



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA – CTEC
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA



DANIEL VICTOR FERNANDES DE ARAÚJO

DIMENSIONAMENTO E MONTAGEM DE UM HIDROCICLONE

Maceió, AL - 2020



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA – CTEC
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA



DANIEL VICTOR FERNANDES DE ARAÚJO

DIMENSIONAMENTO E MONTAGEM DE UM HIDROCICLONE

Trabalho de conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Prof^a. Dra. Dayana de Gusmão Coelho

Maceió, AL – 2020

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário Responsável: Valter dos Santos Andrade – CRB-4 - 1251

A663p Araújo, Daniel Victor Fernandes de.

Dimensionamento e montagem de um hidrociclone / Daniel Victor Fernandes de Araújo. – 2020.
53 f.

Orientadora: Dayana de Gusmão Coelho.

Coorientador: João Inácio Soletti.

Monografia (Trabalho de conclusão de curso em Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Alagoas, Centro de Tecnologia. Maceió, 2020.

Bibliografia: f. 52-53.

1. Hidrociclone. 2. Partículas - Separação. 3. Dimensionamento. I. Título.

CDU: 66.0

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por iluminar meu caminho nos momentos mais difíceis e permitir que tudo isso acontecesse.

Aos meus pais, Rosimeires e Lenison, por todo amor, atenção e apoio imprescindíveis para a minha formação, sendo exemplos de luta, determinação e coragem. Se há algo que faz diferença na formação da personalidade e na vida de uma pessoa é o amor que ela recebe. *Vocês me educaram com amor, se dedicaram à minha educação como ser humano, me deram a vida. Vocês fizeram de mim a pessoa que hoje sou, e eu só tenho motivos para agradecer. Sou e serei eternamente grato por tudo o que vocês dedicaram a mim.* Sem a ajuda dos meus pais, seria praticamente impossível de chegar até aqui.

Aos meus irmãos, Danielle e Gustavo, que moraram e viveram praticamente toda a minha vida ao meu lado, e por todos os momentos que passamos juntos, sejam eles recheados de alegria e amor. E também aos meus irmãos Juliana, Tiago e Rodrigo, que apesar de não morarem comigo, foram importantes no processo de minha educação. Amo todos os meus irmãos, *sendo eles o maior presente dado por Deus e por meus pais.* Sem a presença dele, minha vida se tornaria muito mais solitária e sem emoção.

A todos os meus familiares que acreditaram nesse sonho. Em especial, a minha Tia Rosilane, minha Tia-avó Antônia e minha avó Lindinalva, por todo apoio dado.

A todos os meus amigos e colegas da UFAL, em especial as minhas amigas Ana Carolina, Andreza, Bruna, Dayane, Fernanda, Mariana B., Mariany, Nina, Thais, Vitória e Ysley, por toda amizade, amor, atenção, ajuda e respeito que sempre me deram, e a minha colega Larissa A., por ter me recebido bem e acolhido no laboratório (LASSOP). Sem elas esse mundo se tornaria um grande vazio, e muito dos “desafios” enfrentados por mim, seriam muitos mais complicados de se resolver. E aos meus amigos, Alysson, Alef, Claudemir, Diogo, Elder, Filipe, Franklin, Leonardo e Valdeir, que da mesma forma que minhas amigas, foram imprescindíveis na minha formação, sendo tais verdadeiros “brothers”.

Amigos são pessoas especiais.... Estejam perto ou não, demonstrem ou não, mas são sempre especiais...

A todos os meus professores, que foram tão importantes na minha vida acadêmica e no meu desenvolvimento profissional, em especial, aos professores Dayana, João Inácio, Isnaldo, Viviane, Soraya e Wagner, pelos ensinamentos, orientações e confiança. Por sempre acreditar e me incentivar a buscar melhores resultados. Fatores fundamentais para a realização deste trabalho. *A vocês devo toda a minha gratidão, obrigado por tudo que me ensinaram e por nunca desistir de exercer a sua profissão.*

A todos que direta ou indiretamente participaram para minha formação, tornando o ambiente da Universidade um lugar agradável. Contribuindo que este sonho se tornasse realidade.

Enfim, obrigado, por nunca desistirem de mim e por acreditar no meu futuro, sem vocês, eu nada seria.

RESUMO

Um hidrociclone é um dispositivo mecânico projetado para reduzir ou aumentar a concentração de uma fase dispersa, sólida, líquida ou gasosa de diferente densidade, por meio de forças centrípetas ou centrífugas dentro de um vórtice. Os hidrociclones são equipamentos muito utilizados na indústria minero-metalúrgica, petroquímica e alimentícia, para classificar e separar misturas de partículas leves e pesadas. Além do baixo custo, os hidrociclones apresentam pouca necessidade de manutenção, por não possuírem peças móveis, além disso podem ser operados tanto a baixas como a altas temperatura e pressão, sendo equipamentos bastante versáteis. Existem algumas classificações de tipos de hidrociclones de acordo com as relações de suas dimensões básicas, sendo os mais conhecidos, os de geometria Bradley e Rietema. Os parâmetros estão diretamente relacionados a D_c (diâmetro da parte cilíndrica do ciclone). Um parâmetro importante é o diâmetro de corte (D^* ou D_{50}), que corresponde ao tamanho de partículas com 50% de probabilidade de serem direcionadas ao underflow ou overflow. Conhecer as relações entre as medidas do equipamento, é muito importante para o seu dimensionamento industrial. O presente trabalho consistiu na montagem e dimensionamento de um hidrociclone, além do cálculo de parâmetros importantes para o estudo de hidrociclones em relação ao hidrociclone construído. Para a realização de testes experimentais, foi usado, água com partículas sólidas de areia (média e fina). Os resultados foram satisfatórios, o hidrociclone funcionou corretamente com uma boa eficiência de separação.

Palavra-Chave: Hidrociclone; partículas; dimensionamento; acrílico

ABSTRACT

A hydrocyclone is a mechanical device designed to reduce or increase the concentration of a dispersed phase, solid, liquid or gas of different density, by means of centripetal forces or centrifugal forces within a vortex. The hydrocyclones are equipment widely used in the mining metallurgical, petrochemical and food industries, to classify and separate mixtures of light and heavy particles. Besides the low cost, hydrocyclones have little need for maintenance, as they have no moving parts, and can be operated at low as well as high temperature and pressure, being very versatile equipment. There are some classifications of hydrocyclone types according to the relationship of their basic dimensions, the best known being the geometry Bradley and Rietema. The parameters are directly related to D_c (diameter of the cyclone cylindrical part). An important parameter is the cutting diameter (D^* or D_{50}), which corresponds to the particle size that is 50% likely to be directed to underflow or overflow. Knowing the relationships between equipment measurements is very important for your industrial design. The present work consisted in the assembly and dimensioning of a hydrocyclone, in addition to the calculation of important parameters for the study of hydrocyclones in relation to the constructed hydrocyclone. For carrying out experimental tests, water with solid sand particles (medium and fine) was used.

Keywords: Hydrocyclone; particles; design; acrylic.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenho esquemático de um hidrociclone.....	15
Figura 2 - Dimensões geométricas de um hidrociclone convencional.....	16
Figura 3 - Curva de partição de um hidrociclone.....	18
Figura 4 - Diagramas ilustrativos de três formas e descarga do underflow do hidrociclone....	19
Figura 5 - Hidrociclone Construído.....	25
Figura 6 - Esquema de um hidrociclone qualquer.....	26
Figura 7 – Morsa/torno de bancada utilizado.....	27
Figura 8 – Moto esmeril de bancada utilizado.....	27
Figura 9 - Ilustração do corte feito no esmerio do duto de alimentação.....	27
Figura 10 - Plano circular superior.....	27
Figura 11 - Ilustração do traçado da parte cônica.....	28
Figura 12 – Redução concêntrica de alumínio.....	28
Figura 13 – Protótipo hidrociclone "Rietema".....	28
Figura 14 – Hidrociclone “Bradley”.....	28
Figura 15 – Sistema simples para filtrar a água do poço.....	29
Figura 16 - Resultado da separação do sistema Água-Areia.....	30
Figura 17 – Curva de partição amostra 01.....	32
Figura 18 – Curva de partição amostra 02.....	32
Figura 19 – Linearização, modelo GGS relatava a amostra 01.....	33
Figura 20 – Linearização, modelo GGS relatava a amostra 02.....	34
Figura 21 – Linearização do Modelo RRB, amostra 01.....	35
Figura 22 – Linearização do Modelo RRB, amostra 02.....	35
Figura 23 – Linearização do Modelo Sigmoide, amostra 01.....	36

Figura 24 – Linearização do Modelo Sigmoides, amostra 02.....	37
Figura 25 – Amostra do Underflow e do overflow.....	38
Figura 26 – Regressão linear, amostra 01 da alimentação.....	39
Figura 27 – Regressão linear, amostra 02 da alimentação.....	40

LISTA DE SÍMBOLOS

D_c	Diâmetro do Cilindro
D_i	Diâmetro do duto de alimentação
D_o	Diâmetro do duto de <i>overflow</i>
D_u	Diâmetro do orifício do <i>underflow</i>
L	Comprimento total
h	Comprimento da seção cilíndrica
H	Comprimento do tronco de cone
ℓ	Comprimento do <i>Vortex Finder</i>
θ	ângulo do tronco do cone
Q_u	Vazão volumétrica da corrente de <i>underflow</i>
Q	Vazão volumétrica da corrente de alimentação
C_v	Concentração volumétrica de sólidos na corrente de alimentação
C_{vu}	Concentração volumétrica de sólidos na corrente de <i>underflow</i>
R_L	Razão de líquido
η	Eficiência total
C_w	Concentração mássica de sólidos na corrente de alimentação
C_{wu}	Concentração mássica de sólidos na corrente de <i>underflow</i>
W	Vazão mássica da corrente de alimentação
W_u	Vazão mássica da corrente de <i>underflow</i>
m_u	Massa no <i>underflow</i>
m_a	Massa na alimentação
η_G	Eficiência granulométrica
η'_G	Eficiência granulométrica reduzida

d_{50}	Diâmetro de corte
d'_{50}	Diâmetro de corte reduzido
Eu	Número de Euler
ρ	Massa específica
ΔP	Diferença de pressão
Re	Número de Reynolds
k_4	Parâmetro para a correlação de Euler
k_5	Parâmetro para a correlação de Euler
k_6	Parâmetro para a correlação de Euler
d_s	Densidade do sólido
V	Volume da alimentação
V_u	Volume do <i>underflow</i>
X	Fração passante
D	Diâmetro médio da partícula
K	Diâmetro de partícula tal que 100% da massa de amostra correspondem a partículas menores que K
m	Parâmetro do modelo Gaus-Gaudin-Schuman (GGS)
D'	Diâmetro de partícula tal que 63,2% da massa de amostra correspondem a partículas menores que D'
n	Parâmetro do modelo Rosin-Ramler-Bennet (RRB)
D_{50}	Representa o diâmetro de partícula tal que 50% da massa da amostra referem-se a partículas menores que D_{50}
p	Parâmetro do modelo Sigmoidal
v	Velocidade na secção cilíndrica
ϑ_a	Viscosidade cinemática da água

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	OBJETIVOS.....	15
2.1	Gerais	15
2.2	Específicos	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.1	Funcionamento de um hidrociclone.....	16
3.2	Aplicações/Usos.....	17
3.3	Caracterização de um hidrociclone.....	18
3.4	Influência dos parâmetros na classificação dos hidrociclones.....	20
3.5	Influência das variáveis operacionais na classificação por hidrociclone.....	23
3.6	Conceitos básicos relativos à separação de hidrociclones	25
3.6.1	Razão de líquido (R_L)	25
3.6.2	Análise granulométrica.....	26
3.6.3	Eficiência total (η).....	26
3.6.4	Eficiência total reduzida η'	27
3.6.5	Eficiência granulométrica (η_G).....	27
3.6.6	Eficiência granulométrica reduzida η_G'	27
3.6.7	Diâmetro de corte (d_{50}) e diâmetro de corte reduzido (d'_{50})	28
3.6.8	Número de Euler.....	28
3.7	Modelos de separação	29
4	METODOLOGIA	31
4.1	Materiais utilizados na montagem do hidrociclone	31
4.1.1	Etapa de construção	31
4.1.2	Etapa de estudo	32
4.2	Montagem do hidrociclone	32
4.3	Estudos experimentais realizados.....	36
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
5.1	Razão de líquido	38
5.2	Análise granulométrica	39
5.3	Eficiência total (η).....	46
5.4	Eficiência total reduzida η'	47
5.5	Número Euler.....	47
5.6	Eficiência granulométrica η_G	48

5.7	Eficiência granulométrica reduzida η' e diâmetro de corte reduzido (d_{50}')	50
6	CONCLUSÃO	51
7	REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Svarovsky (2000), de maneira geral, as tecnologias de separação são indispensáveis para o ciclo produtivo das indústrias. A crescente demanda pela pureza dos produtos, especialmente nas indústrias farmacêuticas, de alimentos e de biotecnologia, a redução gradual na qualidade das matérias-primas (um problema sério na indústria de processamento mineral) e a crescente demanda por aceitabilidade ambiental de resíduos, por exemplo, elucidam o fato supracitado.

