

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

JOÃO CHIABAI JUNIOR

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM CICLONE STAIRMAND
ADAPTADO COM BICOS INJETORES DE ÁGUA**

São Carlos – SP

2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

JOÃO CHIABAI JUNIOR

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM CICLONE STAIRMAND
ADAPTADO COM BICOS INJETORES DE ÁGUA

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

Orientadora: Mônica Lopes Aguiar

Coorientadora: Vádila Giovana Guerra Béttega

São Carlos – SP

2014

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

C532ad Chiabai Junior, João.
Avaliação do desempenho de um ciclone *stairmand*
adaptado com bicos injetores de água / João Chiabai Junior.
-- São Carlos : UFSCar, 2014.
75 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São
Carlos, 2014.

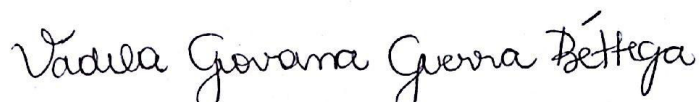
1. Separação (Tecnologia). 2. Ciclone. 3. Lavador
(Tecnologia química). 4. Gás - escoamento. 5. Material
particulado. I. Título.

CDD: 660.2842 (20^a)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE
JOÃO CHIABAI JUNIOR APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM
28 DE MARÇO DE 2014.

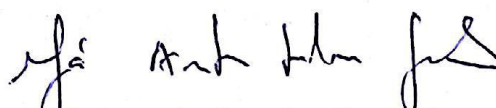
BANCA EXAMINADORA:


Mônica Lopes Aguiar
Orientadora, UFSCar


Vádila Giovana Guerra Béttega
Coorientadora, UFSCar


Simone Andréa Pozza
UNICAMP


Gabriela Cantarelli Lopes
UFSCar


José Antonio Silveira Gonçalves
UFSCar

AGRADECIMENTOS

Agradeço,

Primeiramente a Deus pela saúde e por me fazer acreditar e alcançar os meus objetivos.

Aos meus pais, Cecília e João, por terem acreditados na minha capacidade e potencial para alcançar os meus objetivos. A minha eterna gratidão pelos ensinamentos, dedicação e apoio.

Ao meu tio e padrinho, Nivaldo, por ter me ajudado a seguir os princípios corretos da vida.

Ao meu único irmão, Betinho, por estar sempre à disposição em me ajudar.

À professora Mônica pela orientação, confiança, apoio e dedicação, acreditando sempre no desenvolvimento deste trabalho.

À professora Vádila pela coorientação e grande dedicação em auxiliar a etapa experimental e compreender os resultados.

Aos amigos e companheiros do DEQ por proporcionarem diversos momentos de alegria durante esses dois anos.

Aos funcionários Oscar e Marcos por contribuírem com a montagem do aparato experimental e realização das análises laboratoriais.

RESUMO

A eficiência de coleta e os gastos de implantação e operação são os principais fatores considerados na utilização de equipamentos para a separação de material particulado no gás. O ciclone é comumente empregado industrialmente por apresentar baixos custos, entretanto o seu uso é restrito devido à baixa eficiência na coleta de partículas menores que 5 μm . O incremento do ciclone convencional com bicos injetores de água proporcionou uma melhoria na sua eficiência de coleta. Neste trabalho foi investigado experimentalmente o desempenho de um ciclone úmido na remoção de rocha fosfática com diâmetro mediano de 4,66 μm . Foram instalados 8 bicos injetores de água do tipo leque. As concentrações de particulado na entrada e na saída do equipamento foram obtidas através da amostragem isocinética. Variou-se a relação da vazão de líquido/gás (L/G) de 0,65 a 2,20 L/m^3 para 3 diferentes configurações de bicos. A temperatura na saída diminuiu em relação à entrada em função do aumento da razão L/G. Já a umidade relativa do gás aumentou conforme o aumento da razão L/G. O ciclone operando a seco apresentou eficiência média de 76,7% e a melhor eficiência média a úmido foi de 85,3%. Foi determinada a eficiência de coleta fracionária apenas para a condição operacional que resultou na melhor eficiência global. A adaptação do ciclone Stairmand com bicos injetores de água resultou em uma melhoria de 8,6% na eficiência global de coleta.

ABSTRACT

The collection efficiency and costs of implementation and operation are the main factors considered in the use of equipment for the separation of particulate matter in the gas. The cyclone is commonly employed industrially by low costs, however its use is limited due to the low efficiency in collecting particles smaller than 5 μm . The increase of conventional cyclone with nozzles water led to an improvement in its collection efficiency. This work experimentally investigated the performance of a wet cyclone in the removal of phosphate rock with median diameter of 4.66 μm . The cyclone was adapted with 8 water injectors nozzles of range type. The concentrations of particles in the entrance and exit of equipment were obtained by isokinetic sampling. The ratio of the flow of liquid / gas (L/G) was varied from 0.65 to 2.20 L/m^3 to 3 different nozzle configurations. The outlet temperature decreased compared to entry with increase of the ratio L/G. Have the relative humidity of the gas increased with increasing L/G. The cyclone dry operating had an average efficiency of 76.7% and the best average efficiency the wet was 85.3%. The fractional collection efficiency was determined only for the operating condition that resulted in the best overall efficiency. The adaptation of the cyclone Stairmand with water injectors nozzles resulted in an improvement of 8.6% in the overall collection efficiency.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Ilustração de um ciclone típico	11
Figura 2.2 – Abreviatura das dimensões do ciclone	12
Figura 2.3 – Ilustração do mecanismo de impactação inercial	16
Figura 2.4 – Ilustração do mecanismo de interceptação	17
Figura 2.5 – Ilustração do mecanismo de difusão	17
Figura 2.6 – Ilustração de um típico lavador Venturi	19
Figura 3.1 – Ilustração do aparato experimental	22
Figura 3.2 – Distribuição granulométrica da rocha fosfática	23
Figura 3.3 – Ilustração da posição dos bicos injetores de água	25
Figura 3.4 – Sistema de amostragem isocinética	26
Figura 3.5 – Ilustração da sonda de amostragem isocinética	26
Figura 3.6 – Dados usados na calibração do rotâmetro de água	27
Figura 3.7 – Ilustração (a) da região de amostragem na entrada do ciclone e (b) da entrada do ciclone	29
Figura 3.8 – Ilustração do jato leque	30
Figura 3.9 – Perfil de velocidade no plano de amostragem na entrada do ciclone	35
Figura 3.10 – Ilustração da vista superior da região de injeção de particulado no duto principal	36
Figura 3.11 – Perfil de velocidade no plano de amostragem na entrada do ciclone	37
Figura 3.12 – Placas de papelão	38
Figura 3.13 – Perfil de velocidade na saída de topo do ciclone	39
Figura 3.14 – Perfil de velocidade na saída de topo do ciclone	39
Figura 3.15 – Duto de saída de topo do ciclone	40
Figura 3.16 – Perfil de velocidade na saída de topo do ciclone	41
Figura 3.17 – Visualização do vórtice na caixa coletora	42
Figura 4.1 – Jato do bico injetor de água para a vazão de 28,9 L/h	45
Figura 4.2 – Jato do bico injetor de água para a vazão de 98 L/h	45
Figura 4.3 – Eficiência de coleta na configuração “superior”	46
Figura 4.4 – Eficiência de coleta na configuração “lateral”	47
Figura 4.5 – Eficiência de coleta na configuração “todos”	47
Figura 4.6 – Eficiência de coleta	49

Figura 4.7 – Influência do diâmetro de partícula nos mecanismos atuantes em meios filtrantes.....	50
Figura 4.8 – Eficiência de coleta fracionária.....	50
Figura 4.9 – Temperatura na saída de topo do ciclone.....	52
Figura 4.10 – Diferença da umidade relativa do gás.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Relações geométricas de alguns ciclones	13
Tabela 2.2 – Características dos tipos de lavadores de gás	18
Tabela 3.1 – Medidas do ciclone	24
Tabela 3.2 – Razão L/G para a vazão aferida no rotâmetro e a real.....	29
Tabela 4.1 – Dados do bico injetor de água	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Letras latinas

A	Área	(L^2)
a	Altura do duto de entrada de gás do ciclone	(L)
B	Diâmetro de saída das partículas do ciclone	(L)
b	Largura do duto de entrada de gás do ciclone	(L)
C	Concentração de particulado no gás	$(M L^{-3})$
D	Diâmetro do corpo cilíndrico do ciclone	(L)
E	Função da geometria do ciclone	(L^3)
d	Diâmetro	(L)
d_l	Distância entre as extremidades do leque	(L)
D_0	Diâmetro do duto de entrada do ciclone	(L)
D_e	Diâmetro do duto de saída de gás do ciclone	(L)
d_m	Diâmetro médio das partículas	(L)
f	Fração de partículas	(-)
G	Gás	(L^3)
H	Altura do ciclone	(L)
h	Altura	(L)
h_l	Distância na vertical entre a saída do bico injetor de água e o chão	(L)
K_a	Relação das dimensões do ciclone	(-)
K_b	Relação das dimensões do ciclone	(-)
K_c	Volume efetivo do ciclone	(L^3)
L	Líquido	(L^3)
m	Massa	(M)
n	Função do diâmetro do ciclone e temperatura do gás	(-)
p	Pressão	(P)
Q	Vazão volumétrica	$(L^3 T^{-1})$
S	Comprimento do duto de saída no interior do ciclone	(L)
T	Temperatura	(θ)
t	Tempo	(T)
v	Velocidade	$(L T^{-1})$

Letras gregas

α	Ângulo de abertura do jato	($^{\circ}$)
Δ	Varição	(-)
η	Eficiência de coleta do ciclone	(-)
τ	Função das propriedades do gás	(θ)
μ	Viscosidade	($M L^{-1} T^{-1}$)
ρ	Densidade	($M L^{-3}$)

Subscritos

a	Água
an	Antes
b	Bico
c	Coletada
d	Depois
cc	Corpo cilíndrico do ciclone
e	Entrada
g	Gás
p	Particulado
pa	Ponto de amostragem
rot	Rotâmetro
s	Saída
sa	Sonda de amostragem isocinética
t	Total

SUMÁRIO

RESUMO	i
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	iii
LISTA DE TABELAS	v
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	vi
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	10
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1. CICLONE.....	11
2.2. LAVADORES DE GÁS.....	15
2.3. CICLONE ÚMIDO.....	19
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS	22
3.1. MATERIAL PARTICULADO.....	23
3.2. CICLONE.....	24
3.3. SISTEMA DE AMOSTRAGEM DO PARTICULADO.....	25
3.4. PROCEDIMENTOS INICIAIS.....	26
3.4.1. Calibração do rotâmetro de água.....	27
3.4.2. Preparação do equipamento.....	28
3.4.3. Caracterização do bico injetor de água.....	30
3.5. DESEMPENHO DO CICLONE.....	31
3.5.1. Determinação da eficiência global.....	31
3.5.2. Determinação da eficiência fracionária.....	33
3.5.3. Determinação da eficiência fracionária teórica.....	34
3.6. MODIFICAÇÕES INICIAIS.....	34
3.6.1. Alimentação de particulado.....	35
3.6.2. Perfil de velocidade na saída de topo.....	37
3.6.3. Caixa coletora de particulado.....	41
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
4.1. CARACTERIZAÇÃO DO BICO INJETOR DE ÁGUA.....	44
4.2. EFICIÊNCIA GLOBAL.....	45
4.3. EFICIÊNCIA FRACIONÁRIA.....	49
4.4. TEMPERATURA E UMIDADE.....	51
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	53
5.1. CONCLUSÕES.....	53

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
APÊNDICE A – Dados da distribuição granulométrica.....	58
APÊNDICE B – Dados de calibração do rotâmetro.....	62
APÊNDICE C – Testes preliminares.....	63
APÊNDICE D – Dados para a obtenção da eficiência de coleta	67
APÊNDICE E – Dados para a obtenção da eficiência de coleta fracionária	69
APÊNDICE F – Dados para a obtenção da eficiência teórica.....	73

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

As indústrias estão cada vez mais rigorosas com o controle da emissão de poluentes. Esse fato é decorrente da rigorosa e crescente fiscalização das leis ambientais e da busca de certificados de qualidade ambiental.

O material particulado que é lançado na atmosfera devido à industrialização representa um considerável poluente. Além da poluição ambiental, as partículas suspensas no ar podem provocar inúmeros danos à saúde humana. Portanto, torna-se necessário a utilização de equipamentos para o controle da emissão de poluentes na atmosfera.

Existem diversos equipamentos que são utilizados para a remoção de material particulado no gás. Esse é escolhido de acordo com a eficiência desejada, tamanho das partículas e disponibilidade financeira.

Os lavadores de gás utilizam a nebulização do líquido para a coleta das partículas e são equipamentos bastante eficientes na remoção de partículas menores que 5 μm de diâmetro aerodinâmico. Contudo, geralmente apresentam alto custo de implantação e de operação, além da geração de um custo adicional para o tratamento do líquido de lavagem que contém o particulado removido do gás.

Nos separadores ciclônicos a remoção das partículas contidas no gás é feita pela ação da força centrífuga. Devido à baixa complexidade, esse tipo de equipamento apresenta baixo custo de implantação e operação. No entanto, a eficiência de coleta é baixa para partículas com diâmetro inferior a 5 μm .

Alta eficiência, baixo custo de implantação e de operação são as características positivas dos lavadores de gás e separadores ciclônicos. No intuito de conciliá-las, neste trabalho foi investigado o desempenho experimental de um ciclone com configuração proposta por Stairmand (1951) adaptado com bicos injetores de água para a coleta de material particulado com diâmetro mediano de 4,66 μm .

O ciclone úmido possui a geometria de um ciclone convencional e a técnica de injeção de líquido é similar à dos lavadores de gás do tipo Venturi. Dessa forma, o equipamento coleta as partículas através da nebulização do líquido e pela ação da força centrífuga. No intuito de verificar a influência da injeção de água, este trabalho teve como objetivo melhorar a eficiência global de coleta do ciclone úmido quando comparado a seco. Para isso, foi verificada a influência das configurações de bicos e da relação da vazão de líquido/gás (L/G) na eficiência de coleta.

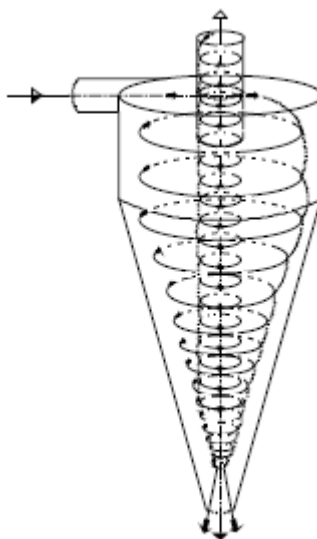
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentadas algumas informações para promover o entendimento do ciclone úmido. Tais como o princípio de funcionamento, desempenho e pesquisas sobre o ciclone convencional e úmido. Além de uma compacta abordagem técnica dos lavadores de gás.

2.1. CICLONE

Os ciclones são equipamentos classificados como separadores ciclônicos e são utilizados na remoção de partículas sólidas contidas em um gás. É composto basicamente por um corpo cilíndrico e cônico, conforme ilustrado na Figura 2.1. O gás contendo as partículas entra na parte superior. Na saída axial superior flui o gás limpo e as partículas são depositadas na extremidade inferior da estrutura cônica.

Figura 2.1 – Ilustração de um ciclone típico



Fonte: Rodrigues (2001)

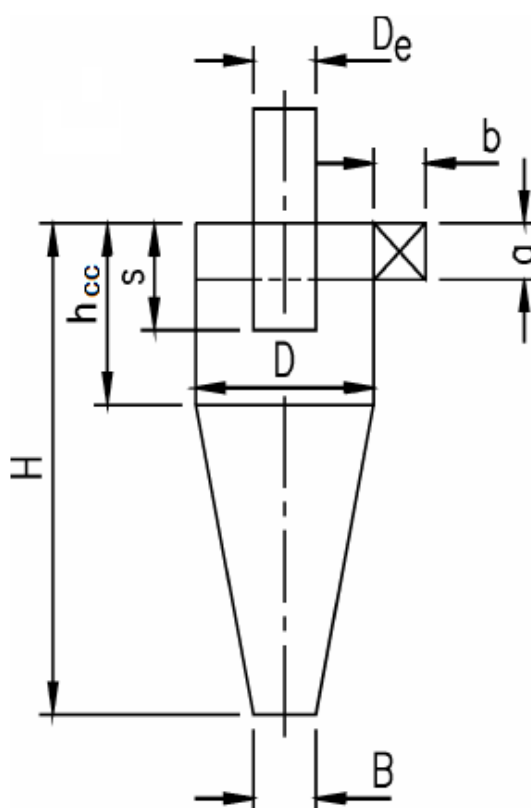
O gás contendo as partículas sólidas entra no equipamento e inicia um movimento circulatório na seção anular em uma região próxima à parede, formando um vórtice externo descendente. Esse vórtice se estende até a base do ciclone invertendo o seu sentido formando um vórtice interno ascendente a qual impulsiona o fluxo de gás para a saída do ciclone. As

partículas sofrem a ação da força centrífuga, se deslocam para a parede do equipamento e são coletadas na parte inferior.

As principais vantagens que os ciclones possuem são a facilidade de construção, os baixos custos de operação e a possibilidade de funcionamento em altas temperaturas e pressões (KOCH E LICHT, 1977), além de apresentarem baixa perda de carga e pouco espaço para instalação (LISBOA E SCHIRMER, 2007). Como principal desvantagem, o ciclone apresenta baixa eficiência de coleta para partículas com diâmetro inferior a $5\ \mu\text{m}$ (LISBOA E SCHIRMER, 2007).

Os ciclones são construídos baseados em relações geométricas. Na Figura 2.2 são ilustradas as dimensões utilizadas na construção.

Figura 2.2 – Abreviatura das dimensões do ciclone



Fonte: Adaptação de Lora (2002)

Existem alguns pesquisadores que são utilizados como referência na teoria e construção dos ciclones. Entre os mais conhecidos estão Stairmand (1951) e Lapple (1951). Alden e

Kane (1959) apresentaram a geometria de um ciclone de grande diâmetro, denominado de ciclone americano. Na Tabela 2.1 é mostrada as relações geométricas desses tipos de ciclones.

Tabela 2.1 – Relações geométricas de alguns ciclones

Dimensão	Stairmand	Lapple	Americano
D	$1,0 \cdot D$	$1,0 \cdot D$	$4,2 \cdot D_0$
a	$0,5 \cdot D$	$0,5 \cdot D$	-
b	$0,2 \cdot D$	$0,25 \cdot D$	-
S	$0,5 \cdot D$	$0,625 \cdot D$	$3,0 \cdot D_0$
D_e	$0,5 \cdot D$	$0,5 \cdot D$	$1,9 \cdot D_0$
h_{cc}	$1,5 \cdot D$	$2,0 \cdot D$	$3,2 \cdot D_0$
H	$4,0 \cdot D$	$4,0 \cdot D$	$6,7 \cdot D_0$
B	$0,375 \cdot D$	$0,25 \cdot D$	-

Fonte: Acervo pessoal (2014)

Os ciclones Stairmand e Lapple são dimensionados em relação ao diâmetro do corpo cilíndrico (D) e o ciclone americano é de acordo com o diâmetro do duto de entrada (D_0).

Elias (2012) cita que os trabalhos de Lapple (1951), Leith e Licht (1972), Casal e Martínez-Benet (1983), Liden e Gudmundsson (1997) e de Lim, Know e Lee (2003) mostram que as principais variáveis de desempenho dos ciclones são a eficiência de coleta global, a eficiência de coleta fracionária e a perda de carga.

A eficiência de coleta global é definida como a fração de sólidos coletada. Essa fração é o valor da massa de sólidos coletada dividida pela massa de sólidos alimentada no ciclone. A eficiência de coleta fracionária é semelhante à global, mas para uma faixa de tamanho específico de partícula. A diferença entre as pressões estáticas na entrada e na saída do ciclone fornece a perda de carga.

Mothes e Löffler (1985) realizaram um estudo experimental e observaram que o acréscimo da concentração de particulado na alimentação do ciclone provocou aumento na

eficiência de coleta. Sendo que a eficiência foi de 88% para a concentração de $0,0005 \text{ kg/m}^3$ e 97% para a $0,02 \text{ kg/m}^3$. Logo os autores concluíram que as partículas podem colidir na seção de entrada do equipamento resultando em uma aglomeração das partículas facilitando a sua coleta.

Hoffmann, Arend e Sie (1991) verificaram a influência da concentração de particulado na alimentação de dois tipos de ciclones para diferentes velocidades. A configuração de um dos ciclones é a mesma de Stairmand (1951). E do outro ciclone difere apenas na redução de 25% no diâmetro do duto de saída de topo (D_e). A eficiência aumentou de acordo com o acréscimo da concentração de particulado na alimentação de ambos os ciclones e velocidades. Houve a tendência no aumento da eficiência em função do aumento da velocidade, principalmente para as concentrações mais baixas que foram analisadas.

Hoffmann et al. (1992) realizaram experimentos em quatro ciclones de geometrias diferentes e observaram que o acréscimo na concentração de particulado na alimentação em ambos os ciclones resultaram no aumento da eficiência mássica de coleta. Os autores concluíram que a geometria do ciclone não interfere no comportamento verificado, sendo que parte do particulado é removido na entrada do ciclone por um mecanismo não associado ao funcionamento do ciclone. As eficiências se mantiveram bem próximas conforme a mudança de velocidade. Houve uma ligeira tendência no aumento da eficiência de coleta conforme o aumento da velocidade até a concentração de aproximadamente 18 g/m^3 . Acima desse valor houve redução da eficiência.

