

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

MARIANA WACHED DE PAIVA CÔRTEZ

**PROPOSIÇÃO E AVALIAÇÃO DE MEDIDAS DE CONTROLE DE MATERIAL
PARTICULADO EM UM PROCESSO DE ELETROFUSÃO**

Poços de Caldas-MG
2015

MARIANA WACHED DE PAIVA CÔRTEZ

**PROPOSIÇÃO E AVALIAÇÃO DE MEDIDAS DE CONTROLE DE MATERIAL
PARTICULADO EM UM PROCESSO DE ELETROFUSÃO**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL-MG – Campus Poços de Caldas-MG. Orientador: Prof. Dr. Luiz Felipe Ramos Turci e Co-orientador: Prof. Dr. Marcos Vinícius Rodrigues.

Poços de Caldas-MG
2015

C828p Côrtes, Mariana Wached de Paiva.
Proposição e avaliação de medidas de controle de material
particulado em um processo de eletrofusão / Mariana Wached de
Paiva Côrtes. – Poços de Caldas, 2015.
94 f. -

Orientador: Luiz Felipe Ramos Turci.
Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) -
Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2015.
Bibliografia.

1. Separadores (Máquinas). 2. Ar - Poluição. 3. Material
Particulado. I. Turci, Luiz Felipe Ramos. II. Título.

CDD: 628.53

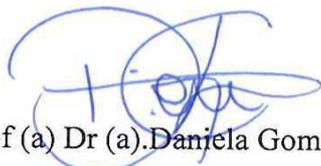
MARIANA WACHED DE PAIVA CÔRTEZ

**PROPOSICAO E AVALIACAO DE MEDIDAS DE CONTROLE DE
MATERIAL PARTICULADO EM UM PROCESSO DE ELETROFUSAO**

A banca examinadora abaixo-assinada, aprova a Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Ciência e Engenharia Ambiental, pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Alfenas.

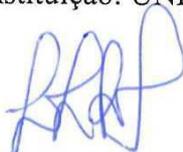
Área de Concentração: Ciência e Engenharia Ambiental.

Aprovada em: 21 de dezembro de 2015.



Prof (a) Dr (a).Daniela Gomes Horta

Instituição: UNIFAL-MG



Prof (a) Dr (a).Luiz Felipe Ramos Turci

Instituição: UNIFAL-MG



Prof (a) Dr (a). Maurício Guimarães Bergerman

Instituição: USP

AGRADECIMENTOS

Aos professores Dr. Luiz Felipe Ramos Turci e Dr. Marcos Vinícius Rodrigues, pela orientação e co-orientação, pela paciência, troca de conhecimentos, experiência e pelos anos de trabalho. E ao professor Ms. Michiel Wichers Schrage pelo apoio durante o desenvolvimento do trabalho.

Aos colaboradores da Elfusa, particularmente Edmilson, Leandro e Alexandre por todo suporte que tornaram possível a realização deste projeto.

E a minha família por me apoiarem em mais esta conquista.

RESUMO

O processamento de materiais sólidos gera emissão e suspensão de material particulado, por este motivo, as indústrias vêm fazendo maiores investimentos na prevenção e minimização de emissões, revertendo essas perdas em lucros, diminuindo suas perdas, utilizando a proteção ambiental como um instrumento de marketing, aumentando a competitividade da empresa no mercado. A motivação deste projeto vem justamente da necessidade de mitigação da emissão de particulados de uma indústria que utiliza o processo de eletrofusão em seu sistema produtivo, pois há fuga de material particulado durante o processo. O objetivo principal do projeto consiste na análise de eficiência do sistema de exaustão para orientação de proposições de melhorias no mesmo. Foram determinados 4 pontos de coleta de amostra de maneira que representasse todo o processo, as amostras foram coletadas 3 vezes por dia, durante 5 dias. Foram feitas a caracterização química, utilizando fluorescência de raio-x e física utilizando a técnica de espalhamento de luz no equipamento Malvern. Posteriormente foi feita a elaboração das curvas de distribuição granulométricas para determinação do diâmetro de corte do ciclone. Para avaliação do sistema de exaustão foi calculada a eficiência do ciclone através do balanço de massa e através do ajuste de modelo RRB linear e não-linear calculados através do resultado de análise granulométrica. A conclusão foi de que é necessário fazer melhoria no ciclone para que haja melhoria no sistema de exaustão da empresa e redução da perda e emissão de material particulado. As análises orientaram o redimensionamento do ciclone.

Palavras-chave: Ciclone. Poluição atmosférica. Material particulado.

ABSTRACT

The processing of solid materials generates emission and suspension of particulate matter - for this reason industries are making major investments in prevention and minimization of emissions, returning those losses into profits by reducing their losses, using environmental protection as a marketing tool, increasing the company's competitiveness in the market. The motivation of this project right comes from the need to mitigating the particulate emissions of an industry that uses the electrofusion process in its production system because there is escape of particulate matter during the process. The main objective of the project consists in analyzing the efficiency of the exhaustion system to guide improvement propositions in it. Four representative sampling points were, samples were collected three times a day during 5 days. Chemical and physical characterization were made by using x-ray fluorescence and with light scattering technique with the Malvern equipment, respectively. After that, the particle size distribution curves were traced so the cyclone cut diameter could be determined. In order too evaluate the exhaustion system it was calculated cyclone efficiency by mass balance; by using the RRB parameters adjusted by linear and nonlinear model adjustment using the results of particle size analysis. The conclusion was that it is necessary to improve the cyclone in order to improve the exhaustion system efficiency reducing the loss and emission of particulate matter. The analyzes guided the resizing of the cyclone.

Key words: Cyclone. Atmospheric pollution. Particulate matter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma do Processo Produtivo	20
Figura 2 – Fuga de Material Particulado no forno elétrico.....	21
Figura 3 – Esquemático do sistema de exaustão.....	30
Figura 4 – Escoamento em um ciclone.	32
Figura 5 – Parâmetros geométricos dos ciclones.....	33
Figura 6 – Exemplo de representação gráfica da distribuição acumulativa $x(D)$ para o modelo RRB, em que $D_{62,3}$ refere-se ao diâmetro D para $x = 0,623$	36
Figura 7 – Exemplo de representação gráfica da distribuição acumulativa $x(D)$ para o modelo GGS.	37
Figura 8 – Equipamento MT-360.....	42
Figura 9 – Teste 510	43
Figura 10 – Princípio de funcionamento do Picnômetro.	44
Figura 11 – Indicação dos pontos de amostragem.	46
Figura 12 – Amostragem do material sendo alimentado no forno.....	47
Figura 13 – Aparato de amostragem do material alimentado no ciclone.	47
Figura 14 – Forma de abertura e fechamento do ponto de amostragem.	48
Figura 15 – Material sendo coletado do amostrador.....	48
Figura 16 – Amostragem do material coletado no <i>Underflow</i> do ciclone.....	49
Figura 17 – Amostragem do material retido no filtro manga.	49
Figura 18 – Curva granulométrica da 2ª amostragem – 2ª batelada.....	60
Figura 19 – Curva granulométrica 3ª amostragem – 1ª batelada.....	60
Figura 20 – Curva granulométrica 1ª amostragem – 2ª batelada.....	61
Figura 21 – Curva granulométrica 2ª amostragem – 2ª batelada.....	62
Figura 22 – Curva granulométrica 3ª amostragem – 2ª batelada.....	62
Figura 23 – Curva granulométrica 1ª amostragem – 3ª batelada.....	63

Figura 24 – Curva granulométrica 2ª amostragem – 3ª batelada.....	64
Figura 25 – Curva granulométrica 3ª amostragem – 3ª batelada.....	64
Figura 26 – Curva granulométrica 1ª amostragem – 4ª batelada.....	65
Figura 27 – Curva granulométrica 2ª amostragem – 4ª batelada.....	66
Figura 28 – Curva granulométrica 3ª amostragem – 4ª batelada.....	66
Figura 29 – Curva granulométrica 1ª amostragem – 5ª batelada.....	67
Figura 30 – Curva granulométrica 2ª amostragem – 5ª batelada.....	68
Figura 31 – Curva granulométrica 3ª amostragem – 5ª batelada.....	68
Figura 32 – Amostrador do Material Particulado que Alimenta o Ciclone. ...	70
Figura 33 – Diagrama do sistema de exaustão.	73
Figura 34 – Curva $\ln D_i$ versus $\ln[\ln(1/(1-x))]$, para obtenção dos ajustes do modelo RRB.	74
Figura 35 – Comparação entre o ciclone estudado e o ciclone redimensionado.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais relações geométricas dos ciclones Lapple, Stairmand e Niigas 11.....	34
Tabela 2 - Exemplo do cálculo da porcentagem de fração em massa acumulada.....	53
Tabela 3 - Configurações de projeto do ciclone estudado.	57
Tabela 4 - Comparação das relações geométricas das famílias de ciclone e o ciclone estudado.	57
Tabela 5 - Comparação das relações geométricas das famílias de ciclone e o ciclone estudado – valores renormalizados.	58
Tabela 11 - $D_{50\text{medido}}$ obtidos através de interpolação linear.	70
Tabela 12 - D_{50} calculado e de projeto.....	71
Tabela 13 - Sintética Valor-P para todas ANAVA.	71
Tabela 14 - Teste Tukey – Hora <i>Underflow</i> do Ciclone.	72
Tabela 15 - Parâmetros do modelo.	75
Tabela 16 - Resultados de D_{50} e Eficiências.....	75
Tabela 17 - Configurações do ciclone estudado redimensionado.....	76
Tabela 18 - Anava Alimentação do Forno para cada dia de amostragem.	85
Tabela 19 - Valores médios do diâmetro da alimentação do forno para cada dia de amostragem.	86
Tabela 20 - Anava Alimentação do Forno para cada hora de amostragem. ...	86
Tabela 21 - Valores médios do diâmetro da alimentação do forno para cada hora de amostragem.....	87
Tabela 22 - Anava Alimentação do Ciclone para cada dia de amostragem. ...	87
Tabela 23 - Valores médios do diâmetro da alimentação do ciclone para cada dia de amostragem.	88
Tabela 24 - Anava Alimentação do Ciclone para cada hora de amostragem.	88
Tabela 25 - Valores médios do diâmetro da alimentação do ciclone para hora de amostragem.....	89

Tabela 26 - Anava do <i>Underflow</i> do Ciclone para cada dia de amostragem.	89
Tabela 27 - Valores médios do diâmetro médio do <i>Underflow</i> do ciclone para cada dia de amostragem.....	90
Tabela 28 - Anava do <i>Underflow</i> do Ciclone para cada hora de amostragem.	90
Tabela 29 - Teste Tukey.....	90
Tabela 30 - Anava do Material Retido no Filtro Manga para cada dia de amostragem	91
Tabela 31 - Valores médios do diâmetro do material retido no filtro de manga para cada dia de amostragem.....	92
Tabela 32 - Anova do Material Retido no Filtro Manga para cada hora de amostragem.	92
Tabela 33 - Valores médios do diâmetro da alimentação do forno para hora de amostragem.....	93

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	JUSTIFICATIVA	17
3	OBJETIVOS	18
3.1	OBJETIVO GERAL	18
3.2	OBJETIVO ESPECÍFICO.....	18
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
4.1	PROCESSO DE ELETROFUSÃO	19
4.2	POLUENTES ATMOSFÉRICOS	21
4.2.1	Danos causados devido a poluição do ar	23
4.2.2	Material particulado	24
4.2.3	Separação de partículas	26
4.2.4	Equipamentos utilizados na remoção de vapores, gases e poeiras	27
4.2.5	Sistema de exaustão	29
4.2.6	Ciclone	31
4.2.6.1	Família de ciclones.....	32
4.2.7	Caracterização das partículas	35
4.2.7.1	Análise granulométrica.....	35
4.2.7.2	Modelos de distribuição granulométrica	35
4.2.7.2.1	<i>Modelo de Rosin-Rammeler-Bennet (RRB)</i>	36
4.2.7.2.2	<i>Modelo de Gates-Gaudin-Shumann (GGS)</i>	37
4.2.7.2.3	<i>Modelo Sigmóide</i>	38
4.2.7.2.4	<i>Modelo Log-Normal</i>	38
4.2.8	Eficiência de coleta	39
4.2.8.1	Eficiência parcial $\bar{\eta}$	39

4.2.8.2	Eficiência total ou global de coleta η	40
4.2.8.3	Eficiência global RRB	40
5	METODOLOGIA	41
5.1	LOCAL DE ESTUDO	41
5.2	PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DO CICLONE	42
5.3	DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA DO FLUXO DE GÁS.....	42
5.4	DETERMINAÇÃO DA VAZÃO DO FLUXO DE GÁS	43
5.5	DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE	43
5.6	AMOSTRAGEM	45
5.7	ANÁLISE QUÍMICA.....	50
5.8	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	51
5.9	CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA X VERSUS D	52
5.10	DETERMINAÇÃO DO D_{50}	53
5.10.1	D_{50}projeto e D_{50}calculado	53
5.10.2	D_{50}medido - interpolação	53
5.11	CLASSIFICAÇÃO DO CICLONE	54
5.12	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS RRB	54
5.13	TRATAMENTO ESTATÍSTICO	55
5.14	ANÁLISE DE EFICIÊNCIA.....	55
5.14.1	Eficiência parcial	55
5.14.2	Eficiência global	56
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
6.1	PROJETO DO CICLONE	57
6.2	TEMPERATURA, VELOCIDADE, VAZÃO E DENSIDADE	58
6.3	ANÁLISE QUÍMICA E GRANULOMÉTRICA.....	59
6.3.1	1ª Batelada	59

6.3.2	2ª Batelada	61
6.3.3	3ª Batelada	63
6.3.4	4ª Batelada	65
6.3.5	5ª Batelada	67
6.4	OBTEÇÃO DO D ₅₀	70
6.4.1	Obteção do D₅₀ interpolado	70
6.4.2	Obteção do D₅₀ calculado a partir da velocidade e vazão	71
6.5	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	71
6.6	ANÁLISE DE EFICIÊNCIA.....	72
6.6.1	Análise de eficiência parcial	72
6.6.2	Análise de eficiência global	73
6.6.2.1	Balanço de massa.....	73
6.6.2.2	Utilizando o ajuste de modelo RRB.....	74
6.2.2.2.1	<i>Obtenção dos parâmetros do modelo</i>	74
6.7	REDIMENSIONAMENTO DO CICLONE.....	76
7	CONCLUSÃO	78
	REFERÊNCIAS.....	80
	APÊNDICE.....	85
	ANEXO.....	94

1 INTRODUÇÃO

A partir da Revolução industrial, houve crescente desenvolvimento e aumento da produção industrial, sendo o carvão inicialmente utilizado como fonte de energia. A imagem de fumaça saindo das chaminés das fábricas era sinônimo de desenvolvimento e prosperidade, porém não havia quase nenhuma preocupação com o impacto sobre o meio ambiente. Nessa época houve alguns episódios históricos de morte relacionadas a doenças respiratórias, estas foram associadas à poluição atmosférica intensa causadas pelo aumento descontrolado das emissões de poluentes, o que passou a afetar o meio ambiente e prejudicar a qualidade de vida da população (RODRIGUES, 2006).

A organização que a sociedade humana vem estabelecendo desde o início da revolução industrial tem demandado uma atividade industrial intensa e gerado aglomerações da população em núcleos urbanos. O crescente nível de consumo e a busca do lucro como principal objetivo da cadeia produtiva resultaram em um cenário de grande poluição, principalmente nos locais de grande concentração industrial (CETESB, 2014).

Atualmente, há maior preocupação em minimizar a quantidade de poluentes emitidos para o meio ambiente culminando, inclusive, na criação de diversos órgãos reguladores e agências fiscalizadoras (MAGALHÃES, 2005; RODRIGUES, 2006).

São inúmeras as fontes de poluição atmosférica, uma das principais são por emissão de material particulado, assim sendo seu controle é primordial. A poluição atmosférica causada pela presença de material particulado em suspensão está associada a riscos para a saúde pública (LIED, 2011; MAGALHÃES, 2005; RODRIGUES, 2006).

Todo processo produtivo pressupõe perdas, por exemplo, por processos de fragmentação de substâncias sólidas, que geram partículas finas aumentando a possibilidade de perda, gerando material particulado e dependendo de suas dimensões, na forma de aerossóis (SÁ, 2007).

Muitos são os processos industriais que envolvem o processamento de materiais sólidos, em que a separação das partículas sólidas suspensas em uma corrente fluida está relacionada com a necessidade de recuperação do material arrastado, ou em função da quantidade emitida para a atmosfera estar acima dos valores permitidos por lei (CERRI, 2010).

Por isso, as indústrias vêm fazendo maiores investimentos na prevenção e minimização de emissões e estão revertendo estes gastos em lucros, utilizando a proteção ambiental como um instrumento de marketing, aumentando a aceitação de seus produtos pelos consumidores, e aumentando a competitividade da empresa no mercado (RODRIGUES, 2006). A motivação deste projeto vem justamente da necessidade de mitigação da emissão de particulados de uma indústria da região que utiliza o processo de eletrofusão em seu sistema produtivo. Uma vez que há fuga de material particulado nas esteiras de carregamento, no processo de mistura de carga, e principalmente dos fornos, material esse que não é eficientemente capturado pelos sistemas de exaustão, surge a necessidade da realização da avaliação do sistema de exaustão atual como ponto de partida para proposição de medidas de mitigação de emissões no sistema produtivo, e finalmente a proposição de tais medidas mitigadoras.

2 JUSTIFICATIVA

A partir da necessidade da redução de emissão de material particulado no processo produtivo da empresa parceira do projeto, surge a necessidade da realização de análise dos sistemas de exaustão atuais como ponto de partida para proposição de medidas de mitigação de emissões no sistema produtivo.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste projeto é avaliar o desempenho do sistema de exaustão atualmente utilizado em um processo de eletrofusão de minerais, e proposição de medidas de mitigação da emissão de material particulado.

3.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

- I** Caracterização química e granulométrica do material particulado do sistema de exaustão desde a alimentação de matéria-prima no forno, passando pelo material coletado pelo sistema de exaustão e alimentado no ciclone, o *underflow* do ciclone, e finalmente o material retido no filtro de mangas;
- II** Elaboração das curvas de distribuição granulométricas da alimentação do forno, alimentação e *underflow* do ciclone e material retido no filtro de mangas;
- III** Determinação do diâmetro de corte do ciclone a partir dos dados de granulometria;
- IV** Determinação do balanço de massa do processo produtivo;
- V** Análise de eficiência do ciclone com base nos dados de projeto, e nos dados reais;
- VI** Proposta de melhorias de processo produtivo para maior recuperação de material particulado no *underflow* do ciclone obtendo-se maior retorno para o processo produtivo, redução na carga enviada para o filtro de mangas e conseqüentemente, para a atmosfera.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 PROCESSO DE ELETROFUSÃO

No processo de eletrofusão, eletrodos aquecem a matéria-prima através da passagem de corrente elétrica gerada por um arco elétrico, levando-a a fase líquida. Charles B. Jacobs iniciou em 1897 o processo industrial de eletrofusão utilizando um forno elétrico totalmente revestido de grafite, porém tinha alto custo e podia ser utilizado somente uma vez, tornando o processo praticamente inviável. Em 1904, Aldous Higgins propôs o primeiro forno industrial de eletrofusão de óxidos resfriado a água, utilizado até os dias de hoje e conhecido como Higgins (CICHY, 1972 apud FERREIRA, 2006).

Atualmente existem três tipos de fornos a arco: pote, basculante e de vazamento; sendo apenas os dois primeiros utilizados na produção de agregados eletrofundidos. Os de tipo pote apresentam três variações: Higgins, Hutchins e híbrido. O de tipo Higgins é constituído de uma capa metálica em forma de tronco de cone, com diâmetro maior na parte inferior do forno e o diâmetro menor na parte superior; a capa é colocada sobre uma estrutura revestida de material refratário, denominada base. O forno híbrido é basicamente um Higgins com a capa invertida. O forno do tipo Hutchins tem o formato de um copo, sendo que todo o conjunto é colocado dentro de uma piscina com água para a realização da fusão. Todos estes fornos não permitem produções contínuas (FERREIRA, 2006).

Na usina estudada neste trabalho, o forno tipo Higgins possui três eletrodos que aquecem a matéria-prima através da passagem de corrente elétrica gerada por um arco elétrico, chegando a uma temperatura entre 2000 e 3000°C, levando-a a fase líquida. A matéria-prima estocada em silos é transportada por correia transportadora para ser preparada em “latões” que alimentam o forno por rosca sem fim. A matéria-prima é constantemente adicionada ao forno, e o ciclo demora de 12 a 24 horas.

Após o processo de liquefação, os eletrodos são recuados e o material fica em repouso até alcançar o estado sólido; então, o vaso metálico é

removido e o “bloco” gerado é então transportado para uma área de resfriamento no qual permanece por aproximadamente 30 horas. O resfriamento lento confere alta estabilidade química e mecânica ao produto. Ao final do resfriamento, são obtidos blocos de aproximadamente 20 toneladas.

O produto gerado segue para as etapas de quebra, britagem, moagem, separação magnética e classificação dos grãos por meio de um conjunto de peneiras vibratórias circulares que definem a faixa granulométrica do produto (FERREIRA, 2006; LUCHE 2011). O fluxograma do processo estudado é ilustrado na Figura 1.

No processo de eletrofusão, há fuga de material particulado para a atmosfera que pode configurar-se como poluente atmosférico; a Figura 2 ilustra a fuga de material particulado num dos fornos de eletrofusão da empresa parceira do projeto. Assim, é preciso que a empresa tome medidas necessárias para manter a emissão de poluentes atmosféricos em conformidade com as legislações vigentes.

