



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS
ESCOLA DE MINAS



IURI DOS SANTOS CORDEIRO

**SIMULAÇÃO DE CICLONES UTILIZANDO O SOFTWARE MOLYCOP
TOOLS**

OURO PRETO

2023

IURI DOS SANTOS CORDEIRO

SIMULAÇÃO DE CICLONES UTILIZANDO O SOFTWARE MOLYCOP TOOLS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas.

Área de concentração: Tratamento de Minérios

Orientador: Prof. Dr. Vladimir Kronemberger Alves

OURO PRETO

2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C794s Cordeiro, Iuri dos Santos.
Simulação de ciclones utilizando o software MolyCop Tools.
[manuscrito] / Iuri dos Santos Cordeiro. - 2023.
51 f.

Orientador: Prof. Dr. Vladimir Kronemberger Alves.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola
de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Beneficiamento de minério. 2. Métodos de simulação. 3.
Otimização matemática. 4. Máquinas de mineração - Hidrociclones. I.
Alves, Vladimir Kronemberger. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III.
Título.

CDU 622.771

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



FOLHA DE APROVAÇÃO

Iuri dos Santos Cordeiro

Simulação de ciclones utilizando o software Moly Cop Tools

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Minas

Aprovada em 30 de março de 2023

Membros da banca

[Doutor] - Vladimir Kronemberger Alves - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
[Mestre] - Marcus Vinícius Cunha Lopes - (Universidade Federal de Ouro Preto)
[Engenheiro] - Thiago Viana Neves - (Samarco)

Vladimir Kronemberger Alves, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 30/03/2023



Documento assinado eletronicamente por **Vladimir Kronemberger Alves, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 30/03/2023, às 16:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0501664** e o código CRC **A006419C**.

*A minha mãe e ao meu pai por todo
amor, dedicação e confiança.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Adenilda e Genival por todo o apoio, confiança e incentivo aos meus estudos, vocês renunciaram sonhos e projetos para garantir que eu conseguisse chegar até aqui, me ensinaram através do exemplo a importância do amor, respeito, honestidade, humildade, determinação e persistência. A primeira fase desse ciclo se encerra e essa vitória também pertence a vocês!

A toda minha família pelas torcidas e vibrações positivas, em especial aos meus avós maternos que mesmo de longe estiverem sempre presentes.

A todos os meus amigos e colegas que compartilharam sorrisos, alegrias e enfrentamos juntos momentos difíceis. Em especial gostaria de agradecer aos que me fizeram muita raiva, mas que vou carregar para o resto da minha vida, Isadora Lira, Gisllaine Alfenas, Emanuelle Silva, Amanda Lira, Andreia Cristina, Ana Paula Jácome, Thais Falco, Mateus Góis, Jamilton Dias, Marcelo Jordão e Ueliton Lima, com vocês passei momentos especiais.

Também não poderia deixar de agradecer aos meus colegas e amigos da Gerência de Beneficiamento da Vale - Mina de Água Limpa, Gerência de Operação de Mina da Leagold Mining - FBDM, Gerência de Excelência Operacional da Nexa - Corporativo SP, a turma da Mina de Vazante, de Morro Agudo e de Aripuanã, e ao time do Colégio Técnico Inconfidente pelos momentos de grandes ensinamentos e trocas de experiências, vocês foram fundamentais para o meu crescimento como pessoa e como profissional.

A todos os professores do Departamento de Engenharia de Minas por dividirem comigo os seus conhecimentos, em especial agradeço ao Felipe Souza que além de professor se tornou um grande amigo. Ao meu orientador Vladimir Kronemberger, muito obrigado pela paciência, orientação e experiências compartilhadas.

A Minera Jr. e a Liga Acadêmica de Tratamento de Minérios pelos momentos de muito perrengue que resultaram em um aprendizado único, nessas entidades além de aprender a desenvolver habilidades soft skills, construir grandes amigos.

Por fim, agradeço imensamente a Universidade Federal de Ouro Preto por propiciar um ensino público, gratuito e de qualidade, é um orgulho muito grande formar na gloriosa Escola de Minas de Ouro Preto.

“Porque nos sonhos entramos num mundo inteiramente nosso. Deixe que mergulhe no mais profundo oceano ou flutue na mais alta nuvem.” (Alvo Dumbledore)

RESUMO

Os hidrociclones são equipamentos utilizados para classificar partículas com diferentes granulometrias. Esses equipamentos possuem uma vasta aplicação na indústria minero-metalúrgica, desde o espessamento de polpas, deslamagem de partículas finais, pré-concentração até a classificação granulométrica. No estudo foi avaliada a influência das condições geométricas e operacionais utilizando o Software Molycop Tools para obtenção de um produto com granulometria de 150 micrômetros, utilizando um banco de dados do professor orientador. O equipamento estudado foi o ciclone da linha GMax da empresa Krebs, tendo a altura e diâmetro fixos nas simulações. A taxa de alimentação de 650 t/h foi constante em todos os cenários. A abertura do *inlet*, diâmetro do *apex* e *vórtex finder*, além da porcentagem de sólidos e quantidade de ciclones foram variados em todas as simulações. Com base nos resultados analisados, seis simulações apresentaram granulometria do produto *overflow* próximo ao esperado no objetivo. Ademais, avaliando outras variáveis propostas no trabalho foi possível identificar que apenas duas simulações seriam operacionalizáveis, mas com um ponto de observação para buscar oportunidades de melhoria na pressão do hidrociclone.

Palavras-chave: Simulações. Otimização. Hidrociclone. Cenários.

ABSTRACT

Hydrocyclones are equipment used to classify different size particles. These equipments have a wide application in the mining and metallurgy industry, including slurry thickening, final particle desliming, pre-concentration and granulometric classification. In this study, the influence of geometric and operational conditions was evaluated using the Software Molycop tools to obtain a 150 micrometers granulometry product, using a database of the guifing professor. The equipment studied was the Krebs GMax line cyclone, with a fixed height and diameter during the simulations. The feed rate of 650 t/h was constant in all scenarios. The *inlet* opening, *apex* diameter and *vortex finder*, percentage of solids and number of cyclones, however, were varied in all simulations. Based on the analyzed results, six simulations presented an *overflow* product size close to the expected. Evaluating other variables, it was possible to identify only two simulations which would be operationalizable, but with an observation point to seek opportunities for improvement in the hydrocyclone pressure.

Keywords: Simulations. Optimization. Hydrocyclone. Scenarios.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de carvão mineral.....	17
Figura 2 - Forças atuantes no movimento de órbita da partícula	19
Figura 3 - Funcionamento do hidrociclone	20
Figura 4 - Principais regiões dentro do ciclone.....	21
Figura 5 – Geometria do ciclone	22
Figura 6 - Formas de descargas do underflow	25
Figura 7 - Curva Padrão de Partição	28
Figura 8 - Fluxograma das atividades propostas.....	33
Figura 9 - Ferramenta utilizada para simulações	34
Figura 10 - Cenários simulados.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Razões entre as principais relações geométricas pertencentes a algumas das famílias clássicas de hidrociclones.	22
Tabela 2 - Variáveis do modelo de Plitt.....	29
Tabela 3 - Constantes de classificação.....	35
Tabela 4 - Parâmetros fixos	36
Tabela 5 - Parâmetros geométricos dos equipamentos	36
Tabela 6 - Parâmetros geométricos definidos para os cenários.....	38

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Parâmetros geométricos e variáveis operacionais do cenário 1.....	39
Gráfico 2 - Parâmetros geométricos e variáveis operacionais do cenário 2.....	40
Gráfico 3 - Parâmetros geométricos e variáveis operacionais do cenário 3.....	41
Gráfico 4 - Parâmetros geométricos e variáveis operacionais do cenário 4.....	42
Gráfico 5 - Parâmetros geométricos e variáveis operacionais do cenário 5.....	42
Gráfico 6 - Parâmetros geométricos e variáveis operacionais do cenário 6.....	43

LISTA DE SIGLAS

D80 – Diâmetro que passou 80% das partículas

μm - Unidade de comprimento do Sistema Internacional de Unidades (SI)

- Número de abertura por polegada

θ - Representa a medida de um ângulo

Fce – Força Centrífuga

Fa – Força de Arraste

Dc – Diâmetro do cilindro

Di – Diâmetro do *inlet*

Do – Diâmetro do *vórtex finder*

Du – Diâmetro do *apex*

L – Comprimento total

h – Comprimento da seção cilíndrica

H – Comprimento do cone

I – Comprimento do *vórtex finder*

Ve – Velocidade de entrada

Vt – Velocidade tangencial

d50c – Diâmetro de corte corrigido

FPS - Percentagem de sólidos na alimentação

spig - Diâmetro do *apex*

VF - Diâmetro do *vórtex finder*

Q - Vazão da alimentação

k - Constante

η - Viscosidade do líquido

ρ_s - Densidade do minério

ρ_p - Densidade da polpa

S - Razão entre as vazões volumétricas da polpa no *underflow* e no *overflow*

m - Parâmetro de nitidez da separação

CIMM - *Centro de Investigación Minera y Metalúrgica*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
2. OBJETIVOS.....	16
2.1. Objetivo Geral	16
2.2. Objetivos Específicos	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1. Características do antracito	17
3.2. O princípio da classificação e funcionamento de hidrociclones	18
3.3. Geometria e parâmetros geométricos dos Ciclones	21
3.3.1. Parâmetros Geométricos	23
3.3.1.1. Diâmetro do hidrociclone	23
3.3.1.2. Área do inlet.....	23
3.3.1.3. Comprimento da seção cilíndrica e ângulo do cone	24
3.3.1.4. Diâmetro do vórtex finder.....	24
3.3.1.5. Diâmetro do apex.....	24
3.4. Variáveis operacionais	26
3.4.1. Porcentagem de sólidos na alimentação	26
3.4.2. Distribuição granulométrica da alimentação	26
3.4.3. Pressão da alimentação	26
3.5. Modelos matemáticos da partição de ciclones.....	27
3.5.1. Modelo de Yoshioka e Hotta.....	27
3.5.2. Modelo de Lynch e Rao	28
3.5.3. Modelo de Plitt	29
3.5.4. Modelo do CIMM.....	30
4. METODOLOGIA	33
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
6. CONCLUSÃO	44
6.1. Sugestões para trabalhos futuros	44
REFERÊNCIAS	45
APÊNDICE	47

1. INTRODUÇÃO

A classificação de partículas em granulometrias distintas é uma operação importante em quase todas as etapas do beneficiamento de minérios. Embora geralmente o foco no controle e desenvolvimento nas operações unitárias da usina seja principalmente nas etapas de cominuição e concentração mineral, a classificação granulométrica desempenha um papel fundamental na entrega do produto final na planta de beneficiamento de minérios devido a sua finalidade.