Fassani (1997) realizou experimentos em um ciclone que não segue nenhuma relação geométrica convencional. Foi utilizado como material particulado o catalisador FCC (Fluid Catalyst Cracking). Foi observado que nas velocidades de 18 e 27 m/s existe a tendência no aumento do rendimento de coleta com o aumento da concentração de particulado até 12 kg de FCC/kg de ar. Acima dessa concentração existe a tendência de redução do rendimento de coleta. O autor ainda relata que o comportamento referente ao aumento do rendimento com o aumento da concentração foi observado por diversos outros autores para concentrações de até 6,5 kg de sólidos/kg de gás. Esses autores sugeriram que o fenômeno observado é atribuído ao efeito de varredura das partículas finas pelas grossas. Outra possível explicação seria a aglomeração das partículas facilitando a sua coleta. A velocidade do gás na entrada do ciclone não afetou de forma significativa a eficiência de coleta.

Scheid (1992) utilizou um ciclone de modelo Stairmand (1951) para a remoção de diferentes particulados. A variação na concentração de sólidos para a alumina e carvão não

influenciou na eficiência de coleta. O aumento na velocidade resultou no aumento da eficiência para ambos os sólidos.

2.2. LAVADORES DE GÁS

Os lavadores de gás constituem uma classe de equipamentos que são utilizados para a limpeza de gases. Geralmente a corrente de entrada dos lavadores é denominada de gás sujo, pois contém algum elemento de natureza particulada ou gasosa que se deseja remover. Os lavadores se diferem das demais classes de equipamentos de limpeza de gases devido à utilização de um líquido, usualmente a água, no auxílio do processo de purificação do gás sujo.

A utilização de líquido na operação dos lavadores implica na produção de uma corrente líquida contendo a sujeira coletada, havendo a necessidade da disposição adequada desse fluido líquido. A utilização de líquido para a lavagem do gás e o direcionamento do líquido sujo ao final do processo provoca gastos. Dessa forma, quanto menos líquido utilizado na lavagem do gás sujo acarreta menos custo operacional envolvendo os lavadores de gás. Assim, é definida uma relação entre a vazão de líquido utilizado na limpeza do gás e a vazão de gás, chamado de razão L/G. De acordo com Lora (2002), essa relação e a queda de pressão são os mais importantes parâmetros dos lavadores de gás.

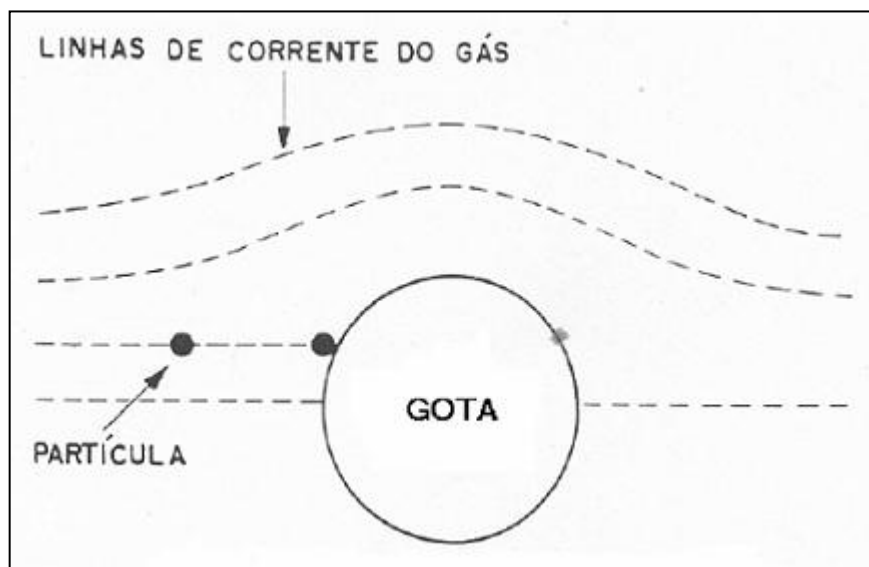
A quantidade de líquido utilizado nos lavadores influencia na eficiência de coleta do equipamento. O líquido induz alguns mecanismos que agem na coleta do particulado suspenso na corrente de gás. Conforme os tamanhos das partículas existem mecanismos predominantes.

O assentamento das partículas nas gotas de líquido ocorre em virtude de alguns mecanismos de coleta. Esses mecanismos podem ocorrer devido à inércia (Figura 2.3), interceptação direta (Figura 2.4) e difusão (Figura 2.5). O principal mecanismo de coleta das partículas é a impactação inercial (GONÇALVES, 2000).

- (i) *Impactação inercial*: A corrente de gás contendo as partículas flui no interior do equipamento onde um líquido é introduzido e gotas são formadas. A trajetória das partículas segue a linha de escoamento do gás. As gotas de líquido recém formadas estão quase paradas em relação ao gás e são muito maiores do que as partículas. Dessa forma, a gota torna-se um obstáculo para a corrente gasosa. As moléculas do gás por serem leves desviam-se das gotas em seu caminho. As partículas não conseguem mudar rapidamente a sua trajetória e colidem com a

gota pelo fato de apresentarem maior massa e, conseqüentemente, maior inércia. Quando aderida à gota, diz-se que a partícula foi coletada.

Figura 2.3 – Ilustração do mecanismo de impactação inercial

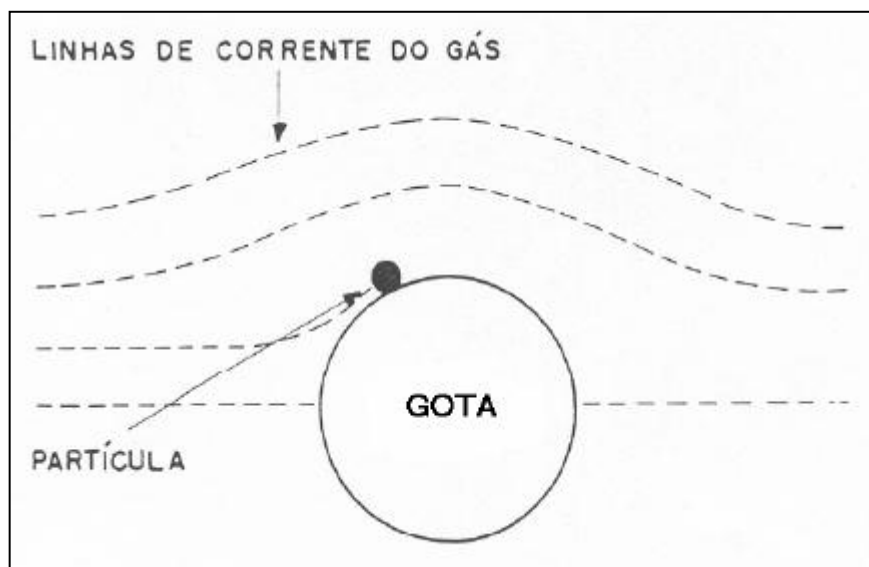


Fonte: Gonçalves (2000)

- (ii) *Interceptação*: A partícula tende a seguir a linha de corrente do gás. Ao encontrar uma gota no caminho, as moléculas de gás conseguem desviar e seguir o escoamento. Já as partículas apresentam certa dificuldade. Algumas seguem parcialmente a linha de corrente do gás ao desviar da gota e são aderidas a superfície da gota. Quando isto ocorre, dizemos que a partícula foi coletada pela interceptação da gota.
- (iii) *Difusão*: As partículas menores não se movimentam uniformemente conforme a linha de corrente do gás. Essas partículas, principalmente as de diâmetro inferior a $0,3 \mu\text{m}$, difundem-se do gás para a superfície da gota devido a essa movimentação irregular que é conhecida como movimento browniano. Heumann (1997) descreve que a partícula se move de uma região de alta concentração para uma de baixa nas proximidades do corpo coletor, a gota.

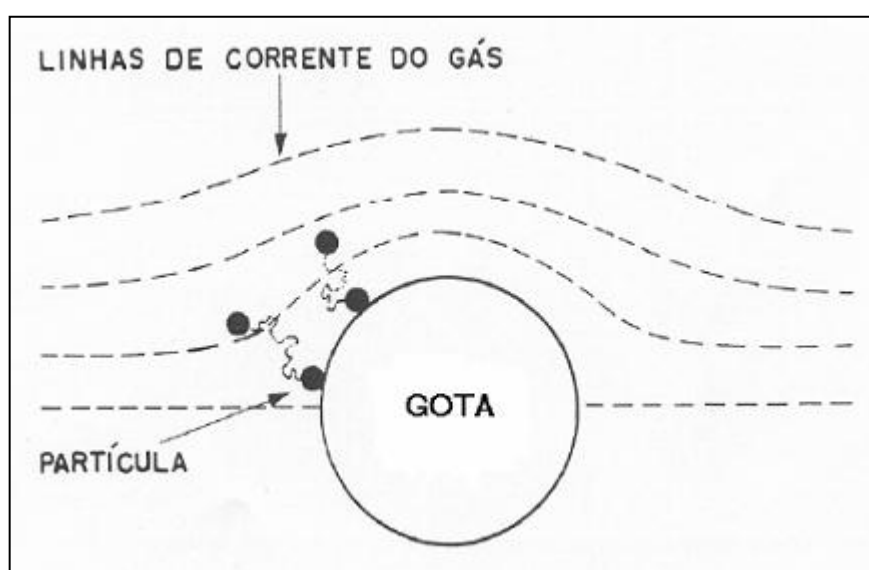
Gomide (1980) classifica os lavadores de gás em 7 tipos de acordo com o mecanismo utilizado na separação. Na Tabela 2.2 é mostrado o diâmetro de partícula (d_p), a eficiência de coleta (η), a queda de pressão (Δp) e a velocidade do gás (v_g) para os equipamentos apresentados pelo autor.

Figura 2.4 – Ilustração do mecanismo de interceptação



Fonte: Gonçalves (2000)

Figura 2.5 – Ilustração do mecanismo de difusão



Fonte: Gonçalves (2000)

De acordo com a Tabela 2.2, verifica-se que os lavadores de gás são equipamentos eficientes na remoção de partículas com diâmetro pequeno. Lora (2002) citou que os lavadores de gás e os precipitadores eletrostáticos geralmente constituem as únicas classes de equipamentos capazes de cumprirem com os valores permissíveis de emissões de poluentes.

Entretanto, a alta eficiência apresentada pelos lavadores possui uma relação direta com a perda de carga e o custo do equipamento (GOMIDE, 1980).

Tabela 2.2 – Características dos tipos de lavadores de gás

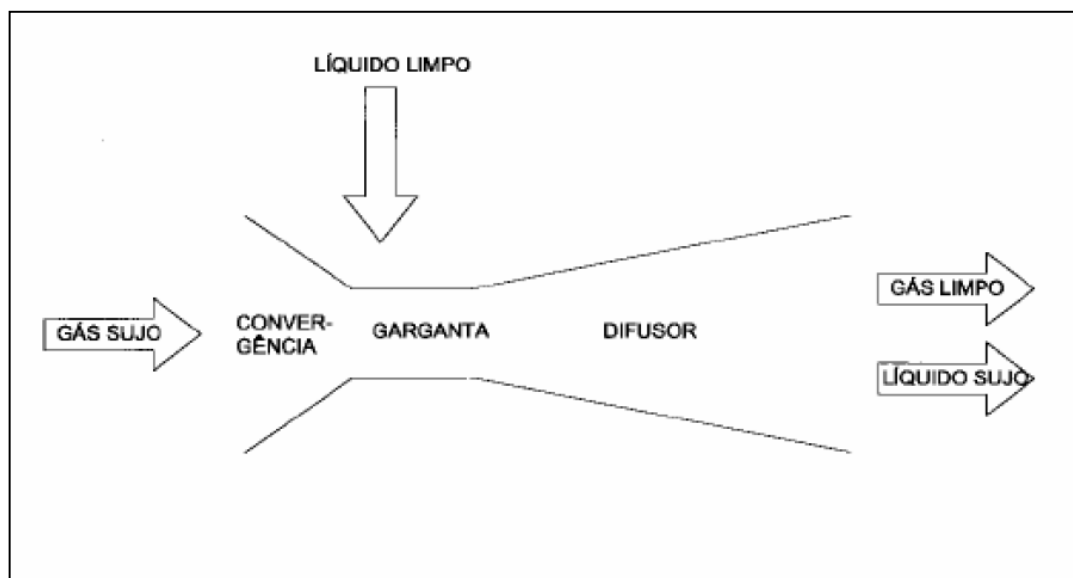
Tipo de lavador	d_p (μm)	η (%)	Δp (mmH_2O)	v_g (m/s)
Gravitacional	10	70	25	0,5-1
Inercial	1	95	50-200	15-20
Centrífugo	5	95	50-200	10-20
Dinâmico	1	95	produz	15-20
Orifício	2	90	50-150	15
Venturi	0,5	99	250-750	60-200
Recheio	5	90	25-250	0,5-1,5

Fonte: Gomide (1980)

O lavador do tipo Venturi geralmente apresenta maior eficiência de coleta para partículas pequenas quando comparado com outros tipos de lavadores. Portanto, o lavador Venturi é um equipamento bastante empregado nas indústrias para a limpeza de gases e, também, alvo de importantes pesquisas. O equipamento é tipicamente dividido em 3 partes distintas que são chamadas de seção convergente, garganta e seção divergente ou difusor, como ilustrado na Figura 2.6. O lavador é construído na forma de um tubo de seção transversal circular ou retangular.

O gás sujo entra no equipamento pela seção convergente e, devido ao estreitamento do tubo, é acelerado no decorrer de sua passagem. A velocidade máxima do gás é obtida na garganta. Em seguida, o gás escoar para a seção divergente onde é desacelerado devido ao aumento da área transversal no decorrer desta seção. De acordo com Guerra (2009), o Venturi é dimensionado de modo que o gás atinja uma velocidade superficial na garganta normalmente entre 40 e 150 m/s.

Figura 2.6 – Ilustração de um típico lavador Venturi



Fonte: Gonçalves (2000)

Normalmente utiliza-se água como líquido de lavagem, mas dependendo da natureza e afinidade do componente a ser removido da corrente gasosa pode ser recomendável a utilização de óleos ou soluções básicas. Geralmente o líquido é injetado na garganta através de orifícios feitos sobre as paredes do equipamento. Ao passar pelos orifícios, o líquido assume forma de jatos e rapidamente é atomizado devido à alta energia do gás.

Como consequência da atomização, a área superficial do líquido aumenta bastante. Esse fato, juntamente com a turbulência e a alta velocidade do gás, favorece a transferência de massa entre as fases gasosa e líquida, bem como a coleta de material particulado pelas gotas (GONÇALVES, 2000).

2.3. CICLONE ÚMIDO

O ciclone úmido difere do seco devido à adição de líquido no interior do equipamento promovendo expressivo aumento na eficiência de coleta. O ciclone convencional opera como um separador inercial. Com a adição de líquido no ciclone, a propriedade de separação é mantida, havendo também os mecanismos de assentamento das partículas na gota de líquido. Esses ocorrem devido a fatores de inércia, interceptação e difusão.

Krames, Bütner e Ebert (1993) mostraram em seu trabalho que o ciclone úmido apresentou boa separação utilizando somente uma fração do líquido que é empregado nos

lavadores Venturi. O ciclone obteve uma eficiência de aproximadamente 99% para partículas maiores que 3 μm . O equipamento estudado apresentou saturação de vapor de água na corrente de saída de topo, ratificando boa transferência de calor e massa.

Krames e Bütner (1994) desenvolveram estudos em um ciclone úmido dimensionado pelas equações de Barth (1959) e Muschelknautz (1970). O equipamento utilizado consistiu, basicamente, de um ciclone com um atomizador pneumático instalado no duto de entrada. O corpo do ciclone funciona como um espaço de contato entre o material particulado presente no gás e as gotículas de água. De acordo com os autores, sem adição de água o ciclone simplesmente opera como um separador inercial. O mecanismo de separação devido à ação da força centrífuga é mantido quando se adiciona água ao sistema. Novos mecanismos de separação passam a atuar melhorando o desempenho do ciclone úmido em relação ao seco. A eficiência de coleta foi obtida com análise gravimétrica da carga do particulado e foi de 99,2% para as partículas com 4 μm de diâmetro de Stokes. Além do excelente desempenho do equipamento, os pesquisadores informaram que o ciclone úmido operou com uma razão de L/G entre 0,05 e 0,25 L/m^3 .

Yang e Yoshida (2004) realizaram experimentos e simulações verificando a posição do bocal de nebulização por ar comprimido na eficiência de coleta de um ciclone úmido. Os autores concluíram que a eficiência é fortemente dependente da posição de injeção da névoa. O aumento da razão L/G mantendo a vazão de água constante resultou no aumento da eficiência de coleta. O diâmetro médio das partículas foi de 1,6 μm e a razão L/G foi variado de 0 a 0,042 L/m^3 .

Ken-ichi Sumida et al. (2004) concretizaram estudos experimentais e modelaram a absorção de gás carbônico em um ciclone úmido. Foi investigado o efeito da concentração inicial da solução e da razão L/G sobre a eficiência de absorção do gás. Os autores realizaram a comparação entre os resultados experimentais e teóricos.

Majewski (2006) trabalhou com um ciclone americano triplo cone adaptado com bicos pulverizadores laterais de água. Esse ciclone apresentou eficiência de 95,2 a 98,8% para partículas em torno de 7,48 μm . O autor acredita que grande parte desta melhoria de eficiência deve-se a:

- (i) O ciclone úmido realiza a separação das partículas do gás em duas direções, ascendente e descendente;
- (ii) Como a água é injetada no fluxo contra a força centrífuga, a gotícula de água permanece dentro do fluxo mais tempo, acarretando maior probabilidade de retenção da partícula;

- (iii) A injeção de água no fluxo de gás do ciclone provocou uma mistura mais homogênea entre o particulado e as gotículas de água.

Os resultados obtidos por Majewski (2006) mostraram que a adaptação do ciclone convencional com bicos injetores de água foi eficiente na coleta de partículas, mesmo com diâmetro inferior que 10 μm .

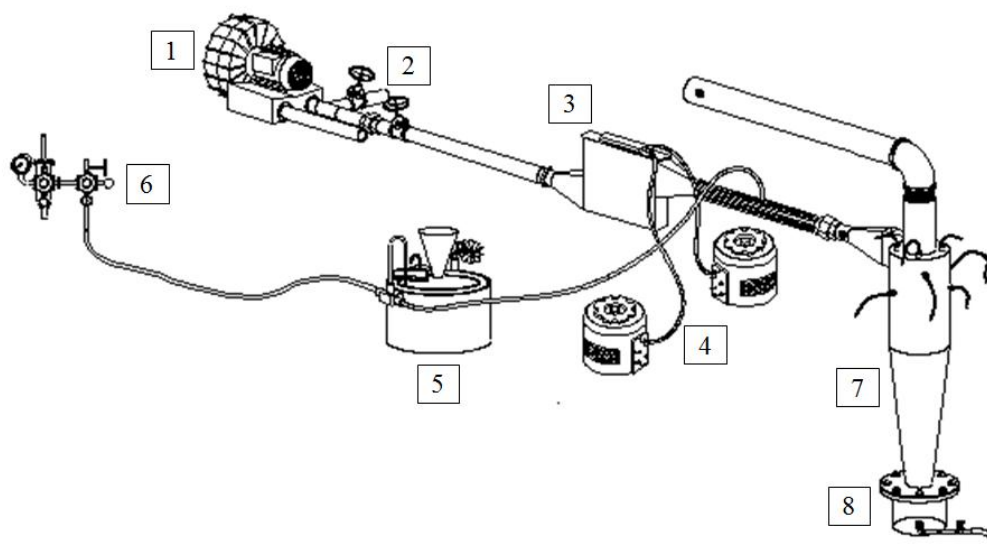
Lee, Jung e Park (2008) construíram um equipamento que consistiu basicamente de um ciclone úmido contendo uma seção com pratos de impactação. Os autores investigaram o efeito da vazão de líquido, do ângulo e do tamanho dos orifícios dos bocais sobre a eficiência de coleta. Foi concluído que a eficiência aumentou com a redução do ângulo dos pratos, com o aumento na pressão de atomização e da vazão de líquido.

Elias (2012) adaptou um ciclone de formato americano com bocais atomizadores com o objetivo melhorar a qualidade do ar. O líquido foi injetado transversalmente à corrente de gás. Os testes experimentais foram conduzidos alterando o diâmetro dos orifícios da pastilha do atomizador em 2,8 e 3,6 mm e da razão L/G em 0,65 e 0,76 L/m^3 . Os resultados obtidos mostraram que o equipamento dispõe de potencial para se tornar uma alternativa viável de condicionamento do ar para os padrões humanos.

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

O sistema experimental que foi utilizado para a realização desse estudo está ilustrado na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Ilustração do aparato experimental



Fonte: Acervo pessoal (2014)

Neste sistema, o gás contendo apenas ar limpo foi alimentado no duto principal utilizando um soprador (1) de vazão máxima igual a $8,2 \text{ m}^3/\text{min}$. O controle da vazão de gás foi efetuado com o auxílio de duas válvulas (2), uma acoplada ao duto principal e outra utilizada como purga.

