



COORDENADORIA DE ENGENHARIA QUÍMICA

ALEX MEIRA DE CAMARGO

ANDRÉ BRIZOTTI

GUSTAVO SANTORO CREMASCO

VITOR RODRIGUES DE OLIVEIRA

**PROJETO DE UM CICLONE DIDÁTICO PARA IMPLEMENTAÇÃO
NAS AULAS DE LABORATÓRIO DE ENGENHARIA QUÍMICA DA
FACENS**

SOROCABA/SP

2020



ALEX MEIRA DE CAMARGO

ANDRÉ BRIZOTTI

GUSTAVO SANTORO CREMASCO

VITOR RODRIGUES DE OLIVEIRA

**PROJETO DE UM CICLONE DIDÁTICO PARA IMPLEMENTAÇÃO
NAS AULAS DE LABORATÓRIO DE ENGENHARIA QUÍMICA DA
FACENS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Centro Universitário Facens, como
exigência parcial para obtenção do diploma de
graduação em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Me Willian Alberto Amaro
Marchioli

**SOROCABA/SP
2020**

ALEX MEIRA DE CAMARGO

ANDRÉ BRIZOTTI

GUSTAVO SANTORO CREMASCO

VITOR RODRIGUES DE OLIVEIRA

**PROJETO DE UM CICLONE DIDÁTICO PARA IMPLEMENTAÇÃO
NAS AULAS DE LABORATÓRIO DE ENGENHARIA QUÍMICA DA
FACENS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Centro Universitário Facens, como
exigência parcial para obtenção do diploma de
graduação em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Me. Willian Alberto Amaro
Marchioli

Banca examinadora



Prof. Dra. Delba Nisi Cosme Melo

Prof. Me. Lara Cristina Alves da Fonseca



Prof. Me. Willian Alberto Amaro Marchioli

FICHA CATALOGRÁFICA
ELABORADA PELA “BIBLIOTECA FACENS”

P964

Projeto de um ciclone didático para implementação nas aulas de Laboratório de engenharia química da Facens / por Alex Meira ... [et al.]. – Sorocaba, SP: [s.n.], 2020.
58f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Centro
Universitário Facens. – Curso de Engenharia Química, 2020.
Orientador: Prof. M.e Willian Alberto Amaro Marchioli

1. Ciclone. 2. Separação. 3. Partícula. I. Camargo, Alex Meira de. II. Brizotti, André. III. Cremasco, Gustavo Santoro. IV. Oliveira, Vitor Rodrigues de. V. Centro Universitário Facens. VI. Título.

CDD 660

“Cada adversidade, cada fracasso, cada dor de cabeça carrega consigo a semente de um benefício igual ou maior.”

Napoleon Hill

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Conjunto de peneiramento da Facens	15
Figura 2 – Sistema de elutriação com duas colunas	18
Figura 3 – Representação de uma câmara de poeira em dois estágios	19
Figura 4 – Escoamento em um ciclone	20
Figura 5 – Modelo de ciclone com entrada tangencial	21
Figura 6 – Tipos de entrada.....	22
Figura 7 – Eficiência de coleta de partículas em função razão do diâmetro da partícula D_p e o diâmetro de corte da partícula D_{pc} , para o ciclone Lapple...	26
Figura 8 – Configuração e cotas de ciclones	29
Figura 9 – Os nove estilos de aprendizagem do Kolb Learning Style Inventory 4.0.	30
Figura 10 – Configuração das peneiras.	32
Figura 11 – Fluxograma das etapas práticas do projeto	33
Figura 12 – Desenho 3D do ciclone inicialmente de acrílico.	35
Figura 13 – Desenho 3D atualizado do ciclone e sua estrutura de sustentação.....	36
Figura 14 – fotografia do ciclone.....	37
Figura 15 – coletor do <i>underflow</i>	38
Figura 16 – coletor do <i>overflow</i>	38
Figura 17 – Bocal de carregamento do ciclone com o funil.	39
Figura 18 – Mangueira conectora com o funil.	40
Figura 19 – Sistema de entrada devidamente montado.	40
Figura 20 – Areia retida dentro do equipamento no primeiro teste.....	48
Figura 21 – vão inferior no bocal de entrada.....	51
Figura 22 – vão lateral no bocal de entrada	51
Figura 23 – Areia retida dentro do equipamento no quarto teste.	52
Figura 24 – Primeira solução.	54
Figura 25 – segunda solução.....	54
Figura 26 – Terceira solução.	55

RESUMO

A separação de partículas é um processo altamente utilizado nas mais variadas indústrias. Dentre as mais diversificadas opções entre os métodos de separação, o ciclone, é vastamente utilizado e estudado para variações, graças a sua facilidade de construção e alta eficiência. Este trabalho tem como proposta o estudo, desenvolvimento, e uso, de um ciclone da família *Lapple* em escala laboratorial na aula de Laboratório de Engenharia Química no Centro Universitário FACENS, visto que no momento atual o ciclone não é um equipamento utilizado nessa disciplina. Existe a possibilidade de fazer uso do ciclone em conjunto com o módulo de granulometria, possibilitando um estudo do diâmetro das partículas, da vazão, da eficiência nos métodos de separação e da correlação existente entre diferentes fenômenos. Primeiramente, foi realizado os testes de peneiramento, chegando em um valor de 0,166072 mm de diâmetro médio de *Sauter* e 0,194120 mm para o diâmetro médio determinado pela regressão RRB. Foi optado pelo valor da regressão RRB devido maior precisão e seu ajuste mais refinado. A carcaça do ciclone foi produzida em aço inox 304, possuindo algumas adaptações em sua entrada e nas saídas *underflow* e *overflow*, sendo que na entrada foi adicionada uma extensão feita de chapa galvanizada, que possibilita o melhor acoplamento do soprador utilizado e o recebimento do particulado a ser separado, já na saída *underflow* foi adaptado um balde para recebimento do material e vedação do sistema, enquanto que na saída *overflow* foi colocada uma tubulação em formato 'U', também de chapa galvanizada, para facilitar o coletamento das partículas mais leves. O teste do ciclone demonstrou que essas alterações causaram efeitos críticos no processo, de maneira que, somente um de quatro experimentos ocorreu próximo do que era esperado, que seria uma eficiência próxima de 90%. Desse modo algumas adaptações se tornaram necessárias, principalmente na entrada do particulado, para que o módulo possa ser utilizado adequadamente em sala de aula.

Palavras-Chave: módulo didático. Ciclone. Separação. partículas.

ABSTRACT

Particle separation is a highly used process in the most varied industries. Among the most diverse options of the separation methods, the cyclone is widely used and studied for variations, thanks to its ease of construction and high efficiency. This work proposes the study, development, and use of a cyclone of the Lapple family on a laboratory scale in the Chemical Engineering Laboratory class at Centro Universitário FACENS, since at the moment the cyclone is not an equipment used in this discipline. There is the possibility of using the cyclone in conjunction with the granulometry module, enabling a study of the particle diameter, flow rate, efficiency in the separation methods and the existing correlation between different phenomena. First, the screening tests were carried out, reaching a value of 0.166072 mm of average Sauter diameter and 0.194120 mm for the average diameter determined by the RRB regression. The RRB regression value was chosen due to its greater precision and its more refined adjustment. The cyclone housing was produced in 304 stainless steel, with some adaptations at its entrance and *underflow* and *overflow* outlets, and at the entrance an extension made of galvanized sheet was added, which allows the best coupling of the blower used and the receipt of particulate to be separated, at the *underflow* outlet a bucket was adapted to receive the material and seal the system, while at the *overflow* outlet a 'U' shaped pipe, also made of galvanized sheet, was placed to facilitate the collection of lighter particles. The cyclone test showed that these changes had critical effects on the process, so that only one of four experiments occurred close to what was expected, that would be an efficiency close to 90%. Thus, some adaptations became necessary, mainly at the entrance of the particulate, so that the module can be used properly in the classroom.

Key-words: didactic module. Cyclone. Separation. Particles.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	Revisão da literatura	14
2.1	Caracterização de partículas	14
2.1.1	Análise granulométrica	14
2.1.2	Peneiramento	14
2.2	Modelo de distribuição	15
2.3	Modelo de distribuição Gates – Gaudin - Shuman (GGS) ...	15
2.3.1	Modelo de distribuição Rosin – Rammler – Bennet (RRB) .	16
2.4	Diâmetro médio de Sauter	17
2.5	Métodos de separação	18
2.6	Estudo geral do ciclone	19
2.6.1	Eficiência.....	22
2.6.2	Principais variáveis de operação	26
2.6.3	Queda de pressão	27
2.7	Famílias de ciclone.....	28
2.8	Métodos de aprendizagem.....	29
3	MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1	Experimentos para a caracterização do particulado	31
3.1.1	Experimento para o cálculo do diâmetro médio de Sauter .	31
3.1.2	Experimento para o cálculo da densidade aparente	33
3.2	Construção do ciclone.....	34
3.3	Testes realizados com o modulo do ciclone	37
3.3.1	Primeiro teste	37
3.3.2	Segundo teste	39

3.3.3	Terceiro teste	41
3.3.4	Quarto teste.....	42
4	RESULTADO E DISCUSSÃO.....	42
4.1	Cálculo do diâmetro médio.....	42
4.1.1	Cálculo do diâmetro médio pelo modelo de distribuição RRB43	
4.1.2	Cálculo do diâmetro médio de <i>Sauter</i>	45
4.2	Cálculos para o dimensionamento do ciclone	46
4.3	Primeiro teste	48
4.4	Segundo teste.....	49
4.5	Terceiro teste.....	50
4.6	Quarto teste	52
4.7	Melhorias para o modulo didático.....	53
5	CONCLUSÃO	56

1 INTRODUÇÃO

Métodos de separação de particulados sempre acompanharam a vida na terra como a catação. Esses métodos vão de um simples ato de separar a polpa de um suco com uma peneira (peneiramento), coletar mariscos no fundo do mar (catação) e garimpo do ouro (levigação) até a purificação da água por meios de agentes químicos (floculação e decantação).

Com avanço do conhecimento e da tecnologia, esses métodos, de certa forma simples, começaram a ser mais sofisticados com a finalidade de se obter melhores rendimentos e menor intervenção humana a ponto de serem empregados em processos industriais. O ciclone, uma operação unitária que é conhecida como separador centrífugo. Esse tipo de separação evoluiu de um método muito simples conhecido como decantação. Os ciclones utilizam propriedades físicas como a gravidade, força centrífuga, densidade e tamanho de partícula para promover a separação de particulados.

Os ciclones são equipamentos de separação de partículas de diferentes tamanhos e de limpeza de ar de processo utilizado nas indústrias. São equipamentos que vêm sendo utilizados na indústria cada vez com mais frequência devido ao seu baixo custo de manutenção, tamanho reduzido, adaptabilidade para o tamanho da empresa e demanda do processo, fácil operação e versatilidade, além de poderem trabalharem ligados em série ou paralelo, tendo assim, a uma gama maior de vazão e condições de trabalho. Podem separar partículas que variam de 1 a 200 μm com um adequado grau de eficiência e com uma velocidade de arraste das partículas (velocidade do fluido de entrada) de 15 a 25 m.s^{-1} (PERRY, 1997). Os ciclones são constituídos basicamente de uma parte cilíndrica e logo abaixo uma parte cônica que começa com o mesmo diâmetro da região cilíndrica e vai se afunilando. Lateralmente na parte superior há uma entrada para o fluido e as partículas sólidas, a parte superior é a saída das partículas menores denominada *overflow*, e na parte inferior é denominado de *underflow*.