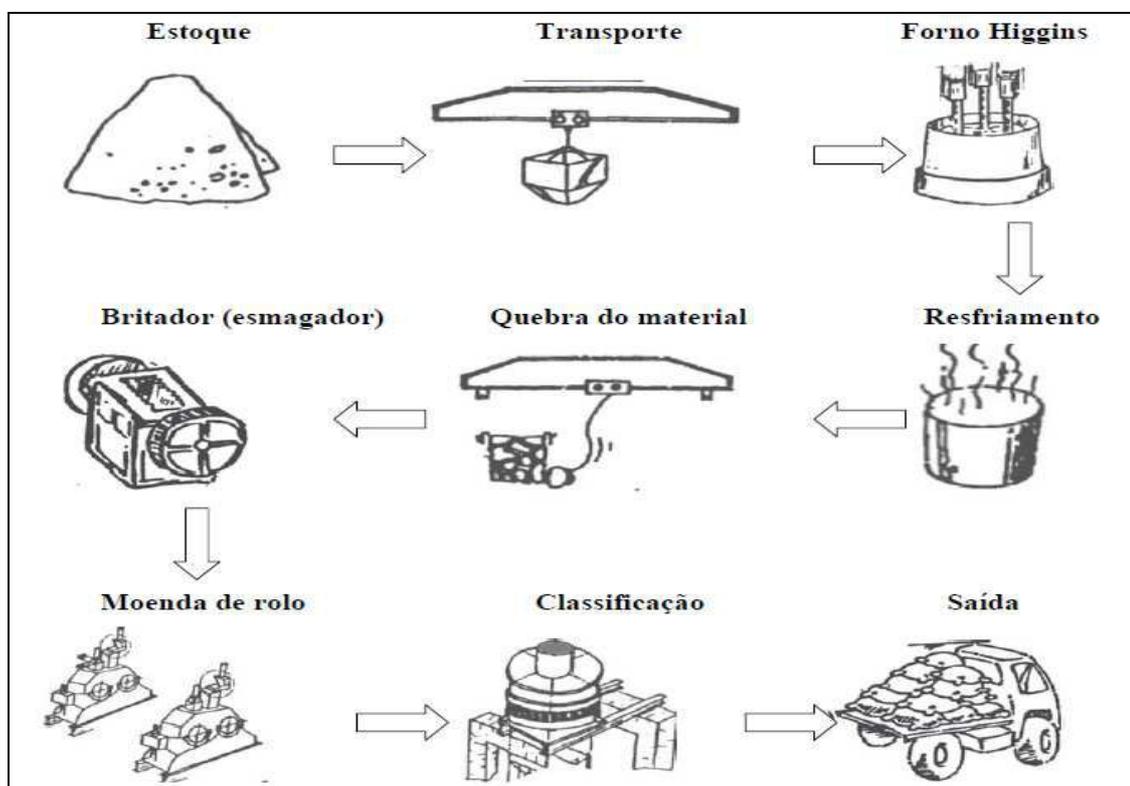


Figura 1 - Fluxograma do Processo Produtivo
Fonte: LUCHE (2011).



Figura 2 - Fuga de Material Particulado no forno elétrico.
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 POLUENTES ATMOSFÉRICOS

Atualmente, a sociedade tem se conscientizado e dado mais atenção aos assuntos ambientais. Empresas e profissionais vêm assumindo posturas diferentes e a legislação tem enrijecido cada vez mais (BRUNO, 2005).

O ar, mesmo considerado puro, contém normalmente, além de nitrogênio, gases raros e hidrogênio (79% em volume), oxigênio (20,97% em volume) e CO₂ (0,03% em volume), pequenas quantidades de poeira de origem vegetal ou animal, além de bactérias e os chamados odores, que são gases de origem vegetal ou animal, desagradáveis ou não ao olfato (MACINTYRE, 2011).

Considera-se poluente qualquer substância presente no ar e que, pela sua concentração, possa torná-lo impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde, causando inconveniente ao bem estar público, danos aos materiais à fauna e à flora, ou prejudicial à segurança ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade (CETESB, 2014).

Os poluentes atmosféricos estão dissolvidos na atmosfera como gases e vapores, ou também nos estados líquido e sólido, finamente divididos, permanecendo suspenso na atmosfera por tempo considerável (MAGALHÃES, 2005).

O nível de poluição atmosférica é medido pela quantidade de substâncias poluentes presentes no ar. A variedade das substâncias encontradas na atmosfera é muito grande, o que torna difícil estabelecer uma classificação. Para facilitar esta classificação, os poluentes são divididos em duas categorias: poluentes primários que são emitidos diretamente pelas fontes de emissão, e poluentes secundários formados através da reação química entre poluentes primários e componentes naturais da atmosfera (CETESB, 2014).

Os processos envolvidos na formação dos poluentes devem ser considerados quando se discute a origem da poluição atmosférica. As fontes de poluição atmosférica são processos naturais ou antropogênicos que liberam ou emitem matéria ou energia para atmosfera, tornando-a contaminada ou poluída.

São exemplos de fontes naturais de poluentes atmosféricos as emissões de gases provocadas por erupções vulcânicas, a decomposição de vegetais e animais, a ressuspensão de poeira do solo pelos ventos, a formação de gás metano em pântanos, os aerossóis marinhos, a formação de ozônio devido as descargas elétricas na atmosfera, os incêndios naturais em florestas e os pólenes de plantas. Fontes antropogênicas são os diferentes processos e operações industriais, a queima de combustíveis, queimadas na agricultura, incineração de lixo e poeiras fugitivas (MAGALHÃES, 2005).

As substâncias poluentes podem ser classificadas em compostos de enxofre, compostos de nitrogênio, compostos orgânicos, monóxido de carbono, compostos halogenados, metais pesados, material particulado e oxidantes fotoquímicos (CETESB, 2014).

O que defini o nível de qualidade do ar é a interação entre as fontes de poluição e a atmosfera, que determina por sua vez o surgimento de efeitos adversos da poluição do ar sobre os receptores, que podem ser o homem, os animais, as plantas e os materiais. O particulado pode também reduzir a visibilidade na atmosfera (CETESB, 2014).

4.2.1 Danos causados devido a poluição do ar

Alguns fenômenos podem ser identificados no processo de danos da poluição do ar sobre materiais, pode-se destacar: abrasão, deposição e remoção, ataque químico direto e indireto e corrosão eletroquímica (LIMA, 2007).

A primeira indicação da poluição do ar para um cidadão comum é a deterioração da visibilidade, que ocorre devido à presença de partículas sólidas e líquidas suspensas na atmosfera que absorvem e dispersam a luz. Esse problema está relacionado com o tamanho, concentração e características físicas das partículas poluentes presentes (POZZA, 2009).

Estudos em diversos países têm relatado associação entre poluição atmosférica e vários indicadores de morbidade e mortalidade, mesmo quando as concentrações de poluentes estão abaixo dos limites padronizados internacionalmente.

Os efeitos da poluição do ar sobre a saúde podem provocar doença aguda ou morte, doença crônica, encurtamento da vida, dano ao crescimento, alteração de importantes funções fisiológicas tais como ventilação do pulmão, transporte de oxigênio pela hemoglobina, adaptação ao escuro ou outras funções do sistema nervoso, sintomas adversos tal como irritações sensoriais, desconforto, odor, prejuízo de visibilidade ou outros efeitos da poluição do ar suficientes para levar indivíduos a trocas de residência ou local de emprego (FREITAS, 2003).

Gouveia et al. (2003) avaliaram os efeitos da poluição do ar na saúde nas populações de São Paulo e Rio de Janeiro entre os anos 1996 e 2000. Foram coletadas informações diárias sobre mortalidade, internações hospitalares, níveis atmosféricos dos principais poluentes do ar e de variáveis meteorológicas, concluindo que os níveis de poluição vivenciados em São Paulo e no Rio de Janeiro são suficientes para causar agravos à saúde da população.

Bakonyi et al. (2004) investigaram os feitos causados pela poluição atmosférica na morbidade por doenças respiratórias em crianças entre 1999 e 2000 no município de Curitiba-PR, todos os

poluentes investigados (material particulado, fumaça, dióxido de nitrogênio e ozônio) apresentaram efeitos sobre as doenças respiratórias de crianças, mesmo quando os níveis dos poluentes estão aquém do que determina a legislação. Nascimento et al. (2006) estudaram o aumento de internações de crianças por pneumonias, na cidade de São José dos Campos SP, nos anos de 2000 e 2001, e confirmaram que o potencial deletério dos poluentes do ar sobre a saúde pode ser detectado, também, em cidades de médio porte.

O poluente atmosférico em foco neste trabalho é o material particulado, visto que, ocorre muita fuga de material particulado no processo de eletrofusão, e esta emissão de material particulado causa incomodo na vizinhança, além de representar substancial perda financeira para a empresa causada pela não recuperação do material.

4.2.2 Material particulado

O Material particulado é um conjunto de poluentes constituídos de poeiras, fumaças e todo tipo de material sólido e líquido que se mantém suspenso na atmosfera (CETESB, 2014).

As principais fontes de emissão de particulado para a atmosfera são veículos automotores, processos industriais, queima de biomassa, ressuspensão de poeira do solo, entre outros (CETESB, 2014).

O tamanho das partículas é expresso em termos de seu diâmetro aerodinâmico, definido como o diâmetro da esfera de densidade unitária que possua a mesma velocidade que a partícula em questão (MAGALHÃES, 2005); e está diretamente associado ao seu potencial para causar problemas à saúde, sendo que quanto menores as partículas, maiores os efeitos provocados (BRUNO, 2005).

O tamanho das partículas determina o tempo de permanência em suspensão no ar. As partícula finas podem permanecer suspensas na atmosfera por dias ou semanas e podem ser transportadas por correntes de ar, afetando o ar não somente em

escala local, mas também em escala regional e até global. As partículas grossas sedimentam-se mais rapidamente, sendo frequentemente ressuspensas pela ação dos ventos e tráfego de veículos (MAGALHÃES, 2005; POZZA, 2009).

O material particulado pode ser classificado como partículas totais em suspensão, partículas inaláveis e partículas inaláveis finas (CETESB, 2014).

Partículas totais em suspensão (PTS) tem diâmetro aerodinâmico menor que 100 μm , sendo parte dessas partículas inalável, podendo causar problemas à saúde e outra parte podendo afetar desfavoravelmente a qualidade de vida da população, interferindo nas condições estéticas do ambiente e prejudicando as atividades normais da comunidade (ITO, 2007).

Partículas inaláveis (MP_{10}) tem diâmetro aerodinâmico menor que 10 μm , podem ficar retidas na parte superior do sistema respiratório ou penetrar mais profundamente, alcançando os alvéolos pulmonares (CETESB, 2014).

Partículas inaláveis finas ($\text{MP}_{2,5}$) tem diâmetro aerodinâmico menor que 2,5 μm , penetram profundamente no sistema respiratório, podendo atingir os alvéolos pulmonares (CETESB, 2014).

As partículas inaláveis MP_{10} resultam de processos mecânicos, operações de moagem e ressuspensão de poeira. As partículas inaláveis finas $\text{MP}_{2,5}$ são geralmente emitidas por atividades como: combustão industrial e residencial, exaustão de veículos automotores, etc. Elas também se formam na atmosfera a partir de reações químicas de gases como dióxido de enxofre (SO_2), NO_x e compostos orgânicos voláteis que são emitidos, principalmente, em atividades de combustão (POZZA, 2009).

Souza et al. (2010), caracterizaram partículas finas ($\text{MP}_{2,5}$) e grossas ($\text{PM}_{2,5-10}$) em São José dos Campos (SP), as amostras foram coletadas de fevereiro de 2004 a fevereiro de 2005.

Freitas e Solci (2009), caracterizaram partículas $MP_{2,5}$ e MP_{10} em Londrina – PR. As coletas de material particulado atmosférico foram realizadas entre os meses de março e abril de 2007, simultaneamente em duas áreas de Londrina, um urbano (Museu Histórico) e outra rural (Farm School-UEL). Os resultados indicaram que a fração de finos $MP_{2,5}$ representada uma parte significativa da massa de MP_{10} , sendo 70 e 67% em locais urbanos e rurais, respectivamente.

Silva et al. (2005), avaliaram os efeitos da exposição de partículas finas $MP_{2,5}$ de queimadas sobre as internações por doenças respiratórias em crianças e idosos. O estudo foi realizado na região Amazônica brasileira em Cuiaba-MT. Foi evidenciada a influência de $MP_{2,5}$ sobre a ocorrência de internações por doenças respiratórias em crianças menores de 5 anos.

Carmo et al. (2010), investigaram os efeitos de curto prazo da exposição ao material particulado de queimadas da Amazônia na demanda diária de atendimento ambulatorial por doenças respiratórias de crianças e de idosos. Os registros diários de atendimento ambulatorial foram obtidos nas 14 unidades de saúde do município de Alta Floresta, Mato Grosso, região sul da Amazônia brasileira, no período de janeiro de 2004 a dezembro de 2005. Os resultados sugeriram que os níveis de material particulado das queimadas na Amazônia estão associados a efeitos adversos à saúde respiratória de crianças.

Os processos de remoção das partículas suspensas ocorrem, basicamente, por deposição seca e úmida. A deposição seca ocorre devido a ação da gravidade sobre as partículas, sendo mais eficiente na fração grossa. A deposição úmida ocorre por remoção de partículas devido a precipitação (MAGALHÃES, 2005). As empresas devem, contudo, adotar medidas de separação de partículas para evitar que essas sejam lançadas à atmosfera.

4.2.3 Separação de partículas

Os vapores, gases e poeiras contidos no ar em processos industriais, devem ser captados e purificados para que possam ser lançados na

atmosfera. A coleta de poluentes pode ser feita através de um único equipamento ou de uma sequência de equipamentos dispostos em série, dependendo da necessidade de separação. Diversos fatores influenciam na escolha do equipamento, principalmente fatores relativos às propriedades do contaminante, do gás de arraste, aspectos econômicos e práticos (RODRIGUES, 2001; LIMA, 2000).

As partículas de grandes dimensões (da ordem de 100 μm) ou de altas densidades (acima de 3 g/cm^3) não apresentam dificuldades de remoção. Porém, para remoção de partículas de dimensões da ordem de 5 μm ou de densidades em torno de 1 g/cm^3 , são necessários maiores cuidados na definição do tipo e das condições de operação dos equipamentos de separação (RODRIGUES, 2001).

4.2.4 Equipamentos utilizados na remoção de vapores, gases e poeiras

Os equipamentos empregados na remoção de vapores, gases e poeiras podem ser divididos nos seguintes grupos:

Filtros de ar – sua finalidade é a remoção de poeiras no grau de concentração em que possam encontrar-se no ar ambiente exterior ou interior e na recirculação de ar do recinto. São empregados normalmente na tomada de ar exterior, nas instalações de ventilação e ar condicionado. São muito usados, também, na retenção de poeiras produzidas em ambientes fechados e instalado, as vezes, próximo ao local de captura ou em locais onde o ar contendo poeiras é conduzido ao longo dos dutos.

Coletores de poeiras – destinados a remover cargas consideráveis de poeiras oriundas de processos e captados nos locais onde são produzidas. A amplitude do grau de concentração de poeiras é muito grande, bastando mencionar que pode variar de 100 até 20000 vezes o teor de concentração para o qual os filtros de ar referidos no item anterior são destinados a operar. Existem coletores inerciais, centrífugos, lavadores, depuradores e precipitadores eletrostáticos.

Lavadores de gases, torres de absorção, condensadores, depuradores, precipitadores hidrodinâmicos, incineradores – visam a remoção de gases e vapores do ar antes da liberação do mesmo. Quando se tratar de dissolução de gases, ou vapores na água, pode vir a ser necessário um tratamento químico complementar acompanhado de filtragem, decantação ou destilação, para que a água possa ser purificada e reutilizada e reciclados certos produtos industriais (MACINTYRE, 2011).

Em geral, os equipamentos que realizam a operação de coleta e eliminação das partículas são classificados de acordo com o princípio físico ou mecânico segundo o qual o objetivo é alcançado (MACINTYRE, 2011).

Destacam-se aos seguintes equipamentos para remoção de particulados

Câmaras de poeira - São tipos muito comuns de coletores, que funcionam por ação da força gravitacional e consistem basicamente de uma câmara na qual a velocidade do ar é drasticamente reduzida permitindo que as partículas em suspensão sejam depositadas por ação da força de gravidade. Seu uso é restrito, devido ao fato de serem mais eficientes quando utilizadas na separação de partículas com dimensões superiores a 40 μm . Possuem grandes dimensões.

Ciclones - São equipamentos amplamente utilizados industrialmente. A separação das partículas ocorre devido à ação da força centrífuga. São equipamentos que operam continuamente, apresentando custos de instalação e de manutenção baixos. Não possuem peças móveis e podem operar a temperaturas e pressões altas. Além disso, apresentam boa eficiência quando aplicados na remoção de partículas com dimensões superiores a 10 μm .

Separadores de leito granulares - Equipamentos utilizados na remoção de poeiras de ar por muitos anos. Atualmente eles têm sido utilizados na

remoção de partículas radioativas na faixa submicrômica e na filtração de gases a altas temperaturas.

Filtros de mangas - São equipamentos capazes de coletar partículas de até 1 μm com eficiência acima de 99%. Como restrição, podem existir riscos de explosões do filtro devido a um aumento da pressão interna, geralmente em função de entupimento das mangas.

Lavadores de gases - Utilizam geralmente água, que é dispersa em gotas de pequenos diâmetros, capturando partículas por diversos mecanismos, dentre eles a impactação inercial (predominante), o mecanismo difusional (efetivo para partículas menores que 0,1 μm) e a interceptação.

Precipitadores eletrostáticos - Nesses equipamentos, as partículas são carregadas eletricamente, e, sob a influência de um campo elétrico, são separadas da corrente gasosa, sendo predominante o mecanismo da precipitação eletrostática. Apresentam altos custos de instalação, porém baixos custos de manutenção. Apresentam boa eficiência na separação de partículas finas (menores que 10 μm) (RODRIGUES, 2001).

4.2.5 Sistema de exaustão

Perdas de material particulado ocorrem em muitos processos produtivos, essas perdas dão-se por processos de fragmentação de substâncias sólidas, pelo transporte de matérias-primas e produtos através de esteiras, elevadores de caneca, pelo esvaziamento de silos através de gravidade, dentre outros.

Lied (2011) avalia o uso de sistemas de ventilação para redução da emissão de materiais atmosféricos, especialmente o material particulado gerado por uma fábrica de móveis, adotando para isso um sistema mecânico industrial conhecido como ventilação local exaustora (VLE). Os principais equipamentos alvos de controle eram: serra circular, plaina, lixadeira e serra de fita. Para o estabelecimento do sistema dimensionam-se seus

componentes essenciais, tais como os captores, dutos, ventilador e um ciclone para a segregação dos resíduos coletados. Nesse estudo, o dimensionamento foi baseado no método do Balanceamento Estático, que é concebido por meio do arranjo de ramais, relacionando suas respectivas perdas de cargas nos captores, dutos e singularidades. Os resultados mostraram que foi possível idealizar o projeto de sistema de ventilação local exaustora em seus aspectos, onde sistema de VLE mostrou ser um recurso bastante eficaz na redução de riscos ocupacionais.

Para evitar essas perdas, bem como reduzir as emissões de poluentes, as empresas investem em sistemas de exaustão. A empresa parceira do projeto possui um sistema de exaustão composto de ciclone como pré-coletor e posteriormente filtro de mangas, conforme ilustrado na Figura 3.

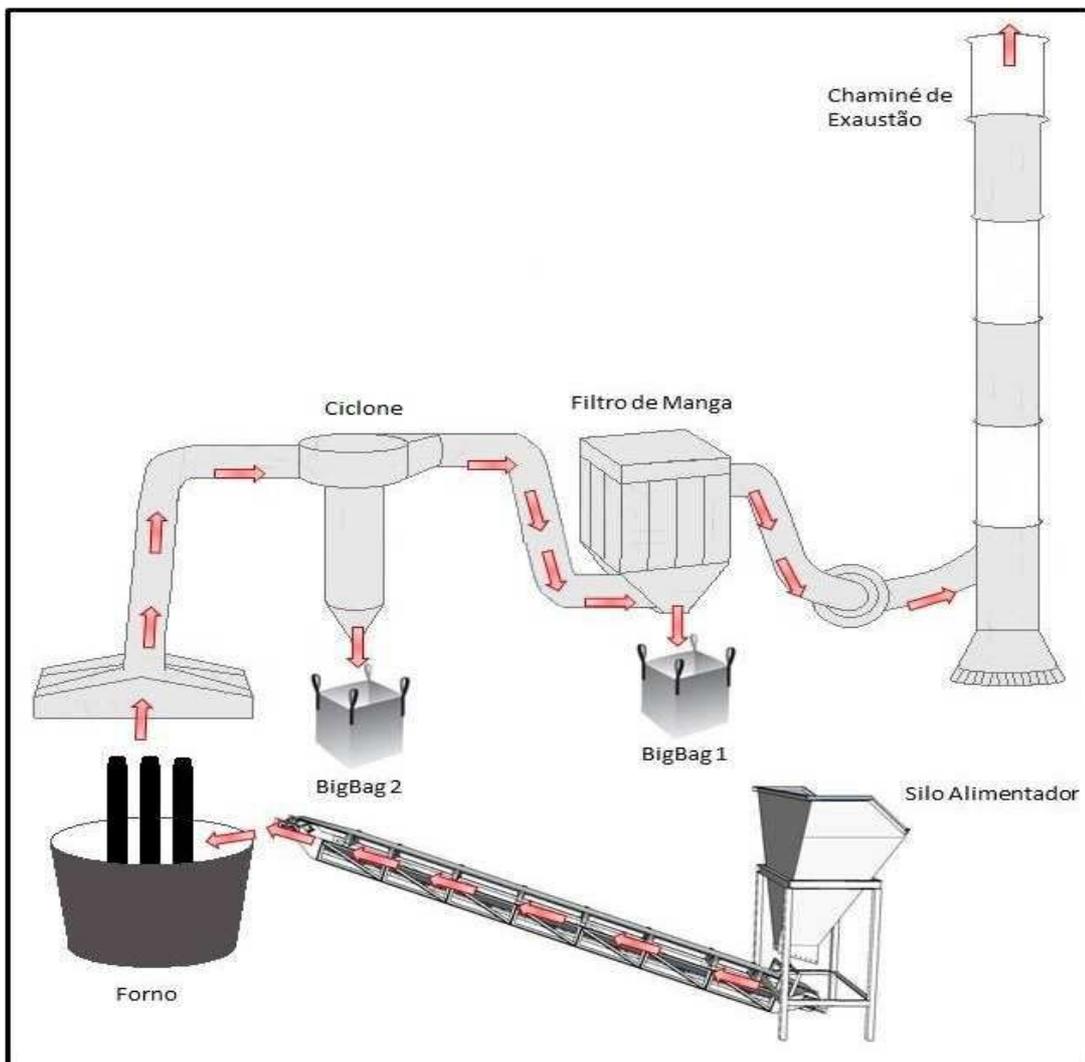


Figura 3 - Esquemático do sistema de exaustão.
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.6 Ciclone

Ciclone é o nome genérico do coletor centrífugo onde partículas são removidas do fluxo gasoso pela ação da força centrífuga resultante do escoamento da suspensão. É utilizado na separação de sólidos em uma corrente gasosa, e apresenta, na sua forma clássica, uma construção cônica-cilíndrica. Considerado como um dos mais simples e econômicos separadores de material particulado, funcionando como pré-coletor, de modo a reduzir a carga de coleta no coletor principal (CERRI, 2010).