Especificamente, a separação sólido-líquido está presente em boa parte dos processos industriais. Na verdade, Rushton, Ward e Holdich (2000) comentam que é difícil identificar um processo em larga escala industrial sem a presença de alguma forma de separação sólido-líquido que, fundamentalmente, baseia-se em dois modos de separação: filtração e sedimentação num campo de força (gravitacional ou centrífugo).

Os hidrociclones pertencem a um importante grupo de equipamentos destinados à separação sólido-líquido e líquido-líquido em um campo centrífugo. Patenteados e conhecidos desde o final do século XIX, quando eram empregados primeiramente na remoção de areia de águas, os hidrociclones permaneceram com o uso pouco difundido, durante algumas décadas, restrito apenas a algumas atividades (VIEIRA, 2006). Somente a partir de 1940 iniciou-se a fabricação desse equipamento com tecnologias avançadas. Nos anos seguintes, milhares de hidrociclones foram instalados e hoje esses equipamentos são considerados padrões em muitas empresas. Trata-se de um equipamento versátil, de capacidade elevada e sem partes móveis. (SAMPAIO; OLIVEIRA; SILVA, 2007).

Comparados às centrífugas, que necessitam de uma enorme quantidade de energia nas operações em altas velocidades de rotação, hidrociclones operam de forma mais econômica, sendo que a quantidade de energia a ser fornecida, deve superar somente a queda de pressão, possuem uma alta confiabilidade operacional, visto que eles são de simples construção, sem partes móveis (SILVA, 2012).

É em função dessa versatilidade de que os hidrociclones são dotados, que se permite a aplicação destes equipamentos nos mais variados processos de separação sólido-líquido, tais como: a classificação seletiva, a deslamagem, o espessamento, o fracionamento, a pré-concentração, a recuperação de líquidos etc. Devido a essas aplicações, os hidrociclones tornaram-se, atualmente, equipamentos bastantes utilizados tanto na separação sólido-fluido quanto na separação líquido-líquido, podendo ser encontrados em diversos

setores industriais, tais como, têxtil, alimentício, químico, petroquímico, minero-metalúrgico, etc (VIEIRA, 2006).

Os hidrociclones são equipamentos simples e de fácil construção, sendo basicamente dotados de uma parte cilíndrica acoplada a uma região cônica. As dimensões geométricas de cada parte são importantes no processo de separação, pois estão diretamente relacionadas com a capacidade e o poder de classificação destes equipamentos (VIEIRA, 2006).

Em resumo, o princípio básico de separação nesse equipamento é a sedimentação centrífuga: as partículas suspensas são sujeitas à aceleração centrífuga, que as separa do fluido. A separação depende fortemente do tamanho da partícula (ou de sua densidade, se o sistema for não-homogêneo) (SILVA, 2014).

2 OBJETIVOS

2.1 Gerais

Realização da montagem e dimensionamento de um hidrociclone em escala de bancada.

2.2 Específicos

- Obtenção de parâmetros e dimensões para separação de sistemas sólido-líquido;
- Construção e avaliação de protótipo de hidrociclones;
- Montagem do hidrociclone
- Avaliar a eficiência dos mesmos na separação;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Funcionamento de um hidrociclone.

O fenômeno de esvaziamento de um tanque, por um dreno central em sua base, provoca o escoamento rotacional livre do fluido através do dreno e a formação de um vórtice no meio da massa fluida (KELLY, 1982). Observando-se o comportamento de uma partícula isolada em suspensão, o seu movimento está associado a pelo menos três componentes de velocidade, a saber:

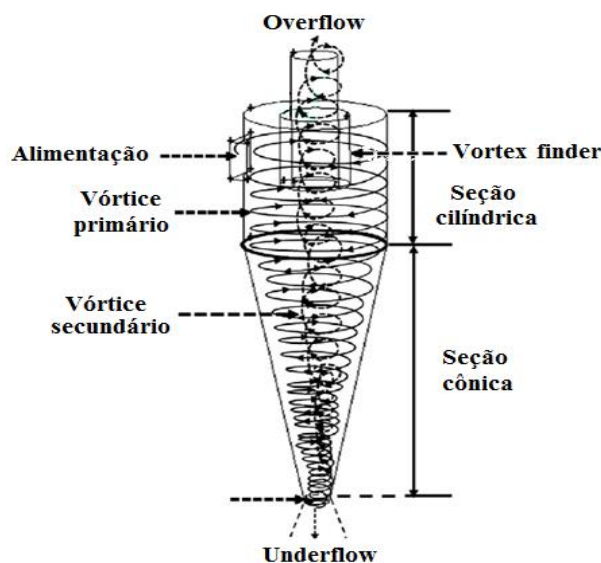
- (i) Velocidade linear, tangencial à trajetória circular da partícula;
- (ii) Velocidade angular, referente ao seu deslocamento radial em relação ao eixo da coluna de ar no dreno central;
- (iii) Velocidade vertical, referente a um dado plano de referência (a base do tanque, do exemplo).

O exame de cada velocidade atuante nas partículas, em processamento no hidrociclone, permitirá compreender a classificação de partículas no processo de hidrociclonagem, entretanto esse não é o objetivo neste trabalho (SAMPAIO, 2007).

O hidrociclone é um equipamento que emprega a separação centrífuga sem a necessidade de partes mecânicas móveis. É similar a uma centrífuga, porém com um custo inferior. Para ambos os separadores, uma diferença de densidade entre a fase dispersa e o líquido é um requisito essencial, pois se essa diferença de densidade for pequena também é a efetividade (SILVA, 2014).

Basicamente um hidrociclone consiste de uma parte cilíndrica seguida de uma parte cônica que possui, em seu vértice, uma abertura, denominada Apex, pela qual descarrega o underflow. A alimentação é introduzida tangencialmente à seção cilíndrica, em que há um tubo coaxial denominado vortex finder, pelo qual é descarregado o overflow (Figura 1).

Figura 1: Desenho esquemático de um hidrociclone



Fonte: SCHEID et al, 2015

Seu funcionamento se deve à alimentação tangencial na parte cilíndrica do mesmo. A suspensão inicia um movimento espiralado descendente em direção à parede do equipamento, por ação da força centrífuga. Ao atingir o orifício de *underflow*, que tem um tamanho pequeno, parcela da suspensão alimentada sai por essa corrente e o restante inverte a direção do movimento e escoa para cima, em sentido contrário ao do primeiro vórtice, formando um vórtice secundário que percorre o centro do separador e atinge o duto de *overflow*. As partículas que atingem a parede do hidrociclone (as maiores e/ou mais densas) quase sempre são coletadas na corrente de *underflow*, e as que chegam ao centro (as menores e/ou menos densas) saem pelo *overflow* (SILVA, 2014). As vazões do *underflow* e *overflow* são obtidas pelo diâmetro dos mesmos e pela pressão em que o equipamento é submetido para operar. Todo hidrociclone opera em conjunto com uma bomba centrífuga que é responsável por manter essa “pressão de trabalho” do mesmo (HIDROCI-CLONE, 2006).

Em resumo, o princípio básico de separação nesse equipamento é a sedimentação centrífuga: as partículas suspensas são sujeitas à aceleração centrífuga, que as separa do fluido. A separação depende fortemente do tamanho da partícula (ou de sua densidade, se o sistema for não-homogêneo).

3.2 Aplicações/Usos

Os hidrociclones podem ser utilizados nos seguintes casos:

- Separação de partículas (suspensas em um líquido de baixa densidade) por tamanho, densidade ou velocidade terminal de queda;
- Remoção de sólidos suspensos de um líquido;
- Separação de líquidos imiscíveis de diferentes densidades;
- Remoção de água de suspensões para fornecer um produto mais concentrado;
- Separação de dispersões líquido-líquido e líquido-gás;
- Remoção de gases dissolvidos em líquidos.

Segundo Svarovsky (2000), as aplicações de hidrociclones na indústria se enquadram em oito categorias de placas de separação bifásica, sendo o líquido o meio de suspensão.

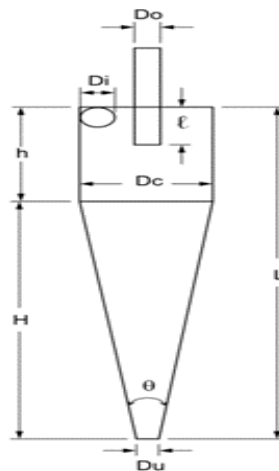
1. Clarificação de líquido
2. Espessamento de chorume
3. Lavagem de sólidos
4. Classificação de sólidos por tamanho de partícula
5. Classificação de sólidos de acordo com a densidade ou a forma das partículas
6. Medição do tamanho da partícula
7. Desgaseificação de líquidos
8. Separação de dois líquidos imiscíveis (a fase dispersa pode ser mais leve ou mais pesada que a fase contínua)

Cada aplicação listada acima tem seus requisitos e objetivos particulares, e exige mudanças no projeto e na operação do ciclone para tornar o ciclone mais adequado para cada caso. Em princípio, no entanto, qualquer hidrociclone separa partículas (sólidos, gotículas ou bolhas de gás) da fase dispersa do líquido (fase contínua) com base na diferença de densidade entre as fases, e a separação depende muito do tamanho da partícula (ou densidade de partículas se o sistema não for homogêneo) (SVAROVSKY, 2000).

3.3 Caracterização de um hidrociclone.

A Figura 2 mostra o esquema de um hidrociclone convencional com suas principais dimensões geométricas:

Figura 2: Dimensões geométricas de um hidrociclone convencional.



Fonte: SILVA, 2014.

- D_c – Diâmetro do cilindro;
- D_i – Diâmetro do duto de alimentação;
- D_o – Diâmetro do duto de *overflow*;
- D_u – Diâmetro do orifício de *underflow*;
- L – Comprimento total;
- h – Comprimento da seção cilíndrica;
- H – Comprimento do tronco do cone;
- ℓ – Comprimento do *vortex finder*;
- θ – ângulo do tronco do cone.

