isso, é possível determinar a taxa de circulação utilizando as equações 4.1 a 4.4, obtidas a partir do balanço de massa do traçador, conforme descrito por Vargas (2000). No intervalo de tempo entre  $t_1$  e  $t_2$ , a quantidade total de traçador que atravessa a perna de descida é calculada por meio dessas equações.

$$M_{sal} = \int_{t_2}^{t_1} Q_C \cdot C_{sal} \cdot dt \quad (4.1)$$

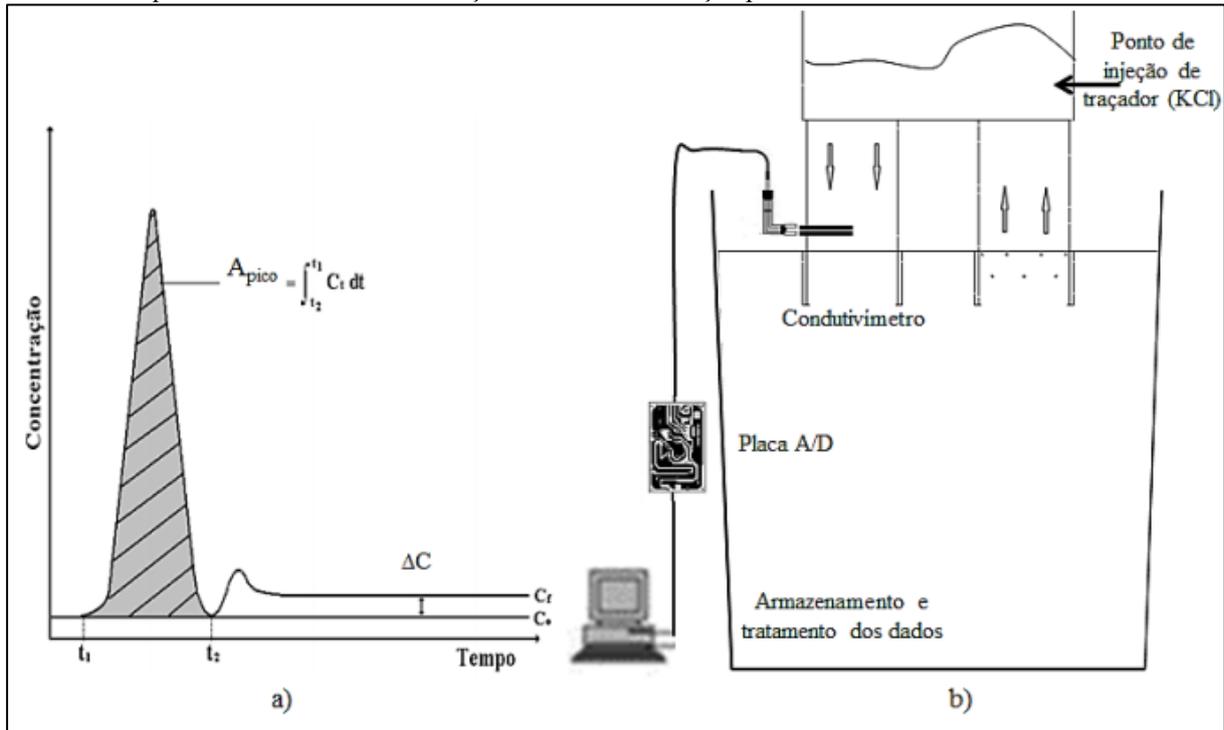
Considerando-se  $Q_C$  constante:

$$M_{sal} = Q_C \cdot A_{Pico} \quad (4.2)$$

Onde:

- $M_{sal}$  = massa de traçador em gramas;
- $Q_C$  = taxa de circulação em kg/s;
- $C_{sal}$  = concentração em g de KCl/kg de água;

Figura 4.3 – a) Curva experimental típica de concentração de traçador (KCl) versus tempo; b) Diagrama esquemático do sistema de medição de taxa de circulação pelo método da Condutivimetria.



Fonte: (a) Vargas (2000); (b) Peixoto (2019)

Depois de atingida a estabilização, a massa de traçador é calculada multiplicando-se a quantidade de líquido presente no reator ( $W_m$ , em kg) pelo aumento na concentração de traçador ( $\Delta C_{sal}$ ):

$$M_{sal} = \Delta C_{sal} \times W_m \quad (4.3)$$

Com isso:

$$Q_c = \Delta C_{sal} \times W_m / A_{pico} \quad (4.4)$$

Nos experimentos deste trabalho, um pulso de solução salina (15mL de solução aquosa saturada de KCl) foi injetado dentro da câmara de vácuo, próximo à perna de subida, enquanto o condutivímetro foi posicionado no centro da perna de descida (Figura 4.3b). Aproximadamente 10 ensaios foram realizados para cada conjunto de condições experimentais, combinando diferentes vazões de gás pela perna e pela lança. Ao final de cada série de quatro testes, o líquido do modelo era substituído para evitar a saturação da água.

#### 4.4 Determinação do Tempo de Mistura

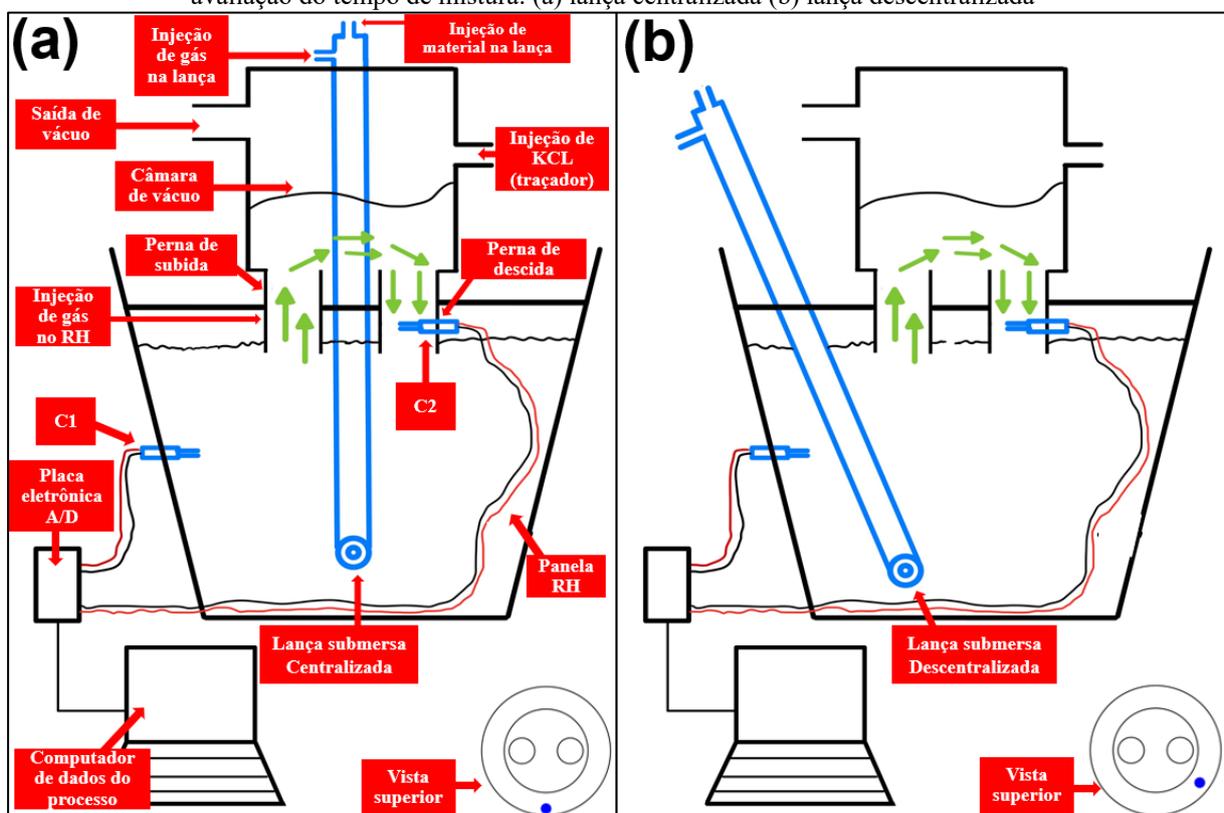
O tempo de mistura de líquido também foi determinado por meio da técnica de condutivimetria. Nesse processo, uma solução salina (KCl) foi injetada sob a forma de pulso

(~15,0mL) na câmara de vácuo. Sua concentração foi acompanhada por um sensor de leitura da condutividade da água (condutivímetro C1) instalado na panela de líquido, conforme a Figura 4.4.

Enquanto a homogeneização não estava completa, a condutividade C1 variou ao longo do tempo devido à distribuição desigual de íons no fluido, resultando em uma detecção não uniforme pelo equipamento. Quando a curva de condutividade atingiu um platô estável, com flutuação inferior a 5%, considerou-se que a homogeneização foi concluída. O condutivímetro C1 é conectado a uma placa de aquisição de dados. Esta, por sua vez, se comunica com um software de computador, onde as informações de cada ensaio foram registradas e analisadas. A estabilização do sinal indicou a conclusão do processo de homogeneização. Detalhes sobre a aplicação da técnica de condutivimetria para determinar a taxa de circulação e o tempo de mistura podem ser encontrados no trabalho de Silva (2022).

A Figura 4.4 ilustra a configuração esquemática de processo do RH nos testes de condutivimetria para avaliação do tempo de mistura nas duas configurações de posição da lança.

Figura 4.4 - Representação esquemática da configuração do processo do RH nos testes de condutivimetria para avaliação do tempo de mistura: (a) lança centralizada (b) lança descentralizada



Fonte: Autor (2024)

#### 4.5 Experimentos de Transferência de Massa

Foram realizados testes de transferência de massa (em triplicata), em que uma solução aquosa é utilizada como fase similar ao aço, o óleo de soja como a fase similar à escória e a espécie de transferência, o timol, para simular a transferência de enxofre. O modelamento físico utilizando solução aquosa, timol e óleo apresenta-se interessante, pois o coeficiente de partição ( $L_i$ ) do timol no sistema óleo/água é elevado ( $>350$ ), assim como o coeficiente de partição de enxofre no sistema aço/escória (200-1000) conforme relatado por Kim e Fruehan (1987).

Foram avaliadas seis condições de processo referentes a vazão de gás da lança e do RH para as duas posições de lança (centralizada e descentralizada), sendo elas:

- L5Q70 que se refere a vazão de gás em 5NL/min na lança e 70NL/min nos bicos injetores do RH.
- L5Q120 que se refere a vazão de gás em 5NL/min na lança e 120NL/min nos bicos injetores do RH.
- L7.5Q70 que se refere a vazão de gás em 7,5NL/min na lança e 70NL/min nos bicos injetores do RH.
- L7.5Q120 que se refere a vazão de gás em 7.5NL/min na lança e 120NL/min nos bicos injetores do RH.
- L10Q70 que se refere a vazão de gás em 10NL/min na lança e 70NL/min nos bicos injetores do RH.
- L10Q120 que se refere a vazão de gás em 10NL/min na lança e 120NL/min nos bicos injetores do RH.