O ciclone estabelece um movimento rotatório para o gás, de modo que a força centrífuga aplicada às partículas seja maior que as forças de coesão molecular e da gravidade, fazendo com que as mesmas sejam lançadas de encontro às paredes, retirando-as da massa gasosa em escoamento. A corrente gasosa entra tangencialmente em alta velocidade numa câmara formando uma espiral descendente externa e uma espiral ascendente interna. O gás é descarregado axialmente pela saída localizada no topo do ciclone. A aceleração centrífuga impulsiona as partículas contidas no gás contra a parede. A componente vertical da força as partículas para a parte inferior do ciclone, de onde elas vão para um local de armazenamento (RODRIGUES, 2001). Este processo está ilustrado na Figura 4.

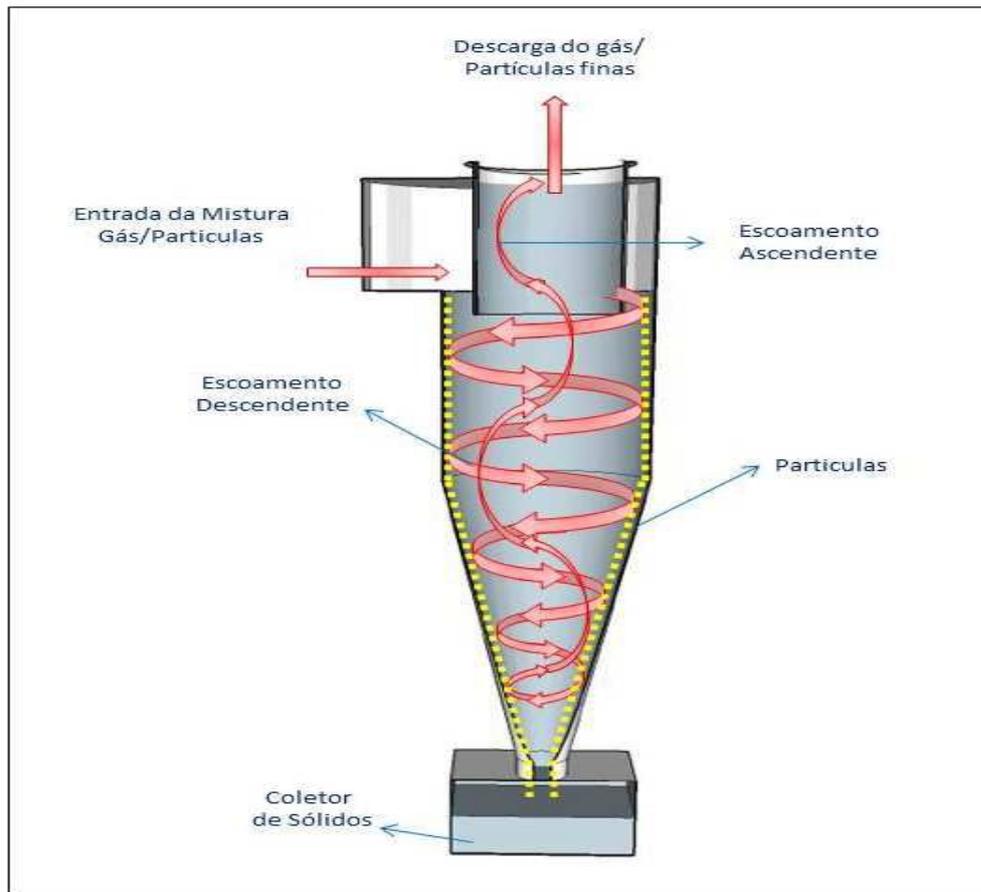


Figura 4 - Escoamento em um ciclone.
Fonte: Elaborado pelo autor.

A eficiência de coleta dos ciclones é afetada por fatores dimensionais, características do gás, e pelas propriedades do pó (CERRI, 2010). A partir dos fatores dimensionais podemos classificar os ciclones em suas famílias que serão detalhadas nos próximos itens.

4.2.6.1 Família de ciclones

Os ciclones são agrupados em famílias. Cada família possui como característica principal as relações constantes entre suas medidas geométricas com o diâmetro da parte cilíndrica (D_c) do ciclone.

As principais famílias de ciclones estudadas são a Lapple, a Stairmand e a Niigas 11. A Figura 5 ilustra as configurações dos ciclones a gás destas famílias, enquanto que a Tabela 1 apresenta suas principais relações geométricas.

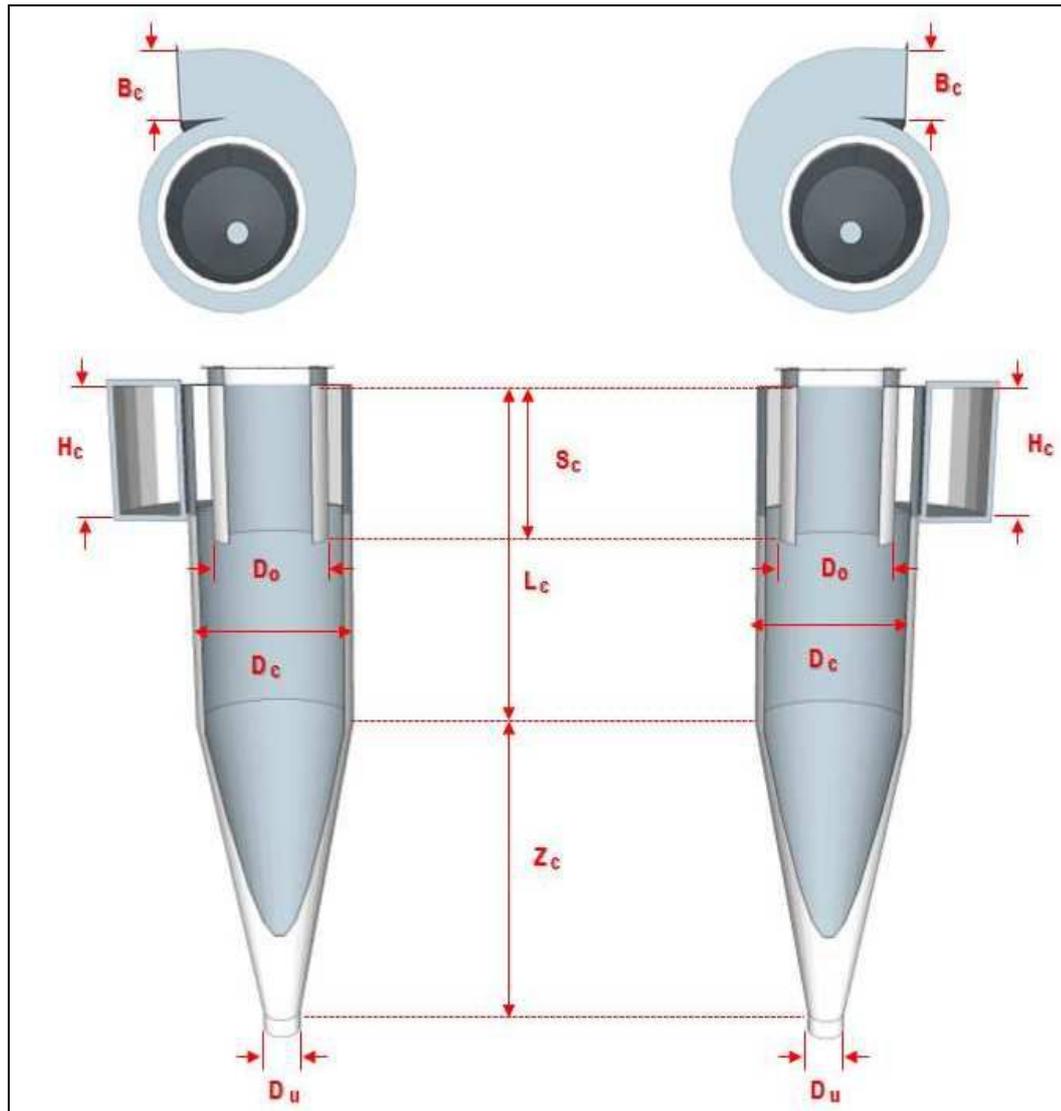


Figura 5 - Parâmetros geométricos dos ciclones.
 Fonte: Elaborado pelo autor.

Em que:

B_c = Dimensão do duto de entrada do ciclone

D_c = Diâmetro da parte cilíndrica

D_u = Diâmetro do duto de *underflow*

L_c = Comprimento do ciclone

Z_c = Comprimento da parte cônica do ciclone

S_c = Comprimento do *vortex finder*

Tabela 1 - Principais relações geométricas dos ciclones Lapple, Stairmand e Niigas 11.

DIMENSÕES	CICLONE		
	Lapple	Stairmand	Niigas-11
B_c / D_c	0,25	0,20	0,26
D_o / D_c	0,50	0,50	0,60
H_c / D_c	0,50	0,50	0,48
L_c / D_c	2,00	1,50	2,08
S_c / D_c	0,62	0,50	1,30
Z_c / D_c	2,00	2,50	2,00
D_u / D_c	0,25	0,37	0,22
Inclinação do duto de alimentação	0	0	11°

Fonte: RODRIGUES (2001).

Como a força inercial é usada, geralmente as partículas com diâmetro aerodinâmico maior que 5 μm podem ser bem separadas. Partículas de areia, por exemplo, são relativamente fáceis de separar. Alguns outros tipos de pó, como cinzas, são mais difíceis de remover necessitando-se, depois dos ciclones de um equipamento adicional (CERRI, 2010).

Os principais parâmetros relacionados ao desempenho dos ciclones são diâmetros de corte (D_{50}), a queda de pressão e a eficiência de coleta. Esses parâmetros são influenciados pela vazão de entrada de sólidos, pelo tipo de fluido, pela natureza das partículas que serão separadas, pela geometria do ciclone, entre outras características do problema.

A expressão empírica comumente utilizada para a determinação do diâmetro de corte de um ciclone é a de Rosin, Rammler e Intelmann:

$$D_{50} = \left[\frac{9\mu b}{2\pi N_e v_e (\rho_s - \rho_g)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

em que:

μ = viscosidade do gás;

b = largura da entrada do ciclone;

N_e = número de voltas que o gás executa no interior do ciclone, no caso de um ciclone Lapple o valor usado é de 5;

v_e = velocidade de entrada do gás no ciclone;

ρ_s e ρ_g = densidades do sólido e do gás, respectivamente.

De acordo com a Equação 1, verifica-se que o diâmetro de corte de um ciclone depende das propriedades do sólido, das propriedades do gás, do tamanho do ciclone e das condições operacionais.

4.2.7 Caracterização das partículas

4.2.7.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica de um material compreende parte da sua caracterização, por meio da determinação do tamanho de partículas e da frequência com que ocorrem em uma determinada faixa de tamanhos (FRANÇA e COUTO, 2007).

Independente da técnica de medida do tamanho de partícula, a distribuição estatística de tamanhos ou granulometria é expressa, usualmente, em função da frequência relativa das partículas que detêm certo diâmetro. Essa função pode ser expressa em função da massa (peneiramento), volume (difração a laser) e número de partículas (análise de imagens). Além da distribuição de frequência, a distribuição de tamanho de partículas também pode ser representada pela fração cumulativa de partículas que possuem diâmetro menor e maior que um valor médio de partícula em um intervalo de 0 a 100% da grandeza acumulada (CREMASCO, 2012).

Sobrinho e Tenório (2004) caracterizaram dois tipos de resíduo com alto teor de cromo, uma poeira (RESA) e uma lama (RESB), visando a reciclagem dos resíduos. Para caracterização da distribuição granulométrica foi utilizado o equipamento Malvern (SOBRINHO e TENÓRIO, 2004).

4.2.7.2 Modelos de distribuição granulométrica

Qualquer que seja a distribuição granulométrica, torna-se possível descrevê-la por modelos matemáticos na forma de $x = x(D)$ (MACINTYRE, 2011).

4.2.7.2.1 Modelo de Rosin-Rammeler-Bennet (RRB)

O modelo RRB é caracterizado por possuir dois parâmetros, sendo: n o parâmetro adimensional, relativo à forma da curva do modelo e D' o diâmetro cuja fração de partículas são menores que D , possuindo dimensão de comprimento. Este modelo é uma função que relaciona diretamente os diâmetros das partículas com a fração em massa (x) de partículas menores que um certo diâmetro (D), conforme a Equação 2:

$$x = 1 - e^{-\left(\frac{D}{D'}\right)^n}, \quad (2)$$

em que:

D = Diâmetro característico das partículas (μm);

D' = Parâmetro do modelo RRB;

n = Parâmetro do modelo RRB;

x = Fração mássica de partículas.

Os modelos de Distribuição Granulométricas também podem ser representados na forma gráfica, onde no caso do RRB, as curvas podem assumir duas formas dependendo do valor do parâmetro n , como mostra a Figura 6.

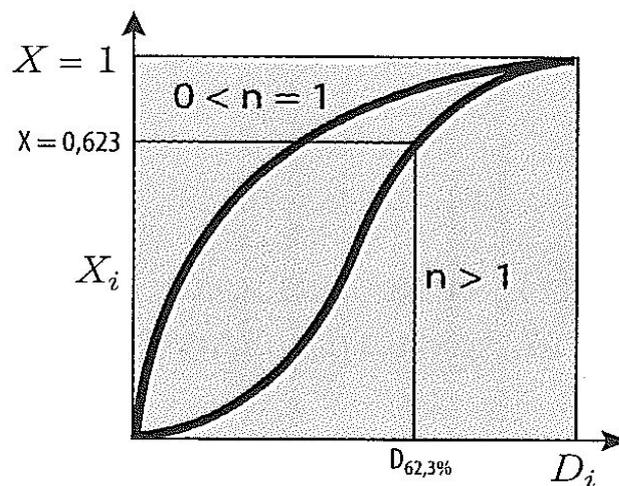


Figura 6 - Exemplo de representação gráfica da distribuição acumulativa $x(D)$ para o modelo RRB, em que $D_{62,3}$ refere-se ao diâmetro D para $x = 0,623$.

Fonte: CREMASCO, (2012).

4.2.7.2.2 Modelo de Gates-Gaudin-Shumann (GGS)

De forma análoga ao anterior, o modelo GGS caracteriza-se por possuir dois parâmetros conforme mostra a Equação 3.

$$x = \left(\frac{D}{k}\right)^m, \quad (3)$$

em que:

D = Diâmetro característico das partículas (μm);

x = Fração mássica de partículas;

m = Parâmetro do modelo GGS;

k = Parâmetro do modelo GGS.

As curvas da representação gráfica do modelo GGS podem assumir três formas dependendo do valor do parâmetro m , como mostra a Figura 7.

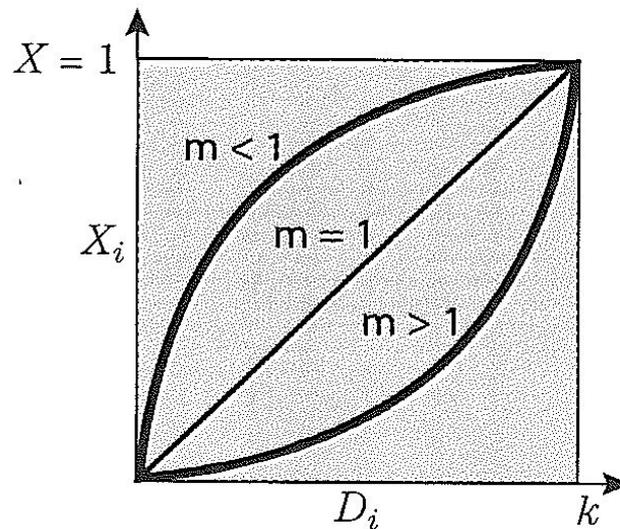


Figura 7 - Exemplo de representação gráfica da distribuição acumulativa $x(D)$ para o modelo GGS.

Fonte: CREMASCO, (2012).

O parâmetro D_{100} refere-se ao diâmetro D para $x=1$. Quando $m = 1$ tem-se uma distribuição uniforme e quando $m \neq 1$ são casos usuais.

4.2.7.2.3 Modelo Sigmóide

O modelo Sigmóide apresenta dois parâmetros ajustáveis, conforme mostra a Equação 4:

$$x(D) = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{50}}{D}\right)^p}, \quad (4)$$

em que:

D = Diâmetro característico das partículas (μm);

x = Fração mássica de partículas;

d_{50} = Parâmetro do modelo;

P = Parâmetro do modelo.

4.2.7.2.4 Modelo Log-Normal

O ajuste Log-normal é representado pelas equações abaixo:

$$x(D) = \frac{[1 + \text{erf}(z)]}{2}, \quad (5)$$

em que:

$$\text{erf}(z) = \frac{2}{\pi} \int_0^z e^{-y^2} dy, \quad (6)$$

$$z = \frac{\ln\left(\frac{D}{d_{50}}\right)}{\sqrt{2\ln(\delta)}}, \quad (7)$$

em que:

D = Diâmetro característico das partículas (μm);

x = Fração mássica de partículas;

d_{50} = Parâmetro do modelo;

δ = Parâmetro do modelo.

4.2.8 Eficiência de coleta

A eficiência da coleta é uma indicação do poder de separação do equipamento. A eficiência de coleta pode estar relacionada ao conjunto de partículas (eficiência global) ou a uma determinada dimensão de partícula (eficiência individual). A eficiência de coleta de um ciclone é influenciada pelas condições operacionais, pelas propriedades físicas do material sólido alimentado e pela geometria do ciclone (RODRIGUES, 2001).

4.2.8.1 Eficiência parcial $\bar{\eta}$

A eficiência parcial para cada diâmetro de partícula é dada pela Equação 8. Esta equação é uma aproximação feita da curva de eficiência obtida experimentalmente por Lapple (1991 apud RODRIGUES, 2001) e só pode ser usada para ciclones da configuração Lapple.

$$\bar{\eta} = \frac{(D_p/D_{50})^2}{1 + (D_p/D_{50})^2}, \quad (8)$$

em que D_p é o diâmetro da partícula que se deseja saber a eficiência.

A Teoria de Lapple (1951 apud RODRIGUES, 2001) assume que o desempenho de um ciclone pode ser especificado em termos do diâmetro de corte (D_{50}), definido como o tamanho de partículas que o ciclone irá coletar com uma eficiência de 50%. As partículas que possuem os diâmetros maiores que o diâmetro de corte são coletadas no *underflow* com eficiências maiores que 50% (RODRIGUES, 2001).

Neste trabalho, estamos particularmente interessados nas características de ciclones tipo Lapple, pois é a família de ciclones cujas características construtivas mais se assemelham às características dos ciclones utilizados na empresa parceira do projeto.

4.2.8.2 Eficiência total ou global de coleta η

A eficiência global é definida como a fração da massa de sólidos alimentados que é retirada pelo ciclone. Matematicamente, a eficiência global pode ser calculada através da medida da razão entre a massa de sólidos coletados no *underflow*, e a massa total de sólidos alimentados ao ciclone, conforme mostra a Equação 9:

$$\eta = \frac{W_{SU}}{W_S}, \quad (9)$$

em que:

W_S = Massa de sólidos na alimentação do ciclone;

W_{SU} = Massa de sólidos no *underflow* do ciclone.

4.2.8.3 Eficiência global RRB

Uma vez conhecida a distribuição granulométrica das partículas, $x = x(D)$ e a eficiência individual de coleta, é possível estabelecer o valor da eficiência global de coleta no campo centrífugo, utilizando-se a Equação 10:

$$\bar{\eta} = \int_0^1 \eta dx, \quad (10)$$

A integração da Equação 10 para uma situação em que a distribuição granulométrica possa ser representada pelo modelo RRB, para o caso dos ciclones Lapple e Stairmand, leva, segundo Massarani (1989), a seguinte equação para eficiência global do ciclone:

$$\eta_{RRB} = \frac{\frac{1,11n}{0,118 + n}}{1,81 - 0,322n + (D'/D_{50})} (D'/D_{50}), \quad (11)$$

5 METODOLOGIA

Primeiramente foi estudado o projeto do ciclone fornecido pela empresa parceira do projeto. Posteriormente foi feita a determinação da temperatura e vazão do fluxo de gás (ar atmosférico) do sistema.

Foram determinados os pontos e períodos de amostragem. Após a coleta das amostras foram determinadas a densidade absoluta da partícula; a análise química e granulométrica. Com os resultados da análise granulométrica, foi feito o cálculo da fração em massa acumulada para fornecer os dados para plotar as curvas de distribuição granulométrica; com os dados das curvas foram feitas as interpolações lineares para determinar o $D_{50\text{medido}}$ de cada amostra.

Determinou-se o diâmetro de corte D_{50} de projeto, medido e calculado, onde o $D_{50\text{projeto}}$ foi determinado utilizando a velocidade e vazão de projeto fornecidos pela empresa parceira do projeto; o $D_{50\text{calculado}}$ foi determinado utilizando a velocidade e vazão medida; e o $D_{50\text{medido}}$ foi estimado através da média dos $D_{50\text{medido}}$ de cada amostra.

A fim de avaliar a eficiência do ciclone estudado foi feita a classificação do ciclone de acordo com as famílias conhecidas na literatura. Com os dados experimentais fez-se o tratamento estatístico e a partir do resultado determinou-se o pior ponto de operação para analisar as eficiências parcial e global através dos D_{50} já determinados. A eficiência global foi determinada através utilizando a equação proposta por Massarani utilizando os parâmetro de modelo RRB obtidos pelos métodos linear e mínimos quadrados não linear generalizado; e através do balanço global de massa.

Finalizando, foi elaborado um projeto de redimensionamento do ciclone estudado.

5.1 LOCAL DE ESTUDO

O estudo foi realizado em uma indústria de transformação mineral, que produz e comercializa mais de 20 tipos de produtos para aplicação nas indústrias de cerâmicos, abrasivos e refratários. A empresa, localizada em

São João da Boa Vista – SP, coordenadas 21°58'47.8"S 46°48'46.8"W, utiliza em seu processo produtivo a eletrofusão para transformação mineral.

5.2 PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DO CICLONE

O projeto do ciclone estudado foi fornecido pela empresa parceira do projeto. Além disso, para conferência dos dados, as dimensões do ciclone foram medidas utilizando uma trena e posteriormente foi feita a relação geométrica conforme Tabela 1.