Os hidrociclones são agrupados em famílias. Define-se como família de hidrociclones um conjunto específico de separadores que mantêm entre si uma proporção constante e exclusiva de suas principais dimensões geométricas com o diâmetro da parte cilíndrica. Essa proporcionalidade existente entre as dimensões geométricas é extremamente importante no processo de separação, pois está diretamente relacionada com a capacidade e o poder de classificação destes equipamentos (VIEIRA, 2006).

Verifica-se, na prática, que famílias de hidrociclones, dotadas de uma região cilíndrica relativamente grande, são equipamentos que oferecem uma maior capacidade de processamento, enquanto as que têm a altura da parte cônica de maior dimensão induzem a uma maior eficiência de coleta. É diante da enorme versatilidade oferecida pelos hidrociclones, que se encontra uma gama considerável de famílias empregadas tanto na

indústria como no âmbito acadêmico (VIEIRA, 2006). As principais relações geométricas referentes a essas famílias são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Razões entre as principais relações geométricas pertencentes a algumas das famílias clássicas de hidrociclones.

Família de hidrociclones	D _c (m)	Proporções geométricas (Figura 2)				
		D _i /D _c	D _o /D _c	D _u /D _c	L/D _c	θ
Rietema	0,075	0,280	0,340	0,400	5	20
Bradley	0,038	0,133	0,200	0,330	6,85	9°
Mosley	0,022	0,154	0,214	0,570	7,43	6°
Mosley	0,044	10,160	0,250	0,570	7,71	6°
Warman	0,076	0,290	0,200	0,310	4,00	15°
Hi-Klone	0,097	0,175	0,250	0,920	5,60	10°
RW 2515	0,125	0,200	0,320	0,800	6,24	15°
Demco	0,051	0,217	0,500	1,000	4,70	25°
Demco	0,102	0,244	0,313	0,833	3,90	20°

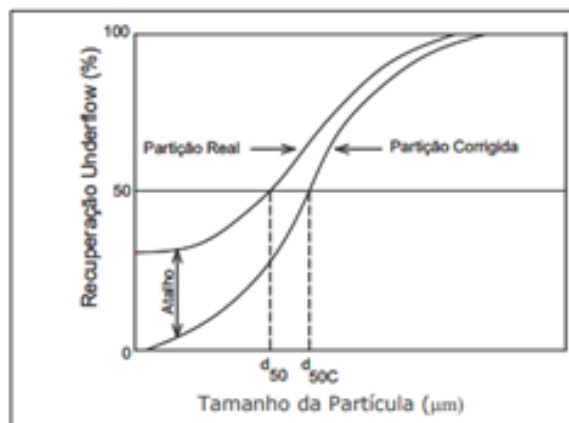
Fonte: VIEIRA, 2006.

De acordo com Svarovsky (2000) existem, três categorias de aplicação de hidrociclones na indústria, dentre outras: clarificação, espessamento e classificação: O objetivo da clarificação consiste em produzir um *overflow* limpo ou, em outras palavras, maximizar a recuperação em massa de sólidos da alimentação. A clarificação do líquido é o interesse primário, não a concentração de sólidos no *underflow*. Já no espessamento, objetiva-se atingir uma alta concentração de sólidos no *underflow*, e qualquer perda de partículas para o *overflow* é indesejável, mas de importância secundária. Por fim, a classificação consiste no emprego de hidrociclones para a separação sólido-líquido por tamanho de partícula. Como a eficiência granulométrica desse equipamento aumenta com o tamanho da partícula, ele pode ser usado para dividir os sólidos alimentados em frações de finos e de grossos.

3.4 Influência dos parâmetros na classificação dos hidrociclones

Na operação do hidrociclone há uma regra, quase universal, para utilização do d_{50} (diâmetro de corte), isto é, o diâmetro ou tamanho de partículas com 50% de probabilidade de ir para o *underflow* ou *overflow*, durante a classificação. A determinação desse valor dá-se por meio da análise granulométrica, em laboratório, de amostras dos fluxos da alimentação e *underflow*. Os resultados das análises granulométricas são plotados em um gráfico, em que, no eixo das abscissas estão os tamanhos das partículas em mm e, no eixo das ordenadas, estão os valores de recuperação do *underflow* (SAMPAIO, 2007). A curva obtida é chamada de curva de partição, na qual se determina o diâmetro mediano de partição, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3: Curva de partição de um hidrociclone



Fonte: SAMPAIO, 2007

O diâmetro de corte d_{50} é influenciado por inúmeras variáveis, sob o aspecto conceitual (parâmetros de equipamento) e pela operação em si. Nos hidrociclones industriais pouco se constata alterações desses parâmetros, pois as variações podem implicar em mudanças no projeto do equipamento.

Entretanto, os hidrociclones usados em escala piloto permitem modificações de alguns parâmetros. Aqui serão discutidos apenas os parâmetros considerados importantes na operação de hidrociclones: diâmetro do hidrociclone, diâmetro e comprimento do vortex finder, área do injetor (inlet), diâmetro do apex, comprimento da parte cilíndrica e ângulo de cone (MULAR, 2003).

Diâmetro do hidrociclone: Na prática, o diâmetro de corte é determinado pelas dimensões do hidrociclone. Este parâmetro exerce maior influência no diâmetro de corte da classificação, e o diâmetro interno da seção cilíndrica determina a capacidade do

equipamento. A classificação em granulometrias finas requer a utilização de hidrociclones com pequenos diâmetros, exigindo que se trabalhe com grupos desses equipamentos, conhecidos como baterias, instalados em paralelo, para capacidades elevadas. Resumindo, quanto maior o diâmetro do hidrociclone, maior será o corte granulométrico da classificação, porque esses equipamentos proporcionam menor aceleração às partículas, isto é, a força de aceleração é inversamente proporcional ao diâmetro do hidrociclone (SAMPAIO, 2007).

Área do injetor (AI): Determina a velocidade de entrada e, consequentemente, a velocidade tangencial, que também varia com o raio da seção cilíndrica. No dimensionamento do hidrociclone é comum usar, para cálculo da área do injetor (AI) de um hidrociclone com diâmetro D (SAMPAIO, 2007).

Variações na área de entrada implicarão em variações na capacidade (kg/h) do hidrociclone e na redução da pressão. Portanto, torna-se indispensável a realização de ensaios em unidade piloto para otimização deste parâmetro (SAMPAIO, 2007).

Comprimento da seção cilíndrica e ângulo de cone: São os parâmetros que afetam o tempo de residência da polpa no hidrociclone. É comum, o uso do comprimento da seção cilíndrica C igual ao seu diâmetro D . O aumento de C eleva o tempo de residência e, em consequência, se obtém uma classificação mais fina (SAMPAIO, 2007).

Para um hidrociclone com seção cilíndrica de diâmetro fixo, a diminuição do ângulo da seção cônica aumenta o comprimento da seção cilíndrica, induzindo um aumento do tempo de residência. Nesse caso, a classificação também será mais fina (SAMPAIO, 2007).

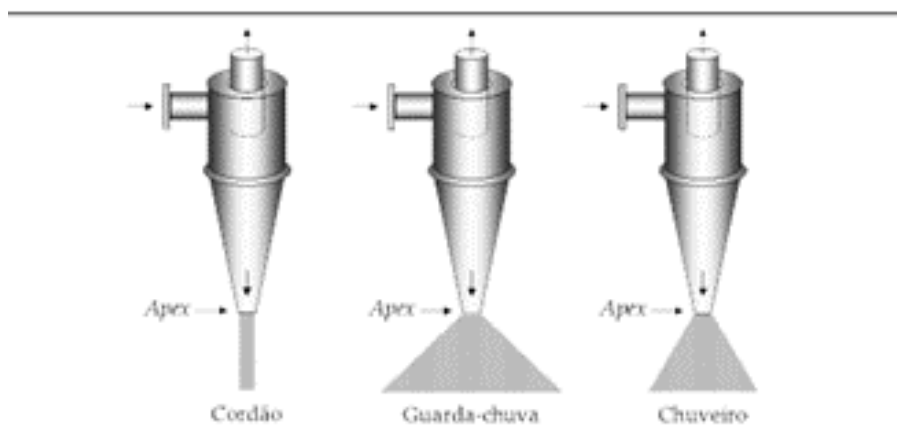
Diâmetro e altura do vortex finder: O diâmetro do *vortex finder* situa-se entre 35 e 40% do diâmetro interno do hidrociclone, entretanto não se trata de uma regra absoluta (SAMPAIO, 2007). As dimensões deste parâmetro exercem uma influência significativa sobre a:

- (i) Eficiência da classificação e capacidade (kg/h) do hidrociclone;
- (ii) Pressão, cujo valor pode reduzir ou aumentar.

Para um mesmo hidrociclone, acréscimos no diâmetro do *vortex finder* provocam também acréscimos no diâmetro de corte de classificação e na percentagem de sólidos no *overflow* (SAMPAIO, 2007).

Diâmetro do Apex: O aumento do diâmetro do apex diminui o diâmetro de classificação. A relação inversa é mais limitada, pois as partículas maiores só podem ser descarregadas pelo apex. Se o diâmetro do apex for muito pequeno, deverá ocorrer um acúmulo de material grosso no cone, aguardando a sua descarga. Conseqüentemente, partículas que já foram rejeitadas pelo *vortex finder* podem retornar e serão descarregadas, o que aumentará o diâmetro da classificação granulométrica. Quando a operação resulta na descarga do *underflow*, segundo o formato de cordão, denota uma sobrecarga do apex com partículas grossas ou, de modo inadvertido, seu estrangulamento. Nesta situação, essas partículas são forçadas a sair pelo *overflow*, prejudicando, de forma expressiva, a eficiência da classificação. Por outro lado, a descarga em forma de guarda-chuva é característica de um apex muito aberto. Finalmente, o operador percebe a operação eficiente do hidrociclone, quando o *underflow* descarrega na forma de um cone de ângulo pequeno, ou chuveiro, que é a posição adequada à classificação perfeita (SAMPAIO, 2007). As três situações estão esquematizadas na Figura 4.

Figura 4: Diagramas ilustrativos de três formas e descarga do *underflow* do hidrociclone



Fonte: SAMPAIO, 2007

3.5 Influência das variáveis operacionais na classificação por hidrociclone

As variáveis operacionais são aquelas que o operador pode modificar por razões diversas, decorrentes, em muitos casos, das peculiaridades inerentes à pesquisa realizada e/ou operação (SAMPAIO, 2007). Aquelas mais importantes à operação dos hidrociclones serão discutidas neste trabalho e constam da relação a seguir:

- (i) Concentração de sólidos na alimentação;
- (ii) Distribuição granulométrica do minério;
- (iii) Formas das partículas na alimentação;
- (iv) Pressão na alimentação;
- (v) Viscosidade e densidade da polpa;

Percentagem de sólidos na alimentação: O aumento dessa variável tende a aumentar o diâmetro de corte. Logo, quanto maior o valor desta variável, as partículas mais grossas enfrentarão mais obstáculos para atravessar a zona de partículas mais finas e decantam na zona de centrifugação (SAMPAIO, 2007).

Distribuição granulométrica da alimentação: Esta variável determina a relação entre as frações retida e passante na malha de classificação, ou seja, os sólidos residuais no *overflow*, que influenciarão no diâmetro de classificação (SAMPAIO, 2007).

