

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Departamento de Metalurgia

AVALIAÇÃO DO TEMPO E DA VELOCIDADE DE PARTÍCULA EM
SIMULADOR DE PCI

GUILHERME TONATTO KIENETZ

Orientador: Professor Dr. Eduardo Osório

Porto Alegre
2024

CIP - Catalogação na Publicação

Kienetz, GUILHERME Tonatto
AVALIAÇÃO DO TEMPO E DA VELOCIDADE DE PARTÍCULA EM
SIMULADOR DE PCI / GUILHERME Tonatto Kienetz. -- 2024.
60 f.
Orientador: Eduardo Osório.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Porto
Alegre, BR-RS, 2024.

1. PCI. 2. Siderurgia. 3. Velocimetria. 4.
Simulador. 5. Alto-forno. I. Osório, Eduardo, orient.
II. Título.

AGREDECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a minha família, Odete, Bruno e Luna, pelo apoio durante todos estes anos.

Gostaria de agradecer ao meu Orientador Prof. Dr Eduardo Osório e Co-orientador Me. Eng. Héctor Picarte pela orientação e por todas as discussões deste trabalho e dos 3 anos de iniciação científica no Laboratório de Siderurgia.

Agradeço também aos Bolsistas, Mestrandos, Doutorandos e professores do LaSid pelas trocas de ideias e ajuda ao longo do tempo de IC e durante a realização deste estudo.

Aos colegas de curso pelos anos de estudos e parceria, especialmente aos Vicente, Diogo, Fernando, Augusto, Felipe, Filipe, Gustavo, Jamile, Julia, Marina, Thiago, Thiago Luis. João, Matheus.

À UFRGS pela educação de excelência.

Ao LaSid (Laboratório de Siderurgia) pelos anos de ensino e amizades.

E a todos que de alguma forma estiveram junto comigo durante os anos de graduação.

Muito obrigado!

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	XII
LISTA DE TABELAS	XIV
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	XV
RESUMO	XVI
ABSTRACT.....	XVII
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	3
2.1 OBJETIVO GERAL	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 ROTAS DA PRODUÇÃO DO AÇO.....	4
3.2 O ALTO-FORNO	4
3.3 SISTEMA DE INJEÇÃO DO ALTO-FORNO	6
3.4 ESTUDO DA COMBUSTÃO EM SIMULADORES DE PCI.....	10
3.5 VELOCIMETRIA.....	13
3.5.1 <i>IMAGEM DE ALTA VELOCIDADE - High-Speed Imaging (HSI)</i>	13
3.5.2 <i>VELOCIMETRIA DE LASE DOPPLER - Laser Doppler Velocimetry (LDV)</i>	14
3.5.3 <i>VELOCIMETRIA DE TRAÇAR PARTÍCULA - Particle Tracking Velocimetry (PTV)</i>	14
3.5.4 <i>VELOCIDADE DE PARTÍCULA POR IMAGEM - Particle Image Velocimetry (PIV)</i>	14
4 MATERIAIS E MÉTODOS	16
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO.....	16
4.2 MÉTODO DE ANÁLISE DE VELOCIMETRIA.....	16
4.3 MÉTODO DE ANÁLISE DA VELOCIMETRIA NO SIMULADOR FÍSICO DA ZONA DE COMBUSTÃO	16
4.4 CÂMERA DE ALTA VELOCIDADE.....	18
4.5 APARATO EXPERIMENTAL DE FILMAGEM	18
4.6 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	21
4.7 EXTRAÇÃO DOS DADOS DA CÂMERA DE ALTA VELOCIDADE ..	22
4.8 CONFIGURAÇÃO DO SOFTWARE.....	23
4.9 METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	25

5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
5.1	INFLUÊNCIA NA VELOCIDADE E TEMPO DE RESIDÊNCIA ΔP 3 bar	28
5.1.1	<i>ANÁLISE DA VELOCIDADE MÉDIA DAS PARTÍCULAS.....</i>	<i>28</i>
5.1.2	<i>ANÁLISE DO TEMPO DE RESIDÊNCIA DAS PARTÍCULAS.....</i>	<i>31</i>
5.2	INFLUÊNCIA NA VELOCIDADE E TEMPO DE RESIDÊNCIA COM ΔP	
DE 1 bar	33	
5.2.1	<i>ANÁLISE DA VELOCIDADE MÉDIA DAS PARTÍCULAS EM 1 bar</i>	<i>33</i>
5.2.2	<i>ANÁLISE DO TEMPO DE RESIDÊNCIA DAS PARTÍCULAS.....</i>	<i>35</i>
5.3	COMPARATIVO ENTRE DIFERENÇA ABERTURA DE VÁLVULA ΔP	
DE 3 e 1 BAR	37	
6	CONCLUSÕES.....	43
7	TRABALHOS FUTUROS.....	45
8	REFERÊNCIAS	46

RESUMO

A injeção de finos de carvão em altos-fornos é uma tecnologia essencial na siderurgia moderna, visando reduzir custos e emissões de CO₂. A complexidade das condições nos altos-fornos instigou cientistas e empresas ao redor do mundo ao desenvolvimento de reatores simuladores que sejam capazes de simular regiões de interesse no alto-forno, uma dessas regiões é a zona de combustão. Assim como outros centros de pesquisa e empresas, o Laboratório de Siderurgia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LaSid – UFRGS) realizou a montagem de um simulador capaz de simular as condições similares a da zona de combustão, permitindo estudos em condições semelhantes às encontradas nos altos-fornos.

Após trabalhos realizados para aprimorar as técnicas de aquisições de dados e de operação do simulado do LaSid, um novo estudo foi desenvolvido com o objetivo de verificar o comportamento de partículas na zona de combustão do simulador, utilizando, no lugar do forno resistivo, um tubo de acrílico para que fosse possível gravar a passagem das partículas ao longo desta região do simulador. Com o auxílio de uma câmera de alta velocidade e técnicas de análise de velocimetria de partículas os dados foram gerados. Para mensurar a velocidade das partículas, foi adotada uma versão simplificada da técnica de Velocimetria de Traçar Partícula, *PTV*. Com o auxílio de um software, foi possível traçar o percurso das partículas ao longo da região de interesse, com a geração dados de posição, tempo e velocidade de partícula.

Desta forma, foi possível verificar se os valores encontrados no presente trabalho estão compatíveis aos encontrados na zona de combustão de altos-fornos. Ainda se observou que o tamanho de partícula não gerou uma grande diferença na velocidade média região central do reator P3. Bem como, quanto maior o tempo de abertura da válvula do ‘porta amostra’, menor é a velocidade média das partículas, com exceção, da partícula de tamanho 1-1,4mm. Além disso, para uma diferença de pressão de 3 bar, as partículas são mais sensíveis ao tempo de abertura da válvula em relação a uma diferença de pressão de 1 ba.

Palavras-chaves: Siderurgia, PCI, Velocimetria

ABSTRACT

The injection of coal fines into blast furnaces is an essential technology in modern steelmaking, aiming to reduce costs and CO₂ emissions. The complexity of conditions in blast furnaces has encouraged scientists and companies around the world to develop simulator reactors that are capable of simulating regions of interest in the blast furnace, one of which is the combustion zone. Like other research centers and companies, the Steel Laboratory of the Federal University of Rio Grande do Sul (LaSid – UFRGS) assembled a simulator capable of simulating conditions similar to those of the combustion zone, allowing studies in conditions similar to those found in blast furnaces.

After work carried out to improve data acquisition techniques and operation of the LaSid simulator, a new study was developed with the objective of verifying the behavior of particles in the combustion zone of the simulator, using, instead of the resistive furnace, a tube of acrylic so that it was possible to record the passage of particles along this region of the simulator. With the aid of a high-speed camera and particle velocimetry analysis techniques, data was generated. To measure particle speed, a simplified version of the Particle Tracing Velocimetry, PTV, technique was adopted. With the help of software, it was possible to trace the path of the particles along the region of interest, generating position, time and particle speed data.

In this way, it was possible to verify whether the values found in the present work are compatible with those found in the combustion zone of blast furnaces. It was also observed that the particle size did not generate a large difference in the average speed in the central region of the P3 reactor. Also, the longer the 'sample holder' valve opening time, the lower the average speed of the particles, with the exception of particles of size 1-1.4mm. Furthermore, for a pressure difference of 3 bar, the particles are more sensitive to the valve opening time compared to a pressure difference of 1 bar.

Key word: Siderurgical, PCI, Velocimetry

LISTRA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

°C	Temperatura em Celsius
AF	Alto forno
BOF	Basic Oxygen Furnace – Forno de conversão a Oxigênio
C	Carbono
cm	Centímetros
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
DRI	Direction Reduction Iron – Ferro Reduzido Direto
DTF	Drop Tube Furnace – Forno de queda livre
EAF	Electric Arc Furnace – Forno elétrico a arco
H ₂	Gás Hidrogênio
HSI	High-Speed Imaging – Imagem de alta velocidade
LDV	Lase Doppler Velocimetry – Velocimetria de Laser Doppler
m/s	Metros por segundo
mm	Milímetros
ms	Milisegundos
O ₂	Oxigênio
PCI	Pulverized Coal Injection – Injeção de carvão Pulverizado
PIV	Particle Image Velocimetry – Velocimetria de Partícula por Imagem
PTV	Particle Tracker Velocimetry – Velocimetria de Traçar Partícula
t	Tempo
U	Velocidade do fluido
V	Velocidade
U _p	Velocidade de um traçador individual
X	Posição
ZAP	Zona de Alta pressão
ZBP	Zona de Baixa Pressão
Δt	Variação do intervalo de tempo
ΔX	Variação de deslocamento
ΔX_p	Variação de deslocamento de partícula

LISTA DE FIGURAS

Figura 2 - Regiões do Alto-forno. (Adaptado Mourão et al 2007)	5
Figura 3 – Zona de combustão (adaptado Rizzo)	7
Figura 4 – Processo de desvolatilização (adaptado Carpenter et al.2006)	9
Figura 5 Simulador de PCI do LaSid – (Barbieri 2018)	12
Figura 6 - Esquema simulador de PCI (Fragoso 2018)	17
Figura 7 - Configuração do simulador	18
Figura 8 - Aparato experimental	19
Figura 9 - Regiões do tubo com destaque ao centro da resistência elétrica (em amarelo).	20
<hr/>	
Figura 10 – Seções de filmagem e visão ampla do tubo de acrílico	20
Figura 11 – Esquema de calibração da câmera.	21
Figura 12 configuração da análise de vídeo	24
Figura 13 - Modo de exportação do arquivo.	25
Figura 14 - Dados gerados durante a análise com o auxílio do software.	25
Figura 15 – Velocidade média em cada região do tubo para $t_4 = 25$ ms	29
Figura 16 - Velocidade média em cada região do tubo para $t_4 = 50$ ms	30
Figura 17 - Velocidade média em cada região do tubo para $t_4 = 75$ ms	31
Figura 18 - Tempo de residência com ΔP 3bar	32
Figura 19 – Velocidade em cada região do tubo para $t_4=25$	34
Figura 20 - Velocidade em cada região do tubo para $t_4=50$	34
Figura 21 - Velocidade em cada região do tubo para $T_4=75$	35
Figura 22 – Tempo de residência para diferentes tempos de abertura de t_4	36
Figura 23 - Tempo de residência para diferentes tempos de abertura de t_4 . Partícula 1-1,4 mm.	38
Figura 24 - Tempo de residência para diferentes tempos de abertura de t_4 . Partícula 1,4-2 mm.	39
Figura 25 - Tempo de residência para diferentes tempos de abertura de t_4 . Partícula 2-2,4 mm	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização química (imediate) e física do carvão	16
Tabela 2 – Variáveis do ensaio	22
Tabela 3 – Variáveis e níveis de estudo	22
Tabela 4 - Distâncias de filmagem.....	23
Tabela 5- Valores de médias de v (m/s) e t (s) de residência com 3 bar de pressão	28
Tabela 6 - Valores de médias de v e t de residência com 1 bar de pressão.....	33

1 INTRODUÇÃO

A injeção de finos em altos-fornos é atualmente uma tecnologia amplamente difundida na produção de ferro-gusa, e compreender o comportamento carvões de carvões desde as ventaneiras até a chegada na zona de combustão é crucial, especialmente considerando que o coque metalúrgico é um dos componentes mais caros na produção do aço, além de também ser uma técnica que reduz a emissão de gases prejudiciais ao meio ambiente, como o CO₂. (BABICH et Al 2010, POHLMANN et Al 2012). O diferencial significativo dessa técnica é promover a flexibilidade no uso de materiais carbonosos alternativos para a injeção. A zona de combustão do alto-forno é um ambiente bastante severo, que durante a injeção de finos, pode atingir altas pressões (5 bar), temperaturas entre 1250° - 2200°C em um curto tempo de residência (10- 40 ms) e velocidades na ordem de 100 – 200 m/s (HUTNY; LEE; PRICE, 1991; CARPENTER, 2006).

Devido as complexas condições que são encontradas em altos-fornos a realização de testes onde se altera a marcha do forno é desafiadora (CARPENTER, 2006). Isso motivou a criação de equipamentos capazes de simular condições internas do reator. Diversas empresas e instituições de ensino ao redor do mundo desenvolveram reatores para estudar e entender mais as zonas do alto-forno. O Laboratório de Siderurgia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LaSid – UFRGS), foi uma dessas instituições que desenvolveu um equipamento capaz de simular parcialmente as condições da zona de combustão de um alto-forno. Este reator é capaz de operar com parâmetros semelhantes aos encontrados na zona das ventaneiras dos altos-fornos, operando sob alta pressão, altas taxas de aquecimento e um tempo de residência baixo. O LaSid conduziu uma série de trabalhos com o intuito de compreender e aprimorar a metodologia de aquisição de dados e de operação do reator (RECH, 2018; MACHADO, 2017; BARBIERI, 2018; FRAGOSO, 2019.) Tais estudos motivaram a realização de experimentos capazes de observar como as partículas se comportam quando estão dentro do reator, para isso, foi montado um novo setup a fim de visualizar as partículas e mensurar sua velocidade e o tempo de residência no equipamento. Com base nos dados de literatura, é possível comparar e relacionar os valores obtidos nesse trabalho com os parâmetros divulgados na indústria siderúrgica.

Existem diversas técnicas conhecidas no meio científico que utilizam equipamentos capazes de medir e estudar a velocidade do fluxo de partículas e de fluídos em escala laboratorial. Dentre as técnicas utilizadas, existe a *Particle Tracker Velocimetry*, PTV, *Laser*

Doppler Velocimetry, LDV, *Particle tracker Velocimetry*, PIV. Para mensurar a velocidade no presente trabalho foi utilizado uma versão simplificada da velocidade de partículas, flexível e simples devido as diversas formas que se pode montar o setup, posição de câmera, iluminação, e do software/algoritmo de análise das partículas.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem por objetivo avaliar o efeito de diferentes tempos de abertura da válvula do ‘porta amostra’ e da diferença de pressão entre as zona de alta pressão e a zona de baixa pressão do simulador de PCI no tempo de residência e da velocidade média das partículas de carvão na região de combustão do reator.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Verificar se os dados do ensaio estão coerentes aos encontrados na região de combustão do alto-forno;
- Influência do tamanho de partícula na velocidade média em cada uma das quatro regiões do forno de combustão do reator;
- Verificar a influência do tempo de abertura da válvula da porta amostra de carvão na velocidade da partícula;
- Determinação do efeito da variação de parâmetros de operação do simulador (zona de baixa de pressão e tempo de abertura da válvula de porta amostra).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ROTAS DA PRODUÇÃO DO AÇO

A produção de aço é normalmente feita por usinas integradas e usinas semi-integradas. Nas siderúrgicas integradas o aço é obtido a partir de ferro primário (ferro-gusa ou DRI) produzido em altos-fornos ou fornos de redução direta e posterior refino em aciarias BOF ou EAF. Na rota semi-integrada a matéria primeira é a sucata de aço, não sendo necessário ter a etapa de redução do minério, que é processada em fornos elétricos a arco. Mourão et. Al (2007). Além disso, há um grupo de usinas denominadas não integradas, que é onde ocorre apenas uma etapa do processo, processamento (trefila ou laminação) ou redução, que de acordo com o *Instituto Aço Brasil*, tem como objetivo de produção a obtenção do ferro-gusa, mas não do aço.