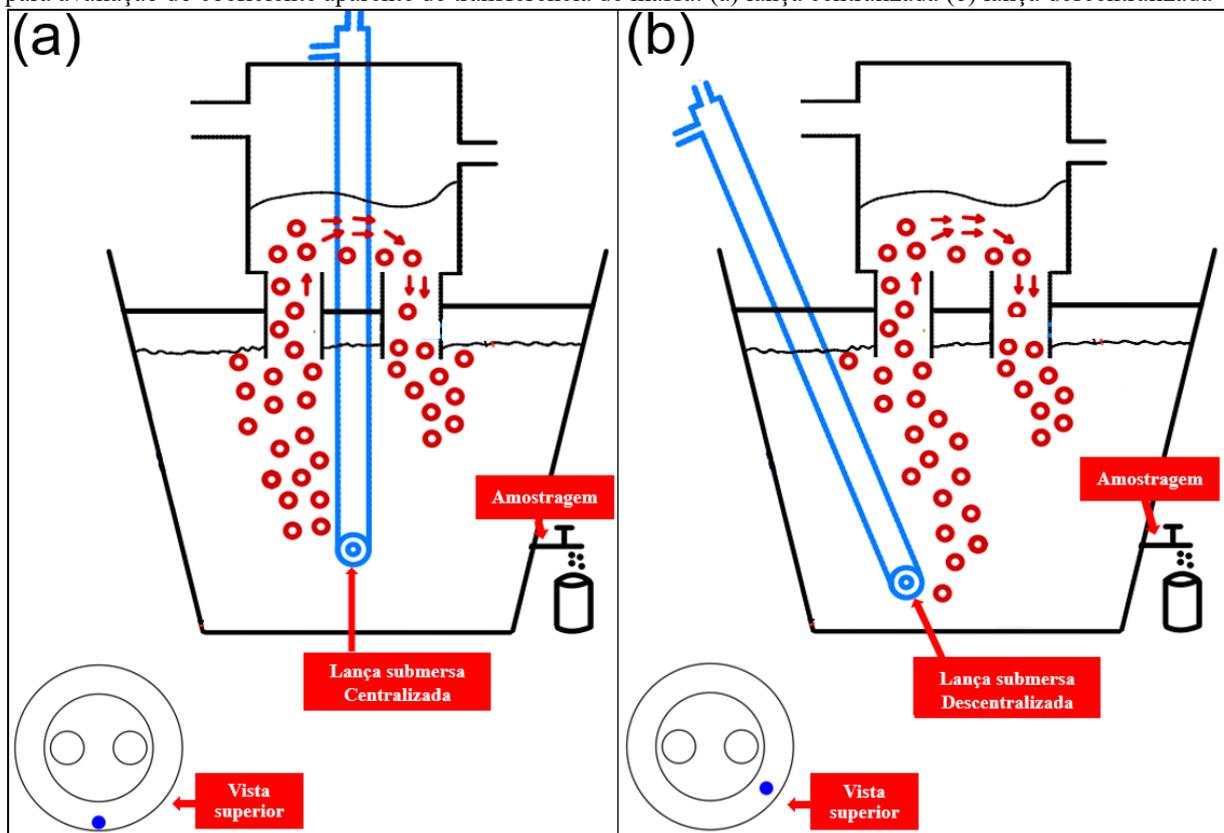
O procedimento inicia com o preenchimento da panela com água, que é aquecida até atingir 25°C. Em seguida, adiciona-se timol à água, ajustando a concentração para 100 ppm. O óleo é aquecido a 25°C e mantido nessa temperatura para garantir a condições isotérmicas do processo. Após isso, aguarda-se o tempo necessário para a completa homogeneização do timol na solução aquosa. Com a solução pronta, retira-se a primeira amostra de aproximadamente 15 mL da parede lateral do modelo, dando início ao experimento. A injeção de óleo é então realizada com uma vazão média de 150 mL/min por meio da lança, durante 7 min, com um total de 1,1L de óleo injetado. Durante o experimento, amostras de 15 mL são retiradas a cada 1 minuto, totalizando então 8 amostras.

O material coletado é filtrado por filtros de papel para reter resíduos de óleo que poderiam interferir nas leituras. As amostras filtradas são armazenadas em béqueres, os quais

são selados com papel alumínio para evitar a volatilização do timol. As amostras são então analisadas utilizando o espectrofotômetro modelo UV-5100, da Metash Instruments Co., Ltd, para determinar a concentração de timol. Os resultados obtidos são processados e interpretados pelo software MetaSpec Pro versão 2.2.13.0720. A partir disso, constrói-se as curvas de decaimento da concentração de timol em função do tempo, fenômeno que simula a remoção de enxofre do aço. A curva padrão, obtida por Abreu (2019), é utilizada para a validação do processo, sendo analisada antes de cada sequência de amostras, garantindo que a acuracidade dos dados seja mantida durante todo o experimento.

A Figura 4.5 ilustra a configuração esquemática de processo do RH nos testes de transferência de massa nas duas configurações de posição da lança.

Figura 4.5 - Representação esquemática da configuração do processo do RH nos testes de transferência de massa para avaliação do coeficiente aparente de transferência de massa: (a) lança centralizada (b) lança descentralizada



Fonte: Autor (2024)

Além disso, a medição da concentração de timol foi feita no início do ensaio ( $t = 0s$ ), correspondendo à concentração inicial  $C_0$ . Durante o experimento, as concentrações de timol e a vazão de óleo foram medidas em intervalos de tempo estabelecidos, com um total de 8 medições realizadas em cada teste. A razão  $C_i / C_0$ , onde  $C_i$  (concentração de timol) em  $t_i$  tempo corresponde à redução da concentração no sistema, ou seja, à taxa de transferência de

massa. Portanto, a cinética do processo pode ser avaliada por meio da equação linear representada na Equação 4.5 (Silva, 2023):

$$\ln(C_i/C_0) = -K_i t_i \quad (4.5)$$

A partir dessa relação, a constante K (coeficiente aparente de transferência de massa) foi determinada pela linha de tendência gerada pela representação gráfica dos dados de concentração.

Uma descrição detalhada da cinética do processo de transferência de timol entre a solução aquosa e o óleo pode ser encontrada no trabalho de Silva (2023), que apresenta a análise da variação da concentração de timol ao longo do tempo e o cálculo da constante de transferência de massa com base nas concentrações medidas.

#### **4.6 Caracterização qualitativa do Fluxo por Filmagens**

Para caracterizar o comportamento do fluxo de traçador e de óleo, foram conduzidos dois experimentos de caracterização de fluxo, em que 50 ml de cada substância foi injetado durante 5 segundos para o traçador (anilina) e 20 segundos para o óleo de soja, com o modelo físico do reator RH em operação. Foram avaliadas quatro condições de processo referentes a vazão de gás da lança e do RH, sendo elas:

- L5Q70 que se refere a vazão de gás em 5NL/min na lança e 70NL/min nos bicos injetores do RH.
- L5Q120 que se refere a vazão de gás em 5NL/min na lança e 120NL/min nos bicos injetores do RH.
- L10Q70 que se refere a vazão de gás em 10NL/min na lança e 70NL/min nos bicos injetores do RH.
- L10Q120 que se refere a vazão de gás em 10NL/min na lança e 120NL/min nos bicos injetores do RH.

Esse procedimento permitiu uma análise do comportamento do fluxo em diferentes condições operacionais, e realizar uma caracterização abrangente dos padrões de dispersão e movimento do traçador (anilina) e do óleo dentro do sistema, contribuindo para uma compreensão mais aprofundada dos fenômenos de transporte e mistura presentes no processo em estudo.

Para evidenciar a caracterização de fluxo de ambos os testes, foram realizadas filmagens utilizando uma câmera Sony HDR CX-405 de alta definição, sob a iluminação de refletores LED

posicionados de forma a favorecer a iluminação necessária para a obtenção de imagens de alta qualidade e definição.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

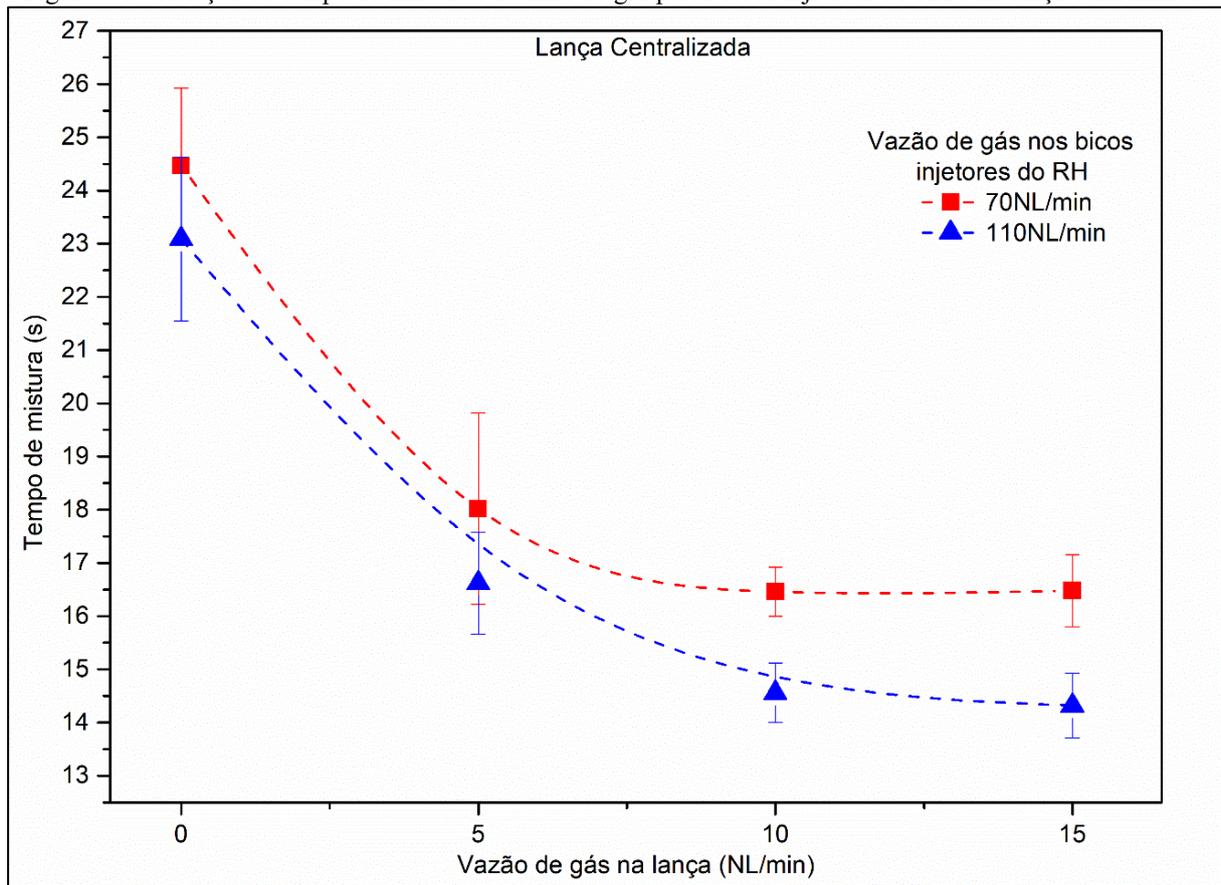
### 5.1 Tempo de Mistura

#### 5.1.1 Influência da vazão de gás sobre o tempo de mistura

Examinando o tempo de mistura em relação ao fluxo de gás injetado tanto pela lança quanto pela perna do RH, os dados evidenciam que um incremento na vazão de gás contribui para uma redução no tempo necessário para atingir a homogeneização do líquido na panela.