Pressão da alimentação: Reservam-se cuidados especiais com o aumento da pressão na alimentação do hidrociclone, por várias razões. Na prática, aumenta-se a pressão quando a velocidade de rotação (rpm) da bomba é elevada. O aumento da pressão provoca um acréscimo na capacidade (kg/h) do hidrociclone, que implicará no aumento da velocidade tangencial e, por consequência, estende o mesmo efeito à velocidade angular. O resultado é um campo centrífugo com maior intensidade. Portanto, prover maior valor à pressão de alimentação significa oferecer maior chance de decantação centrífuga às partículas menores, diminuindo o diâmetro de corte. No entanto, operações com demasiado valor da pressão (superiores a 7,0 atm) resultam em excessivos custos operacionais e de manutenção da bomba de polpa, o que é indesejado (SAMPAIO, 2007).

Entende-se por queda de pressão na hidrociclonagem, a diferença entre as pressões de entrada do hidrociclone e àquela medida no *overflow*. O hidrociclone deve sempre descarregar sob pressão atmosférica, isto é, o ideal seria que a pressão de entrada fosse igual à queda de pressão (SAMPAIO, 2007).

3.6 Conceitos básicos relativos à separação de hidrociclones

Alguns dos conceitos fundamentais envolvidos na temática dos hidrociclones serão apresentados abaixo:

3.6.1 Razão de líquido (R_L)

Segundo Silva (2014), quando a suspensão sólido-líquido é alimentada lentamente no hidrociclone, pode-se atingir uma condição em que não se formam vórtices internos, pois não há movimento rotacional do fluido, nem ação do campo centrífugo. Nesse caso, ocorre, na verdade, uma divisão do escoamento, e o separador funciona como uma conexão em “T”, que é suficiente para permitir o arraste de partículas para o underflow. Esse fenômeno, popularmente conhecido como “efeito T”, é inerente ao escoamento, independente da existência de campo centrífugo e, inevitavelmente, contribui para o processo de separação. O grau de extensão desse fenômeno pode ser relacionado à razão de líquido, de acordo com a equação (1).

$$R_L = \frac{Q_u(1 - C_{vu})}{Q(1 - C_v)} \quad (1)$$

Segundo Silva (2014), a razão de líquido corresponde ao quociente entre a vazão volumétrica de líquido da corrente de *underflow* e a vazão volumétrica de líquido da alimentação. Quanto mais se descarrega líquido na corrente concentrada em sólidos, maior também é a razão de líquido. Ela está diretamente relacionada ao poder de recuperação e de concentração de sólidos em hidrociclones: quanto maior R_L , maior também será a eficiência de coleta, pois se uma quantidade superior de líquido for descarregada no *underflow*, mais partículas serão arrastadas com o fluido. Além disso, na medida em que R_L aumenta, as restrições ao escoamento impostas pelo vórtice externo do hidrociclone também são superiores (já que uma maior quantidade de suspensão ocupa o vórtice externo), de forma a reduzir as vazões volumétricas de alimentação admitidas pelo sistema. Quanto maior for a razão de líquido, mais diluída será a corrente de *underflow*.

3.6.2 Análise granulométrica

Segundo Massarani (2002), a análise granulométrica consiste na distribuição de tamanho das partículas, expressa por $X = X(d_p)$, sendo X a fração mássica das partículas com diâmetro menor que d_p . A função X é crescente e pode ser representada por modelos estatísticos apropriados, por exemplo, Gates-Gaudin-Schumann (GGS), Rosin-Rammler-Bennet (RRB), sigmoide. No estudo do desempenho de qualquer tipo de hidrociclone, as análises granulométricas das correntes permitem a obtenção do diâmetro de corte (reduzido).

3.6.3 Eficiência total (η)

A eficiência total consiste no quociente entre a vazão mássica de sólidos coletados no underflow e a vazão mássica de sólidos alimentados. Contempla todos os sólidos descarregados no underflow, independentemente do que os levou a serem separados, ou seja, considera tanto os sólidos arrastados devido ao “efeito T” quanto aqueles separados devido à ação do campo centrífugo.

$$\eta = \frac{C_{wu}W_u}{C_w W} \quad (2)$$

Segundo Svarovsky (2000), há uma série de condições operacionais que afetam o desempenho de hidrociclones. Talvez, as mais importantes sejam a queda de pressão e a concentração da alimentação. Acréscimos na queda de pressão de um determinado hidrociclone elevam a eficiência de separação devido ao aumento da vazão alimentada, porém a lei da redução de retorno se aplica. Aumentando a concentração da alimentação, a eficiência de separação diminui, em virtude do efeito da concentração na velocidade terminal das partículas. Sendo assim, hidrociclones operam com alimentações diluídas sempre que uma alta recuperação de sólidos for solicitada.

Segundo Andrade(2007), a eficiência total de separação do hidrociclone é definida como sendo a razão entre a massa total de sólidos coletado no concentrado e a massa total de sólidos na alimentação. Ou seja a Equação (2) pode ser rescrita como:

$$\eta = \frac{m_u}{m_a} \quad (3)$$

3.6.4 Eficiência total reduzida (η')

Ao contrário da eficiência total (η), a eficiência total reduzida (η') contempla apenas os sólidos coletados no *underflow* a partir do efeito exclusivo do campo centrífugo, desconsiderando as partículas separadas devido ao “efeito T” (seção 3.6.1). Como esse fenômeno está relacionado à razão de líquido, esta é descontada da eficiência total.

$$\eta' = \frac{(\eta - R_L)}{(1 - R_L)} \quad (4)$$

3.6.5 Eficiência granulométrica (η_G)

A eficiência granulométrica (η_G) está relacionada ao poder de separação do hidrociclone frente ao tamanho das partículas presentes na corrente de alimentação. Considerando um determinado tamanho de partícula, η_G consiste na razão entre a taxa mássica dessas partículas no *underflow* e a taxa mássica de sólidos com esse mesmo tamanho na alimentação. Se conhecida a distribuição granulométrica do material particulado da alimentação do hidrociclone, a eficiência granulométrica pode ser genericamente representada pela Equação (5) (SILVA, 2014).

$$\eta_G = \eta \frac{\frac{dX_u}{d(dp)}}{\frac{dX_a}{d(dp)}} \quad (5)$$

3.6.6 Eficiência granulométrica reduzida (η'_G)

A eficiência granulométrica reduzida (η'_G) admite apenas a atuação do campo centrífugo aplicado na separação das partículas por tamanho, e exclui as partículas separadas devido ao efeito “T”. Sendo assim, a razão de líquido é descontada da eficiência granulométrica.

$$\eta'_G = \frac{\eta_G - R_L}{1 - R_L} \quad (6)$$

3.6.7 Diâmetro de corte (d_{50}) e diâmetro de corte reduzido (d'_{50})

O diâmetro de corte (d_{50}) pode ser especificado de diferentes formas. Dentre elas, a definição de Massarani (2002), diz que d_{50} consiste no diâmetro das partículas coletadas com 50% de eficiência no separador. Essa variável consiste em um valor de referência para o poder de classificação, utilizado para comparar desempenho de hidrociclones.

Trata-se do diâmetro da partícula que é separada com uma eficiência granulométrica de 50%, ou seja, as partículas com diâmetro d_{50} têm a mesma chance de serem direcionadas tanto para o *underflow* quanto para o *overflow*. Partículas de tamanho maior que o diâmetro de corte serão coletadas com uma eficiência granulométrica superior a 50%, enquanto partículas menores que d_{50} serão coletadas com uma eficiência abaixo de 50%. A eficiência total (η) dos hidrociclones relaciona-se de maneira inversamente proporcional ao diâmetro de corte: quanto maior for a eficiência total, menor será o diâmetro de corte, e vice-versa (SILVA, 2014).

O diâmetro de corte reduzido (d'_{50}) é definido como o diâmetro da partícula que é coletada com uma eficiência granulométrica reduzida de 50% (SILVA, 2014).

3.6.8 Número de Euler

Segundo Svarovsky (2000) o número de Euler (Eu), aplicado aos hidrociclones, é um fator de perda de pressão baseado na queda de pressão estática do equipamento. Esse adimensional representa o quociente entre a queda de pressão (diferença de pressão entre a alimentação e a corrente de *overflow*) e a energia cinética por unidade de volume, conforme mostra a Equação 7.

$$Eu = \frac{\pi^2 \Delta P \cdot D_c^4}{8\rho Q^2} \quad (7)$$

O número de Euler está relacionado aos custos energéticos de bombeamento da suspensão: quanto maior a queda de pressão, para uma mesma vazão volumétrica de alimentação, maior o número de Euler e, conseqüentemente, os custos energéticos são mais elevados. Além disso, esse adimensional varia na proporção inversa à vazão volumétrica de alimentação. Essa é uma variável importante, pois permite comparar a capacidade de processamento de separadores, em uma dada queda de pressão (SILVA, 2014).

De acordo com, Medronho (1984), uma correlação que relaciona o número de Euler, com o número de Reynolds e a concentração volumétrica da alimentação C_v , é:

$$Eu = k_4 Re^{k_5} C_v^{k_6} \quad (8)$$

Onde k_4 , k_5 , e k_6 são constantes para uma dada família de hidrociclones. Os valores dessas constantes, sugeridos por Medronho (1984), encontram-se na Tabela 2:

Tabela 2: Valores para constante de correlação de Euler

Hidrociclone	k_4	k_5	k_6
Bradley	258	0,370	0
Rietema	371,5	0,116	-2,12

Fonte: MEDRONHO, 1984

3.7 Modelos de separação

Apesar da simplicidade de construção, operação e manutenção que os hidrociclones são capazes de oferecer, a descrição e previsão da separação sólido-líquido neste tipo de equipamento são ainda complexas do ponto de vista matemático. De acordo com essa realidade, grande parte dos trabalhos científicos com hidrociclones recorre a recursos fundamentados num cunho mais experimental do que teórico (VIEIRA, 2006).

Os modelos de separação em hidrociclones tentam através de considerações teóricas, descrever a forma como uma determinada partícula é classificada. De acordo com as hipóteses adotadas, os principais modelos existentes podem ser situados em quatro grupos principais: Modelo da Órbita de Equilíbrio, Modelo Populacional, Modelo do Escoamento Bifásico Turbilhonar e o Modelo do Tempo de Residência (SVAROVSKY, 1984).

O modelo da órbita de equilíbrio é baseado no conceito de raio de equilíbrio. De acordo com este conceito, as partículas de mesmo tamanho posicionam-se em uma órbita

radial de equilíbrio no hidrociclone onde suas velocidades terminais de sedimentação no campo centrífugo são iguais à velocidade radial do líquido no sentido do eixo do equipamento (ALMEIDA, 2008).

O modelo população foi proposto por Fashlstrom (1996), que sugeriu que o diâmetro de corte seria influenciado pelo diâmetro do orifício de *underflow* e pela distribuição granulométrica na alimentação. Este autor afirmou que o efeito populacional na saída do *underflow* pode afetar a correlação de forças a tal ponto que o diâmetro de corte poderia ser estimado a partir da recuperação de massa no *underflow*. As informações estabelecidas através desta teoria não produziram resultados quantitativos, servindo, entretanto, para explicar diversas observações qualitativas da operação com hidrociclones (ALMEIDA, 2008).

A chamada teoria turbilhonar não se configura com um modelo propriamente dito e deve ser sempre usada em conjunção com outros modelos. Este pressuposto leva em consideração o efeito da turbulência no processo de separação. Este efeito modifica o perfil de velocidades, o que altera as características do equipamento como separador (ALMEIDA, 2008).

O Modelo do Tempo de Residência é a fonte para o embasamento de muitas equações semi-empíricas que são utilizadas na literatura para a previsão de performance de hidrociclones. Este modelo supõe que dada partícula chegará até a parede, e, portanto, será separada, quando seu tempo de residência no interior do hidrociclone for maior ou igual ao tempo necessário para que esta partícula movimente-se radialmente do ponto de entrada, no equipamento, até a parede (ALMEIDA, 2008).

