



**JOÃO VICTOR DOS ANJOS LUCAS, KAROLINE LEITE LEIONE, RIAN MICAEL
RESENDE CARLESSO, SHAIRA RABELO FRANCISCO**

**ANÁLISE E SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA DE RECUPERAÇÃO
PARA O PROCESSO DE JATEAMENTO COM MATERIAL ABRASIVO**

ARACRUZ

2024

JOÃO VÍCTOR DOS ANJOS LUCAS
KAROLINE LEITE LEIONE
RIAN MICAEL RESENDE CARLESSO
SHAIRA RABELO FRANCISCO

**ANÁLISE E SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA DE RECUPERAÇÃO PARA O
PROCESSO DE JATEAMENTO COM MATERIAL ABRASIVO**

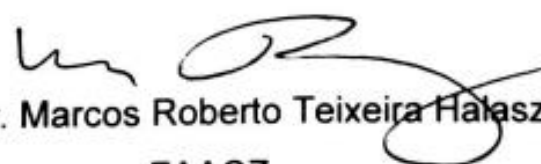
Trabalho de conclusão de curso apresentado à
coordenadoria do curso de Engenharia Mecânica
das Faculdades Integradas de Aracruz, como re-
quisito parcial para a obtenção do título de Ba-
charel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em 16 de dezembro de 2024

COMISSÃO EXAMINADORA


Prof. Dr. Harerton Oliveira Dourado
FAACZ

(Orientador)


Prof. Dr. Marcos Roberto Teixeira Halasz
FAACZ
Prof. Me. Guilherme Induzzi Rosalém
FAACZ

**João Victor Dos Anjos Lucas, Karoline Leite Leione, Rian Micael Resende
Carlesso, Shaira Rabelo Francisco**

**ANÁLISE E SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA DE RECUPERAÇÃO
PARA O PROCESSO DE JATEAMENTO COM MATERIAL ABRASIVO**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao curso de Engenharia
Mecânica, da Universidade
Faculdades integradas de Aracruz
como requisito parcial a obtenção do
título de Engenheiro Mecânico.

Orientador(a): Prof. Dr Harerton
Oliveira Dourado.

ARACRUZ

2024

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Deus por nos dar força, saúde e sabedoria para enfrentar cada etapa deste trabalho. Sem Ele, nada disso teria sido possível.

Agradecemos também aos nossos pais e familiares pelo apoio incondicional, compreensão e carinho ao longo desta jornada acadêmica. Suas palavras de encorajamento foram fundamentais nos momentos mais difíceis.

Ao nosso orientador, Prof. Dr. Harerton Oliveira Dourado, que nos guiou com paciência, dedicação e conhecimento, contribuindo significativamente para o desenvolvimento deste trabalho. Sua orientação foi essencial para o nosso crescimento acadêmico e profissional.

Aos nossos amigos e colegas de curso, que compartilharam conosco essa jornada repleta de desafios e aprendizados. As trocas de conhecimento, os momentos de descontração e o apoio mútuo foram indispensáveis para tornar essa experiência mais leve e enriquecedora.

Por fim, agradecemos a todos os professores e funcionários das Faculdades Integradas de Aracruz por todo o conhecimento transmitido e pelo suporte prestado ao longo desses anos. Somos gratos a todos que, de alguma forma, contribuíram para que pudéssemos chegar até aqui e realizar este trabalho.

RESUMO

O presente trabalho aborda a análise e o desempenho de um dispositivo projetado para o tratamento de particulados gerados durante o processo de jateamento abrasivo. O dispositivo utiliza um sistema de separação por água, que apresentou problemas de eficiência devido à rápida remoção do líquido pelo fluxo de ar de alta velocidade. O objetivo principal foi investigar as falhas do sistema, utilizando ferramentas de simulação computacional para avaliar a dinâmica do escoamento do ar e da água no interior do dispositivo. A metodologia envolveu a realização de simulações fluidodinâmicas no software ANSYS CFX, permitindo visualizar o comportamento do fluido em instantes de tempo específicos e identificar os fatores que comprometem a retenção do particulado. Os resultados demonstraram a incapacidade do sistema em reter a água, indicando a necessidade de reconfiguração do projeto. Concluiu-se que ajustes na geometria e nas condições operacionais do dispositivo são essenciais para aprimorar sua eficiência e atender aos requisitos ambientais. Este estudo contribui para a otimização de dispositivos de separação e a redução do impacto ambiental das operações de jateamento abrasivo.

LISTA DE QUADROS

Tabela 1: Propriedades do processo	24
Tabela 2: Coleta de dados do sistema	24
Tabela 3: Análise granulométrica da granalha pura	32
Tabela 4: Análise granulométrica da granalha pós-uso	32

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Deformação superficial de um material durante o processo de jateamento abrasivo (SERIZAWA, 2005).....	13
Figura 2: Filtro de manga tipo pulse-jet (BATISTONI, 2011)	17
Figura 3: Filtro de manga tipo Convencional (BATISTONI, 2011)	17
Figura 4: Filtro de manga tipo acionamento mecânico (BATISTONI, 2011).....	18
Figura 5: Filtro de cartucho (CERON, 2013).	18
Figura 6: Filtro de disco a vácuo (Silva, 2018)	19
Figura 7 - Ciclone industrial (Adaptado BOF, 2018).....	20
Figura 8: Fluxograma do processo.....	22
Figura 9: Caixa de armazenamento de água	23
Figura 10: Tubulação de entrada e saída.....	23
Figura 11: Amostra da granalha pós - uso	26
Figura 12: Agitador de peneiras	26
Figura 13: Pesagem das peneiras.....	27
Figura 14: Amostra da granalha pura.....	27
Figura 15:Malha gerada da simulação	29
Figura 16 : linhas de corrente do escoamento de ar (tons alaranjados) e fração volumétrica da água (tons azulados) no interior do dispositivo em instantes de tempo discretos entre 0,05 e 10,0 segundos de simulação.	34
Figura 17: comportamento do material particulado no interior do sistema de despoeiramento em instantes de tempo selecionados entre 1,0 e 60 segundos de simulação. A porção em azulado mais escuro representa a fase líquida.	36
Figura 18: gradiente de pressão total no interior do domínio simulado para os instantes 10 e 60 segundos de simulação.....	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D	2 Dimensões
3D	3 Dimensões
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CFX	Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer
DIAM.FUR	Diâmetro do Furo
DGM	Diâmetro Geométrico Médio
FAACZ	Faculdades Integradas de Aracruz
GPU	Unidade de Processamento Gráfico
MF	Módulo de finura
RNG	Renormalização
STL	Stereolithography

LISTA DE SÍMBOLOS

μm	Micrometros.....	14
PR_i	- Peso retido na peneira.....	15
P_{i2}	- Peso da peneira mais a fração retida.....	15
P_{i1}	- Peso da peneira.....	15
%R	- Percentual retido em cada peneira	15
P	- Peso da amostra.....	15
mm	- Milímetros.....	22
g	- Gramas.....	23
kg	- Quilogramas.....	23
∇	- Divergência.....	27
ρ	- Densidade da fase continua.....	27
$\vec{u}$	- Vetor velocidade.....	27
S_M	- Forças de corpo e de rotação.....	28
P	- Pressão.....	28
τ	- Tensor de cisalhamento.....	28
K	- Energia turbulenta.....	28
ϵ	- Taxa de dissipação de energia turbulenta.....	28
m_p	- Massa da partícula.....	28
u_p	- Vetor velocidade da partícula.....	28

°C	-	Graus Celsius.....	29
m ³	-	Metros cúbicos.....	29
m/s	-	Metros por segundo.....	30
g/s	-	Gramas por segundo.....	30