Cada vez mais estudos vêm sendo desenvolvidos com objetivo de fundamentar tomadas de decisões rápidas e assertivas nos processos de mineração utilizando modelos matemáticos e simulações. O avanço da tecnologia possibilitou novas ofertas de equipamentos de classificação mineral como também novos *softwares* que contribuem na otimização de operações.

Hidrociclones são equipamentos amplamente difundidos no ambiente industrial e utilizados na separação de partículas com diferentes tamanhos. As principais vantagens que colaboram na escolha do equipamento são a geometria compacta, baixo custo de construção e manutenção, além da alta eficiência de separação.

A operação ineficiente de um hidrociclone devido ao dimensionamento incorreto, descontrole de variáveis operacionais, ausência de inspeções e de manutenções faz com que as partículas se reportem ao fluxo errado, o que comprometendo o corte granulométrico do equipamento.

As simulações de cenários operacionais utilizando modelos matemáticos e ferramentas computacionais são importantes opções para garantir, dentro das limitações destas, o correto funcionamento dos equipamentos, favorecendo a previsibilidade de resultados, diminuição das limitações da usina e melhor controle de custos.

A partir deste pressuposto, este trabalho terá como principal assunto a avaliação de possibilidades para se obter um produto com granulometria determinada no *overflow* considerando um modelo matemático e constantes de classificação já definidas em estudos anteriores. Buscou-se então avaliar diferentes dados para identificar quais os cenários favoráveis para obtenção do produto com um D80 de 150 μm no *overflow*, variando as principais condições operacionais e parâmetros geométricos do equipamento.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O objetivo do presente trabalho é estudar e simular os possíveis cenários em um sistema de hidrociclones variando as condições geométricas do equipamento como também as operacionais utilizando o software Molycop Tools para atingir um produto do *overflow* com granulometria específica.

2.2. Objetivos Específicos

- i. Atingir a granulometria de 150 micrometros dentro da calibração para o tipo de minério analisado;
- ii. Avaliar quais as melhores condições operacionais para o estudo em questão;
- iii. Analisar qual a melhor condição geométrica do equipamento que garanta a granulometria desejada.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordadas as principais características do mineral utilizado nos ensaios de classificação e calibração das constantes do modelo matemático, princípios básicos da classificação e funcionamento de um hidrociclone, além das suas variáveis geométricas e operacionais. Ademais, serão apresentadas as relações geométricas que definem as famílias clássicas de hidrociclones e alguns dos métodos clássicos de abordagem da modelagem da partição de ciclones.

3.1. Características do antracito

O antracito é uma variedade compacta e dura do carvão mineral, apresentando teor de carbono fixo na faixa de 93 a 98%, mais alto do que as demais variações (DNPM, 2017). Apresenta cor preta e brilhante como uma característica marcante e possui alto poder calorífico. É bastante conhecido por liberar alta energia por quilo e queimar limpidamente com pouca fuligem, tornando-se um tipo de carvão bastante procurado para compra.

É bastante utilizado como filtro médio aplicado na eliminação das impurezas presentes na água, mas sua principal utilização é para fins metalúrgicos.

A figura 1 mostra as principais diferenças visuais entre os tipos de carvão mineral.

Figura 1 - Tipos de carvão mineral



Fonte: Elaboração própria

3.2. O princípio da classificação e funcionamento de hidrociclones

No processamento mineral a etapa de classificação utilizando hidrociclones é uma operação unitária que corresponde a separação por diferentes tamanhos de partículas em meio fluido de acordo como a velocidade que as partículas atravessam o meio. Nessa operação é possível se obter dois produtos, o *underflow* que é onde se encontra a maioria das partículas grosseiras e o *overflow* que é onde estão predominantemente as partículas mais finas. (Valadão e Araújo, 2007)

O hidrociclone é um equipamento de grande destaque quando se fala de classificação por não possuir partes móveis, sendo basicamente constituído de uma parte cilíndrica que é acoplada em uma base cônica, o que facilita na montagem e manutenção. Ademais, são equipamentos compactos que ocupam pequena área para instalação, relativamente eficientes e com fácil controle operacional. Por esse motivo são largamente utilizados no setor industrial (SVAROVSKY, 2000).

A instalação de baterias desses equipamentos geralmente é realizada em pontos mais altos da planta de beneficiamento mineral, já que o bombeamento da alimentação é uma regra necessária. Logo, os produtos do hidrociclone escoam por gravidade para as operações subseqüentes favorecendo uma redução de energia e beneficiando etapas subseqüentes de condicionamento para estágios de concentração mineral.

Os primeiros hidrociclones começaram a ser utilizados e consolidados na indústria apenas após a segunda guerra mundial, especificamente em indústrias de mineração (KRAIPRECH *et al.*, 2005).

Foi desenvolvido pelo *Dutch States Mines Department*, na Holanda, sendo utilizado para classificação de material fino, entre 100# e 2 μm (CHAVES, 2012).

Nas décadas de 1960 a 1980 os hidrociclones começaram a ser muito utilizados em circuitos fechados de moagens (SILVA, 1989). Ademais, eles podem ser empregados em etapas de desaguamento através de ajustes nas variáveis geométricas e operacionais contribuindo para a eliminação de maior parte da água na polpa. É aplicado também para eliminar partículas finas na etapa de deslamagem, em circuitos de pré-concentração com hidrociclones de fundo chato onde por gravidade os minerais mais densos são descartados pelo

underflow e aplicado na classificação seletiva utilizando-se uma configuração em série para se obter um conjunto de produtos com granulometrias definidas (CARRISSO; CORREIRA, 2004).

O processo de separação é originado pela injeção tangencial da alimentação em polpa a uma determinada pressão na parte superior da seção cilíndrica do hidrociclone, gerando um movimento rotacional como consequência da ação centrífuga atuante sobre as partículas presentes no meio, forçando-as a moverem-se em direção à parede do equipamento (SVAROVSKY, 1990). Esse movimento é principalmente realizado por partículas com diâmetros maiores, sendo direcionados pelo fluxo descendente para o apex. De forma contrária, as partículas menores são arrastadas e se deslocam para a região central do equipamento formando um fluxo ascendente no interior do ciclone devido à presença do núcleo de ar no eixo central do equipamento, logo, o material de menor granulometria é direcionado para o *vórtex finder* (VALADÃO; ARAÚJO, 2007).

Portanto, essa separação de partículas em um hidrociclone ocorre através da atuação de duas forças que são geradas devido ao movimento rotacional do fluido, a força centrífuga (F_{ce}) e força de arraste (F_a). O balanço dessas forças determina a velocidade terminal da partícula, que depende da sua forma e de seu tamanho, bem como das propriedades do fluido (KYRIAKIDIS, 2014).

As principais forças geradas pelo fluxo da polpa são ilustradas na figura 2.

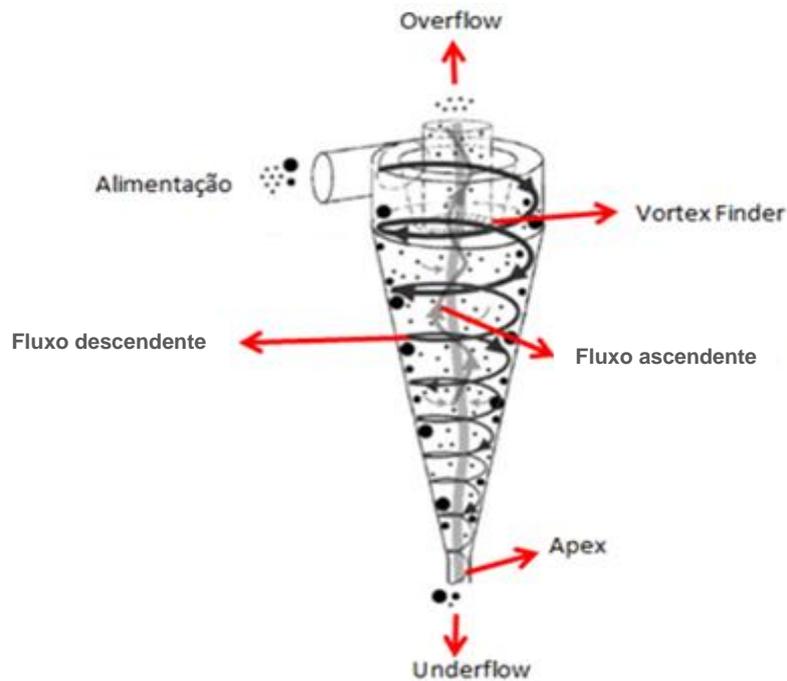
Figura 2 - Forças atuantes no movimento de órbita da partícula



Fonte: Adaptado de WILLS, 2006

Ainda, a figura 3 apresenta o movimento rotacional no interior do equipamento devido a aplicação das forças existentes, bem como o fluxo gerado e o direcionamento dos produtos do hidrociclone.

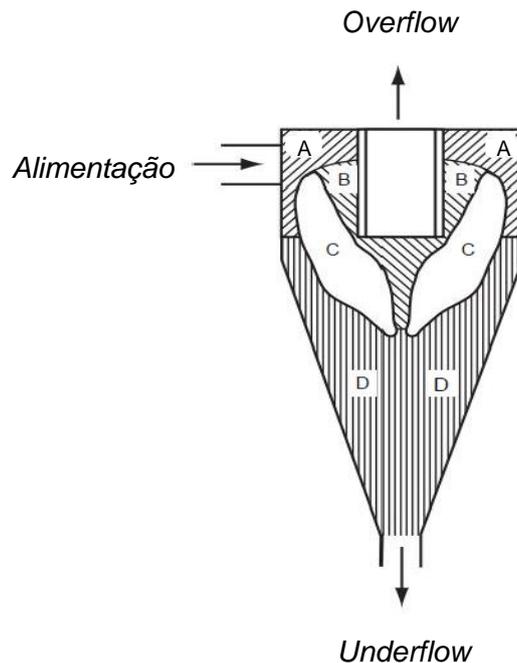
Figura 3 - Funcionamento do hidrociclone



Fonte: Adaptado de SALVADOR, BARROZO e VIEIRA, 2014.

Renner e Cohen, em 1978, mostraram de forma aproximada em seus estudos as principais regiões existentes dentro do equipamento. Conforme a figura 4, a região A é uma área estreita e caracterizada por uma distribuição de tamanho semelhante à da alimentação. A região B é onde fica o material mais fino com uma distribuição de tamanho muito semelhante ao produto do *overflow*. A área C pode ser considerada como a mais crítica, uma vez que contém quantidades significativas de partículas com tamanho próximo. Já a região D é a maior área da seção cônica e onde se concentra maior parte de partículas mais grossas, semelhantes às do *underflow*.