O gás que fluía através do duto principal escoava por uma seção retangular (3) contendo resistências elétricas que foram conectadas a dois variadores de tensão (4) possibilitando o aquecimento do gás. O aquecimento foi realizado no intuito de assegurar a reprodutibilidade no valor da temperatura para todos os testes.

Após a seção retangular, o material particulado era alimentado no duto principal. A alimentação foi feita utilizando o sistema de prato giratório (5). A rotação do prato foi controlada pelo variador de velocidade. Conforme a rotação, o sulco do prato era preenchido com o particulado e este era arrastado para o duto principal através da pressão negativa provocada pelo escoamento de ar comprimido (6) em um Venturi acoplado ao bico de sucção.

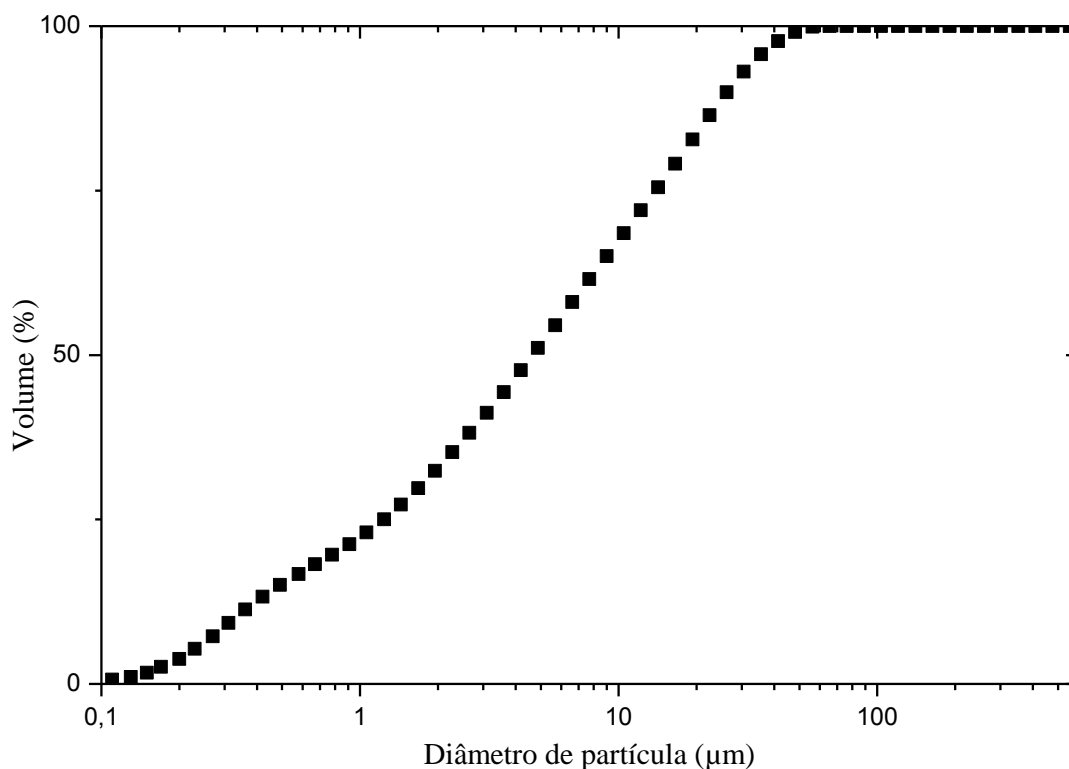
Finalmente, o gás contendo ar limpo e material particulado foi alimentado no ciclone (7). O material particulado era retido na caixa coletora (8) instalada na saída de fundo do ciclone enquanto que o gás limpo fluía pela saída de topo.

O equipamento possuía um sistema de injeção de líquido através da qual era possível introduzir água no ciclone utilizando 8 bicos injetores de líquido instalados na sua face superior e no seu corpo cilíndrico. A vazão de líquido foi aferida pela leitura no rotâmetro.

3.1. MATERIAL PARTICULADO

O material particulado que foi utilizado neste trabalho foi a rocha fosfática com densidade de $3,126 \text{ g/cm}^3$. Foi reservada em um recipiente a quantidade suficiente de particulado para a conclusão de todos os testes experimentais. No interior desse recipiente foram coletadas 5 amostras do material particulado em locais distintos e este foi analisado em triplicata no Malvern Mastersizer MicroPlus para a obtenção da distribuição granulométrica (APÊNDICE A). O resultado da análise é mostrado na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Distribuição granulométrica da rocha fosfática



Fonte: Acervo pessoal (2014)

Através da distribuição granulométrica foi observado que a rocha fosfática analisada apresentou diâmetro volumétrico mediano de 4,66 μm e características de um particulado polidisperso.

3.2. CICLONE

O ciclone que foi utilizado para a realização dos testes experimentais foi construído anteriormente por outros pesquisadores utilizando as relações geométricas apresentadas por Stairmand (1951). As medidas do ciclone são mostradas na Tabela 3.1. As abreviaturas das dimensões foram mostradas na Figura 2.2 na página 12.

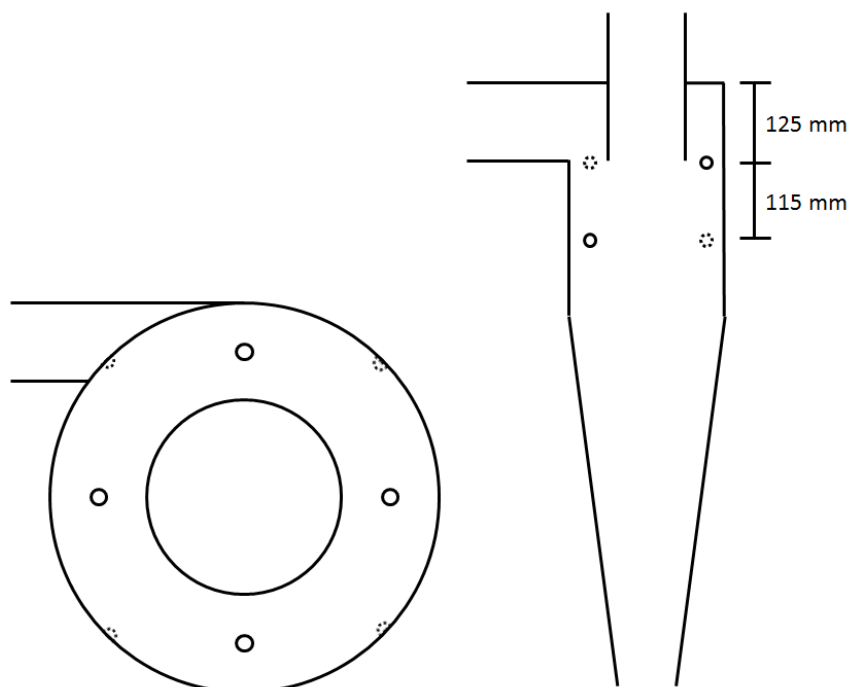
Nesse ciclone foram instalados 8 bicos injetores de líquido do tipo leque com o diâmetro de abertura igual a 1,8 mm. Os bicos foram instalados na parte superior e no corpo cilíndrico do ciclone conforme ilustrado na Figura 3.3.

Tabela 3.1 – Medidas do ciclone

Dimensão	Medida (mm)
D	230
a	120
b	50
S	120
D _e	120
h _{cc}	360
H	930
B	90

Fonte: Acervo pessoal (2014)

Figura 3.3 – Ilustração da posição dos bicos injetores de água



Fonte: Acervo pessoal (2014)

3.3. SISTEMA DE AMOSTRAGEM DO PARTICULADO

O material particulado que fluía na corrente de gás foi quantificado na entrada e saída do ciclone pela amostragem isocinética. Esse método consistiu na retenção do material particulado em uma membrana de filtração, sendo que a velocidade na entrada da sonda foi mantida a mesma que a do fluxo de gás. O sistema que é mostrado na Figura 3.4 é constituído basicamente pelo rotâmetro, bomba de sucção e sonda de amostragem.

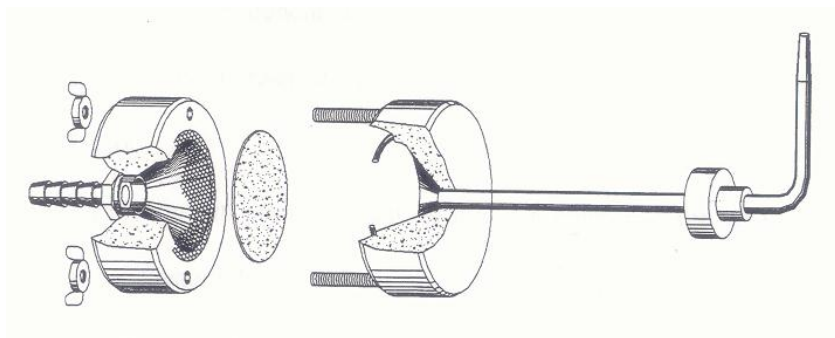
A sonda de amostragem era constituída basicamente por um tubo oco metálico na forma de “L” que foi conectado a um canal com parte móvel onde foram colocadas as membranas de filtração (Figura 3.5). Uma das extremidades foi introduzida no sentido contrário ao fluxo de gás e a outra foi conectada ao rotâmetro. O controle na vazão de sucção foi realizado através do estrangulamento da mangueira de silicone conectada ao rotâmetro e a bomba de sucção. A sucção do gás foi necessária para garantir que a velocidade na entrada da sonda seja igual a do gás no ponto de amostragem.

Figura 3.4 – Sistema de amostragem isocinética



Fonte: Acervo pessoal (2014)

Figura 3.5 – Ilustração da sonda de amostragem isocinética



Fonte: Scarpa (2000)

3.4. PROCEDIMENTOS INICIAIS

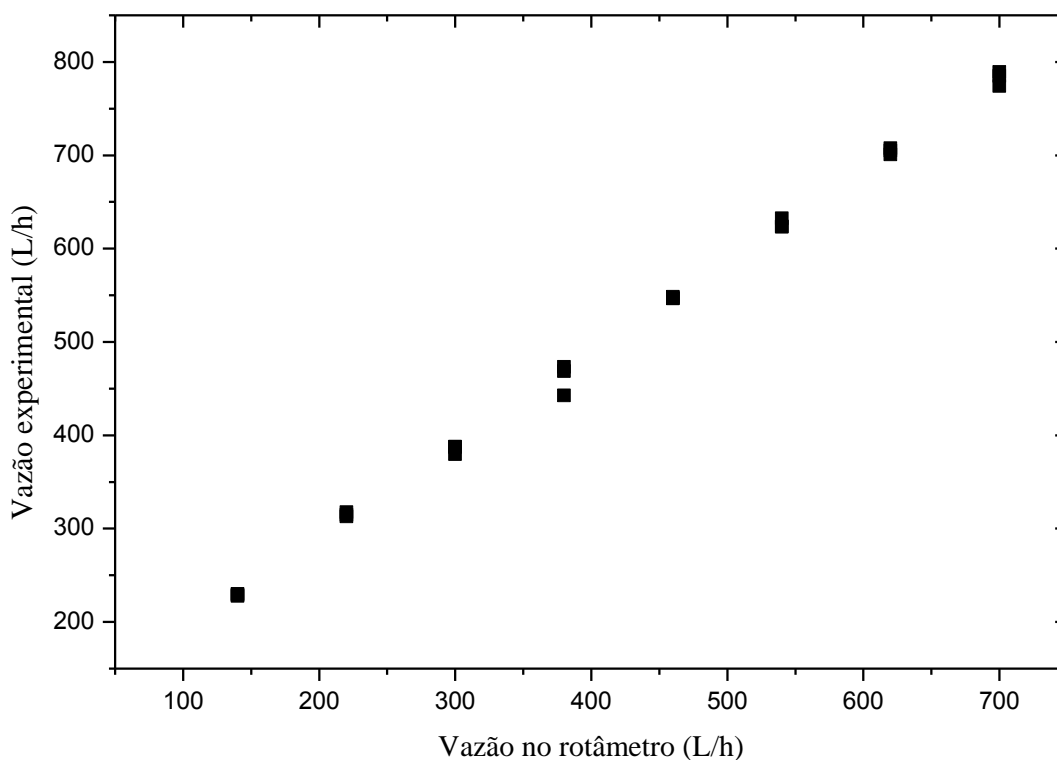
Foi necessário realizar alguns procedimentos antes de iniciar a coleta de dados para a obtenção do desempenho do equipamento. Esses procedimentos iniciais foram realizados para garantir a confiabilidade nos dados obtidos e para a preparação do equipamento para a coleta de resultados. Os procedimentos iniciais estão descritos a seguir.

3.4.1. Calibração do rotâmetro de água

O rotâmetro que foi utilizado para medir a vazão de água que era injetada no ciclone possuía a marcação de 140 a 1300 L/h. Essa vazão não correspondeu à vazão real. Dessa forma, foi feita a calibração do rotâmetro de acordo com os dados experimentais.

Foi ligado apenas o sistema de injeção de líquido do ciclone com todos os bicos injetores abertos e a água foi coletada na saída de fundo do ciclone. Cada coleta foi cronometrada e o volume de líquido aferido em uma proveta de 2000 ml. Todos os testes foram realizados em triplicatas e a vazão experimental referente a cada ponto da vazão aferida no rotâmetro é mostrado na Figura 3.6. Os dados experimentais referente à calibração do rotâmetro são exibidos no APÊNDICE B.

Figura 3.6 – Dados usados na calibração do rotâmetro de água



Fonte: Acervo pessoal (2014)

Foi traçada a linha de tendência ($R^2 = 0,99861$) e a equação da reta permitiu determinar a vazão de água real (Q_a) em função da vazão aferida no rotâmetro ($Q_{a,rot}$) conforme a Equação (3.1).

$$Q_a = 0,9873 \cdot Q_{a,rot} + 91,742 \quad (3.1)$$

3.4.2. Preparação do equipamento

Antes do início da coleta de dados no ciclone era feita a preparação do equipamento. A temperatura e a velocidade do gás no ponto de amostragem na entrada do ciclone foram mantidas em 60°C e 16,5 m/s, respectivamente. A seguir é feita a descrição dos procedimentos adotados para a preparação do equipamento.

O soprador de ar, o voltímetro e o ar comprimido utilizado no arraste do particulado eram ligados. Era feito o controle da vazão de ar no duto principal para a obtenção da velocidade do gás na entrada do ciclone. A velocidade foi controlada com o auxílio das duas válvulas instaladas logo após o soprador. Em seguida, o termo-higrômetro digital era introduzido no ponto de amostragem para aferir a temperatura e umidade do gás. O controle da temperatura foi realizado através do voltímetro.

As áreas no ponto de amostragem (A_{pa}) e na entrada do ciclone (A_e) eram diferentes e, conseqüentemente, as velocidades do gás nesses pontos também eram diferentes, conforme observado na Figura 3.7. O ponto de amostragem na entrada do ciclone (a) era situado em uma região cilíndrica e a entrada do ciclone (b) era retangular. Para a determinação da velocidade do gás na entrada do ciclone (v_g) foi utilizada a Equação (3.2). Sendo que a $A_{pa} = 2,38 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$, $A_e = 6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ e $v_{g,pa}$ é a velocidade do gás no ponto de amostragem na entrada do ciclone.

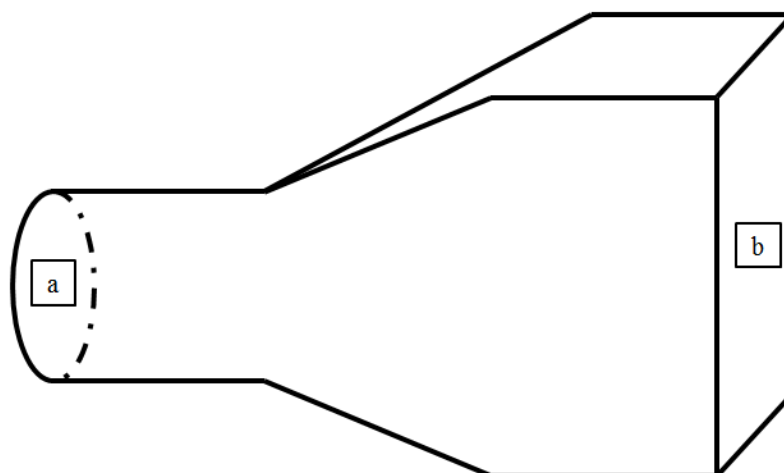
$$v_g = v_{g,pa} \cdot \frac{A_{pa}}{A_e} \quad (3.2)$$

O variador de voltagem era ajustado para a obtenção da temperatura de 60°C na região de amostragem na entrada do ciclone, mantendo esse valor o mais constante possível. O tempo gasto nesse procedimento era de 60 a 90 minutos. A temperatura e umidade relativa do gás foram aferidas utilizando o termohigrômetro portátil. No caso do ciclone operando com água, a diferença no procedimento consistia apenas em definir a configuração dos bicos injetores de água, controlar a vazão desejada e o nível do reservatório de água.

Na Tabela 3.2 são apresentadas as vazões de trabalho aferida no rotâmetro, bem como seu respectivo valor corrigido e a razão L/G correspondente a $v_g = 16,5 \text{ m/s}$. A vazão de água

real foi determinada conforme a Equação (3.1). A razão L/G foi determinada de acordo com a Equação (3.3).

Figura 3.7 – Ilustração (a) da região de amostragem na entrada do ciclone e (b) da entrada do ciclone



Fonte: Acervo pessoal (2014)

Tabela 3.2 – Razão L/G para a vazão aferida no rotâmetro e a real

$Q_{a,rot}$ (L/h)	Q_a (L/h)	L/G (L/m ³)
140	231,0	0,65
240	329,7	0,93
290	379,1	1,06
340	428,4	1,20
700	783,9	2,20

Fonte: Acervo pessoal (2014)

$$\frac{L}{G} = \frac{Q_a}{Q_g} \quad (3.3)$$

Sendo que a vazão de gás (Q_g) é determinada conforme a Equação (3.4).

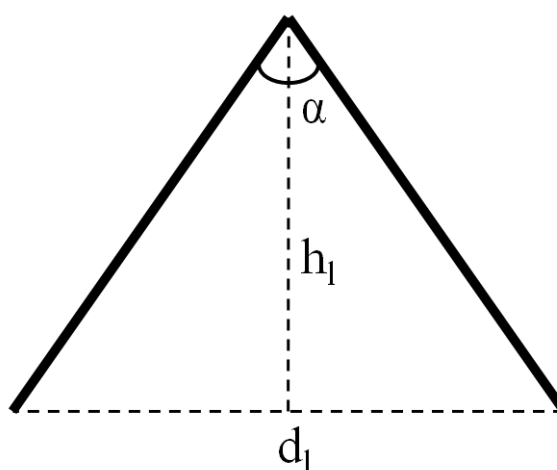
$$Q_g = v_g \cdot A_e \quad (3.4)$$

3.4.3. Caracterização do bico injetor de água

Os 8 bicos injetores de água que foram instalados no ciclone possuem diâmetro de abertura igual a 1,8 mm. Ambos os bicos são do tipo leque com ângulo de abertura do jato igual a 110° a 3 bar, conforme especificação técnica do fornecedor. O ângulo de abertura aumenta de acordo com a pressão. Como não se conhecia a pressão em cada bico, foi necessário caracterizar o ângulo de abertura do jato conforme a vazão de trabalho.

O bico injetor de água foi posicionado na vertical e direcionado para o chão. O ângulo de abertura do jato (α) foi determinado através de h_1 e d_1 , conforme ilustrado na Figura 3.8. Sendo que h_1 é a distância na vertical entre a saída do bico injetor de água e o chão e d_1 é a distância na horizontal entre as extremidades do leque que atingem o chão. Ambas as medidas foram aferidas utilizando uma trena.

Figura 3.8 – Ilustração do jato leque



Fonte: Acervo pessoal (2014)

Aplicando os dados da altura e da distância obtidos experimentalmente na Equação (3.5), foi possível calcular a abertura do leque formado para vazões específicas de água.

$$\alpha = 2 \cdot \left[\operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{d_1/2}{h_1} \right) \right] \quad (3.5)$$

Os testes para a determinação dos valores de h_1 e d_1 foram feitos em uma região que possibilitou a aferição desses dados. Foi determinado o ângulo para as vazões de água mínima e máxima, sendo de 231 e 783,9 L/h respectivamente, equivalendo a 28,9 e 98 L/h em cada bico.

Foi utilizado o Malvern Spraytech para medir o tamanho médio das gotas formadas para essas duas vazões. Para a vazão de 28,9 L/h, o equipamento não conseguiu realizar a leitura devido ao grande tamanho das gotas. Em relação à vazão de 98 L/h, o diâmetro médio de Sauter das gotas formadas foi de 300 μm .

3.5. DESEMPENHO DO CICLONE

Neste item foi descrito a metodologia para a determinação da eficiência de coleta global, fracionária e teórica.