5.3 DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA DO FLUXO DE GÁS

A medida de temperatura do fluxo de gás do sistema de exaustão, foi realizada utilizando o termômetro infravermelho MT-360, marca Minipa, Figura 8, destinado às aplicações que requerem medidas de temperatura sem contato, como em locais de difícil acesso, pontos energizados, com altas temperaturas, em peças ou partes em movimento. Apresenta resposta rápida, de forma prática e conveniente, com auxílio da mira laser para identificação do local de medida (MINIPA, 2015).



Figura 8 - Equipamento MT-360
Fonte: MINIPA (2015).

5.4 DETERMINAÇÃO DA VAZÃO DO FLUXO DE GÁS

Utilizando o equipamento teste 510 em combinação com o tubo de Pitot, Figura 9 a) e b), foi medida a velocidade do fluxo de ar na tubulação, durante a coleta. Após a medida da velocidade, foi medido o diâmetro da tubulação utilizando uma trena (0,85m) e posteriormente foi calculada a área e a vazão, Equação 12 e 13 (TESTO, 2015).

$$A = \frac{(\pi * r^2)}{4} , \quad (12)$$

$$Q = v * A , \quad (13)$$

em que:

Q é a vazão;

A é a área;

v é velocidade;

r é o raio.

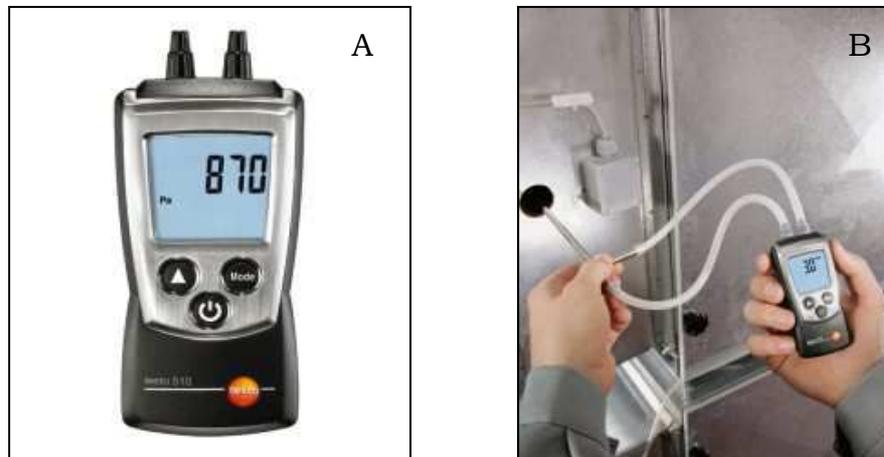


Figura 9 – Testo 510.

A) Equipamento teste 510.

B) Equipamento em combinação com o tubo de Pitot.

Fonte: TESTO (2015).

5.5 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE

Para determinação da densidade absoluta foi utilizando o picnômetro de gás hélio Accupyc 1330 da marca Micromeritics.

A metodologia de picnometria de gás é reconhecida como uma das

técnicas mais confiáveis para a obtenção de densidade absoluta. A densidade absoluta é a massa de uma substância dividida pelo seu volume, excluindo os poros abertos e fechados.

Essa técnica é não-destrutiva pois usa o método de deslocamento de gás para medir o volume com precisão. Os gases inertes, tais como o hélio ou o azoto, são utilizados como meio de deslocamento. A amostra é selada no compartimento do instrumento de volume conhecido, o gás inerte adequado é admitido, e, em seguida, expandido para outro volume interno de precisão. As pressões observadas sobre o enchimento da câmara de amostra e, em seguida, descarregada em uma segunda câmara vazia, permite o cálculo do volume de fase sólida da amostra. Moléculas de hélio enchem rapidamente poros tão pequenos quanto um Angstrom de diâmetro. Apenas a fase sólida da amostra desloca o gás. Dividindo esse volume pelo peso da amostra tem-se a densidade de deslocamento de gás. O princípio de funcionamento é ilustrado pela Figura 10.

Cálculos de densidade usando o método de deslocamento de gás são muito mais precisos e reproduzíveis do que o método de deslocamento de água tradicional, conhecido como Archimedes (MICROMERITICS, 2015).

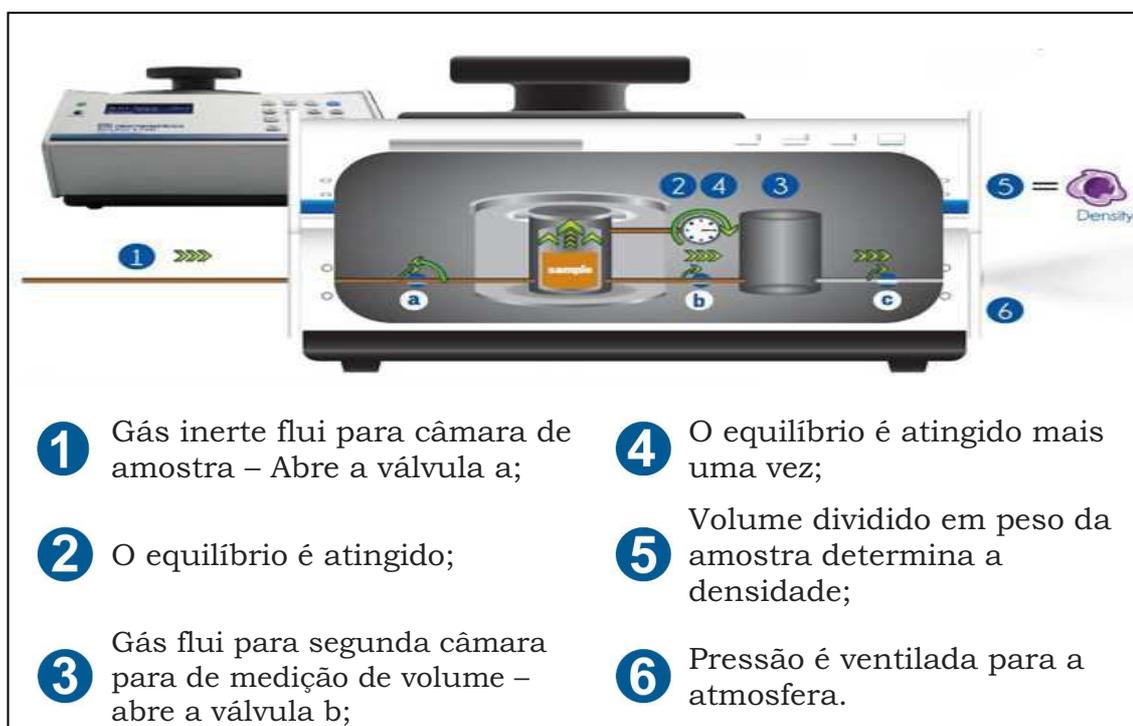


Figura 10 - Princípio de funcionamento do Picnômetro.
Fonte: MICROMERITICS (2015).

5.6 AMOSTRAGEM

Para avaliação da eficiência do sistema de exaustão de material particulado da empresa, foram determinados 4 pontos de coleta de amostra onde o ponto 1 é o material alimentado no forno, ponto 2 o material coletado pelo sistema de exaustão e alimentado no ciclone, ponto 3 o material retido no ciclone, chamado de *underflow* e ponto 4 o material coletado pelo filtro manga, sendo estes pontos indicados na Figura 11.

As amostras foram coletadas 3 vezes por dia, durante 5 dias, na seguinte sequência: 23h (1ª amostragem), 8h (2ª amostragem) e 14h (3ª amostragem). Esse período foi determinado para que representasse o comportamento ao longo do dia, sendo a primeira amostra ao ligar e estabilizar o forno, a segunda no meio do processo e a terceira ao término.

Nos pontos 1, 3 e 4 as amostras foram coletadas por ação da gravidade, sendo no ponto 1 com o auxílio de uma pá que era inserida na abertura do forno no momento da alimentação, conforme Figura 12. E nos pontos 3 e 4 foi realizada com um saco de amostra, conforme Figuras 16 e 17. Para amostragem no ponto 2, foi confeccionado um amostrador de espuma preso à portinhola da tubulação transversalmente ao fluxo de ar, conforme Figuras 13 a 15, e o material era coletado com a portinhola fechada, pois essa tinha que estar fechada no momento da coleta para não interferir no funcionamento do sistema de exaustão e ser uma amostra representativa. Por falta de referência normativa para sistemas de exaustão como o estudado neste trabalho, os pontos e formas de amostragem foram determinados em reuniões com a empresa e escolhidos de maneira que não interferisse no processo produtivo da empresa, como por exemplo, o ponto de amostragem do material alimentado no ciclone onde foi utilizada uma portinhola já existente na tubulação.

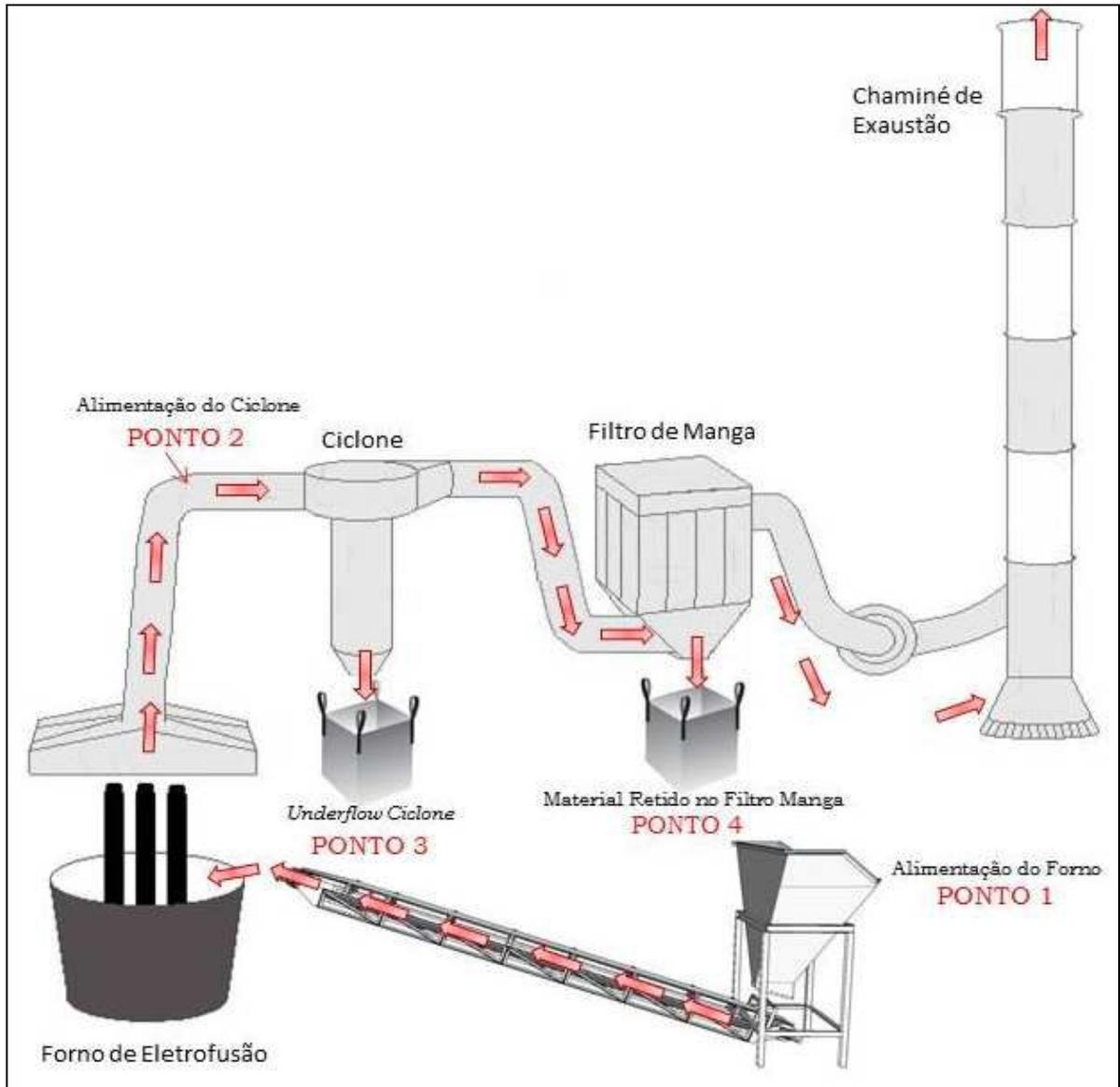


Figura 11 - Indicação dos pontos de amostragem.
Fonte: elaborada pelo autor.



Figura 12 - Amostragem do material sendo alimentado no forno.

Fonte: Elaborada pelo autor.



Figura 13 - Aparato de amostragem do material alimentado no ciclone.

Fonte: Elaborado pelo autor.



Figura 14 - Forma de abertura e fechamento do ponto de amostragem.

Fonte: Elaborado pelo autor.



Figura 15 - Material sendo coletado do amostrador.

Fonte: Elaborado pelo autor.



Figura 16 - Amostragem do material coletado no *Underflow* do ciclone.

Fonte: Elaborado pelo autor.



Figura 17 - Amostragem do material retido no filtro manga.

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.7 ANÁLISE QUÍMICA

A análise química das amostras coletadas no sistema de exaustão foi realizada pelo método de fluorescência de raio-X, utilizando o equipamento XRF 1800, marca Shimadzu.

A análise por espectrometria de fluorescência de raios-X é baseada no fato de que os elementos químicos emitem radiações características quando submetidos a uma excitação adequada. A emissão de espectros de linha característica pode ser induzida pelo impacto de partículas aceleradas, tais como elétrons, prótons, partículas alfa e íons; e, também, pelo impacto de radiações de alta energia a partir de um tubo de raios-X ou de uma fonte radioativa. Geralmente a excitação direta do elétron é utilizada em técnicas de micro sonda eletrônica, enquanto as fontes de radioisótopos e geradores de prótons são comumente associadas à dispersão de energia do elétron (VANDECASTEELE e BLOCK, 1993).

Um átomo ao receber uma descarga de raios-X possibilita a entrada de fótons de raios-X que atingem um elétron, esse elétron é retirado da camada atômica de menor energia, deixando um vazio, esse vazio é preenchido por um elétron de maior energia. No processo há liberação de energia (fluorescência) desprendida na forma de um fóton de raios-X (VANDECASTEELE e BLOCK, 1993).

A radiação emitida pela amostra demonstra as características de comprimento de onda dos elementos presentes na amostra. O feixe refletido é guiado em um sistema chamado dispersivo, produzindo espectros de linhas que estão diretamente relacionados com os elementos presentes na amostra (VANDECASTEELE e BLOCK, 1993).

Santiago et al. (2015) fizeram a caracterização química do material particulado suspenso no ar na região de Cuiabá no período de queimadas do ano de 2012, foi utilizada a técnica de fluorescência de raios X por dispersão em energia. Foram identificados e quantificados 10 elementos químicos (Al, S, Cl, K, Ca, Fe, Cu, Zn, Sr e Ba), predominando os característicos de ressuspensão do solo e queimadas (Al, Fe, Ca, K e Cl), além dos vinculados às emissões veiculares e industriais (Zn, S, Cu).

Yamasoe et al. (2000) recolheram partículas de aerossol em plumas de floresta tropical e cerrado da queima de biomassa na Bacia Amazônica durante agosto e setembro de 1992. A queima de biomassa é uma importante fonte global de partículas de aerossol para a atmosfera. Concentrações de fração fina e grossa de aerossol foram obtidos por método gravimétrico utilizando uma microbalança eletrônica. Concentrações elementares foram medidas emissão de Raios-X. Os seguintes elementos foram medidas nas amostras de aerossóis: Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Se, Br, Rb, Sr e Zr.

5.8 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A análise granulométrica das amostras coletadas no sistema de exaustão foi realizada utilizando o equipamento Malvern, que utiliza a técnica de espalhamento de luz laser de baixo ângulo, conhecida genericamente por “espalhamento de luz”. Esse método de análise de tamanho de partículas, também conhecido como difração laser, consiste na medição dos ângulos de difração do raio laser, que são relacionados ao diâmetro da partícula.

Atualmente, é a técnica mais utilizada na determinação do diâmetro de partículas devido à possibilidade de medidas em diversos meios: ar, suspensões, emulsões e aerossóis. Possui amplitude de 0,01 a 3.500 μm , dependendo do equipamento, sendo a faixa de aplicação recomendada de 0,1 a 3.000 μm . Permite a reprodutibilidade dos resultados pela integração de várias médias individuais e possibilita a fácil verificação da calibração por meio de materiais padrão.

Como desvantagens, essa técnica requer equipamentos de difração laser de custo relativamente alto e possui dificuldade de aplicação para materiais com dimensões superiores a 2 mm, devido aos ângulos de espalhamento serem muito pequenos.

No método de difração laser, as partículas grossas espalham o raio a menores ângulos e vice-versa. É empregado o laser (fonte de luz de comprimento de onda fixo, comumente $\lambda=0,63 \mu\text{m}$) e detectores para

espalhamento da luz, que emitem mensagens para um computador que calcula e fornece os resultados (FRANÇA e COUTO, 2007).

Brito et al. (2005), avaliaram as características físicas e químicas de materiais do processamento cerâmico. A distribuição do tamanho de partículas foi analisada utilizando o equipamento Malvern.

Frare et al. (2000) dizem que as análises granulométricas de sólidos podem ser satisfatoriamente representadas pelos modelos de distribuição a 2 parâmetros: Gates-Gaudin-Schumann (GGS), Rosin-Rammler-Bennet (RRB) e Log-Normal (LN). Os modelos GGS e RRB podem ser linearizados, obtendo-se um coeficiente de correlação que permite avaliar a qualidade do ajuste. Entretanto, para o modelo LN, o ajuste linear é feito através de um gráfico do diâmetro de partícula em escala logarítmica versus fração cumulativa em escala de probabilidades, não sendo possível comparar seu ajuste com os dois anteriores, sob uma mesma base. Sendo assim, partiu-se nesse trabalho de um conjunto de equações desenvolvidas por Lawless (1978 apud FRARE, 2000), que possibilita a obtenção de um coeficiente de correlação linear para o modelo LN. Desta forma, os modelos GGS, RRB e LN podem ser avaliados por meio da comparação dos coeficientes envolvidos na regressão linear, tornando o trabalho de ajuste mais ágil e preciso.

5.9 CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA X VERSUS D

Através dos resultados de diâmetro (D_i) e volume (%) de partícula, obtidos na análise realizada no equipamento Malvern, pode-se obter a curva de distribuição granulométrica de cada amostra. Para isso, calcula-se a porcentagem da fração em massa acumulada (x) para cada diâmetro de partícula (D_i), conforme exemplificado na Tabela 2.

Tabela 2 - Exemplo do cálculo da porcentagem de fração em massa acumulada.

Diâmetro médio D_i (μm)	Volume (%)	Fração em massa retida (Δx)	Fração em massa acumulada x (F)	x (%)
20	10	0,100	0,100	10
50	70	0,700	0,800	80
130	20	0,200	1,000	100
Soma	200	100	1,000	190

Fonte: Elaborado pelo autor.

Onde a fração em massa retida para a partícula de diâmetro 50mm é dada por $70/100 = 0.7$, enquanto a fração de massa acumulada é dada por $0.100 + 0.700 = 0.800$ ($\Delta x(D_i=20\mu\text{m}) + \Delta x(D_i=50\mu\text{m})$).

5.10 DETERMINAÇÃO DO D_{50}

5.10.1 $D_{50\text{projeto}}$ e $D_{50\text{calculado}}$

Utilizando a Equação 1, calcularam-se o $D_{50\text{calculado}}$ e $D_{50\text{projeto}}$ utilizando velocidade e vazão, medida e de projeto respectivamente.

5.10.2 $D_{50\text{medido}}$ - interpolação

A fim de se calcular o D_{50} de cada amostra foi utilizado o método de interpolação, mais especificamente, interpolação linear a partir de pontos das curvas de distribuição granulométrica das amostras.

O método utiliza de uma função linear $p(X)$ para representar, por aproximação, uma função $f(X)$ que originalmente representaria as imagens de um intervalo descontínuo contido no domínio de $f(X)$.

A interpolação linear entre dois pontos (X_0, Y_0) e (X_1, Y_1) pode ser deduzida usando-se proporcionalidade (VIEIRA, 2014):

$$Y = Y_0 + (Y_1 - Y_0) * \frac{X - X_0}{X_1 - X_0}, \quad (14)$$

em que, (X,Y) é o ponto que se deseja estimar.

Em nossa análise deseja-se estimar Y para X = 50 (D₅₀).

Nas curvas x versus D não se tem X para D_i = 50; para determinar o D₅₀, então, foi utilizado o método de interpolação, mais especificamente, interpolação linear, onde foram escolhidos dois pontos do gráfico, um com D_i menor do que 50 e outro maior e estimado o ponto Y(X=50).

Determinados os valores dos diâmetros de corte (D₅₀) de todas as amostras da alimentação do ciclone, faz-se a média aritmética desses valores que, pode ser usada, então, como valor D_{50medido} do ciclone.

5.11 CLASSIFICAÇÃO DO CICLONE

A fim de avaliar o ciclone da empresa parceira do projeto e classificá-lo de acordo com uma família de ciclone conhecida na literatura, primeiramente foram feitas as medidas dos parâmetros geométricos do ciclone utilizando uma fita métrica. Posteriormente foi feita a relação geométrica, conforme Tabela 1 e comparada com as relações geométricas das famílias de ciclone usuais.

A comparação do ciclone estudado com as demais famílias de ciclone, foi feita utilizando-se uma normalização dos dados pelo parâmetro D_c, então, as dimensões (B_c, D_o, H_c, L_c, S_c, Z_c, D_u) foram divididas por D_c.

5.12 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS RRB

Para determinar os parâmetros do modelo RRB, primeiramente foi realizada a linearização da Equação 2, obtendo-se:

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-x}\right)\right) = n \cdot \ln D - n \cdot \ln D' \quad (15)$$

Após a obtenção da equação linear do modelo RRB (15), foi utilizado o programa *Excel*, gerado um gráfico, a partir dos dados granulométricos da pior condição de operação, em que a ordenada representa os valores de y = ln(ln(1/1-x)), e a abcissa representa os valores de x = ln D_i e, então, determinado a equação linear y = ax + b de ajuste à curva. Comparando-se a

equação ajustada com a Equação (15) podemos determinar os parâmetros n e D' do modelo RBR onde $a=n$ e $b = n \cdot \ln(D')$.

A partir dos mesmos dados, os parâmetros do modelo RRB também foram determinados através da estimação dos parâmetros via mínimos quadrados generalizados, utilizando o *software* R. O ANEXO A traz o código utilizado no *software* R.

