



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA



Estudo comparativo entre o desempenho de uma bateria de hidrociclones e de um sedimentador a fim de concentrar as partículas do leite de cal geradas a partir do processamento do minério de Irecê

Lucas Eduardo Mundim Nogueira

Uberlândia – MG

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

Estudo comparativo entre o desempenho de uma bateria de hidrociclones e de um sedimentador a fim de concentrar as partículas de leite de cal geradas a partir do processamento do minério de Irecê

Lucas Eduardo Mundim Nogueira

Monografia de graduação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para a aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso do curso de Engenharia Química

Orientadora: Prof^ª. Dra. Carla Eponina Hori

Uberlândia – MG

2022

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA MONOGRAFIA DA
DISCIPLINA TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE LUCAS
EDUARDO MUNDIM NOGUEIRA APRESENTADA À UNIVERSIDADE
FEDERAL DE UBERLÂNDIA, EM 24 DE MARÇO DE 2022.

BANCA EXAMINADORA

Profª. Dra. Carla Eponina Hori
Orientadora (FEQUI/UFU)

Prof. Dr. Luiz Gustavo Martins Vieira
(FEQUI/UFU)

Prof. Dr. Marcos Antônio de Souza Barrozo
(FEQUI/UFU)

Dr. Felipe Santos Moreira
(PPGEQ/UFU)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por toda fonte de força e sabedoria a mim concedidas para realização desse trabalho e confiança em sua boa vontade para minha vida.

Aos meus pais, amigos e a minha namorada pelo apoio incondicional e motivação para realização deste trabalho dentro do prazo estabelecido.

Ao professor Marcos Antônio de Souza Barrozo pela orientação nos cálculos realizados e por ser fonte de inspiração como profissional dentro e fora da Universidade.

Ao professor e pesquisador Felipe Santos Moreira pelo companheirismo e aprendizado compartilhado durante todo o tempo no laboratório.

À professora Carla por ser minha orientadora neste trabalho, por toda sua paciência e compreensão nas diversas conversas que tivemos em sua sala sempre me orientando e me ensinando o melhor caminho a seguir. Agradeço também por me inspirar profissionalmente com seu ensino e dedicação no seu trabalho como professora e orientação aos alunos.

A todos que de alguma forma contribuíram para minha formação pessoal e profissional durante essa jornada, muito obrigado!

“Science can amuse and fascinate us all, but it is Engineering that changes the world.”

Isaac Asimov

SIMBOLOGIA

A - Área do sedimentador;

Ca - Concentração mássica de sólidos na alimentação do hidrociclone;

Ca - Concentração mássica de alimentação do sedimentador;

Ca* - Concentração volumétrica de sólidos na alimentação;

C_L - Concentração mássica da lama;

Cu - Concentração mássica de sólidos no *underflow*;

Cv - Concentração volumétrica de sólidos na alimentação;

d* - Diâmetro de corte;

Dc - Diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone;

Di - Diâmetro do duto de alimentação do hidrociclone;

Do - Diâmetro do duto de *overflow* do hidrociclone;

Du - Diâmetro do duto de *underflow* do hidrociclone;

F - Vazão volumétrica de suspensão de operação do sedimentador;

(F/A)_{min} - Razão de projeto entre a vazão e a área do sedimentador;

H₁ - Altura região clarificada mais região constante;

H₂ - Altura do fundo;

Hc - Altura região de compactação;

H_{total} - Altura total do sedimentador.

ℓ - Comprimento do *vortex finder*;

L - Comprimento do hidrociclone;

Pot - Potência de operação da bomba;

Q - Vazão de suspensão no duto de alimentação do hidrociclone (total);

Q_{LA} - Vazão no duto de alimentação do hidrociclone;

Q_{LU} - Vazão volumétrica de líquido no *underflow*;

R - Raio do sedimentador;

R_L - Razão de líquido;

$t_{\text{sedimentação}}$ - tempo de residência da região de compactação;

W_{sa} - Vazão mássica de sólidos no duto de alimentação;

W_{su} - Vazão mássica de sólidos no *underflow*;

X – fração em massa de partículas;

Z_0 - Altura inicial do teste de proveta;

Z_{min} - Representa a altura que a suspensão ocuparia se todos os sólidos estivessem em uma dada concentração C;

ρ - Densidade da água;

ρ_s - Densidade do sólido;

ρ_{lodo} - densidade do lodo;

μ - Viscosidade da água;

η' - Eficiência individual de coleta reduzida;

$\bar{\eta}'$ - Eficiência global de coleta reduzida;

$\bar{\eta}$ - Eficiência global de coleta;

$(-\Delta P)$ – Queda de pressão entre a alimentação e a descarga do *overflow*;

u_c – Velocidade média do fluido na seção cilíndrica do hidrociclone;

θ_{min} - Tempo correspondente no gráfico a Z_{min} ;

RESUMO

O hidrociclone é um tipo de equipamento destinado à separação sólido-líquido ou líquido-líquido e utiliza o campo centrífugo como princípio básico de separação. Sua versatilidade explica-se por serem simples, por terem baixos custos de aquisição, manutenção e operação e pelas pequenas dimensões que apresentam, em relação a outros separadores. A função do hidrociclone estudada aqui neste trabalho é a de espessamento, em que objetiva-se atingir uma alta concentração de sólidos no *underflow*, sendo assim, a família de hidrociclones escolhida para ser estudada foi a do hidrociclone Rietema, caracterizada por ser maior concentradora em relação às outras famílias. A sedimentação é um dos processos de separação sólido-fluido baseados, basicamente, na diferença entre as densidades dos constituintes de uma suspensão; a remoção das partículas sólidas presentes em uma corrente líquida se dá pela ação do campo gravitacional, o que oferece ao processo as características de baixo custo e grande simplicidade operacional. A função aqui estudada do sedimentador que é a de espessamento, têm como produto de interesse a produção de espessados com alta concentração de sólidos. No presente trabalho é realizado um estudo comparativo entre o desempenho de uma bateria de hidrociclones frente a um sedimentador-espessador a fim de avaliar qual a melhor operação unitária para realizar a concentração das partículas de suspensão de sólidos do leite de cal geradas no processamento do minério proveniente de Irecê – Bahia. A partir dos cálculos realizados, foram propostas 10 configurações de bateria de hidrociclones, em que se elegeu a melhor configuração proposta para se comparar com o sedimentador; sendo que, este foi dimensionado realizando um teste de proveta seguindo a metodologia de Kynch. O sedimentador mostrou ser mais eficaz na concentração de partículas do leite de cal por apresentar pequena área e 100% de eficiência de operação.

Palavras-chave: espessamento; hidrociclone; Kynch; leite de cal; Rietema; sedimentador; Talmage e Fitch.

ABSTRACT

The hydrocyclone is a type of equipment intended for solid-liquid or liquid-liquid separation and uses the centrifugal field as the basic principle of separation. Their versatility is explained because they are simple, due to low acquisition, maintenance and operation costs and small dimensions that they present, in relation to other separation equipments. The function of the hydrocyclone studied here in this work is thickening, which aims to achieve a high level of solids in the underflow. Therefore, the family of hydrocyclones chosen to be studied was the Rietema hydrocyclone, for given higher concentrations of solids in relation to other families. Sedimentation is a solid-fluid separation process, based in the difference between the densities of the constituents of a suspension; the removal of the solid particles presents a net current is given by the action of the gravitational field which offers the process, as characteristics of low cost and great operational easiness. A settling tank or a thickener can produce a stream with high concentration of solids of interest. In the present work, a comparative study is carried out between the performance of a battery of hydrocyclones against a thickener in order to evaluate the best unit operation to carry out the concentration of suspended particles of solids from milk of lime generated in the processing of ore from Irecê – Bahia. From the calculations performed, a 10 hydrocyclones battery configuration was proposed in which the best proposed configuration was chosen to compare with a thickener dimensioned using the Kynch methodology. The thickener proved to be more effective in the concentration of milk of lime particles because of its small area and 100% operating efficiency.

Key-words: hydrocyclone; Kynch; milk of lime; Rietema; thickener; thickening; Talmage and Fitch;

SUMÁRIO

| | |
|---|------------|
| LISTA DE SÍMBOLOS | I |
| RESUMO | III |
| ABSTRACT | IV |
| 1. INTRODUÇÃO | 11 |
| 1.1 Motivação..... | 11 |
| 1.2 Objetivos..... | 12 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | .13 |
| 2.1 Hidrociclones..... | 13 |
| 2.2 Sedimentadores..... | 17 |
| 3. METODOLOGIA..... | 22 |
| 3.1 Difração de Raios-X..... | 22 |
| 3.2 Massa específica dos sólidos..... | 23 |
| 3.3 Distribuição granulométrica | 24 |
| 3.4 Metodologia adotada para o cálculo da bateria de hidrociclones..... | 25 |
| 3.5 Metodologia adotada para o cálculo do Sedimentador-Espessador..... | 28 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 32 |
| 4.1 Massa específica dos sólidos..... | 32 |
| 4.2 Distribuição Granulométrica..... | 32 |
| 4.3 Resultados obtidos nos cálculos do Hidrociclone..... | 34 |
| 4.4 Resultados obtidos nos cálculos do Sedimentador..... | 36 |
| 5. CONCLUSÃO..... | 37 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 38 |
| APÊNDICE A | 40 |
| APÊNDICE B | 41 |
| APÊNDICE C | 51 |

1. INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

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 particularmente sério na indústria de processamento mineral) e a crescente demanda por aceitabilidade ambiental de resíduos, por exemplo, elucidam o fato supracitado (SILVA, 2014).

Dentre os equipamentos capazes de separar o sólido do líquido estão os hidrociclones, cuja versatilidade explica-se por serem simples, por terem baixos custos de aquisição, manutenção e operação e pelas pequenas dimensões que apresentam, em relação a outros separadores. Podem ser utilizados, por exemplo, na clarificação de líquidos, no espessamento de lamas, na classificação de sólidos por tamanho e na separação de sólidos por densidade ou forma da partícula (SILVA, 2014).

Outra operação unitária bastante utilizada na indústria química é a sedimentação. É um dos processos de separação sólido-fluido baseados, basicamente, na diferença entre as densidades dos constituintes de uma suspensão. A remoção das partículas sólidas presentes em uma corrente líquida se dá pela ação do campo gravitacional, o que oferece ao processo as características de baixo custo e grande simplicidade operacional. A larga utilização industrial dos sedimentadores promove um crescente interesse no conhecimento do dimensionamento e operação desses equipamentos, a fim de melhorar a utilização e eficiência no atendimento aos objetivos operacionais (GUIMARÃES, 2010).

Diante disso, pretende-se neste trabalho estudar a concentração das partículas do leite de cal geradas no processamento do minério de Irecê avaliando o desempenho de uma bateria de hidrociclones frente a um sedimentador-espessador. O calcário dolomítico proveniente da região de Irecê no estado da Bahia contém um teor médio de P_2O_5 em torno de 12%. Esse minério pode ser usado para a obtenção de fertilizantes fosfatados. Como a região de Irecê não possui água em abundância para realizar um processo de flotação, planeja-se realizar a calcinação do minério, para produzir óxidos de cálcio e magnésio. Posteriormente, estes óxidos serão hidratados formando os hidróxidos de cálcio e magnésio, que seriam separados do minério por lavagens com água.

Esse processo será suficiente para elevar a concentração de P_2O_5 no minério para a produção de fertilizantes fosfatados. O leite de cal formado nesse processo é que foi usado nesse estudo visando à concentração das partículas de cal geradas no processamento do minério de Irecê.

1.2 Objetivos

Diante disso, o objetivo deste trabalho de conclusão de curso consiste no estudo comparativo da utilização de uma bateria de hidrociclones frente a um sedimentador espessador avaliando o melhor método para concentração das partículas da suspensão do leite de cal geradas no processamento do minério de Irecê. A fim de cumprir o objetivo geral do trabalho alguns objetivos específicos estão listados a seguir:

- Avaliar as dimensões de projeto de diferentes configurações de baterias de hidrociclones comparando as variáveis de projeto para escolha da melhor configuração;
- Avaliar os cálculos de projeto do sedimentador proposto para concentração da suspensão de partículas do leite de cal;
- Comparar a configuração da bateria de hidrociclones proposta com o sedimentador-espessador a fim de concluir qual a melhor opção para se concentrar as partículas do leite de cal.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Hidrociclones

Inicialmente, os equipamentos de separação do tipo ciclone que usam água como o meio fluído tornaram-se conhecidos como ciclones hidráulicos. Posteriormente, o ciclone hidráulico foi abreviado para "hidrociclone" (BRADLEY, 1965).

Hidrociclones são separadores centrífugos de ampla aplicação nos setores petroquímico e de processamento mineral. Podem ser utilizados tanto na separação de suspensões sólido-líquido quanto emulsões líquido-líquido. São flexíveis quanto ao objetivo de separação, podem clarificar ou concentrar correntes. Em comparação a outros separadores, como centrífugas e filtros, possuem tamanho reduzido e ausência de partes móveis. Outras vantagens estão relacionadas a simplicidade operacional e ao baixo custo de manutenção e aquisição (SVAROVSKY, 2000). A suspensão é alimentada tangencialmente na parte superior cilíndrica do equipamento. Em função da força centrífuga aplicada, é formado um movimento espiral descendente, de forma que, as partículas de maior densidade se aproximam da parede e são descarregadas no orifício de *underflow*. Um outro vórtice central, de movimento ascendente, é formado e arrasta as partículas menores a serem descarregadas no tubo de *overflow*.

O emprego de uma determinada família de hidrociclones em um processo depende da necessidade de equipamentos com um alto poder classificador (baseado no tamanho das partículas coletadas) ou com grande poder concentrador (baseado na concentração da suspensão de fundo). Esses equipamentos apresentam altas eficiências de separação quando aplicados a materiais particulados com tamanhos na faixa de 5 a 400 μm . Essa versatilidade permite como foi dito anteriormente, sua aplicação 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, entre outros. Estes benefícios tornaram os hidrociclones, um dos equipamentos mais utilizados tanto na separação sólido-fluido quanto na separação líquido-líquido, podendo ser encontrados em diversos setores industriais: têxtil, alimentício, químico, petroquímico, metalúrgico (ALMEIDA, 2008).

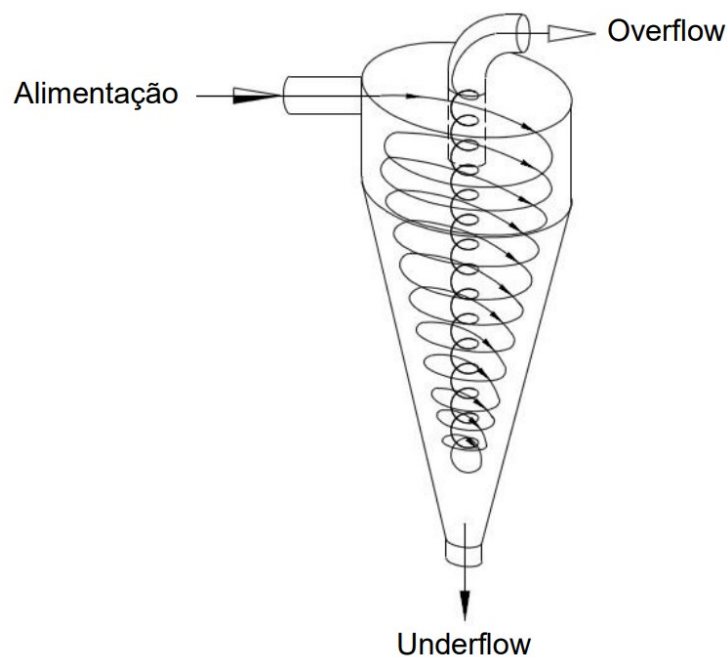
A necessidade específica de um processo é que determina o emprego de um separador com alto poder classificador ou com grande potencial como concentrador.

Um hidrociclone considerado ideal do ponto de vista global apresenta as seguintes características: grande poder de classificação, baixo consumo energético e elevada

concentração de sólidos no orifício de *underflow*. Embora, em alguns processos, nem todas essas características são necessárias simultaneamente. Além disso, é muito difícil alcançar esses objetivos concomitantemente em um equipamento industrial, pois seria preciso o dimensionamento de um separador com características contraditórias, uma vez que um alto desempenho de separação, demanda um elevado gasto energético, por exemplo (SALVADOR, 2017).