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	12
2.1	Objetivo Geral	12
2.2	Objetivos Específicos	12
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	13
3.1	Processo de jateamento por partícula abrasiva	13
3.1.1	Granalha.....	14
3.2	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....	14
3.3	Técnicas de captação dos resíduos	16
3.3.1	Tipos de filtros industriais.....	16
3.3.1.1	Filtro de Manga	16
3.3.1.2	Filtro de Cartuchos	18
3.3.1.3	Filtro de Disco	19
3.3.1.4	Ciclones.....	19
3.3.1.5	Lavadores de gases	20
3.4	Destinação dos resíduos.....	20
3.5	Simulação Computacional.....	21
4	METODOLOGIA.....	22
4.1	caracterização do sistema.....	22
4.1	Parâmetros do sistema	23
4.2	ANÁLISE granulométrica	25
4.3	Simulação computacional	28
4.2	Malha numérica.....	28
4.4	modelo matemático	30
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
5.1	Análise granulométrica.....	32
5.2	ANÁLISE DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO	33
6	CONCLUSÃO.....	39
7	REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

A Política Nacional do Meio Ambiente do Brasil (lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981) define poluição como “a degradação da qualidade ambiental resultante de atividades que, direta ou indiretamente: a) prejudiquem a saúde, segurança e bem-estar da população; b) criem condições adversas para atividades sociais e econômicas; c) afetem desfavoravelmente a biota; d) afetem a estética ou as condições sanitárias do meio ambiente; e) lancem substâncias ou energia em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos”. Uma consequência da industrialização é a emissão de partículas sólidas na atmosfera (CARVALHO, 2018). As partículas sólidas são provenientes de processos industriais pesados como a fabricação de papel, indústrias de produção de materiais de consumo, e de atividades mais específicas como o jateamento de peças com partículas abrasivas (CARVALHO, 2018). Nesse contexto, é de responsabilidade procurar métodos eficientes para minimizar o impacto ambiental, desde a extração da matéria-prima até seu descarte empregando novas tecnologias e adotando práticas de produção cada vez mais limpas (CORREIA, 2018).

O jateamento abrasivo é basicamente um método de preparação de superfície que consiste na utilização de partículas sólidas em altas velocidades para a remoção de resíduos, como pintura, ferrugem e outros materiais contaminantes. Após a aplicação desse processo, o componente mecânico está apto a receber um novo tratamento em sua superfície (PALAU, 2011). O jateamento abrasivo gera resíduos com partículas tóxicas, como metais pesados e tintas e outras substâncias tóxicas que devem ser descartados corretamente ou reutilizados em novos processos para evitar impactos ambientais (PALAU, 2011).

O presente trabalho se propõe a analisar um sistema de despoeiramento empregado em uma empresa do setor metalmeccânico localizada em João Neiva, ES. A empresa em questão, utiliza um dispositivo projetado internamente para realizar a separação do particulado gerado no processo de jateamento abrasivo, adotando a água como principal meio. Contudo, o desempenho do sistema tem se mostrado insatisfatório, uma vez que não está garantindo a separação adequada. Um dos principais problemas observados é que a água utilizada no processo se esgota inexplicavelmente após um período de operação, comprometendo a eficiência do dispositivo e interrompendo o funcionamento adequado do sistema. Diante dessa

problemática, este trabalho busca realizar análises computacionais detalhadas para compreender o comportamento do dispositivo e identificar as possíveis causas do problema.

2 OBJETIVOS

Esse tópico destina-se a apresentar os objetivos estipulados para esse trabalho de conclusão de curso.

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar o sistema de despoeiramento utilizado no processo de jateamento abrasivo em uma empresa do setor metalmecânico localizada em João Neiva, ES.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir a granulometria da granalha por meio de ensaios em laboratório;
- Simular e definir por meio de análise computacional, indicadores que mostram limitações quanto a eficiência do sistema;
- Descrever as causas que culminaram na ineficiência do sistema de despoeiramento do material abrasivo.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Essa seção se dedicará a apresentar os conceitos e características relacionadas ao processo de jateamento abrasivo e os impactos ambientais que ele pode causar. Também serão apresentadas as principais técnicas utilizadas para reduzir esses impactos. No fim, serão introduzidos os conceitos relativos à simulação computacional.

3.1 PROCESSO DE JATEAMENTO POR PARTÍCULA ABRASIVA

O processo de jateamento por granalhas abrasivas, também conhecido como Shot Peening, é um procedimento de tratamento mecânico superficial e trabalho a frio realizado na superfície de uma peça ou em parte dela, onde consiste no bombardeamento das esferas endurecidas, que são classificadas por sua composição química, dureza e tamanho (SILVA, 2018). A granalha age como um martelo que quando entra em contato com a superfície do material, realiza um trabalho a frio provocando uma leve deformação (Figura 1). Sendo assim, os resíduos possivelmente nocivos são expulsos da superfície, deixando-a adequada para outros procedimentos (SILVA, 2018).

O processo promove na peça trabalhada melhoria de suas características mecânicas na ordem superficial, aumento na resistência à fadiga mecânica, aumento na resistência à corrosão e permite controlar os parâmetros superficiais como: rugosidade, porosidade, dureza e tensão residual (SERIZAWA, 2005).

Figura 1: Deformação superficial de um material durante o processo de jateamento abrasivo (SERIZAWA, 2005)

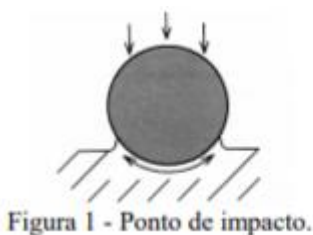


Figura 1 - Ponto de impacto.



Figura 2 - Zona comprimida por ação da granalha.

3.1.1 Granalha

A granalha que tem a função de remoção de impurezas pode ser aplicada na superfície da peça por intermédio de um jato de ar que confere a mesma alta velocidade ou por rotação, essas partículas podem ser metálicas, cerâmicas ou de vidro dependendo das características do trabalho a ser realizado (SILVA, 2018).

Segundo Palau (2011, p. 63):

O jateamento abrasivo é um processo de preparação de superfícies que utiliza o impacto de partículas abrasivas movimentadas em alta velocidade sobre uma superfície, objetivando a remoção da pintura, ferrugem e demais materiais contaminantes.

Durante o processo de jateamento, a granalha atinge altas velocidades para remover impurezas de forma eficiente. Ao impactar a superfície do material, parte da granalha se fragmenta, gerando partículas de diferentes tamanhos. Essas partículas, juntamente com as impurezas removidas, ficam dispersas no ambiente.

3.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Sampaio (2007) destaca que as técnicas de separação são procedimentos antigos na área de processamento. Segundo o autor, desde o século XV, os alemães idealizaram as primeiras telas de arame, resultando no primeiro avanço tecnológico no peneiramento de minérios, com as operações se mantinham de forma mecanizada devido ao pouco conhecimento da época.

Com o grande avanço das máquinas e a busca por um padrão de qualidade dos produtos, surgiu a necessidade de um padrão de referência que atendesse a análises mais minuciosas. (SAMPAIO, 2007).

Para uma caracterização detalhada do material, é de grande importância a determinação da granulometria do material utilizado no sistema, pois este determinará as características filtrantes do processo, como filtro a ser utilizado e sua eficiência. Basicamente o procedimento refere-se ao peneiramento de uma amostra de uma substância conhecida, e por meio deste método é possível avaliar diversas propriedades das partículas (ZANOTTO, 1996). Estes parâmetros podem ser definidos em:

1. Módulo de Finura (MF): É uma medida da distribuição que pode assumir qualquer valor entre zero e seis e quanto menor o seu valor mais fino é a distribuição das partículas na amostra.
2. Diâmetro geométrico médio (DGM): Com esse fator é possível determinar parâmetros para o sistema, como a malha de filtragem e sua eficiência como também as características do meio onde o particulado está inserido.

O cálculo da fração retida (PR_i) em cada peneira ser obtido pela equação (1):

$$PR_i = P_{i2} - P_{i1} \quad (1)$$

PR_i = peso retido na peneira;

P_{i2} = peso da peneira mais a fração retida;

P_{i1} = peso da peneira i ;

O cálculo da porcentagem da amostra retida ($\%R$) em cada peneira obedece a equação (2):

$$\%R = (PR_i * 100)/P \quad (2)$$

$\%R$ = percentual retido em cada peneira;

P = peso da amostra;

3.3 TÉCNICAS DE CAPTAÇÃO DOS RESÍDUOS

Segundo Leite (2009 apud ZANATTA, 2016):

Os resíduos gerados constituem-se uma das principais preocupações ambientais a serem enfrentadas pela sociedade que pretende alcançar o desenvolvimento de forma sustentável. Após inúmeros problemas ambientais, o poder público, por meio de legislações ambientais e de seus órgãos fiscalizadores, pressionou os fabricantes a se responsabilizarem pelos resíduos que geram.