O gás que é utilizado para carregar o particulado que deve ser separado, entra tangencialmente pelo orifício de entrada próximo ao *overflow*. Este orifício de entrada

deve ter uma pequena inclinação para baixo para proporcionar ao fluido que ele escorrega na direção de queda no ciclone.

Com a alta velocidade com que o fluido entra no equipamento, que varia entre 15 e 25 m.s⁻¹ gera uma força centrífuga que atua nas partículas, fazendo com que essas partículas fluam próximas da parede do ciclone, quanto mais pesada a partícula, mais próxima da parede do ciclone a partícula tende a fluir por conta da força centrífuga. Ao se aproximarem do *underflow*, as partículas mais pesadas vão perdendo velocidade devido ao atrito com a parede do ciclone e são depositadas em um recipiente na saída inferior. O gás, por sua vez, inverte sua direção ao se aproximar da região cônica subindo para o overflow formando um vértice ascendente levando consigo partículas mais leves para o overflow (CREMASCO, 2012).

Certamente, profissionais que trabalhem na indústria verão em algum momento um ciclone em meio ao processo. Hoje, os alunos veem na disciplina de operações unitárias toda a teoria envolvida em ciclone, principalmente para as famílias mais conhecidas, como *Lapple* e *Stairmand*, em que é apresentado a eles, cálculos de rendimento, dimensionamento, entre outros. Mas ao chegarem na disciplina de Laboratório de engenharia química do Centro Universitário Facens, onde os alunos colocam em prática toda a teoria estudada em sala de aula, isso não acontece com os ciclones, devido à falta de um módulo didático deste equipamento.

Tendo em vista essa carência surgiu a necessidade da criação de um módulo didático de ciclone para implementação nas aulas de laboratório de engenharia química da grade do Centro Universitário Facens.

Conseguir colocar na prática o que é visto na teoria é uma forma extremamente viável de fixar o conteúdo, pois gera reflexões após o término da prática. Este método de aprendizagem leva o nome de “práxis educacional” assunto estudado por Paulo Freire em “Educação como prática da liberdade” e “Pedagogia do Oprimido” e principalmente por David. A. Kolb em “The Kolb learning style inventory 4.0” (revisão de seus estudos anteriores postado em 2013).

Neste projeto será dimensionado, projetado e construído um ciclone da família *Lapple*. Será feito cálculos para determinar o diâmetro de corte com diferentes granulometrias de partículas, para ter um padrão do tamanho destas partículas;

cálculos para determinar a perda de carga entre a entrada e o *underflow* do ciclone; determinar a vazão ideal de entrada. Será feito uma representação em 3D do ciclone para ser usado como modelo para a sua montagem, utilizando um software de modelagem. Após a determinação a cotas do projeto, será feita a aquisição de materiais para a montagem do ciclone. Será comprado chapas, cilindros de aço, válvulas, um soprador com uma potência adequada e toda a estrutura do módulo.

2 Revisão da literatura

2.1 Caracterização de partículas

A caracterização de partículas é muito importante para determinar as dimensões características deste particulado, principalmente sua densidade, tamanho e formato. Com as partículas caracterizadas é possível determinar a melhor operação unitária que será utilizada para a separação do material analisado.

2.1.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica classifica um conjunto de partículas de acordo com o seu tamanho. Esta análise ocorre pela distribuição granulométrica, que pode ser realizada de diferentes maneiras, o método mais simples e usual de classificação do tamanho das partículas é o peneiramento. Há outros equipamentos que podem ser utilizados, fornecendo uma maior precisão e confiabilidade nos resultados, todavia são equipamentos mais caros e com maior tecnologia empregada.

2.1.2 Peneiramento

O método de peneiramento, método utilizado no Centro Universitário Facens como meio de classificação da granulometria de partículas, consiste em peneiras de diferentes aberturas, denominadas *mesh*, que são a quantidade de aberturas em uma polegada linear, denominada série de Tyler.

As peneiras são ajustadas uma em cima da outra, sendo que, a peneira com menor número de *mesh* se encontra no topo e, assim, o seu tamanho vai aumentando até que a primeira peneira tenha a menor abertura e maior número de *mesh*. Todo o particulado a ser separado é colocado na peneira de menor *mesh*, localizado no topo, e fixado com parafusos, e através de alta vibração acontece o peneiramento, e depois de alguns minutos as partículas de menor tamanho estarão na peneira na base do conjunto. Na Figura 1 é possível ver uma foto do conjunto de agitador e peneiras

disponível no Centro Universitário Facens, utilizado na disciplina laboratório de engenharia química:

Figura 1 – Conjunto de peneiramento da Facens



Fonte: autoria própria.

2.2 Modelo de distribuição

É possível encontrar na literatura alguns modelos estatísticos que ajudam a ajustar modelos de distribuição granulométrica, fornecendo dados mais precisos sem grandes dificuldades. A seguir são apresentados os modelos GGS e RRB, modelos mais utilizados e de metodologia simples:

2.3 Modelo de distribuição Gates – Gaudin - Shuman (GGS)

Esse modelo de ajuste pode ser utilizado na sua forma não linear ou na forma linearizada. A Equação 1 é a forma não linear do modelo:

$$X = \left(\frac{D}{k}\right)^m \quad (1)$$

Sendo:

X = fração passante acumulada;

D = diâmetro médio da partícula;

K e m são parâmetros do modelo.

O modelo GGS após a sua linearização é apresentada de acordo com a Equação 2:

$$\log[x] = m * (\log[D] - \log[k]) = m * \log[D] - m * \log[k] \quad (2)$$

Para m igual a 1 a distribuição é uniforme, mas comumente este parâmetro tende a ser maior que 1, com tendência de crescimento de fração passante.

2.3.1 Modelo de distribuição Rosin – Rammler – Bennet (RRB)

O modelo *RRB* é um parâmetro de ajuste de distribuição granulométrica, e nele há dois parâmetros de ajuste do modelo: D' e n. D' é o diâmetro de partícula em que 63,2% da massa da amostra corresponde a um diâmetro menor que D'. Já o parâmetro n tem relação com a uniformidade do material.

Este modelo também se apresenta na sua forma não linear e linearizada. Na Equação 3 é apresentada a equação do modelo RRB não-linear:

$$x = 1 - e^{-(\frac{D}{D'})^n} \quad (3)$$

Em que X e D são características do material.

Já a Equação 4, apresenta a forma linear do modelo:

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-x}\right)\right) = -n * \ln D' + n * \ln D \quad (4)$$

2.3.1.1 Cálculo de diâmetro médio a partir do modelo de distribuição RRB

Para o cálculo do diâmetro médio através do modelo RRB é utilizada a seguinte equação 5.

$$\bar{D} = \frac{D'}{\gamma(x)} \quad (5)$$

Onde:

$\bar{D}$ = Diâmetro médio (mm)

D' = parâmetro adimensional encontrado através da regressão RRB

$\gamma(x)$ = Função gama

Para determinação da função gama é necessário a correlação com o valor de X na tabela desenvolvida por *Euler* em 1729, como vemos no Anexo 1, sendo tal valor de X descoberto pela equação 6.

$$x = 1 - \frac{1}{n} \quad (6)$$

X = parâmetro adimensional

N = parâmetro adimensional encontrado através da regressão RRB

Caso o valor de X esteja fora dos números compreendidos entre 1 e 2 presentes no anexo 1 e 2 existe a necessidade de um remanejamento matemático.

A função gama possui uma simetria tal que para valores de x que não constam da tabela a seguir, os valores da função podem ser obtidos com a relação $\gamma(x + 1) = x \gamma(x)$ Exemplo: Calcular $\gamma(0,5)$. Note que $x = 0,5$ não existe na tabela. Então, pela relação de simetria temos $\gamma(0,5 + 1) = 0,5 \gamma(0,5)$ e, portanto, $\gamma(0,5) = \gamma(1,5)/0,5$. Observe que $\gamma(1,5)$ existe na referida tabela. Temos então, finalmente: $\gamma(0,5) = 0,88623/0,5 = 1,77246$. (RICADO PEÇANHA, 2014, p. 424)

2.4 Diâmetro médio de Sauter

O diâmetro médio de *Sauter* é um parâmetro que pode ser usado de comparação com os resultados obtidos de outros modelos. Devido ao fato do diâmetro de *Sauter* relacionar o diâmetro médio de cada partícula ele apresenta uma precisão mais realista e confiável. A Equação 7 apresenta esse modelo:

$$\bar{d} = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{d_i}} \quad (7)$$

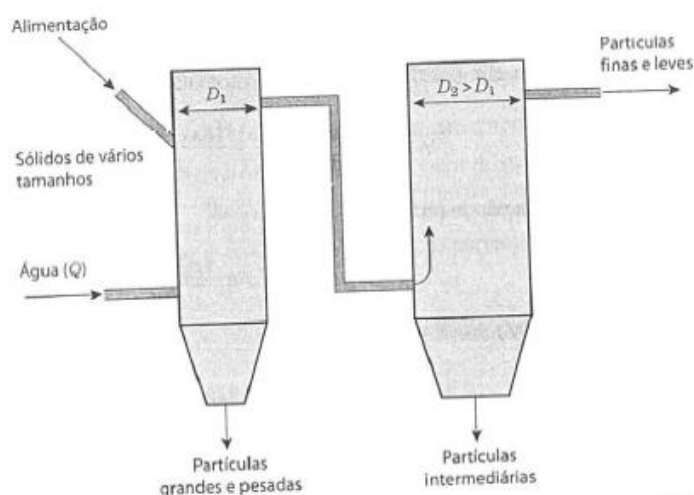
Sendo que x_i é a porcentagem de massa entre dois diâmetros d_i , e d_i é a média aritmética entre os dois d_i correspondente ao x_i .

2.5 Métodos de separação

A separação de particulados é utilizada não só para se adquirir um produto desejado, como também para a recuperação de material envolvido no processo, e para evitar a poluição em diversos ambientes, sendo assim, alguns dos equipamentos para separação de partículas são, as centrifugas, ciclones, hidrociclones, câmaras de poeira e hidrociclones. Todos esses equipamentos possuem um princípio inerente a eles, a decantação, que se caracteriza pela sedimentação do sólido ou sua retirada (CREMASCO, 2012).

A elutrição é uma operação que possui um método de separação, dependente da velocidade média do fluido, e da velocidade da partícula. A Figura 2 mostra como ocorre seu funcionamento, possuindo duas colunas de diâmetros diferentes, D_1 e D_2 , respectivamente, e alimentado com um fluido que possui vazão volumétrica Q (água na figura).

Figura 2 – Sistema de elutrição com duas colunas



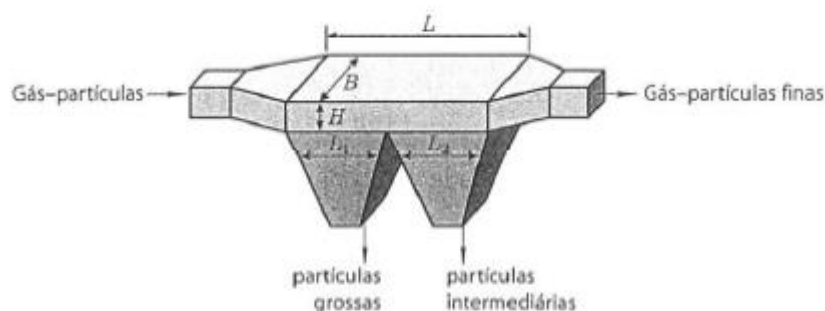
Fonte: Cremasco (2012, p.184).

Pode-se observar que caso a velocidade do fluido seja maior que a da partícula, as partículas com menor diâmetro ou massa específica são carregadas para a segunda coluna, enquanto as de maior massa específica ou diâmetro vão para o fundo da coluna (CREMASCO, 2012).