Figura 4 - Principais regiões dentro do ciclone



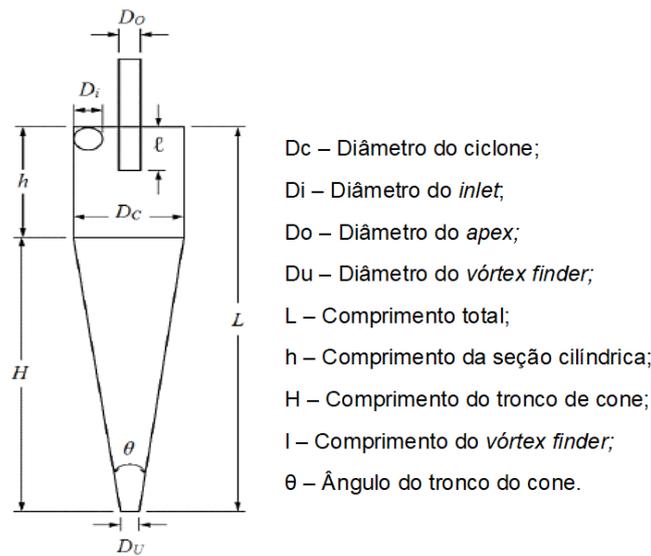
Fonte: Adaptado de Renner e Cohen, 1978

3.3. Geometria e parâmetros geométricos dos Ciclones

A depender das relações entre as dimensões geométricas e o diâmetro da parte cilíndrica, os hidrociclones podem apresentar diferentes funções, sendo um possível efeito concentrador de tamanhos ou apenas classificador.

A figura 5 mostra a geometria padrão do equipamento, sendo D_i o diâmetro do *inlet*, D_c o diâmetro do cilindro, D_o o diâmetro do *vórtex finder*, D_u diâmetro do *apex*, L o comprimento total do equipamento, h o comprimento da parte cilíndrica, H o comprimento do tronco do cone, l o comprimento do *vórtex* e θ o ângulo do tronco do cone.

Figura 5 – Geometria do ciclone



Fonte: SILVA, N. K. G, 2014

A tabela 1 mostra os tipos de ciclones e os respectivos fabricantes que são definidos com base nas relações geométricas dos equipamentos. Os fabricantes de ciclones mais conhecidos são: Krebs, Demco, Bradley, Rietema, AKW.

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

Fabricantes	D_i/D_c	D_o/D_c	l / D_c	L/D_c	θ
AKW	0,200	0,320	0,800	6,240	15°
BRADLEY	0,133	0,200	0,330	6,850	9°
DEMCO I	0,217	0,500	1,000	4,700	25°
DEMCO II	0,244	0,313	0,833	3,900	20°
HI-KLONE	0,175	0,250	0,920	5,600	10°
KREBS	0,267	0,159	-	5,874	13°
MOSLEY I	0,154	0,214	0,570	7,430	6°
MOSLEY II	0,160	0,250	0,570	7,710	6°
RIETEMA	0,280	0,340	0,400	5,000	20°
RW 2515	0,200	0,320	0,800	6,240	15°
WARMAN	0,290	0,200	0,310	4,000	15°

Fonte: Adaptado de SVAROVSKY, 1984; CRUZ, 2008

Vieira (2006) mostrou um comparativo em seu estudo onde os fabricantes com a região cilíndrica maior possuem maior capacidade de alimentação, outrossim, os que apresentam maior altura da parte cônica favorecem uma maior eficiência na separação.

Ainda de acordo com Vieira (2006), a escolha da geometria do equipamento vai depender principalmente do objetivo da operação dos hidrociclones e a mudança dessas condições geométricas influencia na capacidade de classificação do equipamento.

3.3.1. Parâmetros Geométricos

Os hidrociclones tem seu desempenho influenciado por suas condições operacionais e variáveis geométricas (CORREIA, 2010 e CHAVES, 2012). Ambas são de extrema importância para garantir uma correta operação e eficiência do processo de classificação.

De acordo com Chaves (2012), o parâmetro geométrico mais característico do ciclone é o diâmetro interno da porção cilíndrica, sendo o tamanho do ciclone referido a esse diâmetro.

Contudo, outros parâmetros importantes para garantir um bom desempenho dos equipamentos serão listados abaixo.

3.3.1.1. Diâmetro do hidrociclone

De acordo com Chaves (2012), um parâmetro geométrico bastante importante do hidrociclone é o diâmetro interno da porção cilíndrica, mais comumente expresso em polegadas. Esse é um parâmetro importante pois além de ter grande influência no diâmetro de corte também define a capacidade do equipamento.

A relação é direta, quanto maior o diâmetro, maior será o diâmetro de corte do ciclone.

3.3.1.2. Área do inlet

É responsável por determinar a velocidade de entrada (V_e) e, conseqüentemente, a velocidade tangencial (V_t), que também varia com o raio

da seção cilíndrica. Logo, a velocidade tangencial é aproximadamente igual à velocidade de entrada na seção cilíndrica do equipamento. (MULAR, 1980)

Variações na área de entrada traz como consequência variações na capacidade do hidrociclone e na redução da pressão.

3.3.1.3. Comprimento da seção cilíndrica e ângulo do cone

Parâmetro que influencia no tempo de residência da polpa no hidrociclone. Comumente o comprimento da seção cilíndrica h é igual ao seu diâmetro D_c . Para se obter uma classificação mais fina é recomendado aumentar o comprimento h para que ocorra a elevação do tempo de residência.

Quando o ângulo da seção cônica é diminuído em hidrociclones com seção cilíndrica de diâmetro fixo, ocorre o aumento do comprimento da seção cilíndrica, resultando em maior tempo de residência. Nesta situação a classificação será mais fina.

3.3.1.4. Diâmetro do *vórtex finder*

Geralmente situa-se entre 35 e 40% do diâmetro interno do hidrociclone, não sendo uma regra absoluta a ser seguida. Quanto maior for o diâmetro do *vórtex finder* maior será o diâmetro de corte de classificação e a porcentagem de sólidos no *overflow* (SAMPAIO, 2007)

Para evitar a passagem direta das partículas ao *overflow* sem classificação, o ideal é que o comprimento do *vórtex finder* seja suficiente para que sua base seja posicionada abaixo do *inlet*.

3.3.1.5. Diâmetro do apex

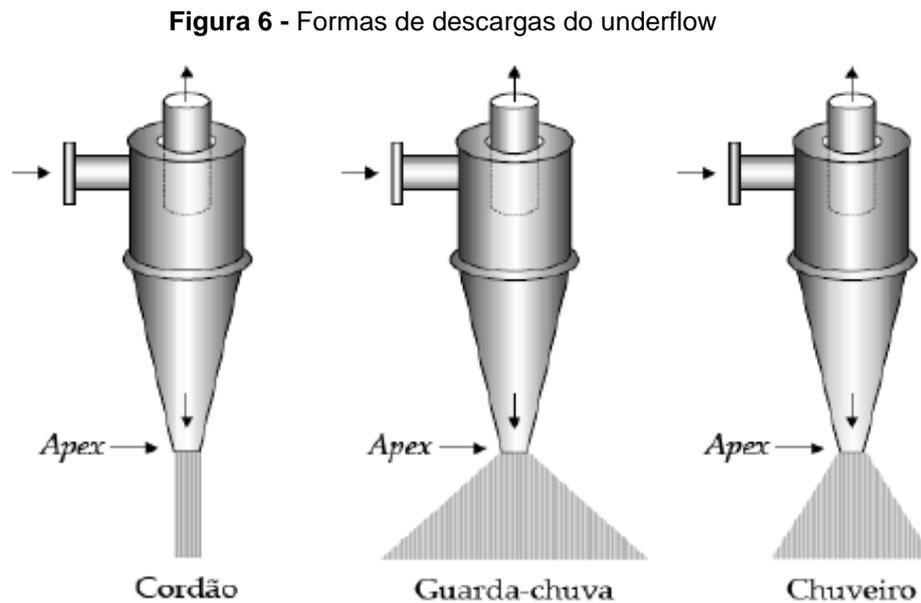
O diâmetro do *apex* regula principalmente o comportamento da água e dos finos no *underflow* do hidrociclone, afetando diretamente sua porcentagem de sólidos.

É recomendado que o *apex* possua um diâmetro menor que 25% do diâmetro do *vórtex finder*. Quando ocorre o aumento desse diâmetro temos a

diminuição do corte de classificação. A relação inversa fica mais limitada pois partículas maiores só podem ser descarregadas pelo apex. (SAMPAIO, 2007)

De acordo com Luz *et al.* (2010), os tipos de descargas dos hidrociclones são controlados pelo diâmetro do *apex*, podendo ser elas cordão, guarda-chuva e chuva.

As três situações podem ser observadas na figura 6:



Fonte: SAMPAIO *et al.* 2007

A descarga do *underflow* no formato cordão ou guarda-chuva influencia de forma negativa a eficiência de corte em hidrociclones. O primeiro formato é observado quando a densidade do *underflow* é elevada, já o formato guarda-chuva é encontrado em polpas excessivamente diluídas.

A operação eficiente do hidrociclone é quando a descarga do *underflow* é no formato de um cone de ângulo pequeno, popularmente conhecida como chuva.

3.4. Variáveis operacionais

As variáveis operacionais são facilmente manipuladas a depender dos ajustes que são necessários para se obter melhores resultados. As mais importantes para são as discutidas abaixo.

3.4.1. Porcentagem de sólidos na alimentação

O aumento da porcentagem de sólidos na alimentação faz com que ocorra o aumento do diâmetro de corte de classificação. Logo, quanto maior for a quantidade de sólidos presente na polpa, as partículas de maior tamanho enfrentarão mais obstáculos para atravessar as partículas finas e decantar na zona de centrifugação.

3.4.2. Distribuição granulométrica da alimentação

Esta variável determina a relação entre as frações retida e passante na malha de classificação que influenciarão no diâmetro de classificação. Ademais, quanto maior for a quantidade de partículas finas na alimentação, mais viscosa será a polpa e como consequência maior será o diâmetro de classificação do equipamento.

3.4.3. Pressão da alimentação

Quando se aumenta a pressão do hidrociclone é provocado um acréscimo na capacidade (em m³/h) do equipamento que poderá implicar na velocidade tangencial, e como consequência, estende o mesmo efeito à velocidade angular.

Deste modo, quanto maior a pressão de alimentação, maior será a chance de decantação centrífuga às partículas menores, diminuindo o diâmetro de corte (SAMPAIO *et al.* 2007).

3.5. Modelos matemáticos da partição de ciclones

Diversos autores desenvolveram modelos matemáticos para as operações de tratamento de minérios. A etapa de classificação recebeu uma atenção especial sobre o assunto pois a previsibilidade granulométrica é uma ferramenta extremamente importante para o controle de processo das demais operações unitárias (CHAVES, 2012).