Observa-se, portanto, que a manutenção dos resíduos gerados, sejam eles provenientes de qualquer natureza ou estado, é de responsabilidade de seu fabricante, ou seja, cada empresa ou organização que porventura realiza algum tipo de atividade deverá se responsabilizar pelos rejeitos gerados por tal. Dessa forma torna-se necessário a análise e o conhecimento acerca das principais técnicas de captação, separação e destinação comumente realizados pelas organizações.

Um sistema de filtragem possui o objetivo de separar particulados dispersos em um meio, seja esse meio gasoso ou líquido, o sistema de filtragem irá agir como uma barreira ou um desvio para que os resíduos que se deseja separar sejam direcionados para um recipiente adequado e assim possam ser corretamente destinados (DOS SANTOS, 2016).

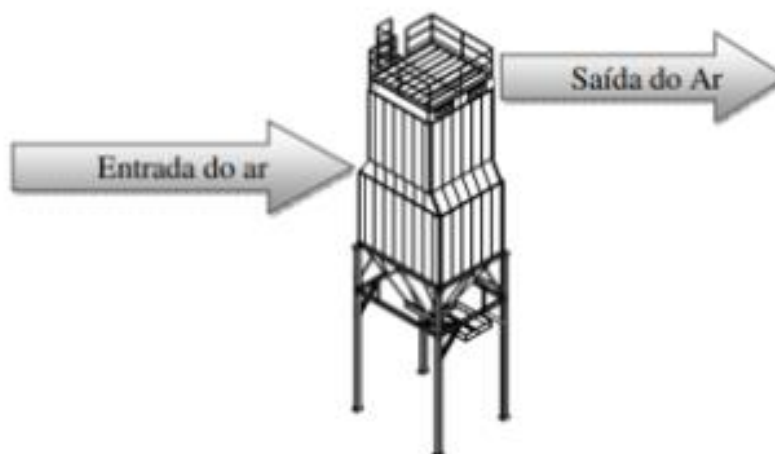
3.3.1 Tipos de filtros industriais

Com intuito de enfatizar a problemática da emissão do resíduo resultante do processo de jateamento abrasivo, é de suma importância destacar alguns tipos de filtros que são comumente utilizados nas indústrias (DOS SANTOS, 2016).

3.3.1.1 Filtro de Manga

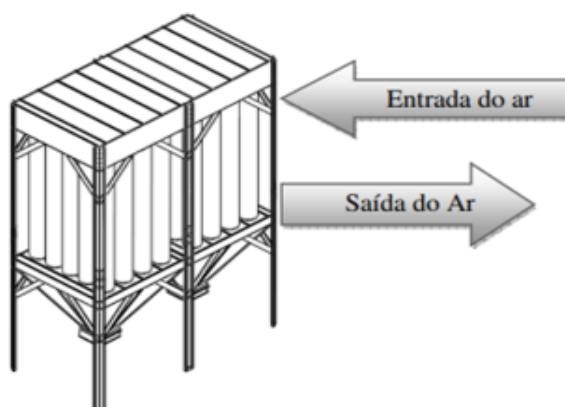
- a) Filtro de manga tipo Pulse-Jet (Figura 2): Esse tipo de equipamento é muito utilizado nas indústrias, o tipo Pulse-Jet permite que o ar poluído que passa pelo meio filtrante, onde é selecionado levando em conta suas características físico-químicas, onde a partícula fica retida na superfície externa das mangas, levando o ar limpo a ser destinado na atmosfera (BATISTONI, 2011).

Figura 2: Filtro de manga tipo pulse-jet (BATISTONI, 2011)



- b) Filtro de manga tipo convencional (Figura 3): O Filtro de Mangas tipo convencional, permite a entrada de ar com impurezas, esse ar passa por meio das mangas, que são montadas em tipo duto, as impurezas ficam retidas nas mangas e depositadas no funil. Assim o ar limpo é lançado na atmosfera (BATISTONI, 2011).

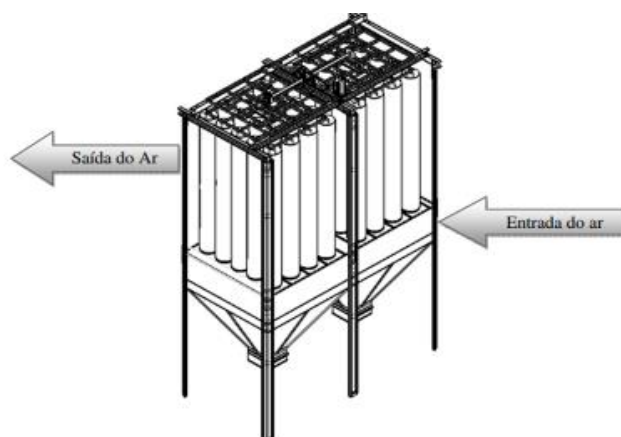
Figura 3: Filtro de manga tipo Convencional (BATISTONI, 2011)



- c) Filtro de manga tipo acionamento mecânico (Figura 4): O filtro por acionamento mecânico, permite que o ar com impurezas passe pelo Plenum inferior, sobre o funil de acúmulo de partículas filtradas, o ar passa pelas mangas e depois é lançado na atmosfera sem impurezas sólidas. A limpeza consiste em sacudir

as mangas, permitindo abrandar o acúmulo de impurezas no funil de coleta (BATISTONI, 2011).

Figura 4: Filtro de manga tipo acionamento mecânico (BATISTONI, 2011)



3.3.1.2 Filtro de Cartuchos

Esse tipo de filtro representado na Figura 5, consiste em um cilindro poroso, podendo ser liso, bobinado e ranhurado, permitindo uma grande área filtrante. A montagem é feita em vasos de pressão de várias dimensões e matérias-primas, com intuito de separar as partículas no processo de purificação. Com o aumento da área filtrante a velocidade de filtração diminui, melhorando assim o desempenho de filtração (CERON, 2013).

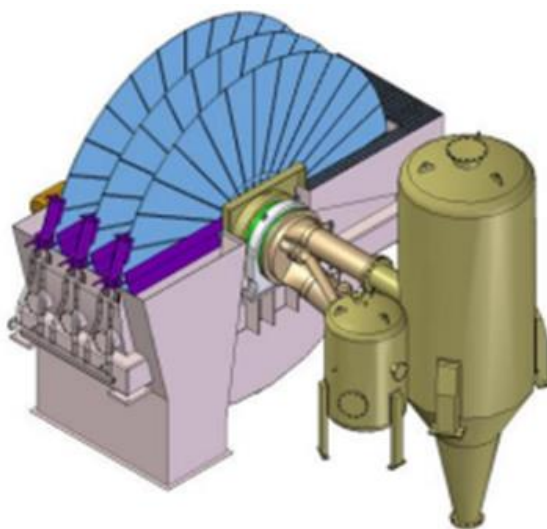
Figura 5: Filtro de cartucho (CERON, 2013).



3.3.1.3 Filtro de Disco

Este tipo de filtro de disco a vácuo (Figura 6) é composto por discos que estão na vertical e paralelos entre si, no centro ocorre a passagem de ar comprimido. O sistema consiste em uma diferença de pressão entre dois lados do disco, fazendo com que a polpa seja sugada do tanque e se aloje na superfície do filtro. Esse filtro não leva o meio filtrante, com isso após o descarte é necessário realizar a limpeza do filtro através do sopro (Silva, 2018).