5.13 TRATAMENTO ESTATÍSTICO

O tratamento estatístico dos dados experimentais de concentração de particulados foi realizado análise de variância a fim de determinar, a partir da análise dos dados de granulometria, se há diferenças significativas na operação do sistema de exaustão nas diferentes fases da produção, e nos diferentes dias da semana; e com isso isolar o pior cenário de operação. Para os cálculos estatísticos foi utilizado o *software* R.

Maziero e colaboradores (2006), avaliaram os níveis de emissões de gases poluentes e material particulado e o desempenho de um motor de ignição por compressão alimentado com éster etílico de óleo de girassol (EEOG) em ensaios realizados em bancada dinamométrica. Os valores das variáveis avaliadas foram comparados pelo teste Tukey e não diferem estatisticamente.

Missagia et al. (2013), empregaram a análise de variância (ANAVA) e posteriormente o teste de comparação de médias de Tukey na investigação da influência dos fatores individuais (espécies de madeira; faixa granulométrica; fração mássica de serragem), assim como da interação entre ambos nas propriedades físicas e mecânicas de interesse.

5.14 ANÁLISE DE EFICIÊNCIA

5.14.1 Eficiência parcial

Para determinação da eficiência parcial para o D_{50} (de projeto, calculado, e medido) foi utilizada a Equação (8).

5.14.2 Eficiência global

A fim de determinar a eficiência global pode ser utilizado o balanço de massa, em que, a partir dos dados obtidos de quantidade média de matéria prima alimentada, bloco e crosta obtidos ao término do processo, *underflow* do ciclone e material coletado no filtro de manga, foi utilizada a Equação 9 e obtida a eficiência global do ciclone.

O cálculo dos parâmetros de balanço de massa foram calculados como disposto a seguir:

W_{SU} = massa de sólidos no *underflow* do ciclone, determinado através da média dos pesos obtidos nos bigbags ao término de cada batelada;

W_S = alimentação do forno – bloco – casca – crosta – perda para atmosfera, sendo que:

Perda para atmosfera = alimentação do forno – bloco – crosta – *underflow* do ciclone – material retido no filtro manga.

Utilizando os parâmetros do modelo RRB, também se pode calcular a eficiência global através da Equação 11.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 PROJETO DO CICLONE

O projeto do ciclone estudado foi fornecido pela empresa parceira do projeto. Além disso, para conferência dos dados, as dimensões do ciclone foram medidas utilizando uma trena, obtendo-se as configurações contidas na Tabela 3.

Tabela 3 - Configurações de projeto do ciclone estudado.

Dados de Projeto		
D_c =	1600	mm
D_o =	1130	mm
S_c =	1350	mm
L_c =	2300	mm
Z_c =	3020	mm
H_c =	1150	mm
B_c =	590	mm
D_u =	405	mm

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com os dados de projeto do ciclone foi feito a comparação das relações geométricas entre as famílias de ciclones usuais e o ciclone estudado, demonstrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Comparação das relações geométricas das famílias de ciclone e o ciclone estudado.

DIMENSÕES	CICLONE			
	Lapple	Stairmand	Niigas-11	ESTUDADO
B_c / D_c	0,25	0,20	0,26	0,37
D_o / D_c	0,50	0,50	0,60	0,71
H_c / D_c	0,50	0,50	0,48	0,72
L_c / D_c	2,00	1,50	2,08	1,44
S_c / D_c	0,62	0,50	1,30	0,84
Z_c / D_c	2,00	2,50	2,00	1,89
D_u / D_c	0,25	0,37	0,22	0,25
Inclinação do duto de alimentação	0	0	11°	0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para facilitar a comparação entre as famílias de ciclone usuais e o ciclone estudado foi realizada a conversão das relações geométricas para proporções em números inteiros, demonstrado na Tabela 5.

Tabela 5 - Comparação das relações geométricas das famílias de ciclone e o ciclone estudado – valores renormalizados.

DIMENSÕES	CICLONE			
	Lapple	Stairmand	Niigas-11	ESTUDADO
B_c / D_c	1	1	1	1
D_o / D_c	2	3	2	2
H_c / D_c	2	3	2	2
L_c / D_c	8	8	8	4
S_c / D_c	2	3	5	2
Z_c / D_c	8	13	8	5
D_u / D_c	1	2	1	1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se que o ciclone estudado não se enquadra em nenhuma das famílias comparadas. A família que mais se enquadra é a família Lapple que foi utilizada nas próximas etapas as equações indicadas para esta família.

6.2 TEMPERATURA, VELOCIDADE, VAZÃO E DENSIDADE

Aplicando-se as metodologias apropriadas descritas no Capítulo 5, determinaram-se a densidade média da partícula do material alimentado no ciclone, igual a 3520 kg/m³, a temperatura do gás da tubulação de 40°C, obtidos na literatura a viscosidade do gás (μ_g) igual a 1,85x10⁻⁵ kg/m.s e densidade do gás (ρ_g) igual a 1,12 kg/m³.

A empresa parceira do projeto forneceu os dados de velocidade e vazão de projeto de 16,2 m/s e 35.000 m³/h, respectivamente. Além disso, mediu-se a vazão e velocidade no momento da coleta, conforme metodologia descrita no capítulo 5, onde a velocidade foi igual a 24,0 m/s e a vazão igual a 48.960 m³/h.

6.3 ANÁLISE QUÍMICA E GRANULOMÉTRICA

A partir dos dados granulométricos do Malvern, foram calculadas as porcentagens da fração em massa acumulada (x) de partículas de diâmetro D_i de cada amostra coletada.

As curvas x vs D_i dos dados granulométricos da alimentação do forno, alimentação do ciclone, *underflow* do ciclone e material retido no filtro de mangas obtidos em um mesmo horário (definam-se dados obtidos num mesmo horário como amostragem) foram plotados em um único gráfico. As Figuras de 18 a 31 ilustram as curvas de distribuição granulométrica de todas as amostragens realizadas. A curva vermelha representa a distribuição granulométrica da alimentação do forno; a azul, da alimentação do ciclone; a amarela, do *underflow* do ciclone; e a verde, o material coletado no filtro manga.

A seguir, apresentam-se os resultados das análises químicas e granulométricas das amostragens, separadas por batelada do forno de eletrofusão.

6.3.1 1ª Batelada

Tabela 6 - Análise química realizada na primeira batelada nos quatro pontos de amostragem.

Local Coleta	ANÁLISE (%)									
	TiO ₂	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	ZrO ₂	Al ₂ O ₃	U+PF
Alimentação Forno	0,003	0,013	0,033	0,043	0,020	0,437	0,000	0,007	99,47	0,503
Alimentação Ciclone	0,000	0,070	0,025	0,040	0,000	0,460	0,010	0,000	97,48	2,095
Underflow Ciclone	0,005	0,000	0,0025	0,030	0,000	0,490	0,005	0,000	98,04	1,520
Material Coletado Filtro Manga	0,000	1,875	0,070	0,040	0,040	1,265	0,025	0,010	94,46	2,170

Fonte: Elaborado pelo autor.

Não foi feita a 1ª amostragem da 1ª batelada, pois o forno não estava operando.

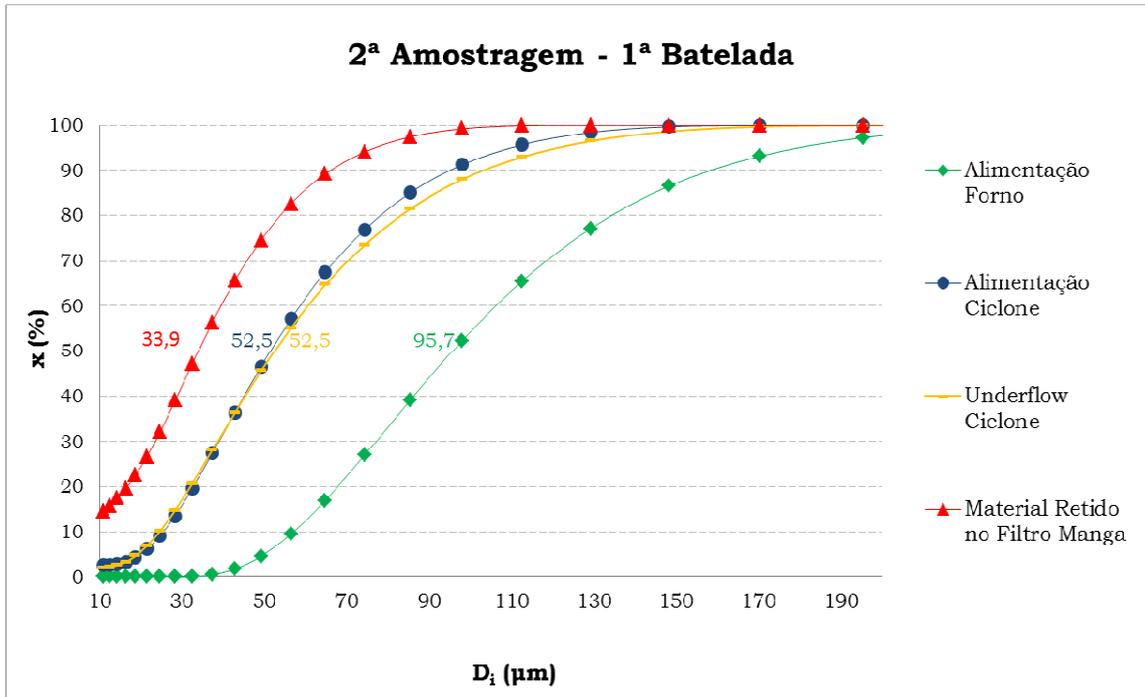


Figura 18 – Curva granulométrica da 2ª amostragem – 2ª batelada.
 Fonte: Elaborado pelo autor.

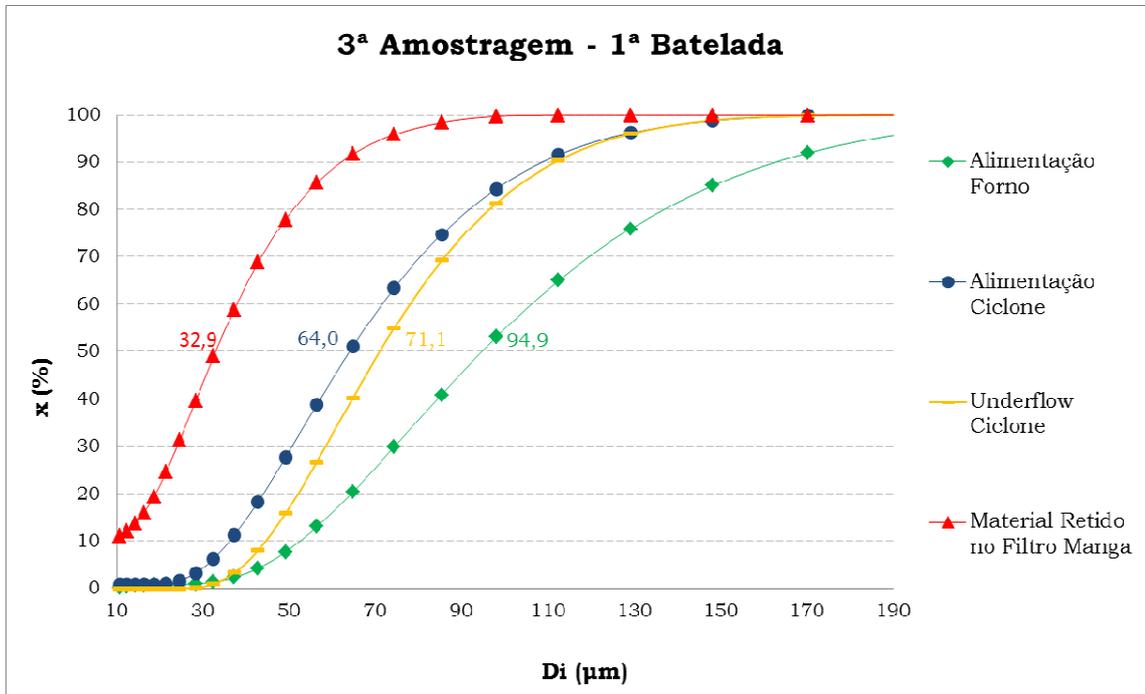


Figura 19 – Curva granulométrica 3ª amostragem – 1ª batelada.
 Fonte: Elaborado pelo autor.

6.3.2 2ª Batelada

Tabela 7 - Análise química realizada na segunda batelada nos quatro pontos de amostragem.

Local Coleta	ANÁLISE (%)									
	TiO ₂	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	ZrO ₂	Al ₂ O ₃	U+PF
Alimentação Forno	0,000	0,050	0,020	0,050	0,020	0,470	0,000	0,000	99,43	0,507
Alimentação Ciclone	0,000	0,065	0,030	0,045	0,000	0,490	0,005	0,000	99,36	1,535
Underflow Ciclone	0,005	0,030	0,095	0,040	0,000	0,470	0,010	0,000	99,36	2,135
Material Coletado Filtro Manga	0,005	0,770	0,085	0,045	0,035	1,220	0,015	0,005	97,82	2,630

Fonte: Elaborado pelo autor.

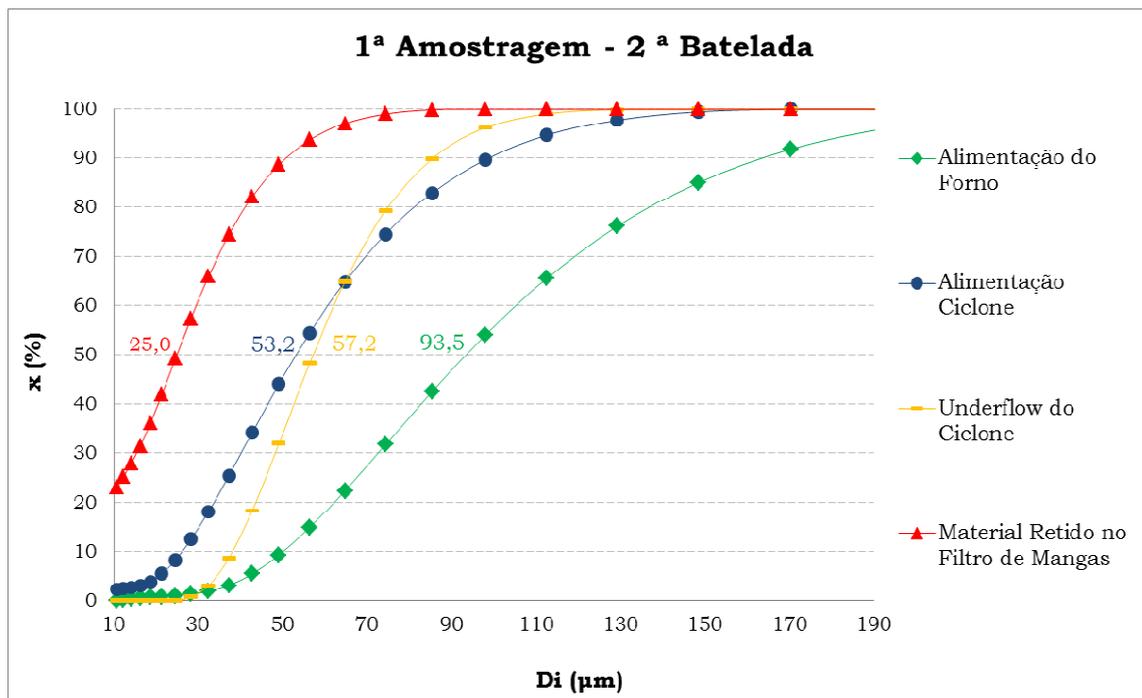


Figura 20 – Curva granulométrica 1ª amostragem – 2ª batelada.

Fonte: Elaborado pelo autor.

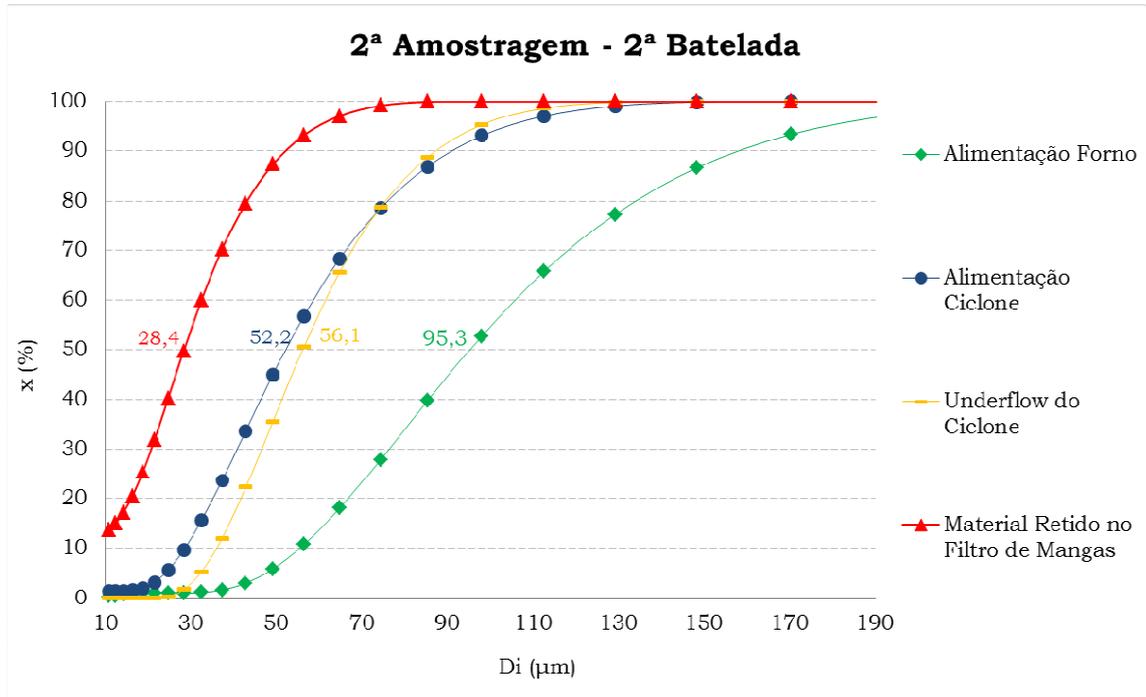


Figura 21 – Curva granulométrica 2ª amostragem – 2ª batelada.
 Fonte: Elaborado pelo autor.

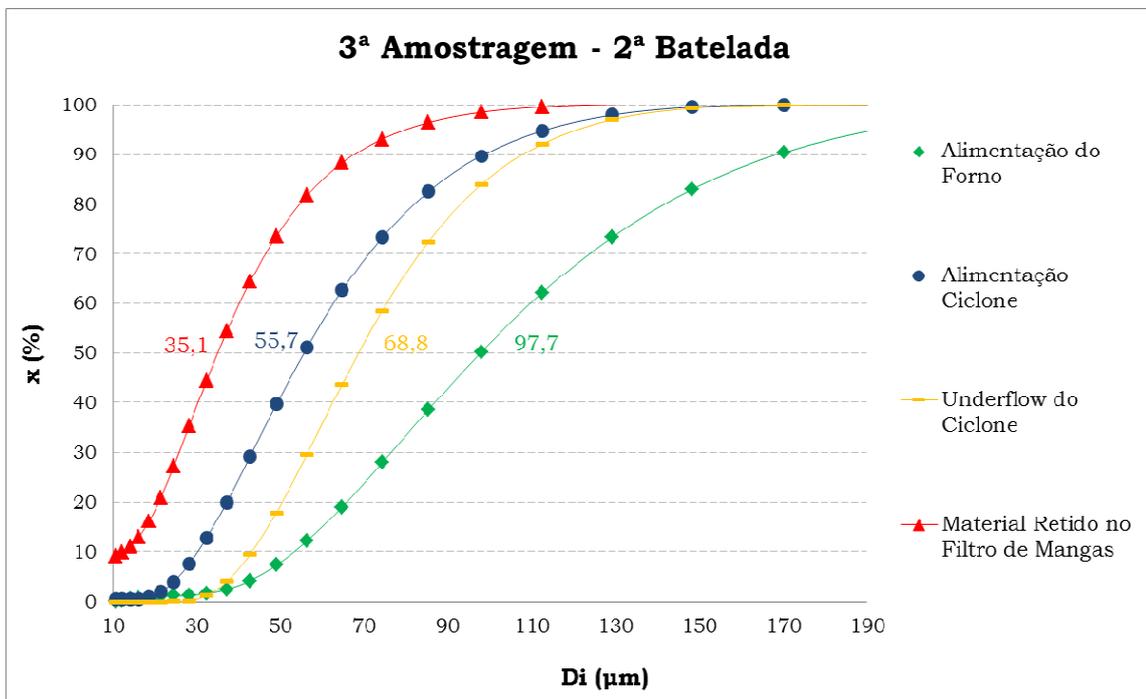


Figura 22 – Curva granulométrica 3ª amostragem – 2ª batelada.
 Fonte: Elaborado pelo autor.

6.3.3 3ª Batelada

Tabela 8 - Análise química realizada na terceira batelada nos quatro pontos de amostragem.

Local Coleta	ANÁLISE (%)									
	TiO ₂	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	ZrO ₂	Al ₂ O ₃	U+PF
Alimentação Forno	0,000	0,017	0,033	0,053	0,003	0,400	0,003	0,007	99,04	0,823
Alimentação Ciclone	0,007	0,027	0,080	0,063	-	0,493	0,100	0,007	97,41	2,020
Underflow Ciclone	0,000	0,023	0,043	0,053	-	0,463	0,003	0,010	97,97	1,560
Material Coletado Filtro Manga	0,000	0,655	0,135	0,060	-	1,210	0,020	0,010	95,93	2,000

Fonte: Elaborado pelo autor.