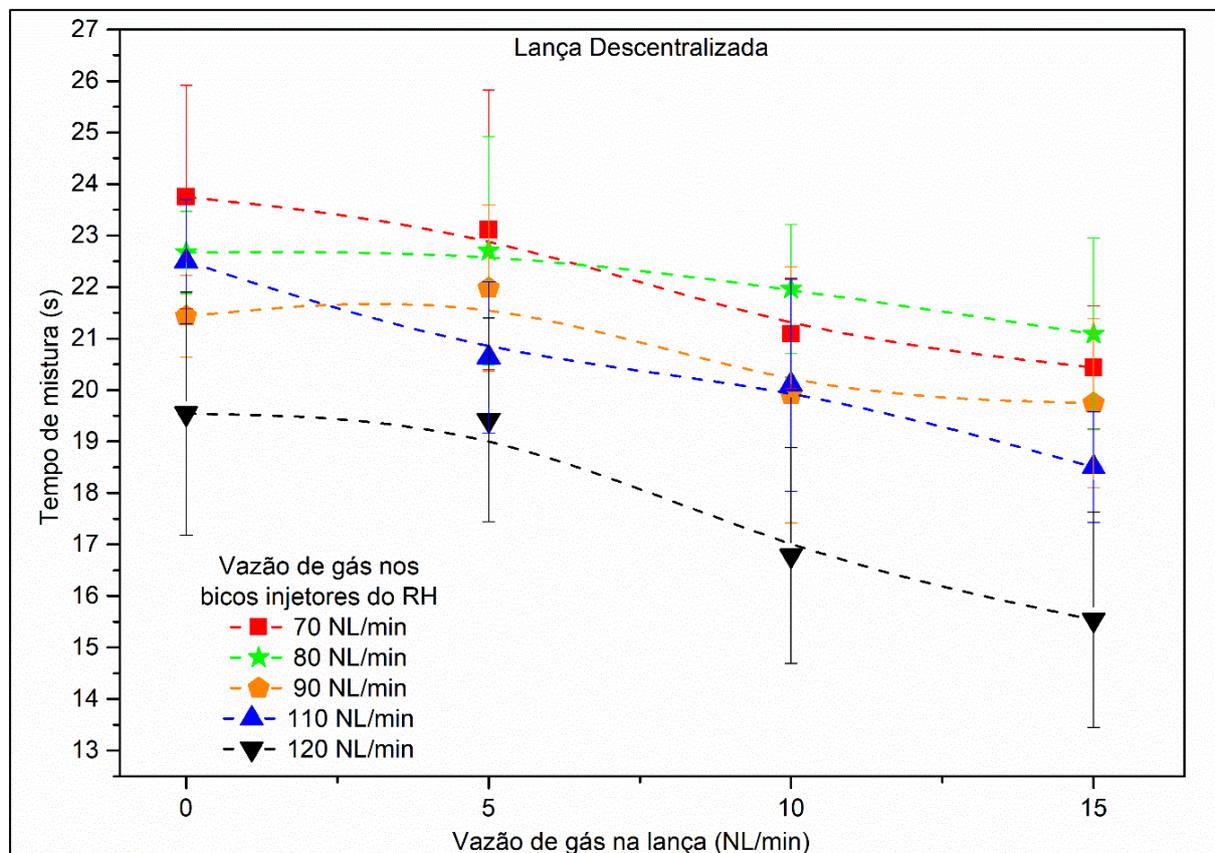
As Figuras 5.1 e 5.2 apresentam o comportamento do processo de homogeneização e enfatizam a diminuição do tempo de homogeneização em resposta à combinação de aumentos na vazão de gás pelos bicos injetores do RH (na posição descentralizada, variando entre 70NL/min, 80NL/min, 90NL/min, 110NL/min e 120NL/min) enquanto na posição centralizada entre 70NL/min e 110NL/min) e a vazão de gás pela lança em ambas posições foi ajustada para 5NL/min, 10NL/min e 15NL/min.

Figura 5.1 - Relação do tempo de mistura e a vazão de gás pelos bicos injetores do RH e na lança centralizada



Fonte: Autor (2024)

Figura 5.2 - Variação do tempo de mistura em função da vazão de gás pelos bicos injetores do RH e na lança descentralizada



Fonte: Autor (2024)

É notável que, à medida que ambas as vazões aumentam, os benefícios são mais evidentes, resultando em um tempo significativamente menor para a mistura e homogeneização. Essa observação enfatiza a importância de uma injeção eficiente de gás tanto pela lança quanto pelos bicos injetores do RH para homogeneização do aço na panela.

A análise comparativa dos resultados demonstra que a posição da lança centralizada é significativamente mais eficiente na redução do tempo de homogeneização na panela. Sob a condição inicial de vazão de gás no RH igual a 70NL/min nos bicos injetores, um incremento de 15NL/min na vazão da lança centralizada resultou em uma diminuição de 32,65% no tempo de homogeneização. Por outro lado, com a lança descentralizada, a mesma condição de processo resultou em uma redução de apenas 13,95%.

Quando a vazão da lança na posição centralizada alcança 10NL/min, observa-se que o tempo de mistura inicia um processo de estabilização. Esse padrão indica que, além de um certo ponto, o aumento adicional na vazão da lança não provoca uma redução substancial no tempo de mistura. Embora a posição centralizada da lança continue a apresentar benefícios operacionais,

a melhoria no tempo de mistura atinge um platô, onde ajustes adicionais na vazão perdem eficácia. Esse comportamento deve ser levado em conta no planejamento do processo, visto que vazões elevadas de gás não resultarão em menores tempos de mistura. Assim, sugere-se que é necessário avaliar outras variáveis operacionais para alcançar uma melhoria contínua no tempo de mistura.

## **5.2 Taxa de Circulação**

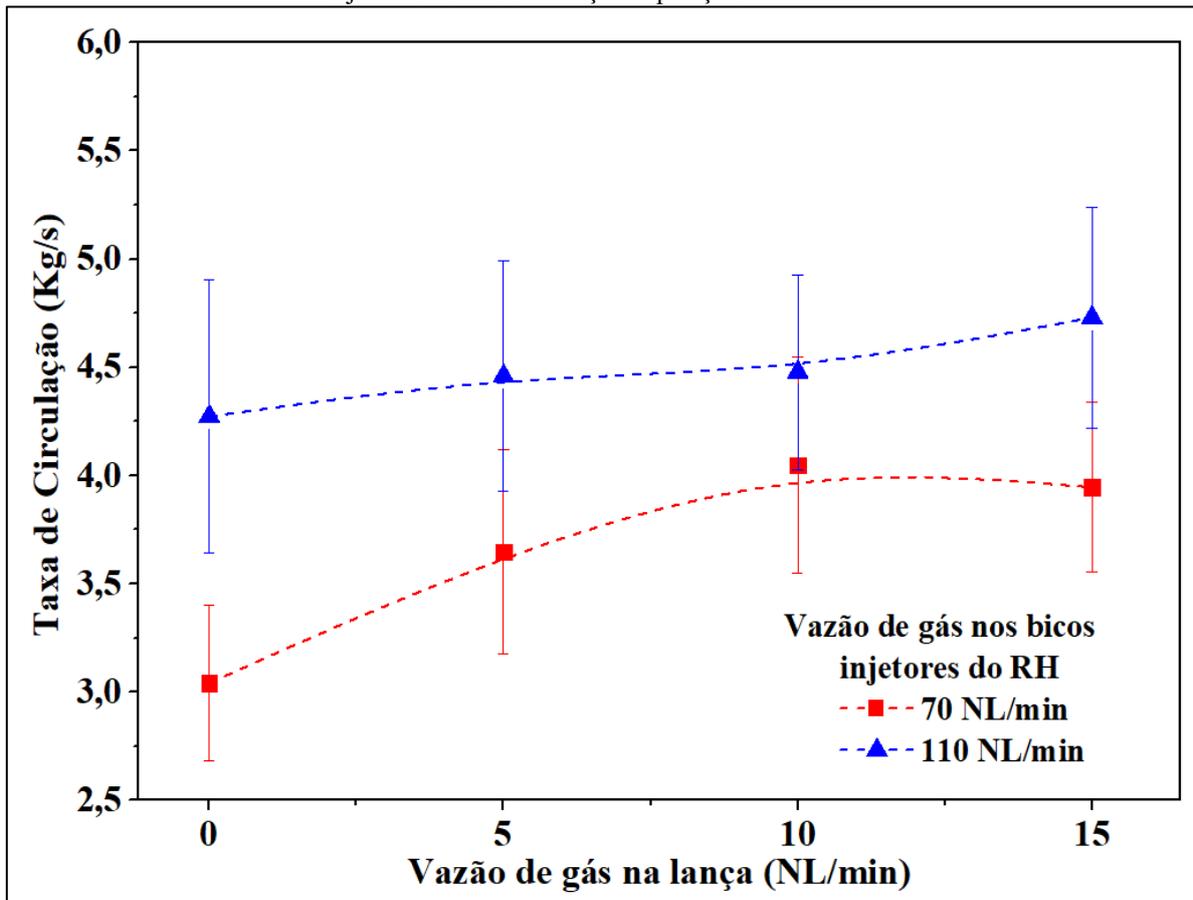
### **5.2.1 Influência da vazão de gás sobre a taxa de circulação do líquido**

Analisando a taxa de circulação em relação ao fluxo de gás injetado tanto pela lança quanto pela perna do RH, os resultados destacam que um aumento na vazão de gás contribui para uma ampliação na taxa de circulação, promovendo assim uma mistura mais rápida e eficiente da solução.

As Figuras 5.3 e 5.4 demonstram o comportamento da taxa de circulação em resposta à combinação de incrementos na vazão de gás pelos bicos injetores do RH (na posição descentralizada, variando entre 70NL/min, 80NL/min, 90NL/min, 110NL/min e 120NL/min) enquanto na posição centralizada entre 70NL/min e 110NL/min) e a vazão de gás pela lança ajustada para 5NL/min, 10NL/min e 15NL/min em ambas posições de lança.

É evidente que, à medida que as vazões na perna aumentam, os benefícios se tornam mais pronunciados, resultando em uma maior taxa de circulação, por conseguinte, em uma mistura mais rápida e eficaz. Essa observação sublinha a importância crucial de uma injeção eficaz de gás tanto pela lança quanto pelos bicos injetores do RH para otimizar a recirculação do aço entre panela e câmara de vácuo no RH.