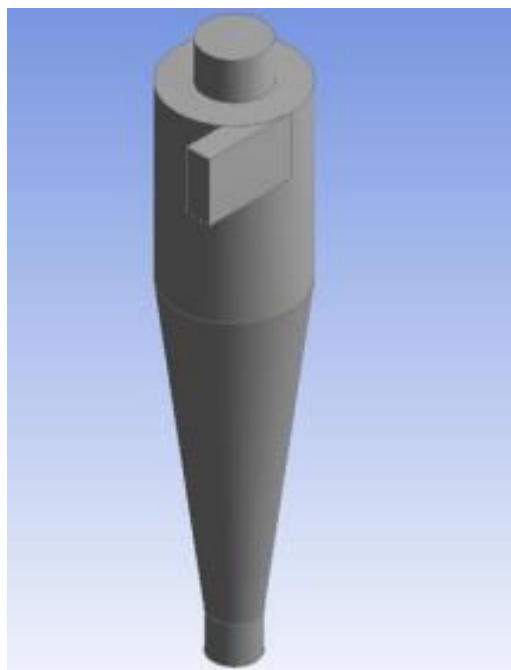
Figura 6: Filtro de disco a vácuo (Silva, 2018)



3.3.1.4 Ciclones

Os ciclones são equipamentos amplamente utilizados na separação gás-sólido na indústria, sendo eficazes para partículas de $5\mu\text{m}$ a $200\mu\text{m}$, podendo separar partículas menores dependendo de sua densidade e concentração. Suas principais vantagens incluem baixos custos de instalação e operação, construção simples, ausência de partes móveis, alta confiabilidade, facilidade de manutenção e capacidade de operar em amplas faixas de temperaturas, pressões e cargas de sólidos (BOF, 2018).

Figura 7 - Ciclone industrial (Adaptado BOF, 2018)



3.3.1.5 Lavadores de gases

Esses equipamentos utilizam um líquido, geralmente água, para coletar partículas ou névoas, removendo-as por mecanismos como impactação inercial, deposição gravitacional, interceptação ou difusão browniana, dependendo do tamanho das partículas. Além de sua eficiência na remoção de partículas coesivas, corrosivas ou explosivas, os lavadores de gases podem também absorver gases solúveis, o que os torna versáteis para diversas aplicações industriais (MEILI, 2006).

3.4 DESTINAÇÃO DOS RESÍDUOS

Os resíduos provenientes do processo de jateamento abrasivo por serem considerados de classe, devido ao fato de apresentarem em sua composição resquícios de óleos e graxas, devem ser armazenados em área autorizada pelo órgão de controle ambiental à espera da destinação adequada (ZANATTA, 2016). Tendo em vista o exposto, é importante salientar que além do armazenamento, os resíduos também podem ser reutilizados de algumas formas específicas, de forma simples, a granalha pode ser redirecionada para o processo de jateamento.

O reuso envolve a utilização de produtos ao final de sua vida útil, possibilitando diversas formas de aproveitamento. Em casos mais simples, os produtos podem ser reutilizados após uma limpeza adequada, enquanto, em situações mais complexas, é necessário realizar processos específicos de reparação ou renovação para viabilizar seu reaproveitamento. (ROSA; FRACETO; CARLOS, 2012 apud ZANATTA, 2016).

Outra maneira de destinação destes resíduos é a reciclagem dos mesmos, que é o aproveitamento do material de que um produto é feito para a fabricação de outro tipo de produto, as formas de se reciclar a granalha são a adição de resíduos em pó de granalha de aço a concreto e massa asfáltica, descontaminação da granalha de aço para reuso e na fabricação de briquetes (ZANATTA, 2016).

3.5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A utilização de tecnologias do ramo computacional vem crescendo ao longo dos últimos anos. Com essa ferramenta pode-se realizar experimentos e simulações em um curto espaço de tempo, possibilitando agilidade na observação e análises de processos (ROCHA, 2012).

A simulação computacional é uma ferramenta essencial para resolver as equações que governam processos físicos, como o movimento de fluidos e o transporte de partículas. Muitos fenômenos da vida real são descritos por equações diferenciais parciais, que envolvem variáveis como tempo, comprimento e temperatura. Para resolver esses problemas, existem três abordagens principais: experimental, analítica e computacional. Nesses casos, a simulação computacional se torna fundamental, pois utiliza métodos numéricos, como o método das diferenças finitas, para discretizar os problemas contínuos e torná-los solucionáveis por computador. Essa abordagem permite que modelos complexos de fluidos sejam resolvidos de maneira eficiente e prática (FERREIRA, 2010).

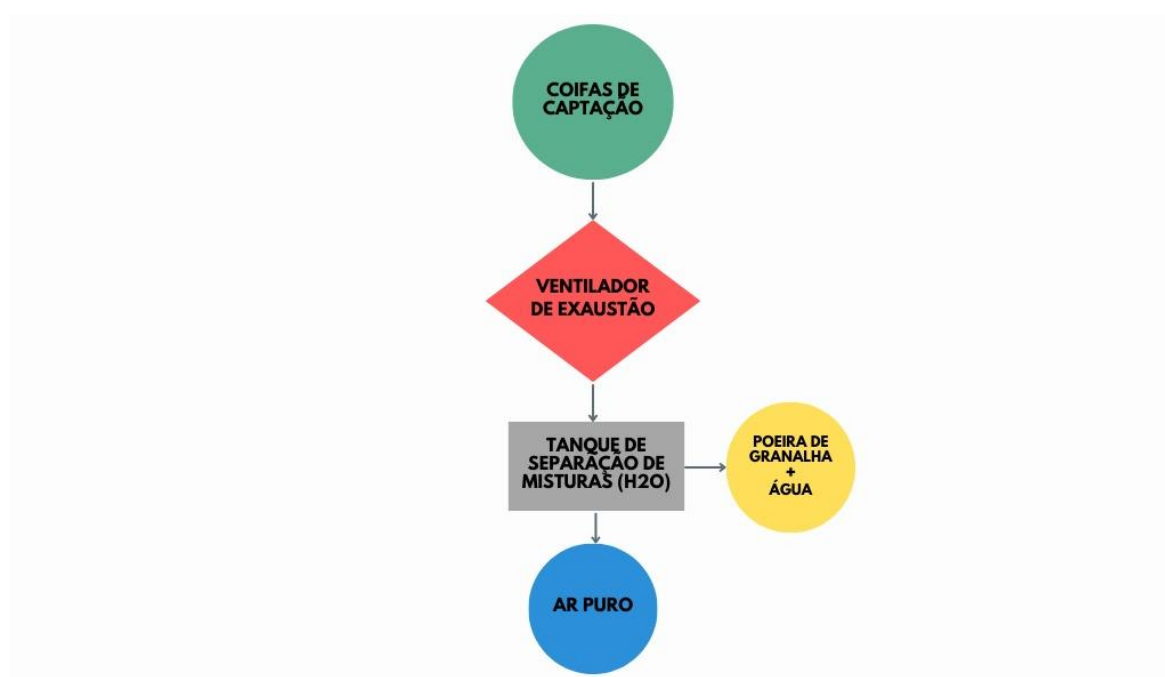
4 METODOLOGIA

A presente seção apresenta a metodologia empregada neste trabalho. Serão descritas as etapas realizadas, bem como as ferramentas empregadas.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA

O fluxo do processo de remoção de partículas, pode ser resumido no fluxograma na Figura 8.

Figura 8: Fluxograma do processo



A ideia inicial do processo, consistia que ao ligar o exaustor, a poeira fosse direcionada para a caixa separadora, e ali os resíduos iriam se misturar com a água e o ar puro seria expulso para o ambiente.

Em uma análise inicial, foi possível avaliar algumas condições do equipamento utilizado no processo, destacando principalmente algumas dimensões que a princípio são base de todo o desenvolvimento deste trabalho. Portanto, os componentes dimensionados foram:

1. Caixa para o armazenamento do líquido (Figura 9), com as seguintes dimensões: 1210mm de comprimento x 820mm de largura x 800mm altura;

Figura 9: Caixa de armazenamento de água



2. A tubulação de entrada (Figura 10), com tubo de saída e bocal de saída com diâmetros de 420 mm e 800mm, respectivamente.