A câmara de poeira possui um funcionamento semelhante à elutrição, em que sua operação depende do tempo de permanência de uma partícula em uma corrente

gasosa, e seu tempo de queda em uma câmara de separação. A Figura 3 demonstra o processo.

Figura 3 – Representação de uma câmara de poeira em dois estágios



Fonte: Cremasco (2012, p.185).

Na primeira etapa entra-se a mistura gás-partículas, enquanto a mistura passa pela primeira câmara, as partículas que possuem maior massa específica, sedimentam-se na base da câmara, já as outras seguem para saída desse primeiro estágio, entrando no segundo, onde ocorre o mesmo processo com as partículas restantes. Sendo que o tempo de queda se relaciona com a velocidade da partícula, e o de permanência com a velocidade do fluido (CREMASCO, 2012).

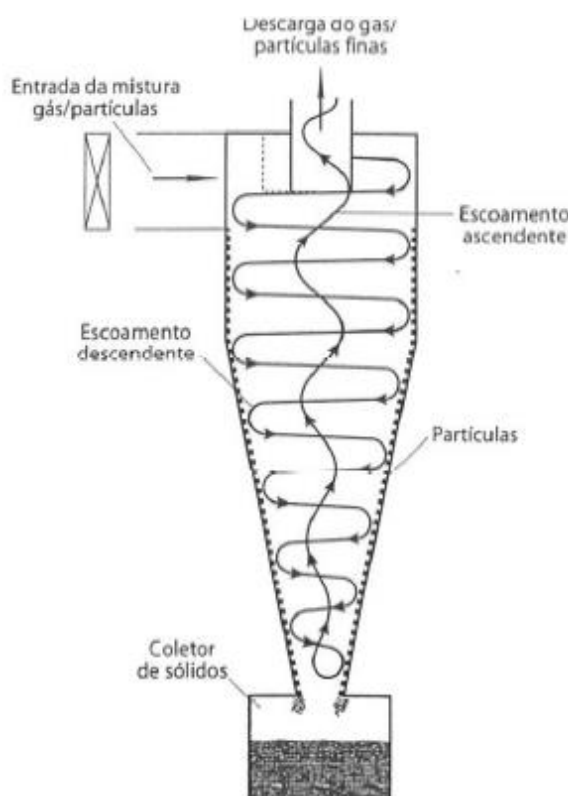
Já a centrifugação não se assemelha tanto aos processos citados, tendo que seu funcionamento pode ser compreendido como uma forma de acelerar a decantação com um movimento de rotação em sistema líquido-partículas, em que a força centrífuga faz com que as partículas se distanciem do eixo principal do movimento. Portanto a centrifugação separa as partículas pela sua diferença de tamanho, de massa específica, ou de ambos (CREMASCO, 2012).

2.6 Estudo geral do ciclone

Os ciclones têm um funcionamento mais semelhante a centrífuga, sendo utilizados na separação de misturas gás-partículas, no caso de ciclones, e de líquido-partículas, no caso de hidrociclones. Esses equipamentos têm uma entrada lateral e duas saídas no eixo central, sendo uma saída de partículas, na base, e outra para fluidos e partículas no topo, a qual leva a um filtro onde passa o fluido contendo os particulados finos restantes (CREMASCO, 2012).

A separação das partículas nos ciclones acontece graças às forças centrífugas que a partir da entrada, fazem à mistura fluido-partículas terem um movimento helicoidal, de modo que as partículas se desloquem próximas a parede, esta que atua na direção radial, causando movimento circular nas partículas que escoam até a base com o coletor (denominado *underflow*). Já a fase fluida, sobe em direção ao topo do equipamento, em movimento espiral, até a saída de fluido (denominado *overflow*). O processo todo descrito pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 – Escoamento em um ciclone



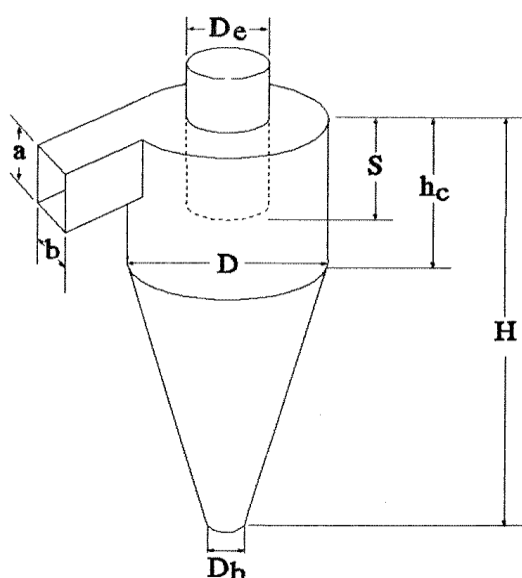
Fonte: Cremasco, 2012

Na figura 4, nota-se que a força centrífuga desloca as partículas para a parede do ciclone, graças ao movimento helicoidal adquirido pelo fluido, fazendo com que as partículas se dirijam até o underflow, e nisso o fluido, volta para cima, circundando o eixo central do ciclone, sendo descarregado no overflow (CREMASCO, 2012).

No ciclone, existem algumas dimensões geométricas que necessitam ser estudadas para o projeto do equipamento, por exemplo, o diâmetro da parte cilíndrica (D), o diâmetro do duto do *overflow* (D_e), o diâmetro do *underflow* (D_b), a altura do ciclone (H), a altura da parte cilíndrica (h_c), a largura do duto de alimentação (b), o

comprimento do tubo de saída do *overflow* (S) e a altura do duto de alimentação (a). A Figura 5 mostra a visualização de cada uma dessas dimensões no equipamento em si (SOUZA, 1994).

Figura 5 – Modelo de ciclone com entrada tangencial



Fonte: Souza (1994, p.5).

Variáveis:

a = Altura do duto de alimentação,

b = Largura do duto de alimentação,

D = Diâmetro da parte cilíndrica,

D_e = Diâmetro do *overflow*,

D_b = Diâmetro do *underflow*,

H = Altura do ciclone,

h_c = Altura da parte cilíndrica,

S = Comprimento do duto do *overflow*.

Os ciclones são muito utilizados industrialmente graças a seu bom desempenho, possuindo alto valor de eficiência (acima de 90%), são pequenos, e não necessitam de muita manutenção e também pela sua grande versatilidade em tamanhos, podendo ter alguns com poucos centímetros de diâmetro, e outros com metros do mesmo (SOUZA, 1994).

Os ciclones dispõem de dois tipos de entradas mais comumente usadas, a tangencial e a em voluta, como mostrado na Figura 6. A entrada tangencial acaba sendo a mais utilizada, por possibilitar maiores valores de eficiência, mesmo que a entrada em voluta cause menos queda de pressão no equipamento. Portanto nota-se que o uso mais desejado do ciclone é com o mesmo possuindo alta eficiência, mas sofrendo uma maior queda de pressão, já que quando se busca operar o ciclone sob uma condição que minimize a perda de carga dele, acabará fazendo com que a eficiência também caia (SOUZA, 1994).

Figura 6 – Tipos de entrada



Fonte: Souza (1994, p.7).

Um dos poucos problemas encontrados nos ciclones é que, quanto menor a partícula, mais difícil torna-se sua obtenção, por exemplo, partículas com menos de quarenta microns têm sua captação diminuindo exponencialmente com o tamanho das mesmas, de forma que partículas com menos de cinco microns são basicamente perdidas. Mesmo assim, existem ciclones projetados especificamente para serem eficientes na coleta de particulados pequenos (menor que 44 micrometros), mas esse processo possui alguns problemas como, uma grande queda de pressão, muito atrito entre as partículas e o equipamento e um elevado custo de manutenção (SOUZA, 1994).

2.6.1 Eficiência

Uma das publicações mais recentes que apresentou e descreveu as equações que prescreviam as equações da eficiência e queda de pressão em ciclones foi na publicação de Zenz no Manual on Disposal of Reinery Wastes – Atmospheric Emissinos, cap. 11 (1975). Segundo Lapple, para um ciclone obter 50% ou mais de eficiência necessita-se que essa porcentagem de particulado seja coletada pelo

underflow, sendo que as partículas entraram de maneira uniforme pela entrada do ciclone. Esse método é o mais usado dentre todas as teorias de corte, nesse caso é chamada de diâmetro de corte (dpc).

As variáveis que definem a eficiência do equipamento dependem da geometria do conteúdo particulado, características físicas do gás e das condições em que o equipamento está operando (SOUZA, 1994).

Segundo *Lapple* (1951), o cálculo da eficiência pode ser definido pelo balanço de forças de quando a partícula está em estado quase estacionário, assumindo que o tempo pode ser assimilado pelo número de voltas que o fluido faz no interior cilíndrico do equipamento.

Em contrapartida o coeficiente de arraste parte do princípio de que a força exercida pelas partículas sólidas já citadas, faz com que o fluido vá em direção ao centro e enfim para o topo assim sendo coletado (SOUZA, 1994).

Mas vale salientar que os cálculos de eficiência do ciclone é um conjunto dos balanços entre as forças que operam o sistema, dentre inúmeras variáveis, por exemplo o coeficiente de atrito, o tempo de resistência do gás e fatores de correção. *Lapple* propôs como citado acima uma expressão que se aplicava a uma família de ciclones que já foi abordada no início, então existe um acordo geral devido a vasta quantidade de variáveis que fez com o cálculo da eficiência seja simplificado a apenas dois parâmetros (LACERDA, 2007):

Parâmetro de operação: onde é contemplado as variáveis dos itens que fazem parte do processo, a massa específica do particulado sólido, a velocidade de entrada do gás, a temperatura.

Parâmetros geométricos: nesse tópico ficou responsável por contemplar a geométrica do ciclone.

Algumas expressões podem correlacionar às oito dimensões do ciclone, porém utiliza-se a simplificada que faz uso de apenas três dessas dimensões. A eficiência individual do ciclone $\eta(i)$ é calculado pela quantidade de partículas que ficam retidas pelo equipamento, enquanto a eficiência global é a soma dos produtos gerados entre a eficiência individual do ciclone e a vazão mássica $m(i)$ (LACERDA, 2007). Como apresentado na Equação 8:

$$\eta = \sum_i m(i) * \eta(i) \quad (8)$$

Outra relação que se pode utilizar para calcular a eficiência global do ciclone, e representada pela equação 9, ambas as equações contemplam as mesmas variáveis, levando em consideração todo o material particulado que é introduzido dentro do equipamento, também sendo o método que melhor se adequa os parâmetros do método de regressão RRB.

$$\bar{\eta} = \frac{\frac{1,11n}{0,118+n}}{1,81-0,322n+\left(\frac{D'}{D*}\right)} \left(\frac{D'}{D*}\right) \quad (9)$$

Para estimar a eficiência proposta por *Lapple* (1951) é necessário utilizar a partícula de diâmetro crítico, que é definida como sendo aquela que percorre exatamente a distância radial de seu eixo para então se dispersarem para as extremidades em direção ao fundo sendo coletadas, essa distância durante seu tempo de resistência no ciclone segundo Souza (1994). *Lapple* assumiu que as partículas entram pelo bocal de maneira organizada e uniforme, assim pode-se adotar que o tempo que elas vão usar para percorrer metade da estrutura do equipamento é exatamente metade da largura do bocal de entrada (b), para que seja feita a coleta com 50% de eficiência, então passa a ser o diâmetro crítico para particulados com o diâmetro maior que 50%, a eficiência vai ser maior que 50%, e para partículas menores, a eficiência é menos que 50%.