4 METODOLOGIA

Nessa secção será discutido como foi o passo a passo para a construção do hidrociclone, bem como os métodos utilizados no estudo. A Figura 5, mostra como ficou o resultado final.

Figura 5: Hidrociclone construído.



Fonte: AUTOR, 2020.

4.1 Materiais utilizados na montagem do hidrociclone

A seguir a listagem completa de todos os materiais utilizados na montagem e estudo do hidrociclone, seguindo a proporção geométrica da “família” Bradley, sendo dividida em “etapa de construção”, referente aos desafios na montagem do hidrociclone, e “etapa de estudo” referente a obtenção de valores experimentalmente.

4.1.1 Etapa de construção

- 1 tubo de acrílico (0,6 cm diâmetro interno X 3 mm de espessura)
- 1 tubo de acrílico (3,2 cm diâmetro interno X 3 mm de espessura)
- Serra de Arco
- Morsa/torno de bancada
- Moto esmeril de bancada.
- Chapa de acrílico 3 mm de espessura
- Cortador de chapa circular para furadeira
- Serra fita vertical de bancada
- 1 chapa de alumínio fina
- Suporte Universal

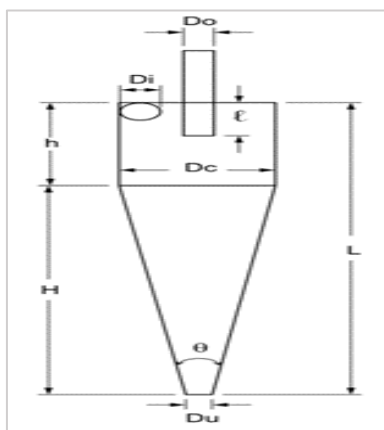
- Garra
- Alicates.
- Pistola de fixação de prego.
- Cola epóxi.
- Tubo de PVC (Com redução)
- Joelho 90° em PVC
- 2 Mangueira (cristal transparente)
- Bomba centrífuga 0,5 CV.
- Agitador mecânico com hélice
- Bomba peristáltica.
- Válvula.
- 2 Tanque

4.1.2 Etapa de estudo

- Béqueres
- Kitasato
- Espátulas
- Bomba de vácuo
- Funil de Buchner
- Estufa de secagem
- Peneiras (0,84 mm; 0,5 mm; 0,42 mm; 0,297 mm; 0,21 mm; 0,149 mm; 0,105 mm; 0,037 mm)
- Balança analítica
- Cronômetro
- Proveta.
- Papel Filtro
- Vidro de relógio

4.2 Montagem do hidrociclone

Figura 6: Esquema de um hidrociclone qualquer.



Fonte: SILVA, 2014

Dois protótipos feitos de cartolina foi construído para uma pré-visualização do hidrociclone e para perceber alguns problemas que poderiam surgir durante a criação, os protótipos foram feitos seguindo a geometria Bradley e Rietema.

Para a construção referente a parte de acrílico do hidrociclone, utilizou-se tubos de acrílicos disponíveis no Laboratório de Sistema de Separação e Otimização de Processo (LASSOP). Os diâmetros desses tubos, são próximos dos diâmetros tabelados para a geometria de hidrociclones Bradley.

O tubo de acrílico de **0,6 cm** de diâmetro foi utilizado tanto para a construção do duto de alimentação, como para a construção do duto do overflow. Para a construção da seção cilíndrica, foi utilizado um tubo de diâmetro 3,2 cm.

Não há especificações para o comprimento dos dutos de alimentação e overflow, a única consideração que deve-se tomar é o comprimento do vortex finder ℓ (1,254 cm). O comprimento “h” da seção cilíndrica foi calculado através das relações:

$$L = H + h \quad (9)$$

$$H = \frac{D_c - D_u}{2 \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (10)$$

O valor obtido, depois de substituir os valores tabelados, foi de $h = 9,86$ cm. O resultado referente a “H”, refere-se ao comprimento do tronco do cone, cujo o valor calculado foi de $H = 16,17$ cm.

Para cortar o tubo de acrílico, para a criação do duto de alimentação e overflow, e da seção cilíndrica, foi utilizado uma morsa/torno de bancada, e uma serra de arco. Para o corte relativo a interceptação da base do duto de alimentação e da seção cilíndrica (Figura 9), foi utilizado o esmeril de bancada. O corte na seção cilíndrica relativa a entrada do duto de alimentação, foi feita utilizando-se uma serra fita vertical de bancada.

Figura 7: Morsa/torno de bancada utilizado.

Figura 8: Moto esmeril de bancada utilizado

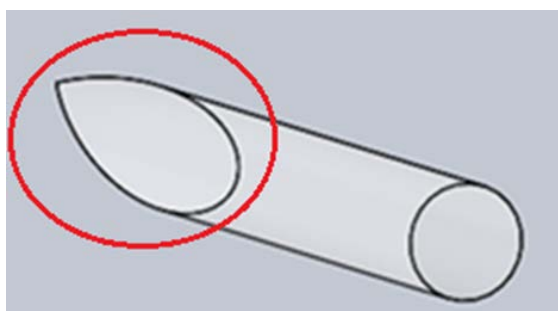


Fonte: AUTOR, 2020.



Fonte: AUTOR, 2020

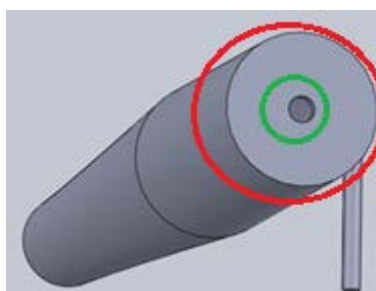
Figura 9: Ilustração do corte feito no esmerio do duto de alimentação



Fonte: AUTOR, 2020

A construção do plano circular superior, para “fechar” o hidrociclone pela parte de cima, foi feito utilizando uma chapa de acrílico de 3 mm de espessura, utilizando um cortador de chapa circular, para o corte da placa e da abertura circular relativo ao duto de overflow (Figura 10).

Figura 10: Plano circular superior



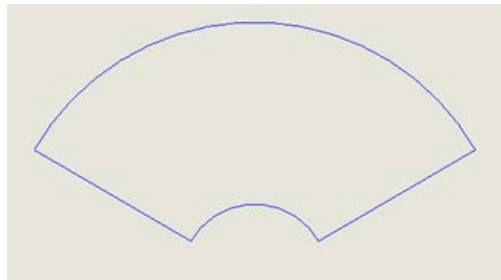
Fonte: AUTOR, 2020

Inicialmente planejou-se fazer a parte cônica de acrílico, a partir do aquecimento de uma chapa de acrílico disponível (O acrílico é um termoplástico, ou seja na presença de uma temperatura adequada ele amolece e torna-se possível molda-lo), entretanto pela falta de um molde adequado, preferiu-se utilizar o alumínio para a construção da parte cônica.

Foi construído primeiramente um protótipo de cartolina, feito o traçado do desenho para a redução concêntrica (Figura 11), e ajustando conforme o necessário, foi obtido o

traçado exato para o corte na chapa de alumínio. Com o corte feito, dobrou-se o alumínio, e ele tomou a forma desejada, prendeu-se então as duas extremidades, com pregos e cola.

Figura 11: Ilustração do traçado da parte cônica.



Fonte: AUTOR, 2020.

Figura 12: Redução concêntrica de alumínio.



Fonte: Autor, 2020

Com todas as partes prontas, colou-se com cola epóxi (Araldite), a cola supriu os espaços vazios, evitando-se assim qualquer vazamento, Figura 14.

Figura 13: Protótipo hidrociclone "Rietema"



Fonte: AUTOR, 2020

Figura 14: Hidrociclone "Bradley"



Fonte: AUTOR, 2020.

Para testar o hidrociclone foi utilizado uma bomba centrífuga 0,5 CV, puxando água de um poço a 7 metros de profundidade. Duas mangueiras (Cristal transparente) foram acopladas ao hidrociclone, no duto de alimentação e no duto de overflow, para controle do fluxo, entretanto a vazão fornecida pela bomba não era ainda o suficiente para fazer com que a água subisse pelo overflow. Ajustou-se então a abertura do *underflow* com uma redução, ajustando-se assim para o tamanho ideal “1,25 cm”. Para diminuir ainda mais a perda de carga, dificultar o retorno das partículas sólidas e ter um melhor controle da vazão de saída, acoplou-se ainda ao sistema um joelho 90° e uma torneira. Na Figura 15 é possível visualizar o sistema para filtrar a água do poço, realizado em casa, como pode-se observar o balde “preto”, ficou com as partículas sólidas e a bacia “vermelha”, com uma água mais limpa.

Figura 15: Sistema simples para filtrar a água do poço.



Fonte: AUTOR, 2020.

No Laboratório de Sistemas de Separação e Otimização de Processos (LASSOP), houve um “aprimoramento” do sistema, para a realização de estudos práticos, onde foi adicionado um agitador, para promover uma maior homogeneização do sistema, uma válvula em posição vertical para o controle de vazão no *underflow*, e usada uma bomba peristáltica no lugar de uma bomba centrífuga. O resultado final pode ser visto na Figura 5.

4.3 Estudos experimentais realizados.

Com o auxílio de béqueres e um cronômetro, obteve-se vazões das correntes de *underflow* e *overflow*.

A estimativa da densidade da areia úmida, foi feita a partir de uma amostra de areia coletada do tanque utilizado.

Para a determinação de parâmetros como o diâmetro de corte, razão de líquido e eficiência, fez-se filtração a vácuo e secagem em estufa, análise granulométrica por peneiramento, e quantificação em massa de amostras do *underflow* e *overflow*.

Além da montagem do hidrociclone, este trabalho também se resume a calcular parâmetros relacionados ao estudo de hidrociclones em relação ao hidrociclone construído. Tais parâmetros foram calculados a partir de experimentos realizados em laboratórios, com amostras do *overflow*, *underflow* e alimentação. Os experimentos foram feitos em duplicata, pois apesar de se tentar manter a distribuição das partículas homogênea no fluido, ainda assim, era difícil de mantê-la perfeitamente distribuída.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 16 mostra o resultado da separação do sistema Água-Areia.

Figura 16: Resultado da separação do sistema Água-Areia, a esquerda temos a amostra do *underflow*, e a direita, do *overflow*.



figFonte: AUTOR, 2020

5.1 Razão de líquido

A razão de líquido corresponde ao quociente entre a vazão volumétrica de líquido da corrente de *underflow* e a vazão volumétrica de líquido da alimentação. Ela é expressa pela equação (1).

$$R_L = \frac{Q_u(1-C_{vu})}{Q(1-C_v)} \quad (1)$$

A concentração volumétrica de sólidos no *underflow* (C_{vu}) e alimentação (C_v) pode ser calculado da seguinte maneira.

$$C_{vu} = \frac{m_u \cdot \frac{1}{d_s}}{V_u} \quad (11) \quad C_v = \frac{m_a \cdot \frac{1}{d_s}}{V} \quad (12)$$

Na literatura encontramos que a densidade da areia úmida varia entre $1700 \frac{kg}{m^3}$ e $2300 \frac{kg}{m^3}$ (OPERATION, 2020), a partir de dados experimentais, foi calculada a massa da areia úmida em um determinado volume de areia úmida, encontrou-se a densidade da areia úmida de aproximadamente: $2222,596 \frac{kg}{m^3} = 2,222596 \frac{g}{m_L}$

De acordo com os dados obtidos experimentalmente temos a Tabela 3:

Tabela 3: Dados obtidos experimentalmente

Amostras	$m_u (g)$	$m_a (g)$	$V (mL)$	$V_u (mL)$	$Q_u \left(\frac{mL}{s} \right)$	$Q \left(\frac{mL}{s} \right)$	C_v	C_{vu}	R_L
01	7,8145	7,908	200	200	46,4	85,23	0,0177	0,0175	0,544
02	9,6565	9,7468	200	225	51,49	89,31	0,0274	0,0219	0,58

Fonte: AUTOR, 2020

5.2 Análise granulométrica

A análise granulométrica permite a obtenção do diâmetro de corte reduzido. De acordo com os dados experimentais obtidos a partir de uma análise granulométrica temos, Tabela 4 e Tabela 5.