Figura 10: Tubulação de entrada e saída



4.1 PARÂMETROS DO SISTEMA

Na Tabela 1 estão apresentados os valores invariáveis das propriedades contidas no processo. Esses valores foram estabelecidos com base nas características dos

materiais envolvidos, que consistem no ar com temperatura de 25°C. Esses materiais foram selecionados devido à sua relevância no contexto do processo de secagem em questão, e suas propriedades físicas e térmicas foram mantidas constantes para garantir a consistência e a precisão dos resultados obtidos nas simulações.

Tabela 1: Propriedades do processo

Propriedade físico químicas	Fluido: ar (25°C).	Fluido: água (25°C)	Partícula (Granalha)
Massa específica (kg/m ³)	1,184	997	2438
Peso Molecular(kg/mol)	28,97	18,015	55,591
Diâmetro da partícula (μm)	-	-	653,04

A Tabela 2 apresenta os valores de quatro medições realizadas durante a coleta de dados do sistema. A velocidade do fluxo na entrada foi medida utilizando um anemômetro. Já o fluxo mássico de partículas no sistema foi determinado por meio de testes realizados na ausência de água, garantindo que seu valor final não fosse influenciado.

Tabela 2: Coleta de dados do sistema

Medição	Velocidade na entrada (m/s)	Fluxo mássico de partículas (g/s)
1	25,3	15,05
2	24,8	14,86
3	25,2	14,5
4	25,2	15,1
Media	25,2	14,96

4.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A definição da granulometria da granalha presente no processo foi obtida por meio de ensaios em laboratório utilizando para tal a técnica das séries de Tyler, conforme metodologia apresentada por Zanotto (1996). Para tanto, foram empregados os seguintes equipamentos, presentes no laboratório da FAACZ:

1. Equipamento vibrador de peneiras;
2. Balança de precisão de 0,1g;
3. Conjunto de peneiras ABNT, números: 8, 1, 20, 30, 40, 80 e 100, para o ensaio da amostra antes de seu uso no jateamento;
4. Conjunto de peneiras ABNT, números: 20, 30, 40, 50, 80, 100, 270 para o ensaio da amostra depois de seu uso no jateamento;
5. Estufa de secagem;
6. Escova de aço para a limpeza das peneiras.

Para a avaliação da granulometria em laboratório foi necessário o recolhimento de 1,5Kg de granalha antes do processo e 1,5Kg de granalha pós uso. Os pacotes foram devidamente identificados e enviados para análise.

Inicialmente foram pesadas todas as peneiras vazias, e então foi medido o peso de uma amostra de 120g de granalha grossa (antes de ser utilizada) e de uma amostra de 120g de granalha fina (após ser utilizada). As amostras foram então secadas a fim de se realizar uma nova pesagem da granalha em 100g. As amostras foram processadas no vibrador de peneiras com velocidade 8 durante 10 minutos, a fim de que todas as partículas presentes na amostra tenham condição de permanecer na sua peneira correta.

Após a realização do procedimento acima, novamente pesou-se as peneiras, porém, com uma certa quantidade de material retido por entre seus vãos. Adiante deverá ser realizado o cálculo do MF e do DGM, utilizando, para isso, as equações apresentadas na seção 3.2.

A Figura 11, mostra a pesagem da granalha pós-uso, a Figura 12 mostra a pesagem da granalha pós-uso, a Figura 13, mostra a pesagem das peneiras e a Figura 14, mostra a pesagem da granalha pós-uso.

Figura 11: Amostra da granalha pós - uso

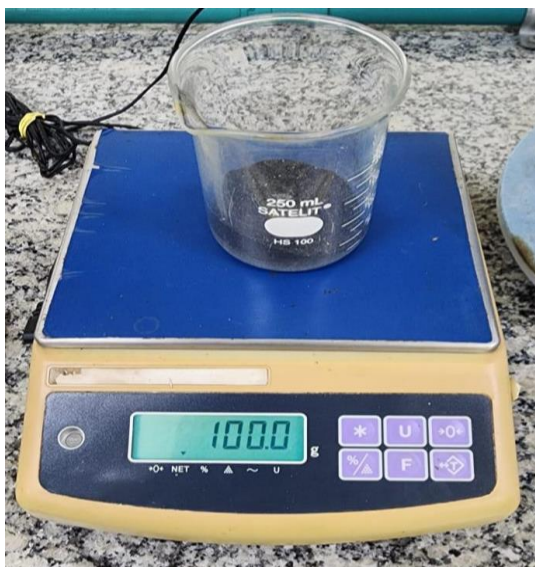


Figura 12: Agitador de peneiras



Figura 13: Pesagem das peneiras



Figura 14: Amostra da gralha pura



4.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Para a realização da simulação computacional foi utilizado o Ansys CFX 2024 R1 (ANSYS, 2023), que é um software de dinâmica de partículas. Neste software é possível realizar a modelagem de formas de partículas reais, incluindo quaisquer sólidos, cascas 2D e fibras rígidas.

Inicialmente foi feita a modelagem 3D do sistema no software Inventor (INVENTOR, 2021), partindo das informações dimensionais obtidas do sistema na vista técnica. Posteriormente, o modelo (em formato STL) foi exportado importada para o ambiente ANSYS SpaceClaim, para a criação da malha computacional. Nessa etapa foram definidos os sub-volumes da geometria.

4.2 MALHA NUMÉRICA

No presente estudo, a malha do sistema de despoeiramento foi gerada considerando parâmetros específicos para representar adequadamente a geometria e capturar os fenômenos físicos do escoamento turbulento.

A malha foi composta por elementos tetraédricos e compreendeu 31835 elementos, com 7107 nós. O domínio foi dividido em duas regiões de malhas distintas, sendo a região inferior correspondendo ao volume ocupado inicialmente pela água. As duas regiões foram conectadas por uma interface fluido-fluido, permitindo livre fluxo de massa entre elas.

As condições de contorno na entrada foram uma velocidade 25,2 m/s, com uma vazão mássica de particulado de 0,01496 kg/s e diâmetro de 653 μm , conforme medições em campo. Na saída, foi adotado pressão manométrica nula. Todas as demais superfícies foram consideradas como paredes lisas. Inicialmente, a região superior do domínio foi toda preenchida com ar, ao passo que a região inferior foi completamente preenchida com água.

A simulação foi do tipo transiente e abrangeu um tempo total de 10 s, com passo de tempo de 0.01 s, totalizando 1000 iterações. O modelo de turbulência empregado foi o k-Omega generalizado, com seus parâmetros nos valores padrão do software. O

controle da solução utilizou um esquema *High Resolution* para o esquema de advecção, com um esquema transiente *Second Order Backward Euler*. O critério de convergência foi um resíduo RMS inferior a 10^{-4} .

A Figura 15, mostra a malha formada pela simulação mediante as informações citadas anteriormente.

Figura 15: Malha gerada da simulação



4.4 MODELO MATEMÁTICO

A fim de calcular as propriedades do escoamento em cada um dos pontos do domínio – correspondentes ao centro dos elementos da malha, o CFX resolve as equações que descrevem o movimento dos fluidos utilizando-se do método dos volumes finitos. As equações são descritas a seguir.

4.2.1 Equações da fase gasosa

O escoamento de partículas é descrito utilizando o modelo multifásico Euleriano-Lagrangeano. Nesse contexto, o movimento das partículas é acompanhado através de um sistema de equações diferenciais ordinárias com respeito ao tempo, que são resolvidas para determinar seu comportamento ao longo do percurso no domínio de escoamento. Paralelamente, o comportamento da fase gasosa é representado pelas equações de conservação de massa e momento linear.