Na forma convencional, o hidrociclone consiste em uma seção cilíndrica acoplada a um tronco de cone, apresentando uma corrente de entrada (alimentação) e duas correntes de saída: *overflow* (diluída em sólidos) e *underflow* (concentrada em sólidos). A alimentação é introduzida tangencialmente na seção cilíndrica, o que provoca um movimento angular da suspensão ao longo do equipamento (SILVA, 2014). A Figura 1 mostra o escoamento básico da mistura no interior do hidrociclone.

Figura 1 - Trajetória simplificada da suspensão dentro de um hidrociclone (adaptado de Silva, 2014).



A alimentação entra com uma alta velocidade tangencial no hidrociclone e a suspensão inicia um movimento espiralado descendente em direção à parede do equipamento, por ação da força centrífuga.

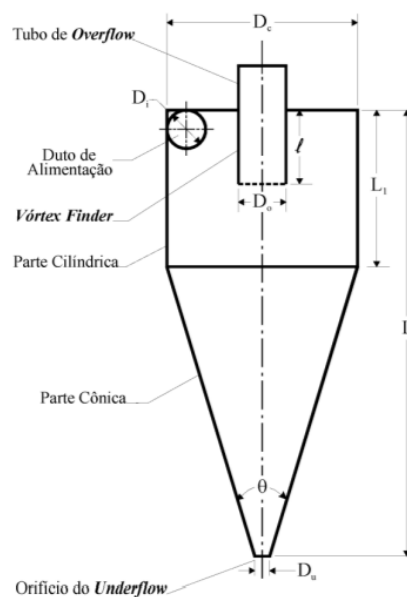
Ao atingir o orifício da corrente de *underflow*, que tem um tamanho pequeno, parcela da suspensão alimentada sai por essa corrente e o restante inverte a direção do movimento e

escoa para cima, em sentido contrário ao do primeiro vórtice, formando um vórtice secundário que percorre o centro do separador e atinge o tubo 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 pela corrente de *overflow*. Svarovsky (2000) comenta que, similarmente a outras operações unitárias na Engenharia Química, como transferência de massa ou de calor, a separação sólido-líquido nunca é completa.

Tipicamente, existem finos saindo na corrente de *overflow* e, certamente, haverá líquido sendo arrastado com os sólidos através da corrente do *underflow*. No hidrociclone, é possível ainda que parte do material não seja classificada, havendo finos no produto de grossos e partículas grossas no produto de finos (SILVA, 2014). 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.

Do ponto de vista de operação e investimento, tais equipamentos oferecem um dos meios mais baratos de separação, justamente por serem equipamentos simples e de fácil construção, sendo basicamente constituídos de uma parte cilíndrica acoplada a uma região cônica (LANNA, 2008). A Figura 2 mostra o esquema de um hidrociclone convencional.

Figura 2 - Principais dimensões geométricas de um hidrociclone (Vieira, 2006).



Devido ao seu grande potencial de aplicação, inúmeras configurações de hidrociclones, denominadas de *famílias*, têm sido propostas e estudadas nos últimos anos. Essas *famílias* são

caracterizadas pelas relações geométricas entre as principais dimensões e o diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone (LANNA, 2008).

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 (VIEIRA, 2006). É diante da enorme versatilidade oferecida pelos hidrociclones, que se encontra uma gama considerável de *famílias* empregadas tanto na indústria como no âmbito acadêmico. Dentre as *famílias* clássicas podem ser citadas como exemplo a de Bradley, Rietema, Krebs, CBV/Demco, Hi-Klone, Mosley, RW, Warman. 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 (Adaptado de Salvador, 2017).

| Família de Hidrociclone | Proporções Geométricas (Figura 2) | | | | |
|-------------------------|-----------------------------------|-----------|-------------|---------|----------|
| | D_i/D_c | D_o/D_c | ℓ /D_c | L/D_c | θ |
| Rietema | 0,280 | 0,340 | 0,400 | 5,00 | 20° |
| Bradley | 0,133 | 0,200 | 0,330 | 6,85 | 9° |
| Mosley | 0,154 | 0,214 | 0,570 | 7,43 | 6° |
| Warman | 0,290 | 0,200 | 0,310 | 4,00 | 15° |
| Hi-Klone | 0,175 | 0,250 | 0,920 | 5,60 | 10° |
| RW 2515 | 0,200 | 0,320 | 0,800 | 6,24 | 15° |
| Demco | 0,217 | 0,500 | 1,000 | 4,70 | 25° |

De acordo com Svarovsky (2000), existem três categorias principais de aplicação de hidrociclones na indústria, dentre outras: clarificação, espessamento (ou ambas simultaneamente) e classificação. O objetivo da clarificação consiste em produzir uma corrente de *overflow* limpa ou, maximizar a recuperação em massa de sólidos no duto de alimentação. A clarificação do líquido é o interesse primário, não a concentração de sólidos na corrente de *underflow*. Já no espessamento, objetiva-se atingir uma alta concentração de sólidos no orifício de *underflow*, e qualquer perda de partículas para o tubo de *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.

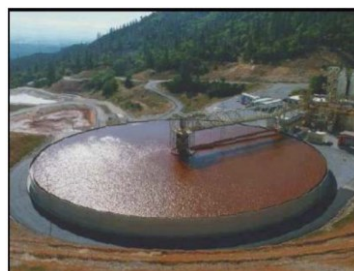
Foi observado por Moura e Almeida (2014), que para uma mesma vazão de operação de hidrociclone, os hidrociclones da família Rietema apresentaram menores valores de razão de líquido comparado aos hidrociclones da família Bradley. Isso indica que o hidrociclone do tipo Rietema possui uma capacidade maior para o espessamento do lodo, pois quanto menor for o valor da razão de líquido menor é quantidade de líquido saindo no orifício de *underflow* (Massarani, 2001). Dessa forma, a fim de se obter uma suspensão de sólidos de leite de cal mais concentrada, a família de hidrociclones escolhida neste trabalho para realização dos cálculos de concentração da suspensão de sólidos de leite de cal foi a de Rietema.

2.2 Sedimentadores

A sedimentação é um dos processos de separação sólido-fluido baseados na diferença entre as densidades dos constituintes de uma suspensão, a remoção das partículas sólidas presentes em uma corrente líquida se dá pela ação do campo gravitacional. Esta operação é baseada em fenômenos de transporte, onde a partícula sólida em suspensão está sujeita à ação das forças da gravidade, do empuxo e de resistência ao movimento (LIRA, 2010).

Na literatura, costuma-se classificar os sedimentadores em dois tipos: os espessadores, que têm como produto de interesse o sólido e são caracterizados pela produção de espessados com alta concentração de sólidos e os clarificadores, que têm como produto de interesse o líquido e se caracterizam pela produção de espessados com baixas concentrações de sólidos. Industrialmente os espessadores são os mais utilizados e operam, geralmente, em regime contínuo (FRANÇA e MASSARANI, 2002). Na Figura 3 encontra-se um Sedimentador convencional utilizado industrialmente.

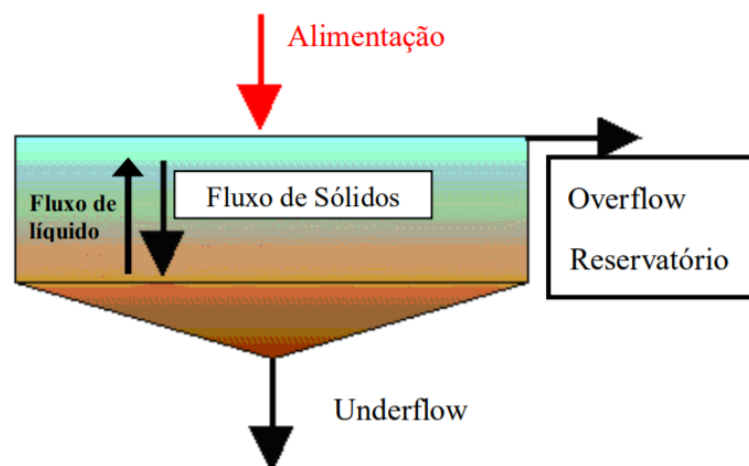
Figura 3 - Sedimentador convencional utilizado industrialmente (NUNES, 2008).



Os sedimentadores apresentam geralmente operação contínua, apresentando uma parte cilíndrica e outra cônica, esta com a função de facilitar a retirada da corrente de fundo do equipamento.

A parte superior do equipamento é dotada de um vertedouro por onde transborda a corrente de líquido clarificado. A alimentação é posicionada na região central do equipamento, podendo ser feita no topo ou interior do mesmo. As partículas sedimentadas são recolhidas no ápice da parte cônica e são chamadas de “*underflow*”, enquanto o líquido clarificado é chamado de “*overflow*” (GUIMARÃES, 2010). Esse último transborda através de calhas que circundam o equipamento e direcionam o líquido sobrenadante até um reservatório de bombeamento de água de reutilização (Figura 4).

Figura 4 - Fluxo esquemático de espessadores e clarificadores (adaptado de GUIMARÃES, 2010).

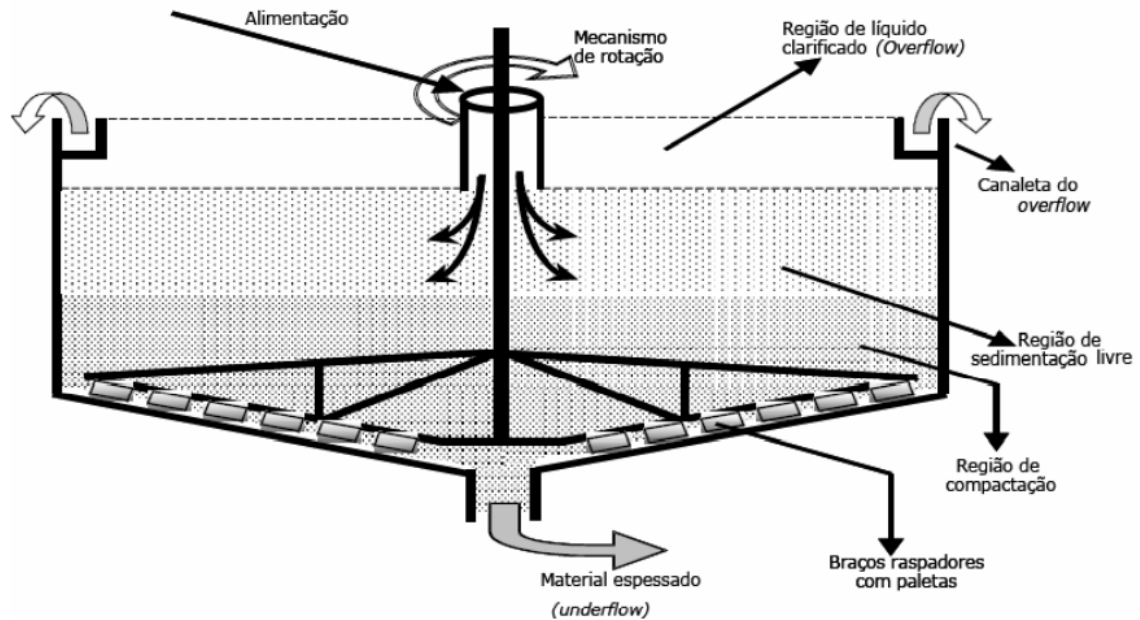


As operações de sedimentação são divididas didaticamente em duas classes: espessamento e clarificação. No espessamento o produto de interesse é o sólido e na clarificação, o produto de interesse é o líquido clarificado (NUNES, 2008).

O espessador contínuo convencional consiste em um tanque provido de um sistema de alimentação de suspensão e um de retirada do espessado (raspadores), dispositivos para descarga do *overflow* e do *underflow*, como ilustra a Figura 5. No espessador a alimentação da suspensão é feita pela parte superior do equipamento.

As partículas sólidas sedimentarão livremente e formarão no fundo do equipamento a região de compactação ou de espessado (LIRA, 2010).

Figura 5 - Diagrama ilustrativo de um espessador contínuo convencional, tipo Dorr-Oliver (FRANÇA e MASSARANI, 2002).



Luz, Sampaio e França (2010) definem espessamento como um dos processos de separação sólido-líquido que se baseia na diferença de velocidade de sedimentação dos materiais presentes em uma suspensão (polpa). É devido ao campo gravitacional que se dá a remoção das partículas sólidas em uma corrente líquida. Ainda de acordo com esses autores, podem-se destacar quatro principais aplicações dos espessadores na indústria da mineração (SANTOS, 2018):

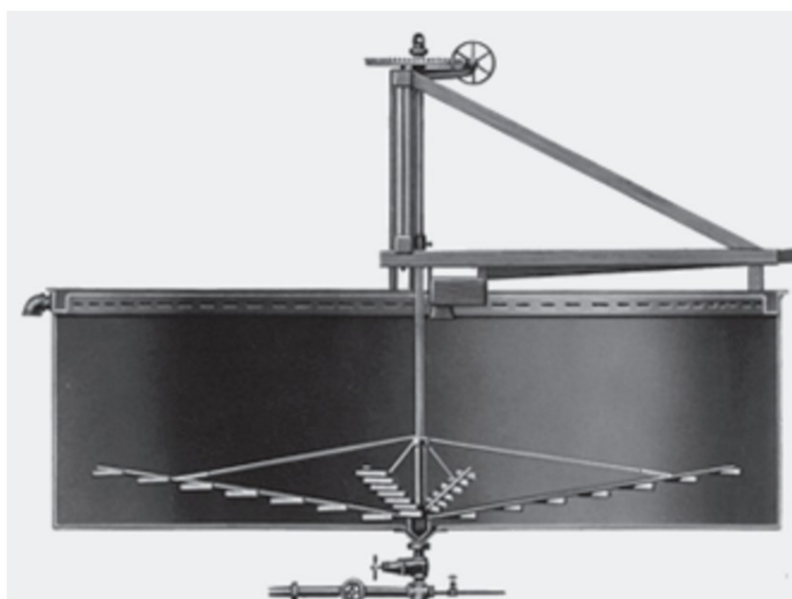
- adensamento de polpas, ou seja, aumento da concentração de sólidos, a fim de adequá-las para processos subsequentes. Um exemplo disto é a elevação da porcentagem de sólidos em minérios de ferro de 45 para 70%, para o bombeamento por meio de minerodutos;
- espessamento de rejeitos com concentração de sólidos elevada, visando o transporte e descarte mais eficazes;
- recuperação de sólidos ou solução de operações de lixiviação, utilizados em processos hidrometalúrgicos;
- recuperação de água para recirculação nos processos industriais, objetivando a recuperação máxima desse recurso o que implica em diminuição de custos e processos ambientais para a captação de água nova.

Dentre as vantagens do sedimentador para o espessamento, perante as outras operações de desaguamento pode-se citar seu baixo custo de operação, simplicidade de funcionamento e sua adaptação em um intervalo amplo de concentração de sólidos e tamanhos das partículas, quando comparado aos outros métodos (SANTOS, 2018).

O dimensionamento de um espessador consiste na definição de sua área unitária, a fim de atender as condições operacionais pré-determinadas. De acordo com Torquato e Luz (2011), para a realização desse dimensionamento são feitos os chamados testes de proveta, em escala de bancada, as quais podem ser de 1.000 ou 2.000 mL. A maior dificuldade nos testes de proveta consiste na identificação do ponto crítico de transição do regime de sedimentação por zona e por compressão: o chamado ponto de compressão. Esse ponto é necessário para o dimensionamento segundo a metodologia de Kynch e seus derivados (OLIVEIRA, LUZ e LACERDA, 2004).

Segundo Guimarães (2010), a tecnologia da sedimentação começou a ser utilizada em 1905, com a invenção do espessador Dorr (Figura 6). As técnicas de dimensionamento foram aprimoradas com o tempo e modelos matemáticos cada vez mais precisos permitiram maior assertividade na construção de novas metodologias e processos de modelamento de espessadores (SANTOS, 2018).

Figura 6 - Modelo do espessador Dorr original (adaptada de GUIMARÃES, 2010).