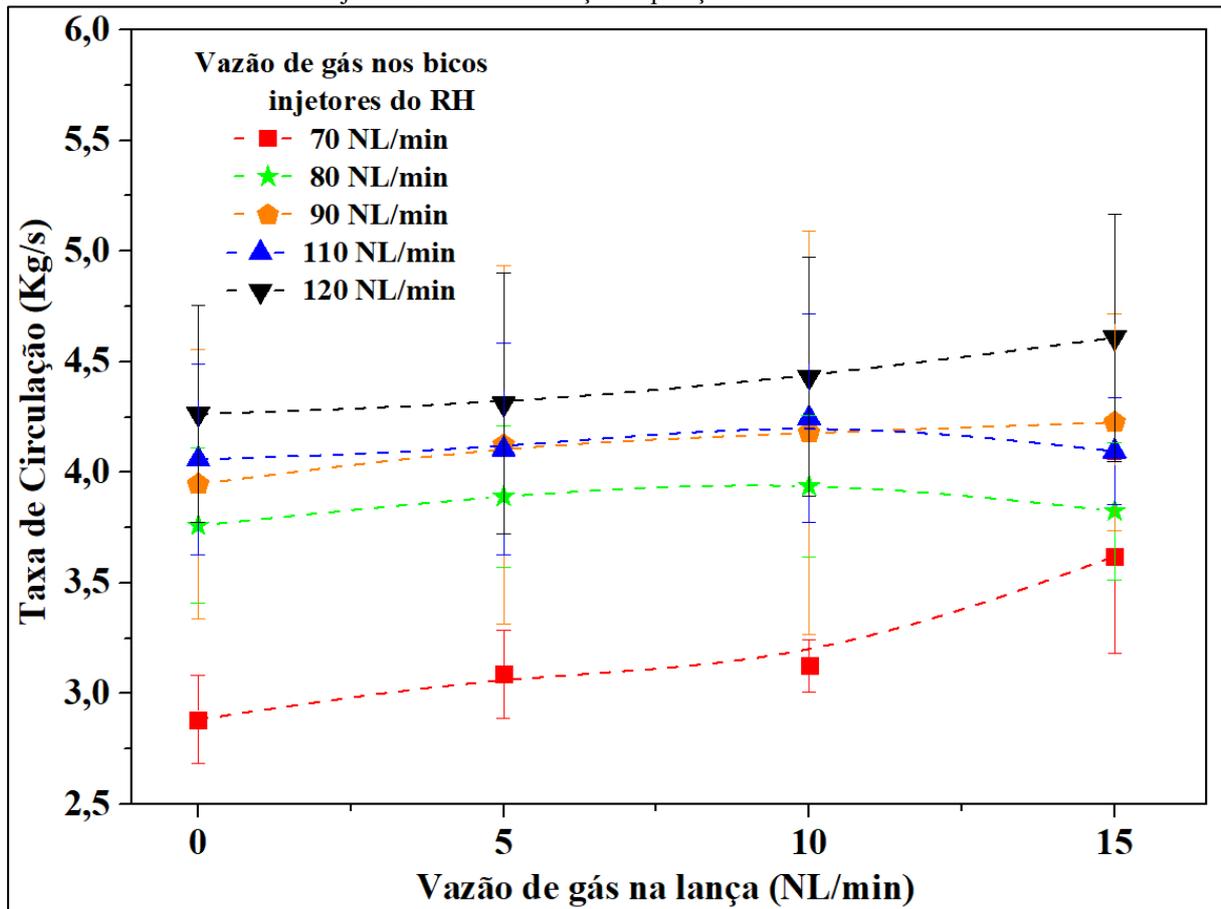
Figura 5.3 - Relação da taxa de circulação em resposta à combinação de aumentos na vazão de gás pelos bicos injetores do RH e na lança em posição centralizada



Fonte: Autor (2024)

A comparação dos resultados mostra que a posição centralizada da lança tem efeito semelhante à descentralizada na taxa de circulação. Com 70 NL/min nos bicos e 15 NL/min na lança, o aumento foi de 19% na posição centralizada e 20% na descentralizada, indicando ganhos operacionais próximos entre as configurações. Esses dados indicam que a configuração centralizada da lança gera ganhos operacionais semelhantes à configuração descentralizada na taxa de circulação entre a câmara de vácuo e a panela.

Figura 5.4 - Relação da taxa de circulação em resposta à combinação de aumentos na vazão de gás pelos bicos injetores do RH e na lança em posição descentralizada



Fonte: Autor (2024)

Destaca-se que, quando a vazão da lança atinge 10NL/min, observa-se que a taxa de circulação tende a se estabilizar em ambos os casos, ficando dependente da vazão de gás do RH. Isso indica que, além de um certo ponto, aumentos adicionais na vazão da lança não resultam em ganhos significativos na eficiência do processo. Esse comportamento sugere que a taxa de circulação atinge um limite de saturação, onde a posição da lança centralizada continua a ser vantajosa, mas o impacto de ajustes na vazão se torna cada vez menos perceptível. Esse fenômeno deve ser considerado no planejamento operacional, pois pode indicar a necessidade de otimizar outras variáveis do processo para alcançar melhorias adicionais.

Conforme menciona Liu, Lou e Zhu (2023), quando a vazão de gás é muito baixa, há pouca formação de bolhas e um empuxo insuficiente para impulsionar o aço líquido para dentro do snorkel, reduzindo a eficiência da circulação. Além disso, bolhas menores se dispersam de maneira irregular, dificultando a formação de um fluxo estável. Porém, se a taxa de fluxo de gás for excessivamente alta, parte das bolhas escapa pela superfície da panela antes de entrar no snorkel, diminuindo a participação ativa do gás no bombeamento do aço líquido. Além disso,

um fluxo de gás elevado pode causar instabilidades no banho metálico, desviando a pluma de gás para longe do snorkel e comprometendo a circulação eficiente.

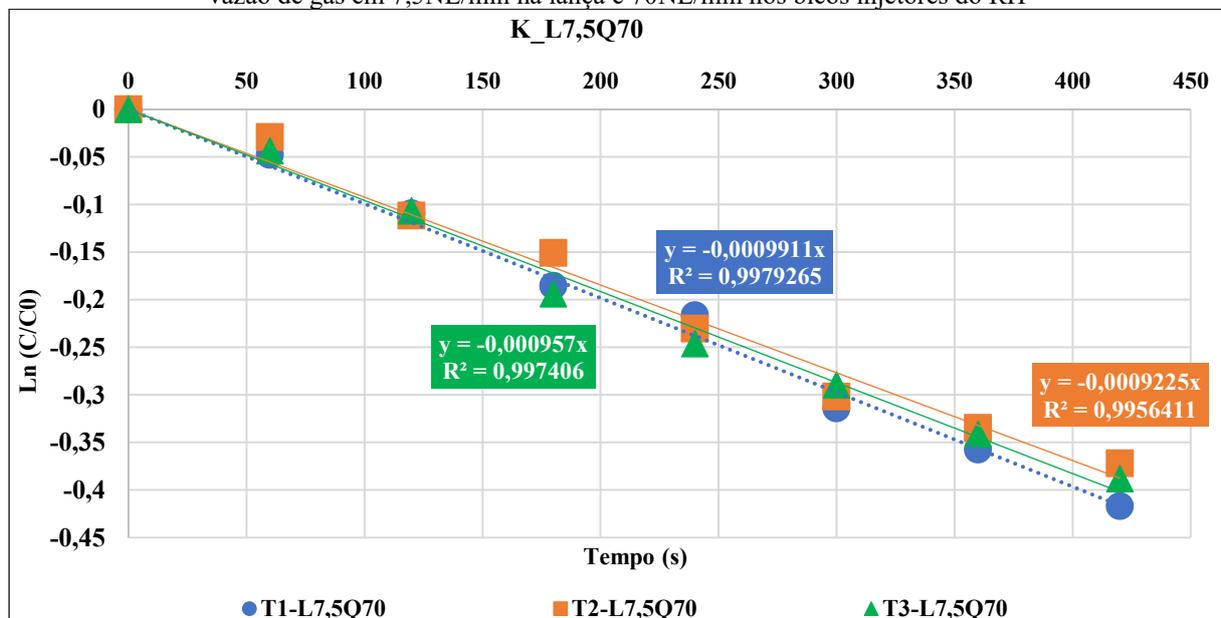
### 5.3 Transferência de Massa

Como mencionado por Silva (2023), o parâmetro cinético que permite avaliar essa velocidade entre o reagente injetado na panela (neste caso, óleo) e o líquido na panela (solução aquosa de timol) é obtido a partir da inclinação da reta  $\ln(C/C_0)$  versus  $t$ , onde  $C_0$  e  $C$  representam, respectivamente, as concentrações iniciais e ao tempo  $t$ .

Cada condição foi replicada três vezes, e os resultados exibiram excelente reprodutibilidade entre os experimentos, o que reforça a confiabilidade dos dados obtidos. A consistência experimental valida o modelo proposto, permitindo sua aplicação prática em situações reais, especialmente na otimização de processos industriais.

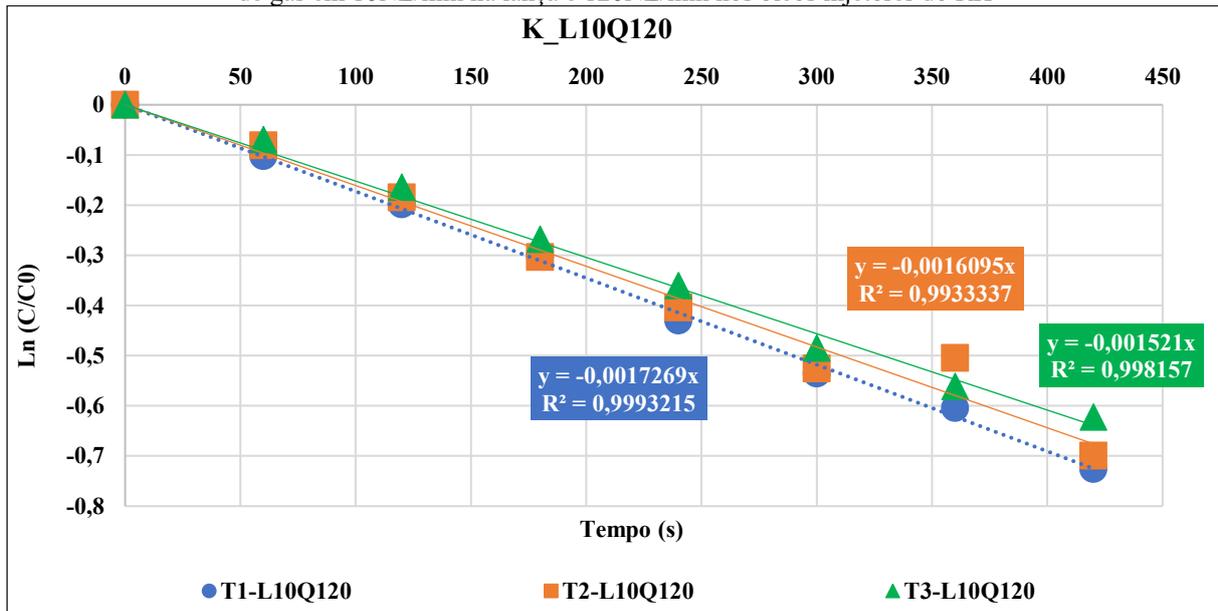
Nas Figuras 5.5 e 5.6, são apresentadas regressões lineares correspondentes a duas das cinco condições experimentais avaliadas, confirmando a relação linear entre  $\ln(C/C_0)$  e  $t$ . As condições experimentais abrangeram variações nos valores de vazão de gás, tanto na lança quanto nos bicos injetores do desgaseificador RH, permitindo uma análise detalhada das dinâmicas de transferência de massa em diferentes regimes.