Tabela 4: Análise granulométrica, amostra 01

Diâmetro médio (D) da peneira (mm)	Massa retida (g)	Fração retida	Fração retida acumulada	Fração Pas- sante (X)
0,84	0,0884	0,01132	0,011312	0,988688
0,67	0,5684	0,072404	0,083716	0,916284
0,46	0,5847	0,074822	0,158539	0,841462
0,3585	1,0048	0,128581	0,28712	0,71288
0,2535	1,9348	0,247591	0,534711	0,465289
0,1795	2,7163	0,347597	0,882309	0,117691
0,127	0,7714	0,098714	0,981022	0,018978
0,071	0,1483	0,018978	1	0

Fonte: AUTOR, 2020

Tabela 5: Análise granulométrica, amostra 02

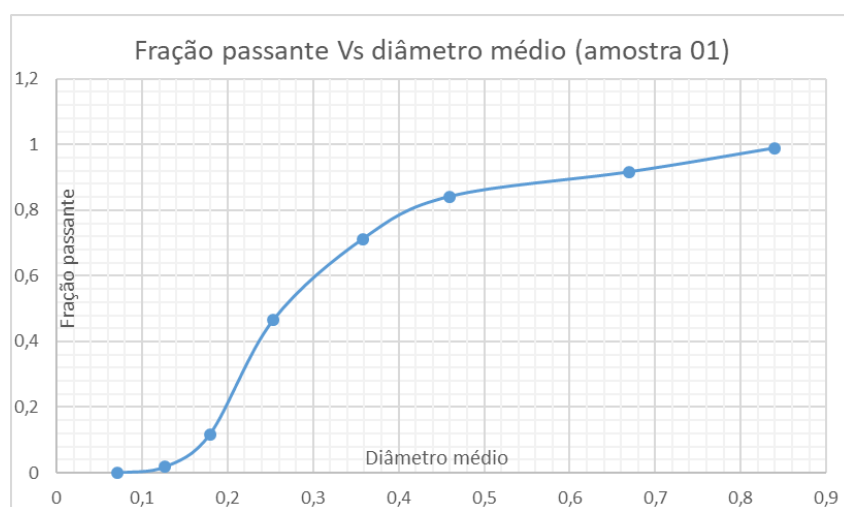
Diâmetro médio (D) da peneira (mm)	Massa retida (g)	Fração retida	Fração retida acumulada	Fração Pas- sante (X)
0,84	0,1231	0,1231	0,1231	0,987252
0,67	0,8878	0,091938	0,104686	0,895314
0,46	0,8552	0,088562	0,193248	0,806752

0,3585	1,3881	0,143748	0,336996	0,663004
0,2535	1,9349	0,200373	0,537369	0,462631
0,1795	2,8375	0,293844	0,831212	0,168788
0,127	1,47	0,152229	0,983441	0,016559
0,071	0,1598	0,016548	1	0

Fonte: AUTOR, 2020

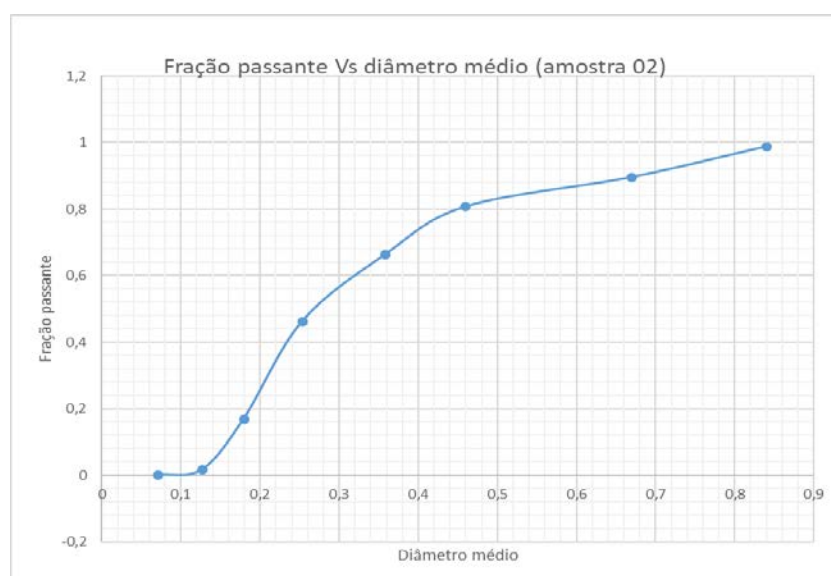
O diâmetro de corte, pode ser estimado a partir da construção de uma curva de partição
Figura 17 e Figura 18.

Figura 17: Curva de partição amostra 01



Fonte: AUTOR, 2020

Figura 18: Curva de partição amostra 02



Fonte: AUTOR, 2020

Para as duas amostras obtemos d_{50} , entre 0,2 mm e 0,3 mm. Valores aproximados para d_{50} podem ser atribuídos para as amostras 01 e 02. Respectivamente 0,27 mm e 0,28 mm.

A vários modelos estatísticos que tentam representar a curva acima, o modelo estatístico inicialmente adotado, foi o Gates-Gaudin-Schuman (GGS)

A equação do modelo é dada pela Equação 12:

$$X = \left(\frac{D}{K}\right)^m \quad (12)$$

Onde:

X = fração passante acumulada (X_p)

D = diâmetro médio da partícula para o referido X

K e m são os parâmetros de ajuste do modelo:

- k representa o diâmetro de partícula tal que 100% da massa de amostra correspondem a partículas menores que k (também denotado por D_{100})
- m caracteriza a uniformidade do material (sem significado estatístico)

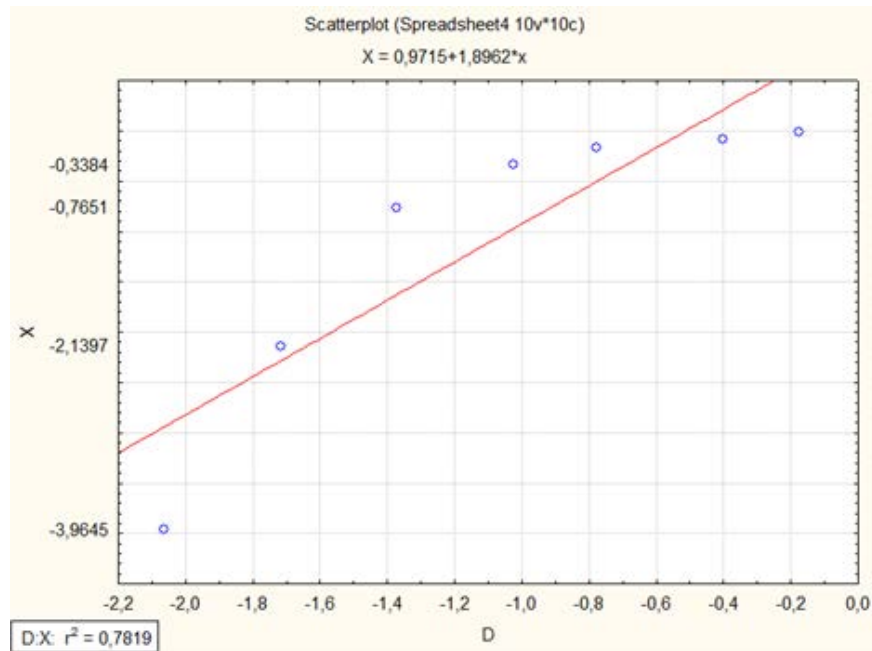
Linearizando a equação, teremos:

$$\ln x = m \cdot \ln D - m \cdot \ln k \quad (13)$$

E com os dados obtidos experimentalmente e com o uso de um software, como o STATISTICA, podemos encontrar os valores de “ m ” e de “ k ”, quando plotado um gráfico de $\ln(X)$ VS $\ln(D)$.

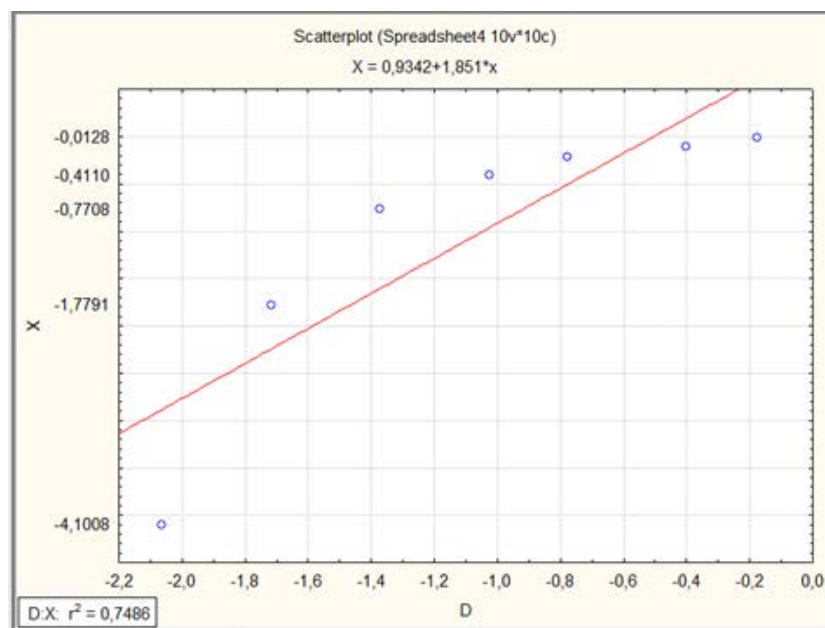
O gráfico de $\ln(X)$ vs $\ln(D)$, foi plotado para as duas amostras, no STATISTICA. E o resultado obtido foi, conforme pode ser visualizado na Figura 19.

Figura 19: Linearização, modelo GGS relatava a amostra 01, eq. $\ln(X) = 1,8962 \cdot \ln D + 0,9715$ (14)



Fonte: AUTOR, 2020

Figura 20: Linearização, modelo GGS relativa a amostra 02, eq. $\ln(X) = 1,851 \cdot \ln D + 0,9342$ (15).



Fonte: AUTOR, 2020

- Para amostra 01, temos: $m = 1,8962$ e $k = 0,599092$ mm
- Para amostra 02, temos: $m = 1,851$ e $k = 0,603687$ mm

O diâmetro de corte pode ser calculado, quando $X=0,5$.

- Para amostra 01, temos um valor de: $d_{50} = 0,415661$ mm
- Para amostra 02, temos um valor de: $d_{50} = 0,415127$ mm

Esse modelo foi bastante impreciso, para o estudo em questão, pois apresenta valores de r^2 que não estão muito próximos a 1.

Além do modelo GGS, temos também o modelo RRB.