Os principais insumos para a operação utilizam a prima bruta, carvão, coque metalúrgico para a redução do minério de ferro em um produto chamado ferro-gusa, que é uma mistura de Ferro com um teor de até 5% de carbono, que será manufaturado ao longo da usina até ser transformado para o que conhecemos como aço – liga de Ferro com até 2,11% de Carbono. O alto-forno é um reator que opera com o princípio de fluxo de contracorrente, onde a matéria prima, coque e minério de ferro, são adicionados na parte superior do forno, enquanto os agentes redutores (finos de carvão, materiais carbonosos e/ou gás natural) são adicionados na parte inferior do forno, através de ventaneiras.

Esta é a rota mais utilizada para a produção de aço. Cerca de 71% da produção mundial é realizada através desse processo. No Brasil, esse número chega a 75% via rota AF/BOF (basic oxygen furnace). Além disso, o alto-forno é o maior e mais importante reator químico na indústria siderúrgica.

3.2 O ALTO-FORNO

O alto-forno é um reator que opera com o princípio de fluxo de contracorrente, onde a matéria prima, coque e minério de ferro, são adicionados na parte superior do forno, enquanto os agentes redutores (finos de carvão, materiais carbonosos e/ou gás natural) são adicionados na parte inferior do forno, através de ventaneiras.

Este reator, de acordo com Geerds et al 2009, como um reator com formato tipicamente cônico e possui regiões bem definidas, tais regiões são:

- Goela – onde é realizado o carregamento e distribuição da carga;

- Cuba – formação de carga semifundida que desce lentamente até a parte inferior do forno.
- Ventre – é onde é localizada a zona coesiva do AF, região que há o amolecimento e fusão da carga metálica. Juntamente com a região da Cuba é a maior diâmetro do reator.
- Rampa – a principal função é a sustentação da carga metálica permitindo que ocorra o gotejamento da carga metálica até o cadinho.
- Cadinho – Armazenamento do ferro-gusa e escória líquidos.

As ventaneiras estão localizadas entre o cadinho e a rampa. As regiões do alto-forno podem ser vistas na Figura 1.

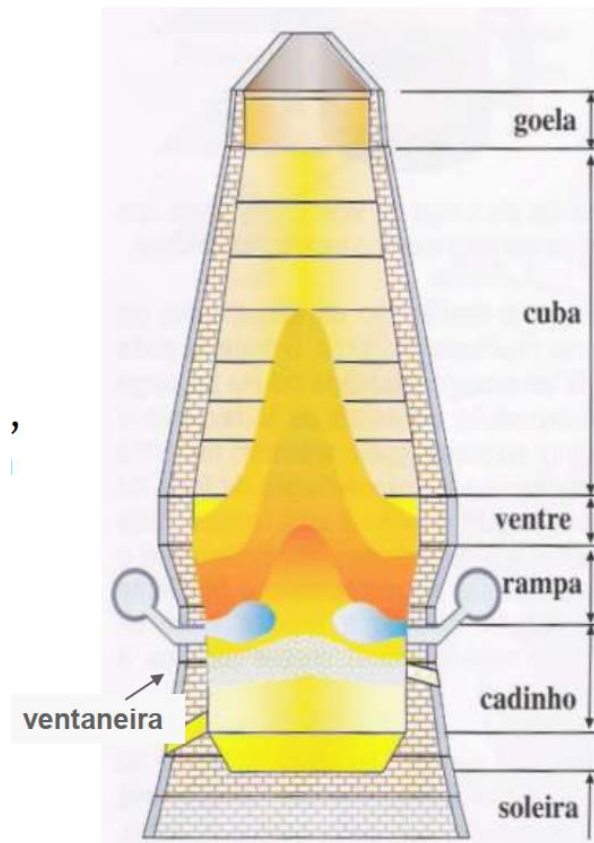


Figura 1 - Regiões do Alto-forno. (Adaptado Mourão et al 2007)

Esta é a rota mais utilizada para a produção de aço. Cerca de 71% da produção mundial é realizada através desse processo. No Brasil, esse número chega a 75% via rota AF/BOF (basic oxygen furnace). Além disso, o alto-forno é o maior e mais importante reator químico na indústria siderúrgica.

3.3 SISTEMA DE INJEÇÃO DO ALTO-FORNO

O sistema de injeção de combustíveis auxiliares no alto-forno, é uma tecnologia patenteada no século XIX, mas somente na década de 1960 foi difundida amplamente na indústria. No Brasil, o PCI foi introduzido nos altos-fornos Usiminas na década de 1990. Hoje o PCI é uma parte fundamental do processo de produção do aço devido a benefícios econômicos e operacionais. De acordo com Carpenter (2006) alguns dos principais benefícios são:

- Diminuição do uso de coque;
- Diminuição de custos
- Aumento do tempo de vida das baterias de coqueificação,
- Aumento da produção de ferro-gusa,
- Flexibilidade de matérias primas utilizadas para a injeção (carvões mais baratos, óleos, gás natural), diminuição de emissões gasosas devido ao menor uso de coque

O sistema de PCI é localizado na parte inferior do reator, como é exemplificado na Figura 3, nesta região é onde se tem as lanças de injeção, que é um tubo de cobre revestido por um cerâmico resistente a alta temperatura onde é injetado o carvão enriquecido ou não com oxigênio. A maioria dos sistemas utiliza carvões com granulometria com 70-80% inferior a $75\mu\text{m}$. A temperatura de sopro é entre 1270 a 1470 K a uma velocidade de 100 a 200 m/s na ventaneira. Na zona de combustão o carvão permanece em torno de 5 milissegundos. É sobre altas taxas de aquecimento, na ordem de 10^5 a 10^6 K/s e tempos de residência de 10 a 40 ms que as partículas de carvão enfrentam quando são injetadas e sofrem uma série de etapas durante o percurso na lança de injeção. Primeiramente, o carvão é aquecido e umidade evapora, em seguida ocorre um pré-aquecimento e a gaseificação dos voláteis, estes entram em combustão e causam o aumento da temperatura. Por fim, o carbono é queimado. (BARBIERI, 2018; GEERDS 2009).

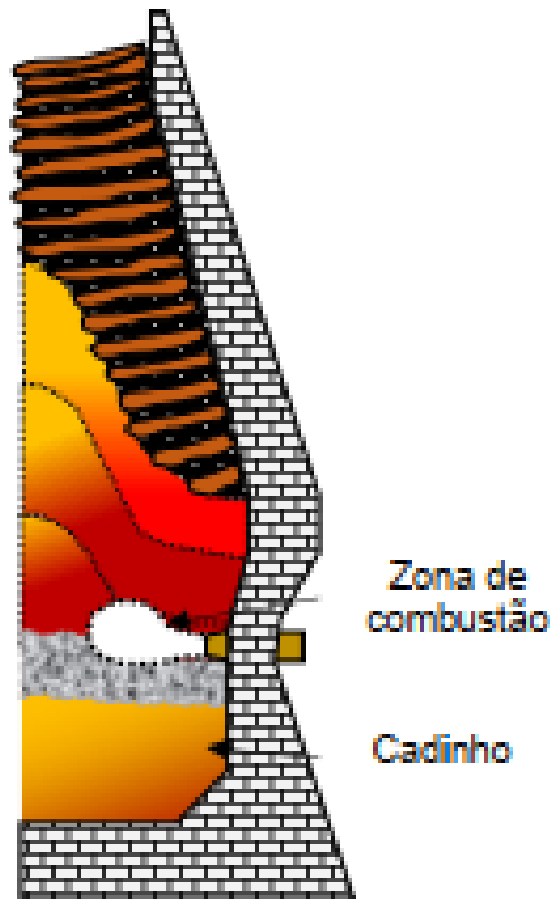


Figura 2 – Zona de combustão (adaptado Rizzo)

Para Deno e Okuno (2000) e Hutny et al. (1996), uma das questões chave operacionais do PCI é como aumentar a taxa de injeção sem ter um aumento excessivo de char dentro da cuba do alto-forno, pois esse material de combustão incompleta pode causar sérios problemas como a redução de permeabilidade, excessiva erosão de coque, distribuição indesejada de gás/temperatura. De acordo com Geerdes et al (2009), para contornar esse problema com o excesso de char, especialmente quando se opera sob altas taxas de injeção, empresas têm instalado diferentes tipos de sistemas de injeção nas ventaneiras tais como:

- lanças coaxiais com fluxo de oxigênio e fluxo de carvão;
- Lança com ponta especial para obter mais turbulência na ponta da lança;
- Uso de duas lanças por ventaneira;
- Pré-aquecimento do carvão.

Além disso, o aumento da taxa de injeção provoca mudanças nas condições de operações do próprio alto-forno, como a redução da temperatura adiabática de chama da zona de combustão, alteração da relação de minério/coque na carga, variação no perfil de temperatura, decréscimo na eficiência de combustão do carvão pulverizado e aumento da queda de pressão na região

inferior do reator. Essas mudanças causam aumento progressivo de taxa de injeção após certo limite, causando redução gradativa de potencial de substituição e o aumento do *fuel rate* (consumo de combustível injetado e de coque em kg de gusa produzido) no processo. (DENO; OKUNO, 2000).

Devido ao ambiente severo que o carvão pulverizado sofre durante a sua operação (temperaturas de 1250 a 2200°C, alta pressão que pode atingir 5 bar) a manutenção da sua eficiência dependerá da qualidade do material. (HUTNY; LEE; PRICE, 1991; CARPENTER, 2006; BÖSENHOFER et al., 2019). O carvão utilizado para injeção, é, geralmente, um carvão mineral que provém de uma mistura de outros carvões de diferentes características químicas, com teores de voláteis distintos, para se chegar a uma mistura de qualidade que irá aumentar a eficiência do processo. Contudo, por ser um sistema de injeção de combustíveis auxiliares, é possível a utilização de carvão vegetal sem perdas na questão de sustentação mecânica da carga no alto forno. A injeção de carvão vegetal diminui a utilização de carvões fosseis, ajudando no combate aos gases estufas, CO₂ (MATHIESON et al., 2011). Também é possível utilizar outras fontes de carbono durante a injeção de materiais auxiliares, alguns estudos sobre a viabilidade de inserção de biomassa e reaproveitamento de outros materiais, como pneus inservíveis, no qual já ocorreu testes e um estudo realizados no LaSid para estudar e investigar a eficiência de combustão desse material, (LIMA, 2020).

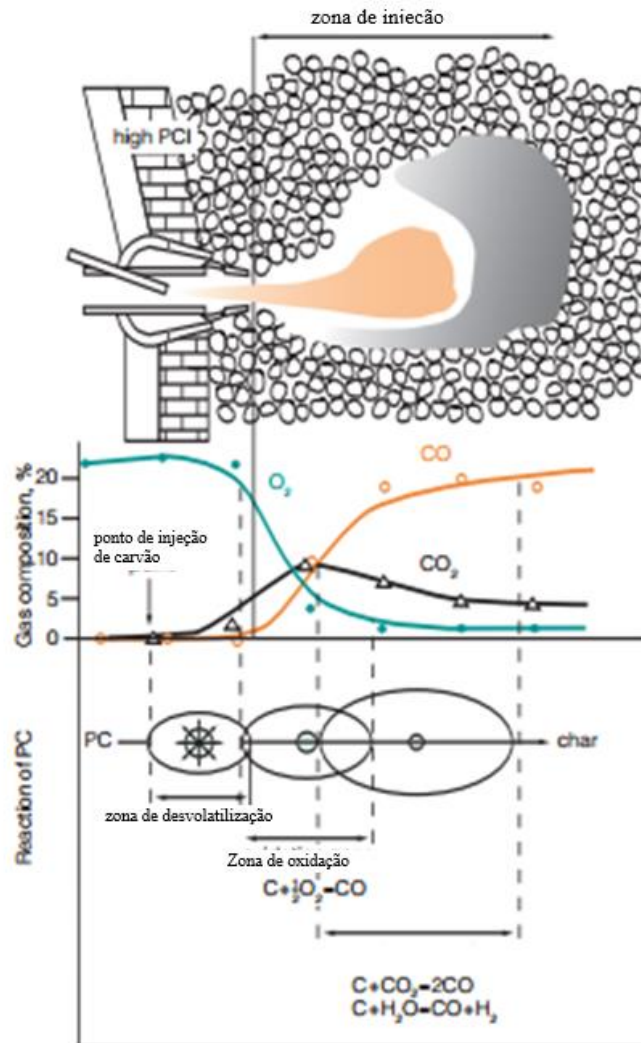
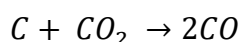


Figura 3 – Processo de desvolatilização (adaptado Carpenter et al.2006)

Na Figura 3, é possível observar como ocorre a desvolatilização do material durante a injeção do material na zona de combustão. Ela tem início na lança de injeção, onde 80-90% da matéria volátil é rapidamente consumido, e os 10-20% restante tem uma lenta liberação de água e CO₂, alcatrão e compostos alifáticos, enquanto a segunda fase tem uma composição majoritária de CO e H₂. A maior parte do oxigênio é consumida próxima a entrada do forno, ao final da ventaneira, enquanto uma atmosfera rica em CO₂ é produzida no meio, e uma atmosfera fica em CO no final do caminho de injeção na zona de combustão injeção. A zona de combustão, também conhecida como “raceway” é uma região anelar parcialmente vazia localizada em frente das ventaneiras onde o coque e o carvão injetado são consumidos pelas reações de combustão, nesse ponto a temperatura é na faixa de 2000-2300°C. Essa região é formada devido a elevada energia cinética do sopro.

O sistema de injeção está localizado na parte inferior do reator. Este sistema pode ser subdividido em três elementos básicos: a unidade de moagem para pulverização do carvão sob faixa granulométrica adequada, unidade de transporte pneumático, que garante uma distribuição constante de carvão e as ventaneiras (CARPENTER, 2006; MOTTA, 2015).

Nesta zona, é onde ocorre a maior intensidade de calor do reator para que seja gerada energia suficiente para desencadear as reações exotérmicas da redução do óxido de ferro pelo coque. Neste processo há uma grande geração de gases CO₂, a taxa de formação de CO aumenta em função da gaseificação do char, que é a reação do carbono presente no char com o CO₂, esta reação é conhecida como reação de Bourduard. (CARPENTER, 2006)



A eficiência da utilização do PCI é geralmente medida em termos da taxa de substituição, ou seja, quantos kg de coque foram economizados com a injeção de carvão pulverizado.

3.4 ESTUDO DA COMBUSTÃO EM SIMULADORES DE PCI

Como mencionado em seções anteriores, fazer adição de novos materiais em altos-fornos é um trabalho bastante complexo com um alto risco e custo, além de ter uma dificuldade de se isolar variáveis no processo para entender se essas modificações estão tendo algum tipo de efeito na operação do reator. Desta forma, não se justifica realizar tais alterações em um reator em operação. Por esta razão, algumas instituições de ensino e empresas viram-se desafiadas a construir equipamentos que fossem possíveis simular a zona de injeção de um alto forno.

Alguns equipamentos como termogravimetria e DTF não operam integralmente sob as condições observadas no alto-forno. Assim, se espera que haja alteração na performance dos materiais em razão das diferentes condições testadas. Foi necessário desenvolver equipamentos que conseguissem simular condições não estáticas que ocorrem no alto-forno.

Alguns são construídos em forma de bancada, outros são construídos em escalas maiores para desenvolver o estudo de forma dinâmica, onde é possível verificar a interação entre o carvão (ou outro material) com fluídos, em diferentes pressões e com uma taxa de aquecimento elevada. Várias instituições de ensino e empresas em diversos países, como Alemanha, Japão, China, Austrália, Canada e Brasil construíram simuladores de PCI para poder estudar a forma como materiais carbonosos se comportam durante a injeção de finos no alto-forno.