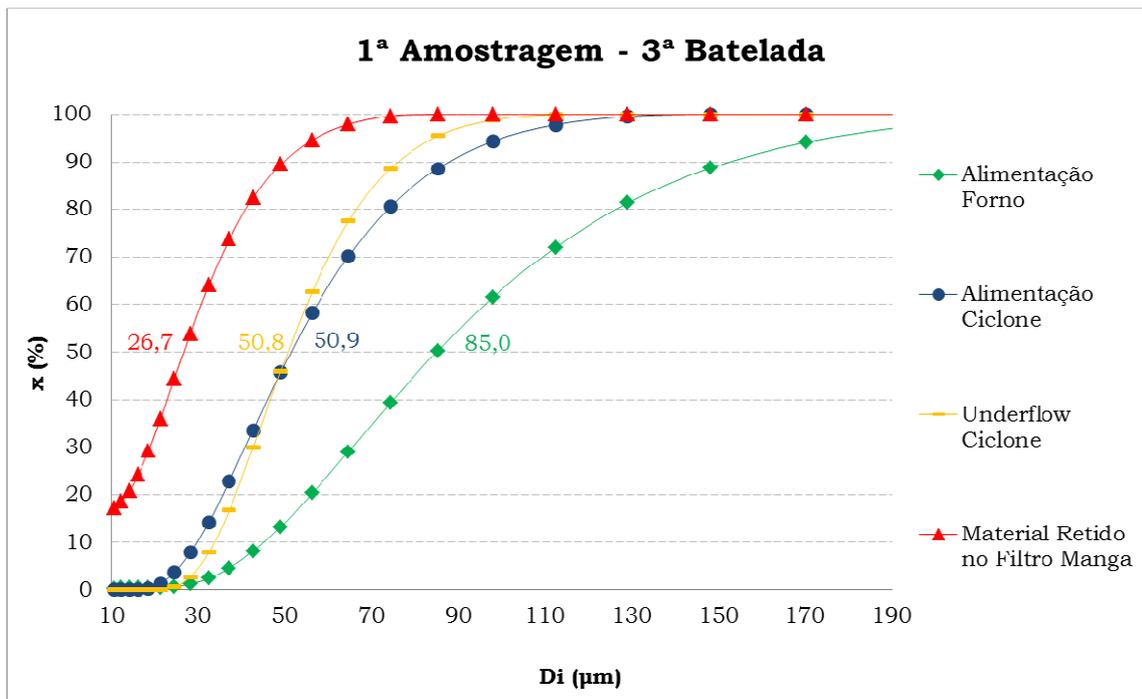


Figura 23 – Curva granulométrica 1ª amostragem – 3ª batelada.

Fonte: Elaborado pelo autor.

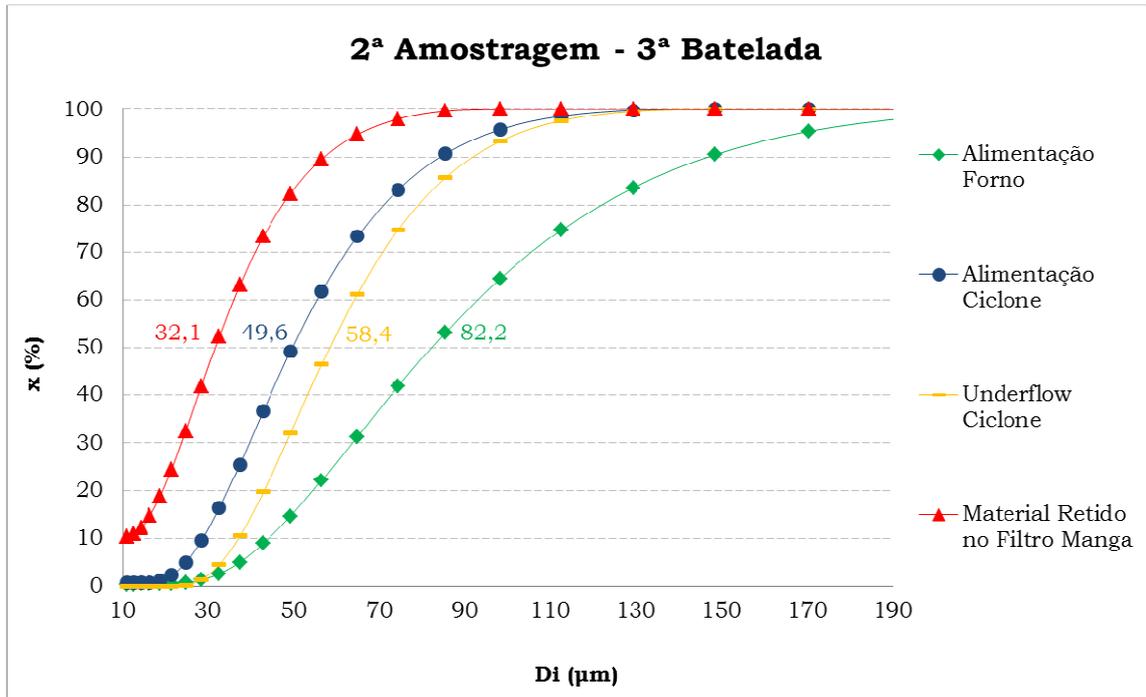


Figura 24 - Curva granulométrica 2ª amostragem – 3ª batelada.
Fonte: Elaborado pelo autor.

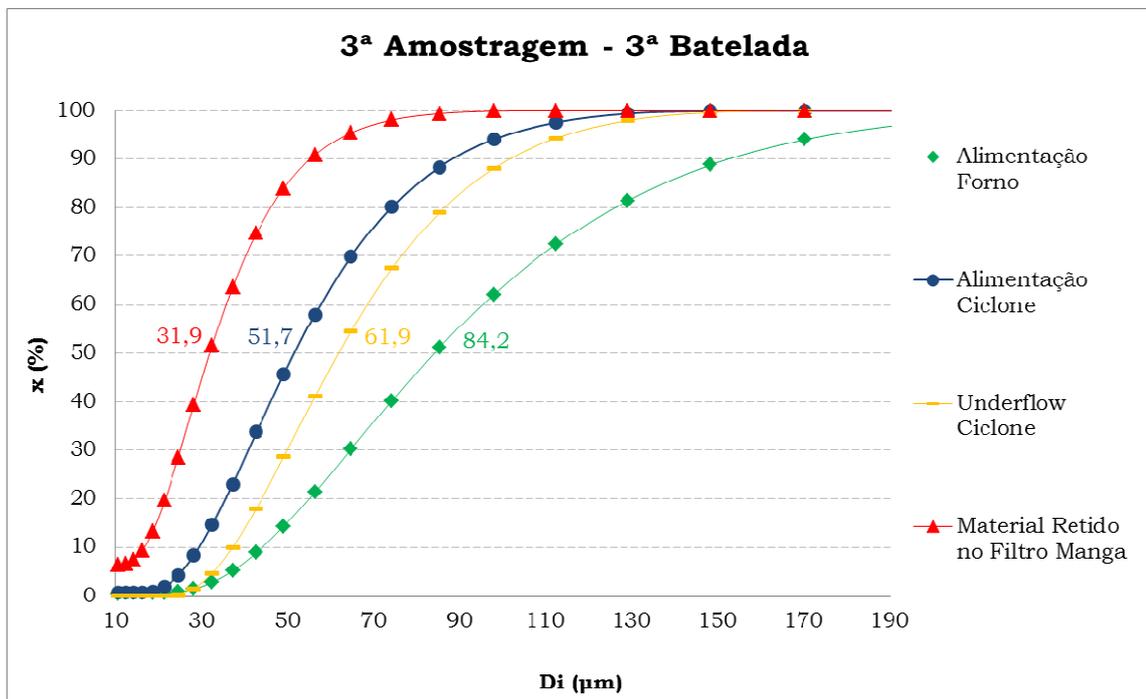


Figura 25 - Curva granulométrica 3ª amostragem – 3ª batelada.
Fonte: Elaborado pelo autor.

6.3.4 4ª Batelada

Tabela 9 - Análise química realizada na quarta batelada nos quatro pontos de amostragem.

Local Coleta	ANÁLISE (%)									
	TiO ₂	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	ZrO ₂	Al ₂ O ₃	U+PF
Alimentação Forno	0,030	0,017	0,027	0,057	0,057	0,533	0,000	0,020	99,26	1,540
Alimentação Ciclone	0,000	0,020	0,033	0,060	0,003	0,470	0,010	0,010	98,61	0,877
Underflow Ciclone	0,007	0,020	0,050	0,057	0,000	0,483	0,007	0,007	98,73	0,723
Material Coletado Filtro Manga	0,000	0,353	0,073	0,067	0,017	1,123	0,017	0,007	95,21	3,127

Fonte: Elaborado pelo autor.

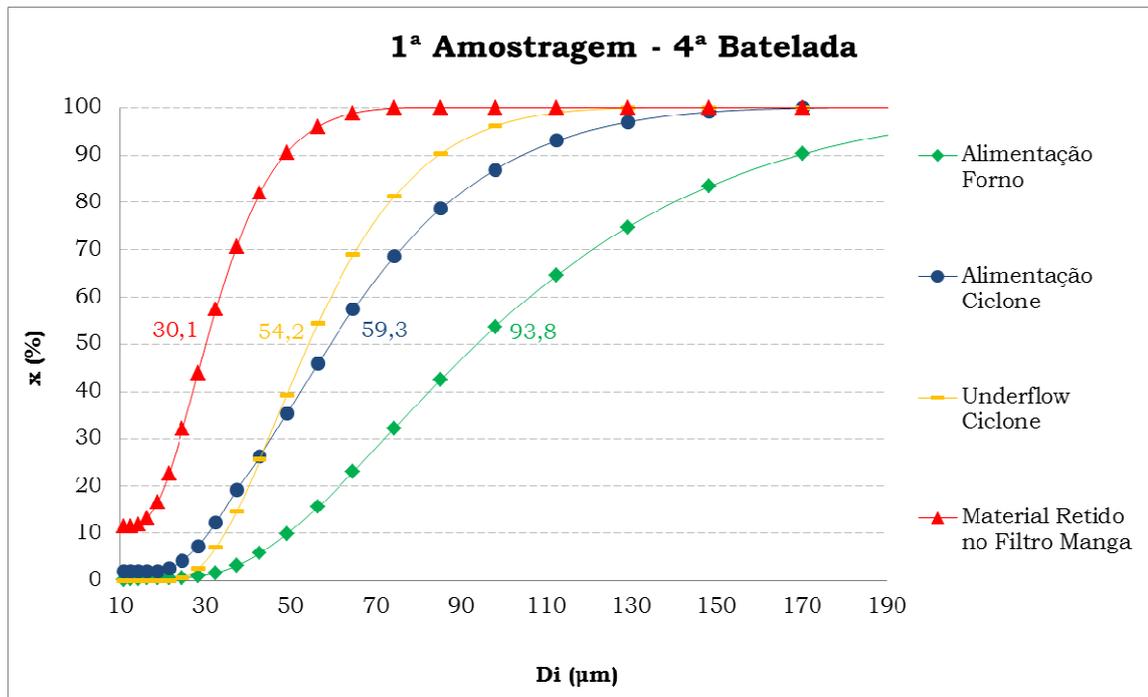


Figura 26 – Curva granulométrica 1ª amostragem – 4ª batelada.

Fonte: Elaborado pelo autor.

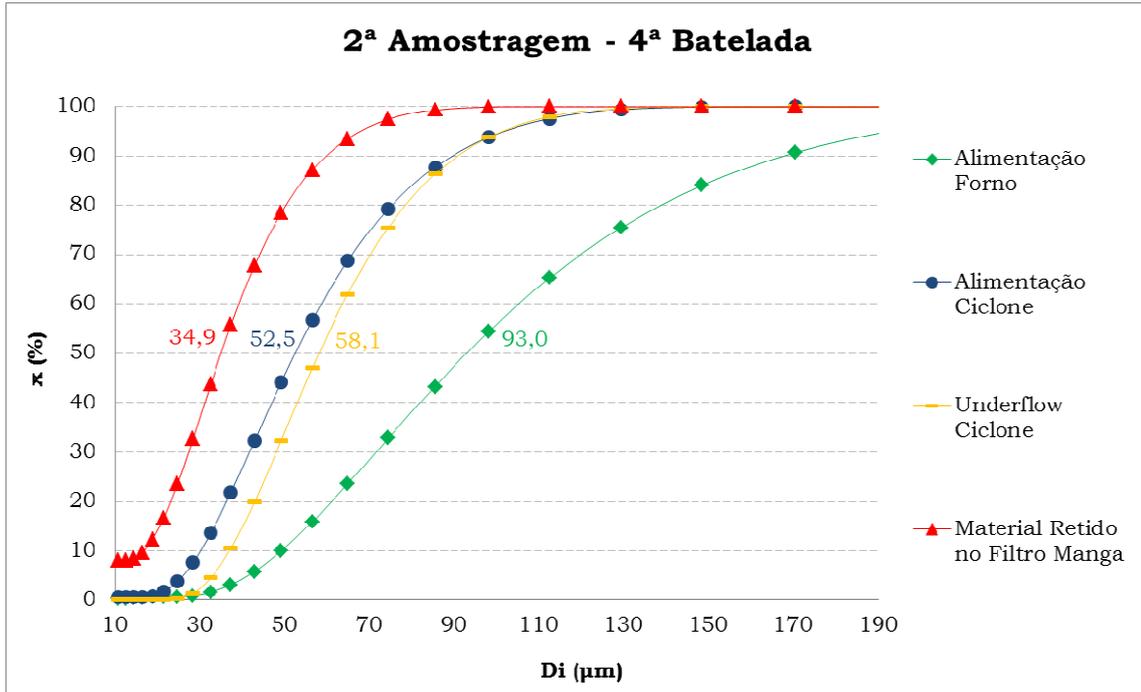


Figura 27 – Curva granulométrica 2ª amostragem – 4ª batelada.
 Fonte: Elaborado pelo autor.

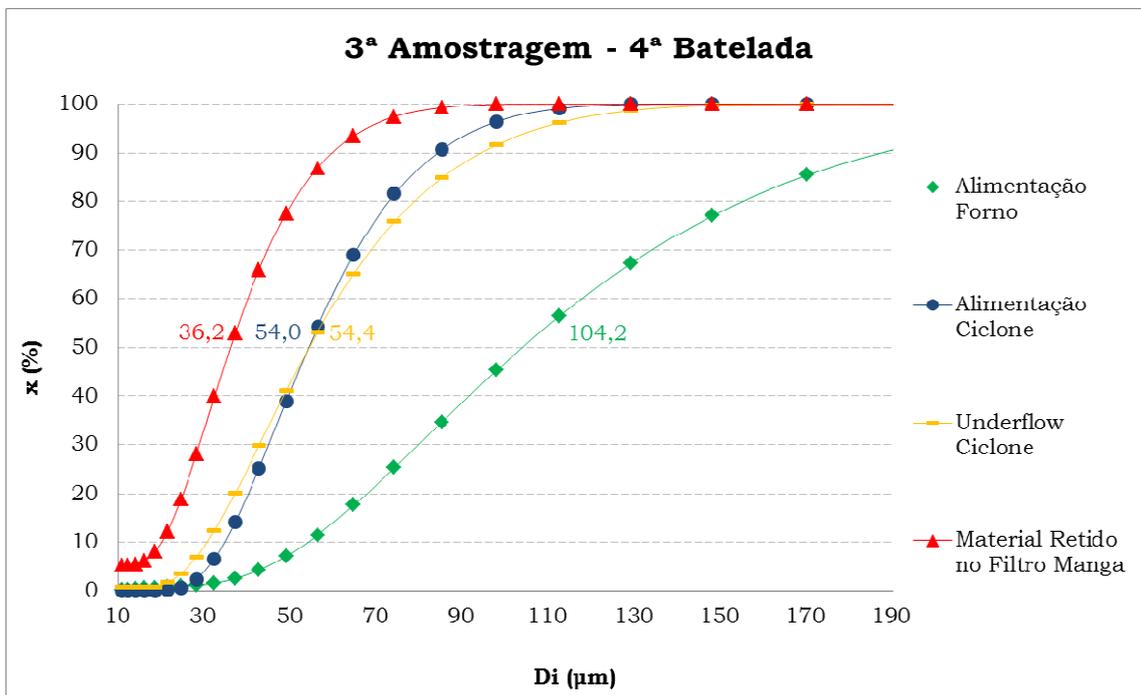


Figura 28 – Curva granulométrica 3ª amostragem – 4ª batelada.
 Fonte: Elaborado pelo autor.

6.3.5 5ª Batelada

Tabela 10 - Análise química realizada na quinta batelada nos quatro pontos de amostragem.

Local Coleta	ANÁLISE (%)									
	TiO ₂	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	ZrO ₂	Al ₂ O ₃	U+PF
Alimentação Forno	0,000	0,007	0,023	0,047	0,030	0,590	0,000	0,020	99,28	1,263
Alimentação Ciclone	0,005	0,025	0,390	0,050	0,000	0,530	0,010	0,010	98,04	1,040
Underflow Ciclone	0,000	0,040	0,045	0,050	0,000	0,540	0,010	0,010	98,35	1,085
Material Coletado Filtro Manga	0,003	0,340	0,220	0,060	0,007	1,440	0,027	0,010	94,78	3,093

Fonte: Elaborado pelo autor.

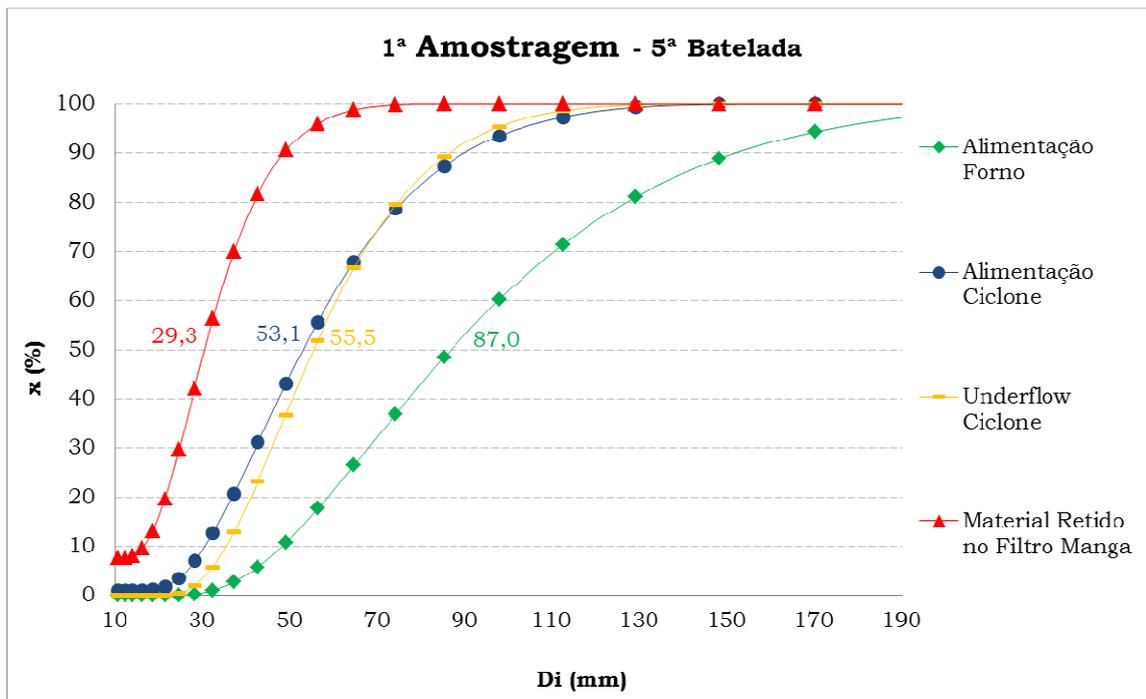


Figura 29 – Curva granulométrica 1ª amostragem – 5ª batelada.

Fonte: Elaborado pelo autor.

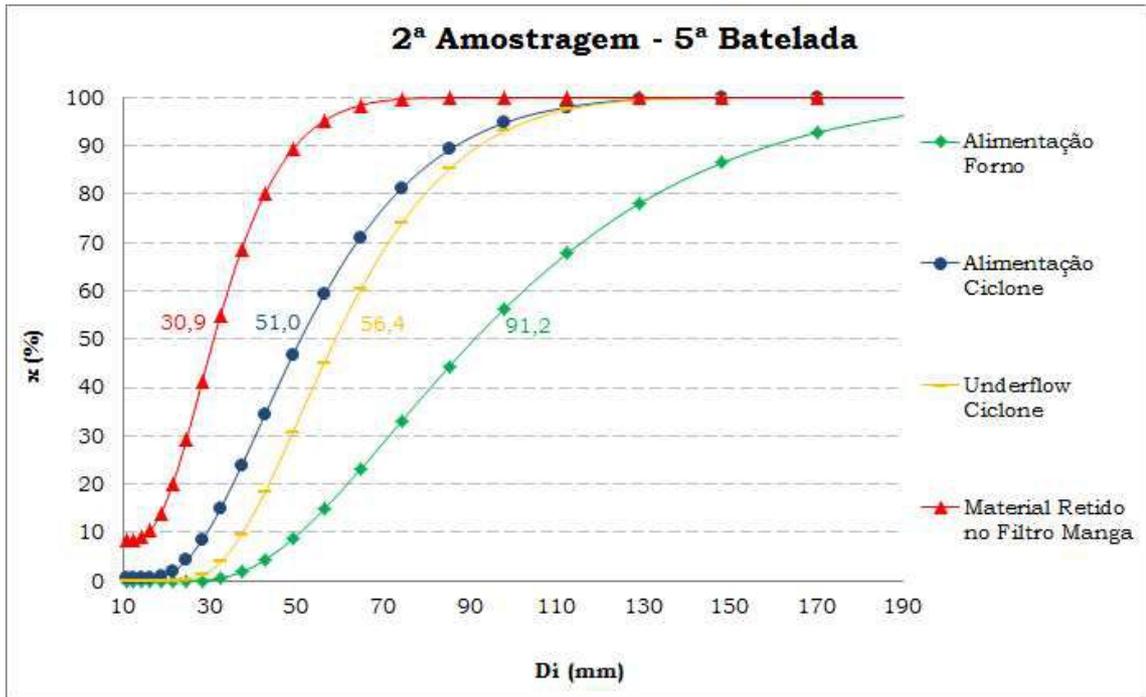


Figura 30 – Curva granulométrica 2ª amostragem – 5ª batelada.
 Fonte: Elaborado pelo autor.