A maioria dos modelos possuem dois parâmetros, um que representa o tamanho da separação (d_{50}) e outro que representa a eficiência da separação. Devido à complexidade adicional injustificada, poucas foram as equações que apresentaram um terceiro parâmetro para a forma da curva, o que poderia ser positivo para uma melhor descrição (CHAVES, 2012).

A base para alguns dos modelos fundamentais são a mecânica dos fluidos e teorias de sedimentação. Alguns autores como Charkraborti e Miller (1992), Devulapalli e Rajamani (1996) e Concha *et al.* (1996) obtiveram bons progressos nos seus estudos, no entanto, esses modelos ainda não apresentam uma acurácia desejada para classificação utilizando hidrociclones (GOMES, 2014).

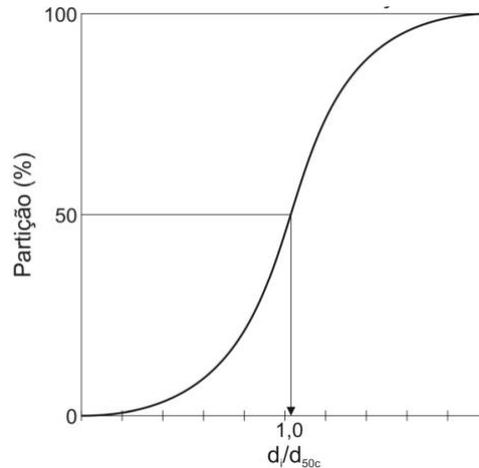
A seguir serão apresentadas algumas modelagens matemáticas da partição de ciclones estudadas ao longo dos anos.

3.5.1. Modelo de Yoshioka e Hotta

O modelo de Yoshioka e Hotta (1955) tinha como proposta a criação da curva de partição corrigida reduzida, mais indicada para avaliar a performance da ciclonação. Em seus estudos eles observaram que seria possível colocar as curvas de partição em função do quociente d/d_{50} , logo, todas as curvas de partição dos diferentes ciclones tenderiam para uma mesma curva, chamada então de curva padrão de partição. No eixo das abcissas é plotado o quociente entre as classes granulométricas e tamanho do corte corrigido (d_{50c}), já no eixo das ordenadas é plotado as partições para o *underflow*.

A curva padrão de partição é demonstrada na figura 7.

Figura 7 - Curva Padrão de Partição



Fonte: Adaptado de DELBONI JR, 2012

3.5.2. Modelo de Lynch e Rao

Os autores introduziram o conceito de curto-circuito ou *by-pass* na curva de partição de Yoshioka. Esse conceito considera que parte das partículas de todos os tamanhos são direcionadas para o *underflow* devido a força de arraste pela água, sem serem classificadas. (CHAVES, 2012)

No trabalho proposto por Lynch (1977), o modelo é composto por quatro correlações básicas: equação da vazão, equação de partição da água, equação do tamanho de corte corrigido (d_{50c}) e a equação de eficiência de classificação.

O modelo de Lynch e Rao fornece a equação 1.

$$\log d_{50c} = 0,0173FPS - 0,0695spig + 0,013VF + 0,000048Q + k \quad (1)$$

Sendo:

FPS = percentagem de sólidos na alimentação (volume);

spig = diâmetro do *apex* (cm);

VF = diâmetro do *vórtex finder* (cm);

Q = vazão da alimentação (l/min);

k = constante.

3.5.3. Modelo de Plitt

Na definição do seu modelo, Plitt também propôs um modelo com quatro correlações com um número maior de variáveis em cada uma delas, podendo ser consideradas como variáveis independentes e dependentes (Plitt, 1976).

A tabela 2 mostra essas principais variáveis.

Tabela 2 - Variáveis do modelo de Plitt

Variáveis dependentes	Variáveis independentes
Tamanho de corte corrigido (d50c)	Diâmetro do ciclone (Dc)
Vazão volumétrica de polpa na alimentação (Q)	Diâmetro do <i>vortex</i> (Do)
Parâmetro de eficiência de classificação (m)	Diâmetro do <i>apex</i> (Du)
Relação entre os fluxos para os produtos (S)	Diâmetro do <i>inlet</i> (Di)
	Altura livre do hidrociclone (h)

Fonte: Adaptado de SILVA, 2014

Outrossim, diferente do modelo definido por Lynch e Rao, Plitt desenvolveu uma equação específica para calcular o coeficiente de inclinação (m) da curva de partição.

As equações 2, 3, 4 e 5 propostas no modelo para avaliar o desempenho do hidrociclone são apresentadas abaixo.

$$d_{50c} = K_1 \frac{39,7D_c^{0,46} D_i^{0,6} D_o^{1,21} \eta^{0,5} \exp^{0,063C_v^p}}{D_u^{0,71} h^{0,38} Q_v^{0,45} \left(\frac{\rho_s-1}{1,6}\right)^n} \quad (2)$$

$$P = K_2 \frac{1,88Q_v^{1,8} \exp^{0,0055C_v^r}}{D_c^{0,37} D_i^{0,94} h^{0,28} (D_u^2 + D_o^2)^{0,87}} \quad (3)$$

$$S = K_3 \frac{18,62\rho_p^{0,24} \left(\frac{D_u}{D_o}\right)^{3,31} h^{0,54} (D_u^2 + D_o^2)^{0,36} \exp^{0,0054C_v^p}}{D_c^{1,11} P^{0,24}} \quad (4)$$

$$m = K_4 1,94 \left(\frac{D_c^2 h}{Q_v} \right)^{0,15} \exp\left(\frac{-1,58S}{1-S}\right) \quad (5)$$

Sendo:

D_c = diâmetro do ciclone (cm);

η = viscosidade do líquido (cP)

C_V^P = percentagem de sólidos por volume na alimentação (%)

h = altura livre do ciclone (cm)

n = expoente hidrodinâmico, a ser estimado a partir dos dados (valores padrões para os regimes laminar = 0,5 e turbulento = 1)

ρ_s = densidade do minério (g/cm³)

ρ_p = densidade da polpa (g/cm³)

S = razão entre as vazões volumétricas da polpa no underflow e no overflow

m = parâmetro de nitidez da separação

Este modelo matemático é o mais utilizado para calcular o diâmetro de corte corrigido de ciclones (d50c) (SILVA *et al.*, 2012).

Durante os estudos de Plitt foram identificadas algumas limitações no modelo. A primeira está relacionada com o cálculo da razão entre as vazões volumétricas da polpa no underflow e overflow; como essa razão é necessária para cálculo de outras variáveis a propagação do erro é inevitável (KING, 2001).

Além disso, outra limitação identificada é a quantidade de variáveis operacionais necessárias para a utilização do modelo que muitas vezes não são simples e fáceis de serem obtidas (SILVA, 2014).

3.5.4. Modelo do CIMM

O modelo estudado pelo Centro de Investigación Minera y Metalúrgica (CIMM) descrito por Sepúlveda (1983), é muito parecido com o proposto de Plitt, no entanto, o CIMM considera diferentes as variáveis de curto-circuito de finos (A_{pw}) e curto-circuito de água (A_{pf}), o que no modelo de Plitt são idênticas.

Abaixo temos as equações 6, 7, 8 e 9 necessárias no modelo.

- Equação da pressão da alimentação do hidrociclone

$$H = a_1 \frac{Q^{1,46} (-7,36\phi + 10,79\phi^2)}{(D_c)^{0,20} (h)^{0,15} (D_i)^{0,51} (D_o)^{1,65} (D_u)^{0,52}} \quad (6)$$

Sendo:

a_1 = constante empírica do material

D_c = diâmetro do hidrociclone (pol);

D_i = diâmetro ou diâmetro equivalente do duto de entrada (pol);

D_o = diâmetro de vortex finder (pol);

D_u = diâmetro do apex (pol);

Φ = percentagem de sólidos (volume) na alimentação;

h = altura livre; distância interna entre o vortex finder e o apex (pol);

Q = vazão volumétrica da polpa na alimentação (m³/h);

- Equação do tamanho de corte corrigido

$$d_{50}^c = a_2 \frac{(DC)^{0,40} (DI)^{0,58} (DO)^{1,91} \exp(11,12\phi)}{(DU)^{0,80} h^{0,37} Q^{0,44} (\rho_s - 1)^{0,5}} \quad (7)$$

Sendo:

a_2 = constante empírica característica do mineral.

ρ_s = peso específico do minério (g/cm³).

- Equação de partição de polpa

$$S = \frac{Q_u}{Q_o} = a_3 \frac{h^{0,19} (DU/DO)^{2,64} \exp(-4,33\phi + 8,77\phi^2)}{H^{0,54} (DC)^{0,38}} \quad (8)$$

Sendo:

a_3 = constante empírica característica do mineral.

- Equação de eficiência de classificação

$$E_i = B_{pf} + (1 - B_{pf})E_i^c \quad i=1, 2, \dots, n \quad (9)$$

Onde:

$$E_i^c = 1 - \exp\left[-0,693(d_i / d_{50}^c)^m\right]$$

$$m = \exp(a_4 - 1,58R_v) \left(\frac{DC^2 h}{Q}\right)^{0,15}$$

$$B_{pf} = \lambda B_{pw}$$

$$B_{pw} = \frac{R_v - \phi R_{sc}}{1 - \phi[1 - \lambda(1 - R_{sc})]}$$

$$R_v = S/(S + 1)$$

$$R_{sc} = \sum_{i=1}^n f_i E_i^c$$

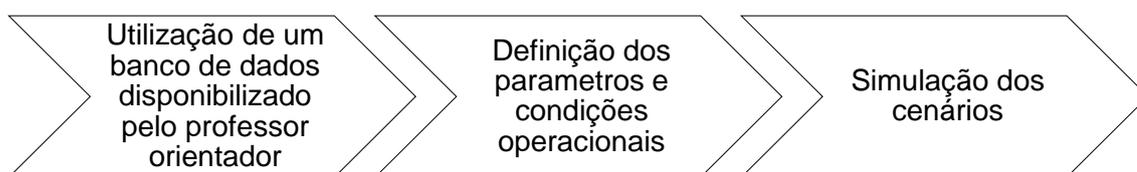
De acordo com a equipe responsável por desenvolver esse modelo, as constantes a_1 , a_2 , a_3 , a_4 e λ são calculadas a partir de um único ensaio de classificação (ALVES, 2006).

4. METODOLOGIA

O desenvolvimento deste trabalho foi dividido em cinco etapas principais: estudo sobre as características físicas do antracito, entendimento do modelo matemático utilizado para calibração do sistema, avaliação e validação dos parâmetros geométricos do ciclone, definição das principais variáveis operacionais que influenciam no desempenho do equipamento e simulação dos cenários.

A figura 8 demonstra o resumo das principais fases do estudo, desde a coleta até a simulação dos dados.

Figura 8 - Fluxograma das atividades propostas



Fonte: Elaboração própria

Tanto a aplicação do modelo como as simulações foram feitos utilizando o Molycop Tools, ferramenta aplicada para caracterizar e avaliar a eficiência operacional de circuitos de cominuição através da moagem e circuitos de classificação utilizando ciclones.