A Alemanha é a precursora na construção de simuladores do tipo one-shot para simulação da zona de injeção. O Instituto de Siderurgia da Universidade Técnica de Aachen (IEHK/RWTH), vem desenvolvendo ao longo das últimas 4 décadas vários simuladores de PCI, dentre os simuladores que é possível destacar é o simulador One Shot, a planta piloto de COBESI (Coke Bed Simulator) e o simulador de injeção contínua MIRI (Multifunctional Injection Rig for Ironmaking).

O simulador One Shot foi desenvolvido na década de 80, ele foi construído com objetivo de estudar o efeito das condições de zona de combustão sobre o comportamento dos carvões, além de suas propriedades e da performance (GUDENAU et al., 2000). Na década de 90 por sua vez, o simulador foi modificado a fim de poder estudar a injeção combinada de minério de ferro e finos de carvão, nessa atualização o equipamento foi modificado com a incorporação de um forno de pré-aquecimento posicionado na vertical. Este simulador, foi projetado com duas zonas de pressão, uma de alta pressão e outra de baixa pressão, além disso ele pode submeter amostras sólidas a elevadas taxas de aquecimento e curto tempo de residência (20-30ms).

Assim como diversos outros países, o Brasil também tem empresas e instituições de ensino que viram a necessidade de construir equipamentos que simulassem a zona de combustão de alto-forno. Os locais onde se encontram esses equipamentos são na Companhia Siderúrgica Nacional (CNS) em Volta Redonda no estado do Rio de Janeiro, Usiminas em Ipatinga, Minas Gerais, no Laboratório de Siderurgia da Escola de Minas da universidade federal de ouro preto (UFOP) e na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Os simuladores brasileiros foram baseados no simulador *one-shot* de Aachen.

O projeto do simulador do LaSid – UFRGS, teve como objetivo desenvolver um equipamento que fosse capaz de submeter carvões a condições próximas às encontradas em ventaneiras de alto-forno como elevado grau de automação, onde é possível variar parâmetros operacionais e com um sistema de aquisição de dados robusto, capaz de registrar dados de pressão e temperatura durante a execução do ensaio, permitindo que sejam avaliados fenômenos durante a combustão/pirólise (RECH, 2018). Na Figura 4 é possível observar a imagem do simulador de PCI do LaSid.



Figura 4 - Simulador de PCI do LaSid – (Barbieri 2018)

O desenvolvimento do simulador gerou 3 teses de doutorados relacionadas ao desenvolvimento conceitual do simulador em escala laboratorial para realização de estudos e testes de combustibilidade de carvões utilizados para injeção em condições próximas às encontradas às que ocorrem na zona de combustão dos altos-fornos (RECH, 2018), elaboração e desenvolvimento do sistema de automação/rotina de aquisição de dados em um simulador de PCI em condições semelhantes às encontradas na zona das ventaneiras e de combustão do alto-forno, e que possibilite o estudo dos fenômenos presentes durante a desvolatilização e combustão nos transientes de tempo, temperatura e pressão. (MACHADO, 2017) e uma metodologia de estudo para avaliar a combustibilidade de carvão brasileiro para injeção em altos-fornos empregando um simulador de PCI, onde o carvão brasileiro foi comparado com dois carvões importados de diferentes ranks utilizados para injeção em altos-fornos (BARBIERI, 2018), além de uma dissertação de mestrado relacionada a evolução da metodologia de avaliação da combustibilidade de carvões no simulador de PCI, com base na análise do comportamento de diferentes ranks em termos de *burnout* e de registro da variação da pressão em ensaios de combustão com diferentes concentrações de oxigênio e taxa de injeção (FRAGOSO, 2019.).

3.5 VELOCIMETRIA

O objetivo deste tópico é realizar um breve levantamento das principais técnicas de velocimetria de partículas.

Velocimetria é um campo de estudos que compreende diferentes técnicas não intrusiva para monitorar e mensurar parâmetros de velocidade em fluídos, partículas e outros materiais. Essa é bastante utilizado para observar como se comportam corpos únicos ou “nuvens” de partícula em determinado fluxo. A velocidade pode ser medida em um vetor em uma, duas ou três dimensões. A visualização de fluxo é uma técnica importante para a análise de fluxos de uma ou duas fases em aplicações de engenharia. As técnicas de visualização de fluxo, como *High-Speed Imaging (HSI)*, *Laser Doppler Velocimetry (LDP)*, *Particle Tracking Velocimetry (PTV)* e *Particle Image Velocimetry (PIV)*, utilizam câmeras de alta velocidade, geradores de laser e partículas traçadoras para permitir a observação de fenômenos de fluxo em tubulações, tanques agitados, impulsores de bombas, entre outros. Essas técnicas fornecem dados qualitativos e quantitativos interessantes para o estudo de fluxos de uma ou duas fases em aplicações de engenharia. Durante as últimas décadas com o aumento da tecnologia foram criadas câmeras digitais que vem tendo suas resoluções aumentada com o passar dos anos e de lasers que permitem estimar a velocidade de fluidos a partir de partículas sólidas, (PERISSINOTTO et al, 2021; DRACO, 1996; QUERESI et all, 2020; ABDULAWAHAB et al, 2020).

3.5.1 IMAGEM DE ALTA VELOCIDADE - *High-Speed Imaging (HSI)*

A câmera de alta velocidade é o principal elemento da Imagem de Alta Velocidade (HSI), um método de visualização que consiste em filmar fluxos com o propósito de observar suas características qualitativas. A técnica de *High-Speed Imaging (HSI)* tem resoluções temporais e espaciais excelentes, o que permite a observação de fenômenos transitórios rápidos e pequenas estruturas de fluxo, como gotas e bolhas. No entanto, para funcionar corretamente com fluxos de fase única, é recomendável que câmeras de alta velocidade sejam usadas para filmar fluxos semeados. Na verdade, a adição de partículas traçadoras ao fluxo é vital para garantir a estimativa de dados quantitativos sobre a dinâmica do fluido. Quando o HSI é usado para visualizar fluxos semeados iluminados com fontes de luz comuns, um método PTV pode ser estabelecido Perissinotto et al. (2021).

3.5.2 VELOCIMETRIA DE LASE DOPPLER - *Laser Doppler Velocimetry* (LDV)

A Laser Doppler Velocimetry (LDV), de acordo com Perissinotto et al. (2021), é uma técnica de visualização de fluxo que consiste em iluminar um fluido com dois feixes de laser de comprimento de onda conhecido e ângulo de inclinação em ordem para medir as variações na frequência da luz refletida. A frequência da onda refletida muda proporcionalmente com a velocidade do fluido, permitindo que a velocidade local do fluido seja estimada. A LDV é baseada no fenômeno de que a luz laser é espalhada por cada partícula, permitindo que a velocidade do fluido seja medida.

3.5.3 VELOCIMETRIA DE TRAÇAR PARTÍCULA - *Particle Tracking Velocimetry* (PTV)

O Particle Tracking Velocimetry (PTV) é um método de medição não intrusivo baseado em visualização de fluxo, que determina a velocidade e a trajetória de partículas imersas em um fluido em movimento a partir da estimativa de seu deslocamento durante um período. O objetivo do PTV é determinar a velocidade do fluido (U) a partir da velocidade de um traçador individual (U_p), que depende de seu deslocamento (ΔX_p) e do intervalo de tempo (Δt). Tanto Δt quanto ΔX_p são obtidos a partir de imagens de fluxo capturadas pela câmera de alta velocidade. O primeiro é uma função da taxa de aquisição, que define o intervalo de tempo entre duas imagens consecutivas. O último é medido nas imagens contando o número de pixels que correspondem ao deslocamento do traçador. Assim, é necessária uma calibração para converter os elementos da imagem (pixels) em unidades de comprimento (por exemplo, milímetros). A técnica de visualização de partículas (PTV) é usada para rastrear partículas em imagens de fluxo com uma abordagem Lagrangiana. A concentração de traçadores é baixa o suficiente para que uma partícula seja rastreada individualmente nas imagens de fluxo. No entanto, uma grande população de partículas individuais deve ser rastreada para garantir resultados estatisticamente válidos. Isso pode aumentar o tempo necessário para processar as imagens. Uma abordagem Euleriana pode ser adotada, na qual grupos de partículas são seguidos em um volume específico de fluido. (PERISSINOTTO et al, 2021; QUERESI et al, 2020).

3.5.4 VELOCIDADE DE PARTÍCULA POR IMAGEM - *Particle Image Velocimetry* (PIV)

Velocimetria de Partícula por Imagem (PIV), é uma técnica de diagnóstico de fluxo baseada em imagens que depende do uso de fluidos que possuem pequenas partículas traçadoras

e da detecção dos movimentos dessas partículas para derivar as velocidades do fluido. Para realizar a medição as partículas traçadoras são iluminadas externamente por uma fonte de laser normalmente produzida por um gerador de laser pulsado. Uma câmera digital é colocada perpendicularmente a fonte de laser para registrar a posição de um grupo de partículas (X) em instantes consecutivos de tempo (t). Em seguida, para um intervalo de tempo conhecido (Δt), algoritmos determinam o deslocamento dessas partículas (ΔX) e, conseqüentemente, fornecem um vetor que representa a velocidade local do fluido (U): $U = \Delta X (X, t) / \Delta t$. Assume-se que as partículas traçadoras se movem com a mesma velocidade dos fluidos locais ao deduzir a velocidade do fluido de trabalho. A técnica ajuda a produzir visualizações quantitativas dos padrões de fluxo instantâneos, que geralmente são usados para apoiar a validação de simulações numéricas ou o desenvolvimento de modelos fenomenológicos relacionados a fluxos complexos. No entanto, devido à complexa relação existente entre os parâmetros experimentais e os erros de medição, a quantificação da incerteza da PIV não é considerada uma tarefa trivial, que geralmente depende de considerações subjetivas. (PERISSINOTTO et al, 2021; QUERESI et all, 2020)

A semelhança entre PIV e PTV é notável. No entanto, a diferença chave entre eles está relacionada ao número de traçadores registrados nas imagens de fluxo e ao algoritmo para calcular as velocidades do fluxo. Por um lado, quando o número de partículas é baixo, é possível monitorar seu movimento individual, então o PTV é usado. Por outro lado, quando o número de partículas é alto, é muito difícil identificar seu movimento individual e, como resultado, deve-se medir o deslocamento médio de grupos de traçadores usando métodos estatísticos. Nesse caso, é usada uma abordagem PIV, (DRACOS, 1996; QUERESI et all, 2020; PERISSINOTTO et all, 2021).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO

O carvão utilizado para a realização destes experimentos foi um baixo volátil tipicamente utilizado em PCI, sob uma faixa granulométrica de 1 a 1,4 mm, 1,4 a 2 mm e 2 a 2,36 mm. A caracterização química do material é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1 – Análise imediata

Material	U%	MV%	CZ%	CF%
BV	2,60	15,40	10,60	74,00

U% = Umidade; MV% = Matéria Volátil; CZ% = Cinzas; CF% = Carbono Fixo.

4.2 MÉTODO DE ANÁLISE DE VELOCIMETRIA

Conforme detalhado anteriormente, é relevante ressaltar que, embora as técnicas PIV e PTV apresentem semelhanças, quando lidamos com um número reduzido de partículas, a PTV se revela mais apropriada, como destacado neste trabalho. O método adotado para medir a velocidade das partículas neste trabalho consistiu em uma versão simplificada da técnica de método de velocimetria, algo próximo ao encontrado em PTV. Essa escolha foi feita, considerando as condições do experimento realizado no LaSid e os recursos disponíveis para a realização destes testes. Para este trabalho, foram implementadas algumas simplificações para se ajustar ao equipamento. Neste contexto, a técnica simplificada atendeu aos requisitos necessários para a visualização das partículas, especialmente devido ao tamanho bem definido dessas partículas, sendo possível a observação das partículas ao longo do tubo de acrílico, que foi utilizado para representar a zona de combustão do simulador.

4.3 MÉTODO DE ANÁLISE DA VELOCIMETRIA NO SIMULADOR FÍSICO DA ZONA DE COMBUSTÃO

A Figura 5 mostra um diagrama esquemático do simulado de PCI do LaSid, onde é apresentada as principais válvulas e sensores, além de identificar onde está localizada as zonas de alta e baixa pressão. O porta amostra é localizado na parte superior do reator dentro da zona de baixa pressão. O simulador quando operado a quente, possui três fornos resistivos, o principal – que foi substituído pelo tubo de acrílico neste trabalho – o de pré-aquecimento e uma fita térmica.

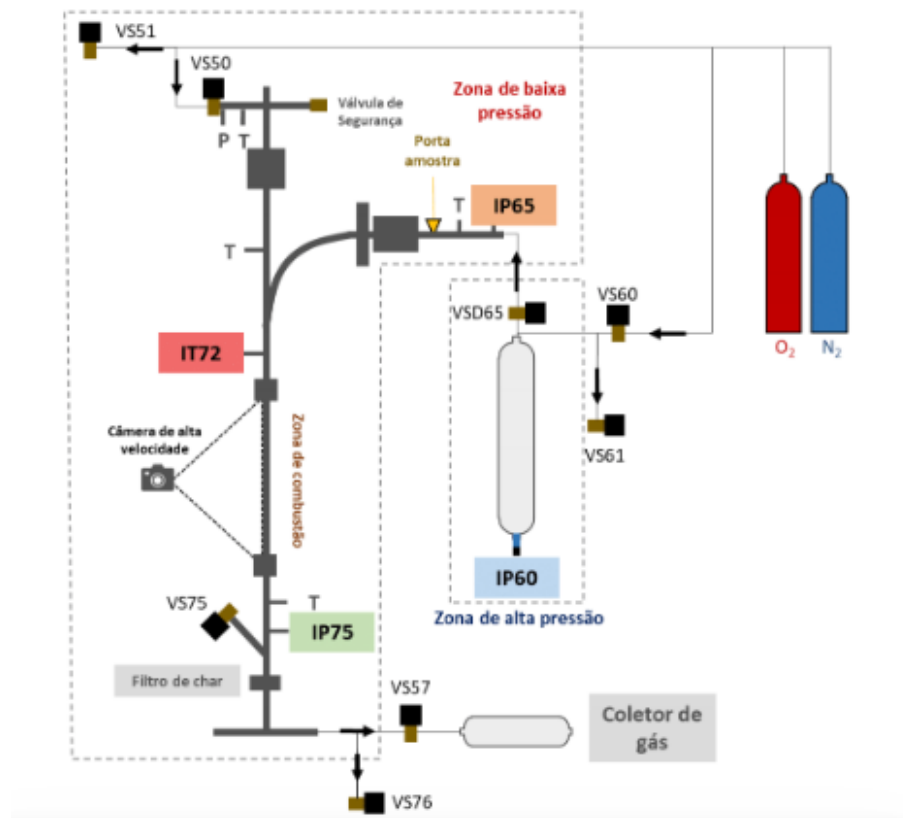


Figura 5 – Diagrama do simulador de PCI (Fragoso 2018)

Antes de iniciar o ensaio, o simulador é configurado com o tempo de abertura da válvula pré-definido (t_4) e a amostra é condicionada no equipamento, na região de baixa pressão em um local chamado ‘porta-amostra’. Em seguida, as duas zonas são pressurizadas de forma independente. A ZAP e ZBP são pressurizadas até 4.1 bar. Após a pressurização, a válvula VS76 é aberta de modo que a pressão na ZBP caia de forma controlada até a pressão de teste para um valor definido pelo usuário. Ao atingir a pressão experimental na ZBP, a válvula VS76 é fechada e a válvula que separa as duas zonas, VSD65, é aberta por um determinado tempo, de modo que em razão da diferença de pressão nas duas zonas a amostra é arrastada da ZBP até ser retido no filtro de char. Durante o ensaio os sensores de pressão ZBP e da ZAP, registram as variações de pressão no interior do reator em função do tempo. Na ZBP há dois indicadores de pressão, IP65 e IP75. O primeiro é localizado na parte superior do reator, próximo ao ‘porta amostras’, este sensor tem por objetivo detectar a pressão pré-programada para que ocorra a ignição da amostra para percorrer o equipamento. A IP75, por sua vez, fica localizada na parte inferior do reator, próximo ao coletor de char. Na ZAP, está localizado o indicador de pressão IP60, que faz a medição da pressurização do sistema, está é a principal válvula do simulador.