Equação do modelo é da pela Equação (16)

$$X = 1 - e^{-\left(\frac{D}{D'}\right)^n} \quad (16)$$

X = Fração passante acumulada (X_p)

D = Diâmetro médio da partícula para o referido X

D' e n são parâmetros de ajuste do modelo:

- D' representa o diâmetro de partícula tal que 63,2% da massa da amostra referem-se a partículas menores que D' (também denotado por $D_{63,2}$)
- n caracteriza a uniformidade do material (sem significado estatístico)

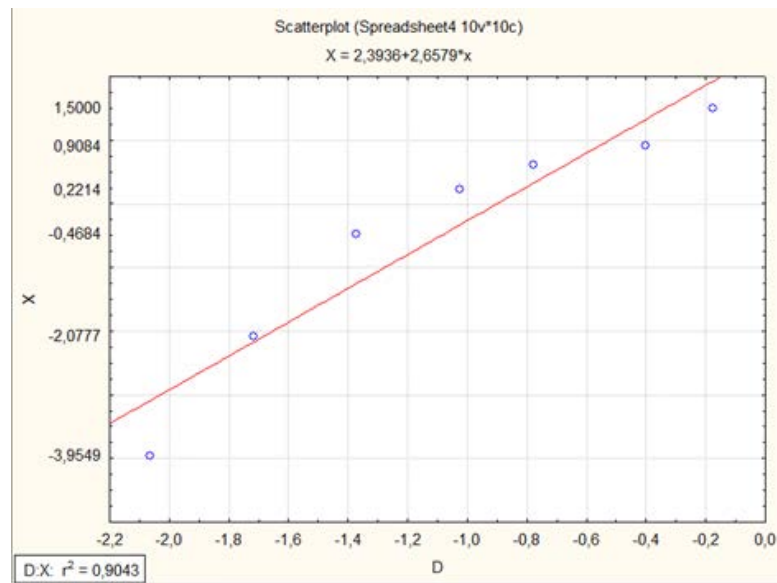
Linearizando a equação temos:

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-x} \right) \right] = n \cdot \ln D - n \cdot \ln D' \quad (17)$$

Plotando o gráfico de $\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-x} \right) \right]$ vs $\ln D$, podemos encontrar “ n ” e “ D' ”

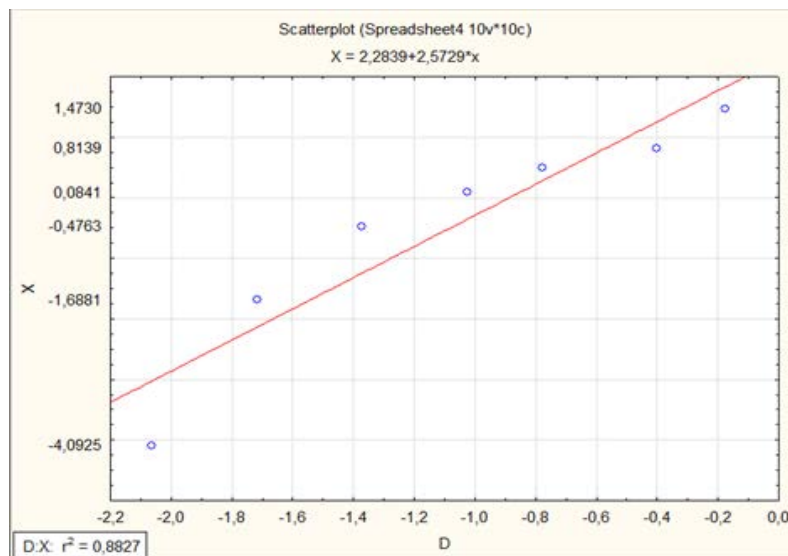
O gráfico de $\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-x} \right) \right]$ vs $\ln D$, foi plotado para as duas amostras, no STATISTICA. E o resultado obtido foi, conforme pode ser visualizado na Figura 23 e 24.

Figura 21: Linearização do Modelo RRB, amostra 01. Equação: $\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-x} \right) \right] = 2,6579 \cdot \ln D + 2,3936$ (18)



Fonte: AUTOR, 2020

Figura 22: Linearização do modelo RRB, amostra 02. Equação: $\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-x} \right) \right] = 2,5729 \cdot \ln D + 2,2839$ (19)



Fonte: AUTOR, 2020

- Para amostra 01, temos: $n = 2,6579$ e $D' = 0,406342$ mm
- Para a amostra 02, temos: $n = 2,5729$ e $D' = 0,411611$ mm

Como no modelo GGS, temos

- Para amostra 01: $d_{50} = 0,354$
- Para amostra 02: $d_{50} = 0,356962$

Pelo **Modelo Sigmoide**, da mesma forma que os modelos anteriores, temos.

Equação do modelo:

$$X = \frac{1}{1 + \left(\frac{D_{50}}{D}\right)^p} \quad (20)$$

X = Fração passante acumulada (Xp)

D = Diâmetro médio da partícula para o referido X

D_{50} e p são parâmetros de ajuste do modelo:

- D_{50} representa o diâmetro de partícula tal que 50% da massa da amostra referem-se a partículas menores que D_{50}
- p caracteriza a uniformidade do material (sem significado estatístico)

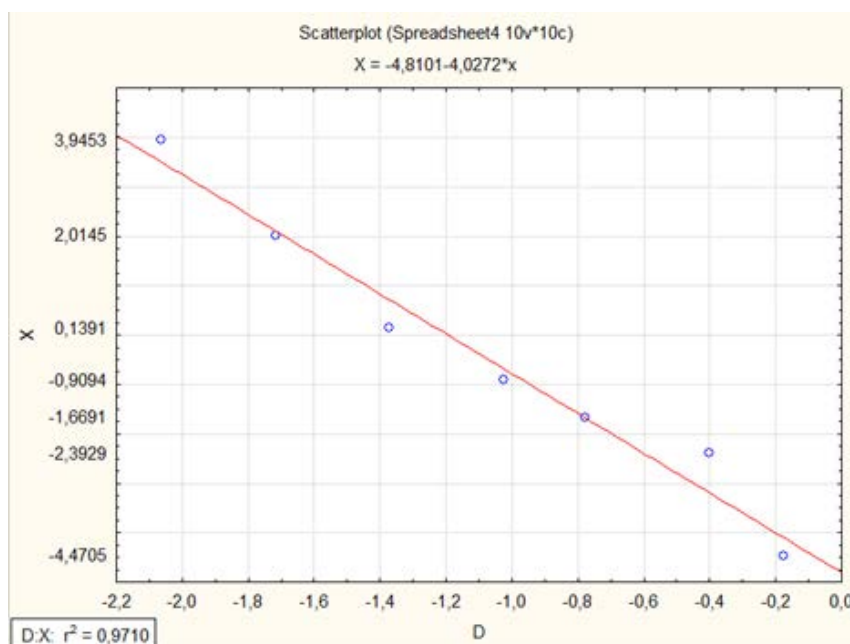
Linearização do modelo

$$P[\ln D_{50} - \ln D] = \ln \frac{1-x}{x} \quad (21)$$

O gráfico de $\ln \left[\frac{1-x}{x} \right]$ vs $\ln D$, foi plotado para as duas amostras, no STATISTICA.

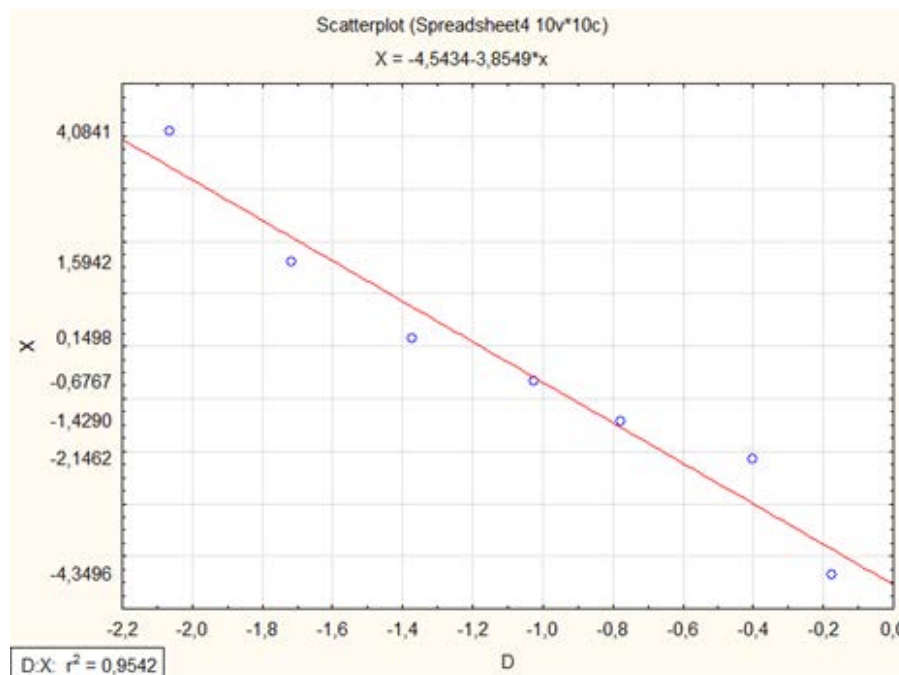
E o resultado obtido foi, conforme pode ser visualizado nas figuras 23 e 24.

Figura 23: Linearização do modelo Sigmoidal, amostra 01. Equação: $\ln \left(\frac{1-x}{x} \right) = -4.8101 - 4.0272 \cdot \ln D$ (22)



Fonte: AUTOR, 2020

Figura 24: Linearização do modelo Sigmoide, amostra 02. Equação: $\ln\left(\frac{1-x}{x}\right) = -4,5434 - 3,8649 \cdot \ln D$ (23)



Fonte: AUTOR, 2020

- Para amostra 01 temos: $p = 4,0272$ e $D_{50} = 0,302885 \text{ mm}$
- Para amostra 02, temos: $p = 3,8649$ e $D_{50} = 0,308648 \text{ mm}$

Há outros modelos estatísticos para a distribuição granulométrica de partículas, neste trabalho, será adotado o modelo sigmoide, por dentre os três, apresentar o maior valor de r^2 .

5.3 Eficiência total (η)

A eficiência total de separação do hidrociclone é definida como sendo a razão entre a massa total de sólidos coletado no concentrado (m_u) e a massa total de sólidos na alimentação (m_a).

$$\eta = \frac{m_u}{m_a} \quad (3)$$

Tabela 6: Eficiência total calculada com dados da Tabela 3.

	η
Amostra 01	0,9881
Amostra 02	0,9907

Fonte: AUTOR, 2020

Como se pode observar na Figura 25, há uma quantidade bem maior depositada, na amostra de *underflow* do que quando comparada com a amostra de *overflow*, (para volumes próximos), o que pode-se esperar uma alta eficiência de separação, para o sistema água-areia. Outra observação é que a densidade da areia úmida, é maior que a densidade da água, e o sistema não se mistura, a areia tende a descer, facilitando a separação.

Figura 25: Amostras do *Underflow* e do *overflow*



Fonte: Autor, 2020

5.4 Eficiência total reduzida (η')

A eficiência total reduzida é dada de acordo com a Equação (4)

$$\eta' = \frac{\eta - R_L}{1 - R_L} \quad (4)$$

Tabela 7: Eficiência total reduzida

	η'
Amostra 01	0,9739
Amostra 02	0,9778

Fonte: Autor, 2020

5.5 Número Euler

O número de Euler se relaciona com a diferença de pressão da seguinte forma:

$$Eu = \frac{\pi^2 \Delta P \cdot D_c^4}{8\rho Q^2} \quad (24)$$

Correlação para Euler

$$Eu = k_4 Re^{k_5} \exp(k_6 C_v) \quad (25)$$

$$Re = D \cdot \frac{v}{\vartheta_a} \quad (26)$$

$$\vartheta_a = \text{viscosidade cinemática da água} \left(0,9025 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s} \right)$$

Tabela 8: Parâmetros da correlação de Euler, tipo Bradley.