Figura 5.5 - Variação da concentração do traçador orgânico (timol) por tempo em condições experimentais de vazão de gás em 7,5NL/min na lança e 70NL/min nos bicos injetores do RH



Fonte: Autor (2024)

Figura 5.6 - Queda da concentração do traçador orgânico (timol) por tempo m condições experimentais de vazão de gás em 10NL/min na lança e 120NL/min nos bicos injetores do RH

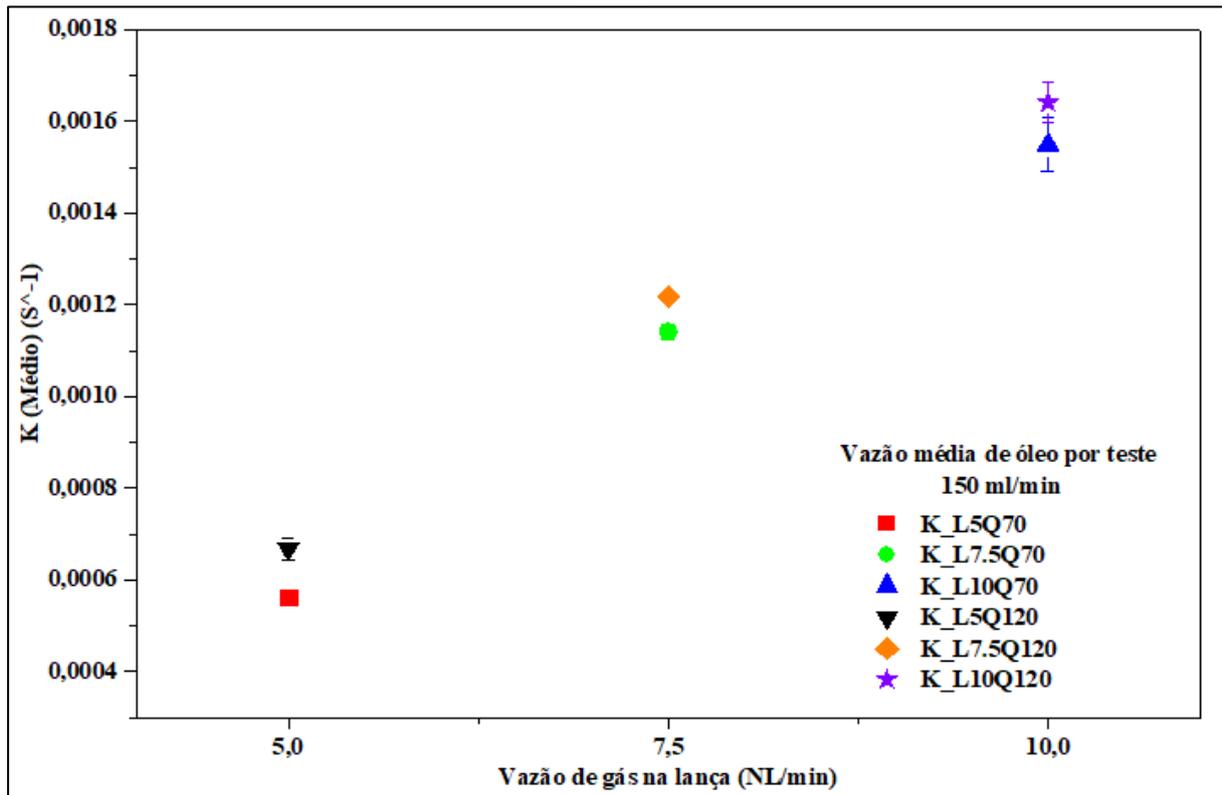


Fonte: Autor (2024)

A observação da linearidade na queda da concentração do traçador orgânico (timol) ao longo do tempo é notável, uma vez que todos os ensaios apresentaram valores de  $R^2$  muito próximos de 0,99. Essa linearidade robusta e consistente em todos os ensaios confirma a precisão e a confiabilidade dos resultados obtidos, fornecendo uma base sólida para as análises e conclusões derivadas desses dados experimentais.

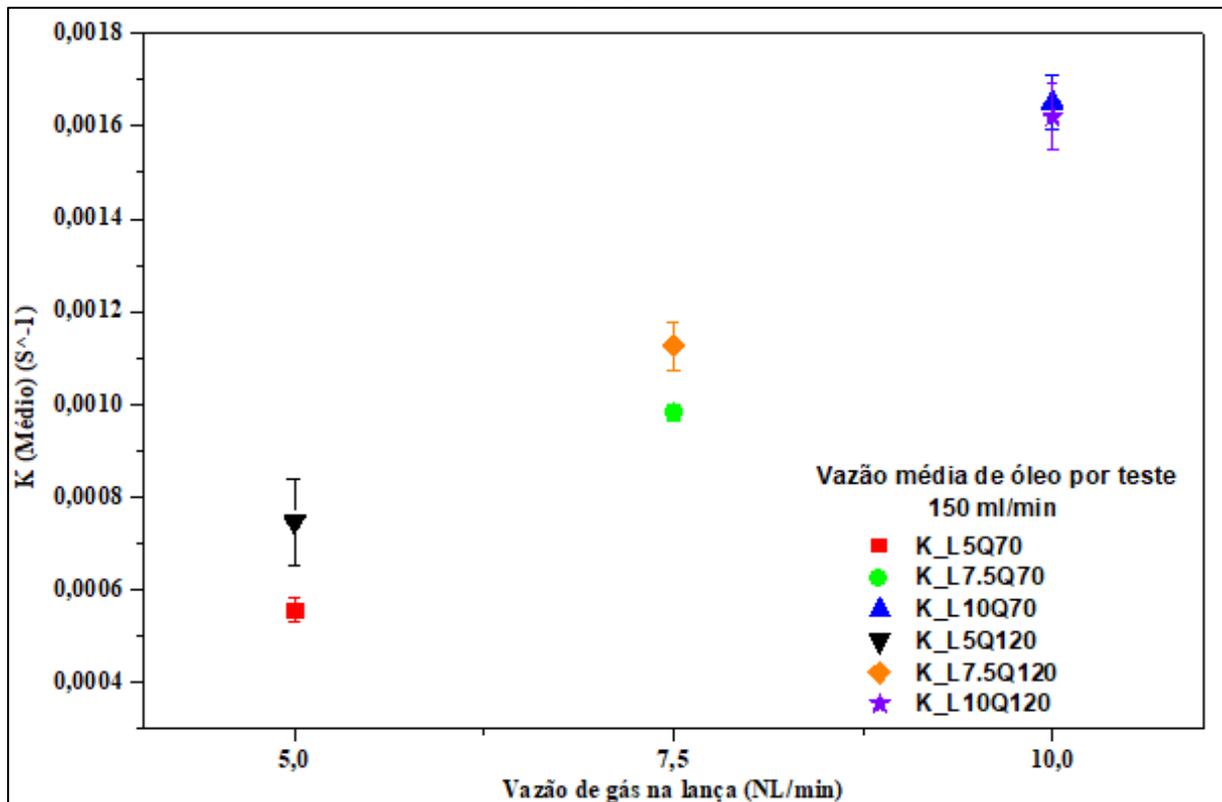
A média dos valores de (k) coeficiente aparente de transferência de massa obtidos nos três ensaios para as diferentes vazões de gás na lança e no desgaseificador RH foi representada em gráficos de vazão de gás na lança versus k. A Figura 5.7 apresenta os resultados para a configuração com a lança centralizada, enquanto a Figura 5.8 exibe os dados correspondentes à lança descentralizada. Esses resultados evidenciam a forte influência da vazão de gás pela lança sobre o coeficiente aparente de transferência de massa.

Figura 5.7 - Influência da vazão de gás na lança centralizada sobre o coeficiente aparente de transferência de massa



Fonte: Autor (2024)

Figura 5.8 - Influência da vazão de gás na lança descentralizada sobre o coeficiente aparente de transferência de massa



Fonte: Autor (2024)

Em ambas as configurações (lança centralizada e descentralizada), observa-se um aumento do coeficiente aparente de transferência de massa ( $k$ ) com o incremento da vazão de gás na lança. Esse comportamento está associado ao aumento na turbulência e na maior dispersão das gotas de óleo (maior taxa de renovação de interface) proporcionados pelas maiores vazões de gás.

A configuração com a lança descentralizada apresentou, valores médios de  $K$  ligeiramente inferiores em comparação com a configuração centralizada, em determinadas condições. Por exemplo, para a vazão de 10NL/min, os valores médios de  $K$  na configuração descentralizada são cerca de 12% inferiores em relação à configuração centralizada. Isso indica que a posição centralizada promove maior eficiência na transferência de massa, possivelmente devido à melhor distribuição das gotas no sistema.

O aumento da vazão de gás na perna de subida de 70NL/min para 120NL/min resultou em um acréscimo nos valores médios de  $K$  em ambas as configurações da lança. Por exemplo, na configuração descentralizada, para uma vazão de gás de 10NL/min, o valor médio de  $K$  nas condições de vazão (L10Q120) foi 14% maior em comparação a (L10Q70), enquanto na configuração centralizada esse aumento foi de cerca de 13%. Esse comportamento indica que a elevação da vazão de gás favorece a transferência de massa, possivelmente devido à maior dispersão dos fluidos e ao aumento da área de contato entre as fases, independentemente da posição da lança.

Em relação à dispersão dos dados, os valores de desvio padrão indicados pelas barras de erro nas figuras são semelhantes entre as configurações para a maioria dos casos. Isso sugere que as condições operacionais foram bem controladas e que o comportamento observado é reprodutível.

É possível observar nas Figuras 5.7 e 5.8, que, para vazões na lança de 5NL/min e 7,5NL/min, a vazão dos bicos injetores do RH impactou significativamente no processo. Esse comportamento sugere uma ligeira relação entre a taxa de circulação e o coeficiente aparente de transferência de massa ( $K$ ), indicando que o aumento na vazão dos bicos de injeção do RH resulta em um incremento positivo no valor de  $K$ . A condição de lança centralizada apresentou esse comportamento de aumento até mesmo para a vazão de lança de 15NL/min.