O simulador de PCI do LaSid está localizado no Laboratório de Siderurgia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

A capacidade dos registros a cada 4 ms. A tela de configuração pode ser visualizada na Figura 6.

Preparação da Amostra e Ensaio - Setup

Limpeza do Simulador :		Ensaio de Pirólise/Combustão :		Ensaio One Shoot :	
SP CFM21 (O2) - Pulso :	25,0 LPM	SP CFM20 (N2) - Purga :	25,0 LPM	Tempo01 - SHOOT :	0,2 s
SP IP60 - Pressurização - Pulso :	2,00 bar	SP CFM21 (O2) - Purga :	25,0 LPM	Tempo02 - SHOOT :	30000 ms
Tempo de Despressurização Pulso :	1 s	SP IP80 Pressurização - Purga :	0,50 bar	SP Pressão IP75 - SHOOT :	SP_IP75
Número de Repetições Pulso :	1	SP IP80 Despressurização - Purga :	0,10 bar	SP Pressão Aquisição Rápida :	SP_aq_rap
SP IP75 - Queda de pressão - PB - PC :	1,90 bar	SP IP80 Vácuo 01 - Vácuo :	-0,90 bar	Tempo03 - SHOOT :	0 ms
SP CFM21 (O2) - Limpeza VE :	25,0 LPM	Número de Purgas :	3	Tempo04 - SHOOT :	t4
Tempo 01 - Limpeza VE :	5 s	SP IP65 Vácuo 02 - Vácuo :	0,20 bar	Tempo05 - SHOOT :	2000 ms
SP IP65 - Pressurização - PB :	0,50 bar	SP IP80 Vácuo 03 - Vácuo :	0,00 bar	SP CMF20 (N2) - Char :	15,00 LPM
SP CFM21 (O2) - Limpeza PB :	25,0 LPM	SP CMF20 (N2) - PA :	25,0 LPM	Tempo01 - Char :	2200 ms
Tempo 01 -Limpeza PB :	1 s	SP CFM21 (O2) - PA :	25,0 LPM	Tempo02 - Char :	10 s
Tempo 02 -Limpeza PB :	1 s	SP IP60 - PA :	3,10 bar	SP IP 80 Pressurização - AG :	0,00 bar
Tempo03 - Limpeza PB :	1 s	SP CMF20 (N2) - PB (Lenta) :	20,0 LPM	SP IP 75 Despressurização - FCA :	0,30 bar
SP Despressurização IP75 - Char :	0,01 bar	SP CMF21 (O2) - PB (Lenta) :	20,0 LPM		
SP CFM21 - Limpeza Char :	25,0 LPM	SP IP65 - PB (Lenta) :	3,10 bar		
Tempo Purga - Char :	10 s	Rampa Vazão - PB (Lenta) :	60 s		

Figura 6 - Configuração do simulador para ensaio.

4.4 CÂMERA DE ALTA VELOCIDADE

Para a captura das imagens das partículas foi utilizado uma câmera de alta velocidade da marca *Fastec Imaging* modelo IL3-100-L com resolução máxima de 800 x 600 com capacidade de registrar imagens a 1250 quadros por segundo.

4.5 APARATO EXPERIMENTAL DE FILMAGEM

A câmera é posicionada em frente ao tubo de acrílico e a sua altura é regulada conforme a posição do tubo que se deseja filmar. O aparato experimental pode ser visto na Figura 7.



Figura 7 - Aparato experimental

O tubo de acrílico é composto por 12 marcações equidistantes com um espaçamento de 5 cm entre cada uma, sendo 10 pretas e duas em amarelo, uma marcação vermelha e duas marcações na coloração verde (Figura 8a). A marcação de referência está em destaque na cor vermelha, e indica o centro da região das resistências do forno de combustão (Figura 8b). As marcações em amarelo sinalizam para a seção central das resistências do forno de combustão e estão cada um a 2,5 cm da marcação referência e sob uma distância de 5 cm entre si. A região das resistências do forno de combustão apresenta um comprimento de 266 mm e são indicadas pelas marcações em verde.

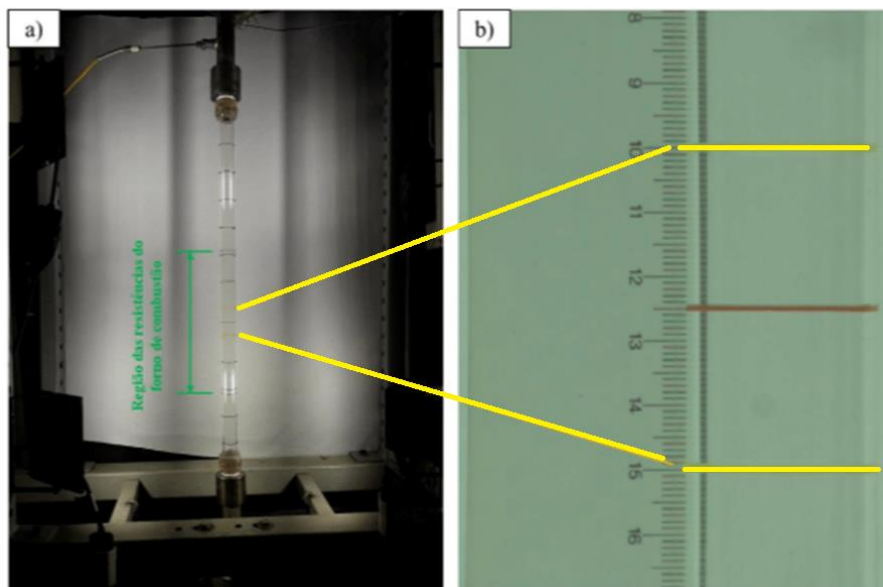


Figura 8 - Regiões do tubo com destaque ao centro da resistência elétrica (em amarelo).

Devido às limitações de resolução das imagens na filmagem integral do tubo de acrílico, optou-se por dividir as seções de filmagem em 4 posições sendo cada posição correspondente a filmagem de 20 cm do tubo de acrílico (Figura 9). Cada posição é subdividida por 4 marcações principais sob uma distância de 5 cm entre si e em três seções, indicadas pelas letras do alfabeto de (a-k). A posição 2 sobrepõe a posição 1 na seção c.

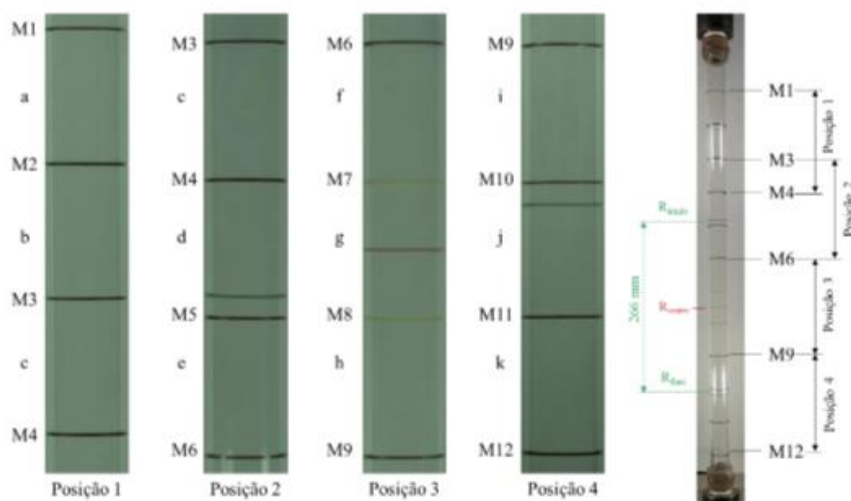


Figura 9 – Seções de filmagem e visão ampla do tubo de acrílico

Para o ajuste do foco da imagem, uma lapiseira técnica com exposição do grafite de 0,5 mm, conforme esquema, e o foco é ajustado para que seja possível registrar o grafite 0.5 mm de diâmetro situado na ponta da lapiseira (Figura 10). Essa espessura é de 50% inferior a mínima granulometria do carvão utilizada (1 -1,4 mm).

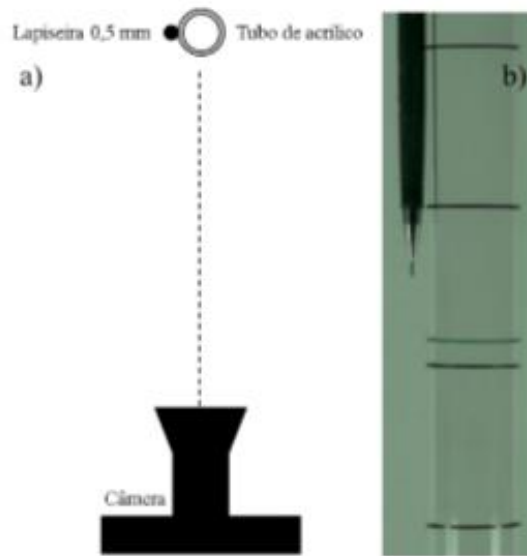


Figura 10 – Esquema de calibração da câmera.

4.6 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

A metodologia utilizada para análise dos dados foi compilar o conjunto de dados obtidos nos testes do simulador de PCI em cada uma das diferenças de pressões que foram testadas no simulador no sensor IP75: 0,1, e 2,1. Essa informação é a diferença de pressão entre a ZBP quando a válvula que separa as duas regiões é aberta. Tendo essa diferença variável, é feita uma análise da velocidade média das partículas para cada posição do tubo em sua granulometria e com o valor do tempo de abertura da válvula t_4 fixo, 25, 50 e 75 ms. Em todos os testes foram escolhidas ao acaso 5 partículas para serem alocadas na porta amostra. A média das velocidades foram feitas de acordo com o número de partículas que passou pela câmera de filmagem.

Na tabela 2 são encontrados as variáveis fixas e os valores durante o ensaio no simulador de PCI.

Tabela 2 – Variáveis do ensaio

Variáveis Fixas	Valores
Concentração de O ₂	100%
Temperatura da ZAP	25°C
Temperatura da ZBP	Ambiente
Configuração da ZBP	Válvula VS77 Fechada
P _{ZAP} (bar)	3,1
Tipo de amostra	Carvão Mineral
Número de partículas	5

As variáveis e níveis de estudo com a amostra de carvão mineral estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3 – Variáveis e níveis de estudo

Variáveis	Nº de níveis	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4
P _{ZBP} manométrica (bar)	3	0,1	1,1	2,1	NA
Δt_4 VSD65 (ms)	3	25	50	75	NA
Faixa granulométrica	3	2,36 - 2	2 - 1,4	1,4 - 1	NA
Posição da filmagem	4	1	2	3	4
Repetições	3	NA	NA	NA	NA
Nº Ensaios	324	NA	NA	NA	NA

4.7 EXTRAÇÃO DOS DADOS DA CÂMERA DE ALTA VELOCIDADE

Com base na análise das imagens dos ensaios coletadas a partir da câmera de alta velocidade serão extraídos o identificador do ensaio (ID), o número da partícula analisada (1-5) e o frame (quadro) quando a partícula atinge uma dada marcação do tubo de acrílico bem como o tempo em que o frame é registrado.

O software *Tracker Video Analysis and Modeling Tool* foi utilizado coletar a velocidade das partículas em cada seção do tubo bem como o seu respectivo tempo de residência. O software é configurado para que os pontos de cada partícula registrada ao longo do tubo tenham um intervalo de 5 frames com uma taxa de 8 ms por frame. As regiões têm uma demarcação em y de acordo com a posição de filmagem, separadas por 15 cm entre o início e o fim.

4.8 CONFIGURAÇÃO DO SOFTWARE

1. Selecionar o vídeo;
2. A configuração do software inicia pela calibração dos pontos X e Y, sendo o ponto x sempre zero devido ao ensaio ser realizado na vertical. Y é calibrado de acordo com o ensaio. Na tabela 4, é mostrado a distância entre o início e o fim de cada posição de filmagem:

Tabela 4 - Distâncias de filmagem

Posição de filmagem	X ₁ , X ₂	Y ₁ (cm)	Y ₂ (cm)
1	0	0	15
2	0	10	25
3	0	25	40
4	0	40	55

3. Na Figura 11 é mostrado como o ajuste do vídeo é realizado, foi configurado para que o tamanho do intervalo entre quadros seja 5 frames e com taxa de 8ms;

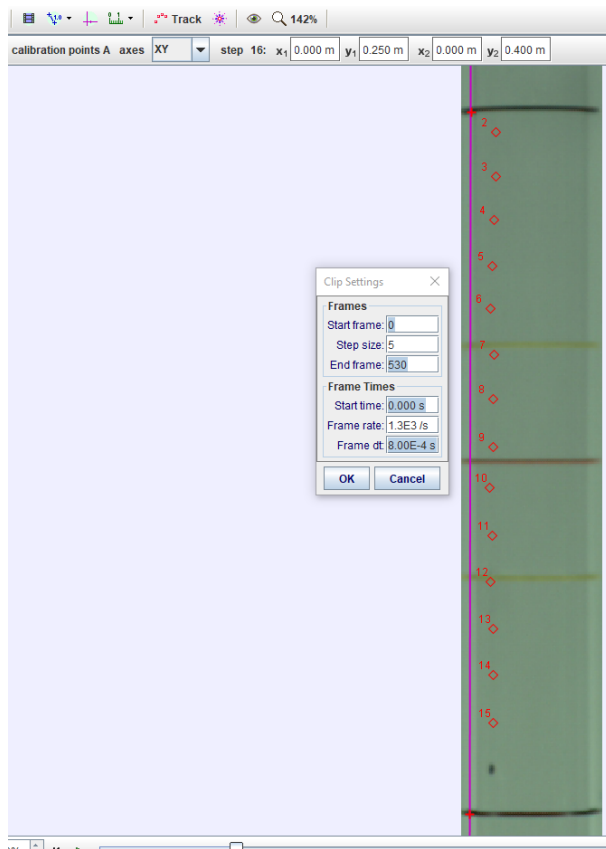


Figura 11 configuração da análise de vídeo

4. Adicionar “pontos de massa”, que é o como são chamados cada uma das 5 (A à E) partículas que foram adicionadas na porta amostra, nem todas as partículas aparecem no vídeo, como já explicado em outras seções. Ao definir um nome para o ponto de massa, é possível traçar o caminho que ele percorre pelo tubo de acrílico.
5. Por fim, os dados são exportados com as variáveis de interesse, como é possível observar na Figura 12. Para este trabalho as variáveis extraídas foram: t (tempo), v (velocidade), x (posição x), y (posição y), v_x (velocidade no vetor x), v_y (velocidade no vetor y).

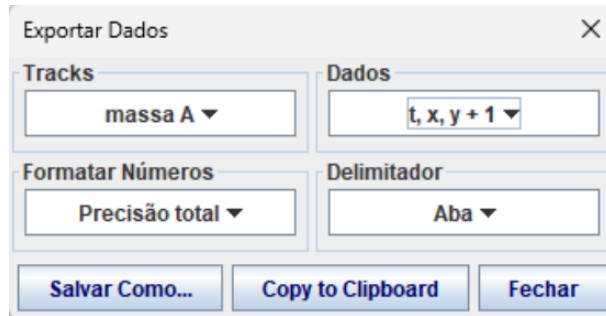


Figura 12 - Modo de exportação do arquivo.

Os dados são armazenados em formas de tabelas, onde as linhas são os pontos de marcados e as colunas são os dados, a Figura 13 exemplifica como é apresentado no software.