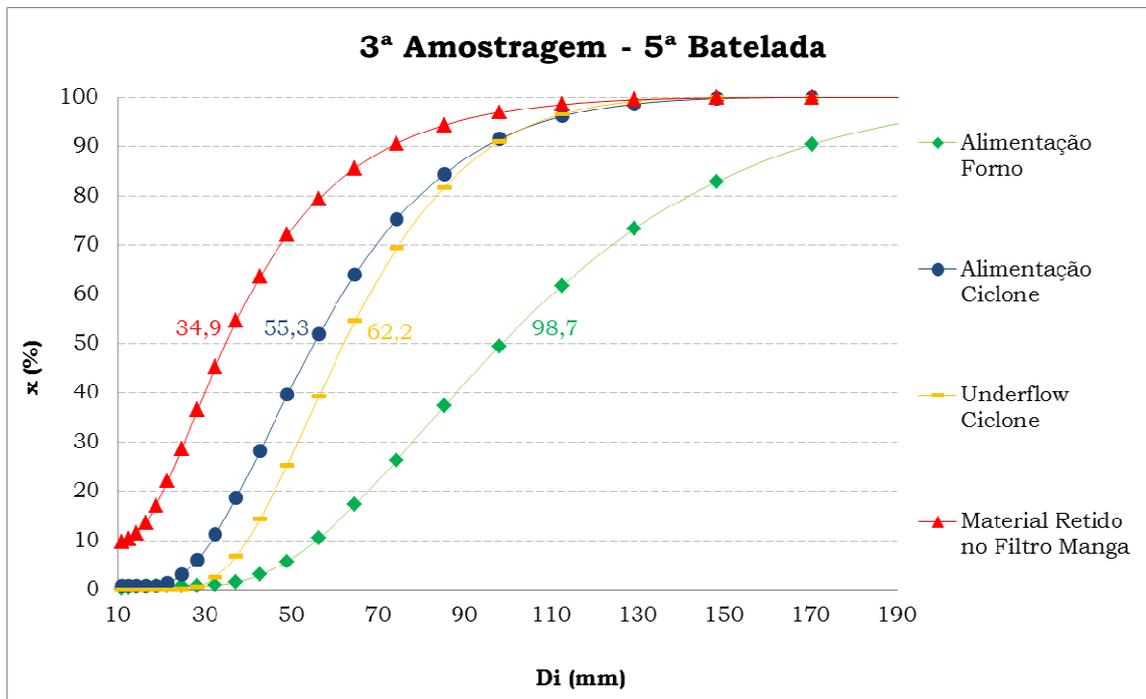


Figura 31 – Curva granulométrica 3ª amostragem – 5ª batelada.
 Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir das análises químicas é possível visualizar houve maior variação nas amostras coletadas no filtro de manga, onde os teores de SiO_2 , Fe_2O_3 , Na_2O são maiores e o teor de Al_2O_3 menor comparado às amostras coletadas nos outros pontos, isso ocorre provavelmente por contaminação de

outros produtos, pois as mangas não são trocadas a cada batelada; por exemplo, um outro produto feito na mesma linha utiliza areia, portanto justifica o aumento de SiO₂.

Nota-se que o D_{50medido} da alimentação do ciclone e do *underflow* do ciclone estão próximos. Nota-se também que o D_{50medido} do material retido no filtro de manga é alto, em torno de 25 e 35 µm, ciclones bem projetados são eficientes na coleta deste diâmetro. Além disso, a partir das curvas granulométricas, nota-se que nas primeiras amostragens realizadas em 4 bateladas houve cruzamento das curvas da alimentação do ciclone e *underflow* do ciclone. O normal seria a curva da alimentação do ciclone estar localizada entre a curva do *underflow* do ciclone e o material retido no filtro manga. Acredita-se que, provavelmente, a forma de amostragem da alimentação do ciclone, tenha afetado a análise de granulometria: a) pode haver saturação na espuma coletora na primeira amostragem, pois é o momento mais turbulento de funcionamento do forno onde há maior suspensão de material particulado; b) o amostrador tem formato quadrangular, conforme demonstrado na Figura 32, logo há desvio de fluxo de ar gás arrastando partículas menores.

Nota-se que o D_{50medido} da alimentação do ciclone e do *underflow* do ciclone estão próximos, se isso realmente acontecesse o ciclone teria ótima eficiência. Santini (2011), diz que os ciclones possuem eficiência de remoção acima de 90% para partículas maiores que 50 µm e acima de 80% para partículas entre 20 e 50 µm, isso não ocorre, pois o D_{50medido} do material retido no filtro de manga varia de 25 a 35 µm.

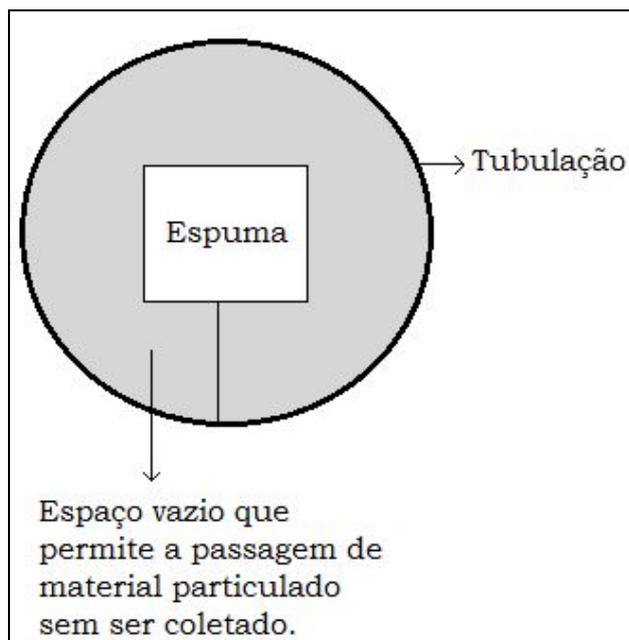


Figura 32 - Amostrador do Material Particulado que Alimenta o Ciclone.

Fonte: Elaborado pelo autor.

6.4 OBTEÇÃO DO D_{50}

6.4.1 Obteção do D_{50} interpolado

A partir da interpolação de dados das curvas de distribuição granulométrica obtém-se o $D_{50\text{medido}}$ de cada amostragem em cada um dos quatro pontos de coleta nas 5 bateladas. Os valores obtidos estão resumidos na Tabela 11.

Tabela 11 - $D_{50\text{medido}}$ obtidos através de interpolação linear.

	$D_{50\text{medido}}$ obtidos através de interpolação linear														
	1ª Batelada		2ª Batelada			3ª Batelada			4ª Batelada			5ª Batelada			Média
	2ªAm.	3ªAm.	1ªAm.	2ªAm.	3ªAm.	1ªAm.	2ªAm.	3ªAm.	1ªAm.	2ªAm.	3ªAm.	1ªAm.	2ªAm.	3ªAm.	
Alimentação Forno	95,7	94,9	93,5	95,3	97,7	85,0	82,2	84,2	93,8	93,0	104,2	87,0	91,2	98,7	92,6
Alimentação Ciclone	52,5	64,0	53,2	52,2	55,7	50,9	49,6	51,7	59,3	52,5	54,0	53,1	51,0	55,3	53,9
Underflow Ciclone	52,5	71,1	57,2	56,1	68,8	50,8	58,4	61,9	54,2	58,1	54,4	55,5	56,4	62,2	58,4
Material Retido Filtro Mangas	33,9	32,9	24,9	28,4	35,1	26,7	32,1	31,9	30,1	34,9	36,2	29,3	30,9	34,9	31,6

Fonte: Elaborado pelo autor.

As variações dos valores encontrados são devidos a variação granulométrica da matéria-prima.

6.4.2 Obteção do D_{50} calculado a partir da velocidade e vazão

Utilizando a Equação 1, foi calculado o $D_{50\text{calculado}}$ e $D_{50\text{projeto}}$, Tabela 12.

Tabela 12 - D_{50} calculado e de projeto.

D_{50} projeto (μm)	D_{50} calculado (μm)
54,8	37,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se que o $D_{50\text{calculado}}$ é menor que o $D_{50\text{projeto}}$. Contudo, sabe-se também que a vazão e velocidade medidas são bem maiores que os valores de projeto, o que pode explicar a redução do $D_{50\text{calculado}}$.

6.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A fim de se avaliar as diferenças contidas na exaustão do processo de eletrofusão foram realizadas análises estatísticas utilizando o *software* R.

Avaliou-se, via Análise de Variância (ANAVA), se havia diferenças estatisticamente significativas nas análises granulométrica para os diferentes horários de amostragem (FATOR 1), e diferentes bateladas (FATOR 2).

Todas as análises realizadas estão no apêndice 1, para análise de variância foi utilizado o nível de significância de 5%. Para avaliar se houve diferença foi elaborada uma Tabela 16, sintética de valor-p.

Tabela 13 - Sintética Valor-P para todas ANAVA.

Valor-P	Dia	Hora
Alimentação do Forno	0,67088	0,47699
Alimentação do Ciclone	0,76781	0,16103
Underflow do Ciclone	0,96362	0,02011
Material Retido no Filtro Manga	0,60522	0,11022

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se que o valor-p da hora para o *underflow* do ciclone, é menor que o nível de significância de 5%, portando, houve diferença estatisticamente significativa entre os horários de amostragem para o *underflow* do ciclone.

Tabela 14 - Teste Tukey – Hora *Underflow* do Ciclone.

Grupos	Níveis (Hora)	Médias (μm)
a	15	63,693
ab	8	56,285
b	23	54,447

Fonte: Elaborado pelo autor.

O Teste de comparação Tukey, Tabela 14, mostra que as médias granulométricas do *underflow* para 8h e 15h são estatisticamente equivalentes. Assim, se queremos isolar o pior ponto de operação, ou seja, o ponto de operação com maior granulometria média no *underflow*, podemos considerar tanto 8h quanto 15h. Escolheu-se o horário das 8 horas por ser o momento que representa maior parte do processo, pois as 23 horas o forno esta sendo ligado e é instável ainda, as 8 horas o forno ainda há alimentação do forno, as 15 horas é o término do processo e o forno esta totalmente estabilizado e sem alimentação.

6.6 ANÁLISE DE EFICIÊNCIA

6.6.1 Análise de eficiência parcial

A partir do $D_{50\text{projeto}}$, $D_{50\text{calculado}}$ e $D_{50\text{medido}}$, foi calculada a eficiência parcial, utilizando a Equação 8, para cada D_{50} . O diâmetro da partícula utilizado para o cálculo de eficiência parcial, foi o diâmetro médio $D_{0,5}$ fornecido na análise granulométrica do Malvern, da alimentação do ciclone. Foram obtidos $\bar{\eta}_{\text{calculado}} = 0,70 = 70\%$, $\bar{\eta}_{\text{projeto}} = 0,52 = 52\%$ e $\bar{\eta}_{\text{medido}} = 0,53 = 53\%$.

O cálculo de $\bar{\eta}_{\text{calculado}}$ foi realizado utilizando a vazão e velocidade utilizadas no sistema de exaustão durante a coleta dos dados; de $\bar{\eta}_{\text{projeto}}$ foi

realizado utilizando a vazão e a velocidade de projeto fornecido pela empresa; e o \bar{I}_{medido} foi realizado utilizando a média dos dados interpolados da alimentação do ciclone.

6.6.2 Análise de eficiência global

6.6.2.1 Balanço de massa

Para o cálculo da eficiência global foi feito o balanço de massa. Aplicando-se a metodologia 5.14.2 determinou-se a quantidade de material perdido para atmosfera e a massa total de sólido alimentado no ciclone. Foi considerado que a perda ao fogo da matéria-prima é desprezível.

Foram utilizados os valores médios das 5 bateladas fornecidos pela empresa parceira do projeto. Os dados estão representados no diagrama da Figura 33.

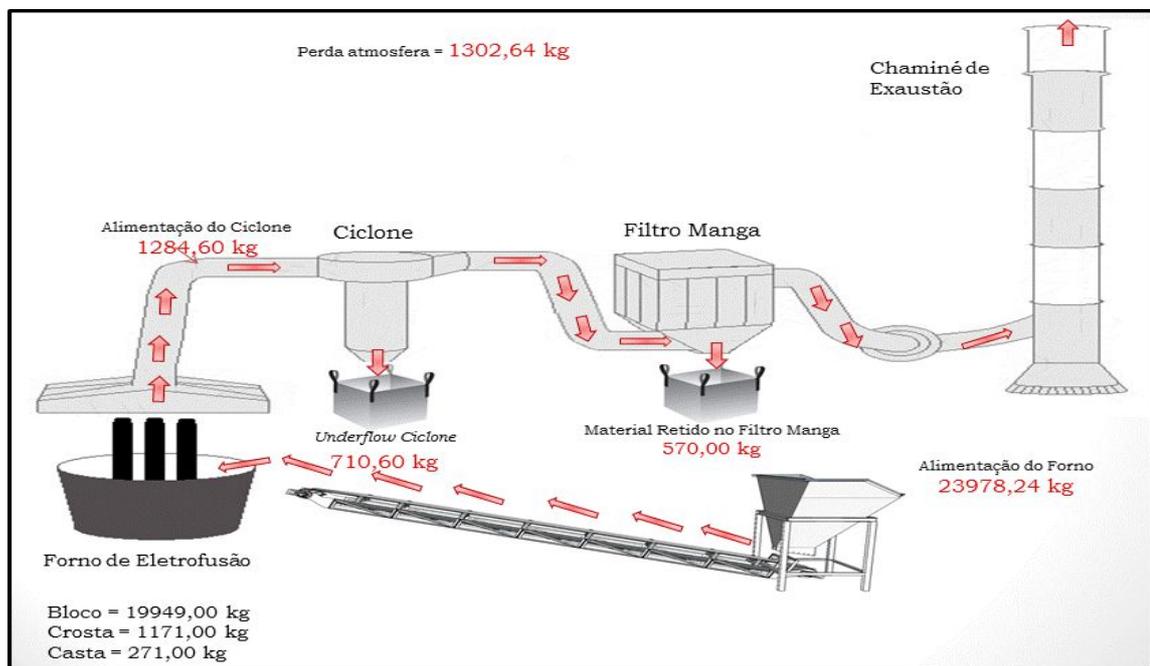


Figura 33 – Diagrama do sistema de exaustão.
Fonte: Elaborado pelo autor.

A perda para atmosfera durante o processo é muito alta, mais de uma tonelada por fornada, isto gera perda financeira e aumento de emissão para atmosfera, aumentando a insatisfação da vizinhança e poluindo.

Para o cálculo de eficiência global foi utilizado a Equação 9, obteve-se 55,3%.

6.6.2.2 Utilizando o ajuste de modelo RRB

6.2.2.2.1 Obtenção dos parâmetros do modelo

Para obtenção dos parâmetros do modelo, foram utilizados os dados da análise granulométrica das 8 horas, da primeira batelada do *underflow* do ciclone. Estes dados foram escolhidos pois através da análise estatística concluímos ser o pior caso.

Ajuste Linear

A partir do ajuste linear dos dados plotados no gráfico $\ln D_i$ versus $\ln[\ln(1/(1-x))]$ pode-se determinar os parâmetros do modelo.

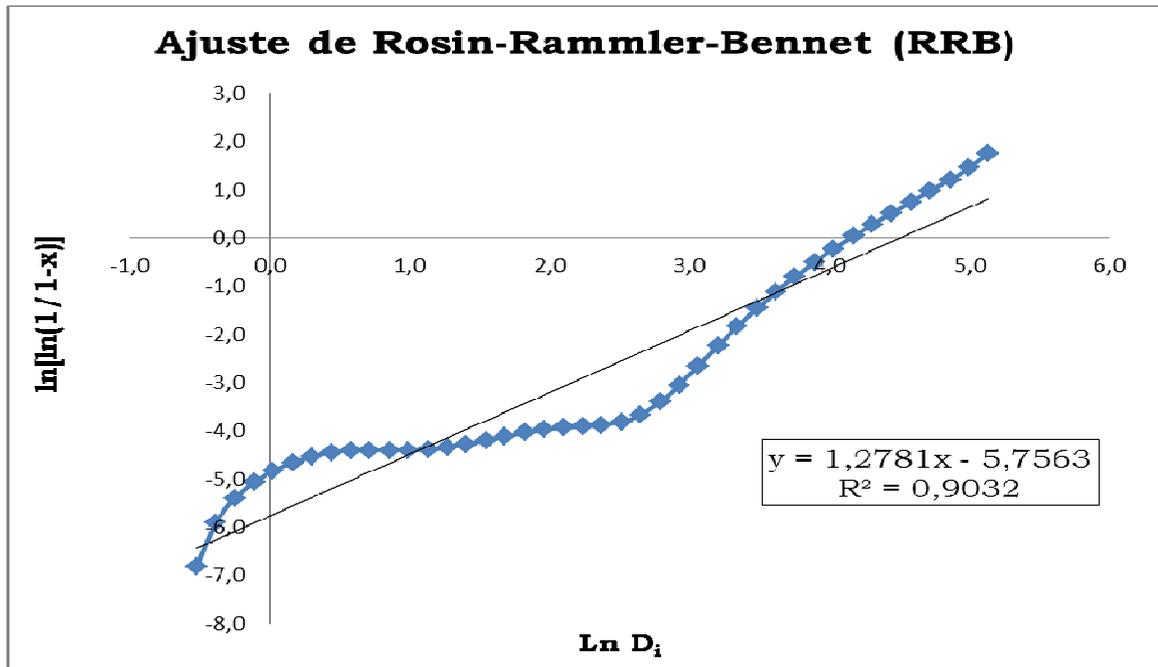


Figura 34 - Curva $\ln D_i$ versus $\ln[\ln(1/(1-x))]$, para obtenção dos ajustes do modelo RRB.
 Fonte: Elaborado pelo autor.

Através da equação linear obtida no gráfico, $y = 1,2781x - 5,7563$, tem-se que $n = 1,2781$ e $n(\ln(D')) = 5,7563$, logo $n(\ln(D'))/n = \ln(D')$ e $\exp(\ln D') = D' = 90,36$.

Ajuste mínimos quadrados não linear generalizado

Através do ajuste mínimos quadrados não linear generalizado, foi encontrado, utilizando o *software* R os parâmetros do modelo RRB, conforme Tabela 15.

Tabela 15 - Parâmetros do modelo.

Coeficientes		
	Valor	p-valor
D	64,79569	0
n	2,06780	0

Fonte: Elaborado pelo autor.

O p-valor é igual a zero, portanto os parâmetros estão estatisticamente ajustado ao modelo.

Cálculo de eficiência global

Utilizando a Equação 11, e os estimadores paramétrico obtidos nos ajustes de modelo RRB, foi calculada a eficiência global $\eta_{RRB} = 56,1 \%$ e η_{RRB} Software R = 54,5 %.

Discussão dos resultados de eficiência

Os resultados dos diâmetros de corte e eficiência foram organizados para uma Tabela 16, única, a fim de facilitar a discussão e entendimento.

Tabela 16 - Resultados de D_{50} e Eficiências.

D₅₀	Eficiência Parcial	Eficiência Global
$D_{50\text{projeto}} = 54,8 \mu\text{m}$	$\bar{\eta}_{\text{projeto}} = 52\%$	$\eta_{RRB \text{ linear}} = 55,0\%$
$D_{50\text{calculado}} = 37,0 \mu\text{m}$	$\bar{\eta}_{\text{calculado}} = 70\%$	$\eta_{RRB \text{ linear}} = 64,6\%$
		$\eta_{\text{Balanço de massa}} = 55,3\%$
$D_{50\text{medido}} = 53,9 \mu\text{m}$	$\bar{\eta}_{\text{medido}} = 53\%$	$\eta_{RRB \text{ software R}} = 54,5\%$
		$\eta_{RRB \text{ linear}} = 56,1\%$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o aumento da velocidade e vazão, utilizados no sistema de exaustão, houve, pelos cálculos, redução do $D_{50\text{projeto}}$ de 54,8 μm para $D_{50\text{calculado}}$ de 37 μm . Esperava-se com isso, segundo os cálculos, que a eficiência melhorasse de 52% para 70%. O que não ocorreu e é comprovado através do valor de eficiência obtido a partir do $D_{50\text{medido}} = 53,9 \mu\text{m}$. As eficiências globais estimadas a partir de três metodologias distintas também corrobora com essa conclusão. Ou seja, a empresa aumentou a velocidade do fluxo de gás, aumentando assim o consumo energético, esperando ter um ganho de eficiência, o que de fato não ocorreu.

6.7 REDIMENSIONAMENTO DO CICLONE

Utilizando as relações geométricas do ciclone da família Lapple, foi feito o redimensionamento do ciclone contido no sistema de exaustão estudado. Mantendo-se o mesmo diâmetro da parte cilíndrica, $D_c = 1600$ mm, redimensionaram-se os demais parâmetros a partir das relações para um ciclone Lapple, conforme Tabela 1. O resultado está resumido na Tabela 17.

Tabela 17 - Configurações do ciclone estudado redimensionado.

Redimensionamento do Ciclone		
D_c =	1.600	mm
D_o =	800	mm
S_c =	992	mm
L_c =	3.200	mm
Z_c =	3.200	mm
H_c =	800	mm
B_c =	400	mm
D_u =	400	mm

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao fazer a comparação do ciclone atual com o ciclone redimensionado nota-se para o ciclone estudado os parâmetros D_o , S_c , H_c , B_c e D_u são 330, 358, 350, 190 e 5mm maiores e os parâmetros L_c , Z_c são 900 e 180mm menores do que o indicado para o ciclone da família Lapple.

Espera-se que com o redimensionamento do ciclone a eficiência esteja entre 70 a 90% (PACHECO, 2012).

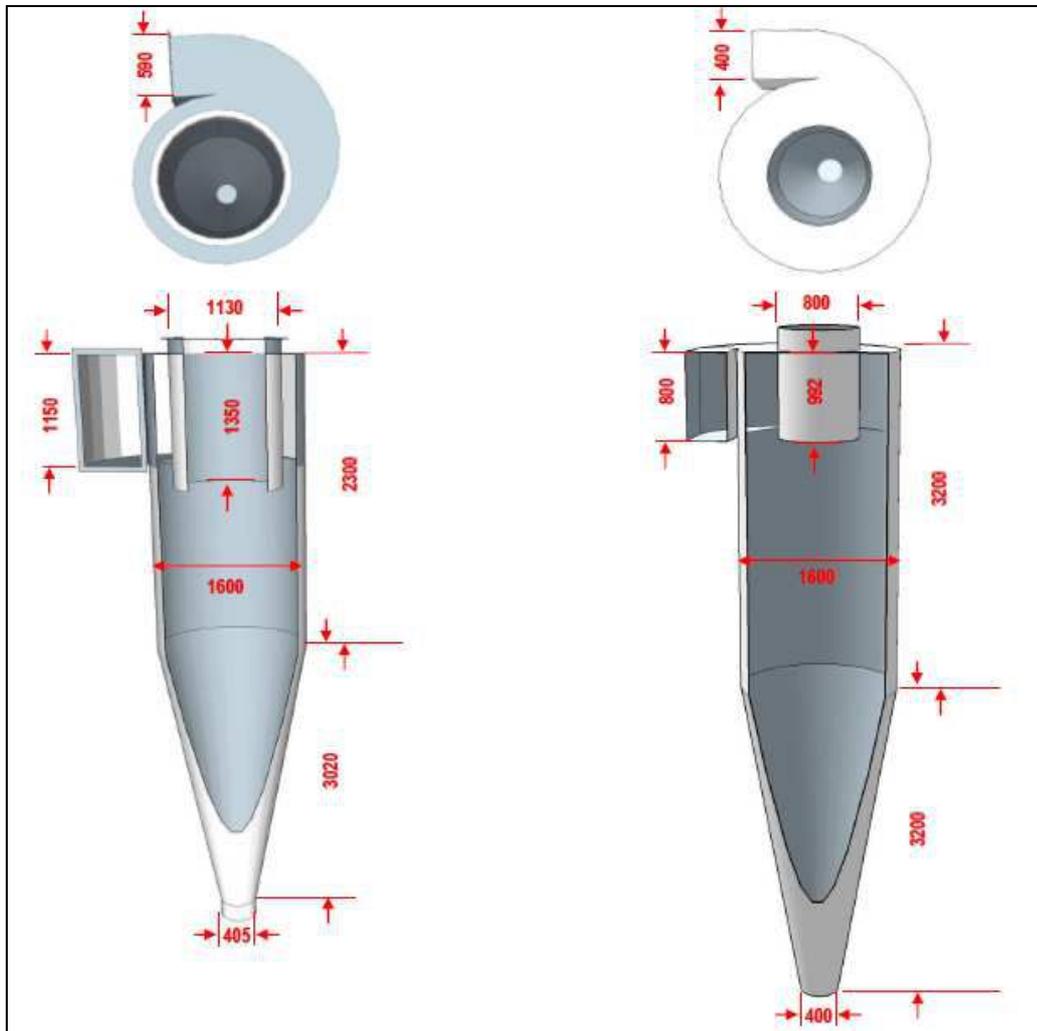


Figura 35 - Comparação entre o ciclone estudado e o ciclone redimensionado.
Fonte: Elaborado pelo autor.