Assumindo que velocidade com o gás percorra toda a estrutura do equipamento e considerando que o gás seja rígido, e a distância percorrida seja o perímetro do ciclone, πD , multiplicado pelo número de vezes de espirais do gás que se formam durante o percurso N_s . O tempo de resistência do gás pode ser expresso pela Equação 10:

$$t_{res} = \frac{(\pi * D) N_s}{v_i} \quad (10)$$

Como citado anteriormente, pode-se concluir que o tempo de resistência para que as partículas de diâmetro crítico percorram a distância radial $b/2$, e que consigam vencer a força contrária que o fluido exerce. A velocidade das partículas durante esse trajeto e na verdade a sua velocidade terminal (v_i) quando em contato com a força centrífuga pode ser expressa pela Equação 11:

$$vt = \frac{d_p^2(\rho - \rho)v^2/r}{18\mu} \quad (11)$$

O tempo necessário para que a partícula de diâmetro crítico percorra todo esse trajeto é mostrada na Equação 12:

$$t_{res} = \frac{b/2}{v_r} \quad (12)$$

Sendo assim correlacionando as Equações 9 e 10 e substituindo o valor v_t pela Equação 2.8, obtém-se a expressão para calcular o diâmetro crítico de coleta de um ciclone tipo *Lapple*, mostrada na Equação 13:

$$d_p \sqrt{\frac{9\mu \cdot b}{2\pi(\rho - \rho)v_i \cdot N_s}} \quad (13)$$

Lapple recomenda que o valor de N_s seja adquirido experimentalmente, para a equação possa se adequar melhor a cada caso, mas é normal utilizar $N_s=5$ como uma constante sempre que for usado o método de *Lapple*.

O cálculo do diâmetro de corte é apenas um meio para se chegar ao objetivo que é calcular a eficiência de coleta do ciclone, dessa forma é necessário relacionar os dados obtidos anteriormente com a eficiência e o diâmetro de corte para qualquer tipo de partícula. Para isso usa-se uma curva obtida pelo próprio *Lapple* através de seus experimentos, a curva de eficiência ($d/d_c \times \eta$) apresentada na Figura 7. Essa curva foi feita a partir de experimentos realizados em uma família específica de ciclones não podendo ser aplicada a outras famílias de ciclone, as especificações dessa família de ciclones podem ser encontradas na Tabela 1.

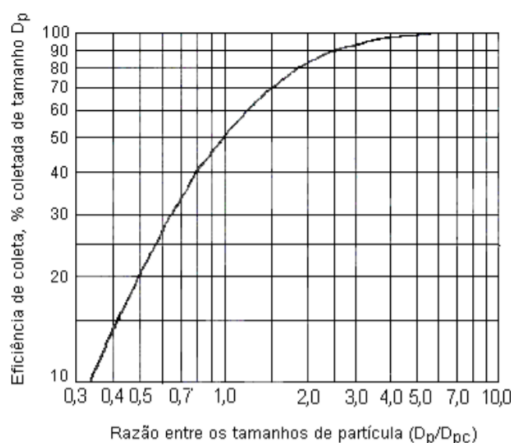
Com todas as equações relacionadas, e com o auxílio da curva fornecida por *Lapple*, pode-se obter a eficiência utilizando a Equação 14.

$$\eta = \frac{1}{[1 + (d_p/d_c)^{-2}]} \quad (14)$$

Tabela 1 – Relação entres cotas de ciclones tipo Lapple

	Lapple
a/D	0,50
b/D	0,25
D_c/D	0,50
S/D	0,62
h_c/D	2,00
H/D	4,00
D_b/D	0,25

Fonte: SOUZA (1994)

Figura 7 – Eficiência de coleta de partículas em função razão do diâmetro da partícula D_p e o diâmetro de corte da partícula D_{pc} , para o ciclone Lapple

Fonte: LAPPLE, C. E. (1951)

2.6.2 Principais variáveis de operação

Por fim, tem-se a Equação abaixo, que é de extrema importância para o dimensionamento do equipamento, fórmula que visualmente mostra a relação e como as principais variáveis do processo se comunicam entre si, assim facilitando os ajustes de processo. Pode se observar que o diâmetro de material particulado está relacionado com a vazão de entrada do fluido, quando a vazão é elevada, observa se que o diâmetro diminui assim possibilitando uma melhor separação, outro ponto importante mostrado por essa relação, é a viscosidade, quanto maior for a viscosidade do fluido de trabalho menor será a eficiência de separação, e para que isso seja

contornado, como falado anteriormente, deve se ajustar a vazão até que D^* esteja de acordo com o processo.

$$\frac{D^*}{D_c} = k \left[\frac{\mu D_c}{Q(\rho_s - \rho)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

Onde:

μ = viscosidade do fluido

Q = vazão de admissão do fluido no sistema

k = constante do ciclone tipo Lapple

ρ_s = densidade do particulado

ρ = densidade do fluido de arrete

2.6.3 Queda de pressão

A queda de pressão que ocorre em um ciclone é o produto da a variação da densidade do gás conforme ele progride em seu percurso dentro do equipamento, vezes a velocidade do gás na entrada, e o número de cargas de pressão na entrada ΔH , o qual é um termo adimensional e completamente dependente da geometria do ciclone a ser estudado (SOUZA, 1994). Como mostrado na Equação 16:

$$\Delta P = \frac{\rho_g v_i}{2} \cdot \Delta H \quad (16)$$

É discutido por alguns autores até hoje sobre essa equação, se ela atende a todas as necessidades para calcular a queda de pressão, que por sua vez não é cem por cento exata. Um dos pontos da discussão desses autores é o fato de que a velocidade de entrada do gás no sistema na Equação 14 está ao quadrado, mas alguns refutam essa teoria, então é comum encontrar em alguns casos em que v_i esteja sendo elevado ao expoente 1,5 ao invés de 2. Mas devido a muitos estudos o termo foi definido e como se aproxima a 2 que é comumente utilizado acaba que utilizamos da maneira que está escrita acima. Mesmo assim o erro ainda está atrelado a tal equação abordada, e até hoje se tem muita dificuldade em definir a queda de pressão, por isso a relação ΔP torna-se uma variável totalmente depende somente da velocidade de entrada (SOUZA, 1994), como mostrado na Equação 17:

$$\Delta P = kv_i^2 \quad (17)$$

Outro ponto a ressaltar é o cálculo para se adquirir um valor para ΔH , como já citado esse é um termo que é obtido através de experimentos e cada ciclone tem o seu, ele acaba sendo considerado até mesmo uma constante por alguns autores. Fazendo uso do método desenvolvido por *Shepherd* e *Lapple*, onde através de estudos empíricos utilizando ciclones do tipo *Lapple*, como mostrados na Tabela 1, chegaram a Equação 18 para a obtenção de ΔH .

$$H = k\left[\frac{ab}{D_e^2}\right] \quad (18)$$

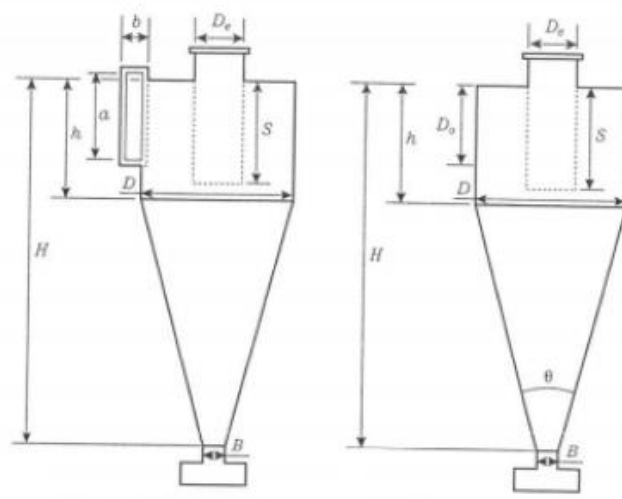
Essa equação refere-se ao tipo mais comum de geometria de ciclones, em que o termo K passa a ser um constante com o valor igual a 16. Para que *Shepherd* e *Lapple* chegassem a essa conclusão utilizaram as seguintes faixas de geometria de ciclones.

$$\frac{1}{12} \leq \frac{b}{D} \leq \frac{1}{4} \quad ; \quad \frac{1}{4} \leq \frac{a}{D} \leq \frac{1}{2} \quad ; \quad \frac{1}{4} \leq \frac{D_e}{D} \leq \frac{1}{2}$$

2.7 Famílias de ciclone

Os ciclones podem ser divididos em famílias de acordo com as suas características dimensionais, ou seja, cada família tem as suas relações entre as medidas características, assim sendo definido o diâmetro D , da sessão cilíndrica do ciclone é possível encontrar todas as configurações dimensionais do equipamento. Na Figura 8 é mostrada as cotas de um ciclone.

Figura 8 – Configuração e cotas de ciclones



Fonte: Cremasco (2012, p. 197).

A seguir é apresentado a Tabela 2 que mostra a relação das configurações dos ciclones *Lapple* e *Stairmand* relacionados com o diâmetro da sessão cilíndrica, D .

Tabela 2 – Configurações dos ciclones

Ciclone	Lapple	Stairmand
b/d	0,25	0,20
D_e/D	0,50	0,50
a/D	0,50	0,50
h/D	2,00	1,50
H/D	4,00	4,00
S/D	0,62	0,50
B/D	0,25	0,35

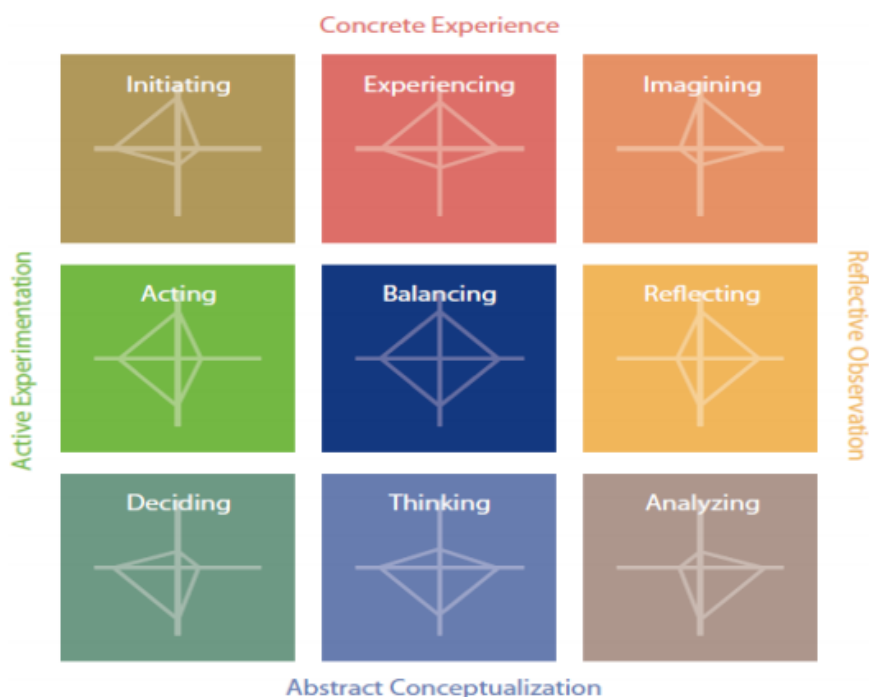
Fonte: Cremasco (2012, p. 197).

2.8 Métodos de aprendizagem

É comprovado que há diferentes maneiras de aprendizado e fixação de conteúdo. Enquanto indivíduos cada pessoa tem sua maneira específica de aprendizado, sendo os 9 mais conhecidos e estudados: iniciador, experimentador, imaginativo, ativo, equilibrado, reflexivo, decisivo, pensativo e analista. Esse assunto foi intensamente estudado no artigo publicado por KOLB, A.Y.; KOLB, D.A. (2013).