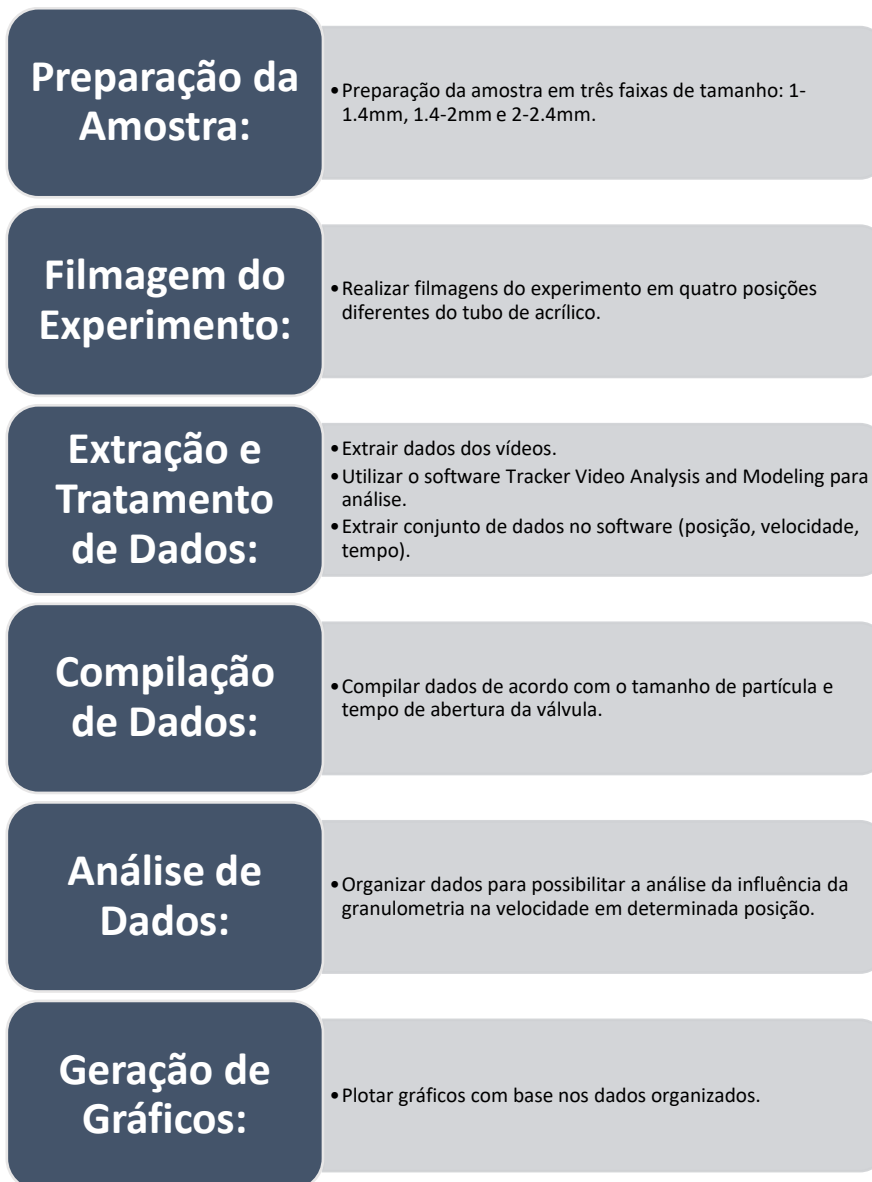
t (s)	x (m)	y (m)	v_x (m/s)	v_y (m/s)	v (m/s)
0,152	4,980E-3	9,718E-2			
0,156	4,721E-3	0,105	5,360E-2	1,826	1,827
0,160	5,409E-3	0,112	0,134	1,905	1,909
0,164	5,789E-3	0,120	5,542E-2	2,064	2,065
0,168	5,852E-3	0,128	2,568E-2	1,947	1,947
0,172	5,995E-3	0,136	6,638E-2	1,897	1,899
0,176	6,383E-3	0,143	2,904E-2	2,006	2,006
0,180	6,227E-3	0,152	3,220E-2	1,972	1,973
0,184	6,641E-3	0,159	8,904E-2	1,933	1,935
0,188	6,939E-3	0,167	7,356E-2	2,012	2,013
0,192	7,229E-3	0,175	4,710E-2	2,051	2,051
0,196	7,316E-3	0,184	-0,272	1,821	1,842
0,200	5,051E-3	0,190	-0,196	1,870	1,880
0,204	5,752E-3	0,198	0,495	2,418	2,468
0,208	9,010E-3	0,209	0,255	2,142	2,157
0,212	7,788E-3	0,216	-5,854E-2	1,881	1,882
0,216	8,541E-3	0,224	0,195	2,181	2,189
0,220	9,350E-3	0,233	0,201	2,238	2,247
0,224	1,015E-2	0,242			

Figura 13 - Dados gerados durante a análise com o auxílio do software.

4.9 METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS RESULTADOS

A partir dos dados gerados pelo software, foi compilado os dados em planilhas eletrônicas a fim de realizar a plotagem de gráficos para visualizar o tempo e a velocidade que cada grupo de níveis com suas variáveis de estudos. Na seção subsequente os resultados encontrados são mostrados e discutidos

A metodologia utilizada para analisar os dados é descrita no fluxograma abaixo.



- Preparação da amostra em granulometria - 1-1.4, 1.4-2 e 2-2,4mm;
- Filmagem do experimento em quatro diferentes posições para visualizar cada área do tubo de acrílico;
- Extração e tratamento de dados – Após extração dos vídeos, ele foi tratado utilizando o software *Tracker Video Analysis and Modeling* para mensurar cada ponto da partícula e obter posição e velocidade nos pontos. Após utilizar, o vídeo, o conjunto de dados são mostrados pelo software, (posição, velocidade, tempo). Os dados são compilados de acordo com o tamanho de partícula e tempo de abertura da válvula. Com os dados organizados é possível plotar os gráficos

de acordo com a influência da granulometria na velocidade em determinada posição.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos são mostrados nas próximas sessões do texto, exemplificando as mudanças de velocidade e tempo de residência no simulador de PCI do LaSid.

5.1 INFLUÊNCIA NA VELOCIDADE E TEMPO DE RESIDÊNCIA ΔP 3 bar

Nas seções 5.1.1 e 5.1.2 são mostrados os resultados obtidos para a maior diferença de pressão, 3 bar, entre as zonas do simulador.

5.1.1 ANÁLISE DA VELOCIDADE MÉDIA DAS PARTÍCULAS

Na Tabela 5, são mostrados os valores das médias da velocidade das partículas para cada faixa granulométrica, tempo de permanência na região do tubo e para cada valor de tempo de abertura da válvula nas posições do tubo. A posição vai de 1 a 4, representadas por p1, p2, p3 e p4. A região p3, é a posição onde se encontra a resistência central do simulador de PCI do LaSid.

Tabela 5- Valores de médias de v (m/s) e t (s) de residência com 3 bar de pressão

Partícula 1-1,4 mm						
	T4=25	Tempo de residência	T4=50	Tempo de residência	T4=75	Tempo de residência
P1	1,633	0,163	1,774	0,135	1,796	0,182
P2	2,028	0,210	2,044	0,205	2,123	0,198
P3	2,766	0,161	2,698	0,151	2,353	0,130
P4	2,814	0,369	2,800	0,120	2,712	0,162
Partícula 1,4-2 mm						
	T4=25	Tempo de residência	T4=50	Tempo de residência	T4=75	Tempo de residência
P1	1,980	0,203	2,056	0,161	2,199	0,160
P2	2,124	0,313	1,994	0,204	2,555	0,204
P3	2,200	0,097	2,369	0,181	2,329	0,181
P4	2,431	0,224	2,527	0,113	2,337	0,113
Partícula 2-2,4 mm						
	T4=25	Tempo de residência	T4=50	Tempo de residência	T4=75	Tempo de residência
P1	1,706	0,132	1,463	0,176	1,900	0,222
P2	3,777	0,315	2,058	0,186	2,071	0,161
P3	2,536	0,179	2,366	0,203	2,302	0,183
P4	2,890	0,128	2,825	0,112	2,780	0,209

Com a variação de tempo de abertura de válvula t_4 , é possível analisar como as partículas de diferentes granulometrias se comportam para a maior diferença de pressão entre a ZBP (IP-65/IP-75) e ZAP (IP-60), ou seja, diferença de pressão igual a 3 bar. Na Figura 14 é possível observar que, a partícula de menor granulometria, com tamanho entre 1-1,4 mm, manteve uma velocidade média crescente ao longo do tubo, tendo sua velocidade máxima quando chega à região 4, com 2,8 m/s. Na região onde há a resistência central do simulador, P3, essa partícula se comporta com uma velocidade de 2,7 m/s. Ao aumentar a granulometria, observar-se que partículas mais grosseiras, apresenta na primeira região do simulador, velocidade semelhante à de menor partícula. Isso pode ser atribuído às interações dessas partículas mais grossas com as áreas de quinas e paredes da tubulação do reator. A partícula de tamanho intermediário, 1,4-2mm, por sua vez, tem uma velocidade maior na primeira região do tubo. As partículas extremas, maior e menor, tiveram uma variação de velocidade de aproximadamente 42% entre o início e o final do percurso. Contudo, ao longo do caminho, tais partículas exibem velocidade diferente.

A partícula de tamanho intermediário, apresenta um aumento gradual da sua velocidade com a evolução do caminho para as outras regiões, mas não tendo uma diferença entre o início e fim de percurso, a variação foi de 17% e entre a região 3 e 4 acabam tendo uma atingindo velocidade próxima a 2,2 m/s. À medida que o tamanho das partículas aumenta, a velocidade também aumenta gradualmente, mas discretamente. Na região de interesse do reator, embora a variação de velocidade entre essas duas faixas de granulometria não seja muito expressiva, é evidente que a partícula menor tem uma velocidade maior que as outras e a partícula intermediária tem a menor velocidade.

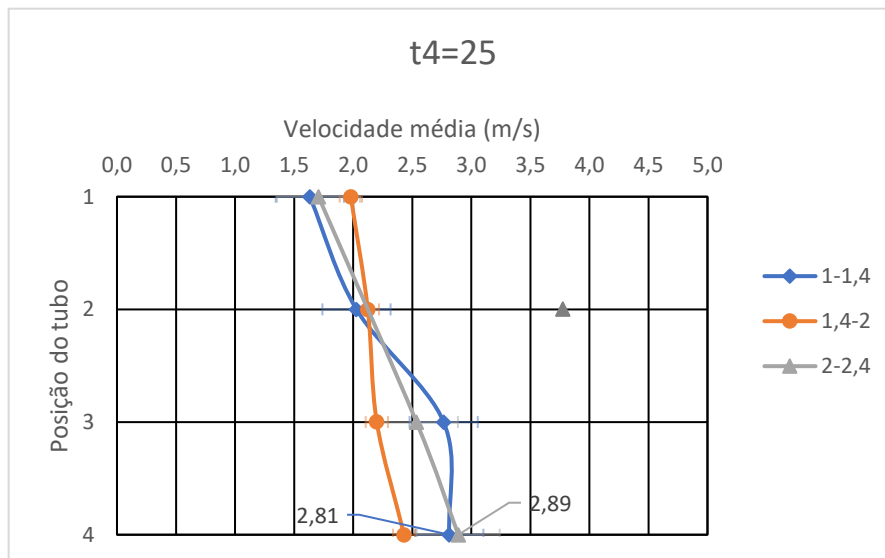


Figura 14 – Velocidade média em cada região do tubo para $t_4 = 25$ ms

Entretanto, na região 2, ainda observando a Figura 14, um ponto mais distante que pode ter sido influenciado pelas condições do ensaio. Novos testes são necessários para validar a precisão desse ponto específico.

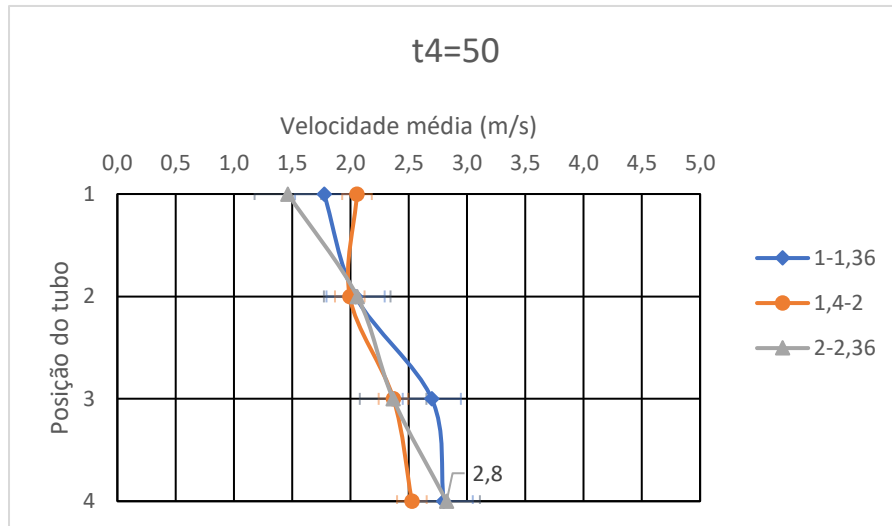


Figura 15 - Velocidade média em cada região do tubo para $t_4 = 50$ ms

Ao aumentar o tempo de abertura da válvula para 50 ms, conforme é mostrado na Figura 15, observamos que as partículas tanto de maior como de menor tamanho apresentam velocidade semelhante na posição 2. Na de interesse, as partículas mais grosseiras têm a mesma velocidade, enquanto a partícula de menor de tamanho, está 12% mais rápida. Essa velocidade semelhante pode ser do fato de a partir de um certo instante a partícula de carvão começa a ter sua velocidade média governada pela velocidade da gravidade, sem uma influência do gás injetado em conjunto com o carvão e da diferença de pressão entre as zonas do simulador. Além disso, a velocidade da maior e menor partículas no ponto final foi idêntica, 2,8 m/s.

Com o tempo de abertura de válvula maior, ilustrado na Figura 16, percebe-se que a partícula menor e a mais grossa mantiveram um avanço de velocidade constante e idêntico ao longo do tubo, enquanto a intermediária experimentou um decréscimo de velocidade ao longo do tubo. Na região 3 do tubo, as velocidades das três partículas foram idênticas, com um valor de 2,3 m/s. Isso evidencia que, na região central da resistência, para um tempo de abertura maior de válvula, a granulometria não é uma variável que influencia na velocidade da partícula, uma vez que todas as três faixas atingiram essa região com uma velocidade média igual.

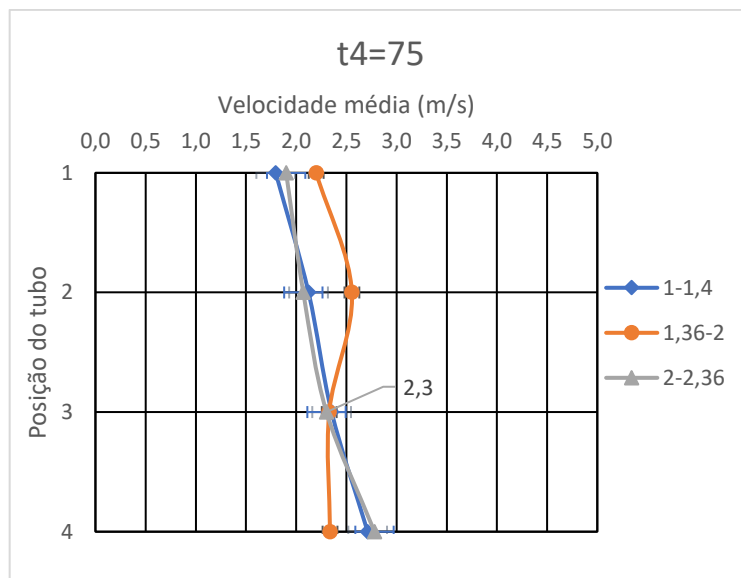


Figura 16 - Velocidade média em cada região do tubo para $t_4 = 75$ ms

5.1.2 ANÁLISE DO TEMPO DE RESIDÊNCIA DAS PARTÍCULAS

Outro aspecto digno de atenção refere-se ao tempo que as partículas permaneceram em cada região do tubo. Na Figura 17, observamos o comportamento e o tempo que cada partícula levou para percorrer os 15 centímetros que separam cada marcação no tubo. Nota-se que, com a partícula de menor tamanho e menores tempos de abertura da válvula, ocorre uma variação mais pronunciada no tempo de permanência em cada posição do tubo. Por outro lado, para tempos de abertura da válvula mais prolongados, observa-se uma tendência linear ao longo do percurso.