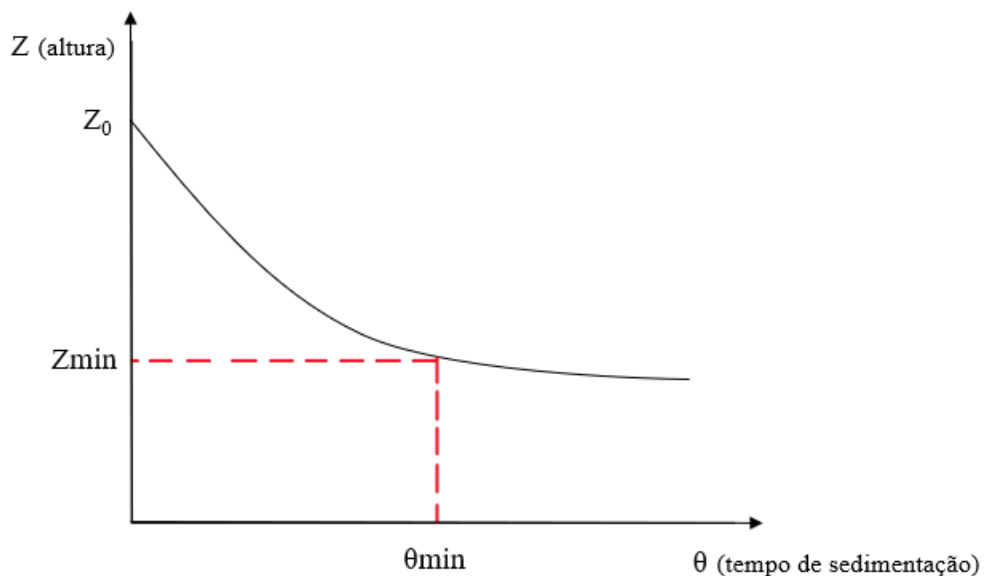


Em 1952 Kynch propôs um modelo cinemático da sedimentação com base apenas no desenvolvimento da equação da continuidade para fase sólida.

A publicação de Kynch motivou a indústria mineral a explorar essa teoria para o projeto de sedimentadores. Este método, apresentado inicialmente por Talmage e Fitch (1955) e que recebeu o nome de método de Kynch, consiste em realizar apenas um ensaio de sedimentação em batelada e, utilizando a teoria de Kynch, deduzir a área mínima necessária de um sedimentador para se processar uma suspensão. A partir do trabalho de Kynch houve um avanço significativo no entendimento do processo de sedimentação e apesar de existirem teorias mais elaboradas, o método de Kynch é utilizado até hoje pela simplicidade de execução.

O método de dimensionamento do espessador adotado neste trabalho foi o de Talmage e Fitch que utilizaram como apoio a mesma ideia inicial de Kynch: espessamento tem finalidade única e exclusivamente a concentração da polpa. O método de Talmage e Fitch necessita de um único teste, a partir do qual se confecciona a curva de sedimentação, como mostrado na Figura 7 (adaptado de SANTOS, 2018).

Figura 7 - Curva de sedimentação típica.



3. METODOLOGIA

Este trabalho possui como material principal o Cálcario dolomítico proveniente da região de Irecê na Bahia, com os teores médios de carbonato de cálcio, carbonato de magnésio e pentóxido de difósforo conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Teores de CaCO_3 , MgCO_3 e P_2O_5 no minério de Irecê.

| Amostra | CaCO_3 (%) | MgCO_3 (%) | P_2O_5 (%) |
|---------------|---------------------|---------------------|----------------------------|
| Minério Bruto | 43,6 | 11,9 | 12,7 |

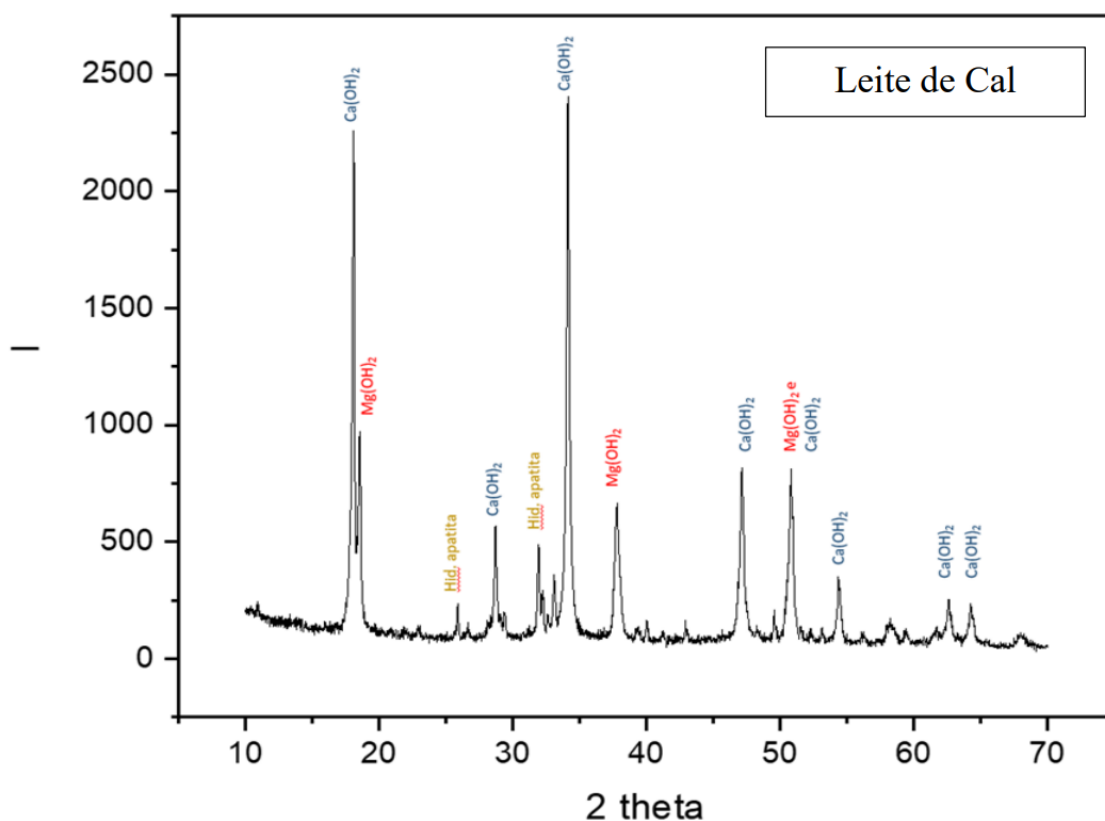
O calcário dolomítico pode ser usado para a obtenção de fertilizantes fosfatados. Como a região de Irecê não possui água em abundância para realizar um processo de flotação, planeja-se realizar a calcinação do minério, para produzir óxidos de cálcio e magnésio. Posteriormente, estes óxidos serão hidratados formando os hidróxidos de cálcio e magnésio, que seriam separados do minério por lavagens com água. Esse processo será suficiente para elevar a concentração de P_2O_5 no minério para a produção de fertilizantes fosfatados. O leite de cal formado nesse processo é que foi usado nesse estudo visando a concentração das partículas de cal geradas no processamento do minério de Irecê.

O material usado nessa etapa foi o minério de Irecê calcinado a $1000\text{ }^\circ\text{C}$ em forno rotativo em Poços de Caldas com tempo de residência de 2 horas. O minério calcinado foi resfriado e hidratado. Para iniciar a solubilização, esperou-se resfriar o minério até temperatura ambiente. A solubilização foi realizada a uma concentração de 40% de sólidos sob agitação de 700 rpm por 100 minutos. Após a solubilização a polpa gerada foi submetida a uma etapa de peneiramento (400 mesh) gerando o material passante (leite de cal). O material passante foi seco em estufa numa temperatura de $110\text{ }^\circ\text{C}$ por 24 horas e pesado para análise. A análise química desse material foi realizada pela Empresa Labfert (Uberaba-MG). Verificou-se que o material passante apresentou composição de 3,8% de P_2O_5 , 66,6% de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e 25,19% de $\text{Mg}(\text{OH})_2$.

3.1 Difração de Raios-X

As fases cristalinas do material seco foram determinadas por difração de raios X. O difratograma da amostra do leite de cal usado pode ser visualizado na Figura 8. Verifica-se a presença dos hidróxidos de cálcio e de magnésio, além da presença de apatita, que é o minério contendo P_2O_5 , em pequenas quantidades.

Figura 8 - Difratoograma do leite de cal.



3.2 Massa específica dos sólidos

Por meio da técnica de picnometria, calculou-se a densidade relativa dos sólidos. Para aplicação desse método, torna-se necessário conhecer as massas do picnômetro vazio, picnômetro com amostra, picnômetro preenchido por água mais amostra, picnômetro acrescido de água, volume do picnômetro e, por fim, densidade da água na temperatura em que foram realizados os testes. Todos esses valores de massa foram aferidos com auxílio de uma balança com 2 casas decimais de precisão. O procedimento para o cálculo da densidade aparente foi realizado da seguinte forma:

1. O Picnômetro seco é pesado e sua massa é anotada ($m_{\text{picnômetro}}$);
2. Enche-se o picnômetro com água destilada, o conjunto é pesado e a massa anotada ($m_{\text{(picnômetro + água)}}$);
3. A densidade da água é encontrada a partir da aferição do valor da temperatura da água utilizada nos testes. A temperatura dos testes realizados foi de 24 °C, obtendo-se na literatura o valor de 0,9973 g/cm³ para a densidade da água utilizada ($\rho_{\text{H}_2\text{O}}$).
4. A partir dos valores de $m_{\text{(picnômetro + água)}}$ e massa do picnômetro ($m_{\text{picnômetro}}$) calcula-se a massa de água utilizada de acordo com a Equação 1.

$$m_{H_2O} = m_{(picnômetro+água)} - m_{picnômetro} \quad (1)$$

5. Obtido o valor da massa de água (m_{H_2O}) e da densidade da água (ρ_{H_2O}), pode-se encontrar o volume real do picnômetro de acordo com a Equação 2.

$$V_{picnômetro} = \frac{m_{H_2O}}{\rho_{H_2O}} \quad (2)$$

6. Adiciona-se o sólido dentro do picnômetro vazio e anota-se a massa do conjunto ($m_{(picnômetro + sólido)}$). Sendo que, buscou-se adicionar dentro do picnômetro uma quantidade de sólido entre 1,0 a 1,5 g.

7. Calcula-se a massa de sólido de acordo com a Equação 3.

$$m_{sólido} = m_{(picnômetro+sólido)} - m_{picnômetro} \quad (3)$$

8. Adiciona-se água ao picnômetro já contendo sólido e anota-se a massa do conjunto ($m_{(picnômetro + sólido + água)}$). Calcula-se o volume de água adicionado ao picnômetro na Equação 4 e o volume de sólido na Equação 5.

$$V_{H_2O} = \frac{(m_{(picnômetro+sólido+água)} - m_{(picnômetro+sólido)})}{\rho_{H_2O}} \quad (4)$$

$$V_{sólido} = V_{picnômetro} - V_{H_2O} \quad (5)$$

9. A partir da massa de sólido e do volume de sólido já calculados, calcula-se a densidade do sólido (leite de cal) de acordo com a Equação 6.

$$\rho_{sólido} = \frac{m_{sólido}}{V_{sólido}} \quad (6)$$

3.3 Distribuição granulométrica

A fim de analisar a forma como as partículas se distribuem por faixas granulométricas, realizou-se a análise granulométrica das partículas utilizando o equipamento *Mastersizer Microplus* da marca *Malvern*. O método utilizado na refração a laser foi o de *Franhoffer* em meio contendo isopropanol. O *Malvern Mastersizer* é um equipamento muito utilizado em

diversos laboratórios por apresentar medidas precisas de distribuição granulométrica de um conjunto de partículas dispersas no ar ou em líquidos.

3.4 Metodologia adotada para o cálculo da bateria de hidrociclones

Com intuito de avaliar o desempenho de uma bateria de hidrociclones para fazer a concentração do passante (leite de cal), foram realizados cálculos utilizando o *software* Excel[®]. As variáveis analisadas foram:

- Q: Vazão de suspensão no duto de alimentação (operação) (m³/h);
- ρ_s : Densidade do sólido (g/cm³);
- ρ : Densidade da água (g/cm³);
- μ : Viscosidade da água (g/cm s);
- Dc: Diâmetro da região cilíndrica (cm);
- Du: Diâmetro da região do *underflow* (cm);
- R_L: Razão de líquido;
- Cv: Concentração volumétrica de sólidos na alimentação;
- d*: Diâmetro de corte (μm);
- η' : Eficiência individual de coleta reduzida;
- $\bar{\eta}'$: Eficiência global de coleta reduzida;
- $\bar{\eta}$: Eficiência global de coleta;
- Q_{LA}: Vazão no duto de alimentação do hidrociclone (cm³/s);
- Q_{LU}: Vazão volumétrica de líquido no *underflow* (cm³/s);
- Ca: Concentração de sólidos na alimentação (g/cm³);
- W_{sa}: Vazão mássica de sólidos na alimentação (g/s);
- W_{su}: Vazão mássica de sólidos no *underflow* (g/s);
- Cu: Concentração de sólidos no *underflow* (g/cm³);
- (-ΔP): Queda de pressão entre a alimentação e a descarga do *overflow* (mmH₂O);
- u_c: Velocidade média do fluido na seção cilíndrica do hidrociclone (cm/s);
- Pot: Potência de operação da bomba (HP).

Para os cálculos realizados, foram testados várias configurações de bateria de hidrociclones, variando o número de hidrociclones compondo a bateria fazendo uma associação em paralelo.

O número de hidrociclones compondo a bateria variou entre 1 a 10 separadores. A influência de outros parâmetros na razão de líquido também foi avaliada: o valor do diâmetro da região

cilíndrica (D_c) variou entre 2 a 10 cm e o valor da razão D_u/D_c variou entre 0,10 a 0,25. As variáveis de projeto pré-estabelecidas foram a vazão total (Q) de 18,75 m³/h e a concentração volumétrica da alimentação (C_v) que foi de 1% de sólidos, além da densidade do sólido que foi calculada por picnometria e as propriedades físicas da água que foram obtidas da literatura.

A família de hidrociclone escolhida para os cálculos foi a Rietema pois, esta é considerada a família que fornece o melhor resultado para fins de utilização de espessamento, que visa à eliminação da maior parte da água de uma suspensão comparando-a com o desempenho de um sedimentador espessador (Svarovsky, 2000). O método adotado para o cálculo da bateria de hidrociclones e as equações utilizadas seguem a metodologia de Massarani, (2001).