Para a fase gasosa considera-se:

- O regime é permanente;
- Não há reação química;
- Não houve variação de temperatura nem trocas térmicas;
- As propriedades físico-químicas são constantes;

Com base nessas considerações, as equações de conservação de massa e de movimento linear podem ser simplificadas para a forma:

a) Equação da continuidade Equação (3)

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (3)$$

ρ = Densidade da fase continua;

$\vec{u}$ = Vetor velocidade;

b) Equação de momento Linear

$$\nabla \cdot (p\vec{u}\vec{u}) = \nabla P + \nabla \cdot \tau + S_m \quad (4)$$

S_M = Forças de corpo e de rotação;

P = Pressão;

τ = Tensor de cisalhamento;

c) Modelo de turbulência

O modelo utilizado para a simulação foi o RNG $K - \varepsilon$, ele é uma variação do modelo $K - \varepsilon$ padrão, desenvolvido com base na teoria do grupo de renormalização (RNG), para descrever de forma mais precisa escoamentos turbulentos em diferentes condições. O sistema basicamente incorpora correções que aprimoram a previsão de escoamentos com alta curvatura, separação ou gradientes de velocidade, incluindo um termo adicional na equação de dissipação para ajustar os efeitos da turbulência.

d) Equações da fase particulada

Equação da interação entre a fase gasosa e fase particulada, Equação(5);

$$\vec{F} = m_p \frac{d\vec{u}_p}{dt} \quad (5)$$

Onde:

m_p = Massa da partícula;

u_p = Vetor velocidade da partícula;

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Os resultados obtidos da análise granulométrica do material particulado antes e após o uso são mostrados na Tabela 3 e Tabela 4.

Tabela 3: Análise granulométrica da granalha pura

ABNT	DIAM.FUR (mm)	PESO (g)	P+F	Pri	%R	Ki	Ki*%R
8	2,86	406,5	417,2	10,7	10,7	7	74,9
12	1,68	298,3	320,8	22,5	22,5	6	135
20	0,85	260,2	306,5	46,3	46,3	5	231,5
30	0,6	194	206,3	12,3	12,3	4	49,2
40	0,42	206,2	212,8	6,6	6,6	3	19,8
80	0,18	181,5	182,9	1,4	1,4	2	2,8
100	0,15	175,6	175,8	0,2	0,2	1	0,2
FUNDO	0	477	477,2	0,2	0,2	0	0
Media Total				100,2	100,2		513,4

Resultado obtido após análise granulométrica da granalha pura: $DGM = 3630,954 \mu m$

Tabela 4: Análise granulométrica da granalha pós-uso

ABNT	DIAM.FUR (mm)	PESO	P+F	Pri	%R	Ki	Ki*%R
20	0,85	260,1	264	3,9	3,9	7	27,3
30	0,6	193,9	198,2	4,3	4,3	6	25,8
40	0,42	206,3	213,7	7,4	7,4	5	37
50	0,3	202,4	212	9,6	9,6	4	38,4
80	0,18	181,6	201,6	20	20	3	60
100	0,15	175,8	181,4	5,6	5,6	2	11,2
270	0,053	175,6	191,5	15,9	15,9	1	15,9
FUNDO	0	477	491,7	14,7	14,7	0	0
Media total				81,4	81,4		215,6

Resultado obtido após análise granulométrica da granalha pós-uso: $DGM = 653,0407 \mu m$.

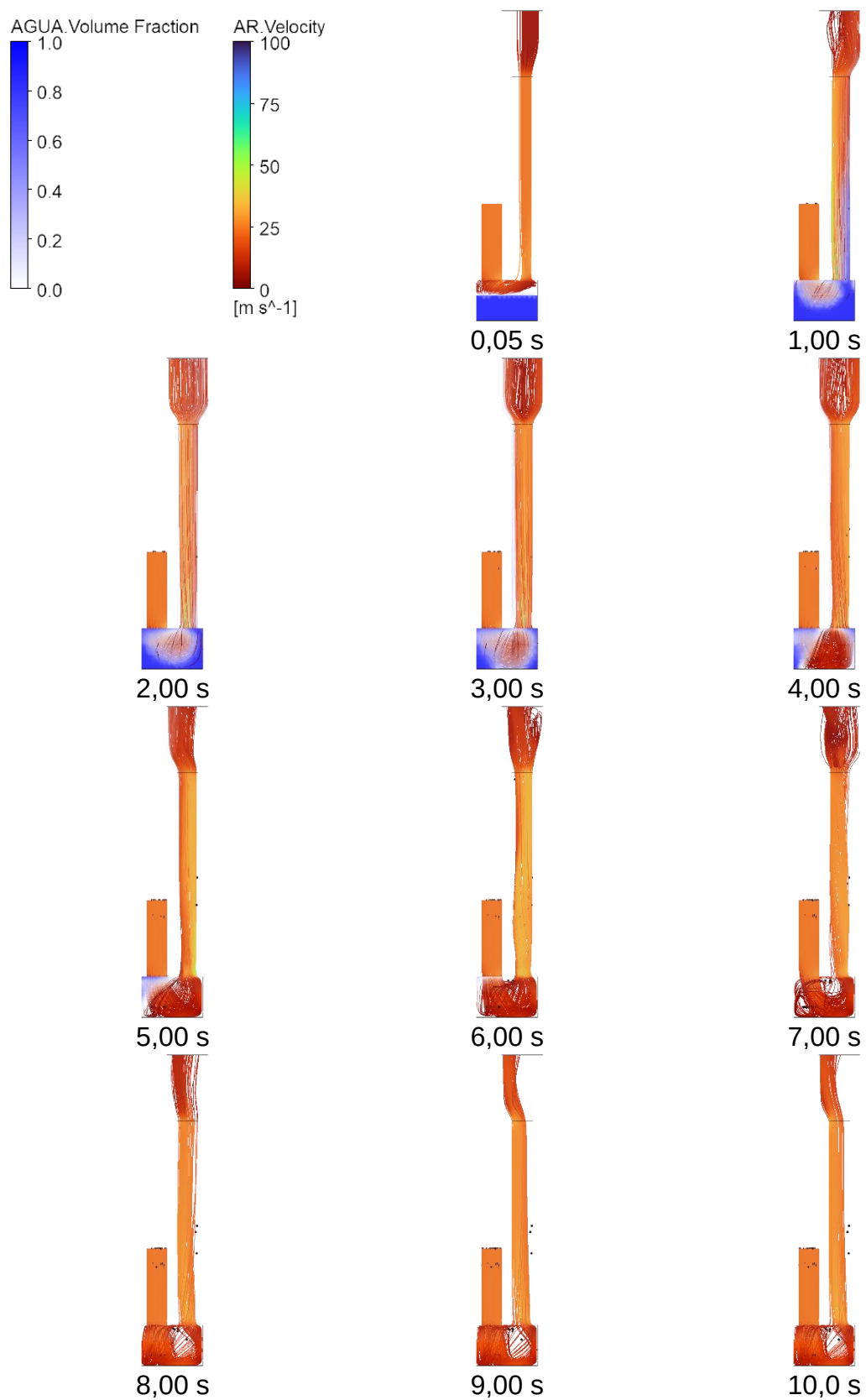
5.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

A Figura 16, permite observar a evolução do escoamento do interior do sistema de despoeiramento durante o primeiro minuto do escoamento. A fração volumétrica da água (tons azuis) reflete diretamente o nível de água no interior do equipamento. É possível observar que, inicialmente, o fluxo de ar é desviado pelo volume líquido, porém, com o decorrer do tempo, o ar passa a se misturar com a água e, devido à transferência de quantidade de movimento, a água é, aos poucos, expulsa através da exaustão do equipamento. Após os 50 segundos de simulação, já não há mais água na caixa, e o escoamento entra em uma configuração de regime permanente.

Para uma análise mais aprofundada, é fundamental examinar detalhadamente cada instante de tempo ao longo da simulação. A abordagem permite identificar com precisão os fenômenos que ocorrem no interior do sistema e compreender a dinâmica do escoamento do ar e da água em diferentes etapas do processo.

- **0,05 segundos:** No instante inicial, observa-se que a água ocupa o compartimento inferior do dispositivo. O fluxo de ar começa a interagir com o líquido, gerando uma leve movimentação sem grandes alterações no volume.
- **1,0 segundo:** A influência do fluxo de ar intensifica-se, promovendo o deslocamento da água. Nota-se que o líquido é parcialmente direcionado à saída do sistema, indicando o início do esvaziamento.
- **2,0 a 3,0 segundos:** A água começa a ser projetada para fora do dispositivo de forma mais acentuada. A alta velocidade do ar dentro do sistema favorece a rápida remoção do líquido, deixando áreas do compartimento inferior quase completamente desprovidas de água.
- **4,0 a 6,0 segundos:** A fração volumétrica de água reduz-se ainda mais, com praticamente todo o líquido sendo arrastado para fora do dispositivo. O compartimento inferior apresenta-se quase vazio, confirmando a incapacidade do sistema em reter o particulado.
- **7,0 a 10,0 segundos:** Nos instantes finais, o compartimento está praticamente seco. O fluxo de ar ocupa completamente a região antes preenchida por água, evidenciando o rápido esvaziamento e a ineficiência do projeto em garantir a retenção do particulado.