Todos os métodos estão correlacionados em duplas dialéticas, com exceção do equilibrador que se encontra no centro sendo o equilíbrio dos outros 8 estilos.

Figura 9 – Os nove estilos de aprendizagem do Kolb Learning Style Inventory 4.0.



Fonte: KOLB, A.Y.; KOLB, D.A. (2013).

As características dos métodos de aprendizagem possuem semelhanças, por isso é importante definir suas principais características:

Iniciador: Caracteriza-se pela habilidade de iniciar uma ação prática para lidar com uma experiência ou situação;

Experimentador: tem como característica compreender pela experiência vivida;

Imaginativo: tem o aspecto de imaginar inúmeras possibilidades a partir da observação e reflexão de experiências;

Reflexivo: tem o atributo de conectar teoria e prática a partir de uma reflexão profunda;

Análítico: tem a aptidão de juntar e organizar ideias a partir da reflexão;

Pensativo: tem a facilidade em unir um pensamento abstrato a uma experiência de maneira lógica;

Decisivo: tem a propriedade de fundir teoria e modelos práticos para solucionar problemas;

Ativo: tem a qualidade de ir diretamente a atividade prática.

Equilibrado: tem a particularidade de se adaptar pesando os prós e os contras entre a ação e a reflexão, e entre experimentar e pensar.

Tendo em vista as diversas maneiras de aprendizado o modulo didático de um conceito teórico, visto em sala de aula, contemplaria uma grande parte do cartesiano desenvolvido por Kolb e os extremos entre os indivíduos que abstraem o conceito de forma teórica e prática. Então pode-se dizer que um ensino contemplando a teoria e a prática favoreceriam o aprendizado de uma grande parcela dos métodos, não englobando somente o analítico.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Experimentos para a caracterização do particulado

3.1.1 Experimento para o cálculo do diâmetro médio de *Sauter*

Para a realização da fase prática do projeto será necessário uma série de etapas. Primeiramente, foi realizado um experimento de granulometria utilizando o peneiramento como método para determinar o tamanho das partículas, utilizando o diâmetro médio de *Sauter* que representa o diâmetro de uma partícula que relaciona o seu volume e área superficial com as de todas as partículas de uma amostra.

Para o teste de peneiramento realizado no laboratório da Facens, foi definido um conjunto de 8 peneiras de diferentes aberturas ou série de Tyler, que serão configuradas uma em cima da outra sendo a de menor série de Tyler em cima para a maior em baixo. A configuração das peneiras utilizadas está representada na figura 10. Foi utilizado peneiras de 24, 48, 60, 80, 100, 150, 200, 250 série *Tyler* e o fundo.

Figura 10 – Configuração das peneiras.



Fonte: autoria própria.

Cada peneira e o fundo foram limpos com escova apropriada e, em seguida, foram pesadas individualmente e anotado os seus valores. Após a pesagem, as peneiras foram configuradas e fixadas no agitador.

Com o sistema montado, um quilograma de areia (disponibilizado pelo laboratório da Facens), previamente pesado em um béquer de dois litros com o auxílio de uma balança semi analítica, foi transferido para o topo do conjunto de peneiras, a tampa das peneiras foi posicionada, o equipamento conectado a uma tomada de 110V e ligado.

Após vinte minutos de agitação constante, o sistema foi desligado, todo o conjunto de peneiras foi retirado e transferido para próximo de uma balança semi analítica. Com extremo cuidado e cautela cada uma das 8 peneiras mais o fundo foram pesadas, suas respectivas massas foram anotadas e com o auxílio de uma escova o sistema foi limpo e a areia descartada.

Todo o processo foi realizado quatro vezes para que, assim, haja uma diminuição dos erros durante o procedimento.

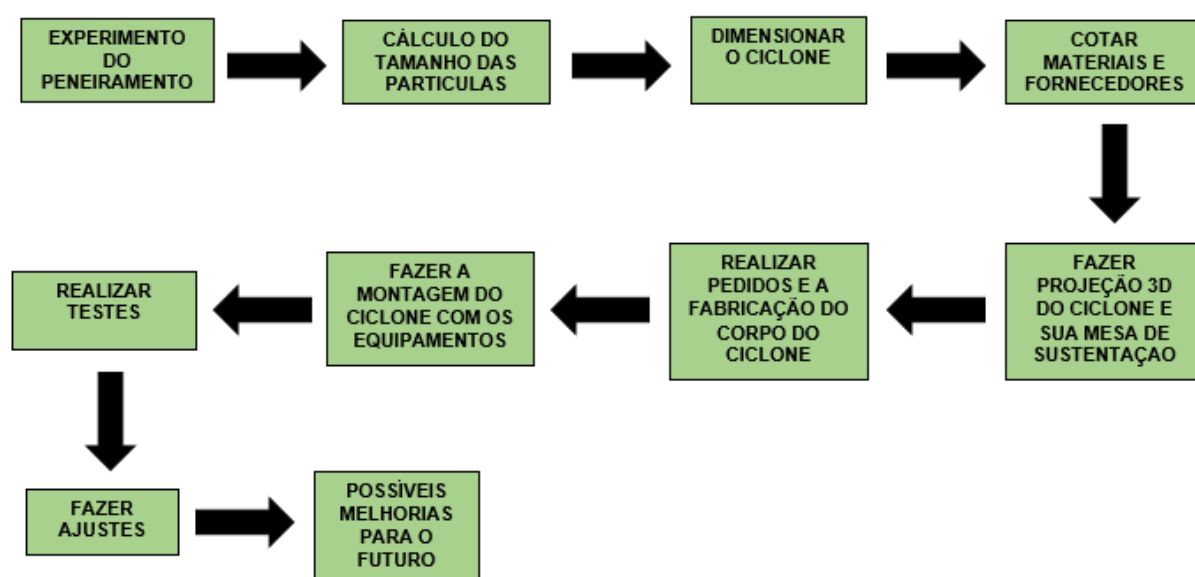
Com a finalização dos cálculos de granulometria, serão feitos os cálculos para determinar o melhor dimensionamento do equipamento para aquele tamanho de particulados, tendo assim, uma melhor eficiência e rendimento do equipamento. É

determinada a melhor carga de alimentação, diâmetro de corte, perda de carga, entre outros parâmetros que podem influenciar na melhor operação do ciclone.

Com todos os parâmetros definidos, é possível realizar a compra dos materiais com suas medidas e características com maior precisão, dando prosseguimento a montagem do equipamento e, assim, realizar os testes de operação e, por fim, realizar possíveis ajustes.

A figura 11 mostra as etapas a serem seguidas para a realização do procedimento prático do projeto:

Figura 11 – Fluxograma das etapas práticas do projeto



Fonte: autoria própria

3.1.2 Experimento para o cálculo da densidade aparente

Houve a necessidade da determinação empírica da densidade aparente da areia utilizada, pois na literatura não existe a densidade de um único tipo de areia. A densidade da areia pode variar muito dependendo de alguns fatores importantes, como do tipo de areia que está sendo trabalhado ou dos pequenos minerais que estão presente na areia.

A determinação da densidade foi um experimento simples de se fazer, primeiramente cinquenta gramas de areia foram previamente pesadas, em uma balança semi analítica, e separadas em um béquer. Paralelo a isso, em uma proveta

de cinquenta mililitros foram adicionados 20 mililitros de água e, em seguida, essa proveta foi pesada também em uma balança semi analítica.

Transferiu-se quantitativamente toda a areia presente no béquer para dentro da proveta com extremo cuidado. Como a areia é mais densa que a água ela se depositou no fundo da proveta, sendo assim, se fez possível a leitura da variação do volume de água.

Com os valores da variação do volume de água na proveta e a massa de areia adicionada na proveta, foi possível determinar a densidade da areia pela Equação 19

$$D = \frac{m}{\Delta V} \quad (19)$$

Onde:

D= densidade (g/m³)

M= massa (g)

ΔV = variação de volume (ml)

3.2 Construção do ciclone

Para esse projeto algumas normas foram preestabelecidas, como: o diâmetro do ciclone não pode exceder o valor de 300 milímetros, pois a família de ciclone escolhida é a *Lapple*, assim, a altura do ciclone tem que ter no mínimo quatro vezes seu diâmetro e, como o objetivo do ciclone é ser implementado nas aulas de laboratório de engenharia química da Facens, o ciclone precisa ter um tamanho razoável para que caiba dentro de uma sala de aula.

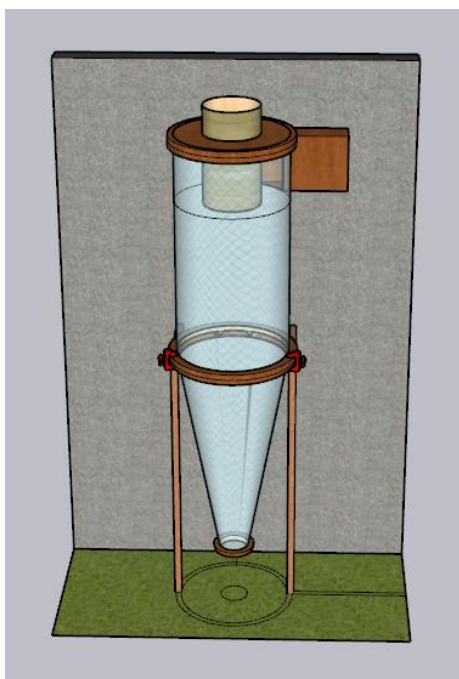
Outro pré-requisito do projeto é que o material a ser utilizado deve ter uma boa resistência a abrasão, considerando que o material escolhido para separação é areia fina com diferentes tamanhos de partículas. Por conta disto, o projeto que, inicialmente, seria feito de acrílico, para que os alunos pudessem olhar dentro do ciclone enquanto ele funcionava, precisou ser modificado para um outro material que, posteriormente, foi definido como sendo inox 304 (2 milímetros) por conta de sua ótima durabilidade.

Após a escolha do inox 304, recalculou-se o custo do projeto e foi constatado que o preço ultrapassava o teto do orçamento inicial, assim, ficou completamente

inviável produzir todo o equipamento com inox 304. Então, decidiu-se fazer o corpo principal do ciclone, que é onde acontece o maior atrito (por conta da alta velocidade e pressão), em inox 304 e as partes secundárias, como a tubulação do *overflow* e a entrada tangencial, em chapa galvanizada meio milímetro.

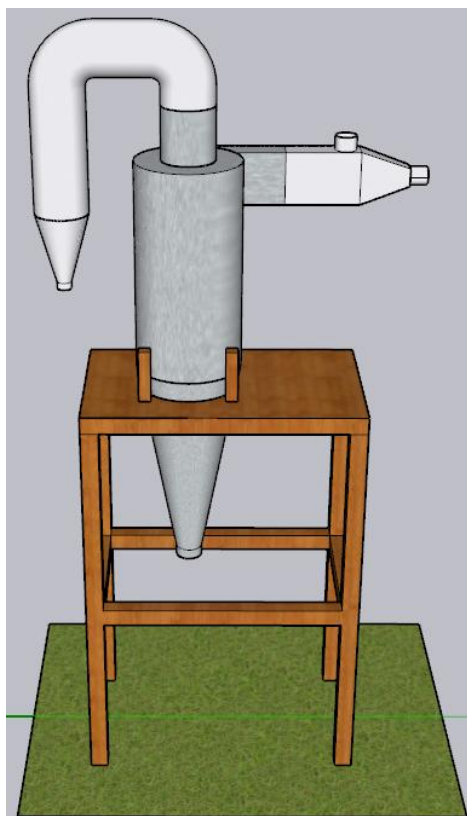
Nas figuras 12 e 13 é possível visualizar o ciclone projetado em acrílico, (incompleto, pois a necessidade da mudança do material foi observada antes do projeto ser finalizado) e em inox 304 (projeto atual), respectivamente.