A figura 9 apresenta a página principal utilizada para desenvolver simulações na ferramenta.

Figura 9 - Ferramenta utilizada para simulações

Moly-Cop Tools™

CYCLOSIM

Simulation N°

Remarks

# of Cyclones	Cyclones Geometry, inches				
	Diameter	Height	Inlet	Vortex	Apex
38	6,00	41,93	1,61	3,00	1,00

Operating Conditions : Ore Density, ton/m3

Cyclone Feed Conditions						
Dry Tons ton/hr	Water m3/hr	Slurry ton/hr	Flow m3/hr	Density ton/m3	% Solids (by volume)	% Solids (by weight)
1123,75	975,37	2099,12	1582,80	1,326	38,38	53,53

Classifier Constants : *(from Cyclobal_Single, Ballbal_Direct or Ballbal_Reverse)*

a1	a2	a3	a4	λ
11,378	10,498	33,765	-0,426	0,828
8,602	1,604	65,134	1,138	0,950

Suggested Default Values

Feed Size Distribution :

i	Mesh	Opening	Mid-Size	ton/hr	% Ret	% Pass
1	1,05	63357	47706	0,00	0,00	100,00
2	0,742	44800	53276	0,00	0,00	100,00
3	0,525	31678	37672	0,00	0,00	100,00
4	0,371	22400	26638	0,00	0,00	100,00
5	3	15839	18836	0,00	0,00	100,00
6	4	11200	13319	0,00	0,00	100,00
7	6	7920	9418	0,00	0,00	100,00
8	8	5600	6660	0,00	0,00	100,00
9	10	4800	5185	26,26	2,34	97,66
10	14	2400	3394	36,75	3,27	94,39
11	20	1000	1549	12,47	1,11	93,28
12	28	840	917	4,59	0,41	92,87
13	35	710	772	10,50	0,93	91,94
14	48	500	596	14,44	1,29	90,66
15	65	300	387	44,63	3,97	86,68
16	100	210	251	66,95	5,96	80,73
17	150	150	177	93,86	8,35	72,37
18	200	106	126	111,59	9,93	62,44
19	270	75	89	97,80	8,70	53,74
20	400	45	58	147,69	13,14	40,60
21	-400	0	23	456,21	40,60	0,00
Total				1123,75	100,00	

Fonte: Molycop Tools

Os dados granulométricos da amostra, bem como o balanço de massas necessário para calibração do modelo de simulação foram retirados a partir de um trabalho de conclusão de curso que utilizou o modelo de simulação CIMM para regular o sistema. De acordo com o autor, a amostra foi coletada na

descarga da moagem e submetida ao teste de classificação em diferentes condições para obter os parâmetros de calibração ideal para o circuito. (BUENO, 2021)

O material utilizado nos testes de ciclonagem foi um antracito proveniente da África do Sul. O antracito é uma variedade de carvão sólido e compacto com teor médio de carbono de 96% e densidade média de 1,85 t/m³.

Abaixo temos os parâmetros de classificação do modelo calibrado obtidos no trabalho do BUENO (2021).

Tabela 3 - Constantes de classificação

Constante de classificação	Valores obtidos
a1	11.378
a2	10.498
a3	33.765
a4	-0.426
λ	0.828

Fonte: BUENO, 2021

Na avaliação feita pelo autor, para calibração do circuito foram consideradas as variáveis abaixo:

- ✓ Porcentagem de sólidos na alimentação;
- ✓ Pressão de alimentação;
- ✓ Condições do apex, vórtex finder e inlet.

Após obtenção dos valores na calibração do modelo, novas simulações foram realizadas variando as características geométricas e condições operacionais para garantir um d80 no overflow do ciclone da ordem de 150 μ m.

Os dados da geometria do equipamento utilizado na simulação foram obtidos através do manual da KREBS, sendo o ciclone com diâmetro de 6" da linha GMAX. A altura e o diâmetro do ciclone foram mantidos os mesmos do proposto na modelagem das constantes de calibração para não interferirem nos resultados.

A tabela 4 mostra os parâmetros que foram mantidos fixos durante as simulações.

Tabela 4 - Parâmetros fixos

Parâmetros	Valores
Diâmetro	6"
Altura	41.93"

Fonte: Elaboração própria

A alimentação do circuito durante todas as simulações foi de 650 t/h.

Para atender a especificação do produto estabelecido, foram variadas as condições geométricas e operacionais abaixo.

➤ **Quantidade de ciclones**

Foram utilizados respectivamente uma série de 10, 20, 30, 40, 50 e 60 ciclones para cada condição estabelecida nas simulações.

➤ **Geometria do ciclone**

Na geometria dos ciclones as únicas variações foram no *inlet*, *apex* e *vórtex finder*.

Abaixo são apresentados os valores estabelecidos para cada cenário.

Tabela 5 - Parâmetros geométricos dos equipamentos

Descrição	Valores	
	Min	Max
Área do Inlet (pol)	1.29	1.67
Vortex (pol)	2.00	2.50
Apex (pol)	1.50	2.00

Fonte: Elaboração própria

Os valores do *vórtex finder* considerados variaram entre 35% e 40% do diâmetro interno do ciclone. Já o diâmetro do apex utilizado foi equivalente a 25% do diâmetro do *vórtex finder* (SAMPAIO, 2007).

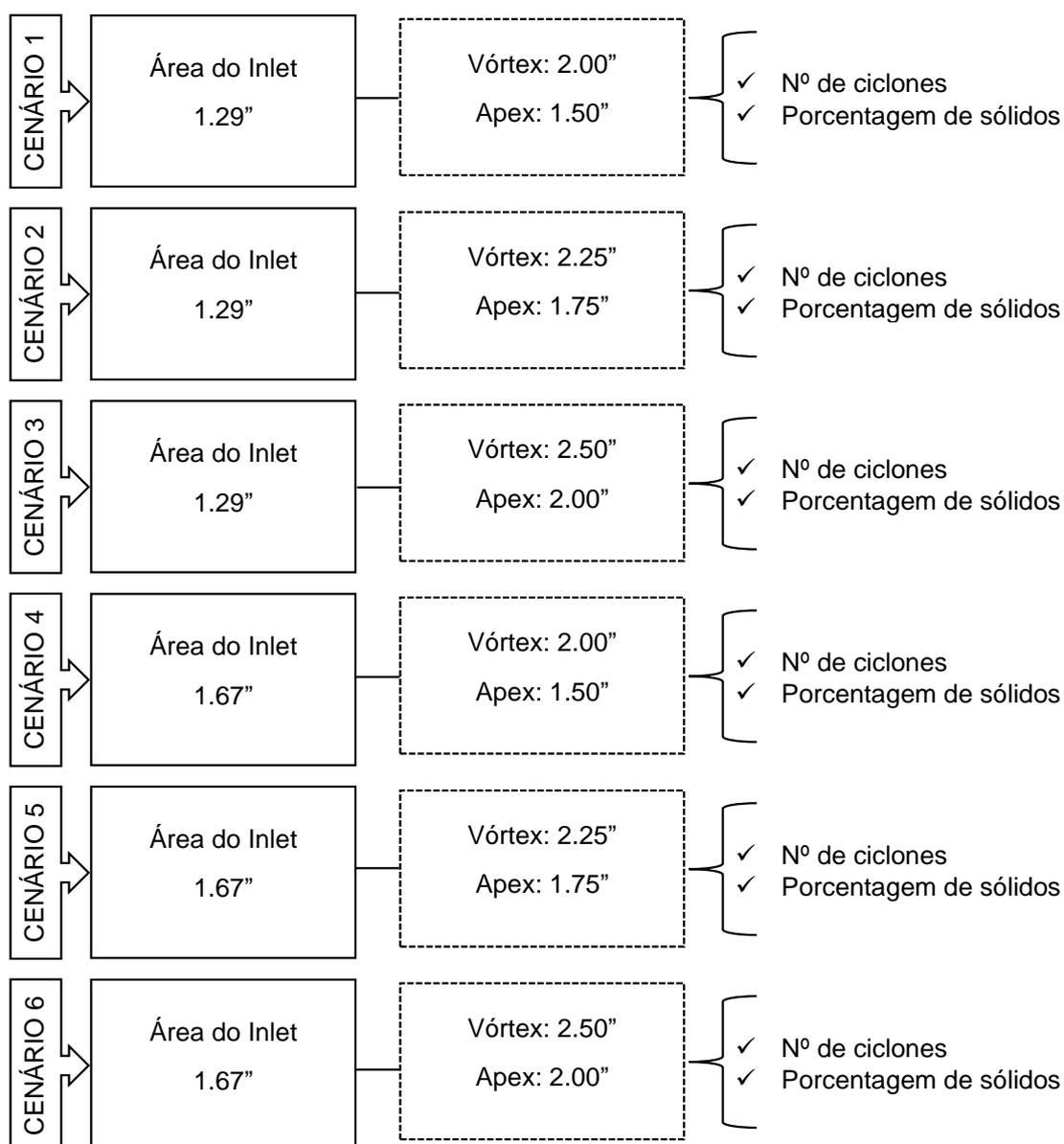
Tanto os valores do *vórtex* quanto do *apex* tiveram os diâmetros variando em intervalos de 0,25" para os dois valores de inlet considerados. Os valores foram obtidos no catálogo do fornecedor.

➤ Porcentagem de sólidos

Para todos os cenários foi utilizada uma porcentagem de sólidos máxima de 60% e mínima de 30% na alimentação do ciclone.

A figura 10 mostra todos os principais parâmetros geométricos estabelecidos e as condições operacionais que foram modificadas durante as simulações.

Figura 10 - Cenários simulados



Fonte: Elaboração própria

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados das simulações desenvolvidas com base no modelo matemático definido e constantes de classificação já calibradas no estudo de BUENO em 2021. Optou-se então por definir possíveis cenários para iniciar as simulações e tentar obter um produto do *overflow* com granulometria de 150 micrometros.

A tabela 6 mostra os valores dos parâmetros fixos de entrada que foram inseridos no MolyCop Tools para começar as simulações.

Tabela 6 - Parâmetros geométricos definidos para os cenários

Cenário	Área do Inlet (pol)	Vortex finder (pol)	Apex (pol)	Taxa de Alimentação (t/h)
01	1,29	2,00	1,50	650
02	1,29	2,25	1,75	650
03	1,29	2,50	2,00	650
04	1,67	2,00	1,50	650
05	1,67	2,25	1,75	650
06	1,67	2,50	2,00	650

Fonte: Elaboração própria

A taxa de alimentação do ciclone foi constante para todas as simulações, sendo de 650 t/h. Já a área do *inlet*, e os diâmetros do *vórtex finder* e *apex* foram variados para cada cenário de simulação, sendo cada um destes com configurações geométricas específicas.