Figura 16 : linhas de corrente do escoamento de ar (tons alaranjados) e fração volumétrica da água (tons azulados) no interior do dispositivo em instantes de tempo discretos entre 0,05 e 10,0 segundos de simulação.

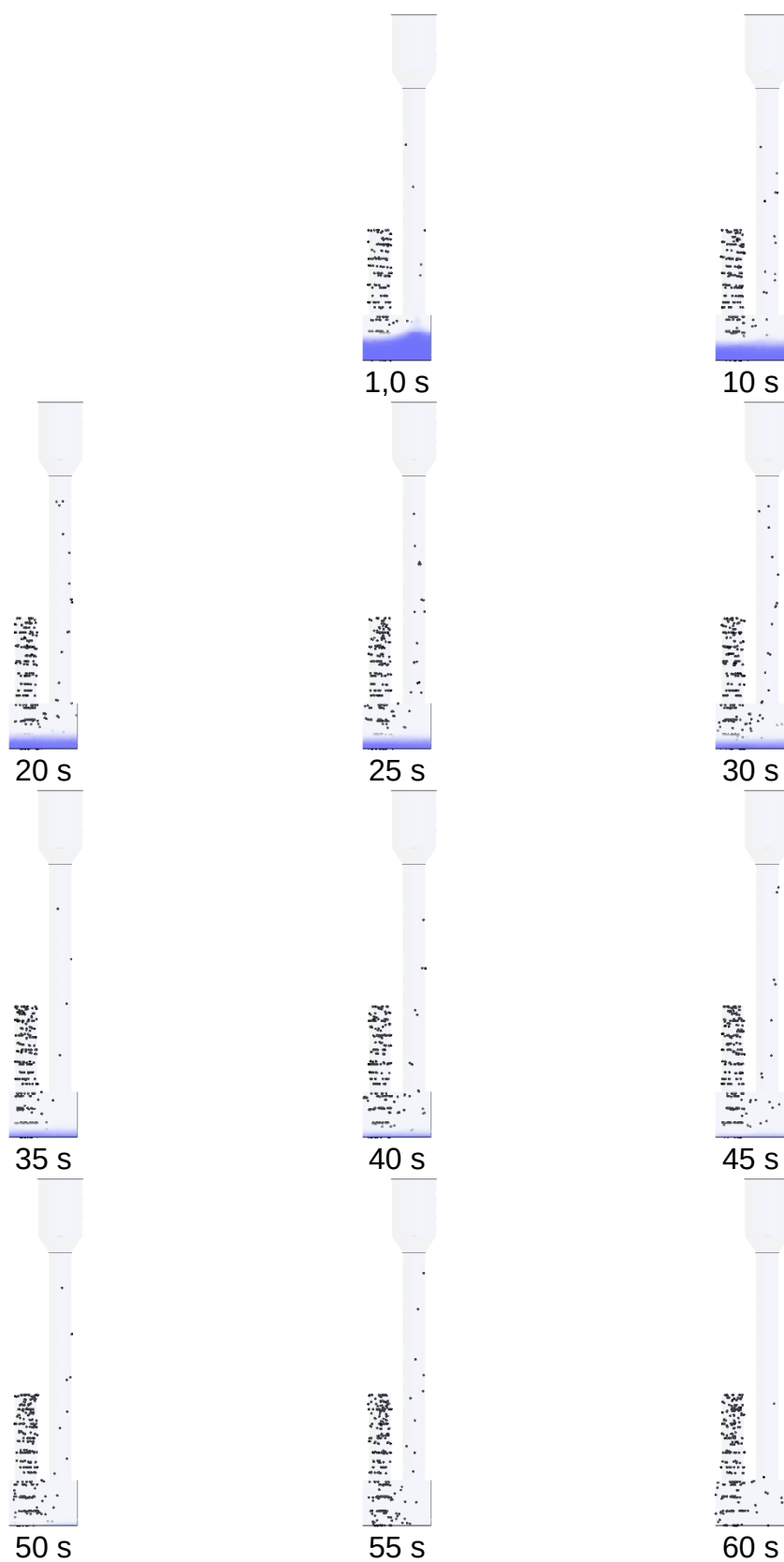


Quanto ao comportamento do material particulado, os resultados mostram que, na medida em que o tempo avança, ocorre um acúmulo de material particulado no interior do equipamento, com algumas partículas sendo emitidas para o meio externo. Na Figura 17 é possível observar o acúmulo progressivo de particulado no interior do domínio simulado para diferentes instantes de tempo durante o primeiro minuto da simulação.

Durante o período de 1 a 60 segundos, foram observados os seguintes comportamentos:

- **1 a 10 segundos:** Nos instantes iniciais, as partículas começam a se acumular na região inferior do sistema, sendo parcialmente retidas pela fase líquida, representada em azul mais escuro. Nesse estágio, o sistema ainda consegue conter parte do material particulado, embora algumas partículas já sejam emitidas para o meio externo.
- **20 a 45 segundos:** Com o avanço do tempo, há um aumento expressivo no acúmulo de particulados na parte inferior do sistema. A fase líquida começa a perder eficiência devido à saturação, enquanto partículas adicionais são expelidas para fora, indicando um limite operacional do sistema.
- **60 segundos:** No estágio final, observa-se que, devido à alta velocidade do fluxo, a fase líquida é projetada para fora do sistema, juntamente com as partículas. Esse comportamento reduz drasticamente a eficiência do despoeiramento, contribuindo para a emissão de material particulado e da própria água utilizada no processo. Esse resultado evidencia que o sistema não é capaz de lidar com as condições operacionais em cenários prolongados, reforçando a necessidade de melhorias

Figura 17: comportamento do material particulado no interior do sistema de despoeiramento em instantes de tempo selecionados entre 1,0 e 60 segundos de simulação. A porção em azulado mais escuro representa a fase líquida.

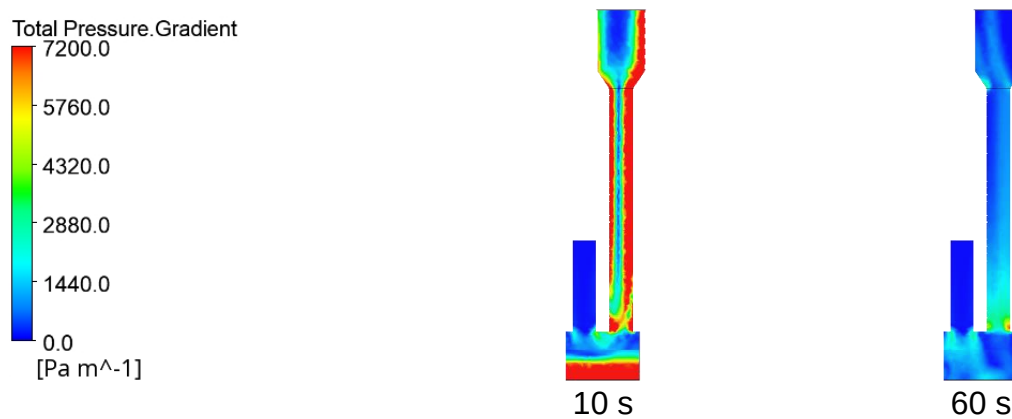


O comportamento do sistema de despoeiramento observado em campo foi coerente com o observado na simulação, no sentido de que também neste a água é completamente expelida e, ao ser desligado o sistema de exaustão, foi registrado material particulado acumulado no equipamento. Entretanto, no sistema real isso acontece após cerca de 30 minutos de funcionamento do equipamento. Essa diferença pode ser atribuída a uma possível baixa acurácia da medição da velocidade no equipamento em campo, com possível superestimação da velocidade do escoamento que entra no sistema de despoeiramento. Outro aspecto não reproduzido pela simulação – nesse caso, devido a uma limitação da implementação dos processos físicos envolvidos no próprio software – é que no equipamento real existe a formação de uma espécie de lama devido à mistura do material particulado com a água. Essa lama tem a tendência de aderir às superfícies internas da caixa de separação, bem como na superfície do tubo de exaustão. Conforme relatos dos operadores do equipamento em campo, essa espécie de lama é um inconveniente, uma vez que ela é extremamente difícil de ser removida das superfícies.