É interessante notar que a partícula de tamanho maior exibiu uma dispersão menor entre os tempos de permanência em cada região do tubo. Isso pode estar relacionado ao seu maior raio e densidade, conferindo-lhe uma estabilidade superior. Além disso, na última fase do tubo, a partícula menor, com o menor tempo de abertura da válvula, levou mais tempo para percorrer o último quarto do equipamento. Esses padrões sugerem nuances intrigantes no comportamento

das partículas em relação ao tamanho, tempo de abertura da válvula e posição no tubo, proporcionando insights valiosos para a compreensão do sistema.

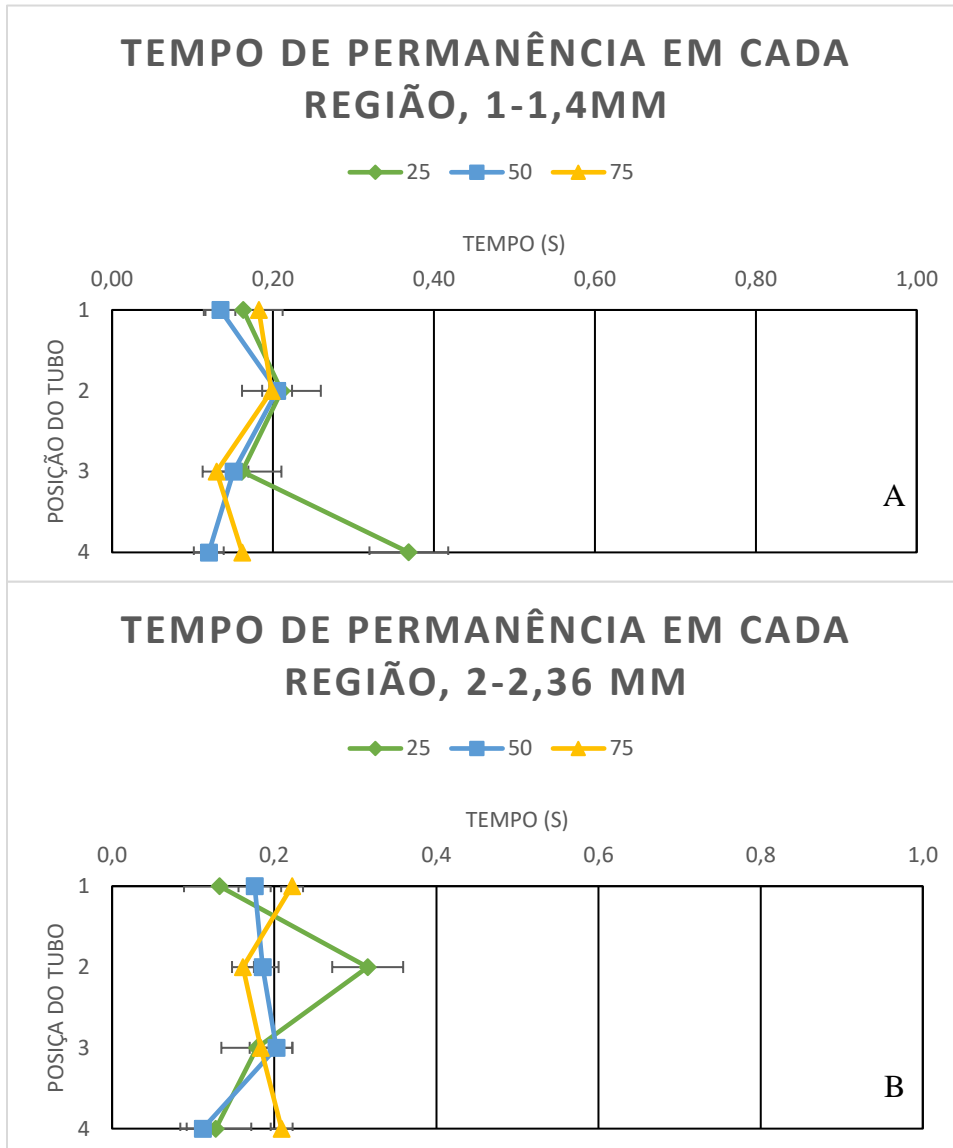


Figura 17 - Tempo de residência com ΔP 3bar

Na figura 17, ainda, é observado que para valores de tempo de abertura de válvula de 25ms, as partículas maiores permanecem cerca de 6% a mais na região 1 do tubo. Já na região 2, devido a variáveis não controláveis, a partícula maior apresenta um tempo de residência 50% maior nesta região, no entanto é necessário estudos mais aprofundados para verificar se está discrepância é um ruído do experimento ou se representa um fenômeno consistente. Entretanto, na parte final, ambas partículas levam o mesmo tempo para percorrer a região 4.

Para o tempo de abertura maior de válvula, observamos que na região 1, a partícula maior permanece por um tempo 8% maior em relação a outra partícula. Essas análises de tempo de

residência ressaltam as variações significativas nos tempos de permanência das partículas em diferentes regiões do tubo, destacando a importância de investigações mais aprofundadas para compreender as nuances dessas diferenças.

5.2 INFLUÊNCIA NA VELOCIDADE E TEMPO DE RESIDÊNCIA COM ΔP DE 1 bar

Nas seções 5.2.1 e 5.2.2 são mostrados os resultados obtidos para a menor diferença de pressão, 1 bar, entre as zonas do simulador.

5.2.1 ANÁLISE DA VELOCIDADE MÉDIA DAS PARTÍCULAS EM 1 bar

Com a menor variação diferença de pressão em a ZBP e a ZAP, 1 bar. Os resultados obtidos com estes testes são explicitados na Tabela 5.

Tabela 6 - Valores de médias de v e t de residência com 1 bar de pressão

Partícula 1-1,4 mm						
	T4=25	Tempo de residência	T4=50	Tempo de residência	T4=75	Tempo de residência
P1	1,591	0,156	1,525	0,171	1,586	0,089
P2	1,774	0,156	1,819	0,126	1,794	0,178
P3	2,055	0,127	1,986	0,128	1,834	0,193
P4	2,127	0,170	2,121	0,152	1,883	0,106
Partícula 1,4-2 mm						
	T4=25	Tempo de residência	T4=50	Tempo de residência	T4=75	Tempo de residência
P1	1,716	0,188	1,654	0,164	1,494	0,116
P2	1,949	0,125	1,798	0,145	1,948	0,134
P3	2,227	0,129	2,076	0,115	2,111	0,158
P4	2,288	0,142	2,250	0,145	2,443	0,156
Partícula 2-2,4 mm						
	T4=25	Tempo de residência	T4=50	Tempo de residência	T4=75	Tempo de residência
P1	1,856	0,120	1,798	0,111	1,544	0,161
P2	2,802	0,169	1,991	0,092	1,959	0,162
P3	2,416	0,127	2,185	0,096	2,318	0,142
P4	2,510	0,127	2,537	0,192	2,442	0,106

Para a configuração com menor diferença de pressão, 1 bar, a velocidade média no ponto inicial apresentou valor próximo para as três granulometrias no ponto inicial, com uma diferença de 0,1 m/s a cada variação. As Figuras 18, 19 e 20 mostram que ao longo das posições destaca-se que a partícula de granulometria menor e intermediária tiveram uma velocidade

semelhante na posição 2, muito próximo ao limite do erro. Por outro lado, a maior granulometria, registrou uma média de velocidade maior ao longo do tubo. No ponto de interesse, a granulometria maior e menor está dentro do erro padrão da granulometria intermediária.

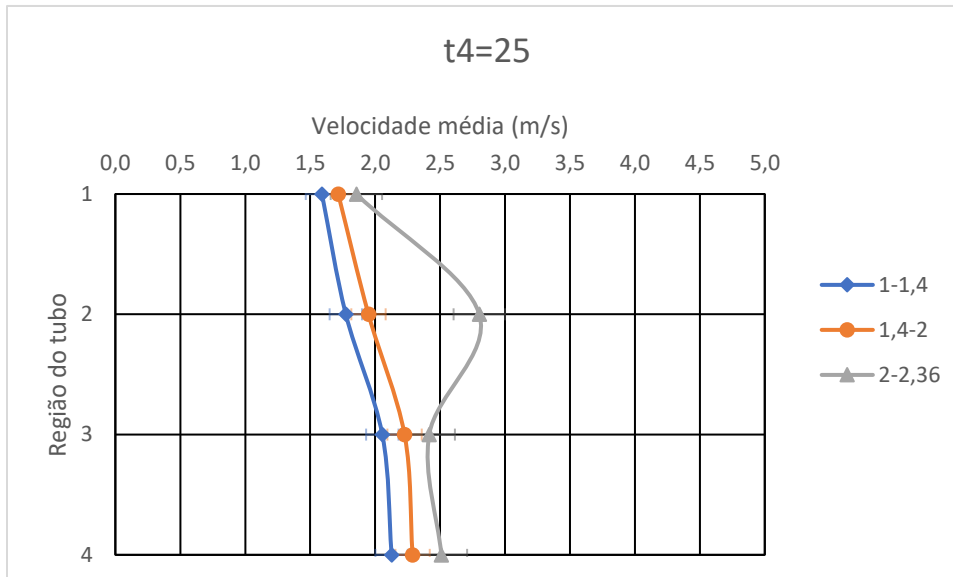


Figura 18 – Velocidade em cada região do tubo para t4=25

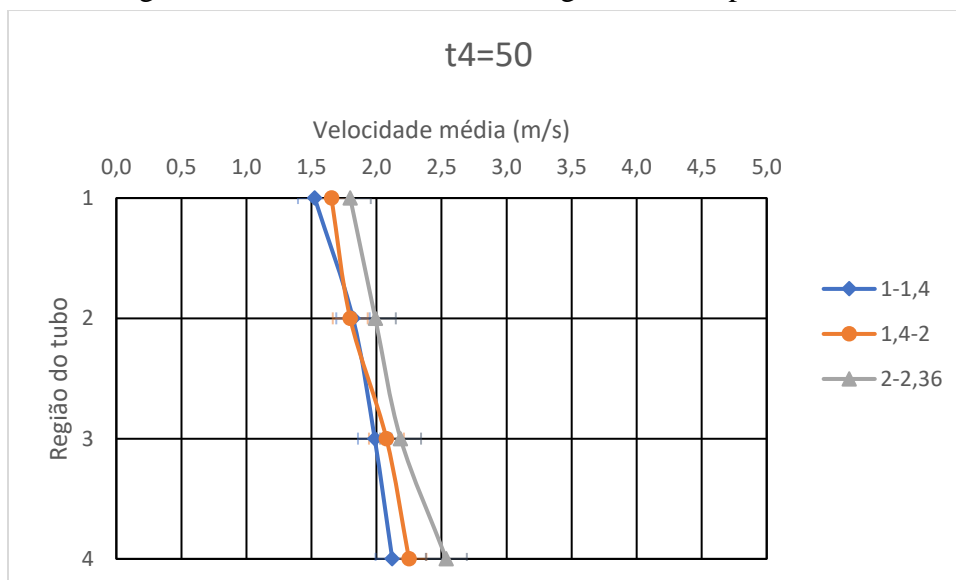


Figura 19 - Velocidade em cada região do tubo para t4=50

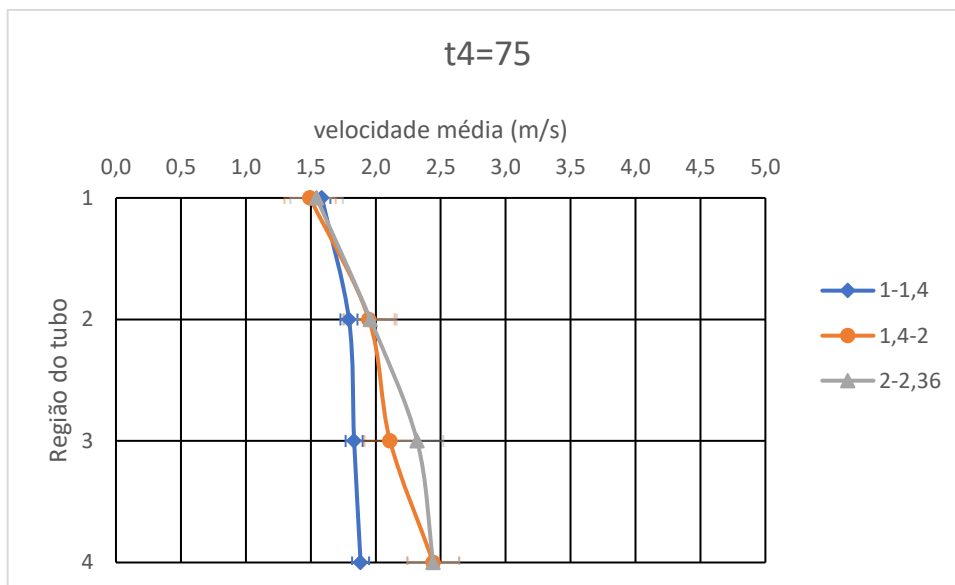


Figura 20 - Velocidade em cada região do tubo para $T_4=75$

É evidente que o tempo de abertura da válvula influenciou a velocidade, em geral, quanto maior o tempo de abertura, mais lenta é a velocidade da partícula. No entanto, essa relação teve uma exceção notável para a partícula com o menor tamanho, que apresentou um aumento de velocidade com a diminuição do tempo de abertura da válvula t_4 .

5.2.2 ANÁLISE DO TEMPO DE RESIDÊNCIA DAS PARTÍCULAS

Quando é analisado o tempo de residência em cada uma das regiões quando operando o simulador com a menor diferença de pressão, 1 bar, ilustrado na Figura 22, é observado que para partículas menores, com tempo de abertura de válvula menor, há uma notável constância no período em que a partícula permanece em cada região. Em outras palavras, a partícula leva aproximadamente o mesmo intervalo de tempo para percorrer cada uma das 4 partes do tubo, como evidenciados na Figura 21a, onde o tempo de permanência em cada região é em torno de 15 ms. Por outro lado, quando ocorre o aumento do tamanho da partícula, verifica-se uma redução do tempo de permanência da partícula em cada região, ou seja, permanece mais tempo em cada região, uma das hipóteses é que essa partícula é seja mais pesada. Chama a atenção especialmente na Figura 21b, que no tempo intermediário de abertura de válvula, 25ms, para o último quarto leva um tempo maior para a partícula de maior tamanho.