3.5.1. Determinação da eficiência global

A determinação da eficiência de coleta do ciclone foi feita com base na amostragem isocinética. No ponto de amostragem na entrada do ciclone era inserido o tubo de Pitot e fixado na região central do duto. Após aproximadamente 4 minutos o micromanômetro digital forneceu a média do valor da velocidade do gás ($v_{g,pa}$). Esse valor foi utilizado no cálculo da vazão de sucção na sonda de amostragem (Q_{sa}), conforme a Equação (3.6).

$$Q_{sa} = v_{g,pa} \cdot A_{sa} \quad (3.6)$$

Sendo que a área no bocal da sonda de amostragem (A_{sa}) é $1,33 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$. A velocidade na entrada da sonda de amostragem (v_{sa}) deve ser igual à velocidade do gás (Equação (3.7)) para a realização da amostragem isocinética. A Equação (3.6) é facilmente deduzida partindo do pressuposto da Equação (3.7) combinada com a Equação (3.8).

$$v_{sa} = v_{g,pa} \quad (3.7)$$

$$Q_{sa} = v_{sa} \cdot A_{sa} \quad (3.8)$$

Após aferir a velocidade do gás no ponto de amostragem, a sonda de amostragem isocinética era introduzida e a vazão da bomba de sucção era ajustada com o auxílio de um rotâmetro para o início da coleta do particulado. O tempo de coleta foi fixado em 5 minutos para padronizar todas as amostras e reter uma quantidade suficiente de material particulado para o tratamento dos dados. Após a coleta no ponto de amostragem na entrada do ciclone, trocava-se a membrana de filtração e iniciava-se o mesmo procedimento na saída. Todos os testes experimentais foram feitos em triplicatas.

As membranas de filtração do particulado que foram utilizadas são do tipo GS em éster de celulose de poro 0,22 μm e diâmetro de 47 mm. Todas as membranas passavam por um procedimento de pesagem antes e após o uso na sonda de amostragem. A membrana permanecia 24 horas na estufa a 60°C e em seguida 2 horas no dessecador, sendo pesada imediatamente em uma balança de 0,01 mg de precisão. A Equação (3.9) permitiu determinar a massa de material particulado coletado (m_c).

$$m_c = m_{t,d} - m_{t,an} \quad (3.9)$$

Em que $m_{t,d}$ é a massa total da membrana após a coleta e $m_{t,an}$ é a massa total da membrana antes da coleta. Foi utilizada a Equação (3.10) para a determinação da concentração de particulado na entrada e saída do ciclone ($C_{e,s}$).

$$C_{e,s} = \frac{m_c}{t_c \cdot Q_{sa}} \quad (3.10)$$

Em que t_c é o tempo de coleta e Q_{sa} é a vazão de sucção. A eficiência global de coleta de particulado do ciclone foi calculada conforme a Equação (3.11).

$$\eta = \frac{C_e - C_s}{C_e} \quad (3.11)$$

3.5.2. Determinação da eficiência fracionária

Na obtenção de dados experimentais suficientes para a determinação da eficiência de coleta fracionária do ciclone úmido foi alterado a quantidade e o tempo de coleta. Essa alteração foi necessária para a retenção de quantidades suficientes de material particulado nas membranas, possibilitando a análise no equipamento de determinação do tamanho de partículas.

O tempo de coleta na entrada do ciclone foi mantido em 5 minutos e na saída foi alterado para 15 minutos. Foram realizadas 9 coletas seguindo a metodologia proposta, diferenciando-se apenas o tempo de coleta na saída do ciclone. Após a coleta experimental, foi utilizada a metodologia de determinação da eficiência de coleta para a validação dos resultados e continuidade no procedimento de determinação da eficiência fracionária.

As membranas utilizadas nas coletas de entrada e saída foram distribuídas em 2 béqueres contendo água e aproximadamente 20 gotas de Disperlam L (poliacrilato de sódio) para auxiliar na dispersão do particulado. Os béqueres foram colocados dentro do banho ultrassônico para a dispersão das partículas. Foi utilizada uma pinça para o auxílio na dispersão e, também, para a remoção das membranas com as partículas já dispersas. As soluções contendo o material particulado foram analisadas no Malvern Mastersizer MicroPlus.

Através da curva de distribuição granulométrica foi possível construir a curva de eficiência fracionária, conforme a Equação (3.12).

$$\eta(d_p) = 1 - \frac{(1 - \eta) \cdot f_s(d_p)}{f_e(d_p)} \quad (3.12)$$

Onde $\eta(d_p)$ é a eficiência fracionária para uma partícula de diâmetro d_p , η é a eficiência global, $f_s(d_p)$ é a fração de partículas de diâmetro d_p na saída de topo e $f_e(d_p)$ é a fração de partículas de diâmetro d_p na alimentação do ciclone.

3.5.3. Determinação da eficiência fracionária teórica

A eficiência global teórica (η_i) foi calculada conforme a Equação (3.13), apresentada por Koch e Licht (1977) e descrito por Lora (2002) e Majewski (2006).

$$\eta_i = 1 - \exp \left\{ -2 \cdot \left[\frac{E \tau_i Q_g}{D^3} \cdot (n+1) \right]^{\frac{0,5}{(n+1)}} \right\} \quad (3.13)$$

Sendo que:

$$\tau_i = (\rho_p d_{pi}^2) / 18 \mu_g$$

$$E = 8K_c / (K_a^2 K_b^2)$$

$$K_a = a/D$$

$$K_b = b/D$$

A variável τ_i é uma função das propriedades do gás, E é uma função da geometria do ciclone, K_a e K_b relacionam as dimensões da entrada do ciclone (a e b) com o diâmetro do corpo cilíndrico (D). K_c refere-se ao volume efetivo do ciclone e pode ser calculado através da Equação (3.14) (LAPPLE, 1951), conforme descrito por Lora (2002).

$$K_c = \frac{\pi}{4} \cdot \left\{ \left[\frac{(H - h_{cc})}{(D - B)} \right] \cdot \left[\frac{D^3 - B^3}{3} \right] + D^2 h_{cc} - 2aD_e^2 \right\} \quad (3.14)$$

O valor de n foi estimado como uma função do diâmetro do ciclone em pés e da temperatura do gás em °F, conforme a Equação (3.15).

$$n = 1 - \left[1 - \frac{(12D)^{0,14}}{2,5} \right] \cdot \left[\frac{T_g + 460}{530} \right]^{0,3} \quad (3.15)$$

3.6. MODIFICAÇÕES INICIAIS

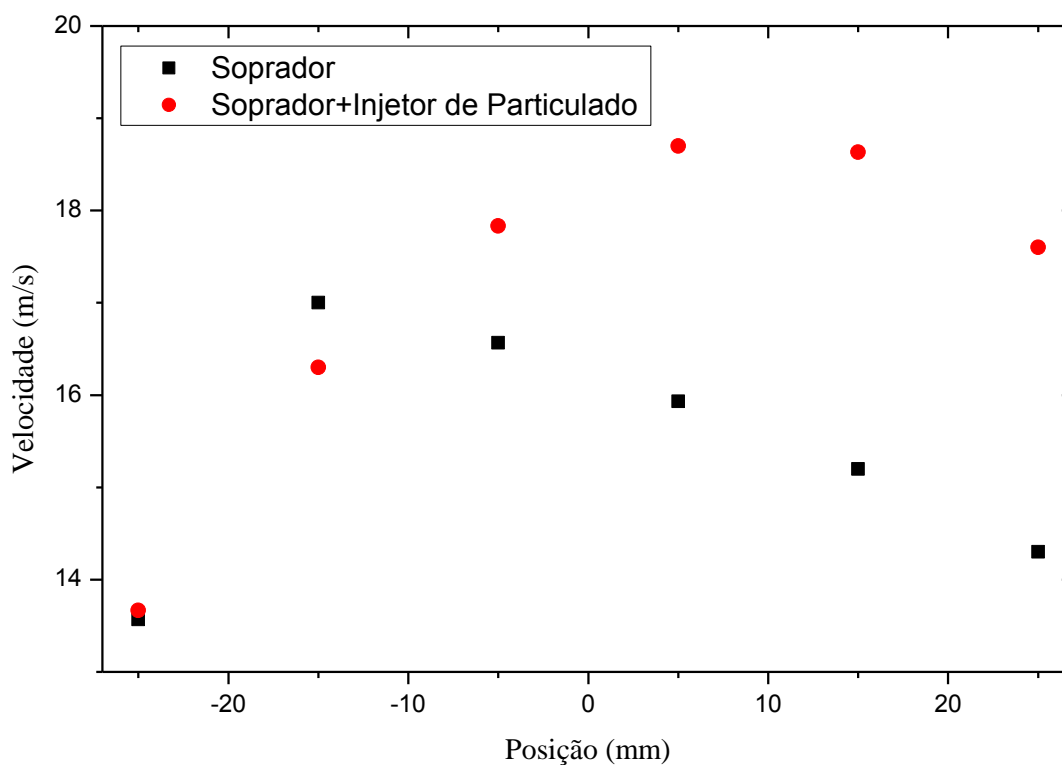
O ciclone de geometria Stairmand (1951) foi utilizado na forma didática no Laboratório de Processos Químicos do Departamento de Engenharia Química da UFSCar por alunos da

gradação. Para a obtenção de resultados confiáveis para alcançar o objetivo deste trabalho, foi necessária a realização de algumas mudanças e ajustes no equipamento. Essas modificações são apresentadas neste tópico. Algumas das modificações não surtiram efeito e, por isso, algumas informações técnicas não foram devidamente arquivadas. Dessa forma, alguns detalhes não são mencionados no texto por falta de dados arquivados.

3.6.1. Alimentação de particulado

A alimentação do material particulado foi feita utilizando o sistema de prato giratório. Portanto, o particulado foi arrastado para o duto principal fluindo no interior de uma mangueira. Essa mangueira estava introduzida no duto principal de forma inadequada. A velocidade no plano de amostragem na entrada do ciclone foi aferida para diferentes pontos. Foi utilizado o tubo de Pitot acoplado ao micromanômetro digital para a obtenção do valor. O perfil de velocidade é mostrado na Figura 3.9.

Figura 3.9 – Perfil de velocidade no plano de amostragem na entrada do ciclone

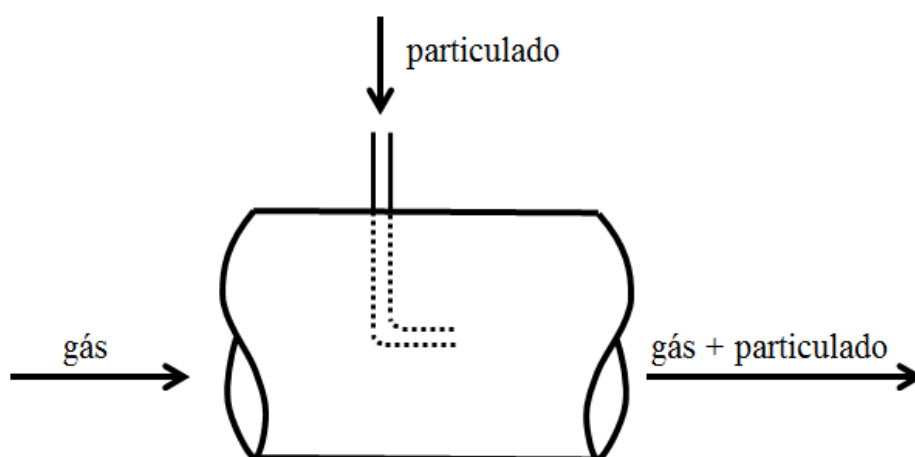


Fonte: Acervo pessoal (2014)

De acordo com a Figura 3.9, é possível observar que o perfil encontrava-se deslocado. Analisando os dados, possivelmente o inadequado posicionamento da mangueira no interior do duto principal obstruía o escoamento do gás, pois o perfil de velocidade quando apenas o soprador estava ligado encontrava-se deslocado para a posição negativa do eixo radial. Observa-se, também, que a injeção do ar comprimido (injetor de particulado) encontrava-se posicionada na posição positiva próxima da parede do duto, pois o perfil de velocidade estava deslocado para essa região quando o soprador e o ar comprimido eram acionados.

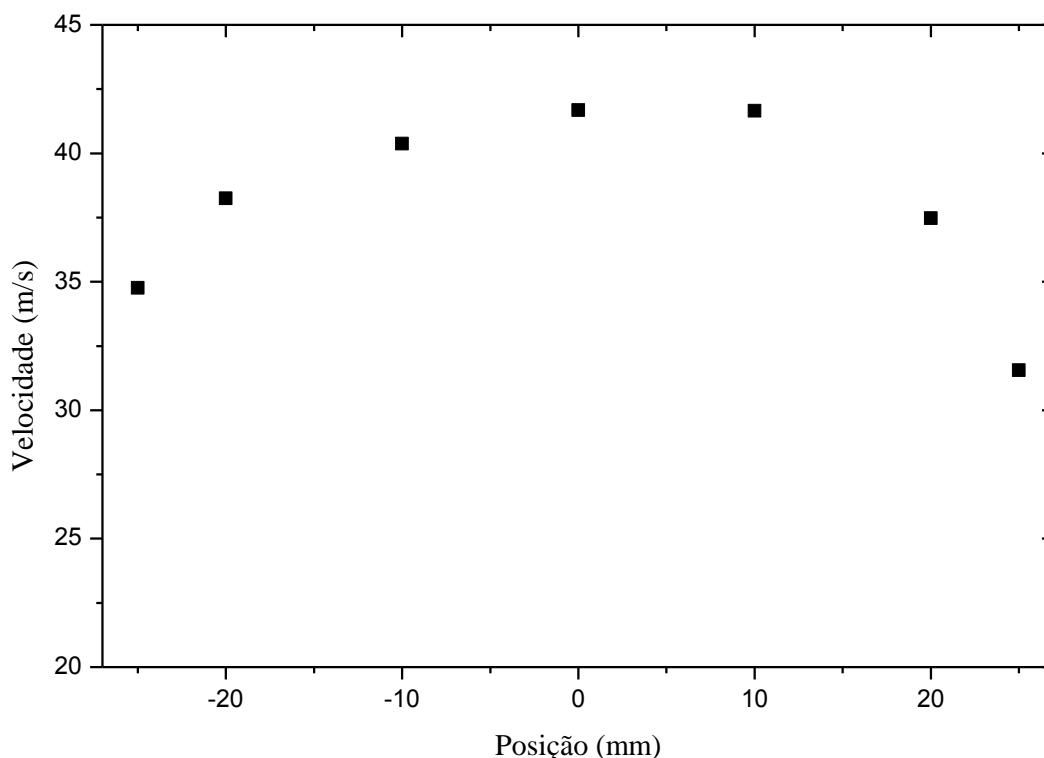
No intuito de contornar esse problema, foi soldado um tudo oco na forma de “L” na região central do duto principal em uma região mais distante de onde era feita a injeção do particulado. Com essa alteração, o particulado passou a ser injetado na região central do duto principal na mesma direção do gás e houve um acréscimo de distância para que o perfil de velocidade se desenvolvesse melhor até o ponto de amostragem. A ilustração da vista superior dessa região é mostrada na Figura 3.10. Além disso, houve a troca do soprador por um mais potente de vazão igual a $8,2 \text{ m}^3/\text{min}$. Esse soprador foi utilizado até a obtenção de todos os dados experimentais desse trabalho. O motivo do uso do soprador antigo, menos potente, foi a disponibilidade experimental, pois no momento, o soprador mais potente disponível estava sendo utilizado em outro equipamento. Na Figura 3.11 é mostrado o novo perfil de velocidade com o soprador e o ar comprimido do injetor de particulado funcionando.

Figura 3.10 – Ilustração da vista superior da região de injeção de particulado no duto principal



Fonte: Acervo pessoal (2014)

Figura 3.11 – Perfil de velocidade no plano de amostragem na entrada do ciclone



Fonte: Acervo pessoal (2014)

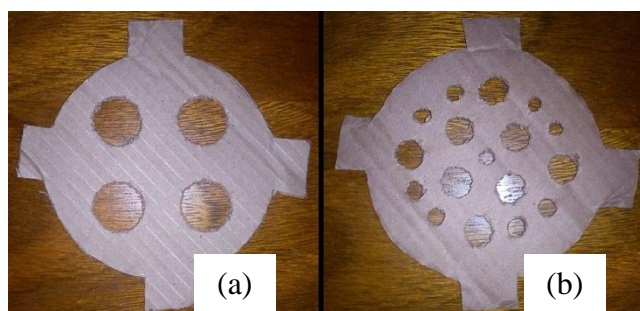
Essa mudança mostrou-se bastante eficiente, pois o perfil de velocidade melhorou significativamente e apresentou as características encontradas na literatura, ou seja, velocidade mais baixa na região próxima a parede e velocidade máxima na região central.

3.6.2. Perfil de velocidade na saída de topo

A velocidade do gás deve se manter o mais constante possível para a realização da amostragem isocinética. Inicialmente, a velocidade na saída de topo do ciclone mostrou-se inadequada para a amostragem, pois em alguns pontos o valor era negativo e oscilava bruscamente. Esse fato foi decorrente da própria fluidodinâmica do equipamento, fazendo com que turbilhões se formassem na saída, resultando na oscilação da velocidade. Tentou-se prolongar o duto de saída de topo acoplado um duto na vertical de aproximadamente 4 vezes o diâmetro do duto de saída. Essa alteração não apresentou melhoria. Outra tentativa foi fixar uma tela com aberturas cilíndricas de 3 mm de diâmetro no interior desse duto. Essa alteração também não apresentou melhoria.

Buscando novas alternativas, o duto utilizado no prolongamento foi preenchido com 3 placas de papelão apresentando 2 desenhos diferentes, (a) e (b), conforme é mostrado na Figura 3.12. Buscou-se essa técnica com base teórica de que o gás seria forçado a escoar por caminhos predefinidos pelos furos nas placas e forçado a mover-se na direção radial do duto, acarretando a mistura do gás e possivelmente a extinção das velocidades negativas e inconstantes provocadas pelos turbilhões.

Figura 3.12 – Placas de papelão



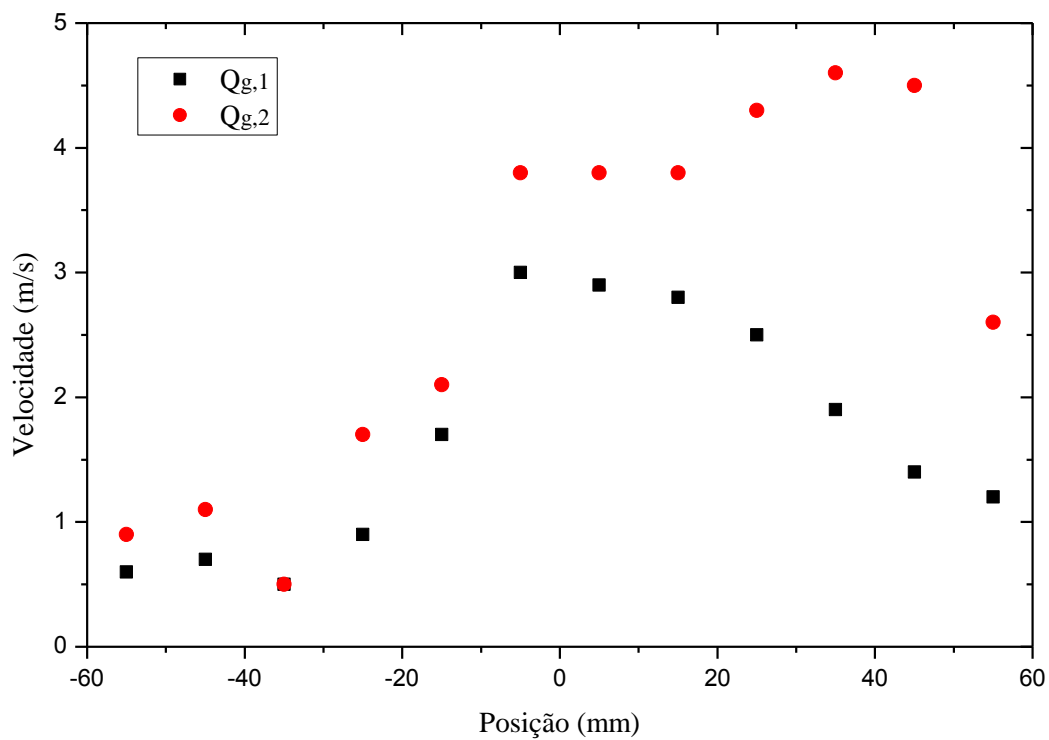
Fonte: Acervo pessoal (2014)

A primeira placa com o desenho (a) foi fixada logo no início do duto. Em uma posição de aproximadamente 120 mm acima da primeira placa foi fixada a segunda com o desenho (a) com um giro de 45°. A terceira placa com o desenho (b) foi fixada 100 mm acima da segunda. O resultado desse terceiro teste é mostrado na Figura 3.13 através do perfil de velocidade para duas vazões de ar no soprador, sendo a $Q_{g,1}$ uma vazão de ar mais baixa que a $Q_{g,2}$.

A fixação das placas induziu a mistura do gás, pois a obstrução parcial no escoamento obrigou a passagem do gás por caminhos predeterminados forçando-o, em alguns momentos, a fluir na direção radial para vencer a obstrução. Essa mistura do gás aliada a caminhos predeterminados com área bem menor que a do diâmetro do duto auxiliou na remoção dos turbilhões.