Figura 12 – Desenho 3D do ciclone inicialmente de acrílico.



Fonte: autoria própria.

Figura 13 – Desenho 3D atualizado do ciclone e sua estrutura de sustentação.



Fonte: autoria própria.

Sendo o objetivo final do projeto o oferecimento de um ciclone operacional para o Centro Universitário Facens há uma certa exigência com a qualidade do projeto em questões de acabamento e matéria prima. Então, foi decidido realizar a construção do corpo principal do ciclone e do suporte com um profissional da área para que não houvessem problemas futuros. O resultado do ciclone é visto na imagem 14.

O recipiente utilizado para coletar o particulado do *underflow* foi um balde com trava de vinte e cinco litros. Apenas a tampa do recipiente foi fixada no ciclone com o auxílio de cola epóxi, assim, deixando o balde livre para que pudesse ser feita a pesagem do material coletado.

Já o recipiente utilizado no *overflow* foi uma *bag* com micro furos, que acompanha o *kit* do soprador “Garthen gss-3000 220v” comprado para o ciclone, para que houvesse a passagem do fluxo de ar e ao mesmo tempo a retenção do particulado do *overflow*.

Figura 14 – fotografia do ciclone.



Fonte: autoria própria

3.3 Testes realizados com o modulo do ciclone

Foram realizados quatro experimentos utilizando o módulo do ciclone com alterações de algumas variáveis, sendo elas: massa de material utilizado, como o material é introduzido no equipamento e a tensão em que o soprador é ligado (110 volts menor potência do equipamento e 220 volts maior potência do equipamento).

3.3.1 Primeiro teste

Iniciou-se pesando e anotando a massa inicial do balde (underflow) e da bag (overflow). Em seguida, o balde foi acoplado no underflow e lacrado com fita adesiva de alta resistência para que não houvesse vazamento de ar (figura 15). Após o acoplamento do *underflow* foi conectado a *bag* do *overflow* (figura 16).

Figura 15 – coletor do *underflow*.



Fonte: autoria própria

Figura 16 – coletor do *overflow*



Fonte: autoria própria

Em seguida, dois quilogramas de areia foram pesados em um béquer de dois litros devidamente tarado. Com a areia devidamente pesada, o ciclone foi carregado pelo bocal de carregamento com o auxílio de um funil improvisado de plástico para que houvesse a transferência quantitativa do material.

Figura 17 – Bocal de carregamento do ciclone com o funil.



Fonte: autoria própria

Após uma rápida checagem nos conectores de entrada, *underflow* e *overflow*, o soprador foi conectado a uma tomada de 220 volts e ligado por aproximadamente dez segundos.

Com o soprador fora da fonte de energia, foi retirado o coletor do *underflow* e do *overflow* e, com o auxílio de uma balança semi analítica, suas respectivas massas foram mensuradas.

Com o teste finalizado, os coletores e o ciclone foram limpos para o próximo teste.

Em resumo, as principais características do primeiro teste foram: uso de dois quilogramas de areia (disponibilizado pelo laboratório da Facens), areia introduzida pelo bocal de escoamento, tensão de duzentos e vinte volts e não elevação da mangueira no momento de adicionar ao soprador deixando-o abaixo do nível de entrada do equipamento.

3.3.2 Segundo teste

O segundo teste também foi iniciado com a pesagem do coletor do *underflow* e do *overflow*. Com seus valores anotados, os coletores foram devidamente acoplados no ciclone da mesma forma que o primeiro teste. Em seguida, também foram pesados

dois quilogramas de areia e introduzidos, desta vez, na mangueira que conecta o soprador ao ciclone (figura 18).

Figura 18 – Mangueira conectora com o funil.



Fonte: autoria própria

Para que o material pudesse ser introduzido diretamente na mangueira, o lado conectado ao ciclone foi desconectado, o material foi introduzido e a mangueira reconectada ao ciclone. Na figura 19 pode ser visto o sistema final reconectado.

Figura 19 – Sistema de entrada devidamente montado.



Fonte: autoria própria

Após uma rápida checagem nos conectores, coletores e na mangueira conectora, o soprador, permanecendo na mesa de (figura 19), foi conectado à fonte de 220 volts e ligado por aproximadamente dez segundos.

Em seguida, o soprador foi desconectado da fonte de energia e os coletores foram retirados e devidamente pesados. Os coletores e o ciclone foram limpos para o próximo teste.

Em resumo, as principais características do segundo teste foram: utilizou-se 2 quilogramas de areia. A areia foi introduzida diretamente na mangueira que conecta o soprador ao bocal de entrada do ciclone. A tensão utilizada foi de 220 volts. E no momento de acionar o soprador a mangueira não foi elevada, deixando o soprador abaixo do nível de entrada do equipamento.

3.3.3 Terceiro teste

Seguindo o protocolo, o terceiro teste teve início com a pesagem dos coletores. Com os valores devidamente anotados, os coletores foram acoplados no ciclone da mesma forma que nos testes anteriores.

Foi pesado um quilograma de areia e transferido para a mangueira, como no segundo teste.

Após uma rápida checagem nos conectores, coletores e na mangueira, o soprador foi conectado a fonte de duzentos e vinte volts e, antes de ser acionado, ele foi elevado, ficando um pouco acima do nível de entrada do ciclone, para então ser acionado por aproximadamente dez segundos.

Por fim, o soprador foi desconectado da fonte de energia e os coletores foram devidamente esvaziados.

Em resumo, as principais características do terceiro teste foram: utilizou-se 1 quilograma de areia. A areia foi introduzida diretamente na mangueira que conecta o soprador ao bocal de entrada do ciclone (como o segundo experimento). A tensão utilizada foi de 220 volts.

3.3.4 Quarto teste

O quarto teste iniciou-se da mesma forma, com a pesagem dos coletores. Em seguida, os coletores foram fixados no ciclone como nos testes anteriores.

Então, um quilograma de areia, devidamente pesado em uma balança, foi introduzido na mangueira conectora, da mesma forma que no segundo e no terceiro teste.

Após uma rápida checagem nos conectores, coletores e na mangueira, o soprador foi conectado na fonte de cento e dez volts.

Antes do soprador ser acionado, ele foi elevado acima do nível do de entrada, exatamente como no terceiro teste.

Em resumo, as principais características do quarto teste foram: carregar 1 quilograma de areia. A areia foi introduzida diretamente na mangueira que conecta o soprador ao bocal de entrada do ciclone (como o segundo experimento). A tensão utilizada foi de 110 volts. E, no momento de acionar o soprador, a mangueira foi elevada, deixando o soprador e toda a mangueira levemente acima do nível de entrada do equipamento.

4 RESULTADO E DISCUSSÃO

4.1 Cálculo do diâmetro médio

O diâmetro médio representa o diâmetro de partícula que melhor representa o particulado estudado. Com os dados obtidos foi possível o cálculo do diâmetro médio de duas formas diferentes, a primeira foi pelo modelo de distribuição RRB e a segunda foi pelo diâmetro médio de *Sauter*. Seus valores foram respectivamente 0,19412 mm e 0,17114 mm. Como todo o cálculo que envolve o projeto do ciclone foi feito baseado no modelo de distribuição RRB, então, foi adotado o seu valor como o real (0,19412 mm).

4.1.1 Cálculo do diâmetro médio pelo modelo de distribuição RRB

Para o cálculo do diâmetro médio foram utilizados os dados empíricos adquiridos experimentalmente no laboratório da Facens no dia 20 de agosto de 2020 como descrito no procedimento experimental no tópico 3.1. Segue na tabela 3 os dados experimentais.

Tabela 3 – Dados obtidos durante experimento de peneiramento.

1ª massa de areia (kg)	2ª massa de areia (kg)	3ª massa de areia (kg)	4ª massa de areia (kg)	Média (kg)	Xi	X ac	X passante
0,008	0,006	0,008	0,006	0,007	0,70%	0,70%	99,30%
0,304	0,302	0,304	0,328	0,310	31,11%	31,81%	68,19%
0,146	0,154	0,156	0,162	0,155	15,53%	47,34%	52,66%
0,254	0,248	0,248	0,238	0,247	24,82%	72,16%	27,84%
0,172	0,172	0,180	0,174	0,175	17,54%	89,70%	10,30%
0,056	0,058	0,048	0,050	0,053	5,33%	95,03%	4,97%
0,034	0,030	0,030	0,032	0,032	3,17%	98,19%	1,81%
0,012	0,012	0,010	0,010	0,011	1,11%	99,30%	0,70%
0,020	0,004	0,002	0,002	0,007	0,70%	100,00%	0,00%
1,006	0,986	0,986	1,002	0,995			

Fonte: autoria própria.

Para estudo do particulado calculou-se o diâmetro médio que melhor representava o conjunto de partículas. Para tal cálculo foi utilizado o modelo de distribuição RRB (equação 3). Segue na tabela 4 a regressão e seus respectivos coeficientes.

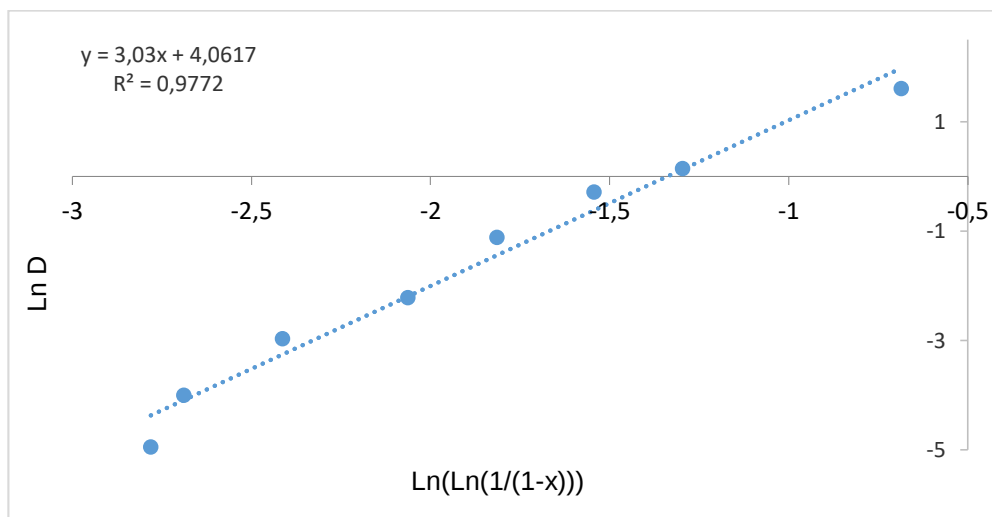
Tabela 4 – Dados calculados para a realização do modelo RRB.

Dm Peneiras (mm)	média	Xi	X ac	X passante	1/(1-X)	Ln(1/(1-X))	Ln(Ln(1/(1-X)))	Ln D
0,504	0,007	0,70%	0,70%	99,30%	142,143	4,957	1,601	-0,686
0,274	0,310	31,11%	31,81%	68,19%	3,144	1,145	0,136	-1,296
0,214	0,155	15,53%	47,34%	52,66%	2,113	0,748	-0,291	-1,544
0,163	0,247	24,82%	72,16%	27,84%	1,386	0,326	-1,120	-1,814
0,127	0,175	17,54%	89,70%	10,30%	1,115	0,109	-2,219	-2,064
0,090	0,053	5,33%	95,03%	4,97%	1,052	0,051	-2,975	-2,414
0,068	0,032	3,17%	98,19%	1,81%	1,018	0,018	-4,003	-2,688
0,062	0,011	1,11%	99,30%	0,70%	1,007	0,007	-4,953	-2,781
Fundo	0,007	0,70%	100,00%	0,00%				
Total	0,995							
A (n)	B							
3,030	4,062							

Fonte: autoria própria.