As variáveis foram calculadas de acordo com as seguintes Equações:

O diâmetro de corte das partículas foi calculado de acordo com a Equação 7.

$$\frac{d^*}{D_c} = 0,039 \sqrt{\frac{\mu D_c}{Q(\rho_s - \rho)}} \frac{e^{4,5C_v}}{[1 + 1,73R_L]} \quad (7)$$

Sendo a razão de líquido calculada conforme a Equação 8.

$$R_L = 145 \left(\frac{D_u}{D_c}\right)^{4,75} \quad (8)$$

A partir destes valores foram calculadas a eficiência individual de coleta reduzida, eficiência global de coleta reduzida e a eficiência global de coleta sendo a eficiência global de coleta reduzida calculada por meio da integração pelo método dos trapézios. A Eficiência Individual de Coleta reduzida foi calculada de acordo com a Equação 9.

$$\eta' = 1 - e^{\left[-\left(0,88\frac{dp}{d^*}\right)^{2,35}\right]} \quad (9)$$

A Eficiência Global de coleta reduzida foi calculada conforme a Equação 10.

$$\bar{\eta}' = \int_0^1 \eta' dX \quad (10)$$

A Eficiência Global de coleta foi calculada de acordo com a Equação 11.

$$\bar{\eta} = (1 - R_L)\bar{\eta}' + R_L \quad (11)$$

A partir da eficiência global de coleta foram feitos os cálculos para encontrar a concentração de sólidos no *underflow* (C_u). A vazão no duto de alimentação do hidrociclone foi calculada conforme a Equação 12.

$$Q_{LA} = Q(1 - Cv) \quad (12)$$

A vazão volumétrica de líquido no *underflow* foi calculada de acordo com a Equação 13.

$$Q_{LU} = Q_{LA}R_L \quad (13)$$

A concentração de sólidos na alimentação foi calculada conforme a Equação 14.

$$Ca = Cv\rho_s \quad (14)$$

A vazão mássica de sólidos na alimentação foi calculada de acordo com a Equação 15.

$$Wsa = CaQ \quad (15)$$

A vazão mássica de sólidos no *underflow* foi calculada conforme a Equação 16.

$$Wsu = Wsa\bar{\eta} \quad (16)$$

A concentração de sólidos no *underflow* foi calculada de acordo com a Equação 17.

$$C_u = \frac{Wsu}{Q_{LU} + \frac{Wsu}{\rho_s}} \quad (17)$$

A queda de pressão entre a alimentação e a descarga do *overflow* ($-\Delta P$) foi calculada conforme a Equação 18.

$$(-\Delta P) = 1200\rho \frac{u_c^2}{2} \quad (18)$$

Sendo a velocidade calculada conforme a Equação 19.

$$u_c = \frac{Q}{\left(\frac{\pi D_c^2}{4}\right)} \quad (19)$$

A partir do valor da queda de pressão e da vazão de alimentação da bateria de hidrociclones, calculou-se a potência de operação da bomba de acordo com a Equação 20.

$$Potência = Q(-\Delta P) \quad (20)$$

As 10 melhores configurações obtidas serão apresentadas na seção de resultados para se avaliar as principais variáveis de projeto na escolha da bateria para fins de comparação com o sedimentador. As variáveis analisadas para a melhor configuração proposta da bateria de hidrociclones foram a razão de líquido, eficiência global de coleta das partículas, concentração de sólidos no orifício de *underflow* e potência de operação da bomba. O objetivo foi atingir uma razão de líquido superior a 10%, eficiência global de coleta de pelo menos 60%, concentração de sólidos no orifício de *underflow* 3 vezes superior a concentração da alimentação e potência de operação da bomba inferior a 100 HP.

3.5 Metodologia adotada para o cálculo do Sedimentador-Espessador

Com intuito de avaliar o desempenho de um sedimentador-espessador frente à bateria de hidrociclones para obter uma suspensão do passante (leite de cal) mais concentrada, foram realizados cálculos utilizando o *software* Excel[®]. Dadas as concentrações de sólidos na alimentação e no *underflow* do espessador, um teste de proveta foi realizado segundo a metodologia de Kynch (Talmage e Fitch, 1955) em que necessita apenas de um ensaio que determine a curva de sedimentação (Z versus θ). Após o ensaio de proveta confeccionou-se a curva de sedimentação para aplicação do método gráfico de Talmage e Fitch. As variáveis analisadas foram:

- Ca: Concentração mássica de alimentação do sedimentador (g/cm³);

- C_L : Concentração mássica da lama (g/cm^3);
- F : Vazão volumétrica de suspensão de operação do sedimentador (m^3/h);
- Z_0 : Altura inicial do teste de proveta (cm);
- Z_{\min} : Representa a altura que a suspensão ocuparia se todos os sólidos estivessem em uma dada concentração C (cm);
- θ_{\min} : Tempo correspondente no gráfico a Z_{\min} (min);
- $(F/A)_{\min}$: Razão de projeto entre a vazão e a área do sedimentador ($\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ h}$);
- A : Área do sedimentador (m^2);
- R : Raio do sedimentador (m);
- C_{a^*} : Concentração volumétrica de sólidos na alimentação;
- $t_{\text{sedimentação}}$: tempo de residência da região de compactação (min);
- ρ_{lodo} : densidade do lodo (g/cm^3);
- H_1 : Altura região clarificada mais região constante (m);
- H_2 : Altura do fundo (m);
- H_c : Altura região de compactação (m);
- H_{total} : Altura total do sedimentador (m).

As variáveis de projeto pré-estabelecidas foram a vazão (F) de $18,75 \text{ m}^3/\text{h}$, a concentração de alimentação do sedimentador que foi considerada igual a concentração de sólidos na alimentação (C_a) do hidrociclone, a concentração da lama igual a concentração do *underflow* (C_u) do hidrociclone, além da densidade do sólido que foi calculada por picnometria e as propriedades físicas da água que foram obtidas da literatura. A metodologia de cálculo adotada e as equações seguem a metodologia de Kynch (1952). As variáveis foram calculadas de acordo com as seguintes Equações:

A altura (Z_{\min}) foi calculada de acordo com a Equação 21.

$$Z_{\min} = \frac{C_a Z_0}{C_L} \quad (21)$$

O tempo θ_{\min} foi calculado a partir da interpolação entre valores de altura e tempo da curva de sedimentação, conforme a Equação 22.

$$\frac{\theta_{\min} - \theta_n}{\theta_{n+1} - \theta_n} = \frac{Z_{\min} - Z_n}{Z_{n+1} - Z_n} \quad (22)$$

A razão $(F/A)_{min}$ foi calculada de acordo com a equação 23.

$$\left(\frac{F}{A}\right)_{min} = \frac{Z_0}{\theta_{min}} \quad (23)$$

A Área do Sedimentador foi calculada rearranjando a Equação 23, obtendo-se a Equação 24. Sendo que, o valor da área foi acrescido de um fator de segurança de 10%.

$$A = \frac{F\theta_{min}}{Z_0} \quad (24)$$

A partir da área, calculou-se o Raio do Sedimentador conforme a Equação 25.

$$R = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (25)$$

A concentração volumétrica de sólidos foi calculada de acordo com a Equação 26.

$$Ca^* = \frac{Ca}{\rho_s} \quad (26)$$

A densidade do lodo foi calculada conforme a Equação 27.

$$\rho_{lodo} = \frac{\left(m_{sólido} + \left(V_{sólido} - \frac{m_{sólido}}{\rho_s}\right)\right)\rho}{V_{sólido}} \quad (27)$$

Sendo que, para o Volume de sólido foi adotada uma base de cálculo de 1 litro de suspensão, ou 1000 cm³.

A altura H₁ é calculada somando a região clarificada mais a região de concentração constante, sendo que este valor varia entre 0,45 a 0,75 m. Para os cálculos aqui realizados adotou-se o valor de projeto para H₁ que é de 0,60 m.

A altura H₂ foi calculada conforme a Equação 28.

$$H_2 = 0,146R \quad (28)$$

A altura H_c foi calculada adotando a correlação de Orr, de acordo com a Equação 29.

$$H_c = \frac{4FC_a^* t_{sedimentação}}{3A} \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho_{lodo} - \rho} \right) \quad (29)$$

Sendo o tempo de sedimentação o tempo de residência da região de compactação calculado a partir do gráfico gerado pelo teste de proveta.

Por fim, a altura total do sedimentador foi calculada conforme a Equação 30.

$$H_{total} = H_1 + H_2 + H_c \quad (30)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos no teste de Picnometria, na análise granulométrica, nos cálculos do hidrociclone e no ensaio de proveta seguido dos cálculos do Sedimentador.

4.1 Massa específica dos sólidos

Realizou-se um total de 5 testes de picnometria (P1, P2, P3, P4 e P5) para determinação da massa específica dos sólidos. O valor utilizado nos cálculos foi o valor médio dos 5 testes. Na Tabela 3 a seguir é possível visualizar os valores das massas obtidas durante a realização dos testes.

Tabela 3 – Dados Teste de Picnometria.

| | Picnômetro (g) | Picnômetro e amostra (g) | Picnômetro e água (g) | Picnômetro, amostra e água (g) | Massa específica (g/cm ³) |
|--|-------------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------------------|---|
| P1 | 33,88 | 35,06 | 91,48 | 92,18 | 2,45 |
| P2 | 33,88 | 37,36 | 91,48 | 93,44 | 2,28 |
| P3 | 33,88 | 35,38 | 91,50 | 92,37 | 2,37 |
| P4 | 33,88 | 35,10 | 91,54 | 92,25 | 2,39 |
| P5 | 33,88 | 35,50 | 91,47 | 92,43 | 2,45 |
| Massa específica média (g/cm³) | | | | | 2,39 |
| Desvio padrão (g/cm³) | | | | | 0,07 |

A partir dos testes de picnometria obteve-se o valor da massa específica dos sólidos de leite de cal que foi de $2,39 \pm 0,07 \frac{g}{cm^3}$. Esse valor é que foi usado para a densidade do sólido (ρ_s) nos cálculos de projeto do hidrociclone e do sedimentador.

4.2 Distribuição Granulométrica

O equipamento *Mastersizer Microplus* da marca *Malvern* é um analisador de partículas por difração a *laser*, sendo a dimensão característica fornecida pelo equipamento, o diâmetro volumétrico das partículas.

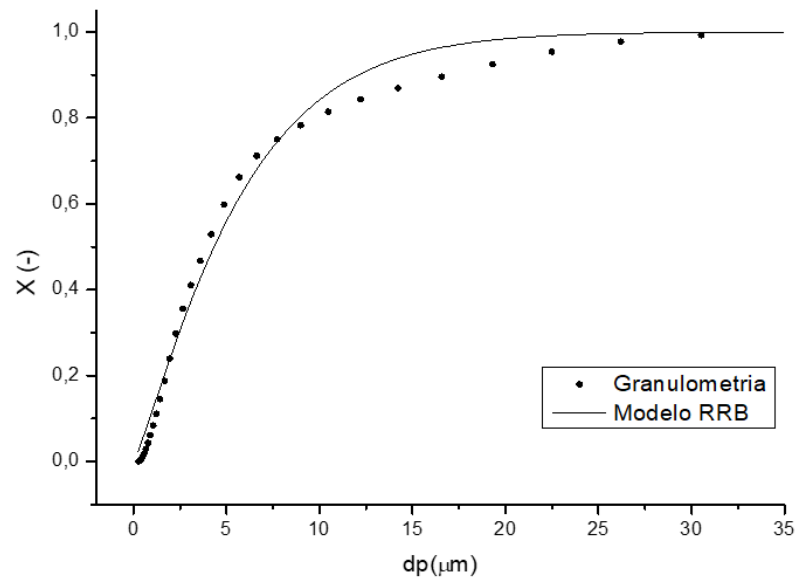
Com os dados obtidos na análise de distribuição granulométrica realizou-se um ajuste seguindo o modelo Rosin-Rammler-Bennet (RRB), utilizando o *Software Statistica*®.

O coeficiente de determinação (r^2) foi de 0,98798 e os parâmetros do ajuste $d_{63,2}$ e n foram, respectivamente, 5,9238 μm e 1,165. O modelo RRB ajustado é mostrado na Equação 31.

$$X = 1 - \exp\left[-\left(\frac{dp}{5,9238}\right)^{1,165}\right] \quad (31)$$

A distribuição granulométrica típica do material particulado utilizando o modelo RRB ajustado é apresentada na Figura 9.

Figura 9 - Distribuição granulométrica do leite de cal puro.



Com base nos dados da Figura 9 conclui-se que a amostra é composta em sua maioria por material fino. O material consiste essencialmente de finos naturais de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio.

4.3 Resultados obtidos nos cálculos do Hidrociclone

Para os cálculos de projeto da bateria de hidrociclones foram adotadas as Equações correspondentes à família Rietema de hidrociclones. Foram calculadas mais de 300 configurações, variando o número de hidrociclones compondo a bateria, o diâmetro da região cilíndrica e razão D_u/D_c para o cálculo do diâmetro de corte e razão de líquido de cada configuração. Todos os resultados estão apresentados no Apêndice B. Dessas mais de 300 configurações calculadas, 20 foram selecionadas para fazer um cálculo mais detalhado de eficiência global e potência requerida. Esses dados estão apresentados no Apêndice C. A Tabela 4 contém os dados de 10 dessas configurações propostas para se avaliar as principais variáveis de projeto na escolha da bateria de hidrociclones.

Tabela 4 - Configurações propostas de hidrociclones.

| Configuração proposta de Hidrociclone | Bateria (n) | Dc (cm) | d* (μm) | Razão de Líquido | Eficiência Global (%) | Concentração no underflow (g/cm^3) | Potência (HP) |
|---------------------------------------|-------------|---------|----------------------|------------------|-----------------------|--|---------------|
| 1 | 3 | 2,00 | 2,9150 | 0,0694 | 65,36 | 0,2076 | 66,54 |
| 2 | 1 | 3,00 | 2,5719 | 0,2002 | 73,64 | 0,0856 | 354,87 |
| 3 | 7 | 7,00 | 29,1562 | 0,0694 | 11,40 | 0,0390 | 0,03 |
| 4 | 2 | 2,00 | 1,9799 | 0,2002 | 80,22 | 0,0929 | 224,57 |
| 5 | 5 | 2,00 | 4,0898 | 0,0177 | 51,62 | 0,5440 | 14,37 |
| 6 | 10 | 5,00 | 21,0373 | 0,0694 | 15,14 | 0,0515 | 0,05 |
| 7 | 9 | 2,00 | 5,0489 | 0,0694 | 47,34 | 0,1541 | 2,46 |
| 8 | 4 | 3,00 | 6,1837 | 0,0694 | 41,23 | 0,1353 | 5,55 |
| 9 | 1 | 4,00 | 3,9598 | 0,2002 | 61,53 | 0,0719 | 112,28 |
| 10 | 4 | 2,00 | 2,7999 | 0,2002 | 71,34 | 0,0830 | 28,07 |

A partir dos dados da Tabela 4, avaliou-se qual seria a melhor configuração de bateria de hidrociclones proposta para operar em associação em paralelo, na qual fosse possível obter uma razão de líquido superior a 10%, concentração de sólidos no orifício de *underflow* de pelo menos 3 vezes a concentração de sólidos no duto de alimentação, possuindo eficiência global de coleta de pelo menos 60% e que não fosse gerar um alto custo de operação, ou seja, que tivesse uma potência de operação da bomba menor que 100 HP.

Nos cálculos realizados procurou-se escolher configurações com maiores valores de eficiência. No entanto, observou-se que quanto maiores são os valores de eficiência, maiores

são os valores da potência necessária para a operação da bomba. Isso oneraria bastante o custo do processo. Dessa forma, à medida que diminuía-se uma variável ao mesmo tempo aumentava-se o valor de outra variável para se avaliar os resultados obtidos e balancear os valores atingidos. Assim, as configurações de hidrociclone 2, 4 e 9 foram descartadas de imediato, uma vez que apresentaram um valor de potência bem superior a 100 HP, ou seja, incompatíveis com as realidades do projeto.

As configurações de hidrociclone 3 e 6 apesar de possuírem os menores valores de potência, apresentaram baixas concentrações de sólidos no *underflow*, abaixo do objetivo esperado, que é de 3 vezes a concentração de sólidos na alimentação. Além disso, apresentaram valores de eficiência muito baixos, de 11,40 e 15,14% respectivamente. Esses valores de eficiência global muito baixos geram uma perda alta na coleta das partículas para a região do tubo de *overflow* do hidrociclone, tornando inviável o modelo proposto e sua operação.

A configuração 5 apesar de ter apresentado a maior concentração de sólidos no *underflow*, apresentou eficiência global de coleta abaixo do objetivo esperado que é de 60%. As configurações 7 e 8 apesar dos baixos valores de potência apresentados, obtiveram valores de eficiência baixos, abaixo do objetivo esperado, gerando uma perda alta na coleta das partículas para a região do tubo de *overflow* do hidrociclone.

A configuração de hidrociclone 1, apresentou valor relativamente alto de potência de operação para a eficiência global de coleta apresentada. Apesar de maior o valor de eficiência quando comparado às configurações 5, 7 e 8 seu valor de potência foi de 4 a 27 vezes maior, não compensando pelo baixo aumento da eficiência obtida. Além disso, em comparação com a configuração 10, apresentou menor eficiência global de coleta e maior potência de operação.

Desse modo, a configuração escolhida foi a de número 10, que consiste em uma bateria de 4 hidrociclones arranjadas em paralelo, diâmetro da região cilíndrica (D_c) de 2 cm, razão D_u/D_c de 0,25 e diâmetro de corte de aproximadamente 2,8 μm . Essa configuração apresentou um dos maiores valores de razão de líquido que foi de 0,20, junto as configurações 2, 4 e 9, eficiência global de coleta de 71,34%, valor esse acima da média para os valores de eficiência das configurações apresentadas, concentração de sólidos no orifício de *underflow* de 0,083 g/cm^3 , ou seja, concentração cerca de 3,5 vezes superior à concentração de alimentação e potência de operação abaixo da média para os valores apresentados, de 28,07 HP.