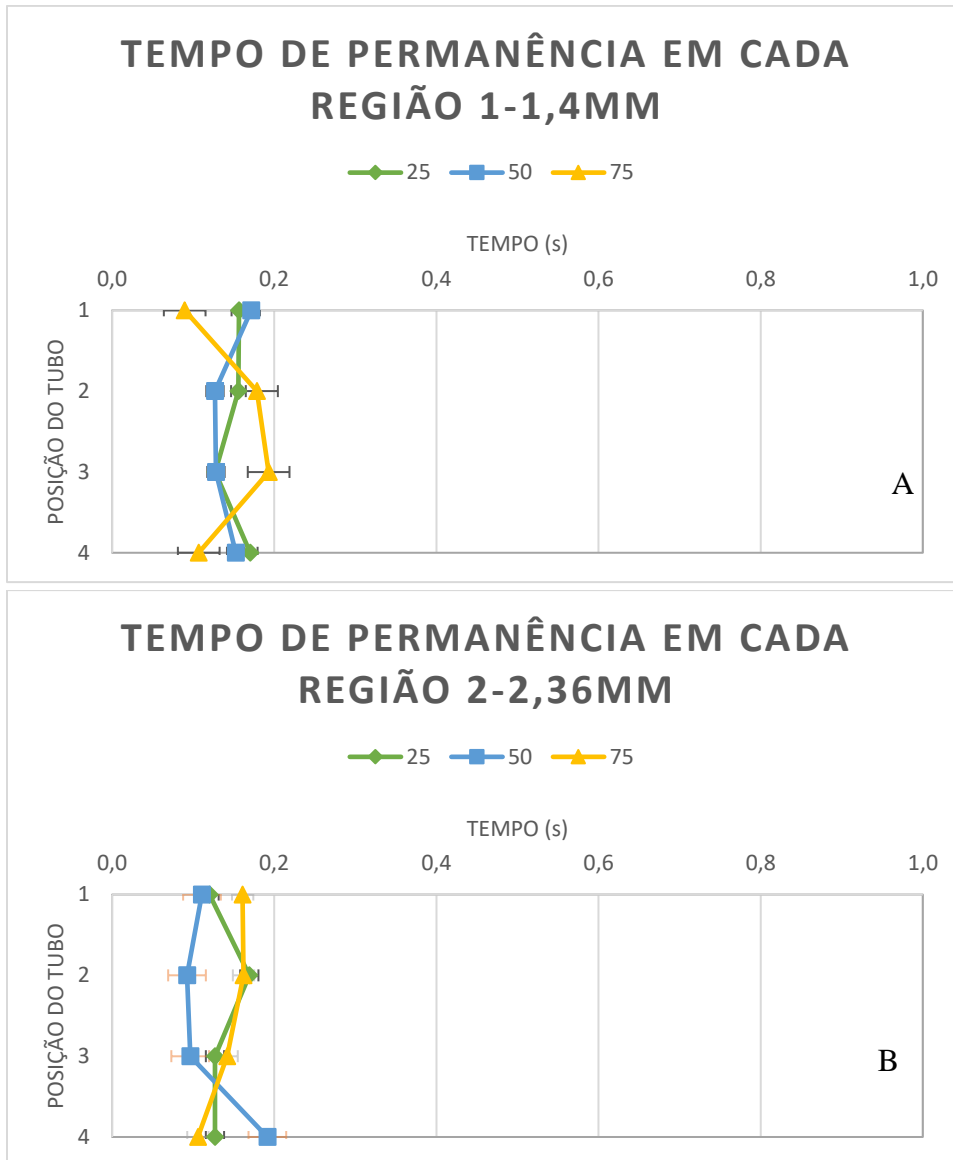


Figura 21 – Tempo de residência para diferentes tempos de abertura de t4

Para os valores extremos de cada granulometria, observamos que a partícula de menor tamanho, com um tempo de abertura de 25 ms, permanece na região 1 do tubo 23% mais tempo em comparação com a partícula maior. Essa proporção de 23% também é mantida na região 4. Por outro quando o tempo de abertura de válvula torna-se máximo, ocorre uma diferença de 44% entre as partículas extremas na região 1. Interessantemente, na região 4, ambas partículas levam o mesmo tempo para percorrer os 15 cm finais do tubo. Esses resultados destacam as variações significativas no tempo de permanência das partículas em diferentes regiões do tubo, dependendo do tamanho e do tempo de abertura da válvula.

5.3 COMPARATIVO ENTRE DIFERENÇA ABERTURA DE VÁLVULA ΔP DE 3 e 1 BAR

Neste capítulo serão apresentado um comparativo entre as diferenças e qual é a influência desta na velocidade média. A comparação é feita entre a mesma faixa granulométrica.

A Figura 22a, com pressão iguala 1 bar, o comportamento visto de acordo com o tempo de abertura da válvula t_4 , mostra que com o menor tempo de abertura de válvula, na região de interesse, houve um aumento da velocidade média em relação aos tempos de abertura superior. É visto também que o comportamento nas regiões 1, 2 para todos os tempos de abertura de válvula tem um comportamento igual, mas que na região de interesse do tubo, a região 3, há uma pequena divergência deste valor. Para a região onde há a resistência central do forno, não há grande diferença se utilizássemos tempos de abertura de 25, 50 ou 75 ms pois a partícula de menor tamanho chegaria com uma velocidade semelhante nesse ponto. Ao observar a Figura 22b, que possui a maior diferença de pressão, 3 bar, há uma variação significativa de diferença de velocidade nas regiões variando o tempo de abertura de válvula, mas na região 3 é perceptível que tende a ocorrer uma convergência para o mesmo, ambas estão dentro do erro padrão. O tempo intermediário de abertura apresentou uma velocidade média maior no ponto de interesse.

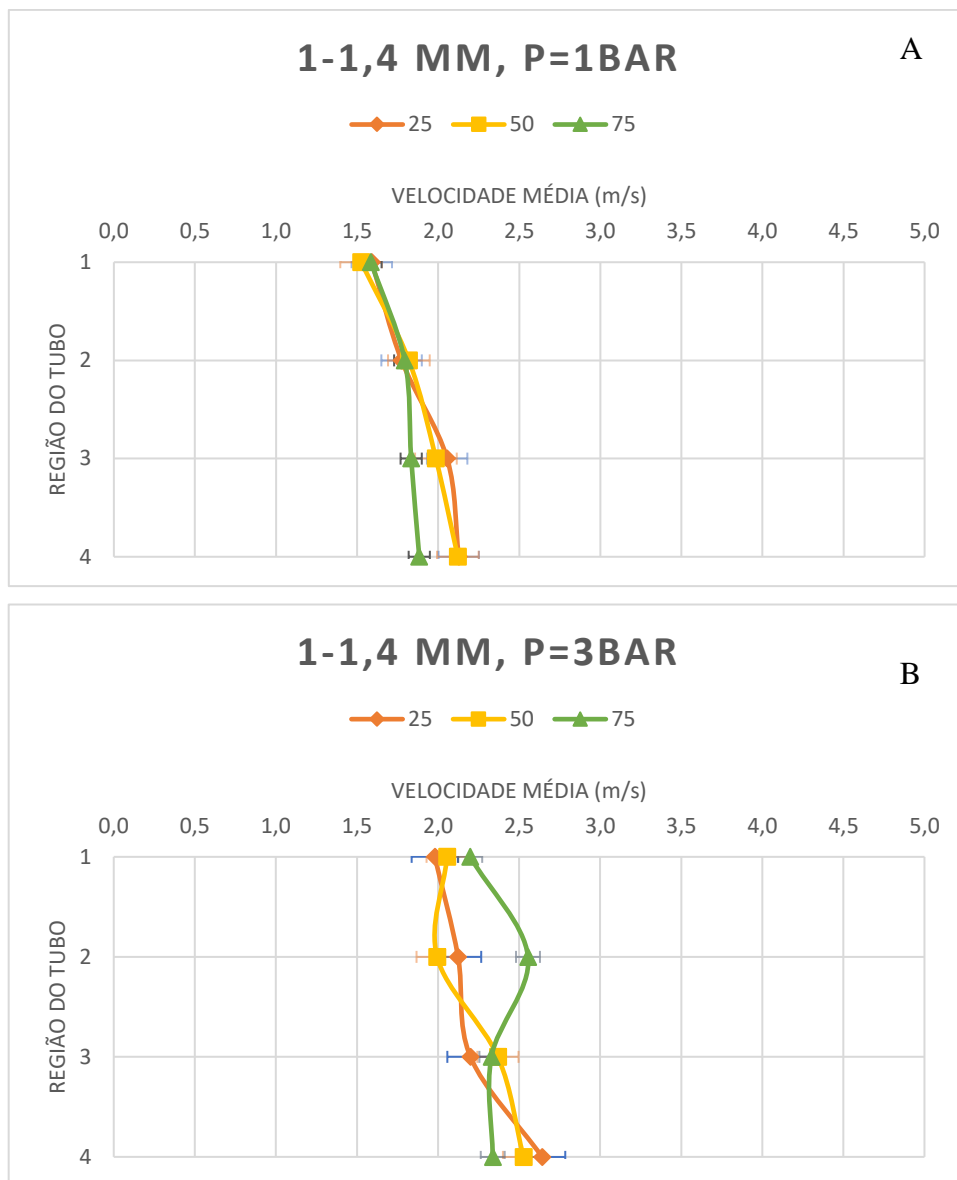


Figura 22 - Tempo de residência para diferentes tempos de abertura de t4. Partícula 1-1,4 mm.

Quando utilizado a partícula de tamanho intermediário, 1,4-2 mm para as diferenças extremas de pressão, Figura 23a e 23b, observamos que o menor tempo de abertura da válvula t4 tem a maior velocidade média no ponto de interesse do reator enquanto o maior tempo de abertura de válvula tem a maior velocidade nesta região do tubo. É interessante perceber que a velocidade com o maior tempo de abertura, 75, é o menor encontrado. Os dois primeiros tempos de abertura da válvula t4 não tiveram tanta influência na velocidade média da partícula no ponto de interesse, já que a velocidade neste ponto é semelhante para os primeiros tempos. Por outro lado, com a maior diferença de pressão entre a ZBP e ZAP, Figura 23b, observamos que o maior tempo de abertura, 75 ms, teve um valor de velocidade inferior em comparação entre os menores tempos na posição 3. É perceptível que houve uma diminuição da velocidade média

quando há um aumento de diferença de pressão entre as ZBP e ZAP, essa diferença fez com que a partícula diminuísse em torno de 0,5 m/s a sua velocidade média.

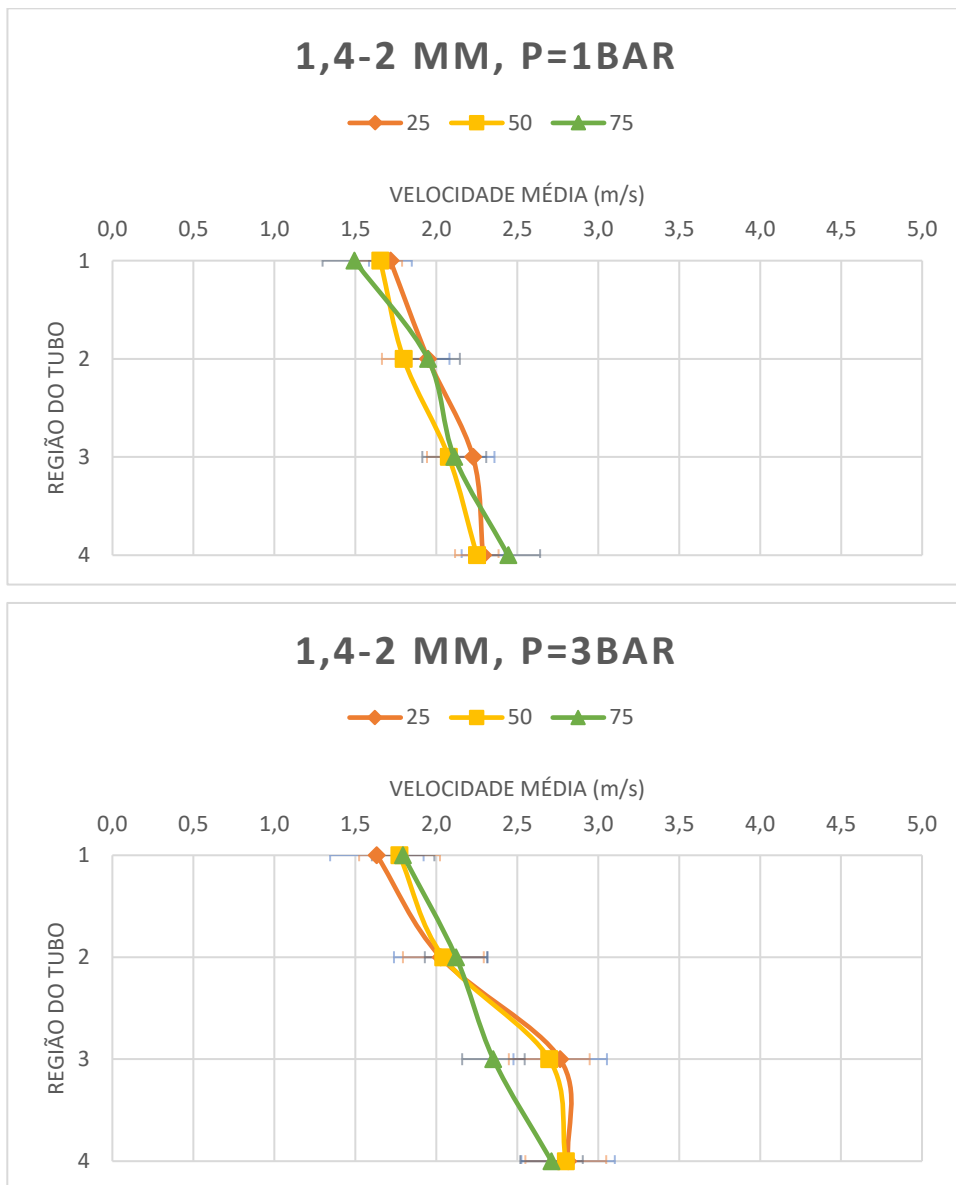


Figura 23 - Tempo de residência para diferentes tempos de abertura de t4. Partícula 1,4-2 mm.

Na Figura 24 observa-se que com a partícula maior, os tempos de abertura se comportaram de forma semelhante ao decorrer do tubo de acrílico, a exceção se dá pela região 2 com tempo de abertura de 25 ms. Na região de interesse, a região 3, é visto que independente do tempo de abertura da válvula a partícula chegou nesta posição com uma velocidade média próxima a 2,4, m/s, todas dentro do erro padrão. Isso é possivelmente devido à grande área dessas partículas, e ela começa a cair de forma mais controlada e por isso ao chegar na região 3 de filmagem, a velocidade média é semelhante para diferentes tempos de abertura da válvula t4. Quando a pressão é considerada a mínima, 1bar, observa-se que o menor tempo de abertura,

25 ms, apresenta a maior velocidade média ao longo das regiões do tubo, mas a velocidade média na região de interesse é semelhante a com maior diferença de pressão, como é visto na Figura 25a. Pode-se concluir que a diferença de pressão para partículas mais grosseiras não tenha tanta influência na velocidade da partícula que percorre o tubo de acrílico do experimento. Houve uma pequena diminuição na velocidade média na região de interesse, mas não foi uma diferença muito acentuada.

De forma inesperada na região final do tubo tanto a partícula menor, quanto a partícula de maior granulometria, demandam maiores intervalos de tempo para percorrer esta seção do equipamento, tal fato pode ocorrer devido a inercia das partículas e apenas forças de a atmosfera estarem exercendo algum tipo de força nas partículas. Essas observações destacam a complexidade do comportamento das partículas.

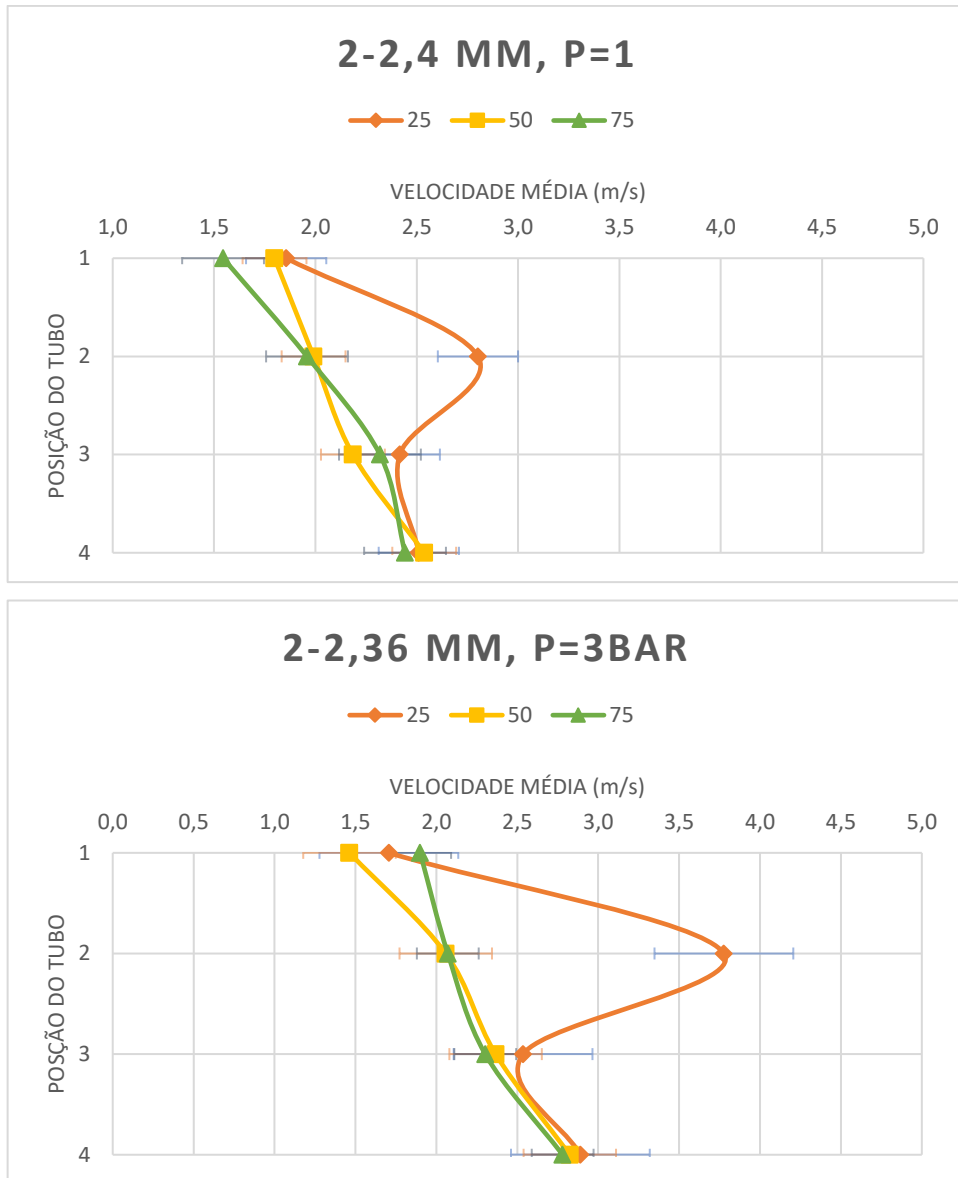


Figura 24 - Tempo de residência para diferentes tempos de abertura de t_4 . Partícula 2-2,4 mm

Os experimentos feitos neste trabalho demonstraram que os valores encontrados estão próximos aos da literatura. Para valores de tempo, os valores mínimos encontrados estão na mesma ordem do que ocorre operacionalmente. Para velocidades, os valores deste estudo estão uma ordem de grandeza abaixo.