Com base nos primeiros parâmetros estabelecidos foram realizadas 144 simulações, sendo 24 para cada cenário. No entanto, dentro do objetivo do trabalho foram estabelecidos novos critérios para tornar a análise mais assertiva. Todos os valores de granulometria do *overflow* abaixo de 140 μm e acima de 160 μm foram expurgados das análises. No apêndice deste trabalho encontra-se a base geral das 144 simulações realizadas divididas por cada cenário proposto.

Em todos os cenários a pressão foi menor quando o número de ciclones foi maior, o que já é esperado em um circuito operacional. De igual modo, as porcentagens de sólidos na alimentação abaixo de 50% diminuíram o corte do ciclone, não favorecendo para os resultados esperados.

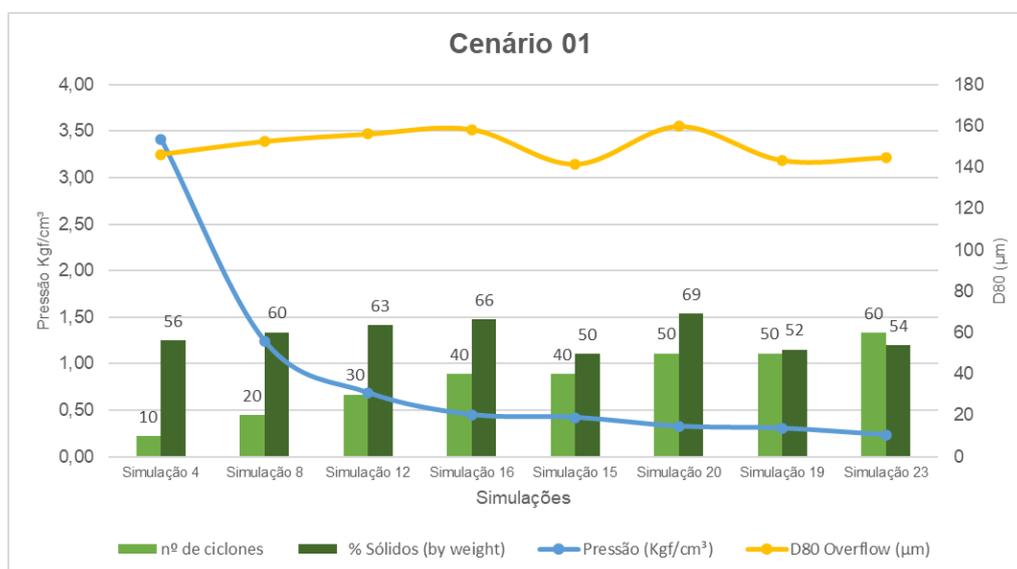
Ainda na avaliação, todas as simulações que geraram resultados de pressão maior do que 2,50 Kgf/cm³ possuíam 10 ciclones em operação, com 60% de sólidos na alimentação.

5.1. Cenário 1

No cenário 1 foi possível perceber que as simulações n°4 e n°8 apresentaram bons resultados granulométricos no *overflow*, sendo respectivamente 146 μm e 153 μm. Ademais, esses dois valores de granulometria foram atingidos com 10 e 20 ciclones operantes e 60% de sólidos na alimentação. A pressão mais baixa foi a da simulação 08, sendo 1,24 Kgf/cm³, no entanto, a porcentagem de sólidos nos dois produtos do ciclone desta simulação foi bem próxima, sendo 59,92% no *underflow* e 60,16% no *overflow*.

O gráfico 1, mostra a relação entre as principais variáveis analisadas na simulação.

Gráfico 1 - Parâmetros geométricos e variáveis operacionais do cenário 1



Fonte: Elaboração própria

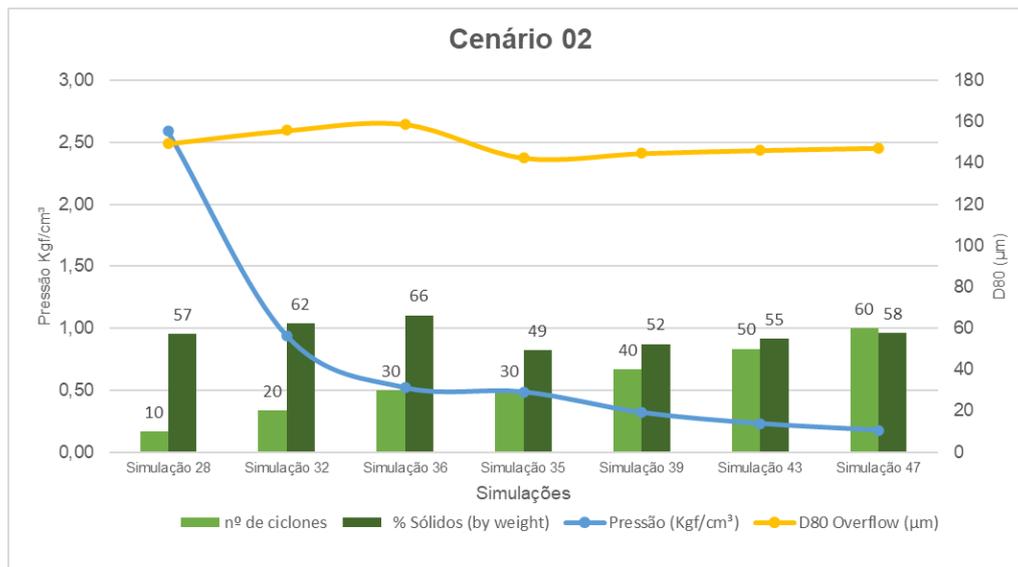
5.2. Cenário 2

No cenário 2 foi modificado o diâmetro do *apex* e *vórtex* com objetivo de avaliar a alteração na granulometria do *overflow*. A simulação n°28 e n°47 foram

as que apresentaram resultado mais próximo do objetivo, tendo um d80 de 147 μm e 149 μm no produto avaliado, respectivamente. A segunda simulação destacada teve 2,59 Kgf/cm^3 com 10 ciclones operantes e 57% de sólidos no *overflow*.

Pode-se observar abaixo, no gráfico 2, a relação entre as variáveis.

Gráfico 2 - Parâmetros geométricos e variáveis operacionais do cenário 2



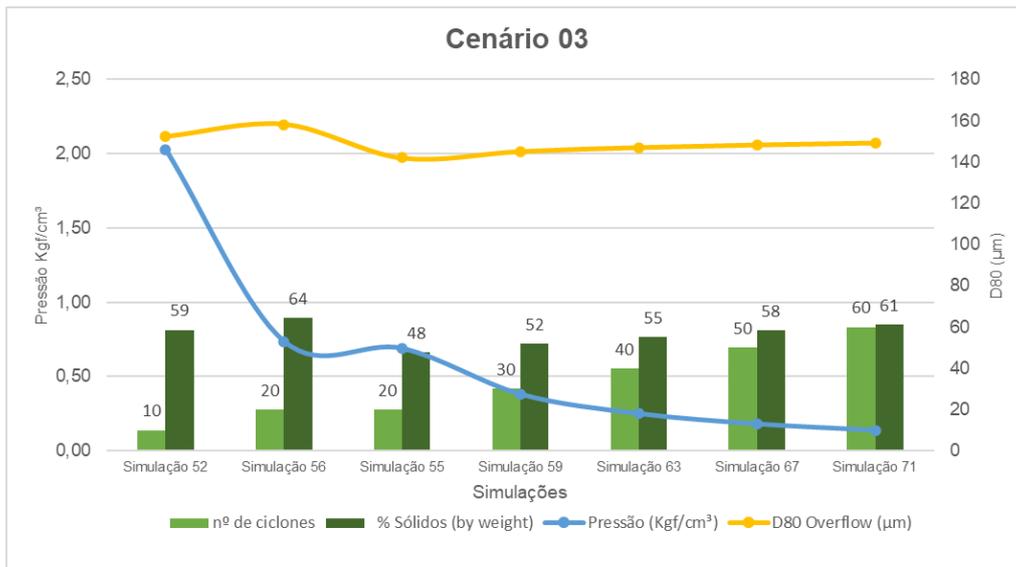
Fonte: Elaboração própria

5.3. Cenário 3

Este cenário continuou com o diâmetro do *inlet* sendo de 1,29" mas com diâmetro do *apex* de 2,00" e *vórtex* de 2,50". As simulações n°52, n°67 e n°71 apresentaram resultado de granulometria do *overflow* mais próximo do esperado. Como tamanho granulométrico do produto *overflow* as simulações apresentaram respectivamente 152 μm , 148 μm e 149 μm . Um ponto de atenção é que a simulação n°67 e a n°71 apresentaram um percentual de sólidos no *overflow* maior do que o do *underflow*. Ambas as pressões ficaram abaixo de 2,50 Kgf/cm^3 .

As principais variações são apresentadas no gráfico 3.

Gráfico 3 - Parâmetros geométricos e variáveis operacionais do cenário 3



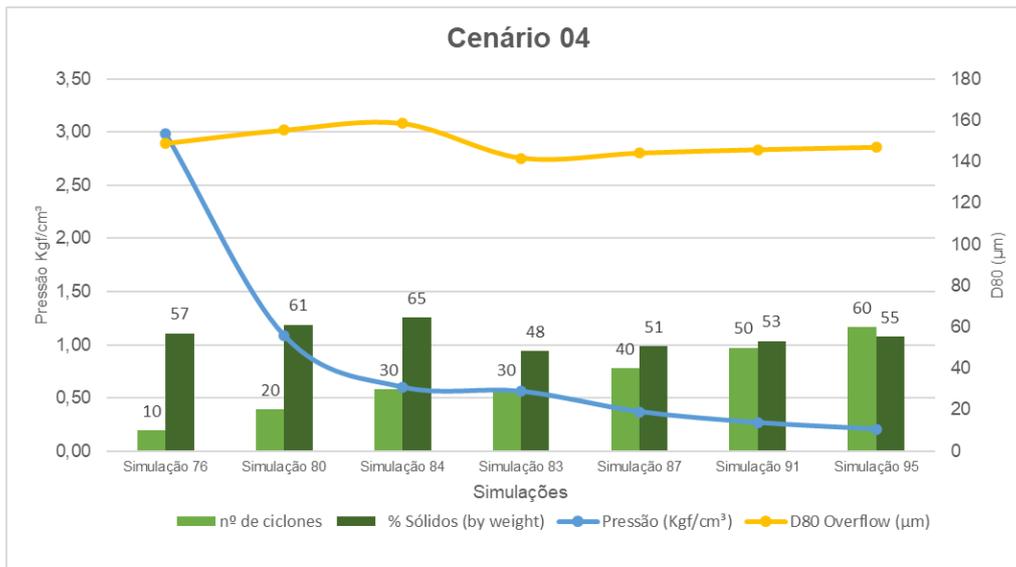
Fonte: Elaboração própria

5.4. Cenário 4

Já no cenário 4 foi feita a mudança do diâmetro do *inlet*, passando a ser 1,67" com *vórtex* de 2,00" e apex de 1,50". Das 7 simulações analisadas nesse cenário apenas duas resultaram em valores mais próximos do esperado, sendo a simulação nº76 com 149 µm e a simulação nº95 com 147 µm no *overflow*. A primeira apresentou uma pressão alta, da ordem de 2,98 Kg/cm³, com 10 ciclones e 60% de sólidos na alimentação. A segunda simulação teve 55% de sólidos no *overflow* e 49% no *underflow*.