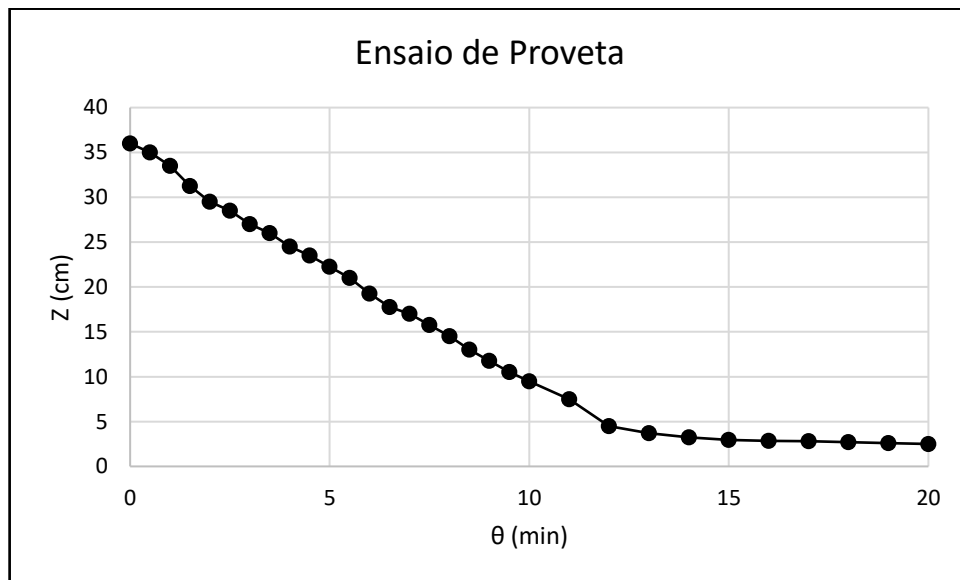
Logo, a configuração 10 foi usada para comparação com o sedimentador verificando o desempenho deste com o hidrociclone para concentração da suspensão de sólidos do leite de cal.

4.4 Resultados obtidos nos cálculos do Sedimentador

Para os cálculos de projeto do Sedimentador foi necessário realizar um teste de Proveta. Foram realizados 5 testes de proveta sendo que, estes apresentaram um comportamento de sedimentação bem semelhantes. Dessa forma, foi escolhido o teste que melhor representou esse comportamento.

A Figura 10 apresenta a curva de sedimentação obtida para o teste de proveta a uma concentração de $0,0239 \text{ g/cm}^3$ (igual à da alimentação do hidrociclone).

Figura 10 - Teste de proveta para amostra de sólidos de leite de cal puro.



A partir dos valores obtidos por análise gráfica (Z_0 , Z_{\min} , θ_{\min} e $t_{\text{sedimentação}}$) foram calculadas as variáveis de projeto do sedimentador, conforme mostra a Tabela 5.

Tabela 5 - Dimensões de operação do sedimentador.

| $C_a \text{ (g/cm}^3\text{)}$ | $C_{\text{lama}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$ | Vazão (m^3/h) | Área (m^2) | Raio (m) | H_{total} (m) |
|-------------------------------|---|------------------------------------|-----------------------|----------|------------------------|
| 0,0239 | 0,0830 | 18,75 | 9,14 | 1,70 | 0,89 |

A função do sedimentador aqui adotada é a de espessamento que visa à obtenção de uma suspensão mais concentrada à fim de se comparar seu desempenho com a configuração proposta de hidrociclone da família Rietema. Os resultados de projeto obtidos para o sedimentador foram satisfatórios visto que, para as condições de operação, um sedimentador pequeno de 0,89 m de altura e 9,14 m² de área consegue ser eficaz no serviço de concentração das partículas de suspensão do leite de cal e ainda operará com 100% de eficiência.

Devido à falta de informações de projeto, não foram calculadas a perda de carga no sedimentador e potência de operação da bomba. Ainda assim, quando comparado a configuração proposta 10 de hidrociclone espera-se que o valor de potência da bomba seja menor que o valor apresentado por essa configuração.

5. CONCLUSÃO

A partir dos cálculos realizados neste trabalho, foi possível obter uma comparação entre o desempenho de uma bateria de hidrociclones pertencentes à família Rietema com um sedimentador-espessador à fim de se concentrar as partículas de suspensão de sólidos do leite de cal.

Quando avaliadas as dimensões de projeto das diferentes configurações de bateria de hidrociclone propostos, buscou-se atingir um valor de eficiência global de coleta próximo a 100%. No entanto, verificou-se que isso não seria possível, pois iria gerar um aumento da queda de pressão entre a alimentação e a descarga no tubo de *overflow* do hidrociclone e, conseqüentemente, aumento da potência de operação da bomba, gerando altos custos de operação e então, inviabilizando o projeto.

Fazendo a comparação das diferentes configurações de bateria de hidrociclone propostas, verificou-se que a configuração proposta de número 10 foi a que atingiu melhores resultados frente as outras configurações propostas. A configuração número 10 irá operar num arranjo em paralelo de 4 hidrociclones com uma razão de líquido do orifício do *underflow* e da alimentação de 0,20, eficiência global de coleta de 71,34%, concentração de sólidos no orifício do *underflow* 3,5 vezes superior à concentração de alimentação e potência da bomba de 28,07 HP. Esses valores satisfazem os critérios esperados de operação que são de razão de líquido superior a 10%, eficiência global de coleta superior a 60%, concentração de sólidos no orifício do *underflow* 3 vezes superior a concentração do duto de alimentação e potência de operação da bomba inferior a 100 HP.

A partir do teste de proveta realizou-se os cálculos de projeto para o sedimentador operando com concentração de alimentação igual a concentração de alimentação do hidrociclone e concentração de lama igual a concentração do *underflow* do hidrociclone. A área obtida do sedimentador é de 9,14 m² sendo o raio de 1,7 m e altura de 0,89 m. Uma vez que o sedimentador irá operar com 100% de eficiência e com uma área de projeto considerada pequena para a vazão de operação de 18,75 m³/h, conclui-se que este será a melhor opção para fazer a concentração das partículas de sólidos do leite de cal. Ainda que não tenha sido calculada a potência de operação da bomba para o sedimentador, espera-se que este valor seja menor quando comparado a configuração proposta, favorecendo ainda mais o desempenho do sedimentador frente a configuração proposta de número 10 da bateria de hidrociclones.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, C. A. K., 2008. Comportamento do Hidrociclone Filtrante frente às modificações no diâmetro de *underflow* e no tubo de *vortex finder*, Tese de mestrado submetida ao PPGEQ/Faculdade de Engenharia Química da UFU, Uberlândia-MG.

BRADLEY, D. The hydrocyclone. Oxford. Pergamon, 1965.

FRANÇA, S. C. A, MASSARANI. G. “Separação sólido-líquido”. Comunicação Técnica elaborada para a 3a Edição do Livro de Tratamento de Tratamento de Minérios, cap.14, p.571-609, Rio de Janeiro, Brasil, 2002.

GUIMARÃES, F. A. V., 2010. Revisão nos métodos de dimensionamento de espessadores e comparação dos modelos industriais, Tese de mestrado submetida ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da UFMG, Belo Horizonte-MG.

KYNCH, G. J. A Theory of Sedimentation. 1952 Trans. Faraday Society, 48, 1666-177, London; Apud. SOUSA, P. A. Espessamento de Polpas. 2012. 49 f. Monografia. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

LANNA, A. E.; BARROZO, M. A. S.; DAMASCENO, J. J. R. 1992. Estudo de desempenho de um hidrociclone filtrante. Revista Ciência & Engenharia, 2008.

LIRA, J. R., 2010. Estudo dos parâmetros que influenciam a floculação na sedimentação contínua, Tese de doutorado submetida ao PPGEQ/Faculdade de Engenharia Química da UFU, Uberlândia-MG.

LUZ, A. B., SAMPAIO, J. A., FRANÇA, S. C. Tratamento de Minérios. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2010, 932p.

MAIA, J. F., SILVA, O. H. A. Verificação dos métodos de dimensionamento de espessadores.

MASSARANI, G. Fluidodinâmica em sistemas particulados. Rio de Janeiro: Editora Papers Serviços Editoriais, 2001.

MOURA, A.D., MOURA, T. R., ALMEIDA, A. R. F., Análise e projeto de hidrociclones para o processamento de lodo provido da indústria têxtil, COBEQ 2014.

NUNES, J. F., 2008. Estudo da Sedimentação Gravitacional de Suspensões Floculentas, Tese de mestrado submetida ao PPGEQ/Faculdade de Engenharia Química da UFU, Uberlândia-MG.

OLIVEIRA, M. L. M., LUZ, J. A. M., LACERDA, C. M. M. Escola de Minas da universidade Federal de Ouro Preto. Espessamento e Filtragem, Ouro Preto. 2004, 121p.

SALVADOR, F. F., 2017. Otimização Geométrica de Hidrociclones com Cilindros e Cones Permeáveis, Tese de doutorado submetida ao PPGEQ/Faculdade de Engenharia Química da UFU, Uberlândia-MG.

SANTOS, L. R., 2018. Dimensionamento de Espessador: Validação das técnicas de *COE E CLEVENGER, TALMAGE E FITCH E OLTMANN*. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Minas do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG.

SILVA, N. K. G., 2014. Estudo de otimização da configuração do Hidrociclone Filtrante, Tese de mestrado submetida ao PPGEQ/Faculdade de Engenharia Química da UFU, Uberlândia-MG.

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

TALMAGE, W.P.; FITCH, E.B.; Determining Thickener unit areas, Ind. Eng.Chem, v.47 (1955); Apud. SOUSA, P. A. Espessamento de Polpas. 2012. 49 f. Monografia. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

TORQUATO, N. C., LUZ, J. A. M. Espessadores no beneficiamento de minério de ferro. REM: Revista Escola de Minas, Ouro Preto, p. 091-096, jan/mar. 2011.

VIEIRA, L. G. M., 2006. Otimização dos Processos de Separação em Hidrociclones Filtrantes, Tese de doutorado submetida ao PPGEQ/Faculdade de Engenharia Química da UFU, Uberlândia-MG.

<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/15053/2/LGMVieira2TESPRT.pdf>

APÊNDICE A

Distribuição granulométrica típica do material particulado.

| dp (µm) | X (-) |
|---------|----------|
| 0,2683 | 0,000287 |
| 0,3125 | 0,001041 |
| 0,3641 | 0,002692 |
| 0,4242 | 0,005766 |
| 0,4941 | 0,010849 |
| 0,5757 | 0,018529 |
| 0,6707 | 0,029319 |
| 0,7813 | 0,043597 |
| 0,9103 | 0,061712 |
| 1,0604 | 0,084006 |
| 1,2354 | 0,111360 |
| 1,4393 | 0,145364 |
| 1,6767 | 0,187927 |
| 1,9534 | 0,239612 |
| 2,2757 | 0,297502 |
| 2,6512 | 0,355781 |
| 3,0887 | 0,466798 |
| 3,5983 | 0,529217 |
| 4,1920 | 0,59784 |
| 4,8837 | 0,661740 |
| 5,6895 | 0,711703 |
| 6,6283 | 0,749443 |
| 7,7219 | 0,782822 |
| 10,4804 | 0,814630 |
| 12,2096 | 0,843281 |
| 14,2242 | 0,869044 |
| 16,5712 | 0,895470 |
| 19,3055 | 0,924637 |
| 22,4909 | 0,953639 |
| 26,2019 | 0,977437 |
| 30,5252 | 0,992349 |

APÊNDICE B

Cálculos do diâmetro de corte fixando o diâmetro da região cilíndrica (Dc) em 2 cm, variando a bateria entre 1 a 10 hidrociclones e variando a razão Du/Dc entre 0,10 a 0,25.

| n | Q (cm ³ /s) | ps (g/cm ³) | p (g/cm ³) | μ (g/cm ³ *s) | Dc (cm) | Du/Dc | RL | Cv (cm ³ /cm ³) | d* (cm) | d* (μm) |
|----|------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|---------|-------|----------|--|----------|----------|
| 1 | 5208,333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 2 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,000188 | 1,876627 |
| 2 | 2604,167 | 2,39 | 1 | 0,01 | 2 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,000265 | 2,653951 |
| 3 | 1736,111 | 2,39 | 1 | 0,01 | 2 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,000325 | 3,250413 |
| 4 | 1302,083 | 2,39 | 1 | 0,01 | 2 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,000375 | 3,753253 |
| 5 | 1041,667 | 2,39 | 1 | 0,01 | 2 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,00042 | 4,196265 |
| 6 | 868,0556 | 2,39 | 1 | 0,01 | 2 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,00046 | 4,596778 |
| 7 | 744,0476 | 2,39 | 1 | 0,01 | 2 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,000497 | 4,965087 |
| 8 | 651,0417 | 2,39 | 1 | 0,01 | 2 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,000531 | 5,307902 |
| 9 | 578,7037 | 2,39 | 1 | 0,01 | 2 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,000563 | 5,62988 |
| 10 | 520,8333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 2 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,000593 | 5,934414 |

| n | Q (cm ³ /s) | ps (g/cm ³) | p (g/cm ³) | μ (g/cm ³ *s) | Dc (cm) | Du/Dc | RL | Cv (cm ³ /cm ³) | d* (cm) | d* (μm) |
|----|------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|---------|-------|----------|--|----------|----------|
| 1 | 5208,333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 2 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,000183 | 1,829014 |
| 2 | 2604,167 | 2,39 | 1 | 0,01 | 2 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,000259 | 2,586616 |
| 3 | 1736,111 | 2,39 | 1 | 0,01 | 2 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,000317 | 3,167945 |
| 4 | 1302,083 | 2,39 | 1 | 0,01 | 2 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,000366 | 3,658028 |
| 5 | 1041,667 | 2,39 | 1 | 0,01 | 2 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,000409 | 4,089799 |
| 6 | 868,0556 | 2,39 | 1 | 0,01 | 2 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,000448 | 4,480151 |
| 7 | 744,0476 | 2,39 | 1 | 0,01 | 2 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,000484 | 4,839116 |
| 8 | 651,0417 | 2,39 | 1 | 0,01 | 2 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,000517 | 5,173232 |
| 9 | 578,7037 | 2,39 | 1 | 0,01 | 2 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,000549 | 5,487041 |
| 10 | 520,8333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 2 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,000578 | 5,783849 |

| n | Q (cm ³ /s) | ps (g/cm ³) | p (g/cm ³) | μ (g/cm ³ *s) | Dc (cm) | Du/Dc | RL | Cv (cm ³ /cm ³) | d* (cm) | d* (μm) |
|----|------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|---------|-------|----------|--|----------|----------|
| 1 | 5208,333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 2 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,000168 | 1,682982 |
| 2 | 2604,167 | 2,39 | 1 | 0,01 | 2 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,000238 | 2,380096 |
| 3 | 1736,111 | 2,39 | 1 | 0,01 | 2 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,000292 | 2,91501 |
| 4 | 1302,083 | 2,39 | 1 | 0,01 | 2 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,000337 | 3,365964 |
| 5 | 1041,667 | 2,39 | 1 | 0,01 | 2 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,000376 | 3,763262 |
| 6 | 868,0556 | 2,39 | 1 | 0,01 | 2 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,000412 | 4,122447 |
| 7 | 744,0476 | 2,39 | 1 | 0,01 | 2 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,000445 | 4,452751 |
| 8 | 651,0417 | 2,39 | 1 | 0,01 | 2 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,000476 | 4,760191 |
| 9 | 578,7037 | 2,39 | 1 | 0,01 | 2 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,000505 | 5,048945 |
| 10 | 520,8333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 2 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,000532 | 5,322056 |

| n | Q (cm ³ /s) | ps (g/cm ³) | p (g/cm ³) | μ (g/cm ³ *s) | Dc (cm) | Du/Dc | RL | Cv (cm ³ /cm ³) | d* (cm) | d* (μm) |
|----|------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|---------|-------|----------|--|----------|----------|
| 1 | 5208,333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 2 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,00014 | 1,399986 |
| 2 | 2604,167 | 2,39 | 1 | 0,01 | 2 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,000198 | 1,979879 |
| 3 | 1736,111 | 2,39 | 1 | 0,01 | 2 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,000242 | 2,424846 |
| 4 | 1302,083 | 2,39 | 1 | 0,01 | 2 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,00028 | 2,799971 |
| 5 | 1041,667 | 2,39 | 1 | 0,01 | 2 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,000313 | 3,130463 |
| 6 | 868,0556 | 2,39 | 1 | 0,01 | 2 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,000343 | 3,42925 |
| 7 | 744,0476 | 2,39 | 1 | 0,01 | 2 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,00037 | 3,704014 |
| 8 | 651,0417 | 2,39 | 1 | 0,01 | 2 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,000396 | 3,959757 |
| 9 | 578,7037 | 2,39 | 1 | 0,01 | 2 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,00042 | 4,199957 |
| 10 | 520,8333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 2 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,000443 | 4,427143 |