Nos experimentos com 1bar e 3bar de pressão de diferença entre a ZBP e ZAP, é possível perceber que com menores tempos de abertura de válvula, 25ms, para todos os tamanhos de partícula, houve uma maior velocidade para esse tempo, isso pode ser devido ao pouco tempo que a válvula fica aberta e que a aceleração da partícula pode ser mais rápida com esse curto espaço de tempo.

Os experimentos deste estudo revelaram a influência do tamanho da partícula, diferentes tempos de abertura da válvula (t_4) e variações na diferença de pressão no simulador. O objetivo era compreender como esses fatores afetam o tempo de residência das partículas e a velocidade média das partículas na região crítica do simulador, onde se encontra a resistência central. As conclusões destacam a complexidade das interações entre granulometria, tempo de abertura da válvula e diferença de pressão na dinâmica das partículas no reator.

6 CONCLUSÕES

De acordo com o que foi proposto neste trabalho para ser analisado, foi possível chegar nas seguintes conclusões:

- A região da zona de combustão do alto forno, possui valores da ordem de tempo de residência de 0,01 a 0,04 s e velocidade de 100-200 m/s. neste estudo foram encontrados valores que variam de tempo de residência 0,08 a 0,1s e 1,5 a 2,6 m/s. Isto mostra que os valores encontrados têm uma ou duas ordens de grandeza menor que as encontradas na literatura.
- Na região central da resistência do reator (P3), para uma diferença de pressão de 3 bar, houve variação na velocidade entre diferentes granulometrias, e ao aumentar a o tempo de abertura de válvula até 75 ms, todas as granulometrias convergiram para a mesma velocidade de 2,3 m/s. Para a variação de pressão de 1 bar, essa convergência ocorre com o tempo de abertura de 50ms, tendo uma velocidade média na posição 3 de 2,1 m/s.
- A variação no tempo de abertura da válvula não se mostrou uma influência tão pronunciada, mas foi possível observar que a velocidade das partículas sofre um decaimento quando há um tempo de abertura de válvula maior. Com tempo de abertura de 25 ms, obteve-se um valor de 2,7 m/s enquanto para 75 ms o valor de velocidade encontrado foi de 2,3 m/s para um ΔP de 3 bar. Já para ΔP de 1 bar, os valores foram de 2,01 m/s e 1,8 m/s para os respectivos tempos de abertura de 25 e 75 ms.
- Em condições de maior diferença de pressão, 3 bar, as partículas apresentaram comportamento mais sensível às variações no tempo de abertura da válvula, enquanto em condições de menor diferença de pressão, 1 bar, a influência do tempo de abertura é menos pronunciada. Partículas menores tem uma variação mais sensível na de maior pressão. Enquanto partículas mais grosseiras, a diferença de pressão não parece ter uma influência tão significativa.
- O tempo que as partículas permanecem em cada região do tubo varia significativamente, chegando a uma diferença de 44%, sendo influenciado pelo tamanho da partícula e pelo tempo de abertura da válvula e diferença de pressão. Partículas maiores, de 2-2,4mm exibem uma dispersão menor nos tempos de permanência. Em condições de menor diferença de pressão, 1 bar, o tempo varia significativamente para todos três tempos de abertura de válvula, 25, 50 e 70 ms.

Os experimentos deste estudo revelaram a influência do tamanho da partícula, diferentes tempos de abertura da válvula (t_4) e variações na diferença de pressão no simulador. O objetivo era compreender como esses fatores afetam o tempo de residência das partículas e a velocidade média das partículas na região crítica do simulador, onde se encontra a resistência central. As conclusões destacam a complexidade das interações entre granulometria, tempo de abertura da válvula e diferença de pressão na dinâmica das partículas no reator.

7 TRABALHOS FUTUROS

Trabalhos futuros sugeridos para dar continuidade a este são:

1. Visualizar como se comportariam partículas de tamanho intermediários;
2. Utilização de carvões vegetais, carvões médio, alto voláteis e/ou outros materiais carbonosos;
3. Análise estatística mais robusta para verificar se as variações nos números estão relacionadas as mudanças de parâmetros de ensaio ou se essa mudança é insignificante, tendo que a mudança de parâmetros não influencia na velocidade e tempo de residência.
4. Utilização de material pulverizado (nuvem de carvões) em conjunto com as partículas mais grosseiras para verificar se as partículas e a nuvem de carvão têm algum tipo de interação.

8 REFERÊNCIAS

Abdulwahab, M. R. ., H. Ali, Y. ., J. Habeeb, F., A. Borhana, A. ., Abdelrhman, A. M. ., & Ali Al-Obaidi, S. M. . (2020). A Review in Particle Image Velocimetry Techniques (Developments and Applications). **Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences**, 65(2), 213–229.

BABICH, A. et al. **Ironmaking: textbook**. Aachen: RWTH Aachen University, 2008.

BABICH, A.; SENK, D.; FERNANDEZ, M. Charcoal Behaviour by Its Injection into the Modern Blast Furnace. *ISIJ International*, v. 50, n. 1, p. 81–88, 2010. BABICH, A. et al. **Ironmaking: textbook**. Aachen: RWTH Aachen University, 2008

BARBIERI, C. C. T. **Estudos de misturas de carvões e biomassa visando a combustão em alto-forno**. 2013. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013

BARBIERI, C. C. T. **Avaliação da combustibilidade de carvão brasileiro para injeção em altos-fornos em simulador de PCI e em termobalança**. 2018. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018

BORREGO, A. G.; ALVAREZ, D. Comparison of Chars Obtained under Oxy-Fuel and Conventional Pulverized Coal Combustion Atmospheres. **Energy & Fuels**, v. 21, n. 6, p. 3171–3179, nov. 2007.

BROWN, D; Wolfgang C.; Hanson M.R; Tracker Video Analysis and Model Tool. 2023. < [Tracker Video Analysis and Modeling Tool for Physics Education \(physlets.org\)](https://physlets.org) >. Acesso em 14/01/2024

BÖSENHOFER, M. et al. Suitability of Pulverised Coal Testing Facilities for Blast Furnace Applications. **Ironmaking & Steelmaking**, p. 1–12, 20 jan. 2019.

CAMPOS, A. M. A. **Influência da adição da casca e do rejeito da semente de Moringa oleifera após extração do óleo em carvões minerais utilizados para injeção em altos-fornos a coque.** 2018. Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, 2018.

CARPENTER, A. M. **Coal blending for power stations.** London: IEA Coal Research, 1995.

CARPENTER, A. M. **Use of PCI in blast furnaces.** London: IEA Coal Research, 2006.

CHEN, Q. et al. A particle-tracking image pyrometer for characterizing ignition of pulverized coal particles. **Fuel Processing Technology**, [s. l.], v. 225, p. 107065, 2022.

CHEN, W.-H.; WU, J.-S. An Evaluation on Rice Husks and Pulverized Coal Blends Using a Drop Tube Furnace and a Thermogravimetric Analyzer for Application to Blast Furnace. **Energy**, v. 34, n. 10, p. 1458–1466, out. 2009.

COWEN, E. A. et al. A hybrid digital particle tracking velocimetry technique. **Experiments in Fluids**, [s. l.], v. 22, n. 3, p. 199–211, 1997.

DE GIROLAMO, A. et al. Ignitability and Combustibility of Yallourn Pyrolysis Char under Simulated Blast Furnace Conditions. **Fuel Processing Technology**, v. 156, p. 113–123, fev. 2017

DENO, T.; OKUNO, Y. Hight rate PCI operation in Japan. In: ISHII, K. (Ed.). **Advanced pulverized coal injection technology and blast furnace operation.** Netherlands: Pergamon. 1st. ed. Oxford, UK: Pergamon, 2000. p. 37–62

Dracos, T. (1996). Particle Tracking Velocimetry (PTV). In: Dracos, T. (eds) Three-Dimensional Velocity and Vorticity Measuring and Image Analysis Techniques. **ERCOFTAC Series**, vol 4. Springer, Dordrecht.

Fragoso, H. P. **AVALIAÇÃO DA COMBUSTIBILIDADE DE CARVÕES EM SIMULADOR DE PCI: EVOLUÇÃO DA METODOLOGIA DE OPERAÇÃO**. 2019. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

FRIEDEMANN, J. et al. Direct optical observation of coal particle fragmentation behavior in a drop-tube reactor. **Fuel**, v. 166, p. 382–391, 2016.

GEERDES, M. et al. **Modern blast furnace ironmaking: an introduction**. 2nd ed ed. Amsterdam: IOS Press, 2009.

GERHARDTER, H. et al. Evaluation of drag models for particles and powders with non-uniform size and shape. **Powder Technology**, v. 330, p. 152–163, 2018.

GOMES, L. M.; MESQUITA, A. L. A. Effect of particle size and sphericity on the pickup velocity in horizontal pneumatic conveying. **Chemical Engineering Science**, [s. l.], v. 104, p. 780–789, 2013.

GU, M. et al. Effects of Particle Size Distribution and Oxygen Concentration on the Propagation Behavior of Pulverized Coal Flames in O₂/CO₂ Atmospheres. **Energy & Fuels**, v. 31, n. 5, p. 5571–5580, 2017.

GUDENAU, H. W. et al. Environmental Aspects and Recycling of Filter Dusts by Direct Injection or Use of Agglomerates in Shaft Furnaces. **ISIJ International**, v. 40, n. 3, p.218–223, 2000.

Han Dang, Guangwei Wang, Chen Wang, Xiaojun Ning, Jianliang Zhang, Xiaoming Mao, Nan Zhang, and Chuan Wang. Comprehensive Study on the Feasibility of Pyrolysis Biomass Char Applied to Blast Furnace Injection and Tuyere Simulation Combustion. **ACS Omega** 2021 6 (31), 20166-20180

Hippe, Frederik & Babich, A. & Senk, Dieter & Solar Irazabal, Jon & Marco, Isabel. (2019). Efficiency of Biomass Pyrolysis Product Injection into the Blast Furnace. **BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte**. 164.

HUTNY, W. P.; LEE, G. K.; PRICE, J. T. Fundamentals of Coal Combustion during Injection into a Blast Furnace. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 17, n. 4, p. 373–395, jan. 1991.

HUTNY, W.; PRICE, J.; GRANSDEN, J. Evaluation of coals for blast furnace injection using a computer model. In: **Anais... In: IRONMAKING CONFERENCE PROCEEDINGS**. 1990.

LEE, H.; CHOI, S. Motion of single pulverized coal particles in a hot gas flow field. **Combustion and Flame**, v. 169, p. 63–71, 2016.

Lima, G. **CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE COMBUSTIBILIDADE DE PNEUS INSERVÍVEIS E SUAS MISTURAS COM CARVÃO MINERAL EM TERMOBALANÇA VISANDO À INJEÇÃO EM ALTOS-FORNOS**. 2019. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

MACHADO, A. da S. **Automação de simulador de combustão para avaliação dos fenômenos transientes durante a desvolatilização e combustão de carvões para injeção em altos-fornos**. 2017. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

MACHADO, J. G. M. da S. **Estudo de reatividade e combustão de carvões minerais, carvão vegetal e misturas**. 2009. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

MATHIESON, J. G. et al. Use of Biomass in the Iron and Steel Industry – An Australian Perspective. p. 11, 2011.

MOTTA, M. N.; Barbieri, C. C. T.; Machado, A. da S.; Rech, R. L.; Osório, E; Vilela, A. C. F. **AUTOMAÇÃO DO ENSAIO DE COMBUSTÃO DE UM SIMULADOR DE PCI**, p. 21-29. In: 17º Enemet, São Paulo, 2017.

MOTTA, R. S. N. **Sistemas de Injeção de Materiais Pulverizados em Altos-Fornos e Aciarias**. São Paulo: Blucher, 2015

OSÓRIO, E. et al. Evaluation of Petrology and Reactivity of Coal Blends for Use in Pulverized Coal Injection (PCI). **International Journal of Coal Geology**, v. 68, n. 1–2, p. 14–29, ago. 2006.

POHLMANN, J. G. **Avaliação da combustibilidade e reatividade de biomassas termicamente tratadas e carvões com vistas à injeção em altos-fornos**. 2014. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

Pohlmann, J. G., Borrego, A. G., Osório, E., Díez, M. A., & Vilela, A. C. F. (2016). Combustion of eucalyptus charcoals and coals of similar volatile yields aiming at blast furnace injection in a CO₂ mitigation environment. **Journal of Cleaner Production**, 129, 1–11.

Pohlmann, Juliana Gonçalves; Borrego, Ángeles Gómez; Díez, María Antonia; Vilela, Antônio Cezar Faria; Osório, Eduardo. **EVALUATION OF COMBUSTIBILITY OF BIOMASSES AIMING AT BLAST FURNACE INJECTION** , p. 1828-1835. In: 42º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas / 13º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro / 6th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking, Rio de Janeiro, 2012.

QIAN, X. et al. Characterisation of the combustion behaviours of individual pulverised coal particles entrained by air using image processing techniques. **Measurement Science and Technology**, v. 32, n. 3, p. 034005, 2021.

Qureshi, M. H., Tien, W. H., & Lin, Y. J. P. (2020). Performance comparison of particle tracking velocimetry (PTV) and particle image velocimetry (PIV) with long-exposure particle streaks. **Measurement Science and Technology**, 32(2), 024008.

RECH, R. L. **Desenvolvimento de equipamento para estudos de injeção de carvão pulverizado em altos-fornos siderúrgicos**. 2018. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

RECH, R. L. et al. Design and Construction of a PCI Rig Evaluation of Pulverized Fuels Combustion: Equipment Features. **Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração**, v. 15, n. 4, p. 496–503, 2018.

RIZZO, E. M. da S. **Processo de fabricação de ferro-gusa em alto-forno**. São Paulo: ABM, 2009.

Rodolfo M. P, William M. V., Jorge L. B., Natan A. V. B, William D. P. F., Marcelo S. de C., Erick de M. F., Antonio Carlos B.. Flow visualization in centrifugal pumps: A review of methods and experimental studies. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, Volume 203,2021.

YOKOJI, Akira et al. **Introdução à siderurgia**. São Paulo: ABM. , 2007.