Pode-se avaliar as principais variações no gráfico 4.

Gráfico 4 - Parâmetros geométricos e variáveis operacionais do cenário 4



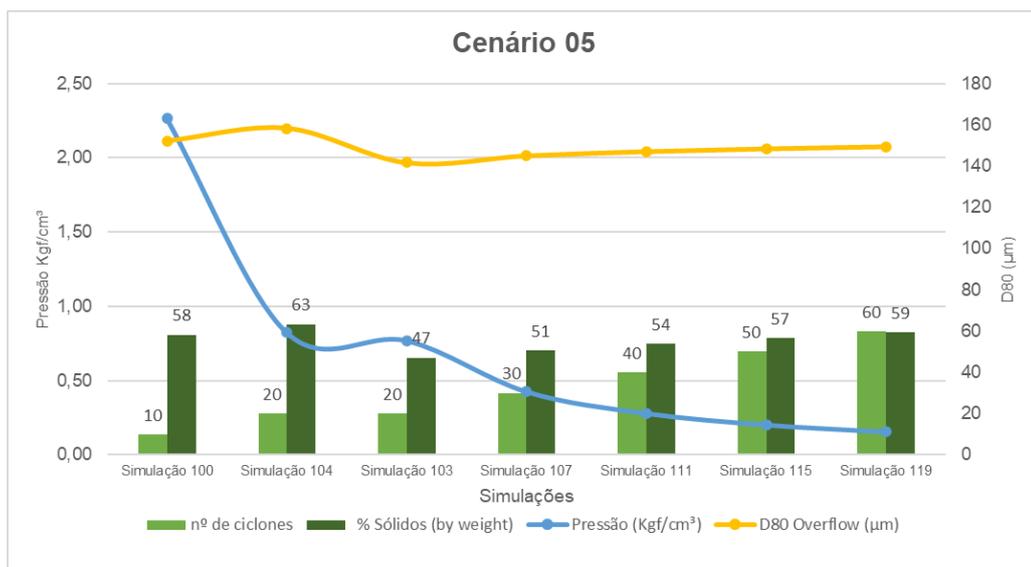
Fonte: Elaboração própria

5.5. Cenário 5

Para o cenário 5 foi mantido o inlet de 1,67” de abertura com o diâmetro do apex de 1,75” e vórtex de 2,25”. O destaque na granulometria do overflow foi para a simulação nº100, nº115 e nº119, sendo respectivamente 150 µm, 148 µm e 149 µm. As duas últimas simulações obtiveram percentual de sólidos maior no overflow com 50 e 60 ciclones e pressão abaixo de 0,50 Kgf/cm³.

A seguir, no gráfico 5, seguem as principais variações.

Gráfico 5 - Parâmetros geométricos e variáveis operacionais do cenário 5



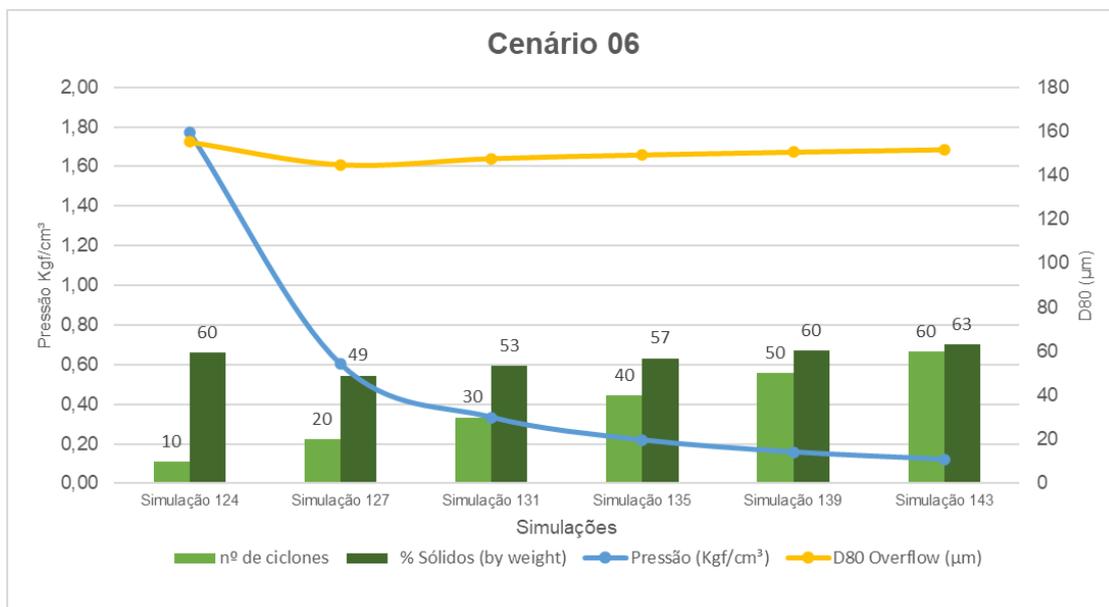
Fonte: Elaboração própria

5.6. Cenário 6

O último cenário avaliado apresentou baixas pressões para os dois resultados granulométricos mais próximos do objetivo. As simulações nº135 e nº139 obtiveram respectivamente 0,22 e 0,16 Kgf/cm³ de pressão, com 40 e 50 ciclones, e com uma porcentagem de sólidos na alimentação de 50%. Sobre a granulometria do overflow obteve-se como resultado 149 µm e 151 µm com percentual de sólidos maior do que o do underflow nos dois casos.

O gráfico 6 apresenta esses resultados.

Gráfico 6 - Parâmetros geométricos e variáveis operacionais do cenário 6



Fonte: Elaboração própria

6. CONCLUSÃO

A modelagem matemática e a simulação de variáveis em uma usina de beneficiamento se fazem cada vez mais presente, tanto no momento do projeto quanto na rotina de busca da melhoria contínua em operações já em funcionamento. Essas opções são excelentes alternativas para otimização de processos, redução de custos e ganho de produtividade.

Acredita-se que os resultados adquiridos representem o primeiro passo para otimizar um circuito de ciclonagem. No entanto, foi possível perceber que das 144 simulações realizadas considerando o modelo matemático proposto e as constantes de classificação calibradas, apenas 6 estariam mais próximas dos resultados granulométricos esperados no overflow. Vale ressaltar que, quando analisados os demais parâmetros, pode-se perceber que as simulações 28 e 76 seriam as com maior probabilidade de operacionalização devido aos resultados obtidos.

6.1. Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, pode-se fazer uma repetição da calibração das constantes de classificação com outros modelos de hidrociclones, variando o diâmetro do equipamento e avaliando a eficiência para o tipo e granulometria do minério analisado com foco no objetivo granulométrico dos produtos. Outra sugestão é aumentar o número de simulações com novas condições operacionais com foco mais estratégico na correta operacionalização do circuito de classificação.

REFERÊNCIAS

ALVES, V.K. Otimização de carga moedora utilizando ferramentas de modelamento matemático e simulação de moagem. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.

BUENO, Emanuel Amorim. Simulação de hidrociclones. Trabalho de Conclusão de curso – Universidade Federal de Ouro Preto. 2021.

CARRISSO, R. C. C; CORREIRA, J. C. G. Classificação e peneiramento. Rio de Janeiro - RJ. Centro de Tecnologia Mineral. 2004.

CHAVES, A. P. Teoria e Prática de Tratamento de Minérios. Volume 1. 4ª ed. rev. e aprimorada. Oficina de Textos, São Paulo-SP, 2012.

CRUZ, O. C. Desempenho de um hidrociclone de geometria "Rietema" como pré-filtro para sistemas de irrigação. 2008. 66 f. Tese de Doutorado em Agronomia - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, UNESP, Jaboticabal, SP, 2008.

DELBONI JR, H. Modelagem e Simulação de Circuitos de Cominuição e Classificação. Apostila do curso. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012.

GOMES, Wellington Lacerda Integração de modelos energéticos e de balanço populacional para simulação de moagem em moinhos de bolas / W.L. Gomes São Paulo, 2014. 197 p.

KYRIAKIDIS, Yanne Novais. 19892014 Análise do efeito de variáveis geométricas sobre o desempenho de hidrociclones otimizados / Yanne Novais Kyriakidis. - 2014.

KING, R.P, 2001, Modelling and Simulation of Mineral Processing Systems, ButterworthHeinemann, Oxford.

LYNCH, A.J., (1977)“Mineral Crushing and Grinding Circuits”, Elsevier, New York.

LUZ, Adão Benvindo (Ed.); SAMPAIO, João Alves (Ed.); ALMEIDA, Salvador Luiz Matos (Ed.). Tratamento de Minérios 2010. 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 932p.

MULAR, A. L. e Jull, N. A. Cyclone classifiers, pumps and pump boxes for grinding circuits. In Mular, A. L. e Bhappu, R. B. (Ed.) Mineral processing plant design. 2nd Edition. Society of Mining Engineers. New York, 1980.

PLITT, L. R. A mathematical model of the hydrocyclone classifier. CIM Bulletin, 1976. v. 69, n. 776, p. 114 -123.

RENNER, V. G. e COHEN, H. E., Measurement and interpretation of size distribution of particles in a hydrocyclone, Trans. Inst. Min. Metal., c139-c145, 1978.

SILVA, C. A., SILVA, E. M. S., MATOS, J. D. V., 2012, "Modelo empírico para cálculo do diâmetro de corte corrigido de hidrociclone", TECNOL. METAL. MATER. MINAS, Sao Paulo, V9, n4, p302-308.

SALVADOR, F. F.; SILVA, N. K. G.; BARROZO, M. A. S.; VIEIRA, L. G. M. Estudo Experimental do tipo de separação de partículas em um hidrociclone concentrador. Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química, Uberlândia, 2014.

SAMPAIO, J. A.(Ed.) ; FRANÇA, S. C. A.(Ed.); BRAGA, P. F. A. (Ed). Tratamento de minérios: práticas laboratoriais. Rio de Janeiro: CETEM, 2007. 570p.

SILVA, N. K. G. Estudo de otimização da configuração de um hidrociclone filtrante. 2014.