7 CONCLUSÃO

Na região de Poços de Caldas existe uma indústria de eletrofusão de grande porte. Essa indústria, parceira deste projeto, utiliza o processo de eletrofusão em seu sistema produtivo onde há fuga de material particulado nas esteiras de carregamento, no processo de mistura de carga, e principalmente dos fornos, material esse que não é eficientemente capturado pelos sistemas de exaustão. Devido, então, à necessidade de mitigação das emissões de particulados nesse processo produtivo, neste projeto foi avaliado a eficiência do sistema de exaustão para orientar a proposição de medidas de mitigação de emissões no sistema produtivo.

Como mostrado no trabalho, amostrou-se o fluxo de partículas em 4 pontos distintos do sistema de exaustão, sendo eles, a alimentação do forno, a alimentação do ciclone, o *underflow* do ciclone e o material retido no filtro manga.

A partir das amostras foram feitas as análises granulométricas utilizando o equipamento Malvern e análise química utilizando a fluorescência de raio-x.

A partir das curvas granulométricas estimou-se o $D_{50\text{medido}}$, obtendo-se $D_{50\text{medido}}$ médio para alimentação do ciclone de 53,9 μm . Para esse valor médio de $D_{50\text{medido}}$ obteve-se uma eficiência fracionária de 53%, que está de acordo com a eficiência fracionária de projeto de 52%. Contudo o sistema de exaustão é operado numa velocidade acima da de projeto e eficiência fracionária esperada seria de 70%.

Estimou-se também a eficiência global utilizando o ajuste de modelo RRB, a eficiência para o $D_{50\text{projeto}}$ é de 55%, com o aumento de velocidade de aumentou teoricamente para 64,6%, porém o $D_{50\text{medido}}$ pelo método linear é de 56,1% e pelo *software* R é de 54,5%, mostram que o aumento da velocidade e vazão de operação não são acompanhados por um aumento da eficiência. Para comprovar este fato, foi calculada a eficiência global utilizando o balanço de massa dos dados médios do processo, obteve-se eficiência de 55,3%.

Portanto, a prática adotada pela empresa de aumentar a vazão e velocidade do fluxo de ar no sistema de exaustão em relação aos valores de

projeto não melhorou sua eficiência como era esperado teoricamente (64,6% de eficiência), aumentando somente o custo energético de operação do sistema. Uma vez que o ciclone estudado não é de fato do tipo Lapple, isso explica porque a teoria falha nesse caso. Para determinar o ponto ótimo de operação do ciclone estudado seria necessário a operação de um piloto em escala reduzida para se obter a curva de eficiência em função da vazão.

Com o redimensionamento proposto, espera-se que a eficiência do ciclone fique acima de 80%.

Conclui-se que é necessário fazer melhoria no ciclone para que haja melhoria no sistema de exaustão da empresa e redução da perda e emissão de material de particulado.

REFERÊNCIAS

BAKONYI et.al. Poluição atmosférica e doenças respiratórias em crianças na cidade de Curitiba, PR. **Revista Saúde Pública**, v.38, n.5, p.695-700, 2004.

BRITO, S.L.M., GOUVÊA, D. e GANZELLA, R. Estudo da adsorção de dispersante à base de poliacrilato em um sistema varistor comercial: caracterização físico-química. **Revista Cerâmica**, v.51, p.30-36, 2005.

BRUNO, R. **Material particulado atmosférico na cidade de São Carlos-SP: quantificação e identificação de fontes**. 2005. 187f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, 2005.

CARMO C.N. et.al. Associação entre material particulado de queimadas e doenças respiratórias na região sul da Amazônia brasileira. **Revista Panam Salud Publica**, V.27, p.6-10, 2010.

CERRI, F.F.P. **Estudo para validação de modelo gás-sólido em separação ciclônica de sais de iodo na indústria química**. 2010. 92f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Disponível em: <www.cetesb.sp.gov.br>. Acesso em: 28 jan. 2014.

CREMASCO, M.A. **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos**. São Paulo: Blucher, 2012.

FERREIRA, L.L.H.C. **Desenvolvimento de agregados eletrofundidos para utilização em refratários para a zona de queima de fornos de cimento**. 2006. 181f. Tese (Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo – SP, 2006.

FRANÇA, S.C.A. e COUTO H.J. **Análise microgranulométrica – Malvern e Sedigraph**. Comunicação técnica elaborada para o livro tratamento de minérios: Práticas Laboratoriais, Parte II – Classificação, Capítulo 5 – pág. 101. Centro de Tecnologia Mineral Ministério da Ciência e Tecnologia – CETEM. Rio de Janeiro – RJ, 2007.

FRARE et al. Linearização do modelo log-normal para distribuição de tamanho de partículas. **Artigo Acta Scientiarum**, v.22, p.1235-1239, 2000.

FREITAS, M. **Investigação da produção e dispersão de poluentes do ar no ambiente urbano: Determinação empírica e modelagem em rede neural da concentração de CO**. 2003. 212f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.

FREITAS, A.M. e SOLCI, M.C. Caracterização do MP₁₀ e MP_{2,5} e distribuição por tamanho de cloreto, nitrato e sulfato em atmosfera urbana e rural de Londrina. **Revista Química Nova**, v.32, n.7, p.1750-1754, 2009.

GOUVEIA, N. et al. Poluição do ar e efeitos na saúde nas populações de duas grandes metrópoles brasileiras. **Revista Epidemiologia e Serviços de Saúde**, v.12, n.1, p.29-40, 2003.

ITO, L. **Monitoramento da qualidade do ar em ambientes internos – bibliotecas**. 2007. 160f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, 2007.

LIED, E.B. Dimensionamento de sistema de ventilação local exaustora (VLE): estudo de caso de uma indústria de móveis, em Sta. Terezinha de Itaipu, PR, Brasil. **Revista Estudos Tecnológicos**, v.7, n.1, p.1-11, 2011.

LIMA, E. **Um Estudo sobre a Qualidade do Ar de Uberlândia: Material Particulado em Suspensão**. 2007. 148f. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Federal de Uberlândia – MG, 2007.

LUCHE, J.R.D. **Modelos e Algoritmos para a Otimização do Planejamento da Produção de Grãos Eletrofundidos**. 2011. 140f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de São Carlos – SP, 2011.

MACINTYRE, A.J. **Ventilação Industrial e Controle da Poluição**. 2ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

MAGALHÃES, L. **Estudo do material particulado atmosférico e metais associados às partículas totais em suspensão na cidade de Ouro Preto, MG**. 2005. 81f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Ouro Preto, 2005.

MASSARANI, G. Projeto e Análise do Desempenho de Ciclones e Hidrociclones II. **Anais do Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos**, 17, São Carlos – SP, vol.2, p.125-135, 1989.

MAZIERO, J.V.G. et. al. Avaliação de Emissões Poluentes de um Motor Diesel Utilizando Biodiesel de Girassol como Combustível. **Engenharia na Agricultura**, v.14, n.4, p.287-288, 2006.

MICROMERITICS. Disponível em: <www.micromeritics.com> Acesso em: 27 ago. 2015.

MINIPA, Disponível em: <www.minipa.com.br>. Acesso em: 27 ago. 2015.

MISSAGIA, Z. M. V. et.al. Materiais compósitos particulados em matriz epóxi reforçados com serragem, cimento e silicato de magnésio. **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.13, n.3, p.285-302, 2013.

NASCIMENTO L.F. et al. Effects of air pollution on children's health in a city in Southeastern Brazil. **Revista Ver Saúde Pública**, v.40, n.1, p.1-5, 2006.

PACHECO, T.A. Como obter o rendimento máximo dos filtros de manga. **Revista Química e Derivados**, p.56-64, 2012.

POZZA, S. **Material Particulado na Atmosfera da Cidade de São Carlos – SP**. 2009. 141p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade de São Carlos, 2009.

RODRIGUES, K. **Filtração de Gases: Estudo da Deposição de Diferentes Tortas de Filtração em Diferentes Meios Filtrantes**. 2006. 224f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, 2006.

RODRIGUES, M.V. **Análise do Desempenho de um Ciclone com Mangas: Efeito da Permeabilidade do Meio Filtrante**. 2001. 111f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, 2001.

SÁ, A. Meio ambiente do trabalho, conceituação e prevenção de riscos. 2007. Disponível em: <www.anest.org.br/noticias/Meio_Ambiente_Trabalho_conceituacao_prevencao.pdf> Acesso em: 10 set. 2015.

SANTIAGO, A. et al. Caracterização do material particulado suspenso no ar de Cuiabá-MT no período de queimadas. **Revista matéria**, artigo 11595, p.273-283, 2015.

SANTINI, J. **Filtro de mangas para o controle de emissões atmosféricas de material particulado gerados no beneficiamento de mármore e granitos**. Trabalho de conclusão de curso. Faculdade de engenharia e arquitetura. Passo Fundo, 2011.

SILVA, A.M.C. et.al. Particulate matter originating from biomass burning and respiratory. **Revista Saúde Pública**, v.47, p.345-352, 2013.

SOBRINHO, P.J.N. e TENÓRIO, J.A.S. Reciclagem da poeira e lama geradas na fabricação de aço inoxidável. **Revista Esc. Minas**, vol.57, n.2, p.121-127, 2004.

SOUZA, P.A. et al. Caracterização do Material Particulado Fino e Grosso e Composição da Fração Inorgânica Solúvel em Água em São José dos Campos (SP). **Revista Química Nova**, v.33, n.6, p.1247-1253, 2010.

TESTO. Disponível em: <www.testo.com.br>. Acesso em 18 ago. 2015.

VANDECASTEELE, C. e BLOCK, C.B. **Modern Methods for Trace Element Determination**. Wiley, England, 1993.

VIEIRA, T. **Interpolação**. Material de apoio. Universidade Federal de Alagoas - Instituto de Matemática, 2014.

YAMASOE, M.A. et.al. Chemical composition of aerosol particles from direct emissions of vegetation fires in the Amazon Basin: water-soluble species and trace elements. **Jornal Atmospheric Environment**, v.34, p.1641-1653, 2000.

APÊNDICE A – Análise estatística completa

Análise Estatística

A fim de se avaliar as diferenças contidas na exaustão do processo de eletrofusão foram realizadas análises estatísticas utilizando o *software* R.

Avaliou-se, via Análise de Variância (ANAVA), se havia diferenças estatisticamente significativas nas análises granulométrica para os diferentes horários de amostragem, e diferentes bateladas.

Alimentação do Forno para cada dia de amostragem

A partir das análises granulométricas obtidas para alimentação do forno, avaliou-se através da análise de variância se havia diferença entre os dias em que o forno era alimentado. Assim, na ANAVA, os valores observados são os diâmetros de partícula, e os tratamentos são os diferentes dias de amostragem.

Tabela 18 - Anava Alimentação do Forno para cada dia de amostragem.

Quadro da Análise Variância					
	GL	SQ	QM	Fc	Pr > Fc
Tratamento	5	130,45	26,091	0,6491	0,67088
Resíduo	8	321,56	40,195		
Total	13	452,01			

CV = 6,88%

Fonte: Elaborado pelo autor.

CV = Coeficiente de Variação

GL = Grau de liberdade

SQ = Soma dos quadrados

QM = Quadrado médio

De acordo com a análise de variância, vide Tabela 18, os valores médios do diâmetro da alimentação do forno não podem ser considerados diferentes

nos diferentes horários amostrados. A Tabela 19 mostra os valores médios do diâmetro da alimentação do forno para cada hora de amostragem.

Tabela 19 - Valores médios do diâmetro da alimentação do forno para cada dia de amostragem.

	Níveis (Dia)	Médias (μm)
1	18/10/2014	95,29700
2	19/10/2014	93,49900
3	20/10/2014	92,67733
4	21/10/2014	86,72233
5	22/10/2014	94,70267
6	23/10/2014	91,96450

Fonte: Elaborado pelo autor.

Alimentação do Forno para cada hora de amostragem

A partir das análises granulométricas obtidas para alimentação do forno, avaliou-se através da análise de variância se havia diferença entre os horários de amostragem em que o forno era alimentado. Assim, na ANAVA, os valores observados são os diâmetros de partícula, e os tratamentos são as diferentes horas de amostragem.

Tabela 20 - Anava Alimentação do Forno para cada hora de amostragem.

Quadro da Análise Variância					
	GL	SQ	QM	Fc	Pr > Fc
Tratamento	2	56,92	28,461	0,79238	0,47699
Resíduo	11	395,09	35,918		
Total	13	452,01			

CV = 6,5%

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com a análise de variância, Tabela 20, os valores médios do diâmetro da alimentação do forno não podem ser considerados diferentes nos horários amostrados. A Tabela 21 mostra os valores médios do diâmetro da alimentação do forno para cada hora de amostragem.

Tabela 21 - Valores médios do diâmetro da alimentação do forno para cada hora de amostragem.

	Níveis (Hora)	Médias (μm)
1	15	94,7212
2	23	89,8225
3	8	91,4866

Fonte: Elaborado pelo autor.

Alimentação do Ciclone para cada dia de amostragem

A partir das análises granulométricas obtidas para alimentação do ciclone, avaliou-se através da análise de variância se havia diferença entre o dia de amostragem em que o ciclone era alimentado. Assim, na ANAVA, os valores observados são os diâmetros de partícula, e os tratamentos são os diferentes dias de amostragem.

Tabela 22 - Anava Alimentação do Ciclone para cada dia de amostragem.

Quadro da Análise Variância					
	GL	SQ	QM	Fc	Pr > Fc
Tratamento	5	44,497	8,8994	0,50194	0,76781
Resíduo	8	141,840	17,7300		
Total	13	186,337			

CV = 7,81%

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com a análise de variância, vide Tabela 22, os valores médios do diâmetro da alimentação do ciclone não podem ser considerados diferentes em cada dia da semana. A Tabela 23 mostra os valores médios do diâmetro da alimentação do ciclone para cada dia de amostragem.

Tabela 23 - Valores médios do diâmetro da alimentação do ciclone para cada dia de amostragem.

	Níveis (Dia)	Médias (μm)
1	18/10/2015	58,26950
2	19/10/2015	53,23100
3	20/10/2015	52,91900
4	21/10/2015	53,52100
5	22/10/2015	53,21233
6	23/10/2015	53,14500

Fonte: Elaborado pelo autor.

Alimentação do Ciclone para cada hora de amostragem

A partir das análises granulométricas obtidas para alimentação do ciclone, avaliou-se através da análise de variância se havia diferença entre os horários de amostragem em que o ciclone era alimentado. Assim, na ANAVA, os valores observados são os diâmetros de partícula, e os tratamentos são as diferentes horas de amostragem.

Tabela 24 - Anava Alimentação do Ciclone para cada hora de amostragem.

Quadro da Análise Variância					
	GL	SQ	QM	Fc	Pr > Fc
Tratamento	2	52,647	26,324	2,1659	0,16103
Resíduo	11	133,690	12,154		
Total	13	186,337			

CV = 6,46%

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com a análise de variância, vide Tabela 24, os valores médios do diâmetro da alimentação do ciclone não podem ser considerados diferentes nos horários amostrados. A Tabela 25 mostra os valores médios do diâmetro da alimentação do ciclone para cada hora de amostragem.

Tabela 25 - Valores médios do diâmetro da alimentação do ciclone para hora de amostragem.

	Níveis (Hora)	Médias (μm)
1	15	56,13220
2	23	54,14575
3	8	51,55460

Fonte: Elaborado pelo autor.

***Underflow* do Ciclone para cada dia de amostragem**

A partir das análises granulométricas obtidas para o *underflow* do ciclone, avaliou-se através da análise de variância se havia diferença entre o dia de amostragem do *underflow* do ciclone. Assim, na ANAVA, os valores observados são os diâmetros de partícula, e os tratamentos são os diferentes dias de amostragem.

Tabela 26 - Anava do *Underflow* do Ciclone para cada dia de amostragem.

Quadro da Análise Variância					
	GL	SQ	QM	Fc	Pr > Fc
Tratamento	5	44,11	8,822	0,17722	0,96362
Resíduo	8	398,26	49,782		
Total	13	442,37			

CV = 12,08%

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com a análise de variância, vide Tabela 26, os valores médios do diâmetro do *underflow* do ciclone não podem ser considerados diferentes em cada dia da semana. A Tabela 27 mostra os valores médios do diâmetro do *underflow* do ciclone para cada dia de amostragem.

Tabela 27 - Valores médios do diâmetro médio do *Underflow* do ciclone para cada dia de amostragem.

	Níveis (Dia)	Médias (μm)
1	18/10/2014	61,80300
2	19/10/2014	57,24000
3	20/10/2014	58,58633
4	21/10/2014	58,18133
5	22/10/2014	55,97067
6	23/10/2014	59,30900

Fonte: Elaborado pelo autor.

***Underflow* do Ciclone para cada hora de amostragem**

A partir das análises granulométricas obtidas para o *underflow* do ciclone, avaliou-se através da análise de variância se havia diferença entre os horários de amostragem do *underflow* do ciclone. Assim, na ANAVA, os valores observados são os diâmetros de partícula, e os tratamentos são as diferentes horas de amostragem.

Tabela 28 - Anava do *Underflow* do Ciclone para cada hora de amostragem.

Quadro da Análise Variância					
	GL	SQ	QM	Fc	Pr > Fc
Tratamento	2	224,94	112,471	5,6901	0,02011
Resíduo	11	217,43	19,766		
Total	13	442,37			

CV = 7,61%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 29 - Teste Tukey.

Grupos	Níveis (Hora)	Médias (μm)
a	15	63,693
ab	8	56,285
b	23	54,44725

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se que, como o valor p é menor que o nível de significância de 5%, houve diferença estatisticamente significativa entre os horários de amostragem para o *underflow* do ciclone. O Teste de comparação Tukey, mostra que as médias granulométricas do *underflow* para 8h e 15h são estatisticamente equivalentes. Assim, se queremos isolar o pior ponto de operação, ou seja, o ponto de operação com maior granulometria média no *underflow*, podemos considerar tanto 8h quanto 15h. Escolheu-se o horário das 8 horas por ser o momento que representa maior parte do processo, pois as 23 horas o forno esta sendo ligado e é instável ainda, as 8 horas o forno ainda há alimentação do forno, as 15 horas é o término do processo e o forno esta totalmente estabilizado e sem alimentação.

Material Retido no Filtro Manga para cada dia de amostragem

A partir das análises granulométricas obtidas para o material retido no filtro manga, avaliou-se através da análise de variância se havia diferença entre o dia de amostragem do material retido no filtro manga. Assim, na ANAVA, os valores observados são os diâmetros de partícula, e os tratamentos são os diferentes dias de amostragem.

Tabela 30 - Anava do Material Retido no Filtro Manga para cada dia de amostragem

Quadro da Análise Variância					
	GL	SQ	MQ	Fc	Pr > Fc
Tratamento	5	144,58	28,917	0,75575	0,60522
Resíduo	8	306,10	38,263		
Total	13	450,69			

CV = 18,83%

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com a análise de variância, vide Tabela 30, os valores médios do diâmetro do material retido no filtro manga não podem ser considerados diferentes em cada dia da semana. A Tabela 31 mostra os valores médios do diâmetro do material retido no filtro de manga para cada dia de amostragem.

Tabela 31 - Valores médios do diâmetro do material retido no filtro de manga para cada dia de amostragem.

	Níveis (Dia)	Médias (μm)
1	18/10/2015	33,44100
2	19/10/2015	24,94800
3	20/10/2015	30,06600
4	21/10/2015	37,21300
5	22/10/2015	33,44967
6	23/10/2015	32,90600

Fonte: Elaborado pelo autor.

Material Retido no Filtro Manga para cada hora de amostragem

A partir das análises granulométricas obtidas para o material retido no filtro manga, avaliou-se através da análise de variância se havia diferença entre os horários de amostragem do material retido no filtro manga. Assim, na ANAVA, os valores observados são os diâmetros de partícula, e os tratamentos são as diferentes horas de amostragem.

Tabela 32 - Anova do Material Retido no Filtro Manga para cada hora de amostragem.

Quadro da Análise Variância					
	GL	SQ	MQ	Fc	Pr > Fc
Tratamento	2	148,87	74,435	2,7129	0,11022
Resíduo	11	301,81	27,438		
Total	13	450,69			

CV = 15,95%

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com a análise de variância, vide Tabela 32, os valores médios do diâmetro do material retido no filtro manga não podem ser considerados diferentes nos horários amostrados. A Tabela 33 mostra os valores médios do diâmetro do material retido no filtro manga para cada hora de amostragem.

Tabela 33 - Valores médios do diâmetro da alimentação do forno para hora de amostragem.

	Níveis (Hora)	Médias (μm)
1	15	34,21040
2	23	27,76625
3	8	35,54220

Fonte: Elaborado pelo autor.

ANEXO A – Código utilizado no *software* R**Código utilizado no *software* R**

```
require(xlsx)
dados=read.xlsx("dados.xls",1)
attach(dados)
funcao = volume ~ 1-exp(-(diametro/D)^n)
require(car)
require(nlme)
modelo = gnls(funcao,dados,start=c(D=50,n=0.5))
summary(modelo)
```