Com o auxílio de uma ferramenta gráfica foi possível a plotagem do gráfico 1 para análise do coeficiente de correlação.

Gráfico 1 – plotagem dos dados do modelo RRB.



Fonte: autoria própria.

Como pode ser observado no gráfico, o valor do coeficiente de correlação teve um valor satisfatório ($R^2 = 0,9772$) possibilitando o uso dos valores empíricos para o dimensionamento do ciclone.

Com os dados obtidos na regressão (coeficiente angular e coeficiente linear) foi possível o cálculo do D' e n presentes no modelo de distribuição RRB (visível na equação 4) sendo eles, respectivamente, 0,2617 e 3,03. Tais valores serão usados posteriormente para o dimensionamento do ciclone através da equação 9, descrito no tópico 2.5.1, visando uma eficiência de 90%.

Para fins de comparação também foi calculado o diâmetro médio da partícula através da regressão RRB. O cálculo foi feito com o auxílio das equações 5 e 6 como é descrito no tópico 2.2.2.1 e o resultado obtido foi de 0,19412 mm. Para uma melhor avaliação dos resultados a tabela 5 traz os valores para o cálculo do diâmetro médio por RRB.

Tabela 5 – Valores utilizados para o cálculo do diâmetro médio por RRB.

X obtido	0,669968
γ(x)	1,348209
D'	0,261714
D_{médio} (mm)	0,194120

Fonte: Autoria própria.

4.1.2 Cálculo do diâmetro médio de Sauter

Para a realização do cálculo do diâmetro médio de *Sauter* foi realizado o experimento detalhado no tópico 3.1. Como o procedimento foi realizado quatro vezes, foi calculada a média das massas de cada peneira como visto na tabela 3.

Utilizando a equação 7 foi calculado o diâmetro de *Sauter* utilizando as médias das massas, como mostrado na tabela 6.

Tabela 6 – valores calculados para a determinação de Sauter

D_m (mm)	X_i	X_i/D_m
0,5035	0,70%	0,013973
0,2735	31,11%	1,137314
0,2135	15,53%	0,727290
0,1630	24,82%	1,522952
0,1270	17,54%	1,380920
0,0895	5,33%	0,595155
0,0680	3,17%	0,465563
0,0620	1,11%	0,178311
Total		6,021477

Fonte: autoria própria.

Desenvolvendo a equação 7 utilizando a soma da fração retida sobre o diâmetro médio das peneiras subsequentes, obtém-se:

$$\bar{d} = \frac{1}{6,021477} \quad (20)$$

Concluindo o valor de *Sauter* igual a 0,166072 mm.

4.2 Cálculos para o dimensionamento do ciclone

Para o dimensionamento do ciclone, inicialmente, buscava-se calcular o diâmetro da parte cilíndrica do mesmo porque, como é visto no tópico “2.6 famílias de ciclone”, é o diâmetro da parte cilíndrica que determina todas as outras cotas do ciclone. Para a realização dos cálculos algumas variáveis foram preestabelecidas pelo grupo como: o ciclone iria possuir uma eficiência de 90%, a vazão de entrada foi estipulada em $2,83 \text{ m}^3/\text{s}$, a densidade da areia utilizada foi determinada com pouca precisão em laboratório $1,030 \text{ g/cm}^3$, viscosidade e densidade do ar são tabeladas e valem respectivamente $18,20 \text{ }\mu\text{Pa.s}$ e $1,275 \text{ g/cm}^3$.

Com todas essas informações predeterminadas foi possível dar sequência aos cálculos como é descrito no tópico 2.6.1. Porém ao realizar os cálculos, com a equação 15, usando o diâmetro da parte cilíndrica como variável era encontrado um diâmetro extremamente grande (próximo a 0,84 metros) que tornava o projeto completamente inviável.

Após algumas tentativas sem sucesso, foi determinado utilizar 3 opções fixas de diâmetros, sendo elas: 0,20 m 0,25 m ou 0,30 m, e dimensionar a vazão de entrada para cada diâmetro (excluindo a vazão anterior previamente estabelecida de $2,83 \text{ m}^3/\text{s}$). Tem-se as tabelas 7, 8 e 9 que apresentam o resultado da vazão para cada diâmetro.

Tabela 7 – Resultados para um diâmetro de 0,2 m.

Dc	0,2	m
Q	0,0371	m^3/s
V	7,4140	m/s

Fonte: autoria própria.

Tabela 8 – Resultados para um diâmetro de 0,25 m.

Dc	0,25	m
Q	0,0724	m^3/s
V	9,2672	m/s

Fonte: autoria própria.

Tabela 9 – Resultados para um diâmetro de 0,3 m.

Dc	0,3	m
Q	0,1251	m³/s
V	11,1209	m/s

Fonte: autoria própria.

A velocidade de entrada do fluido também foi calculada porque na família de ciclone *Lapple* existe uma faixa de trabalho para a velocidade de entrada, sendo esta faixa de 5 m/s a 20 m/s. Esse cálculo foi feito de forma simples, bastando dividir a vazão calculada pela área da entrada tangencial como descrito na Equação 21.

$$V = \frac{Q}{A} \quad (21)$$

Onde:

V= Velocidade de entrada do fluido (m/s)

Q= Vazão de entrada (m³/s)

A= Área da entrada tangencial (m²)

A área de entrada tangencial varia conforme o diâmetro de corte seguindo a seguinte Equação 22.

$$A = 0,125 * Dc^2 \quad (22)$$

Onde:

A= Área da entrada tangencial (m²)

Dc= diâmetro da parte cilíndrica do ciclone (m)

Ao analisar os dados obtidos foi escolhido trabalhar com o diâmetro de 0,3 metros pois tanto a velocidade do fluido quanto a vazão de entrada possuíam um ótimo valor. Com esse valor de vazão conseguiu-se trabalhar com sopradores de ar convencionais, barateando o custo do projeto. Porém o ideal seria o uso de um soprador industrial com vazão preestabelecida, mas tendo em vista a verba disponível tornava-se uma opção inviável.

O modelo de soprador comprado foi o “Garthen gss-3000 220v” por sua saída de ar ter um formato ótimo para o trabalho e também por ter um baixo custo. Esse soprador possui sua vazão máxima de 780 m³/h a 220 volts informado pelo fabricante.

4.3 Primeiro teste

Após o término do teste os coletores foram retirados e visualmente já era possível perceber que grande parte do particulado ficou retido dentro do equipamento. Retirando a mangueira conectora (figura 19) do ciclone foi possível visualizar o material retido dentro do equipamento (figura 20 – meramente ilustrativa. Esta figura retrata o ocorrido no segundo teste, porém por falta de fotografia do acervo foi necessário usá-la para representar onde o particulado ficou retido no primeiro teste).

Figura 20 – Areia retida dentro do equipamento no primeiro teste.



Fonte: autoria própria.

Neste teste a areia foi introduzida pelo bocal de carregamento alojando-se em um local onde não há fluxo de ar. Ao acionar o soprador, por conta de um degrau existente, o fluxo de ar arrastou pouco particulado para dentro do equipamento tornando o teste inconclusivo.

Na tabela 10 segue os valores de massa obtidas no primeiro teste (inconclusivo).

Tabela 10 – dados do primeiro teste.

	Massa (kg)
Areia introduzida no ciclone	2,100
Coletor <i>underflow</i>	0,572
Coletor <i>overflow</i>	0,318
Areia no <i>underflow</i>	0,800
Areia no <i>overflow</i>	0,0

Fonte: autoria própria.

4.4 Segundo teste

Para o segundo teste foi decidido entrar com o particulado diretamente na mangueira do soprador, para que o particulado já entrasse em alta velocidade dentro do equipamento afim de evitar a falha ocorrida no primeiro teste.

Porém como descrito no tópico 3.3.2 não houve a elevação do soprador ao nível do bocal de entrada fazendo assim com que dois quilogramas de areia abaixo do nível do bocal fosse muito pesado para a força do soprador e conseqüentemente foi acumulado uma pequena quantidade do particulado na entrada do equipamento conforme a figura 20.

Na tabela 11, é possível perceber que quase todo o particulado entrou no equipamento, porém o particulado retido na entrada do equipamento foi em torno de 0,250 quilogramas tornando, dessa maneira, o teste inconclusivo.

Tabela 11 – dados do segundo teste.

	Massa (kg)
Areia introduzida no ciclone	2,036
Coletor <i>underflow</i>	0,562
Coletor <i>overflow</i>	0,314
Areia no <i>underflow</i>	1,748
Areia no <i>overflow</i>	0,002

Fonte: autoria própria.

4.5 Terceiro teste

A fim de corrigir o erro do segundo teste, a massa de areia utilizada foi reduzida de dois quilogramas para um quilograma e o soprador foi posicionado levemente acima do bocal de entrada (como descrito no tópico 3.3.3). Desta maneira o particulado seria mais facilmente transportado para dentro do equipamento.

Seguem, na tabela 12, os resultados do terceiro teste.

Tabela 12 – dados do terceiro teste.

	Massa (kg)
Areia introduzida no ciclone	1,042
Coletor <i>underflow</i>	0,566
Coletor <i>overflow</i>	0,312
Areia no <i>underflow</i>	1,018
Areia no <i>overflow</i>	0,002

Fonte: autoria própria.

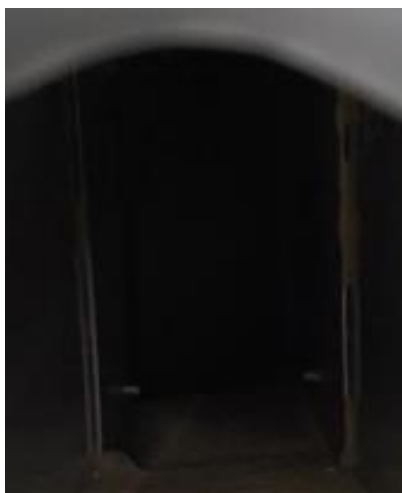
De todos os quatro testes realizados o terceiro foi o mais conclusivo, tendo em vista que quase todo o particulado entrou no equipamento. Apenas 0,22 gramas ficou retido no equipamento, essa perda de material muito provavelmente deve estar associada à emenda da solda e resquícios do adesivo selante de poliuretano utilizado para a fixação da chapa galvanizada ao inox no bocal de entrada que deixou um vão na entrada do equipamento como visto na figura 21 e 22.

Figura 21 – Vão inferior no bocal de entrada



Fonte: autoria própria.

Figura 22 – Vão lateral no bocal de entrada



Fonte: autoria própria.

Dos 1,042 quilogramas introduzidos no equipamento 1,018 quilogramas saíram pelo *underflow* resultando em uma eficiência de 97,7%. O projeto inicial foi calculado para um ciclone com 90% de eficiência. Esse erro pode ter sido ocasionado pelo fato de que o projeto foi calculado para ter como vazão de entrada o valor de 450 m³/h, porém não foi possível a compra de um equipamento que proporcionasse essa vazão. Como citado no tópico 4.2 o soprador utilizado possui vazão de 780 m³/h.

4.6 Quarto teste

Pensando em corrigir o problema tido no terceiro teste foi pensado em conectar o soprador na tensão de 110 volts para diminuir a potência do soprador e, assim, deixar o mais próximo de 450 m³/h. Então realizou-se o teste como descrito no tópico 3.3.4.