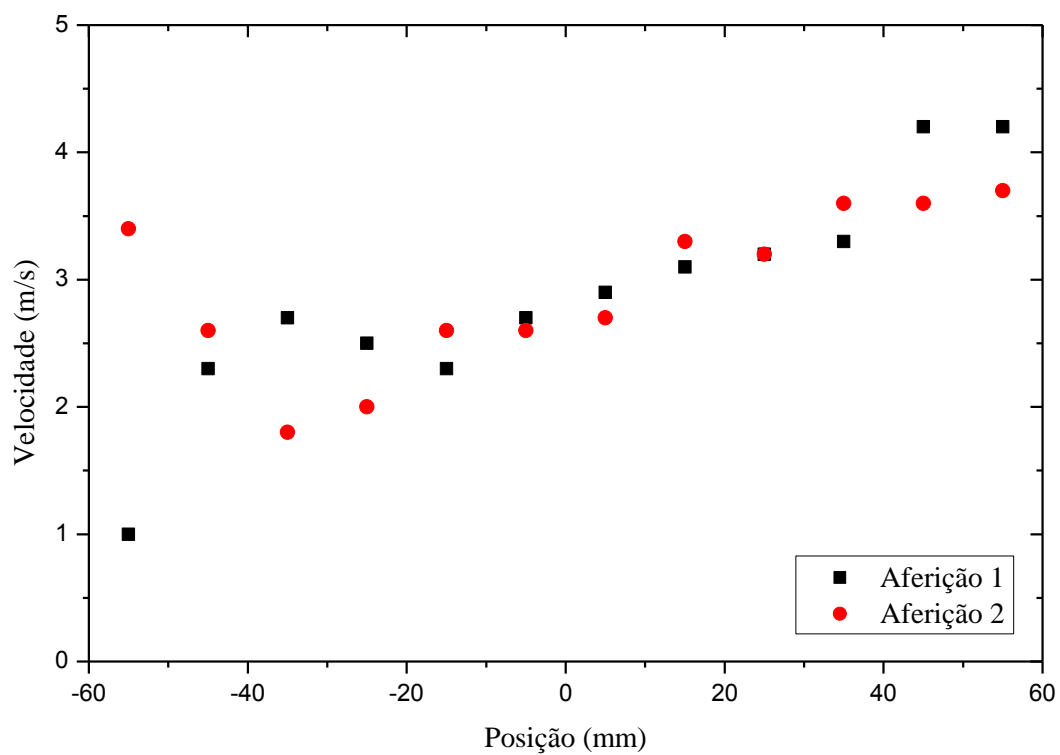
Outro teste envolveu o preenchimento com esferas de sílica no duto utilizado para o prolongamento. O recheio teve altura de 50 mm e o perfil de velocidade é mostrado na Figura 3.14 em duplicata. De forma análoga a utilização das placas de papelão, o recheio de sílica foi eficiente na remoção dos turbilhões, além de apresentar pouca variação na velocidade entre as posições -25 e 55 mm.

Figura 3.13 – Perfil de velocidade na saída de topo do ciclone



Fonte: Acervo pessoal (2014)

Figura 3.14 – Perfil de velocidade na saída de topo do ciclone



Fonte: Acervo pessoal (2014)

A utilização das placas ou do recheio seriam suficientes para a realização da amostragem isocinética, pois em nenhuma posição radial houve a aferição de velocidades negativa. O recheio de sílica auxilia na redução da umidade do gás, comportamento interessante para as indústrias, pois a presença de umidade pode ser prejudicial para alguns equipamentos e para a imagem da indústria caso a alta umidade esteja provocando a pluma que é emitida nas chaminés.

A oscilação da velocidade no duto de saída pode ser solucionada com o uso de placas com aberturas ou recheio de sílica. No entanto, isto implicaria em novos mecanismos de coleta, podendo interferir na análise da influência da injeção de água na eficiência de coleta do ciclone.

De modo a afetar o mínimo possível na aferição dos dados experimentais, buscou-se uma nova alternativa para atenuar os turbilhões. Foi acoplado um cotovelo na saída de topo do ciclone juntamente com um duto de 1300 mm (Figura 3.15). Esse duto possui 3 pontos de amostragem, o primeiro situado a 720 mm do cotovelo, o segundo a 920 mm e o terceiro a 1120 mm.

Figura 3.15 – Duto de saída de topo do ciclone

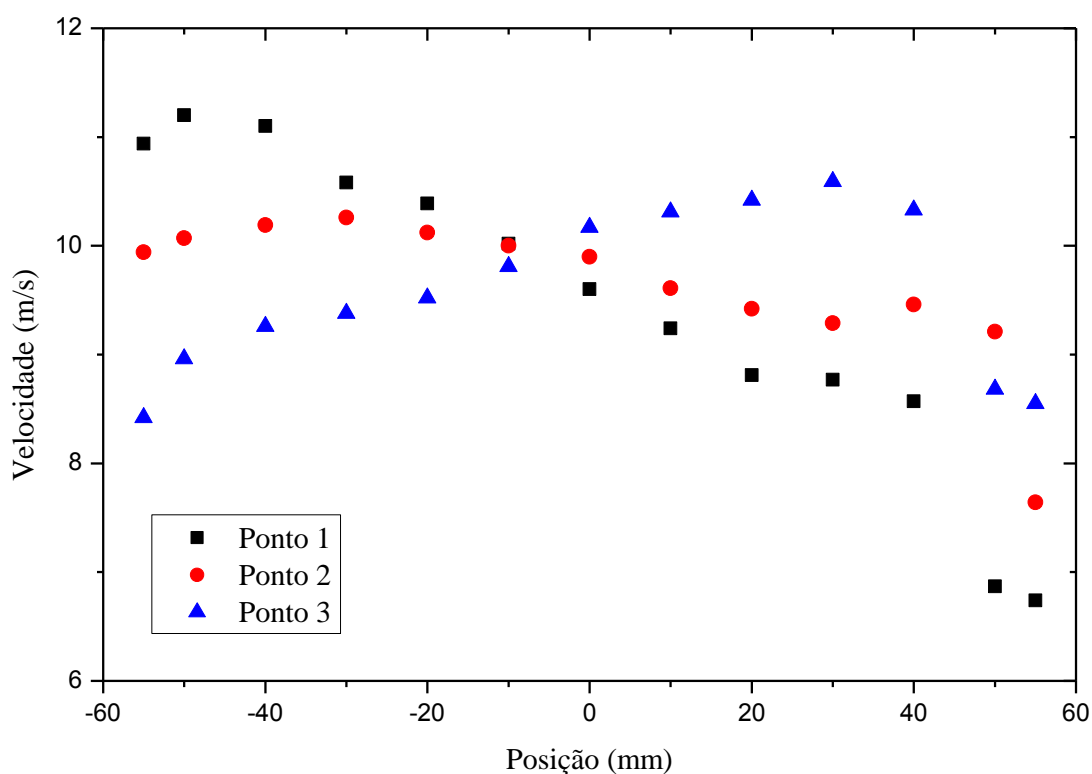


Fonte: Acervo pessoal (2014)

Para cada ponto de amostragem, foi aferida a velocidade no plano radial do duto, sendo que o ponto 1 refere-se ao ponto mais próximo do cotovelo, o 2 ao do meio e o 3 ao mais próximo da extremidade em contato com o ar ambiente. O perfil de velocidade é mostrado na Figura 3.16.

A simples utilização do cotovelo foi suficiente para atenuar os turbilhões. Ambos os pontos de amostragem estão aptos para a realização da amostragem isocinética. O prolongamento do duto foi feito no intuito de realizar o desenvolvimento do perfil de velocidade. A região central na direção radial apresentou pouca variação no valor da velocidade e, assim, a amostragem foi feita nessa região, exatamente na posição radial de 0 mm. A amostragem isocinética foi feita no ponto 3, pois acredita-se que o ponto mais distante do ciclone apresenta uma melhor homogeneidade do gás, em relação a mistura de material particulado e gás.

Figura 3.16 – Perfil de velocidade na saída de topo do ciclone



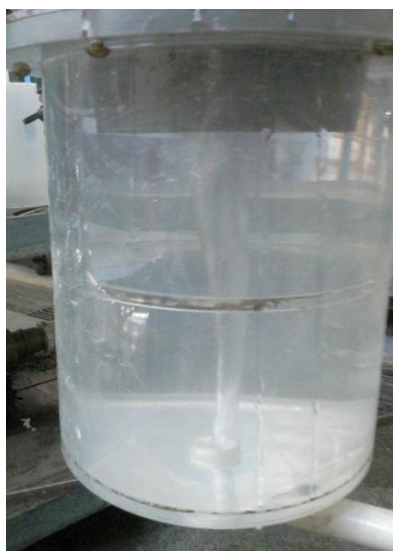
Fonte: Acervo pessoal (2014)

3.6.3. Caixa coletora de particulado

Na saída de fundo do ciclone foi acoplada uma caixa cilíndrica para a coleta do particulado com volume útil de $3,62 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$. O material utilizado foi o acrílico para possibilitar a visualização da altura de água acumulada. Uma válvula para remoção de água foi instalada na região central da parte inferior da caixa.

Assim que a caixa foi instalada no ciclone, iniciaram-se alguns testes. O aumento da vazão de gás alimentado na tubulação principal proporcionou a saída do gás na caixa coletora de particulado pela região central, conforme observado na Figura 3.17.

Figura 3.17 – Visualização do vórtice na caixa coletora



Fonte: Acervo pessoal (2014)

O vórtice de ar dificultou a saída da água formando um acúmulo superior ao volume da caixa. Esse fenômeno ocorreu devido à própria fluidodinâmica do ciclone. A força centrífuga proporcionada pelo escoamento do gás impulsionou a movimentação circulatória da água no interior da caixa coletora. Assim, o fluido de maior densidade, a água, tendeu a manter-se na região mais próxima da parede enquanto o fluido de menor densidade, o gás, tendeu a manter-se na região central. A solução para contornar esse problema foi a mudança da posição da saída de água na parte inferior da caixa coletora. A saída foi deslocada do centro para uma região próxima à parede da caixa. Essa mudança surtiu efeito, formando um acúmulo máximo de 30 mm.

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a realização de todas as modificações e ajustes descritos no Capítulo 3, iniciaram-se os testes preliminares que compõem uma etapa de aptidão ao equipamento e à metodologia. Os testes preliminares estão detalhados no APÊNDICE C e serão comentados brevemente a seguir.

Os primeiros testes foram feitos utilizando um soprador diferente do atual e outro tamanho médio de partículas de rocha fosfática. Nessa primeira etapa experimental foi avaliada a eficiência de coleta através da variação da velocidade do gás e concentração do material particulado na entrada do ciclone para as temperaturas de 40 e 80°C com o equipamento operando a seco.

Em seguida, o soprador foi trocado pelo que está instalado atualmente. A temperatura de trabalho foi fixada em 60°C e o diâmetro mediano das partículas utilizadas foi de 4,66 µm. Essa condição foi a mesma descrita no item de materiais e métodos e que foi utilizada para a conclusão da etapa experimental. Nessa etapa de experimentos foi verificada a influência da concentração de particulado e velocidade na entrada do ciclone a seco. Com base nos resultados obtidos de eficiência de coleta, foram utilizadas a melhor e a pior condição operacional para serem avaliadas no ciclone operando com água. Foi realizado experimentos com 3 diferentes vazões de água e todos os bicos injetores de água abertos.

Durante a finalização destes experimentos foi verificada a existência de uma pequena fenda no tubo da sonda de amostragem isocinética. Assim, todos os testes experimentais que foram realizados até o descobrimento do vazamento foram apresentados como testes preliminares, pois não se sabe o quanto essa fenda afetou nos resultados.

Devido ao longo tempo tomado pelos ajustes e testes que apresentaram algum tipo de falha, optou-se por definir uma condição operacional no equipamento operando a seco e efetuar a pesquisa do ciclone úmido com base nessa condição. Essa condição foi definida com base científica e nas possibilidades do aparato experimental.

Conforme observado na revisão bibliográfica deste presente trabalho, alguns autores relatam que o aumento da concentração de particulado e da velocidade do gás resulta no aumento da eficiência de coleta do ciclone (FASSANI, 1997; HOFFMAN, AREND E SIE, 1991; HOFFMAN et al., 1992; MOTHES E LÖFFLER, 1985) e que a velocidade operacional ideal do ciclone está entre 10 e 30 m/s (MASSARANI, 2001). Dessa forma, este trabalho foi realizado utilizando 90% do máximo que o aparato experimental atinge como forma de segurança para garantir a mesma condição operacional para todos os testes experimentais.

Portanto, a velocidade do gás na entrada do ciclone foi definida em 16,5 m/s e a rotação do prato de alimentação de particulado em 90%, equivalendo a 0,59 g/m³ de particulado no gás. O desempenho do ciclone foi avaliado com base em 3 diferentes configurações dos bicos injetores de água:

- (i) os 4 bicos injetores na parte superior abertos e os 4 bicos no corpo cilíndrico fechados, essa condição recebeu o nome de “superior”;
- (ii) os 4 bicos injetores na parte superior fechados e os 4 bicos no corpo cilíndrico abertos, essa condição recebeu o nome de “lateral”;
- (iii) os 4 bicos injetores na parte superior abertos e os 4 bicos no corpo cilíndrico abertos, essa condição recebeu o nome de “todos”.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DO BICO INJETOR DE ÁGUA

Utilizando a Equação (3.5) foi calculado o valor do ângulo de abertura do leque. Os dados utilizados e o ângulo referente a cada vazão de água no bico (Q_b) são mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Dados do bico injetor de água

Q_b (L/h)	h (mm)	d_i (mm)	α (°)
28,9	600	509	46
98	600	143	100

Fonte: Acervo pessoal (2014)

Com base nesses valores, observa-se que o ângulo de abertura do leque aumentou conforme o aumento da vazão de água no bico, sendo que para a vazão máxima de trabalho o ângulo formado foi superior a duas vezes ao ângulo referente à vazão mínima. Na Figura 4.1 e Figura 4.2 é mostrado o leque formado para a vazão de 28,9 e 98 L/h, respectivamente.

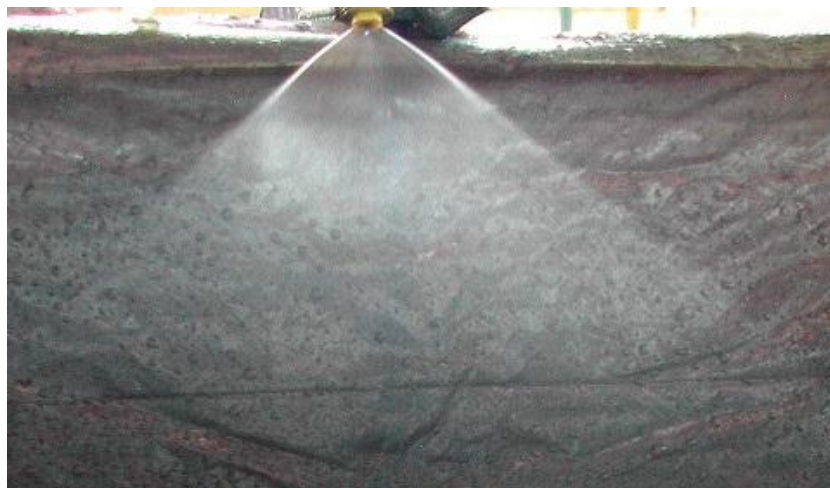
Na vazão de 98 L/h o ângulo de abertura foi de 100°, valor próximo aos 110° especificado pelo fornecedor. Isto indica que o jato formado possui boa formação, ou seja, dispersão adequada do líquido no gás e formação de pequenas gotas de água. Já para a vazão de 28,9 L/h, observa-se má formação do jato.

Figura 4.1 – Jato do bico injetor de água para a vazão de 28,9 L/h



Fonte: Acervo pessoal (2014)

Figura 4.2 – Jato do bico injetor de água para a vazão de 98 L/h



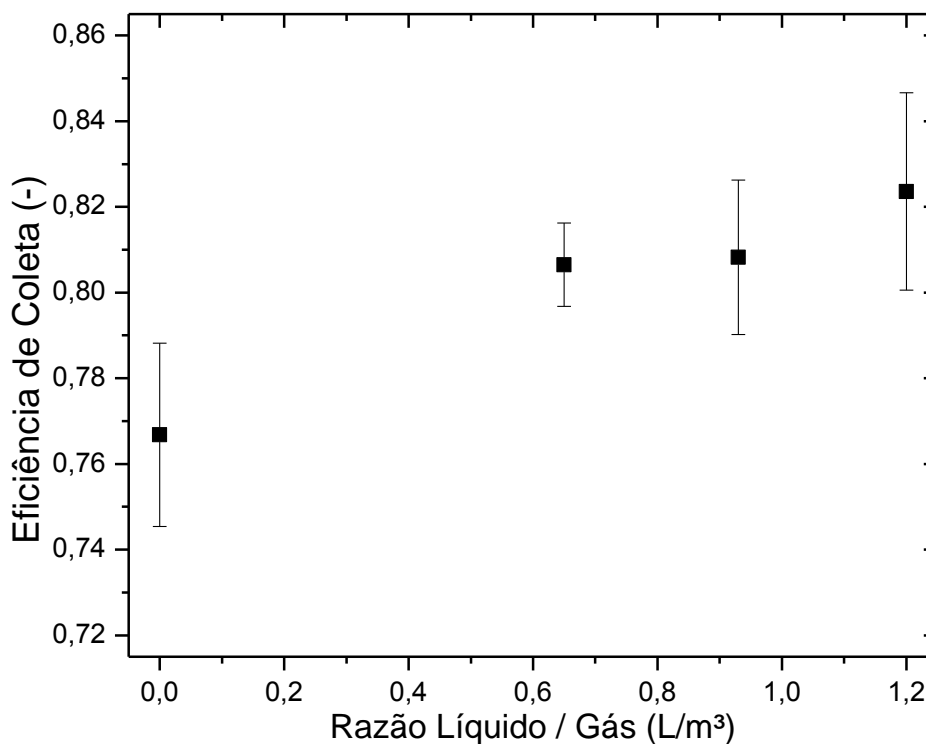
Fonte: Acervo pessoal (2014)

4.2. EFICIÊNCIA GLOBAL

A eficiência global de coleta do ciclone é apresentada em função da razão líquido gás (L/G). Os resultados são mostrados na Figura 4.3, Figura 4.4 e Figura 4.5 para cada uma das configurações dos bicos injetores de água. A barra de erro corresponde ao desvio padrão da

média da triplicata. Todos os dados necessários para a obtenção da eficiência são mostrados no APÊNDICE D.

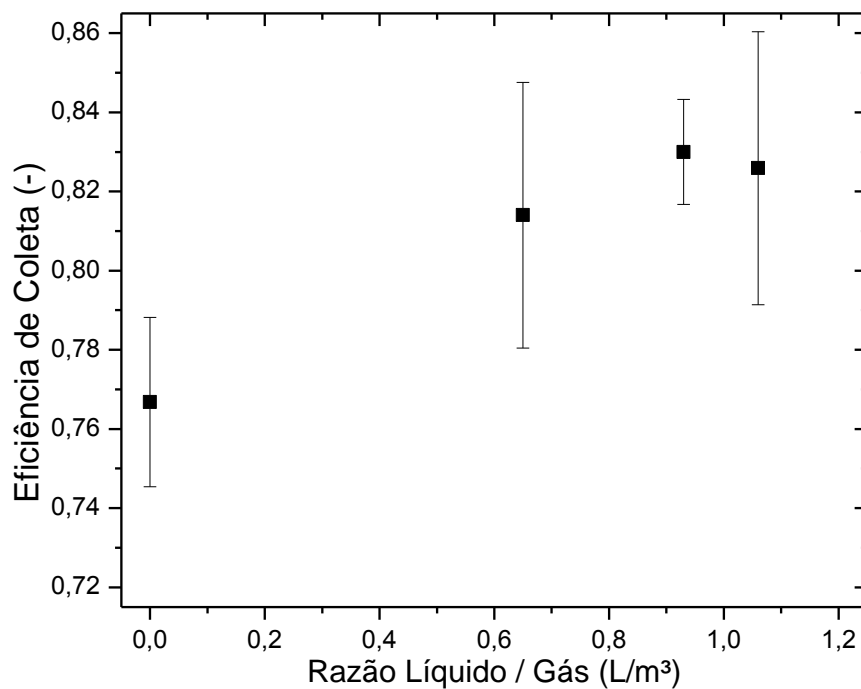
Figura 4.3 – Eficiência de coleta na configuração “superior”



Fonte: Acervo pessoal (2014)

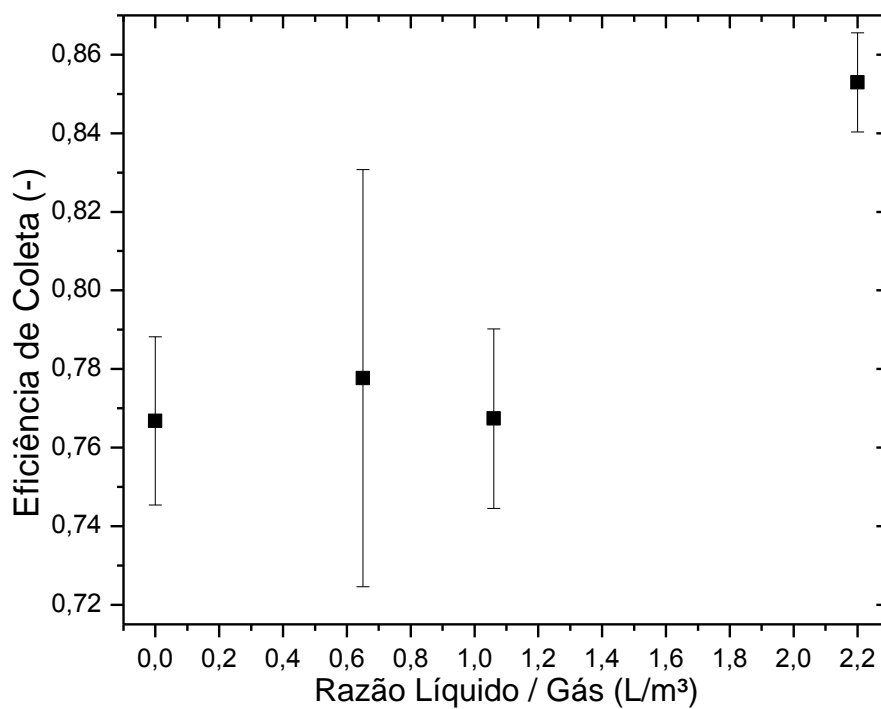
O ponto onde a razão $L/G = 0$ refere-se ao ciclone operando a seco, sendo que a eficiência é igual a 76,7%. Na configuração com os bicos injetores da região superior aberto (Figura 4.3), foi verificada a tendência no aumento da eficiência global de coleta conforme o aumento da razão L/G , ou seja, aumento da vazão de água. Para a razão $L/G = 1,2 \text{ L/m}^3$ foi constatada a melhor eficiência média, sendo de 82,4%. A mesma tendência foi observada para a configuração lateral (Figura 4.4), sendo que a melhor eficiência média foi de 83,4% na razão $L/G = 0,93 \text{ L/m}^3$. Para a configuração de todos os bicos abertos, foi observado uma tendência de não melhoria para os 2 primeiros pontos, razão $L/G = 0,65$ e $1,06 \text{ L/m}^3$, e um expressivo aumento na eficiência para o último ponto, razão $L/G = 2,2 \text{ L/m}^3$, correspondendo a 85,3%.