Cálculos do diâmetro de corte fixando o diâmetro da região cilíndrica (Dc) em 3 cm, variando a bateria entre 1 a 10 hidrociclones e variando a razão Du/Dc entre 0,10 a 0,25.

| n | Q (cm ³ /s) | ρs (g/cm ³) | ρ (g/cm ³) | μ (g/cm*s) | Dc (cm) | Du/Dc | RL | Cv (cm ³ /cm ³) | d* (cm) | d* (μm) |
|----|------------------------|-------------------------|------------------------|------------|---------|-------|----------|--|----------|----------|
| 1 | 5208,333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 3 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,000345 | 3,447583 |
| 2 | 2604,167 | 2,39 | 1 | 0,01 | 3 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,000488 | 4,875619 |
| 3 | 1736,111 | 2,39 | 1 | 0,01 | 3 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,000597 | 5,971389 |
| 4 | 1302,083 | 2,39 | 1 | 0,01 | 3 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,00069 | 6,895166 |
| 5 | 1041,667 | 2,39 | 1 | 0,01 | 3 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,000771 | 7,70903 |
| 6 | 868,0556 | 2,39 | 1 | 0,01 | 3 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,000844 | 8,44482 |
| 7 | 744,0476 | 2,39 | 1 | 0,01 | 3 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,000912 | 9,121448 |
| 8 | 651,0417 | 2,39 | 1 | 0,01 | 3 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,000975 | 9,751238 |
| 9 | 578,7037 | 2,39 | 1 | 0,01 | 3 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,001034 | 10,34275 |
| 10 | 520,8333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 3 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,00109 | 10,90222 |

| n | Q (cm ³ /s) | ρs (g/cm ³) | ρ (g/cm ³) | μ (g/cm*s) | Dc (cm) | Du/Dc | RL | Cv (cm ³ /cm ³) | d* (cm) | d* (μm) |
|----|------------------------|-------------------------|------------------------|------------|---------|-------|----------|--|----------|----------|
| 1 | 5208,333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 3 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,000336 | 3,360113 |
| 2 | 2604,167 | 2,39 | 1 | 0,01 | 3 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,000475 | 4,751917 |
| 3 | 1736,111 | 2,39 | 1 | 0,01 | 3 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,000582 | 5,819886 |
| 4 | 1302,083 | 2,39 | 1 | 0,01 | 3 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,000672 | 6,720226 |
| 5 | 1041,667 | 2,39 | 1 | 0,01 | 3 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,000751 | 7,513441 |
| 6 | 868,0556 | 2,39 | 1 | 0,01 | 3 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,000823 | 8,230562 |
| 7 | 744,0476 | 2,39 | 1 | 0,01 | 3 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,000889 | 8,890023 |
| 8 | 651,0417 | 2,39 | 1 | 0,01 | 3 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,00095 | 9,503834 |
| 9 | 578,7037 | 2,39 | 1 | 0,01 | 3 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,001008 | 10,08034 |
| 10 | 520,8333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 3 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,001063 | 10,62561 |

| n | Q (cm ³ /s) | ρs (g/cm ³) | ρ (g/cm ³) | μ (g/cm*s) | Dc (cm) | Du/Dc | RL | Cv (cm ³ /cm ³) | d* (cm) | d* (μm) |
|----|------------------------|-------------------------|------------------------|------------|---------|-------|----------|--|----------|----------|
| 1 | 5208,333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 3 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,000309 | 3,091835 |
| 2 | 2604,167 | 2,39 | 1 | 0,01 | 3 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,000437 | 4,372515 |
| 3 | 1736,111 | 2,39 | 1 | 0,01 | 3 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,000536 | 5,355215 |
| 4 | 1302,083 | 2,39 | 1 | 0,01 | 3 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,000618 | 6,18367 |
| 5 | 1041,667 | 2,39 | 1 | 0,01 | 3 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,000691 | 6,913553 |
| 6 | 868,0556 | 2,39 | 1 | 0,01 | 3 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,000757 | 7,573418 |
| 7 | 744,0476 | 2,39 | 1 | 0,01 | 3 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,000818 | 8,180226 |
| 8 | 651,0417 | 2,39 | 1 | 0,01 | 3 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,000875 | 8,74503 |
| 9 | 578,7037 | 2,39 | 1 | 0,01 | 3 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,000928 | 9,275505 |
| 10 | 520,8333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 3 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,000978 | 9,777241 |

| n | Q (cm ³ /s) | ρs (g/cm ³) | ρ (g/cm ³) | μ (g/cm*s) | Dc (cm) | Du/Dc | RL | Cv (cm ³ /cm ³) | d* (cm) | d* (μm) |
|----|------------------------|-------------------------|------------------------|------------|---------|-------|----------|--|----------|----------|
| 1 | 5208,333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 3 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,000257 | 2,571938 |
| 2 | 2604,167 | 2,39 | 1 | 0,01 | 3 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,000364 | 3,637269 |
| 3 | 1736,111 | 2,39 | 1 | 0,01 | 3 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,000445 | 4,454727 |
| 4 | 1302,083 | 2,39 | 1 | 0,01 | 3 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,000514 | 5,143876 |
| 5 | 1041,667 | 2,39 | 1 | 0,01 | 3 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,000575 | 5,751028 |
| 6 | 868,0556 | 2,39 | 1 | 0,01 | 3 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,00063 | 6,299935 |
| 7 | 744,0476 | 2,39 | 1 | 0,01 | 3 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,00068 | 6,804708 |
| 8 | 651,0417 | 2,39 | 1 | 0,01 | 3 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,000727 | 7,274539 |
| 9 | 578,7037 | 2,39 | 1 | 0,01 | 3 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,000772 | 7,715813 |
| 10 | 520,8333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 3 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,000813 | 8,133181 |

Cálculos do diâmetro de corte fixando o diâmetro da região cilíndrica (Dc) em 4 cm, variando a bateria entre 1 a 10 hidrociclones e variando a razão Du/Dc entre 0,10 a 0,25.

| n | Q (cm ³ /s) | ρs (g/cm ³) | ρ (g/cm ³) | μ (g/cm ³ *s) | Dc (cm) | Du/Dc | RL | Cv (cm ³ /cm ³) | d* (cm) | d* (μm) |
|----|------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|---------|-------|----------|--|----------|----------|
| 1 | 5208,333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 4 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,000531 | 5,307902 |
| 2 | 2604,167 | 2,39 | 1 | 0,01 | 4 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,000751 | 7,506506 |
| 3 | 1736,111 | 2,39 | 1 | 0,01 | 4 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,000919 | 9,193555 |
| 4 | 1302,083 | 2,39 | 1 | 0,01 | 4 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,001062 | 10,6158 |
| 5 | 1041,667 | 2,39 | 1 | 0,01 | 4 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,001187 | 11,86883 |
| 6 | 868,0556 | 2,39 | 1 | 0,01 | 4 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,0013 | 13,00165 |
| 7 | 744,0476 | 2,39 | 1 | 0,01 | 4 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,001404 | 14,04339 |
| 8 | 651,0417 | 2,39 | 1 | 0,01 | 4 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,001501 | 15,01301 |
| 9 | 578,7037 | 2,39 | 1 | 0,01 | 4 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,001592 | 15,9237 |
| 10 | 520,8333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 4 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,001679 | 16,78506 |

| n | Q (cm ³ /s) | ρs (g/cm ³) | ρ (g/cm ³) | μ (g/cm ³ *s) | Dc (cm) | Du/Dc | RL | Cv (cm ³ /cm ³) | d* (cm) | d* (μm) |
|----|------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|---------|-------|----------|--|----------|----------|
| 1 | 5208,333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 4 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,000517 | 5,173232 |
| 2 | 2604,167 | 2,39 | 1 | 0,01 | 4 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,000732 | 7,316055 |
| 3 | 1736,111 | 2,39 | 1 | 0,01 | 4 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,000896 | 8,960301 |
| 4 | 1302,083 | 2,39 | 1 | 0,01 | 4 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,001035 | 10,34646 |
| 5 | 1041,667 | 2,39 | 1 | 0,01 | 4 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,001157 | 11,5677 |
| 6 | 868,0556 | 2,39 | 1 | 0,01 | 4 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,001267 | 12,67178 |
| 7 | 744,0476 | 2,39 | 1 | 0,01 | 4 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,001369 | 13,68709 |
| 8 | 651,0417 | 2,39 | 1 | 0,01 | 4 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,001463 | 14,63211 |
| 9 | 578,7037 | 2,39 | 1 | 0,01 | 4 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,001552 | 15,5197 |
| 10 | 520,8333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 4 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,001636 | 16,3592 |

| n | Q (cm ³ /s) | ρs (g/cm ³) | ρ (g/cm ³) | μ (g/cm ³ *s) | Dc (cm) | Du/Dc | RL | Cv (cm ³ /cm ³) | d* (cm) | d* (μm) |
|----|------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|---------|-------|----------|--|----------|----------|
| 1 | 5208,333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 4 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,000476 | 4,760191 |
| 2 | 2604,167 | 2,39 | 1 | 0,01 | 4 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,000673 | 6,731927 |
| 3 | 1736,111 | 2,39 | 1 | 0,01 | 4 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,000824 | 8,244893 |
| 4 | 1302,083 | 2,39 | 1 | 0,01 | 4 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,000952 | 9,520383 |
| 5 | 1041,667 | 2,39 | 1 | 0,01 | 4 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,001064 | 10,64411 |
| 6 | 868,0556 | 2,39 | 1 | 0,01 | 4 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,001166 | 11,66004 |
| 7 | 744,0476 | 2,39 | 1 | 0,01 | 4 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,001259 | 12,59428 |
| 8 | 651,0417 | 2,39 | 1 | 0,01 | 4 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,001346 | 13,46385 |
| 9 | 578,7037 | 2,39 | 1 | 0,01 | 4 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,001428 | 14,28057 |
| 10 | 520,8333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 4 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,001505 | 15,05305 |

| n | Q (cm ³ /s) | ρs (g/cm ³) | ρ (g/cm ³) | μ (g/cm ³ *s) | Dc (cm) | Du/Dc | RL | Cv (cm ³ /cm ³) | d* (cm) | d* (μm) |
|----|------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|---------|-------|----------|--|----------|----------|
| 1 | 5208,333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 4 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,000396 | 3,959757 |
| 2 | 2604,167 | 2,39 | 1 | 0,01 | 4 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,00056 | 5,599942 |
| 3 | 1736,111 | 2,39 | 1 | 0,01 | 4 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,000686 | 6,858501 |
| 4 | 1302,083 | 2,39 | 1 | 0,01 | 4 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,000792 | 7,919515 |
| 5 | 1041,667 | 2,39 | 1 | 0,01 | 4 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,000885 | 8,854286 |
| 6 | 868,0556 | 2,39 | 1 | 0,01 | 4 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,00097 | 9,699385 |
| 7 | 744,0476 | 2,39 | 1 | 0,01 | 4 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,001048 | 10,47653 |
| 8 | 651,0417 | 2,39 | 1 | 0,01 | 4 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,00112 | 11,19988 |
| 9 | 578,7037 | 2,39 | 1 | 0,01 | 4 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,001188 | 11,87927 |
| 10 | 520,8333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 4 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,001252 | 12,52185 |

Cálculos do diâmetro de corte fixando o diâmetro da região cilíndrica (Dc) em 5 cm, variando a bateria entre 1 a 10 hidrociclones e variando a razão Du/Dc entre 0,10 a 0,25.

| n | Q (cm ³ /s) | ρs (g/cm ³) | ρ (g/cm ³) | μ (g/cm*s) | Dc (cm) | Du/Dc | RL | Cv (cm ³ /cm ³) | d* (cm) | d* (μm) |
|----|------------------------|-------------------------|------------------------|------------|---------|-------|----------|--|----------|----------|
| 1 | 5208,333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 5 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,000742 | 7,418018 |
| 2 | 2604,167 | 2,39 | 1 | 0,01 | 5 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,001049 | 10,49066 |
| 3 | 1736,111 | 2,39 | 1 | 0,01 | 5 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,001285 | 12,84838 |
| 4 | 1302,083 | 2,39 | 1 | 0,01 | 5 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,001484 | 14,83604 |
| 5 | 1041,667 | 2,39 | 1 | 0,01 | 5 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,001659 | 16,58719 |
| 6 | 868,0556 | 2,39 | 1 | 0,01 | 5 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,001817 | 18,17036 |
| 7 | 744,0476 | 2,39 | 1 | 0,01 | 5 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,001963 | 19,62623 |
| 8 | 651,0417 | 2,39 | 1 | 0,01 | 5 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,002098 | 20,98132 |
| 9 | 578,7037 | 2,39 | 1 | 0,01 | 5 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,002225 | 22,25405 |
| 10 | 520,8333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 5 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,002346 | 23,45783 |

| n | Q (cm ³ /s) | ρs (g/cm ³) | ρ (g/cm ³) | μ (g/cm*s) | Dc (cm) | Du/Dc | RL | Cv (cm ³ /cm ³) | d* (cm) | d* (μm) |
|----|------------------------|-------------------------|------------------------|------------|---------|-------|----------|--|----------|----------|
| 1 | 5208,333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 5 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,000723 | 7,229812 |
| 2 | 2604,167 | 2,39 | 1 | 0,01 | 5 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,001022 | 10,2245 |
| 3 | 1736,111 | 2,39 | 1 | 0,01 | 5 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,001252 | 12,5224 |
| 4 | 1302,083 | 2,39 | 1 | 0,01 | 5 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,001446 | 14,45962 |
| 5 | 1041,667 | 2,39 | 1 | 0,01 | 5 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,001617 | 16,16635 |
| 6 | 868,0556 | 2,39 | 1 | 0,01 | 5 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,001771 | 17,70935 |
| 7 | 744,0476 | 2,39 | 1 | 0,01 | 5 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,001913 | 19,12828 |
| 8 | 651,0417 | 2,39 | 1 | 0,01 | 5 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,002045 | 20,449 |
| 9 | 578,7037 | 2,39 | 1 | 0,01 | 5 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,002169 | 21,68944 |
| 10 | 520,8333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 5 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,002286 | 22,86267 |

| n | Q (cm ³ /s) | ρs (g/cm ³) | ρ (g/cm ³) | μ (g/cm*s) | Dc (cm) | Du/Dc | RL | Cv (cm ³ /cm ³) | d* (cm) | d* (μm) |
|----|------------------------|-------------------------|------------------------|------------|---------|-------|----------|--|----------|----------|
| 1 | 5208,333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 5 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,000665 | 6,65257 |
| 2 | 2604,167 | 2,39 | 1 | 0,01 | 5 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,000941 | 9,408154 |
| 3 | 1736,111 | 2,39 | 1 | 0,01 | 5 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,001152 | 11,52259 |
| 4 | 1302,083 | 2,39 | 1 | 0,01 | 5 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,001331 | 13,30514 |
| 5 | 1041,667 | 2,39 | 1 | 0,01 | 5 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,001488 | 14,8756 |
| 6 | 868,0556 | 2,39 | 1 | 0,01 | 5 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,00163 | 16,2954 |
| 7 | 744,0476 | 2,39 | 1 | 0,01 | 5 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,00176 | 17,60104 |
| 8 | 651,0417 | 2,39 | 1 | 0,01 | 5 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,001882 | 18,81631 |
| 9 | 578,7037 | 2,39 | 1 | 0,01 | 5 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,001996 | 19,95771 |
| 10 | 520,8333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 5 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,002104 | 21,03727 |

| n | Q (cm ³ /s) | ρs (g/cm ³) | ρ (g/cm ³) | μ (g/cm*s) | Dc (cm) | Du/Dc | RL | Cv (cm ³ /cm ³) | d* (cm) | d* (μm) |
|----|------------------------|-------------------------|------------------------|------------|---------|-------|----------|--|----------|----------|
| 1 | 5208,333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 5 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,000553 | 5,533929 |
| 2 | 2604,167 | 2,39 | 1 | 0,01 | 5 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,000783 | 7,826158 |
| 3 | 1736,111 | 2,39 | 1 | 0,01 | 5 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,000959 | 9,585046 |
| 4 | 1302,083 | 2,39 | 1 | 0,01 | 5 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,001107 | 11,06786 |
| 5 | 1041,667 | 2,39 | 1 | 0,01 | 5 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,001237 | 12,37424 |
| 6 | 868,0556 | 2,39 | 1 | 0,01 | 5 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,001356 | 13,5553 |
| 7 | 744,0476 | 2,39 | 1 | 0,01 | 5 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,001464 | 14,6414 |
| 8 | 651,0417 | 2,39 | 1 | 0,01 | 5 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,001565 | 15,65232 |
| 9 | 578,7037 | 2,39 | 1 | 0,01 | 5 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,00166 | 16,60179 |
| 10 | 520,8333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 5 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,00175 | 17,49982 |