O soprador não teve a potência necessária para introduzir todo o particulado para dentro do equipamento, uma pequena quantidade ficou retida na logo à frente do bocal de entrada (figura 23).

Figura 23 – Areia retida dentro do equipamento no quarto teste.



Fonte: autoria própria.

Como o primeiro e o segundo teste os dados deste experimento se tornam inconclusivos por conta do acúmulo de areia da entrada do equipamento. Seguem, na tabela 13, os dados coletados.

Tabela 13 – dados do segundo teste.

	Massa (kg)
Areia introduzida no ciclone	1,016
Coletor <i>underflow</i>	0,572
Coletor <i>overflow</i>	0,318
Areia no <i>underflow</i>	0,800
Areia no <i>overflow</i>	0,0

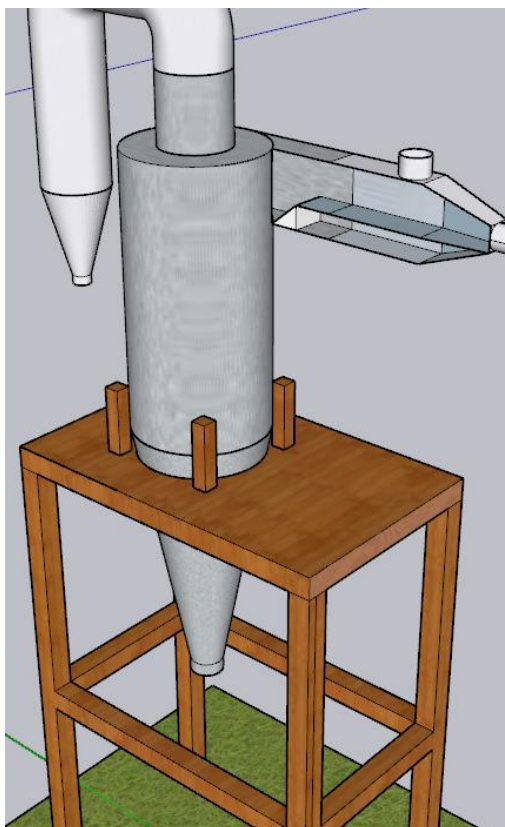
Fonte: autoria própria.

4.7 Melhorias para o modulo didático

Levando em conta a utilização do equipamento pelos alunos da Facens, no laboratório de engenharia química, algumas melhorias devem ser feitas antes da entrega para a faculdade.

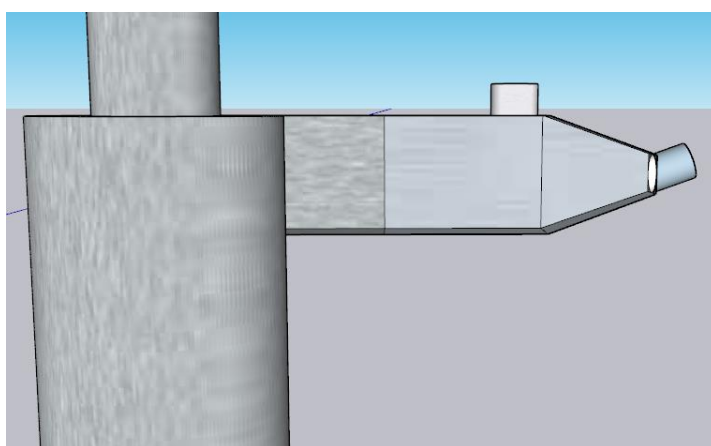
Para eliminar o problema de acúmulo de areia na entrada do equipamento, três são as soluções propostas. A primeira é construir uma plataforma dentro do equipamento para que a região que não entra em contato com o fluxo do ar no bocal de entrada deixe de existir (figura 23). A segunda solução é uma leve angulação no início do bocal de entrada fazendo com que a área que não estava em contato com a corrente de ar passe a estar (figura 24). E a terceira é refazer o início do bocal de entrada para que o nível do bocal seja o mesmo da corrente de ar, eliminando, também a área fora da corrente de ar (figura 25).

Figura 24 – Primeira solução.



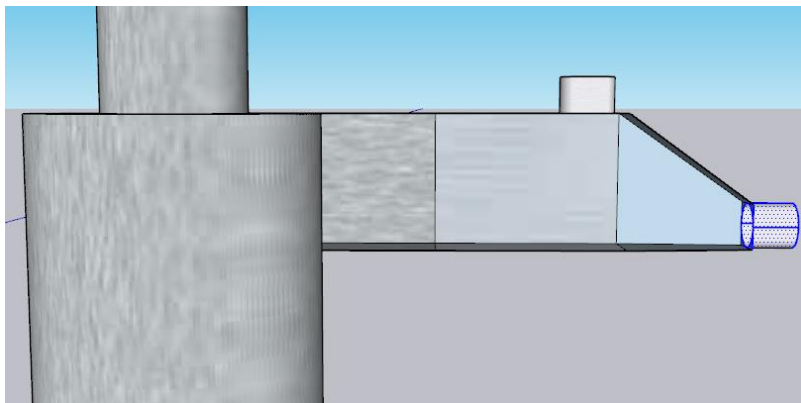
Fonte: autoria própria.

Figura 25 – segunda solução.



Fonte: autoria própria.

Figura 26 – Terceira solução.



Fonte: autoria própria.

Para minimizar os riscos de acidente o soprador deve ser fixado diretamente na mesa de apoio.

Para facilitar o transporte do equipamento rodas com trava podem ser instaladas no suporte do equipamento.

Para tornar o equipamento mais simples de ser manuseado o coletor do *underflow* pode ser trocado por um balde com vedação própria, extinguindo a necessidade de uma fita adesiva de alta resistência (figura 15).

Por fim, para melhorar a qualidade do equipamento toda a parte feita em chapa galvanizada pode ser trocada por aço inox 304 conferindo um melhor desempenho, já que as uniões das chapas seriam feitas com solda, eliminando os degraus formados na união entre os dois materiais (Figuras 21 e 22). Além do desempenho, o equipamento sendo feito todo em inox 304 proporcionaria uma melhor estética.

5 CONCLUSÃO

Diante do exposto nesse trabalho, pode-se perceber que mesmo com o cálculo correto do diâmetro das partículas, do dimensionamento do ciclone, as alterações feitas em sua estrutura, no caso a ligação com a entrada tangencial, que mesmo sendo essencial para realização do experimento, interferiu diretamente em seu funcionamento, afetando a vazão; o escoamento das partículas e sua eficiência. Portanto, necessita-se que seja feita a correção desses erros estruturais no equipamento, para que ele consiga desempenhar a separação de partículas com as características desejadas, dessa forma, podendo ser utilizado em aula como um módulo didático no Laboratório de Engenharia Química, possibilitando os alunos visualizar o processo industrial em escala laboratorial e realizar cálculos coerentes com o fenômeno apresentado.

ANEXOS

Anexo 1 – Tabela de valores de gama para função gama

x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$
1,00	1,00000	1,26	0,90440	1,52	0,88704	1,78	0,92623
1,01	0,99433	1,27	0,90250	1,53	0,88757	1,79	0,92877
1,02	0,98884	1,28	0,90072	1,54	0,88818	1,80	0,93138
1,03	0,98355	1,29	0,89904	1,55	0,88887	1,81	0,93408
1,04	0,97844	1,30	0,89747	1,56	0,88964	1,82	0,93685
1,05	0,97350	1,31	0,89600	1,57	0,89049	1,83	0,93969
1,06	0,96874	1,32	0,89464	1,58	0,89142	1,84	0,94261
1,07	0,96415	1,33	0,89338	1,59	0,89243	1,85	0,94561
1,08	0,95973	1,34	0,89222	1,60	0,89352	1,86	0,94869
1,09	0,95546	1,35	0,89115	1,61	0,86468	1,87	0,95184
1,10	0,95135	1,36	0,89018	1,62	0,89592	1,88	0,95507
1,11	0,94740	1,37	0,88931	1,63	0,89724	1,89	0,95838
1,12	0,94359	1,38	0,88854	1,64	0,89864	1,90	0,96177
1,13	0,93993	1,39	0,88785	1,65	0,90012	1,91	0,96523

Fonte: Peçanha (2014, p. 392)

Anexo 2– Tabela de valores de gama para função gama (continuação)

x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$
1,14	0,93642	1,40	0,88726	1,66	0,90167	1,92	0,96877
1,15	0,93304	1,41	0,88676	1,67	0,90330	1,93	0,97240
1,16	0,92980	1,42	0,88636	1,68	0,90500	1,94	0,97610
1,17	0,92670	1,43	0,88604	1,69	0,90678	1,95	0,97988
1,18	0,92373	1,44	0,88581	1,70	0,90864	1,96	0,98374
1,19	0,92089	1,45	0,88566	1,71	0,91057	1,97	0,98768
1,20	0,91817	1,46	0,88560	1,72	0,91258	1,98	0,99171
1,21	0,91558	1,47	0,88563	1,73	0,91467	1,99	0,99581
1,22	0,91311	1,48	0,88575	1,74	0,91683	2,00	1,00000
1,23	0,91075	1,49	0,88595	1,75	0,91906		
1,24	0,90852	1,50	0,88623	1,76	0,92137		
1,25	0,90640	1,51	0,88659	1,77	0,92376		

Fonte: Peçanha (2014, p. 392)

REFERÊNCIAS

BRUNETTI, Franco. **Mecânica dos Fluídos**. 2. Ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

Ciclones: Teoria (parte 1). 03 jul., 2017. 1 vídeo (10 min. 8 seg.). Publicado pelo canal Laboratório de Operações unitárias – LabOP UFMG. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=XLXyHVramH4&app=desktop>. Acesso em: 10 set. 2020.

CREMASCO, Marco Aurelio. **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidodinâmicos**. 3. Ed. São Paulo: Edgar Blucher, 2012.

GOMIDE, Reynaldo. **Operações unitárias: operações com sistemas sólidos granulares**. 1. Ed. São Paulo, 1983.

KOLB, David Allen; KOLB, Alice. **The Learning Style Inventory - Version 4.0**, 2011.

LACERDA, Aderjane Ferreira. **Estudo dos efeitos das variáveis geométricas no desempenho de ciclones convencionais e filtrantes**. 2007. 100 f. Dissertação (Doutorado) – Programa de Pós – Graduação em engenharia química, Universidade de Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

LAPPLE, C.E. **Processos usados em muitos tipos de coletores**. Engenharia química, 58 (1951) p. 144-151.

PERRY'S Chemical Engineers' Handbook. 7. Ed. New York, McGraw-Hill, 1997.

Linearização do modelo RRB. [S.l.:s.n], 2018. 1 vídeo (9 min. 11 seg.). Publicado pelo canal Operações Unitárias FURG-SAP. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=cnDKbSh_zAY&t=390s&ab_channel=Opera%C3%A7%C3%B5esUnit%C3%A1riasFURG-SAP. Acesso em: 10 set. 2020.

MORAES, Rafael Alessandro de. et al. Desenvolvimento e construção de um ciclone para separação de partículas a partir de materiais de baixo custo. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, São Francisco**, 12 nov. 2019. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-quimica/construcao-de-um-ciclone>. Acesso em: 28 nov. 2019.

SOUZA, Daniel Rolla de Camargo. **Desenvolvimento de um software aplicativo em linguagem C para cálculo de eficiência e perda de carga de ciclones**. 1994. 215 f. Dissertação (mestrado) – Faculdade de engenharia química, Universidade estadual de Campinas, Campinas, 1994.