Figura 4.4 – Eficiência de coleta na configuração “lateral”



Fonte: Acervo pessoal (2014)

Figura 4.5 – Eficiência de coleta na configuração “todos”



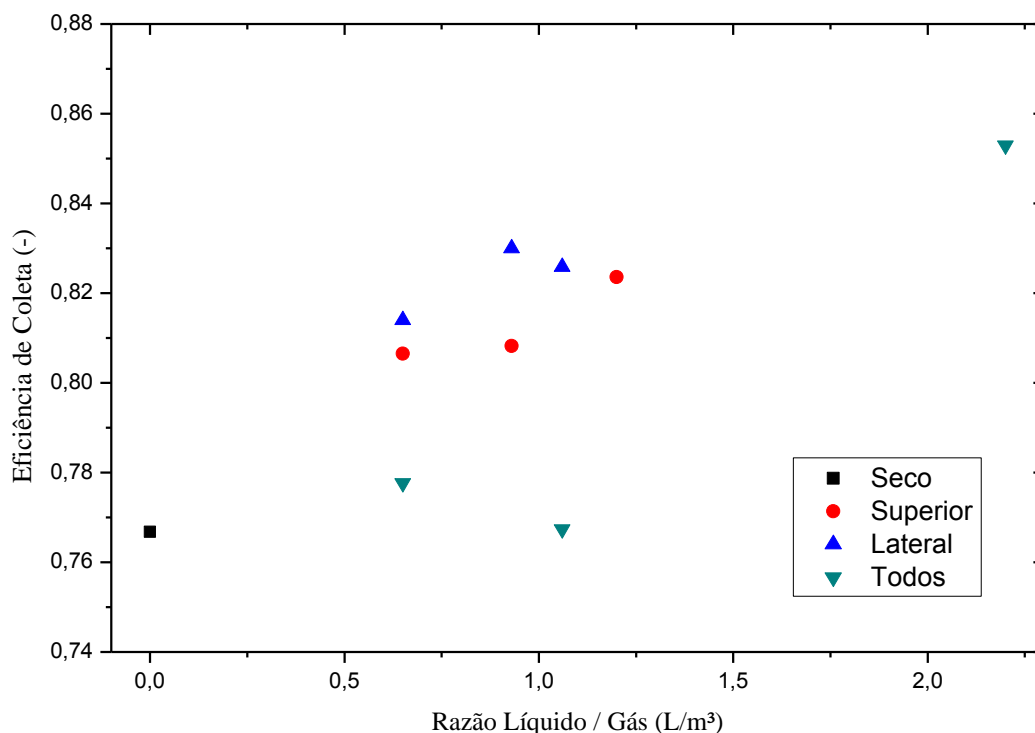
Fonte: Acervo pessoal (2014)

Dentre as 3 configurações analisadas, a com todos os bicos abertos apresentou a melhor eficiência global média de coleta, representando uma melhoria de 8,6% em relação ao ciclone operando a seco. A adição de água no interior do ciclone elevou a eficiência através de dois fenômenos:

- (i) *Adição de um corpo coletor*: As gotas que são formadas no interior do ciclone atuam como um corpo coletor de partículas. As partículas que não seriam coletadas pelo ciclone operando a seco passam a obter uma resistência no escoamento provocada pela presença de gotas de água. Algumas delas, ao colidirem diretamente ou aderirem à superfície da gota passam a ser coletadas. O aumento na massa da partícula provocada pela aglomeração com a água e, em alguns casos, com outras partículas auxilia na remoção dessas partículas na corrente de gás. Esse mecanismo é o predominante na melhoria da eficiência;
- (ii) *Eliminação do rebatimento das partículas*: O simples fato de injetar água no interior do ciclone faz com que a parede interna fique úmida. O filme de líquido atua reduzindo a energia de impacto da partícula na parede. Isso evita que a partícula seja rebatida e direcionada à corrente de gás ascendente que flui em direção à saída de topo.

Na Figura 4.6 é mostrada a eficiência média de coleta com todas as configurações analisadas. Observa-se que para as razões L/G de 0,65 a 1,2 L/m³ houve um aumento na eficiência de coleta para as configurações superior e lateral em relação ao ciclone operando a seco. O mesmo não é observado para todos os bicos abertos. Esse resultado mostra que o aumento na vazão de água total no sistema não indica o aumento na eficiência de coleta, pois a água que é injetada no sistema é distribuída para os bicos que estão em aberto. No caso das configurações superior e lateral, a quantidade de água que é injetada no sistema é distribuída em 4 bicos, já na configuração todos é distribuída para 8 bicos. Dessa forma, o líquido injetado nessa faixa de razão L/G para todos os bicos abertos não está formando um jato adequado, afetando a qualidade de dispersão do líquido no gás e, conseqüentemente, sendo ineficaz na coleta de particulado.

Figura 4.6 – Eficiência de coleta



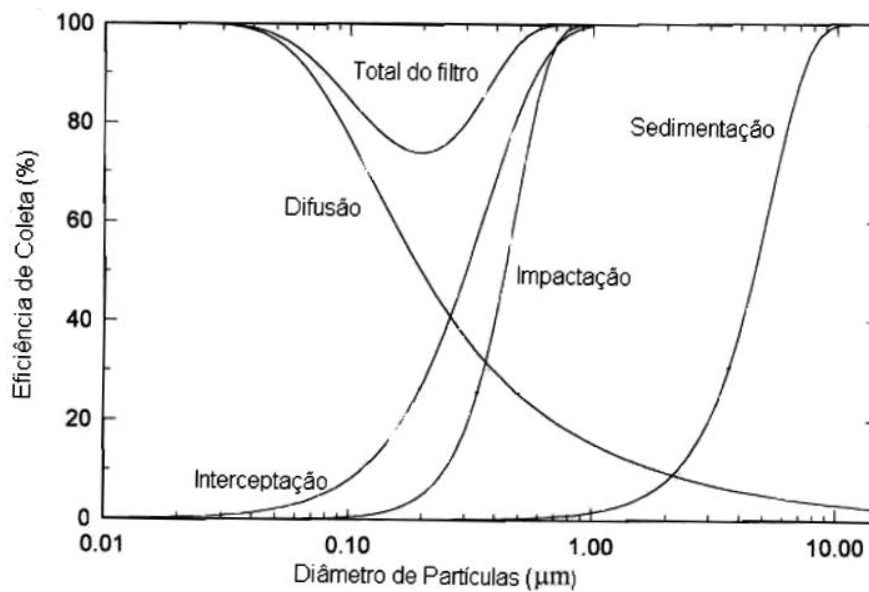
Fonte: Acervo pessoal (2014)

4.3. EFICIÊNCIA FRACIONÁRIA

A eficiência de coleta do equipamento foi determinada com base na amostragem isocinética. Dessa forma, a concentração de particulado na entrada e saída do ciclone é uma função da massa que é retida na membrana de filtração. Tratando de filtração de gás por membranas, existem alguns mecanismos que atuam na deposição do material particulado na membrana conforme o diâmetro de partícula (Figura 4.7). Devido à influência individual e em conjunto de cada mecanismo, o comportamento referente à diminuição da eficiência de coleta para uma faixa crescente de diâmetro de partículas é comum na filtração em meios porosos.

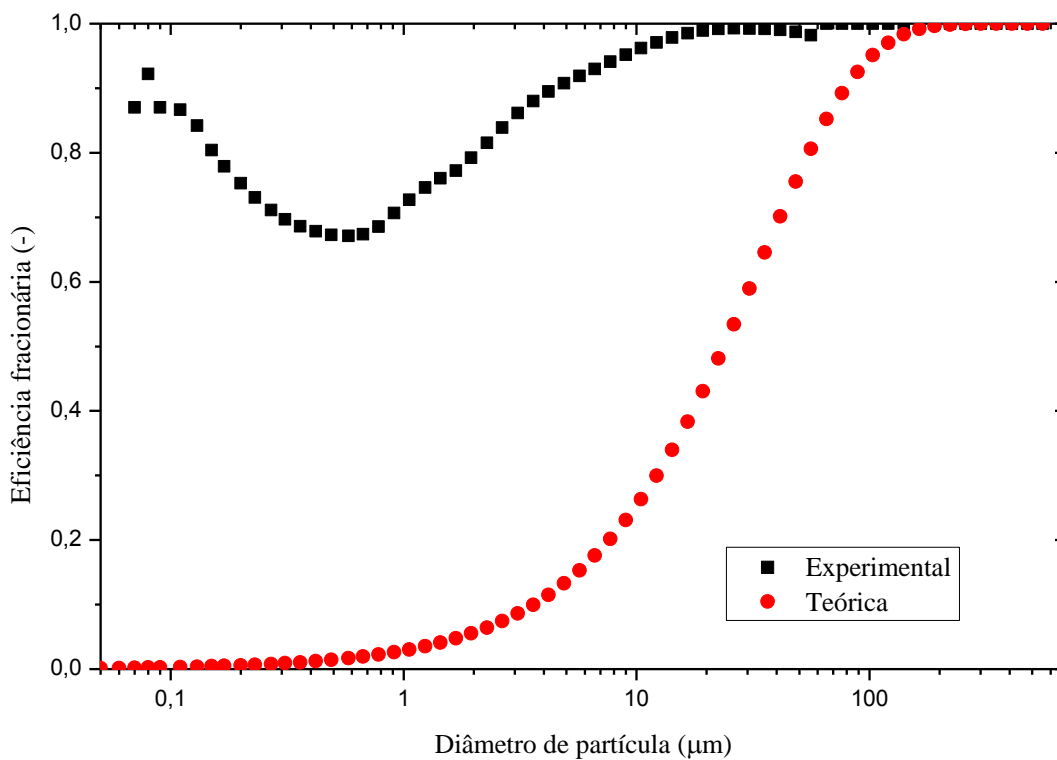
A eficiência de coleta fracionária foi feita apenas para a melhor condição experimental que consistiu na configuração “todos” e razão L/G = 2,2 L/m³, correspondendo a uma eficiência de coleta global igual a 85,3%. Na Figura 4.8 é mostrada a eficiência de coleta fracionária experimental e a teórica para cada diâmetro de partícula. Sendo que a eficiência teórica refere-se ao ciclone operando a seco e foi obtida pela Equação (3.13) da página 34. Os dados para a obtenção da eficiência fracionária experimental e teórica estão dispostos no APÊNDICE E e F.

Figura 4.7 – Influência do diâmetro de partícula nos mecanismos atuantes em meios filtrantes



Fonte: Costa (2002)

Figura 4.8 – Eficiência de coleta fracionária



Fonte: Acervo pessoal (2014)

O comportamento mostrado na Figura 4.8 não é típico em equipamentos coletores, como ciclones e lavadores de gás. No entanto, a metodologia empregada para a determinação da eficiência de coleta é resultante da filtração de gás por membrana, indicando que este comportamento é decorrente da metodologia de amostragem isocinética.

Conforme a Figura 4.8, observa-se que o mecanismo difusional é predominante para as partículas menores que $0,08 \mu\text{m}$. Conforme o aumento do diâmetro da partícula, esse mecanismo atua de forma decrescente na eficiência. As partículas com diâmetro superior a $0,6 \mu\text{m}$ são coletadas devido a dois mecanismos de intensa atuação na eficiência total de coleta, o inercial e a interceptação direta.

O aumento do diâmetro das partículas resultou no aumento da eficiência de coleta para as partículas com o diâmetro maior que $0,6 \mu\text{m}$. Sendo que para as partículas com o diâmetro superior a $4,5 \mu\text{m}$ a eficiência de coleta foi superior a 90%. As partículas com diâmetro superior a $65 \mu\text{m}$ foram coletadas com a eficiência de 100%.

A eficiência fracionária teórica é consideravelmente baixa quando comparada com a experimental. Essa eficiência teórica refere-se ao ciclone operando a seco. Assim, esta grande diferença entre a eficiência experimental e teórica pode ser atribuída ao uso da água.

4.4. TEMPERATURA E UMIDADE

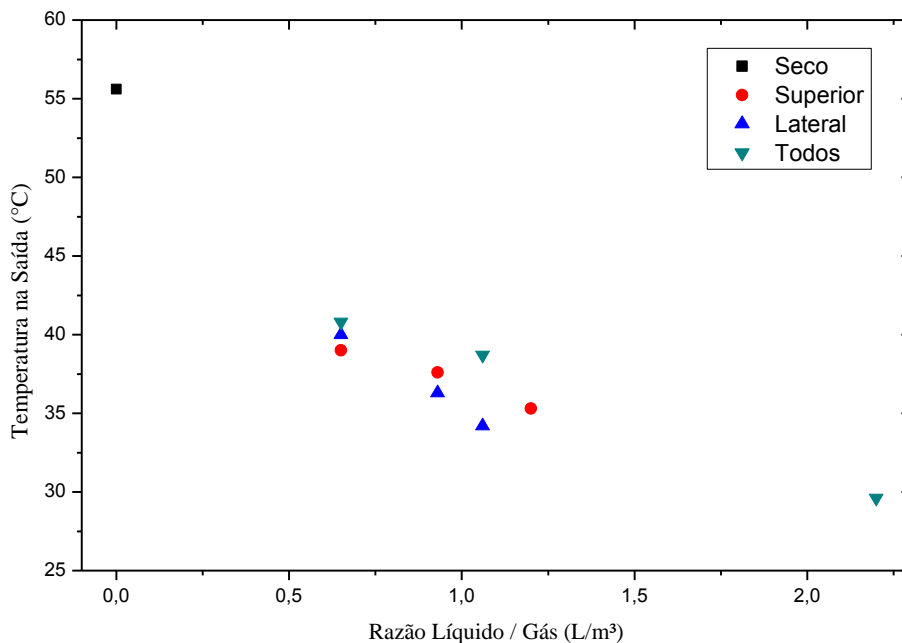
A temperatura do gás na entrada do ciclone foi fixada em 60°C para todas as rodadas experimentais. A temperatura de saída de topo é apresentada na Figura 4.9.

Houve uma tendência na redução da temperatura de saída de topo do ciclone com o aumento da razão L/G. O aumento na quantidade de água injetada no ciclone aumentou a quantidade de gotas formadas e, conseqüentemente, aumentou a área superficial de contato entre o líquido e o gás. Esse fato aliado à turbulência do escoamento do gás no interior do ciclone fez com que aumentasse a transferência de calor entre o líquido e o gás. O líquido por estar mais frio resfria o gás. A temperatura mais baixa registrada foi de $29,6^\circ\text{C}$ correspondendo à razão L/G de $2,2 \text{ L/m}^3$ com todos os bicos injetores abertos.

Na Figura 4.10 é mostrada a diferença da umidade relativa do gás na entrada em relação a saída de topo do ciclone. Houve uma tendência no aumento da diferença de umidade relativa do gás entre a entrada e saída do ciclone conforme o aumento da razão L/G. Esse comportamento é fundamentado de forma análoga à redução de temperatura, sendo que houve transferência de massa da fração líquida para o gás conforme o aumento da razão L/G. A

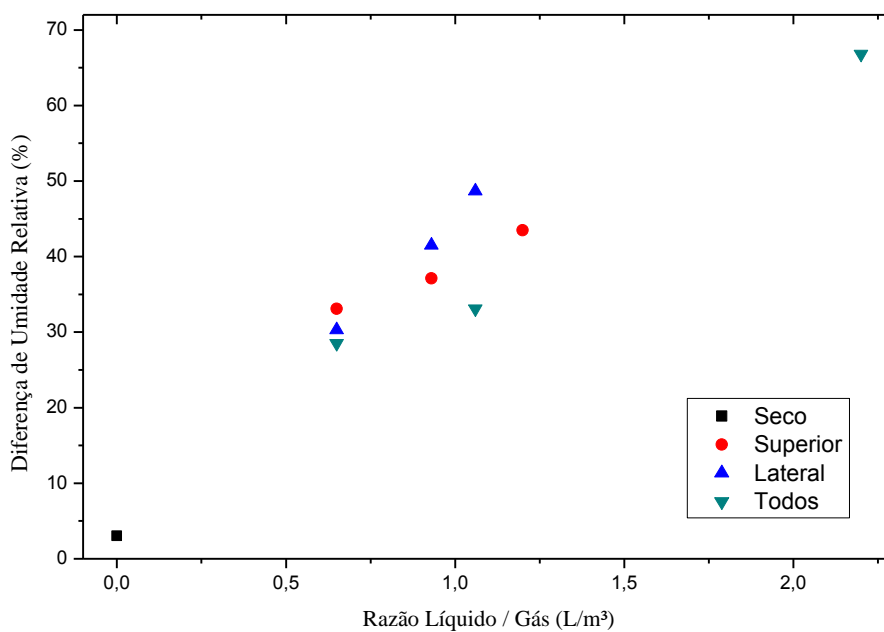
diferença de umidade mais elevada registrada foi de 66,8% correspondendo à razão L/G de 2,2 L/m³ com todos os bicos injetores abertos.

Figura 4.9 – Temperatura na saída de topo do ciclone



Fonte: Acervo pessoal (2014)

Figura 4.10 – Diferença da umidade relativa do gás



Fonte: Acervo pessoal (2014)

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1. CONCLUSÕES

O aumento na razão L/G resultou na tendência no aumento da eficiência global de coleta para as configurações superior e lateral. O valor da eficiência foi próximo para essas duas configurações. A razão $L/G = 2,2 \text{ L/m}^3$ referente à configuração com todos os bicos abertos apresentou a eficiência mais alta, sendo de 85,3%. Esse valor equivale à melhoria de 8,6% em relação ao ciclone operando a seco. A eficiência de coleta foi superior a 90% para as partículas com o diâmetro superior a $4,5 \mu\text{m}$ e 100% para as partículas com o diâmetro superior a $65 \mu\text{m}$.

O aumento na vazão de água total no sistema não indica o aumento na eficiência de coleta, pois a água que é injetada no sistema é distribuída para os bicos que estão em aberto. Conforme a vazão no bico pode ocorrer à formação inadequada do jato, prejudicando a formação das gotas e, conseqüentemente, tornando ineficaz a coleta do particulado.

O aumento na razão L/G resultou na redução na temperatura de saída de topo do ciclone. A maior redução na temperatura foi de 60 para $29,6^\circ\text{C}$, correspondendo à configuração de todos os bicos abertos e razão $L/G = 2,2 \text{ L/m}^3$.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- (i) Estudar detalhadamente a queda de pressão no ciclone úmido;
- (ii) Verificar o comportamento fluidodinâmico das gotículas de líquido formadas no interior do equipamento;
- (iii) Avaliar a eficiência fracionária do ciclone úmido para diversas configurações de bicos e vazões de líquido;
- (iv) Examinar a influência da velocidade do gás e concentração de material particulado na entrada do ciclone sobre a eficiência de coleta do ciclone úmido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALDEN, J. L.; KANE, J. M. **Desing of industrial exhaust systems**. 4^a ed, New York, Industrial Press, 1959, 238 f.

BARTH, W. **Grundlegende untersuchungen über.die reinigungsleistung von wassertropfen**. Staub, v. 19, n.5, p. 175-180, 1959.

CASAL, J.; MARTÍNEZ-BENET, J. M. A Better way to calculate cyclone pressure drop. **Chemical Engineering**, p. 99-100, 1983.

COSTA, M.A.M. **Eficiência de coleta de partículas em lavadores Venturi**. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2002.

ELIAS, R. B. **Estudo experimental de um resfriador evaporativo ciclônico**. 2012. 190 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

FASSANI, F.L., **Subsídios ao estudo do efeito da concentração de sólidos na perda de pressão e no rendimento de coleta**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade de Campinas, Campinas, 1997.