## **5.4 Caracterização de Fluxo por Filmagens**

### **5.4.1 Caracterização de fluxo pela trajetória de traçador**

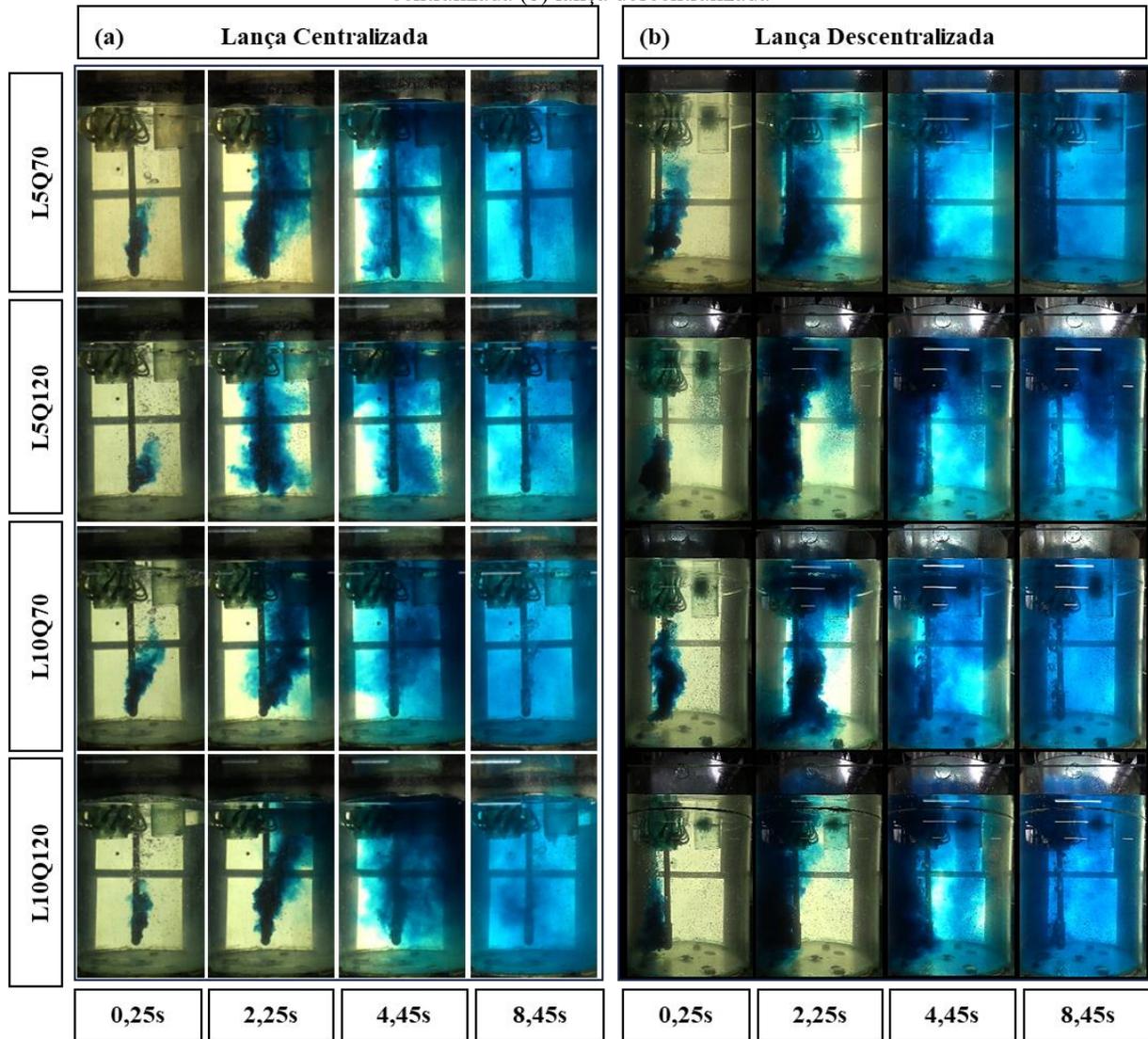
O comportamento do fluxo de traçador utilizando anilina azul apresentado na imagem revela diferenças entre as configurações de lança centralizada e descentralizada, influenciadas pelo tempo e pelas vazões de gás do RH e lança, Figura 5.9.

Na configuração de lança centralizada (Figura 5.9a), o traçador apresenta uma dispersão inicial concentrada na região próxima à lança, especialmente em condições de menor vazão (L5Q70). Com o tempo, observa-se uma propagação vertical mais evidente, mas o alcance horizontal ainda é limitado, indicando circulação menos eficiente. No entanto, à medida que as vazões aumentam, tanto na lança quanto no RH (L10Q120), a dispersão se torna mais uniforme e rápida. Nessa configuração, o traçador cobre praticamente toda a panela em tempos mais curtos, evidenciando uma mistura mais homogênea e uma circulação mais eficaz.

Por outro lado, na configuração de lança descentralizada (Figura 5.9b), o fluxo do traçador é direcionado principalmente para as regiões próximas à parede adjacente à lança. Isso é mais evidente em condições de baixa vazão (L5Q70), onde a dispersão é um pouco mais restrita resultando em uma distribuição desigual do traçador. Com o aumento das vazões, especialmente na condição L10Q120, a dispersão melhora significativamente, com o traçador atingindo a câmara de vácuo através da perna de subida e apresentando uma circulação mais satisfatória. Contudo, a concentração do fluxo próximo à parede ainda persiste, o que pode implicar maior desgaste refratário e distribuição menos uniforme do traçador em comparação com a configuração centralizada.

Ao longo do tempo, observa-se que as condições com maiores vazões (L10Q120) proporcionam uma recirculação mais eficiente, com o traçador alcançando rapidamente as regiões periféricas da panela e a câmara de vácuo. Isso evidencia que o aumento da turbulência gerado por vazões maiores favorece a mistura e a homogeneização do banho metálico.

Figura 5.9 - Comportamento de traçador na panela do RH em diferentes condições de vazão de gás (a) lança centralizada (b) lança descentralizada



Fonte: Autor (2024)

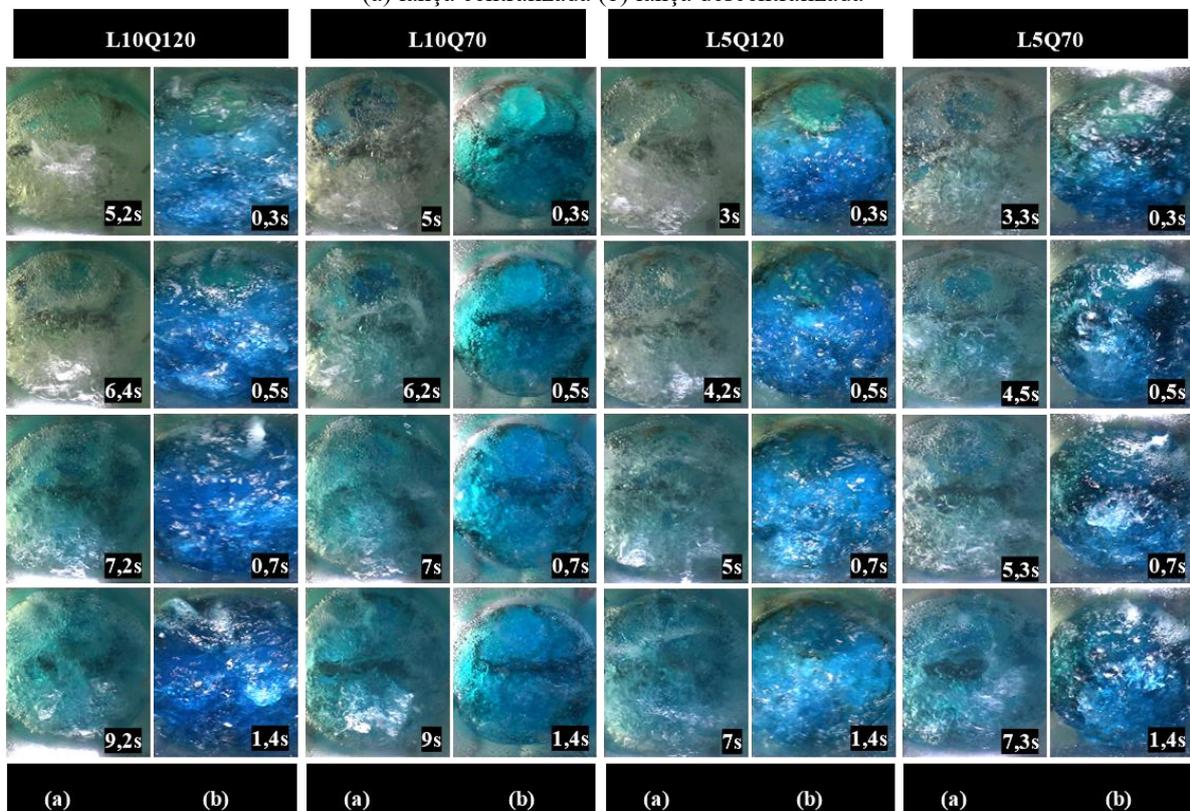
A análise da dispersão do traçador anilina azul na câmara de vácuo do revela como a interação entre tempo, posição da lança e fluxo de gás do sistema influenciam no processo, Figura 5.10. As condições experimentais exploradas, que combinam diferentes vazões de gás na lança e no RH evidenciam padrões distintos de propagação do traçador, com impacto significativo no tempo de homogeneização e na uniformidade da coloração azul.

Com a lança centralizada (Figura 5.10a), o padrão de fluxo apresenta uma propagação simétrica e relativamente mais lenta, favorecendo uma dispersão uniforme do traçador em toda a panela. Contudo, esse padrão resulta em um tempo maior para que o traçador alcance a perna de subida da câmara de vácuo.

Em contrapartida, na configuração descentralizada (Figura 5.10b), o fluxo inicial é mais direcionado, caracterizado por zonas de maior concentração do traçador próximas ao ponto de injeção. Esse comportamento assimétrico permite que o traçador atinja a câmara de vácuo de forma mais rápida, devido ao direcionamento preferencial gerado pela posição da lança abaixo da perna.

O impacto do fluxo de gás na lança é evidente, vazões maiores na lança proporcionam uma propagação mais rápida e eficiente do traçador, com maior cobertura da câmara em tempos iniciais. Já vazões menores retardam a propagação, tornando o processo mais dependente da vazão nos bicos de injeção no RH para atingir a homogeneidade.