Mesmo com as limitações da simulação e as diferenças em relação ao observado no equipamento real, ainda assim é possível, através da simulação, compreender o comportamento do equipamento. Os resultados permitem a compreensão de que, a medida em que percorrem o tubo de exaustão do sistema de despoeiramento, as partículas perdem energia, o que dificulta a sua emissão para o exterior e pode explicar o acúmulo de material particulado no interior do sistema na Figura 17. De fato, a Figura 18 mostra a existência de várias zonas com alto gradiente negativo de pressão total, indicando as regiões que mais colaboram com a perda de carga do escoamento para dois instantes de tempo distintos, com e sem a presença da fase líquida. É possível observar que enquanto a fase líquida está presente, os gradientes de pressão total são mais intensos na parte inferior da caixa de separação, bem como no tubo de exaustão. Após a exaustão da fase líquida, é nas regiões próximas aos pontos de conexão da caixa separadora com os tubos de entrada e saída que ocorrem os valores mais intensos do gradiente de pressão total. Dessa forma, independentemente da presença da fase líquida, ao atingir o tubo de exaustão, o escoamento já terá perdido parte da energia, o que pode influenciar a quantidade material particulado que é emitido para o meio externo. Isso pode explicar parte do

material particulado que se acumula no equipamento real mesmo após toda a água ser expulsa do sistema.

Figura 18: gradiente de pressão total no interior do domínio simulado para os instantes 10 e 60 segundos de simulação.



6 CONCLUSÃO

Com base nos objetivos, foi possível definir a granulometria da granalha por meio de ensaios laboratoriais, identificando características críticas do material que influenciam diretamente no desempenho do sistema. Por meio de simulações e análises computacionais, foram determinados indicadores importantes que evidenciam as limitações do sistema, permitindo uma avaliação detalhada de sua eficiência. Além disso, as causas que levaram à ineficiência do sistema de despoejamento do material abrasivo foram descritas, destacando fatores operacionais e estruturais que impactaram negativamente o processo, oferecendo subsídios para futuras melhorias e otimizações do sistema.

Observa-se que o dispositivo projetado para a separação do particulado gerado no processo de jateamento abrasivo, apresenta limitações em sua funcionalidade. A análise dinâmica do comportamento do escoamento do ar e da água ao longo do tempo evidenciou que o sistema não é capaz de reter de forma eficiente o particulado e o líquido no compartimento inferior, resultando em um rápido esvaziamento. Esse fenômeno é causado principalmente pela alta velocidade do fluxo de ar, que arrasta a água e o particulado para fora do dispositivo em poucos segundos, comprometendo a eficiência do processo.

Os dados demonstram que, nos tempos iniciais, a água ocupa parcialmente o compartimento, mas rapidamente é deslocada, tornando o sistema incapaz de realizar a captura do particulado. A partir disso, é evidente que o projeto atual precisa ser revisado e otimizado para melhorar sua eficácia. Modificações na geometria interna do dispositivo, ajustes na velocidade do fluxo de ar ou a introdução de barreiras que promovam maior retenção de água podem ser alternativas para solucionar as deficiências identificadas.

Portanto, como alternativa ao sistema atual, sugere-se a implementação de outros dispositivos, como filtros de manga, ciclones ou filtros de cartuchos, que são amplamente utilizados na indústria para captação eficiente de partículas. Esses sistemas, quando adequados às características físicas do material particulado e às taxas de emissão, podem oferecer maior eficiência de retenção, reduzindo impactos ambientais e otimizando o processo.

Este estudo, ao evidenciar as limitações do sistema atualmente utilizado, estabelece uma base consistente para futuras pesquisas e melhorias. Sugere-se, como desdobramento, a realização de análises e simulações detalhadas de outros tipos de sistemas de despoejamento, como os mencionados ao longo do trabalho, com o objetivo de avaliar experimentalmente sua viabilidade técnica e econômica. Tais investigações têm o potencial de fomentar o desenvolvimento de sistemas de filtração mais eficientes e sustentáveis, atendendo tanto às exigências ambientais quanto às demandas do setor industrial.

7 REFERÊNCIAS

BATISTONI, Celésio. **Padronização e desenvolvimento de filtros de mangas**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

BOF, Claudia Giacomini. Desenvolvimento de um ciclone para separação de material particulado de uma corrente de gás de combustão de coqueria “heat recovery”. **Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos**, 2018.

BRASIL. Lei n.º 6938/81, de 31 de agosto de 1981. **Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências**. Ministério da Ciência e Tecnologia. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/9104.html>.

CARVALHO, Max Vinícius Aparecido de. **Avaliação de meios filtrantes para filtro de mangas com sistema de limpeza de jato de ar pulsante do processo de despoeiramento secundário da aciaria de uma indústria siderúrgica**. 2018.

CERON, Luciano Peske; EINLOFT, Sandra Mara Oliveira; LIGABUE, Rosane Angélica. **Nova tecnologia em processo de filtração de particulados de polietileno usando filtro cartucho de poli-imida aromática**. REDIGE, v. 4, n. 1, 2013.

DOS SANTOS, Ricardo Seixas Lima; OLIVEIRA, Francisco de Carvalho. **A aplicação do filtro de manga acoplado com um sistema de aspiração em um galpão de fabricação de painéis para móveis**. 2016

FERREIRA, Valdemir Garcia; DE LIMA, Giseli A. Braz; CORRÊA, Laís. **Simulação computacional de alguns problemas em dinâmica dos fluidos**. In: Proceedings of the 9th Brazilian Conference on Dynamics Control and their Applications. 2010. p. x2.

FREZ, Gustavo Vieira et al. **Simulação fluidodinâmica em ANSYS-CFD da combustão dual-fuel em motores de ignição por compressão utilizando diesel renovável (HVO) com biogás**. 2022.

GRILLO, Gabriel; KREWER, Evandro José. **Produção mais limpa: um comparativo entre os processos de jato de escória de cobre e jato de granalha de aço**. Revista Global Manager Acadêmica, v. 7, n. 1, 2018.

MEILI, Lucas et al. **Estudo do desempenho de lavadores de gases do tipo venturi com seção circular**. 2006.

PALAU, José Carlos Fortes et al. **Avaliação dos efeitos da aplicação do jateamento abrasivo a seco na superfície do aço de ultra-alta-resistência 300M-ESR**. 2011.

ROCHA, Paulo Alexandre Costa; SILVEIRA, João Victor Pinto da. **Estudo e aplicação de simulação computacional em problemas simples de mecânica dos fluidos e transferência de calor**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 34, 2012.

SAMPAIO, João Alves; SILVA, Fernanda Arruda Nogueira Gomes da. **Análise granulométrica por peneiramento**. CETEM/MCTI, 2007.

SANTOS, Nayara Stefanie Pereira dos; SANTOS, Paola Palmeira dos. **Reutilização do óxido de alumínio após o processo de jateamento**. 2017.

SERIZAWA, Gustavo Henrique Ramos; GALLEGO, Juno. **Análise estrutural da aplicação do processo de jateamento com granalhas de aço (shot peening) em rotores hidroelétricos**. In: Anais do XII Congresso Nacional dos Estudantes de Engenharia Mecânica. 2005.

SILVA, Ingrid Guimarães Silveira e. **Utilização de meios filtrantes alternativos para filtragem a vácuo**. 2018.

SILVA, João Paulo Paes de Araújo et al. **Secador ciclônico: modelagem e simulação via CFX**. 2016.

ZANOTTO, Dirceu Luis; BELLAVER, Claudio. **Método de determinação da granulometria de ingredientes para uso em rações de suínos e aves**. Embrapa Suínos e Aves, 1996.