Cálculos do diâmetro de corte fixando o diâmetro da região cilíndrica (Dc) em 6 cm, variando a bateria entre 1 a 10 hidrociclones e variando a razão Du/Dc entre 0,10 a 0,25.

| n | Q (cm ³ /s) | ρs (g/cm ³) | ρ (g/cm ³) | μ (g/cm ³ *s) | Dc (cm) | Du/Dc | RL | Cv (cm ³ /cm ³) | d* (cm) | d* (μm) |
|----|------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|---------|-------|----------|--|----------|----------|
| 1 | 5208,333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 6 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,000975 | 9,751238 |
| 2 | 2604,167 | 2,39 | 1 | 0,01 | 6 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,001379 | 13,79033 |
| 3 | 1736,111 | 2,39 | 1 | 0,01 | 6 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,001689 | 16,88964 |
| 4 | 1302,083 | 2,39 | 1 | 0,01 | 6 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,00195 | 19,50248 |
| 5 | 1041,667 | 2,39 | 1 | 0,01 | 6 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,00218 | 21,80443 |
| 6 | 868,0556 | 2,39 | 1 | 0,01 | 6 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,002389 | 23,88556 |
| 7 | 744,0476 | 2,39 | 1 | 0,01 | 6 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,00258 | 25,79935 |
| 8 | 651,0417 | 2,39 | 1 | 0,01 | 6 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,002758 | 27,58067 |
| 9 | 578,7037 | 2,39 | 1 | 0,01 | 6 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,002925 | 29,25371 |
| 10 | 520,8333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 6 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,003084 | 30,83612 |

| n | Q (cm ³ /s) | ρs (g/cm ³) | ρ (g/cm ³) | μ (g/cm ³ *s) | Dc (cm) | Du/Dc | RL | Cv (cm ³ /cm ³) | d* (cm) | d* (μm) |
|----|------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|---------|-------|----------|--|----------|----------|
| 1 | 5208,333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 6 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,00095 | 9,503834 |
| 2 | 2604,167 | 2,39 | 1 | 0,01 | 6 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,001344 | 13,44045 |
| 3 | 1736,111 | 2,39 | 1 | 0,01 | 6 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,001646 | 16,46112 |
| 4 | 1302,083 | 2,39 | 1 | 0,01 | 6 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,001901 | 19,00767 |
| 5 | 1041,667 | 2,39 | 1 | 0,01 | 6 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,002125 | 21,25122 |
| 6 | 868,0556 | 2,39 | 1 | 0,01 | 6 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,002328 | 23,27955 |
| 7 | 744,0476 | 2,39 | 1 | 0,01 | 6 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,002514 | 25,14478 |
| 8 | 651,0417 | 2,39 | 1 | 0,01 | 6 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,002688 | 26,8809 |
| 9 | 578,7037 | 2,39 | 1 | 0,01 | 6 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,002851 | 28,5115 |
| 10 | 520,8333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 6 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,003005 | 30,05376 |

| n | Q (cm ³ /s) | ρs (g/cm ³) | ρ (g/cm ³) | μ (g/cm ³ *s) | Dc (cm) | Du/Dc | RL | Cv (cm ³ /cm ³) | d* (cm) | d* (μm) |
|----|------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|---------|-------|----------|--|----------|----------|
| 1 | 5208,333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 6 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,000875 | 8,74503 |
| 2 | 2604,167 | 2,39 | 1 | 0,01 | 6 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,001237 | 12,36734 |
| 3 | 1736,111 | 2,39 | 1 | 0,01 | 6 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,001515 | 15,14684 |
| 4 | 1302,083 | 2,39 | 1 | 0,01 | 6 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,001749 | 17,49006 |
| 5 | 1041,667 | 2,39 | 1 | 0,01 | 6 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,001955 | 19,55448 |
| 6 | 868,0556 | 2,39 | 1 | 0,01 | 6 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,002142 | 21,42086 |
| 7 | 744,0476 | 2,39 | 1 | 0,01 | 6 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,002314 | 23,13717 |
| 8 | 651,0417 | 2,39 | 1 | 0,01 | 6 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,002473 | 24,73468 |
| 9 | 578,7037 | 2,39 | 1 | 0,01 | 6 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,002624 | 26,23509 |
| 10 | 520,8333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 6 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,002765 | 27,65421 |

| n | Q (cm ³ /s) | ρs (g/cm ³) | ρ (g/cm ³) | μ (g/cm ³ *s) | Dc (cm) | Du/Dc | RL | Cv (cm ³ /cm ³) | d* (cm) | d* (μm) |
|----|------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|---------|-------|----------|--|----------|----------|
| 1 | 5208,333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 6 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,000727 | 7,274539 |
| 2 | 2604,167 | 2,39 | 1 | 0,01 | 6 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,001029 | 10,28775 |
| 3 | 1736,111 | 2,39 | 1 | 0,01 | 6 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,00126 | 12,59987 |
| 4 | 1302,083 | 2,39 | 1 | 0,01 | 6 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,001455 | 14,54908 |
| 5 | 1041,667 | 2,39 | 1 | 0,01 | 6 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,001627 | 16,26636 |
| 6 | 868,0556 | 2,39 | 1 | 0,01 | 6 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,001782 | 17,81891 |
| 7 | 744,0476 | 2,39 | 1 | 0,01 | 6 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,001925 | 19,24662 |
| 8 | 651,0417 | 2,39 | 1 | 0,01 | 6 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,002058 | 20,5755 |
| 9 | 578,7037 | 2,39 | 1 | 0,01 | 6 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,002182 | 21,82362 |
| 10 | 520,8333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 6 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,0023 | 23,00411 |

Cálculos do diâmetro de corte fixando o diâmetro da região cilíndrica (Dc) em 7 cm, variando a bateria entre 1 a 10 hidrociclones e variando a razão Du/Dc entre 0,10 a 0,25.

| n | Q (cm ³ /s) | ρs (g/cm ³) | ρ (g/cm ³) | μ (g/cm*s) | Dc (cm) | Du/Dc | RL | Cv (cm ³ /cm ³) | d* (cm) | d* (μm) |
|----|------------------------|-------------------------|------------------------|------------|---------|-------|----------|--|----------|----------|
| 1 | 5208,333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 7 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,001229 | 12,28796 |
| 2 | 2604,167 | 2,39 | 1 | 0,01 | 7 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,001738 | 17,37781 |
| 3 | 1736,111 | 2,39 | 1 | 0,01 | 7 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,002128 | 21,28338 |
| 4 | 1302,083 | 2,39 | 1 | 0,01 | 7 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,002458 | 24,57593 |
| 5 | 1041,667 | 2,39 | 1 | 0,01 | 7 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,002748 | 27,47672 |
| 6 | 868,0556 | 2,39 | 1 | 0,01 | 7 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,00301 | 30,09924 |
| 7 | 744,0476 | 2,39 | 1 | 0,01 | 7 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,003251 | 32,5109 |
| 8 | 651,0417 | 2,39 | 1 | 0,01 | 7 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,003476 | 34,75561 |
| 9 | 578,7037 | 2,39 | 1 | 0,01 | 7 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,003686 | 36,86389 |
| 10 | 520,8333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 7 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,003886 | 38,85795 |

| n | Q (cm ³ /s) | ρs (g/cm ³) | ρ (g/cm ³) | μ (g/cm*s) | Dc (cm) | Du/Dc | RL | Cv (cm ³ /cm ³) | d* (cm) | d* (μm) |
|----|------------------------|-------------------------|------------------------|------------|---------|-------|----------|--|----------|----------|
| 1 | 5208,333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 7 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,001198 | 11,9762 |
| 2 | 2604,167 | 2,39 | 1 | 0,01 | 7 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,001694 | 16,9369 |
| 3 | 1736,111 | 2,39 | 1 | 0,01 | 7 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,002074 | 20,74339 |
| 4 | 1302,083 | 2,39 | 1 | 0,01 | 7 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,002395 | 23,9524 |
| 5 | 1041,667 | 2,39 | 1 | 0,01 | 7 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,002678 | 26,7796 |
| 6 | 868,0556 | 2,39 | 1 | 0,01 | 7 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,002934 | 29,33558 |
| 7 | 744,0476 | 2,39 | 1 | 0,01 | 7 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,003169 | 31,68605 |
| 8 | 651,0417 | 2,39 | 1 | 0,01 | 7 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,003387 | 33,87381 |
| 9 | 578,7037 | 2,39 | 1 | 0,01 | 7 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,003593 | 35,9286 |
| 10 | 520,8333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 7 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,003787 | 37,87207 |

| n | Q (cm ³ /s) | ρs (g/cm ³) | ρ (g/cm ³) | μ (g/cm*s) | Dc (cm) | Du/Dc | RL | Cv (cm ³ /cm ³) | d* (cm) | d* (μm) |
|----|------------------------|-------------------------|------------------------|------------|---------|-------|----------|--|----------|----------|
| 1 | 5208,333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 7 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,001102 | 11,02 |
| 2 | 2604,167 | 2,39 | 1 | 0,01 | 7 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,001558 | 15,58463 |
| 3 | 1736,111 | 2,39 | 1 | 0,01 | 7 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,001909 | 19,08719 |
| 4 | 1302,083 | 2,39 | 1 | 0,01 | 7 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,002204 | 22,03999 |
| 5 | 1041,667 | 2,39 | 1 | 0,01 | 7 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,002464 | 24,64146 |
| 6 | 868,0556 | 2,39 | 1 | 0,01 | 7 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,002699 | 26,99337 |
| 7 | 744,0476 | 2,39 | 1 | 0,01 | 7 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,002916 | 29,15617 |
| 8 | 651,0417 | 2,39 | 1 | 0,01 | 7 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,003117 | 31,16926 |
| 9 | 578,7037 | 2,39 | 1 | 0,01 | 7 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,003306 | 33,05999 |
| 10 | 520,8333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 7 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,003485 | 34,84829 |

| n | Q (cm ³ /s) | ρs (g/cm ³) | ρ (g/cm ³) | μ (g/cm*s) | Dc (cm) | Du/Dc | RL | Cv (cm ³ /cm ³) | d* (cm) | d* (μm) |
|----|------------------------|-------------------------|------------------------|------------|---------|-------|----------|--|----------|----------|
| 1 | 5208,333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 7 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,000917 | 9,166966 |
| 2 | 2604,167 | 2,39 | 1 | 0,01 | 7 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,001296 | 12,96405 |
| 3 | 1736,111 | 2,39 | 1 | 0,01 | 7 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,001588 | 15,87765 |
| 4 | 1302,083 | 2,39 | 1 | 0,01 | 7 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,001833 | 18,33393 |
| 5 | 1041,667 | 2,39 | 1 | 0,01 | 7 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,00205 | 20,49796 |
| 6 | 868,0556 | 2,39 | 1 | 0,01 | 7 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,002245 | 22,45439 |
| 7 | 744,0476 | 2,39 | 1 | 0,01 | 7 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,002425 | 24,25351 |
| 8 | 651,0417 | 2,39 | 1 | 0,01 | 7 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,002593 | 25,9281 |
| 9 | 578,7037 | 2,39 | 1 | 0,01 | 7 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,00275 | 27,5009 |
| 10 | 520,8333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 7 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,002899 | 28,98849 |

Cálculos do diâmetro de corte fixando o diâmetro da região cilíndrica (Dc) em 8 cm, variando a bateria entre 1 a 10 hidrociclones e variando a razão Du/Dc entre 0,10 a 0,25.

| n | Q (cm ³ /s) | ps (g/cm ³) | ρ (g/cm ³) | μ (g/cm*s) | Dc (cm) | Du/Dc | RL | Cv (cm ³ /cm ³) | d* (cm) | d* (μm) |
|----|------------------------|-------------------------|------------------------|------------|---------|-------|----------|--|----------|----------|
| 1 | 5208,333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 8 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,001501 | 15,01301 |
| 2 | 2604,167 | 2,39 | 1 | 0,01 | 8 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,002123 | 21,23161 |
| 3 | 1736,111 | 2,39 | 1 | 0,01 | 8 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,0026 | 26,0033 |
| 4 | 1302,083 | 2,39 | 1 | 0,01 | 8 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,003003 | 30,02603 |
| 5 | 1041,667 | 2,39 | 1 | 0,01 | 8 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,003357 | 33,57012 |
| 6 | 868,0556 | 2,39 | 1 | 0,01 | 8 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,003677 | 36,77422 |
| 7 | 744,0476 | 2,39 | 1 | 0,01 | 8 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,003972 | 39,7207 |
| 8 | 651,0417 | 2,39 | 1 | 0,01 | 8 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,004246 | 42,46321 |
| 9 | 578,7037 | 2,39 | 1 | 0,01 | 8 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,004504 | 45,03904 |
| 10 | 520,8333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 8 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,004748 | 47,47532 |

| n | Q (cm ³ /s) | ps (g/cm ³) | ρ (g/cm ³) | μ (g/cm*s) | Dc (cm) | Du/Dc | RL | Cv (cm ³ /cm ³) | d* (cm) | d* (μm) |
|----|------------------------|-------------------------|------------------------|------------|---------|-------|----------|--|----------|----------|
| 1 | 5208,333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 8 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,001463 | 14,63211 |
| 2 | 2604,167 | 2,39 | 1 | 0,01 | 8 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,002069 | 20,69293 |
| 3 | 1736,111 | 2,39 | 1 | 0,01 | 8 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,002534 | 25,34356 |
| 4 | 1302,083 | 2,39 | 1 | 0,01 | 8 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,002926 | 29,26422 |
| 5 | 1041,667 | 2,39 | 1 | 0,01 | 8 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,003272 | 32,71839 |
| 6 | 868,0556 | 2,39 | 1 | 0,01 | 8 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,003584 | 35,8412 |
| 7 | 744,0476 | 2,39 | 1 | 0,01 | 8 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,003871 | 38,71293 |
| 8 | 651,0417 | 2,39 | 1 | 0,01 | 8 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,004139 | 41,38586 |
| 9 | 578,7037 | 2,39 | 1 | 0,01 | 8 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,00439 | 43,89633 |
| 10 | 520,8333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 8 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,004627 | 46,2708 |

| n | Q (cm ³ /s) | ps (g/cm ³) | ρ (g/cm ³) | μ (g/cm*s) | Dc (cm) | Du/Dc | RL | Cv (cm ³ /cm ³) | d* (cm) | d* (μm) |
|----|------------------------|-------------------------|------------------------|------------|---------|-------|----------|--|----------|----------|
| 1 | 5208,333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 8 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,001346 | 13,46385 |
| 2 | 2604,167 | 2,39 | 1 | 0,01 | 8 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,001904 | 19,04077 |
| 3 | 1736,111 | 2,39 | 1 | 0,01 | 8 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,002332 | 23,32008 |
| 4 | 1302,083 | 2,39 | 1 | 0,01 | 8 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,002693 | 26,92771 |
| 5 | 1041,667 | 2,39 | 1 | 0,01 | 8 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,003011 | 30,10609 |
| 6 | 868,0556 | 2,39 | 1 | 0,01 | 8 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,003298 | 32,97957 |
| 7 | 744,0476 | 2,39 | 1 | 0,01 | 8 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,003562 | 35,62201 |
| 8 | 651,0417 | 2,39 | 1 | 0,01 | 8 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,003808 | 38,08153 |
| 9 | 578,7037 | 2,39 | 1 | 0,01 | 8 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,004039 | 40,39156 |
| 10 | 520,8333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 8 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,004258 | 42,57645 |

| n | Q (cm ³ /s) | ps (g/cm ³) | ρ (g/cm ³) | μ (g/cm*s) | Dc (cm) | Du/Dc | RL | Cv (cm ³ /cm ³) | d* (cm) | d* (μm) |
|----|------------------------|-------------------------|------------------------|------------|---------|-------|----------|--|----------|----------|
| 1 | 5208,333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 8 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,00112 | 11,19988 |
| 2 | 2604,167 | 2,39 | 1 | 0,01 | 8 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,001584 | 15,83903 |
| 3 | 1736,111 | 2,39 | 1 | 0,01 | 8 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,00194 | 19,39877 |
| 4 | 1302,083 | 2,39 | 1 | 0,01 | 8 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,00224 | 22,39977 |
| 5 | 1041,667 | 2,39 | 1 | 0,01 | 8 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,002504 | 25,0437 |
| 6 | 868,0556 | 2,39 | 1 | 0,01 | 8 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,002743 | 27,434 |
| 7 | 744,0476 | 2,39 | 1 | 0,01 | 8 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,002963 | 29,63211 |
| 8 | 651,0417 | 2,39 | 1 | 0,01 | 8 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,003168 | 31,67806 |
| 9 | 578,7037 | 2,39 | 1 | 0,01 | 8 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,00336 | 33,59965 |
| 10 | 520,8333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 8 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,003542 | 35,41715 |