SILVA, M. A. P., 1989, "Hidrociclones de Bradley: dimensionamento e análise de desempenho", dissertação de mestrado – Eng Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

SILVA, José Pedro da. Caracterização dos hidrociclones utilizados nas etapas de classificação dos concentradores I e II da Samarco Mineração. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

SVAROVSKY, L. Hydrocyclones. 198 p. Eastbourne, UK: Holt, Rinehart & Winston, 1984.

SVAROVSKY, L., 1990, Hydrocyclones. In: SVAROVSKY, L., ed., Solid-Liquid Separation, Butterworths & Co. Ltd., 3 th edition.

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

VALADÃO, George Eduardo Sales; ARAUJO, Armando Corrêa. Introdução ao tratamento de minérios. Editora UFMG, 2007 – Belo Horizonte, MG.

VIEIRA, L. G. M. Otimização dos Processos de Separação em Hidrociclones Filtrantes. 2006. 297 f. Tese de Doutorado em Engenharia Química - UFU, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2006.

WILLS, B. A. Mineral Processing Technology, Burlington USA: Tim Napier-Munn, pg. 444. 2006.

APÊNDICE

CENÁRIO 1							
Simulação	Feed		Underflow		Overflow		
	# ciclones	Pressão (Kgf/cm ³)	% Solids (by weight)	D80 U'flow (µm)	% Solids (by weight)	D80 O'flow (µm)	% Solids (by weight)
Simulação 1	10	4,51	30	262	49	73	13
Simulação 2	10	3,57	40	283	55	100	26
Simulação 3	10	3,19	50	289	59	126	41
Simulação 4	10	3,41	60	268	63	146	56
Simulação 5	20	1,64	30	254	40	90	16
Simulação 6	20	1,30	40	263	47	113	29
Simulação 7	20	1,16	50	258	53	135	44
Simulação 8	20	1,24	60	240	60	153	60
Simulação 9	30	0,91	30	248	36	99	18
Simulação 10	30	0,72	40	251	44	120	31
Simulação 11	30	0,64	50	244	51	139	47
Simulação 12	30	0,69	60	230	59	156	63
Simulação 13	40	0,60	30	243	34	104	20
Simulação 14	40	0,47	40	244	43	124	34
Simulação 15	40	0,42	50	237	50	141	50
Simulação 16	40	0,45	60	225	58	158	66
Simulação 17	50	0,43	30	239	33	107	21
Simulação 18	50	0,34	40	239	42	127	35
Simulação 19	50	0,30	50	232	49	143	52
Simulação 20	50	0,33	60	222	58	160	69
Simulação 21	60	0,33	30	236	32	110	22
Simulação 22	60	0,26	40	236	41	129	37
Simulação 23	60	0,23	50	229	49	145	54
Simulação 24	60	0,25	60	219	58	161	72

CENÁRIO 2

Simulação	Feed		Underflow		Overflow		
	# ciclones	Pressão (Kgf/cm ³)	% Solids (by weight)	D80 U'flow (µm)	% Solids (by weight)	D80 O'flow (µm)	% Solids (by weight)
Simulação 25	10	3,43	30	258	45	83	14
Simulação 26	10	2,71	40	272	51	108	27
Simulação 27	10	2,42	50	271	56	131	42
Simulação 28	10	2,59	60	252	62	149	57
Simulação 29	20	1,24	30	248	37	99	18
Simulação 30	20	0,98	40	252	45	120	31
Simulação 31	20	0,88	50	246	52	139	46
Simulação 32	20	0,94	60	232	59	156	62
Simulação 33	30	0,69	30	241	34	106	20
Simulação 34	30	0,54	40	242	43	126	33
Simulação 35	30	0,49	50	235	50	142	49
Simulação 36	30	0,52	60	224	58	159	66
Simulação 37	40	0,45	30	237	33	111	22
Simulação 38	40	0,36	40	236	41	129	36
Simulação 39	40	0,32	50	230	49	145	52
Simulação 40	40	0,34	60	220	58	161	70
Simulação 41	50	0,33	30	233	32	114	23
Simulação 42	50	0,26	40	232	41	131	38
Simulação 43	50	0,23	50	226	49	146	55
Simulação 44	50	0,25	60	218	57	162	73
Simulação 45	60	0,25	30	231	31	117	25
Simulação 46	60	0,20	40	230	40	133	40
Simulação 47	60	0,18	50	224	48	147	58
Simulação 48	60	0,19	60	216	57	163	76

CENÁRIO 3

Simulação	Feed		Underflow		Overflow		
	# ciclones	Pressão (Kgf/cm ³)	% Solids (by weight)	D80 U'flow (µm)	% Solids (by weight)	D80 O'flow (µm)	% Solids (by weight)
Simulação 49	10	2,68	30	254	41	92	16
Simulação 50	10	2,12	40	263	48	115	28
Simulação 51	10	1,90	50	259	54	135	43
Simulação 52	10	2,03	60	242	61	152	59
Simulação 53	20	0,97	30	243	35	106	19
Simulação 54	20	0,77	40	244	43	125	32
Simulação 55	20	0,69	50	237	51	142	48
Simulação 56	20	0,74	60	226	59	158	64
Simulação 57	30	0,54	30	236	33	113	21
Simulação 58	30	0,43	40	236	41	130	35
Simulação 59	30	0,38	50	229	50	145	52
Simulação 60	30	0,41	60	220	58	161	69
Simulação 61	40	0,35	30	232	32	117	23
Simulação 62	40	0,28	40	231	40	133	38
Simulação 63	40	0,25	50	225	49	147	55
Simulação 64	40	0,27	60	217	57	162	73
Simulação 65	50	0,26	30	229	31	119	25
Simulação 66	50	0,20	40	228	40	135	41
Simulação 67	50	0,18	50	222	48	148	58
Simulação 68	50	0,19	60	215	57	164	77
Simulação 69	60	0,20	30	227	31	121	27
Simulação 70	60	0,15	40	226	39	136	43
Simulação 71	60	0,14	50	220	48	149	61
Simulação 72	60	0,15	60	214	57	164	81

CENÁRIO 4

Simulação	Feed			Underflow		Overflow	
	# ciclones	Pressão (Kgf/cm ³)	% Solids (by weight)	D80 U'flow (µm)	% Solids (by weight)	D80 O'flow (µm)	% Solids (by weight)
Simulação 73	10	3,95	30	264	47	79	14
Simulação 74	10	3,12	40	282	53	105	27
Simulação 75	10	2,79	50	284	57	129	42
Simulação 76	10	2,98	60	262	62	149	57
Simulação 77	20	1,43	30	254	39	96	17
Simulação 78	20	1,13	40	260	46	118	30
Simulação 79	20	1,01	50	254	52	138	45
Simulação 80	20	1,08	60	237	60	155	61
Simulação 81	30	0,79	30	247	35	104	19
Simulação 82	30	0,63	40	249	43	124	33
Simulação 83	30	0,56	50	241	51	142	48
Simulação 84	30	0,60	60	228	59	159	65
Simulação 85	40	0,52	30	242	34	109	21
Simulação 86	40	0,41	40	242	42	128	35
Simulação 87	40	0,37	50	234	50	144	51
Simulação 88	40	0,39	60	223	58	161	68
Simulação 89	50	0,38	30	238	33	112	22
Simulação 90	50	0,30	40	237	41	130	37
Simulação 91	50	0,27	50	230	49	146	53
Simulação 92	50	0,28	60	220	58	162	71
Simulação 93	60	0,29	30	235	32	115	24
Simulação 94	60	0,23	40	234	40	132	38
Simulação 95	60	0,20	50	227	49	147	55
Simulação 96	60	0,22	60	218	57	163	73

CENÁRIO 5

Simulação	Feed		Underflow		Overflow		
	# ciclones	Pressão (Kgf/cm ³)	% Solids (by weight)	D80 U'flow (µm)	% Solids (by weight)	D80 O'flow (µm)	% Solids (by weight)
Simulação 97	10	3,00	30	259	43	90	15
Simulação 98	10	2,37	40	270	50	113	28
Simulação 99	10	2,12	50	266	55	134	43
Simulação 100	10	2,26	60	248	61	152	58
Simulação 101	20	1,09	30	247	36	104	19
Simulação 102	20	0,86	40	249	44	124	32
Simulação 103	20	0,77	50	242	51	142	47
Simulação 104	20	0,82	60	229	59	158	63
Simulação 105	30	0,60	30	240	34	111	21
Simulação 106	30	0,48	40	240	42	129	35
Simulação 107	30	0,43	50	233	50	145	51
Simulação 108	30	0,46	60	222	58	161	68
Simulação 109	40	0,40	30	236	32	116	23
Simulação 110	40	0,31	40	234	41	132	37
Simulação 111	40	0,28	50	228	49	147	54
Simulação 112	40	0,30	60	219	58	163	71
Simulação 113	50	0,29	30	232	32	118	24
Simulação 114	50	0,23	40	230	40	134	40
Simulação 115	50	0,20	50	224	49	148	57
Simulação 116	50	0,22	60	216	57	164	75
Simulação 117	60	0,22	30	230	31	120	26
Simulação 118	60	0,17	40	228	40	136	42
Simulação 119	60	0,15	50	222	48	149	59
Simulação 120	60	0,17	60	215	57	165	78

CENÁRIO 6

Simulação	Feed		Underflow		Overflow		
	# ciclones	Pressão (Kgf/cm ³)	% Solids (by weight)	D80 U'flow (µm)	% Solids (by weight)	D80 O'flow (µm)	% Solids (by weight)
Simulação 121	10	2,35	30	254	40	98	17
Simulação 122	10	1,85	40	260	47	119	29
Simulação 123	10	1,66	50	254	53	138	44
Simulação 124	10	1,77	60	238	60	155	60
Simulação 125	20	0,85	30	242	34	111	20
Simulação 126	20	0,67	40	242	43	129	33
Simulação 127	20	0,60	50	235	50	145	49
Simulação 128	20	0,64	60	224	58	161	66
Simulação 129	30	0,47	30	235	32	117	22
Simulação 130	30	0,37	40	234	41	133	37
Simulação 131	30	0,33	50	227	49	148	53
Simulação 132	30	0,36	60	218	58	163	71
Simulação 133	40	0,31	30	231	31	121	25
Simulação 134	40	0,24	40	229	40	136	40
Simulação 135	40	0,22	50	223	49	149	57
Simulação 136	40	0,23	60	216	57	164	75
Simulação 137	50	0,22	30	228	31	123	27
Simulação 138	50	0,18	40	226	40	137	42
Simulação 139	50	0,16	50	221	48	151	60
Simulação 140	50	0,17	60	214	57	165	79
Simulação 141	60	0,17	30	226	30	125	28
Simulação 142	60	0,14	40	224	39	139	45
Simulação 143	60	0,12	50	219	48	152	63
Simulação 144	60	0,13	60	213	57	166	83