GOMIDE, R. **Operações unitárias**. Câmara Brasileira do Livro, v. 3, São Paulo, 1980.

GONÇALVES, J. A. S. **Aspectos da modelagem matemática de lavadores Venturi**. 2000. 383 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2000.

GUERRA, V. G. **Investigação do efeito de injeção de líquido por orifícios múltiplos na formação de gotas em um lavador Venturi**. 2009. 154 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

HEUMANN, W. L. **Industrial air pollution control systems**, McGraw-Hill, New York, 1997.

HOFFMANN, A.C., AREND, H., SIE, H. An experimental investigation elucidating the nature of the effect of solids loading on cyclone performance. **Filtration and Separation**, 1991, p. 188-193.

HOFFMANN, A.C., SANTEN, A., ALLEN, R.W.K., CLIFT, R. Effects of geometry and solid loading on the performance of gas cyclones. **Powder Technology**, v. 70, 1992, p. 83-91.

KEN-ICHI SUMIDA, M.; SATAKE, T.; MAEZAWA; A.; TAKESHITA, T.; UCHIDA, S. Experimental and modelind study on CO₂ absorption in a cyclone scrubber by phenomenological model and neural networks. **Korean J. Chem. Eng.**, 2004, p. 589-594.

KOCH, W. H.; LICHT, W. New design approach boosts cyclone efficiency. **Chemical Engineering**, 1977, p. 80-88.

KRAMES, J.; BÜTTNER, H. The cyclone scrubber: a high efficiency wet separator. **Chemical Engineer e Technology**, v.17, 1994, p. 73-80.

KRAMES, J.; BÜTTNER, H.; EBERT, F. Particle separation in a wet operated cyclone. **Journal of Aerosol Science**, 1993, p. 591-592.

LAPPLE, C. E. Processes use many collector types. **Chemical Engineering**, 1951, p. 144-151.

LEE, B. K.; JUNG, K. R.; PARK, S. H. Development and application of a novel swirl cyclone scrubber - (1) experimental. **Journal of Aerosol Science**, 2008. p. 1079-1088.

LEITH, D.; LICHT, W. The collection efficiency of cyclone type particle collectors — a new theoretical approach. **AIChE Symposium Series**, v. 68, n. 126, 1972.

LIDEN, G.; GUDMUNDSSON, A. Semi-empirical modelling to generalise the dependence of cyclone collection efficiency on operating conditions and cyclone design. **Journal of Aerosol Science**, 1997, p. 853-874.

LIM, K. S.; KWON, S. B.; LEE, K. W. Characteristics of the collection efficiency for a double inlet cyclone with clean air. **Journal of Aerosol Science**, 2003.

LISBOA, H. M.; SCHIRMER W. N. **Controle da poluição atmosférica**. 1 ed – Ed Montreal, 2007, Cap. 7, 93 f.

LORA, E. E. S. **Prevenção e controle da poluição nos setores energéticos, industrial e de transporte**. 2^a ed, Rio de Janeiro, Ed. Interciência, 2002, 481 f.

MAJEWSKI, R. **Projeto, construção e avaliação experimental de um lavador de gases industrial**. 2006. 126 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

MASSARANI, G. **Fluidodinâmica em sistemas particulados**. 2^a ed, Rio de Janeiro, Ed. UFRJ, 2001, 152 f.

MOTHES, H., LÖFFLER, F. Motion and deposition in cyclones, **German Chemical Engineering**, v. 8, 1985, p. 223-233.

MUSCHELKNAUTZ, E. **Auslegung von zyklonabscheidern in der technischen praxis**. Staub, v.30, n. 5, 1970, p. 187-234.

RODRIGUES, M. V. **Análise do desempenho de um ciclone com mangas: efeito da permeabilidade do meio filtrante**. 2001. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2001.

SCARPA, J. D. A. S. **Influência de características geométricas no desempenho de um ciclone**. 2000. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2000.

SCHEID, C. M., 1992, **Estudo da influência da concentração de sólidos e de sangrias no desempenho de ciclones a gás**, Dissertação (Mestrado em Engenharia) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

STAIRMAND, C. J. The design and performance of the cyclone separators. **Trans. Inst. Chem. Engrs.**, 1951, p. 356-372.

YANG, K.; YOSHIDA, H. Effect os mist injection position on particle separation performance of cyclone scrubber. **Separation and Purification Technology**, 2004, p. 221-230.

APÊNDICE A – Dados da distribuição granulométrica.

Tamanho da partícula (µm)	Amostras															
	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3	4.1	4.2	4.3	5.1	5.2	5.3	Média
0,05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,06	0	0	0	0,04	0,04	0,04	0,02	0,04	0,04	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02
0,07	0,01	0	0	0,14	0,14	0,14	0,07	0,13	0,13	0,07	0,07	0,07	0,04	0,07	0,07	0,08
0,08	0,02	0,01	0,01	0,31	0,31	0,31	0,17	0,3	0,3	0,17	0,17	0,17	0,1	0,16	0,16	0,18
0,09	0,04	0,03	0,03	0,58	0,58	0,59	0,35	0,58	0,57	0,34	0,33	0,33	0,2	0,32	0,33	0,35
0,11	0,1	0,07	0,07	1,01	1,01	1,03	0,64	1	0,99	0,62	0,61	0,61	0,39	0,6	0,6	0,62
0,13	0,23	0,17	0,17	1,64	1,64	1,66	1,1	1,63	1,61	1,07	1,05	1,06	0,71	1,03	1,03	1,05
0,15	0,48	0,38	0,37	2,51	2,51	2,55	1,79	2,51	2,48	1,74	1,72	1,73	1,23	1,68	1,68	1,69
0,17	0,96	0,79	0,79	3,67	3,68	3,73	2,77	3,67	3,62	2,69	2,66	2,67	2,01	2,59	2,6	2,59
0,2	1,78	1,53	1,51	5,13	5,14	5,2	4,07	5,13	5,06	3,96	3,92	3,94	3,11	3,81	3,83	3,81
0,23	3,03	2,71	2,68	6,86	6,88	6,97	5,7	6,86	6,78	5,54	5,49	5,52	4,54	5,35	5,37	5,35
0,27	4,78	4,41	4,36	8,82	8,84	8,95	7,6	8,82	8,71	7,4	7,34	7,37	6,3	7,15	7,18	7,20
0,31	6,9	6,51	6,44	10,88	10,92	11,05	9,65	10,89	10,75	9,41	9,35	9,39	8,25	9,11	9,15	9,24
0,36	9,13	8,76	8,67	12,9	12,95	13,1	11,69	12,92	12,75	11,42	11,35	11,4	10,23	11,08	11,13	11,30
0,42	11,27	10,92	10,82	14,77	14,84	15	13,61	14,81	14,63	13,31	13,24	13,29	12,11	12,94	13	13,24
0,49	13,25	12,94	12,84	16,48	16,57	16,74	15,37	16,55	16,35	15,04	14,98	15,04	13,87	14,68	14,75	15,03

Tamanho da partícula (µm)	Amostras															
	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3	4.1	4.2	4.3	5.1	5.2	5.3	Média
0,58	15,07	14,8	14,7	18,04	18,14	18,32	16,97	18,13	17,93	16,63	16,58	16,64	15,5	16,29	16,36	16,67
0,67	16,68	16,45	16,36	19,45	19,58	19,77	18,43	19,58	19,37	18,09	18,05	18,11	17,01	17,77	17,86	18,17
0,78	18,19	18	17,93	20,83	20,98	21,17	19,86	21	20,79	19,51	19,49	19,55	18,47	19,22	19,32	19,62
0,91	19,83	19,65	19,61	22,38	22,55	22,75	21,45	22,58	22,36	21,08	21,08	21,15	20,09	20,83	20,93	21,22
1,06	21,61	21,46	21,43	24,13	24,32	24,53	23,24	24,36	24,13	22,84	22,85	22,93	21,88	22,61	22,72	23,00
1,24	23,63	23,5	23,48	26,1	26,32	26,54	25,27	26,37	26,12	24,83	24,84	24,94	23,9	24,6	24,71	25,01
1,44	25,93	25,82	25,81	28,32	28,57	28,8	27,56	28,63	28,36	27,07	27,08	27,19	26,16	26,83	26,94	27,27
1,68	28,47	28,38	28,36	30,76	31,03	31,28	30,1	31,12	30,82	29,53	29,53	29,64	28,64	29,26	29,37	29,75
1,95	31,16	31,08	31,06	33,38	33,68	33,93	32,82	33,81	33,46	32,16	32,16	32,28	31,29	31,87	31,97	32,41
2,28	34,01	33,94	33,92	36,16	36,48	36,74	35,7	36,67	36,27	34,96	34,94	35,07	34,08	34,63	34,73	35,22
2,65	36,96	36,91	36,88	39,05	39,4	39,66	38,72	39,66	39,21	37,87	37,87	38	37	37,51	37,61	38,15
3,09	40,01	39,96	39,94	42,04	42,42	42,7	41,85	42,77	42,29	40,91	40,92	41,07	40,01	40,51	40,62	41,20
3,6	43,16	43,13	43,12	45,13	45,56	45,84	45,09	46	45,5	44,07	44,1	44,29	43,15	43,63	43,76	44,37
4,19	46,44	46,43	46,44	48,33	48,81	49,1	48,43	49,34	48,84	47,36	47,42	47,65	46,41	46,89	47,03	47,66
4,88	49,81	49,83	49,87	51,61	52,16	52,46	51,87	52,77	52,28	50,76	50,86	51,13	49,78	50,27	50,42	51,06
5,69	53,27	53,31	53,39	54,96	55,57	55,89	55,36	56,26	55,79	54,23	54,39	54,7	53,24	53,73	53,89	54,53
6,63	56,75	56,82	56,93	58,34	59,01	59,36	58,88	59,77	59,33	57,75	57,94	58,29	56,75	57,23	57,41	58,04
7,72	60,24	60,33	60,47	61,74	62,46	62,84	62,38	63,26	62,85	61,27	61,49	61,87	60,28	60,75	60,94	61,54

APÊNDICE B – Dados de calibração do rotâmetro.

$Q_{a,rot}$ (L/h)	V (mL)	t (s)	Q_a (L/h)
140	1625	25,43	230,0
140	1750	27,67	227,7
140	1718	27,03	228,8
220	1615	18,31	317,5
220	1672	19,22	313,2
220	1612	18,44	314,7
300	1770	16,78	379,7
300	1647	15,31	387,3
300	1700	15,79	387,6
380	1652	13,44	442,5
380	1800	13,82	468,9
380	1767	13,44	473,3
460	1660	10,93	546,8
460	1870	12,28	548,2
460	1802	11,87	546,5
540	1607	9,28	623,4
540	1738	10,03	623,8
540	1762	10,03	632,4
620	1775	9,03	707,6
620	1782	9,1	705,0
620	1838	9,44	700,9
700	1908	8,87	774,4
700	1828	8,34	789,1
700	1840	8,44	784,8

APÊNDICE C – Testes preliminares.

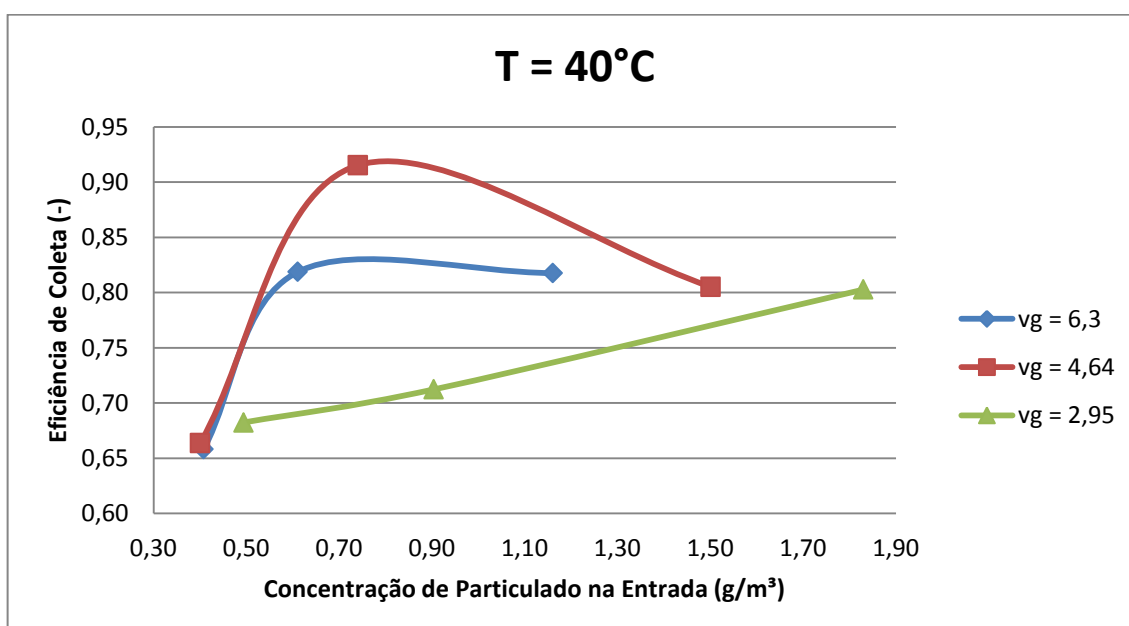
Os testes preliminares compõem uma etapa de aptidão ao equipamento e a metodologia. Os resultados obtidos serão apresentados neste.

C.1. Aparato experimental com outro soprador e d_m

Os primeiros testes foram feitos utilizando um soprador de vazão igual a $2 \text{ m}^3/\text{min}$ e outro tamanho mediano de partículas. Essa vazão fez com que a velocidade do gás ficasse abaixo da faixa de 10 a 30 m/s que é recomendável por Massarani (2001). O motivo do uso desse soprador foi a disponibilidade experimental, pois no momento, o soprador mais potente disponível estava sendo utilizado em outro equipamento. O diâmetro mediano volumétrico da rocha fosfática utilizada era de $28,3 \text{ }\mu\text{m}$.

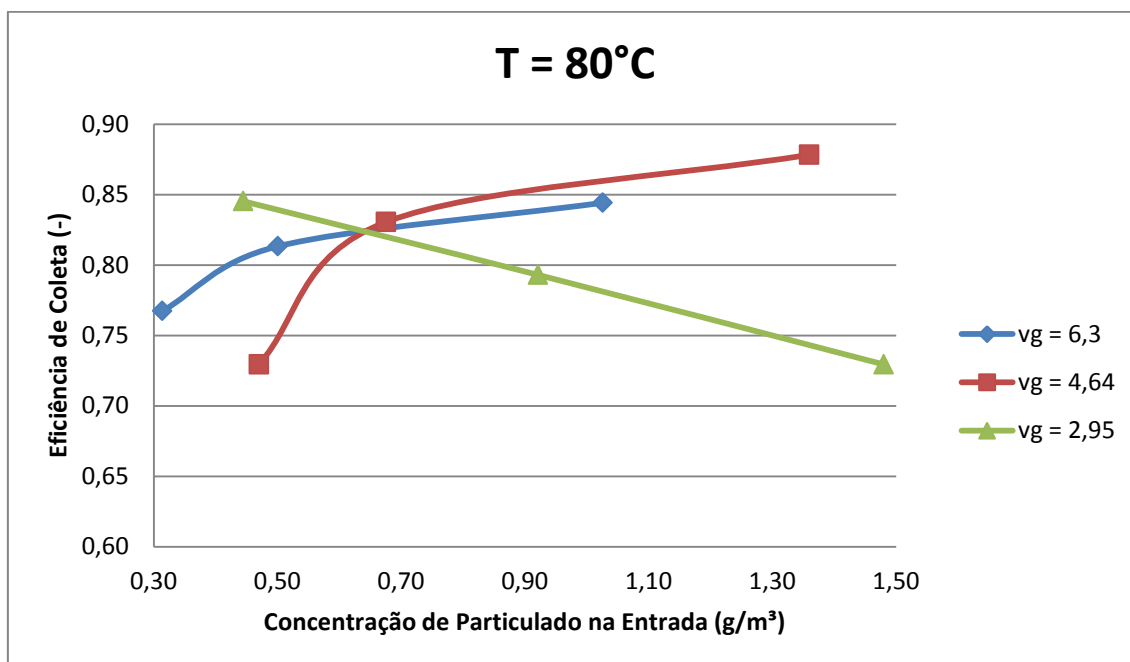
Nessa primeira etapa experimental foi avaliada a eficiência de coleta através da variação da velocidade do gás e concentração de particulado na entrada do ciclone para as temperaturas de 40 e 80°C com o equipamento operando a seco. Os resultados são mostrados na Figura C. 1 e Figura C. 2 respectivamente. Todos os pontos são a representação do valor médio das triplicatas.

Figura C. 1 – Eficiência de coleta em função da concentração na entrada a 40°C



Fonte: Acervo pessoal (2014)

Figura C. 2 – Eficiência de coleta em função da concentração na entrada a 80°C



Fonte: Acervo pessoal (2014)

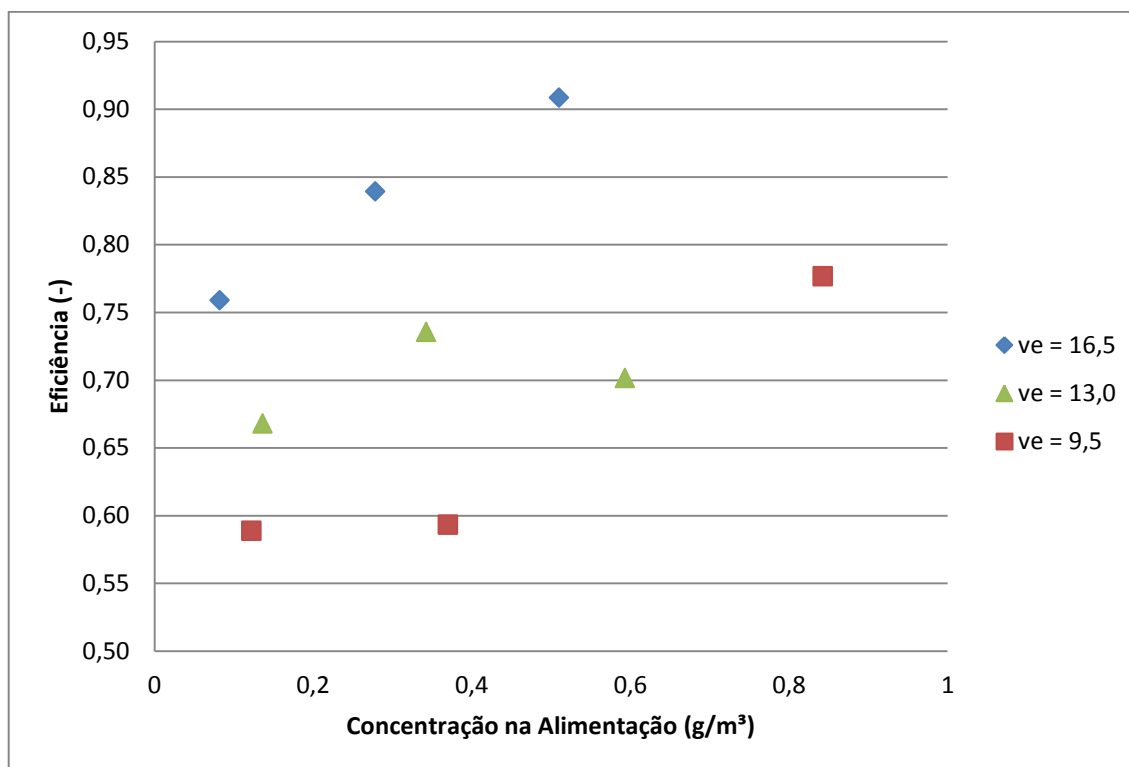
Os resultados não mostraram uma tendência. Poderia concluir que a operação do equipamento na velocidade abaixo da recomendável foi a causa desse resultado, entretanto, foi encontrado um vazamento no sistema de amostragem que será abordado no tópico seguinte. Esse vazamento certamente influenciou nos resultados, tornando-o inconclusivo.

C.2. Aparato experimental completo

O teste experimental deste tópico difere do tópico acima pelo fato que o soprador foi trocado por um mais potente de vazão igual a 8,2 m³/min, a temperatura de trabalho foi fixada em 60°C e o diâmetro mediano das partículas utilizadas foi de 4,66 µm. Essas condições são as mesmas descritas no item de materiais e métodos e que foram utilizadas para a conclusão da etapa experimental.

Nessa rodada de experimentos foi verificada a influência da concentração de particulado e velocidade na entrada do ciclone a seco. O resultado é mostrado na Figura C. 3. Todos os pontos são a representação do valor médio das triplicatas.