Cálculos do diâmetro de corte fixando o diâmetro da região cilíndrica (Dc) em 9 cm, variando a bateria entre 1 a 10 hidrociclones e variando a razão Du/Dc entre 0,10 a 0,25.

| n | Q (cm ³ /s) | ρs (g/cm ³) | ρ (g/cm ³) | μ (g/cm ³ *s) | Dc (cm) | Du/Dc | RL | Cv (cm ³ /cm ³) | d* (cm) | d* (μm) |
|----|------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|---------|-------|----------|--|----------|----------|
| 1 | 5208,333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 9 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,001791 | 17,91417 |
| 2 | 2604,167 | 2,39 | 1 | 0,01 | 9 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,002533 | 25,33446 |
| 3 | 1736,111 | 2,39 | 1 | 0,01 | 9 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,003103 | 31,02825 |
| 4 | 1302,083 | 2,39 | 1 | 0,01 | 9 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,003583 | 35,82834 |
| 5 | 1041,667 | 2,39 | 1 | 0,01 | 9 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,004006 | 40,0573 |
| 6 | 868,0556 | 2,39 | 1 | 0,01 | 9 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,004388 | 43,88057 |
| 7 | 744,0476 | 2,39 | 1 | 0,01 | 9 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,00474 | 47,39643 |
| 8 | 651,0417 | 2,39 | 1 | 0,01 | 9 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,005067 | 50,66892 |
| 9 | 578,7037 | 2,39 | 1 | 0,01 | 9 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,005374 | 53,7425 |
| 10 | 520,8333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 9 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,005665 | 56,64957 |

| n | Q (cm ³ /s) | ρs (g/cm ³) | ρ (g/cm ³) | μ (g/cm ³ *s) | Dc (cm) | Du/Dc | RL | Cv (cm ³ /cm ³) | d* (cm) | d* (μm) |
|----|------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|---------|-------|----------|--|----------|----------|
| 1 | 5208,333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 9 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,001746 | 17,45966 |
| 2 | 2604,167 | 2,39 | 1 | 0,01 | 9 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,002469 | 24,69169 |
| 3 | 1736,111 | 2,39 | 1 | 0,01 | 9 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,003024 | 30,24102 |
| 4 | 1302,083 | 2,39 | 1 | 0,01 | 9 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,003492 | 34,91932 |
| 5 | 1041,667 | 2,39 | 1 | 0,01 | 9 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,003904 | 39,04098 |
| 6 | 868,0556 | 2,39 | 1 | 0,01 | 9 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,004277 | 42,76726 |
| 7 | 744,0476 | 2,39 | 1 | 0,01 | 9 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,004619 | 46,19392 |
| 8 | 651,0417 | 2,39 | 1 | 0,01 | 9 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,004938 | 49,38337 |
| 9 | 578,7037 | 2,39 | 1 | 0,01 | 9 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,005238 | 52,37898 |
| 10 | 520,8333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 9 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,005521 | 55,21229 |

| n | Q (cm ³ /s) | ρs (g/cm ³) | ρ (g/cm ³) | μ (g/cm ³ *s) | Dc (cm) | Du/Dc | RL | Cv (cm ³ /cm ³) | d* (cm) | d* (μm) |
|----|------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|---------|-------|----------|--|----------|----------|
| 1 | 5208,333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 9 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,001607 | 16,06565 |
| 2 | 2604,167 | 2,39 | 1 | 0,01 | 9 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,002272 | 22,72025 |
| 3 | 1736,111 | 2,39 | 1 | 0,01 | 9 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,002783 | 27,82651 |
| 4 | 1302,083 | 2,39 | 1 | 0,01 | 9 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,003213 | 32,13129 |
| 5 | 1041,667 | 2,39 | 1 | 0,01 | 9 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,003592 | 35,92388 |
| 6 | 868,0556 | 2,39 | 1 | 0,01 | 9 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,003935 | 39,35263 |
| 7 | 744,0476 | 2,39 | 1 | 0,01 | 9 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,004251 | 42,5057 |
| 8 | 651,0417 | 2,39 | 1 | 0,01 | 9 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,004544 | 45,44051 |
| 9 | 578,7037 | 2,39 | 1 | 0,01 | 9 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,00482 | 48,19694 |
| 10 | 520,8333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 9 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,00508 | 50,80403 |

| n | Q (cm ³ /s) | ρs (g/cm ³) | ρ (g/cm ³) | μ (g/cm ³ *s) | Dc (cm) | Du/Dc | RL | Cv (cm ³ /cm ³) | d* (cm) | d* (μm) |
|----|------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|---------|-------|----------|--|----------|----------|
| 1 | 5208,333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 9 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,001336 | 13,36418 |
| 2 | 2604,167 | 2,39 | 1 | 0,01 | 9 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,00189 | 18,89981 |
| 3 | 1736,111 | 2,39 | 1 | 0,01 | 9 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,002315 | 23,14744 |
| 4 | 1302,083 | 2,39 | 1 | 0,01 | 9 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,002673 | 26,72836 |
| 5 | 1041,667 | 2,39 | 1 | 0,01 | 9 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,002988 | 29,88322 |
| 6 | 868,0556 | 2,39 | 1 | 0,01 | 9 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,003274 | 32,73542 |
| 7 | 744,0476 | 2,39 | 1 | 0,01 | 9 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,003536 | 35,3583 |
| 8 | 651,0417 | 2,39 | 1 | 0,01 | 9 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,00378 | 37,79961 |
| 9 | 578,7037 | 2,39 | 1 | 0,01 | 9 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,004009 | 40,09254 |
| 10 | 520,8333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 9 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,004226 | 42,26125 |

Cálculos do diâmetro de corte fixando o diâmetro da região cilíndrica (Dc) em 10 cm, variando a bateria entre 1 a 10 hidrociclones e variando a razão Du/Dc entre 0,10 a 0,25.

| n | Q (cm ³ /s) | ρs (g/cm ³) | ρ (g/cm ³) | μ (g/cm*s) | Dc (cm) | Du/Dc | RL | Cv (cm ³ /cm ³) | d* (cm) | d* (μm) |
|----|------------------------|-------------------------|------------------------|------------|---------|-------|----------|--|----------|----------|
| 1 | 5208,333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 10 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,002098 | 20,98132 |
| 2 | 2604,167 | 2,39 | 1 | 0,01 | 10 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,002967 | 29,67207 |
| 3 | 1736,111 | 2,39 | 1 | 0,01 | 10 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,003634 | 36,34072 |
| 4 | 1302,083 | 2,39 | 1 | 0,01 | 10 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,004196 | 41,96265 |
| 5 | 1041,667 | 2,39 | 1 | 0,01 | 10 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,004692 | 46,91567 |
| 6 | 868,0556 | 2,39 | 1 | 0,01 | 10 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,005139 | 51,39354 |
| 7 | 744,0476 | 2,39 | 1 | 0,01 | 10 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,005551 | 55,51136 |
| 8 | 651,0417 | 2,39 | 1 | 0,01 | 10 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,005934 | 59,34414 |
| 9 | 578,7037 | 2,39 | 1 | 0,01 | 10 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,006294 | 62,94397 |
| 10 | 520,8333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 10 | 0,1 | 0,002579 | 0,01 | 0,006635 | 66,34877 |

| n | Q (cm ³ /s) | ρs (g/cm ³) | ρ (g/cm ³) | μ (g/cm*s) | Dc (cm) | Du/Dc | RL | Cv (cm ³ /cm ³) | d* (cm) | d* (μm) |
|----|------------------------|-------------------------|------------------------|------------|---------|-------|----------|--|----------|----------|
| 1 | 5208,333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 10 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,002045 | 20,449 |
| 2 | 2604,167 | 2,39 | 1 | 0,01 | 10 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,002892 | 28,91925 |
| 3 | 1736,111 | 2,39 | 1 | 0,01 | 10 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,003542 | 35,4187 |
| 4 | 1302,083 | 2,39 | 1 | 0,01 | 10 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,00409 | 40,89799 |
| 5 | 1041,667 | 2,39 | 1 | 0,01 | 10 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,004573 | 45,72534 |
| 6 | 868,0556 | 2,39 | 1 | 0,01 | 10 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,005009 | 50,08961 |
| 7 | 744,0476 | 2,39 | 1 | 0,01 | 10 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,00541 | 54,10296 |
| 8 | 651,0417 | 2,39 | 1 | 0,01 | 10 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,005784 | 57,83849 |
| 9 | 578,7037 | 2,39 | 1 | 0,01 | 10 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,006135 | 61,34699 |
| 10 | 520,8333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 10 | 0,15 | 0,017693 | 0,01 | 0,006467 | 64,6654 |

| n | Q (cm ³ /s) | ρs (g/cm ³) | ρ (g/cm ³) | μ (g/cm*s) | Dc (cm) | Du/Dc | RL | Cv (cm ³ /cm ³) | d* (cm) | d* (μm) |
|----|------------------------|-------------------------|------------------------|------------|---------|-------|----------|--|----------|----------|
| 1 | 5208,333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 10 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,001882 | 18,81631 |
| 2 | 2604,167 | 2,39 | 1 | 0,01 | 10 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,002661 | 26,61028 |
| 3 | 1736,111 | 2,39 | 1 | 0,01 | 10 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,003259 | 32,5908 |
| 4 | 1302,083 | 2,39 | 1 | 0,01 | 10 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,003763 | 37,63262 |
| 5 | 1041,667 | 2,39 | 1 | 0,01 | 10 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,004207 | 42,07454 |
| 6 | 868,0556 | 2,39 | 1 | 0,01 | 10 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,004609 | 46,09035 |
| 7 | 744,0476 | 2,39 | 1 | 0,01 | 10 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,004978 | 49,78327 |
| 8 | 651,0417 | 2,39 | 1 | 0,01 | 10 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,005322 | 53,22056 |
| 9 | 578,7037 | 2,39 | 1 | 0,01 | 10 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,005645 | 56,44892 |
| 10 | 520,8333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 10 | 0,2 | 0,069384 | 0,01 | 0,00595 | 59,50239 |

| n | Q (cm ³ /s) | ρs (g/cm ³) | ρ (g/cm ³) | μ (g/cm*s) | Dc (cm) | Du/Dc | RL | Cv (cm ³ /cm ³) | d* (cm) | d* (μm) |
|----|------------------------|-------------------------|------------------------|------------|---------|-------|----------|--|----------|----------|
| 1 | 5208,333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 10 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,001565 | 15,65232 |
| 2 | 2604,167 | 2,39 | 1 | 0,01 | 10 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,002214 | 22,13572 |
| 3 | 1736,111 | 2,39 | 1 | 0,01 | 10 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,002711 | 27,1106 |
| 4 | 1302,083 | 2,39 | 1 | 0,01 | 10 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,00313 | 31,30463 |
| 5 | 1041,667 | 2,39 | 1 | 0,01 | 10 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,0035 | 34,99964 |
| 6 | 868,0556 | 2,39 | 1 | 0,01 | 10 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,003834 | 38,34019 |
| 7 | 744,0476 | 2,39 | 1 | 0,01 | 10 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,004141 | 41,41213 |
| 8 | 651,0417 | 2,39 | 1 | 0,01 | 10 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,004427 | 44,27143 |
| 9 | 578,7037 | 2,39 | 1 | 0,01 | 10 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,004696 | 46,95695 |
| 10 | 520,8333 | 2,39 | 1 | 0,01 | 10 | 0,25 | 0,200255 | 0,01 | 0,00495 | 49,49697 |

APÊNDICE C

A tabela a seguir apresenta 20 configurações de hidrociclones selecionadas, mostrando as características de cada configuração, os cálculos da eficiência global de coleta, concentração de sólidos no underflow de cada hidrociclone e cálculo da potência de operação da bomba.

| Configuração de Hidrociclone | Bateria (n) | Dc (cm) | d* (µm) | Razão de Líquido | Eficiência Global (%) | Concentração no underflow (g/cm³) | Potência (HP) |
|-------------------------------------|--------------------|----------------|----------------|-------------------------|------------------------------|---|----------------------|
| 1 | 3 | 2,00 | 2,9150 | 0,0694 | 65,36 | 0,2076 | 66,54 |
| 2 | 1 | 3,00 | 2,5719 | 0,2002 | 73,64 | 0,0856 | 354,87 |
| 3 | 7 | 7,00 | 29,1562 | 0,0694 | 11,40 | 0,0390 | 0,03 |
| 4 | 2 | 2,00 | 1,9799 | 0,2002 | 80,22 | 0,0929 | 224,57 |
| 5 | 5 | 2,00 | 4,0898 | 0,0177 | 51,62 | 0,5440 | 14,37 |
| 6 | 10 | 5,00 | 21,0373 | 0,0694 | 15,14 | 0,0515 | 0,05 |
| 7 | 9 | 2,00 | 5,0489 | 0,0694 | 47,34 | 0,1541 | 2,46 |
| 8 | 4 | 3,00 | 6,1837 | 0,0694 | 41,23 | 0,1353 | 5,55 |
| 9 | 1 | 4,00 | 3,9598 | 0,2002 | 61,53 | 0,0719 | 112,28 |
| 10 | 4 | 2,00 | 2,7999 | 0,2002 | 71,34 | 0,0830 | 28,07 |
| 11 | 9 | 3,00 | 10,0803 | 0,0177 | 24,85 | 0,2969 | 0,49 |
| 12 | 8 | 4,00 | 15,0130 | 0,0026 | 14,97 | 0,8835 | 0,22 |
| 13 | 2 | 4,00 | 7,3160 | 0,0177 | 33,06 | 0,3795 | 14,03 |
| 14 | 8 | 6,00 | 20,5755 | 0,2002 | 27,34 | 0,0325 | 0,04 |
| 15 | 4 | 3,00 | 5,1439 | 0,2002 | 54,25 | 0,0636 | 5,55 |
| 16 | 3 | 10,00 | 27,1106 | 0,2002 | 24,45 | 0,0291 | 0,11 |
| 17 | 2 | 3,00 | 4,3725 | 0,0694 | 51,96 | 0,1681 | 44,36 |
| 18 | 5 | 2,00 | 5,7510 | 0,2002 | 68,24 | 0,0795 | 14,37 |
| 19 | 2 | 2,00 | 2,3801 | 0,0694 | 71,69 | 0,2259 | 224,57 |
| 20 | 8 | 2,00 | 3,9596 | 0,2002 | 61,53 | 0,0719 | 3,51 |