Figura 5.10 - Comportamento do fluxo de traçador na câmara de vácuo em diferentes condições de vazão de gás (a) lança centralizada (b) lança descentralizada



Fonte: Autor (2024)

#### 5.4.2 Caracterização de fluxo pela trajetória de gotas de óleo

Quando a lança está centralizada (Figura 5.11a), o fluxo de óleo apresenta um padrão mais simétrico e uniforme em relação ao centro da panela. Na condição de baixa vazão na lança e baixa vazão no RH (L5Q70), o fluxo inicial é pouco agitado, e a dispersão do óleo ocorre de forma lenta, com regiões de bolsões de óleo permanecendo visíveis até os 40 segundos. Por outro lado, ao aumentar a vazão nos bicos de injeção do RH (L5120), há uma intensificação da turbulência, promovendo uma dispersão mais eficiente em tempos intermediários, com maior

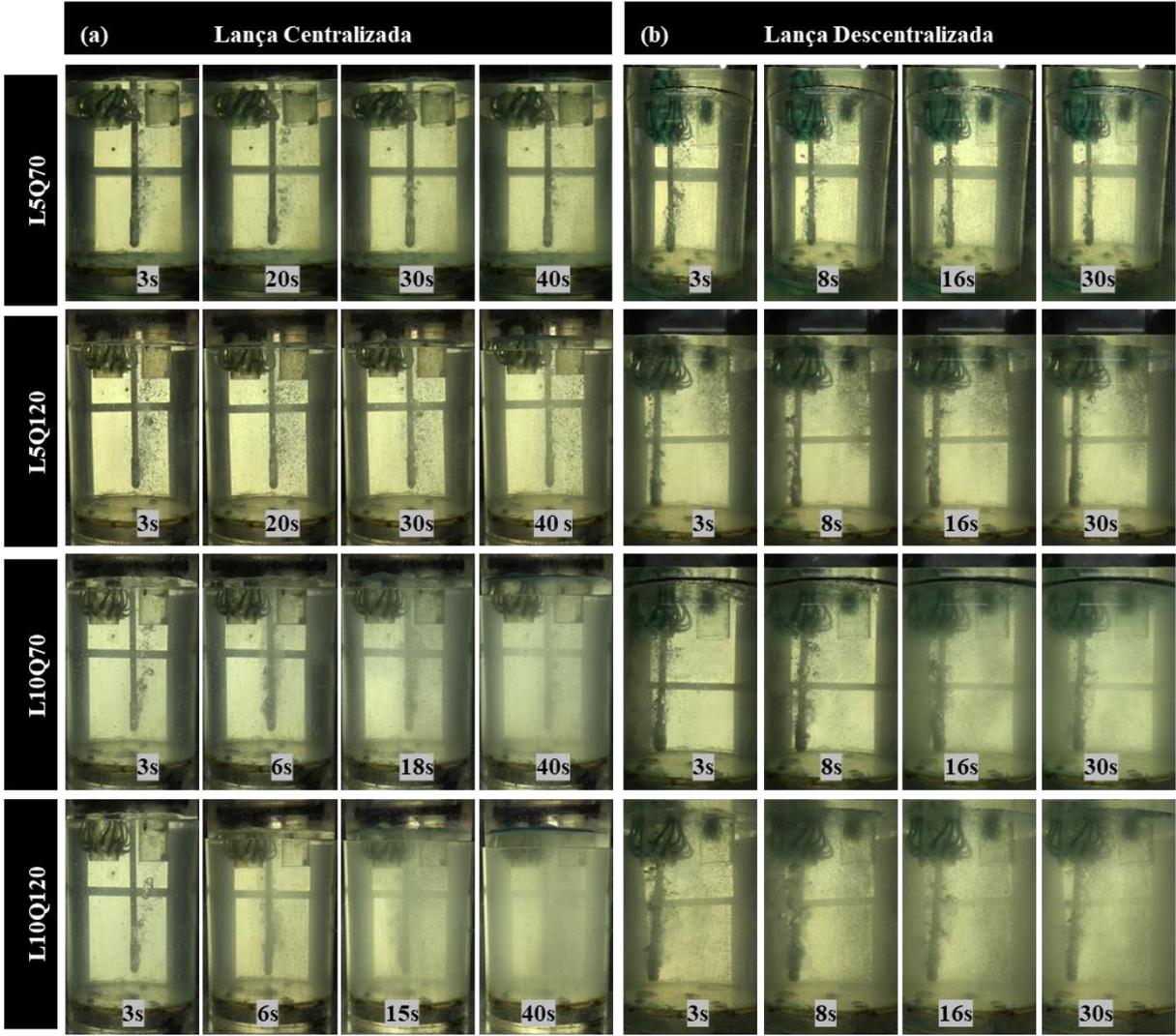
homogeneidade observada ao final do intervalo de análise (40 segundos). Quando a vazão da lança é alta (10NL/min) a dispersão inicial torna-se mais vigorosa, especialmente na condição (L10Q120), onde a uniformidade é atingida rapidamente (em cerca de 15 segundos), devido à maior força ascensional gerada pelo gás.

Na configuração com a lança descentralizada (Figura 5.11b), observa-se um padrão distinto na dispersão do óleo. A injeção de gás deslocada para a lateral da panela promove uma maior concentração do fluxo e do óleo próximo à área da lança e em direção a perna de subida do RH, nos tempos iniciais. Na condição de menor vazão (L5Q70), o óleo apresenta maior dificuldade para se dispersar por toda a panela, com áreas de concentração persistindo até os 30 segundos. Ao aumentar a vazão total (L5Q120), a turbulência gerada pelo gás compensa parcialmente a posição descentralizada, promovendo uma dispersão mais ampla. Quando a vazão da lança é alta (L10Q120), a dispersão do óleo torna-se mais uniforme e rápida, seguindo a recirculação entre panela e câmara de vácuo do RH.

Nas configurações em que a vazão de gás, tanto no RH quanto na lança são menores, observou-se um padrão de fluxo com um tempo de dispersão do óleo maior e mais prolongado em direção à perna de subida do RH. Isso resulta em um maior tempo de residência do óleo na panela, porém sem exercer o movimento de circulação padrão no RH.

Por outro lado, nas condições em que a taxa de fluxo de gás no RH e na lança são maiores, notou-se um padrão de fluxo com um tempo de dispersão do óleo ligeiramente reduzido em comparação com o anterior, o que se traduz em um tempo menor para o óleo alcançar a perna de subida do RH, conforme Figura 5.11.

Figura 5.11 - Comportamento do fluxo de óleo na panela RH em diferentes condições de vazão de gás (a) lança centralizada (b) lança descentralizada



Fonte: Autor (2024)

## 6 CONCLUSÃO

Os ensaios de condutivimetria demonstraram que a vazão de gás, especialmente na lança centralizada, exerce influência significativa na redução do tempo de mistura, enquanto a vazão pela perna de subida predomina sobre o aumento da taxa de circulação do líquido, o que ressalta que as funções primárias de desgaseificação e descarburização não foram prejudicadas e até, na maioria dos casos, melhorada. Para a vazão de 70NL/min no RH e 15NL/min na lança (posição centralizada), a homogeneização do banho foi alcançada com uma redução de 32,65% no tempo de mistura, o que evidencia a importância da escolha de parâmetros operacionais otimizados.

Por meio dos ensaios de transferência de massa, foi possível estabelecer uma correlação positiva entre a vazão de gás e a taxa de transferência de massa, confirmando que injeção de óleo pela lança promove significativa remoção de timol (traçador que simula o enxofre). A lança na posição centralizada promoveu resultados ligeiramente maiores de coeficiente aparente de transferência de massa ( $K$ ), indicando maior eficiência do processo em termos de dessulfuração.

A caracterização qualitativa realizada com traçadores, como a anilina e o óleo de soja, complementou essas análises, mostrando que a configuração centralizada da lança resulta em uma dispersão mais uniforme e eficiente ao longo do banho metálico enquanto a posição de lança descentralizada demonstrou um fluxo ascendente em direção a perna de subida do RH. Filmagens em alta resolução permitiram visualizar a dinâmica de fluxo dentro da panela e na câmara de vácuo, confirmando que as condições de maior vazão otimizam a circulação e a distribuição do traçador.

Por fim, a comparação entre as diferentes configurações da lança de injeção revelou que a posição centralizada não só melhora a taxa de circulação e otimiza o tempo de mistura, mas também promove uma transferência de massa ligeiramente mais eficiente. Além disso, a posição centralizada é mais viável para instalação no reator RH industrial devido às condições do ambiente e às restrições geométricas e de processo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, S. G. P. T. **Modelamento físico de transferência de massa aplicado ao refino do aço**. 2019. 51f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

AHRENHOLD, F.; PLUSCHKELL, W. Circulation rate of liquid steel in RH degassers. **Steel Research**, v. 69, n. 2, p. 54–59, fev. 1998.

ALMEIDA, A. T. P. Estudo da Cinética de Descarburização no Modelo Físico do Desgaseificador à Vácuo RH, Trabalho Final de Curso, UFMG, Belo Horizonte, 2005.

ANDERSON, J. C. **Materials science and engineering: an introduction**. CRC Press, 1999.

BOLOTA, J.R. Refino Secundário de Aços. In: MOURÃO, M.B. (Coord.) Introdução a Siderurgia. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007. cap. 7. p. 189-215.

CARVALHO, J. L. R., CAMILO, R. D., FIGUEIRA, R. M., CAMPOS, V. C., Dados termodinâmicos para metalurgistas, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Fevereiro, 1977.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica: materiais e processos**. 9ª ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2012.

COSTA, L. T. **Simulação fluidodinâmica computacional para estudo do tratamento de dessulfuração do aço**. 2012. 88p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2012.

COSTA, L. T.; TAVARES, R. P. Dessulfuração do aço em desgaseificador RH por meio de modelo matemático. In: SEMINÁRIO DE ACIARIA, FUNDIÇÃO E METALURGIA DE NÃO-FERROSOS, 46. 2015, Rio de Janeiro, **Anais ...** São Paulo: ABM, 2015. p. 552-561.

DAI, W.; CHENG, G.; ZHANG, G.; HUO, Z.; LV, P.; QIU, Y. et al. Investigation of circulation flow and slag-metal behavior in an industrial single snorkel refining furnace (SSRF): application to desulfurization. **Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science**, v. 51, n. 2, p. 611-627, 2020.

EMI, T. Steelmaking technology for the last 100 years: toward highly efficient mass production systems for high quality steels. **ISIJ International**, v. 55, n. 1, p. 36–66, 2015.

GHOSH, A. **Secondary steelmaking: principles and applications**. Florida: CRC Press LLC, 2001. 322 p.

KAMATA, C.; MATSUMURA, H.; MIYASAKA, H.; HAYASHI, S.; ITO, K. Cold model experiments on the circulation flow in RH reactor using a laser doppler velocimeter. In: Ironmaking Conference Proceedings, 57. 1998. **Proceedings...**Toronto, Canada, 1998. P. 1849-1856.

KIM, S.; FRUEHAN, R. J. Physical modeling of liquid/liquid mass transfer in gas stirred ladles. **Metallurgical Transactions B**, v. 18B, p. 381-390, 1987.

KISHAN, P. A. e DASH, S. K. Numerical and experimental study of circulation flow rate in a closed circuit due to gas jet impingement, *Int. Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, v.16 n.8, pp. 890-909, 2006. <https://doi.org/10.1108/09615530610702050>

LIU, Z; LOU, W; ZHU, M. Numerical Analysis of Fluid Flow and Powder Transport Characteristics of RH-Degasser Ladle Bottom Powder Injection (RH-PBI) Process. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 55, n. 1, p. 418-430, 2023.