Figura C. 3 – Eficiência de coleta em função da concentração na entrada



Fonte: Acervo pessoal (2014)

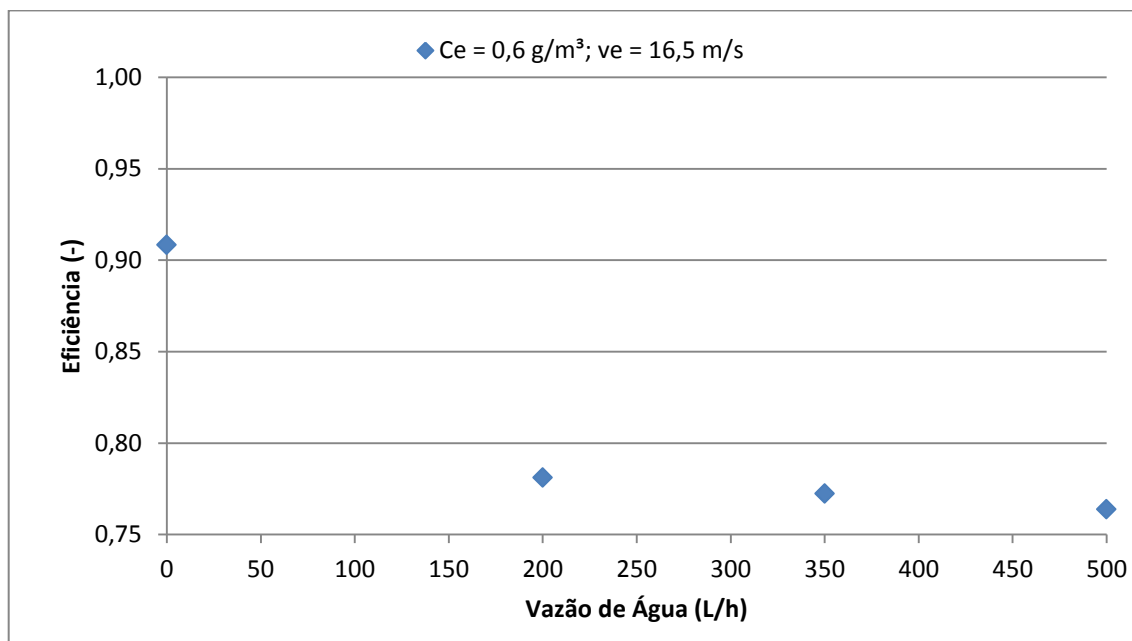
Com base nesses resultados, foi utilizada a melhor e a pior condição para serem avaliadas no ciclone operando com água. Esses pontos correspondem, respectivamente, a combinação da concentração e velocidade mais alta e da concentração e velocidade mais baixa respectivamente. Para cada ponto, foi utilizado 3 vazões de água diferentes e todos os bicos estavam abertos. Os resultados são mostrados na Figura C. 4 e Figura C. 5. Todos os pontos são a representação do valor médio das triplicatas.

Durante a finalização dessa rodada experimental foi verificado uma pequena fenda no tudo da sonda de amostragem isocinética. Dessa forma, o sistema de amostragem estava com vazamento. Assim, todos os testes experimentais que foram realizados até o descobrimento do vazamento foram apresentados neste tópico de testes preliminares e são totalmente desprezíveis, pois não se sabe o quanto essa fenda afetou nos resultados.

O vazamento foi descoberto quando a entrada da sonda de amostragem foi vedada completamente e o rotâmetro estava marcando um valor acima de 0. A fenda na sonda foi vedada com fita adesiva e esse teste repetido. Após a vedação, o rotâmetro ficou na marca 0, mostrando que nenhum ar estava fluindo pela sonda quando a bomba de sucção estava ligada

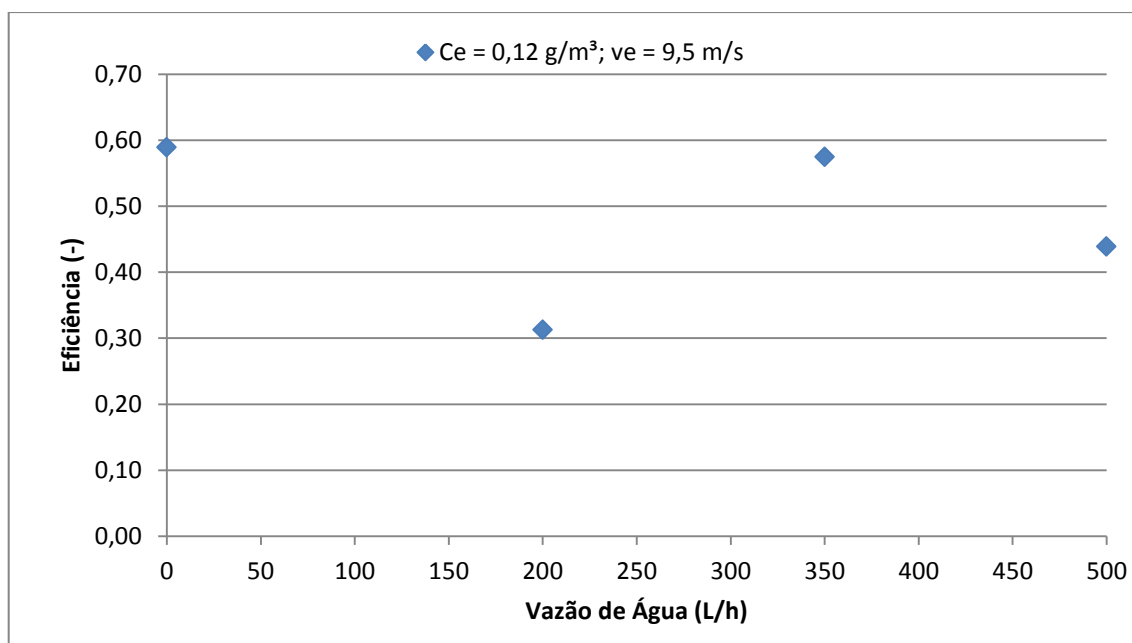
com a entrada da sonda vedada. Isso comprova que não havia mais vazamentos no sistema de amostragem. Esse procedimento foi adotado no momento que antecede cada dia de coleta.

Figura C. 4 – Eficiência de coleta em função da vazão de água



Fonte: Acervo pessoal (2014)

Figura C. 5 – Eficiência de coleta em função da vazão de água



Fonte: Acervo pessoal (2014)

APÊNDICE D – Dados para a obtenção da eficiência de coleta

Configuração	L/G (L/m ³)	Corrida	m _{ta,e} (g)	m _{ta,s} (g)	m _{td,e} (g)	m _{td,s} (g)	m _{ce} (g)	m _{cs} (g)	Q _{bs,e} (L/min)	Q _{bs,s} (L/min)	C _e (g/m ³)	C _s (g/m ³)	η (-)	η (-)	Desvio
Seco	0	a	4,3836	4,3179	4,4802	4,3233	0,0966	0,0054	33,09	7,96	0,58	0,14	0,77		
		b	4,3270	4,3840	4,4253	4,3900	0,0983	0,0060	33,30	7,91	0,59	0,15	0,75	0,767	0,021
		c	4,3245	4,3336	4,4307	4,3390	0,1062	0,0053	33,23	7,87	0,64	0,14	0,79		
Superior	0,65	a	4,3167	4,2737	4,4101	4,2782	0,0934	0,0044	33,39	7,87	0,56	0,11	0,80		
		b	4,3263	4,3998	4,4154	4,4039	0,0891	0,0041	33,29	7,81	0,54	0,10	0,80	0,806	0,010
		c	4,4036	4,3947	4,4992	4,3989	0,0957	0,0042	33,16	7,97	0,58	0,11	0,82		
	0,93	a	4,2665	4,2653	4,3638	4,2697	0,0973	0,0044	33,17	7,73	0,59	0,11	0,80		
		b	4,3874	4,3181	4,4803	4,3226	0,0929	0,0045	33,14	7,69	0,56	0,12	0,79	0,808	0,018
		c	4,4012	4,4016	4,5108	4,4060	0,1097	0,0044	33,19	7,75	0,66	0,11	0,83		
1,2	a	4,2738	4,4024	4,3752	4,4067	0,1013	0,0043	33,19	7,70	0,61	0,11	0,82			
	b	4,3219	4,3896	4,4188	4,3929	0,0969	0,0033	33,35	7,59	0,58	0,09	0,85	0,824	0,023	
	c	4,3423	4,3186	4,4479	4,3234	0,1056	0,0048	33,28	7,74	0,63	0,12	0,81			
Lateral	0,65	a	4,3801	4,3128	4,4773	4,3164	0,0972	0,0037	33,25	7,61	0,58	0,10	0,84		
		b	4,3870	4,3146	4,4792	4,3183	0,0922	0,0036	33,32	7,79	0,55	0,09	0,83	0,814	0,034
		c	4,3902	4,3884	4,4823	4,3931	0,0921	0,0047	33,31	7,57	0,55	0,12	0,78		
	0,93	a	4,3108	4,3036	4,4044	4,3075	0,0936	0,0039	33,18	7,87	0,56	0,10	0,83		
		b	4,3113	4,3281	4,4054	4,3320	0,0941	0,0039	33,12	7,91	0,57	0,10	0,83	0,834	0,013

Configuração	L/G (L/m ³)	Corrida	m _{ta,e} (g)	m _{ta,s} (g)	m _{td,e} (g)	m _{td,s} (g)	m _{ce} (g)	m _{cs} (g)	Q _{bs,e} (L/min)	Q _{bs,s} (L/min)	C _e (g/m ³)	C _s (g/m ³)	η (-)	η (-)	Desvio
		c	4,3877	4,3093	4,4840	4,3126	0,0963	0,0033	33,29	7,59	0,58	0,09	0,85		
		a	4,3220	4,3071	4,4267	4,3104	0,1047	0,0033	33,16	7,75	0,63	0,09	0,86		
	1,06	b	4,3905	4,3938	4,4964	4,3985	0,1059	0,0048	33,31	7,41	0,64	0,13	0,80	0,826	0,034
		c	4,2378	4,2313	4,3402	4,2358	0,1023	0,0045	33,15	7,93	0,62	0,11	0,82		
		a	4,3079	4,3907	4,4095	4,3945	0,1016	0,0038	33,22	7,75	0,61	0,10	0,84		
	0,65	b	4,3289	4,3861	4,4235	4,3915	0,0945	0,0054	33,15	7,41	0,57	0,15	0,74	0,778	0,053
		c	4,3262	4,3203	4,4247	4,3262	0,0984	0,0059	33,19	7,93	0,59	0,15	0,75		
		a	4,3943	4,3971	4,4939	4,4019	0,0995	0,0048	33,24	7,71	0,60	0,13	0,79		
Todos	1,06	b	4,3105	4,2632	4,4016	4,2685	0,0911	0,0053	33,19	7,55	0,55	0,14	0,75	0,767	0,023
		c	4,3925	4,3197	4,4925	4,3250	0,1000	0,0053	33,27	7,48	0,60	0,14	0,77		
		a	4,4116	4,4013	4,5169	4,4048	0,1052	0,0035	33,36	7,34	0,63	0,09	0,85		
	2,2	b	4,4109	4,4037	4,5113	4,4074	0,1004	0,0037	33,13	7,65	0,61	0,10	0,84	0,853	0,013
		c	4,4111	4,4127	4,5092	4,4158	0,0980	0,0031	33,24	7,75	0,59	0,08	0,87		

APÊNDICE E – Dados para a obtenção da eficiência de coleta fracionária

Configuração	L/G (L/m ³)	Corrida	mta,e	mta,s	mtd,e	mtd,s	mce	mcs	Qbs,e	Qbs,s	Ce	Cs	η (-)	η (-)	Desvio
			(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(L/min)	(L/min)	(g/m ³)	(g/m ³)			
Todos	2,2	a	4,3916	4,3998	4,4929	4,4076	0,1013	0,0077	33,26	7,46	0,61	0,07	0,89		
		b	4,3149	4,3261	4,4186	4,3355	0,1036	0,0094	33,36	7,48	0,62	0,08	0,87		
		c	4,3915	4,3906	4,4985	4,4006	0,1070	0,0100	33,28	7,60	0,64	0,09	0,86		
		d	4,3118	4,3103	4,4156	4,3201	0,1038	0,0099	33,32	7,57	0,62	0,09	0,86		
		e	4,3069	4,3807	4,4057	4,3894	0,0988	0,0087	33,18	7,51	0,60	0,08	0,87	0,870	0,012
		f	4,3923	4,3883	4,4940	4,3966	0,1017	0,0082	33,27	7,60	0,61	0,07	0,88		
		g	4,4109	4,4112	4,5224	4,4203	0,1115	0,0091	33,09	7,34	0,67	0,08	0,88		
		h	4,4067	4,4119	4,5035	4,4217	0,0968	0,0099	33,19	7,48	0,58	0,09	0,85		
		i	4,4018	4,4116	4,5092	4,4203	0,1074	0,0088	33,11	7,39	0,65	0,08	0,88		

Tamanho da partícula (μm)	e ₁	e ₂	e ₃	s ₁	s ₂	s ₃	f _e	f _s	f _e (d _p)	f _s (d _p)	η(d _p)
0,05	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	-
0,06	0	0	0,01	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	-
0,07	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,870
0,08	0,04	0,04	0,06	0,03	0,03	0,03	0,05	0,03	0,03	0,02	0,922
0,09	0,08	0,08	0,13	0,08	0,08	0,08	0,10	0,08	0,05	0,05	0,870

Tamanho da partícula (μm)	e_1	e_2	e_3	s_1	s_2	s_3	f_e	f_s	$f_e(d_p)$	$f_s(d_p)$	$\eta(d_p)$
0,11	0,18	0,18	0,28	0,2	0,2	0,2	0,21	0,20	0,12	0,12	0,867
0,13	0,39	0,39	0,55	0,48	0,48	0,48	0,44	0,48	0,23	0,28	0,842
0,15	0,76	0,76	1,02	1,09	1,09	1,09	0,85	1,09	0,40	0,61	0,804
0,17	1,41	1,41	1,79	2,26	2,27	2,27	1,54	2,27	0,69	1,18	0,779
0,2	2,44	2,45	2,94	4,3	4,32	4,32	2,61	4,31	1,07	2,05	0,753
0,23	3,94	3,96	4,55	7,48	7,52	7,54	4,15	7,51	1,54	3,20	0,731
0,27	5,94	5,96	6,61	11,97	12,02	12,06	6,17	12,02	2,02	4,50	0,711
0,31	8,3	8,34	9	17,5	17,57	17,65	8,55	17,57	2,38	5,56	0,697
0,36	10,78	10,83	11,47	23,48	23,57	23,69	11,03	23,58	2,48	6,01	0,686
0,42	13,16	13,23	13,83	29,36	29,48	29,62	13,41	29,49	2,38	5,91	0,678
0,49	15,4	15,48	16,04	34,98	35,11	35,28	15,64	35,12	2,23	5,64	0,673
0,58	17,47	17,57	18,09	40,22	40,36	40,55	17,71	40,38	2,07	5,25	0,671
0,67	19,33	19,44	19,92	44,87	45,02	45,23	19,56	45,04	1,85	4,66	0,674
0,78	21,07	21,19	21,65	49,09	49,24	49,46	21,30	49,26	1,74	4,22	0,685
0,91	22,84	22,98	23,41	53,1	53,26	53,48	23,08	53,28	1,77	4,02	0,706
1,06	24,68	24,84	25,25	56,99	57,14	57,37	24,92	57,17	1,85	3,89	0,727
1,24	26,64	26,82	27,2	60,84	60,99	61,22	26,89	61,02	1,96	3,85	0,746
1,44	28,73	28,93	29,29	64,72	64,87	65,1	28,98	64,90	2,10	3,88	0,760
1,68	30,92	31,14	31,47	68,57	68,72	68,96	31,18	68,75	2,19	3,85	0,772

Tamanho da partícula (μm)	e_1	e_2	e_3	s_1	s_2	s_3	f_e	f_s	$f_e(d_p)$	$f_s(d_p)$	$\eta(d_p)$
1,95	33,16	33,4	33,71	72,17	72,32	72,56	33,42	72,35	2,25	3,60	0,792
2,28	35,49	35,75	36,03	75,49	75,64	75,9	35,76	75,68	2,33	3,33	0,815
2,65	37,9	38,17	38,43	78,49	78,64	78,9	38,17	78,68	2,41	3,00	0,839
3,09	40,41	40,71	40,94	81,19	81,33	81,6	40,69	81,37	2,52	2,70	0,861
3,6	43,07	43,39	43,6	83,66	83,81	84,06	43,35	83,84	2,67	2,47	0,880
4,19	45,92	46,27	46,45	85,99	86,13	86,37	46,21	86,16	2,86	2,32	0,895
4,88	48,99	49,37	49,51	88,19	88,33	88,56	49,29	88,36	3,08	2,20	0,907
5,69	52,27	52,69	52,79	90,26	90,39	90,61	52,58	90,42	3,29	2,06	0,919
6,63	55,73	56,18	56,25	92,14	92,27	92,48	56,05	92,30	3,47	1,88	0,930
7,72	59,34	59,84	59,86	93,79	93,92	94,14	59,68	93,95	3,63	1,65	0,941
9	63,09	63,62	63,61	95,19	95,31	95,54	63,44	95,35	3,76	1,40	0,952
10,48	66,96	67,51	67,47	96,32	96,44	96,7	67,31	96,49	3,87	1,14	0,962
12,21	70,92	71,48	71,42	97,2	97,32	97,61	71,27	97,38	3,96	0,89	0,971
14,22	74,98	75,54	75,45	97,86	97,99	98,29	75,32	98,05	4,05	0,67	0,979
16,57	79,12	79,66	79,53	98,34	98,47	98,77	79,44	98,53	4,11	0,48	0,985
19,31	83,25	83,77	83,59	98,68	98,83	99,09	83,54	98,87	4,10	0,34	0,989
22,49	87,25	87,73	87,5	98,95	99,1	99,31	87,49	99,12	3,96	0,25	0,992
26,2	90,94	91,36	91,09	99,17	99,33	99,47	91,13	99,32	3,64	0,20	0,993
30,53	94,12	94,47	94,18	99,38	99,53	99,6	94,26	99,50	3,13	0,18	0,993

Tamanho da partícula (μm)	e_1	e_2	e_3	s_1	s_2	s_3	f_e	f_s	$f_e(d_p)$	$f_s(d_p)$	$\eta(d_p)$
35,56	96,63	96,9	96,61	99,57	99,7	99,72	96,71	99,66	2,46	0,16	0,992
41,43	98,41	98,58	98,39	99,72	99,84	99,82	98,46	99,79	1,75	0,13	0,990
48,27	99,49	99,56	99,52	99,85	99,94	99,9	99,52	99,90	1,06	0,10	0,987
56,23	100	100	100	99,94	99,99	99,96	100	99,96	0,48	0,07	0,982
65,51	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0,04	1
76,32	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0	1
88,91	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0	1
103,58	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0	1
120,67	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0	1
140,58	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0	1
163,77	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0	1
190,8	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0	1
222,28	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0	1
258,95	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0	1
301,68	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0	1
351,46	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0	1
409,45	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0	1
477,01	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0	1
555,71	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0	1

APÊNDICE F – Dados para a obtenção da eficiência teórica

Tabela F.1 – Dados fixos para a obtenção da eficiência teórica

Parâmetro	Valor	Unidade
ρ_p	3125	Kg/m ³
μ_g	0,0000174	Pa.s
Q_g	0,099	m ³ /s
T_g	60	°C
A	0,12	m
B	0,05	m
D	0,23	m
H	0,35	m
H	0,93	m
B	0,09	m
D_e	0,12	m
K_a	0,5217	(-)
K_b	0,2174	(-)
K_c	0,0242	m ³
G	15,0697	m ³
n	4,7515	(-)

Tabela F.1 – Dados variáveis para a obtenção da eficiência teórica

d_{pi}	τ_i	η
0,05	0,00000	0,00146
0,06	0,00000	0,00175
0,07	0,00000	0,00204
0,08	0,00000	0,00233
0,09	0,00000	0,00262
0,11	0,00000	0,00320
0,13	0,00000	0,00378
0,15	0,00000	0,00437
0,17	0,00000	0,00495
0,2	0,00000	0,00582

d_{pi}	τ_i	η
0,23	0,00000	0,00669
0,27	0,00000	0,00784
0,31	0,00000	0,00900
0,36	0,00000	0,01045
0,42	0,00000	0,01218
0,49	0,00000	0,01419
0,58	0,00000	0,01678
0,67	0,00000	0,01935
0,78	0,00001	0,02250
0,91	0,00001	0,02620
1,06	0,00001	0,03045
1,24	0,00002	0,03552
1,44	0,00002	0,04113
1,68	0,00003	0,04782
1,95	0,00004	0,05529
2,28	0,00005	0,06434
2,65	0,00007	0,07439
3,09	0,00010	0,08619
3,6	0,00013	0,09969
4,19	0,00018	0,11505
4,88	0,00024	0,13268
5,69	0,00032	0,15293
6,63	0,00044	0,17584
7,72	0,00059	0,20164
9	0,00081	0,23089
10,48	0,00110	0,26339
12,21	0,00149	0,29964
14,22	0,00202	0,33952
16,57	0,00274	0,38328
19,31	0,00372	0,43065
22,49	0,00505	0,48109
26,2	0,00685	0,53431

d_{pi}	τ_i	η
30,53	0,00930	0,58957
35,56	0,01262	0,64558
41,43	0,01713	0,70135
48,27	0,02325	0,75537
56,23	0,03155	0,80606
65,51	0,04282	0,85205
76,32	0,05812	0,89207
88,91	0,07887	0,92524
103,58	0,10705	0,95127
120,67	0,14529	0,97040
140,58	0,19719	0,98344
163,77	0,26761	0,99158
190,8	0,36323	0,99617
222,28	0,49298	0,99847
258,95	0,66905	0,99948
301,68	0,90807	0,99985
351,46	1,23248	0,99996
409,45	1,67275	0,99999
477,01	2,27030	1,00000
555,71	3,08123	1,00000