Hidrociclone	k₄	k₅	k₆
Bradley	258	0,37	0

Fonte: RESPONDEAI, 2020

Tabela 9: Valores obtidos

	Re	Eu	ΔP (Pa)
Amostra 01	20456,48	10153,8	375,583
Amostra 02	22700,5	10552,4	480,66

Fonte: Autor, 2020

5.6 Eficiência granulométrica (η_G)

A eficiência granulométrica pode ser dada pela Equação (5)

$$\eta_G = \eta \cdot \frac{\frac{dX_u}{d(dp)}}{\frac{dX_a}{d(dp)}} \quad (5)$$

Para isso é necessário calcular os parâmetros para o modelo mais adequado, p_a , D_{50a} , p_u , D_{50u} .

Os valores relativos ao *underflow*, já foram calculados no item 5.2

Tabela 10: Valores relativos a alimentação

Diametro médio	0,84	0,67	0,46	0,3585	0,2535	0,1795	0,127	0,071
(mm)								

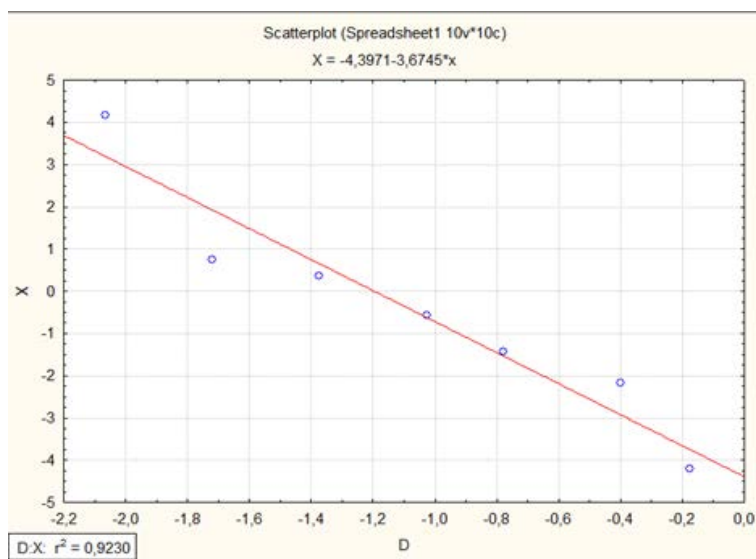
Amostra 01 (g)	0,1026	0,618	0,6359	1,1828	1,583	0,65501	2,1414	0,1071
	2							

Amostra 02 (g)	0,1373	0,94	0,9064	1,5661	1,9649	2,3626	1,1815	0,16
----------------	--------	------	--------	--------	--------	--------	--------	------

Fonte: Autor, 2020

Adotando-se o modelo SIGMOIDE, temos:

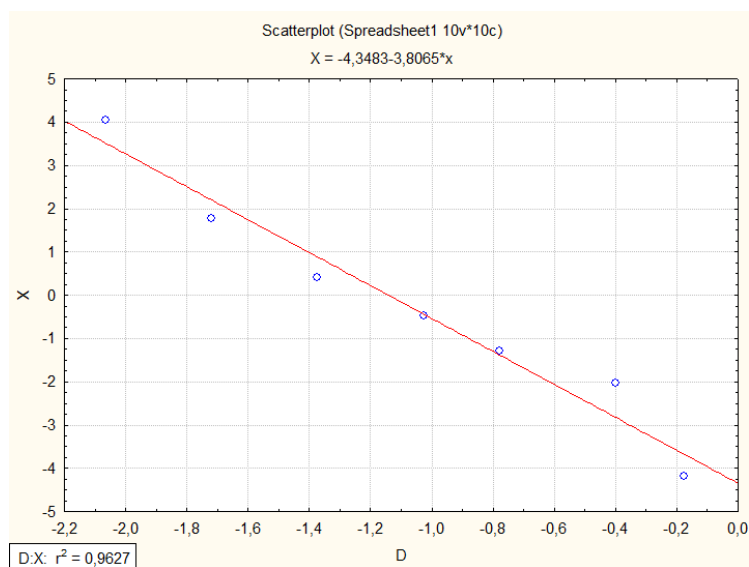
Figura 26: Regressão linear, Amostra 01 da alimentação



Fonte: Autor, 2020

$$P = 3,6745 \text{ e } D_{50} = 0,3022$$

Figura 27: Regressão linear, amostra 02 do *underflow*.



Fonte: Autor, 2020.

$$P = 3,8065 \text{ e } D_{50} = 0,319073$$

Amostra 02, obteve melhores resultados, por tanto, substituindo na equação (5), com o valor de η de 0,94800, temos

$$\begin{aligned} x_a &= \frac{1}{1 + \left(\frac{0,319073}{D}\right)^{3,8065}} \\ x_u &= \frac{1}{1 + \left(\frac{0,308648}{D}\right)^{3,8649}} \\ \eta_G &= 0,9907 \cdot \frac{0,835377 \left(0,0129288 \left(\frac{1}{D_p}\right)^{3,8065} + 1\right)^2 \left(\frac{1}{D_p}\right)^{0,0584}}{\left(0,0106372 \left(\frac{1}{D_p}\right)^{3,8649} + 1\right)^2} \quad (27) \end{aligned}$$

Para encontrar d_{50} , segundo a definição de Massarani (2002) (Ver tópico 3.6.7.), temos que $\eta_G=0.5$, entretanto nos leva a um valor de $d_{50} = 2,24 \cdot 10^{-7} \text{ mm}$, um número bastante pequeno, o que talvez possa se explicar por razões discutidas no tópico 5.3.

5.7 Eficiência granulométrica reduzida (η') e diâmetro de corte reduzido (d'_{50})

A eficiência granulométrica reduzida é dada pela equação (6):

$$\eta'_G = \frac{\eta_G - R_L}{1 - R_L} \quad (6)$$

O diâmetro de corte reduzido, é o diâmetro tal que é obtido quando $\eta'_G = 0,5$, o que nos leva a um valor de $\eta_G = 0,79$, e substituindo na equação, nos leva a $d'_{50} = 0,0005654 \text{ mm}$.

6 CONCLUSÃO

Foram vários os desafios, enfrentados para a construção do hidrociclone tipo Bradley, inicialmente planejou-se construí-lo inteiramente de acrílico para poder visualizar o movimento do fluido no interior do hidrociclone, mas devido à dificuldade de moldar a parte cônica de acrílico (O acrílico é um termoplástico, e se amolece com o calor, então acreditava-se que amolecendo uma placa de acrílico, seria possível facilmente moldá-lo, porém o acrílico ao entrar em contato com a temperatura ambiente, se endurece muito rápido, tornando-se difícil moldá-lo), decidiu-se então fazer a parte cônica de alumínio.

Entretanto, apesar dos desafios, o hidrociclone funcionou conforme o esperado, realizando a separação sólido-líquido, sendo possível até ver a formação do vórtice em seu interior. Para o sistema água-areia, o hidrociclone se mostrou altamente eficiente na separação, obtendo uma eficiência total de 99%, o fato de que a areia úmida é bem mais densa da que a água (densidade da areia calculada: 2,222596 g/mL, densidade da água 0,97 g/mL) e não se misturar com a água, formando um sistema heterogêneo, pode ser uma das explicações por causa da obtenção de uma eficiência total, bastante elevada para o sistema.

Parâmetros relacionados ao estudo de hidrociclones foram calculados com base em experimentos realizados em laboratório, o diâmetro de corte, dado pela definição de Massarani (2000), foi muito diferente do que aquele obtido pela curva de partição, o que pode ser explicado pela alta eficiência do hidrociclone, no sistema água-areia.

Existem diversas aplicações para hidrociclones, sendo aplicados principalmente em indústrias minero-metalúrgicas, mas também em outros setores, como o têxtil, alimentício e também o petroquímico. O hidrociclone se mostrou bastante eficiente para separar areia e água, sendo uma alternativa barata, e de custo de manutenção relativamente baixo, o equipamento pode servir para ajudar a filtrar água em comunidades que sofrem com a qualidade da água, além de melhorar as condições de uma “água de poço”, que geralmente contém areia.

A realização desse trabalho também pode servir como objeto de estudo, para futuros estudantes, bem como a realização de aulas práticas, sobre o funcionamento de um hidrociclone.

7 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, C. A. K.. *Comportamento do hidrociclone filtrante frente às modificações no diâmetro de underflow e no tubo de vortex finder*. 2008. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

ANDRADE, V. T. de. *Construção e avaliação de modelos de hidrociclone para tratamento de água residuária*. 2007. 74f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Campinas, SP.

ARRUDA, A. A. de. *Otimização de um hidrociclone utilizado na separação de uma mistura líquido-líquido*. 2009. 40 f. : Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica de Pernambuco. Pró-reitoria Acadêmica. Curso de Mestrado em Ciências da Linguagem, 2009.

CONHECIMENTOGERAL. *Hidrociclone*. Disponível em: <https://www.conhecimento-geral.inf.br/hidrociclone/> Acesso: 05 de outubro de 2019.

EDISCIPLINAS. *Viscosidade cinemática*. Disponível em: < <https://edisiplinas.usp.br/mod/resource/view.php?id=1557646> >. Acesso: 18/02/2020.

KELLY, E. G. e Spottiswood, D. J. *Introduction to mineral processing*. New York: John Wiley & Sons, 1982, p.199-236.

MASSARANI, G. *Fluidodinâmica em Sistemas Particulados*. 2ª ed. Rio de Janeiro: EPapers Serviços Editoriais, 2002.

MULAR, A. L. *Size Separation*. In: Principles of Mineral Processing. Fuerstenau, M. C. and Han, K. N. (Ed.) Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc. Colorado, 2000.

OPERATION. *Densidade dos materiais*. Disponível em: < <http://www.operaction.com.br/densidade-dos-materiais> >. Acesso: 18/02/2020.

RESPONDEAI. *HIDROCICLONES*. Disponível em: < <https://www.respondeai.com.br/conteudo/operacoes-unitarias/equipamentos/hidrociclones/1632>>. Acesso: 17/02/2020.

RUSHTON. A.S.; WARD, A.S.; HOLDICH, R.G. *Solid-liquid filtration and separation technology*. 2nd ed. Wiley-VCH Verlag GmbH, 2000.

SAMPAIO, J. A.; OLIVEIRA, G. P.; SILVA, A. O.. *Ensaio de classificação em hidrociclone*. IN: Tratamento de Minérios: práticas laboratoriais. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2007. p. 139-154.

SCHEID, et al. *Eficiência de separação de hidrociclones para a separação de mistura óleo-água com alto teor de óleo: comparação entre resultados simulados e experimentais*. 9 f. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2015.

SILVA, D. de O.. *Otimização da separação sólido-líquido em hidrociclones mediante modificações geométricas*. 2012. 224 f. Tese (Doutorado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

SILVA, N. K. G.. *Estudo de otimização da configuração do hidrociclone filtrante*. 2014. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

SVAROVSKY, L. *Solid-Liquid Separation*. 554 p. 4th Edition. Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP: Butterworth-Heinemann, 2000.

VIEIRA, L. G. M.. *Otimização dos processos de separação em hidrociclones filtrantes*. 2006. 323 f. Tese (Doutorado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.