MARINS, A. M. F. **Modelagem física e computacional do fluxo de aço em panela com agitação por gás inerte, com ênfase na separação de inclusões**. 2011. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Rede Temática em Engenharia de [Materiais (REDEMAT), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

MELO, P. H. R. V. de; PEIXOTO, J. J. M.; GALANTE, G. S.; LOIOLA, B. H. M.; SILVA, C. A. da; SILVA, I. A. da et al. The influence of flow asymmetry on refractory erosion in the vacuum chamber of a RH degasser. **Journal of Materials Research and Technology**, 2019; 8(5): 3764–71.

NAKANISHI, K., SZEKELY & CHANG, C. W., Experimental and theoretical investigations of mixing phenomena in the RH-vacuum process, *Ironmaking & Steelmaking*, N°2, p.115- 124, 1975.

NEVES, L.; OLIVEIRA, H. P. O.; TAVARES, R. P. Evaluation of gas injection in the vacuum chamber of a RH degasser on melt circulation and decarburization rates. **ISIJ International**, v. 49, n. 8, p. 1141-1146, 2009.

NKK, CORPORATION. **Mecha-Stir: Mechanical Stirring de-Sulfurization System With Impeller**. *Anual Report*, 1999.

OKANO, H.; TAJIRI, Y.; SATOH, M.; FUKAGAWA, S.; SHINME, K. Development of technology for producing ultra-low sulphur steel by RH top blowing method. **The Sumitomo Search**, v. 59, p. 91-95, 1997.

ORTON, J. P. **The Importance of Low Sulphur on Processing and Properties of Steel**. Hamilton, Ontario: The Steel Company of Canada, Limited, 1974. p. 14.

RIBOUD, P. Désulfuration de l'acier en poche-synthèse des résultats théoriques et industriels. **Revue de Métallurgie**, v. 82, n. 11, p. 801-810, 1985.

PEIXOTO, J. J. M.; GABRIEL, W. V.; OLIVEIRA, T. A. S.; SILVA, C. A.; SILVA, I. A.; SESHADRI, V. Numerical Simulation of Recirculating Flow and Physical Model of Slag–Metal Behavior in an RH Reactor: Application to Desulfurization. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 49, p. 2421–2434, 2018.

PEIXOTO, J. J. M. **Análise da turbulência e do comportamento metal-escória no interior de um reator RH e sua influência sobre a reação de dessulfuração do aço**. 2019. 205 f. Tese

(Doutorado em Engenharia de Materiais) – Rede Temática em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

PISTORIUS, P. C.; VERMAAK, M. K. G. Modelling pyrometallurgical kinetics: Ladle desulphurization. **South African Journal of Science**, v. 95, n. 9, p. 377–380, 1999.

RIZZO, E. M. S. **Introdução aos Processos de Refino Secundário dos Aços**. São Paulo: ABM, 2006.

SCHRADE, C.; NICOLAI, H.; ZULHAN, Z. Desulfurization of molten steel in RH-degasser by powder blowing to produce silicon steel – Operational Results Maanshan ISCO. In: METEC. 2° ESTAD, 2. 2015, Düsseldorf, Germany. **Proceedings ...**, Düsseldorf: METEC, 2015. p. 1-5.

SCHRAMA, F. N. H.; BEUNDER, E. M.; VAN DEN BERG, B.; YANG, Y.; BOOM, R. Sulphur removal in ironmaking and oxygen steelmaking. **Ironmaking & Steelmaking**, v. 44, n. 5, p. 333–343, 2017.

SESHADRI, V.; SOUZA COSTA, S. L. Cold Model Studies of R. H. Degassing Process. **Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan**, v. 26, n. 2, p. 133–138, 1986.

SESHADRI V, DA SILVA CA, DA SILVA IA, VARGAS GA, LASCOSQUI PSB. Decarburisation rates in RH-KTB degasser of CST steel plant through physical modelling study. *Ironmak Steelmak*. 2006;33(1):34 8.

SILVA, A. M. B.; OLIVEIRA, M. A.; PEIXOTO, J. J. M.; SILVA, C. A. Slag-Steel Emulsification on a Modified RH Degasser. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 52, p. 1–7, 2021.

SILVA, A. M. B.; PEIXOTO, J. J. M.; SILVA, C. A.; SILVA, I. A. Steel desulfurization on RH degasser: physical and mathematical modeling. **REM - International Engineering Journal**, v. 75, n. 1, p. 27–35, 2022.

SILVA, Cecília Laia da. Modelagem física da dessulfuração de ferro gusa em panela com lança submersa rotativa. 2023. 69 f. Monografia (Graduação em Engenharia Metalúrgica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023.

SILVA, C.A.; SILVA, I. A. Estudo Comparativo do Pré-Tratamento do Gusa Líquido em Reatores Diversos: Carro Torpedo vs Reator Kambara, Projeto de Pesquisa Apresentado à FAPEMIG, 2002.

SILVA, M. A. **Avaliação da Utilização de Agentes Dessulfurantes à Base de Carbureto de Cálcio Contendo Sodalita em Substituição à Fluorita em Carro Torpedo**. 2012. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

SILVA, A. M. B. **Modelagem física e matemática da emulsificação aço-escória para fins de refino em um desgaseificador RH modificado**. 2022. 205 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Rede Temática em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

SILVA, I. A. **Estudo Físico-Químico da Dessulfuração do Gusa**. 1976. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte) – CPGM, UFMG, 1976,

TORRES, F. de M. **Modelamento físico e matemático dos efeitos da injeção auxiliar de gás em um reator Kanbara**. 65 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

TRINDADE, L. C.; PEIXOTO, J. J. M.; SILVA, C. A.; BASTON, E. P.; NAVES, F. L.; NETO, J. C. B.; et al. Influence of Obstruction at Gas-Injection Nozzles (Number and Position) in RH Degasser Process. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 50, n. 1, p. 578–584, 2019.

TURKDOGAN, E.T. **Fundamentals of steelmaking**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 1996. 352 p.

VARGAS, G.A. Modelagem Matemática e Física do Desgaseificador a Vácuo RH da Companhia Siderúrgica Tubarão – CST. 2000. 158 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – PPGEM/UFMG, Belo Horizonte, 2000.

WANG, X.; TANG, F. P.; LI, Z.; TIAN, Y.; MENG, J.; ZHU, M.; BAO, Y.; DENG, Z.; WANG, M. Desulphurisation with dispersed in-situ phases induced by composite ball explosive reaction during ultra-low carbon steel production in RH degasser. **Ironmaking & Steelmaking**, v. 49, n. 2, p. 217–225, 2022.

WEI, J.H.; ZHU, S.J.; YU, N.W. Kinetic model of desulphurization by powder injection and blowing in RH refining of molten steel. **Iron and Steelmaking**, v. 27, n. 2, p. 129-137, 2000.

YANG, H.; LI, J.; GAO, Z.; SONG, F.; YANG, W. Study on Flow-Reaction Desulfurization of RH By Physical Experiment. In: Zhang, L., Allanore, A., Wang, C., Yurko, J.A., Crapps, J. (eds) **Materials Processing Fundamentals. TMS (The Minerals, Metals & Materials Society)**, p. 45-52, 2013.

ZHANG, J.; LIU, L.; ZHAO, X.; LEI, S. e DONG, Q. Mathematical Model for Decarburization Process in RH Refining Process. **ISIJ International**, v. 54, n. 7, p. 1560–1569, 2014.

ZHANG, M.; ZENG, J.H.; PAN, H. Study on Desulphurization Technology in RH Refining for Electric Steel. **Applied Mechanics and Materials**, V. 217-219, p. 449-453, 2012.

ZHU, C.; CHEN, P.; LI, G.; LUO, X.; ZENG, W. A Mathematical Model of Desulphurization Kinetics for Ultra-low sulfur Steels Refining by Powder Injection during RH Processing. **ISIJ International**, v. 56, n. 8, p. 1368–1377, 2016.

ZULHAN, Z.; SCHRADE, C.; PATRIONA, Y.A. Desulphurization of Molten Steel in RH-Degasser by Powder Blowing to Produce Non Grain Oriented (NGO) Silicon Steel. In: SOUTH EAST ASIA IRON AND STEEL INSTITUTE, 2013, Thailand. **Proceedings ... Institute of Technology Bandung, Technometal GmbH**, 2013, p. 1-9.

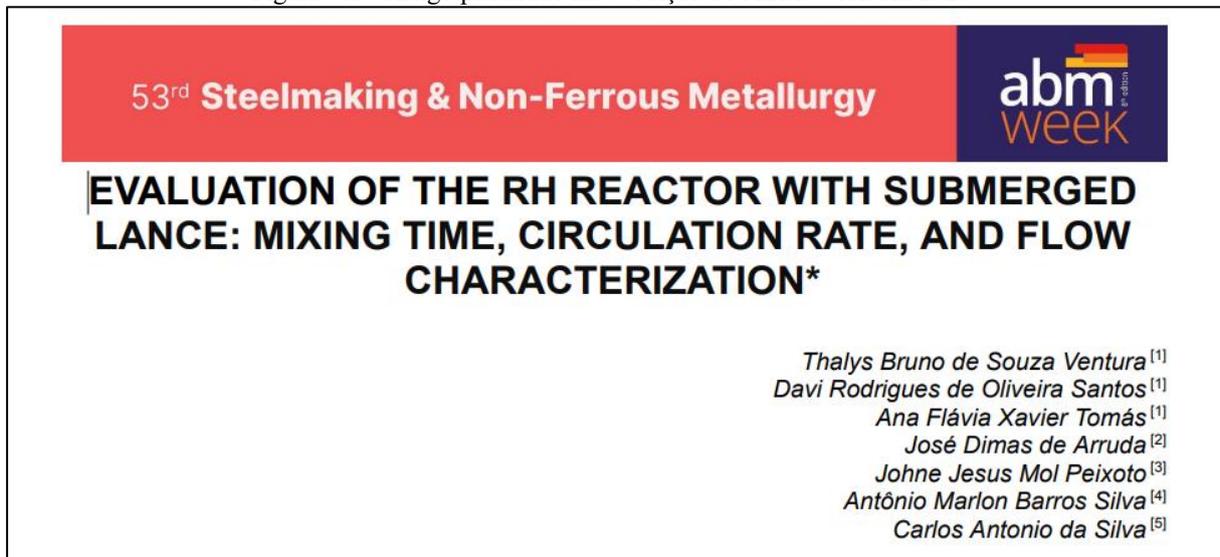
## APENDICE - PUBLICAÇÃO CIENTÍFICA

No contexto da 8ª edição do ABM Week, em 2024, foi apresentado um artigo no *53rd Seminar on Steelmaking, Casting and Non-Ferrous Metallurgy*, um congresso internacional de grande destaque na área de metalurgia. O artigo abordou parte dos resultados deste TCC, focando na otimização do processo de dessulfuração, com ênfase na influência da vazão de gás na taxa de circulação, no tempo de mistura e na homogeneização no reator RH. O artigo também incluiu a análise das filmagens realizadas, que permitiram observar a dinâmica de dispersão do traçador, óleo e a influência das configurações da lança na eficiência do processo.

Doi: 10.5151/2594-5300-41168

A figura 5.12 demonstra alguns dados sobre a publicação.

Figura 0.1 - Artigo publicado na 8ª edição do ABM Week em 2024



Fonte: Autor (2024)